



ISSN 1005-0094
CODEN SHDUEM

BIODIVERSITY SCIENCE

生物多样性

第28卷 第12期
2020年12月

Vol. 28 No. 12
December 2020

黄河流域生物多样性保护



主 办

中国科学院生物多样性委员会

中国植物学会

中国科学院植物研究所

中国科学院动物研究所

中国科学院微生物研究所

Biodiversity Committee, CAS

Botanical Society of China

Institute of Botany, CAS

Institute of Zoology, CAS

Institute of Microbiology, CAS

<http://www.biodiversity-science.net>

生物多样性

SHENGWU DUOYANGXING

第28卷 第12期 2020年12月

目次

黄河流域生物多样性保护专题

编者按

1445 黄河流域生物多样性保护应考虑复杂的空间
异质性

傅声雷

1447 基于“三类分区框架”的黄河流域生物多样性
保护策略

曹越 侯姝彧 曾子轩 王小珊 王方邑
赵智聪 杨锐

1459 黄河流域鸟类多样性现状、分布格局及保护
空缺

段菲 李晟

1469 黄河流域湿地水鸟多样性保护对策

孙工棋 张明祥 雷光春

1483 基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对3
种水鸟栖息地的保护现状

王昱熙 谢彦波 Nyambayar Batbayar
朱宝光 董树斌 Anna Barma Anton Sasin
曹垒

1496 黄河流域淡水鱼类多样性和保护

赵亚辉 邢迎春 吕彬彬 周传江 杨文波
赵凯

1511 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物
物种组成及长周期变化

李宝泉 姜少玉 吕卷章 陈琳琳 闫朗
刘春云 李晓静 宋博 李新正

1523 黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物丰富度格
局及其影响因子

孙远 胡维刚 姚树冉 孙颖 邓建明

1533 生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策

殷万东 吴明可 田宝良 于宏伟 王麒云
丁建清

研究报告

1546 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状beta
多样性形成的重要驱动力

周昌艳 王彬 邓云 乌俊杰 曹敏
林露湘

1558 扬州宝应湖底栖大型无脊椎动物的生物多样
性及其变化

胡芮 王儒晓 杜诗雨 李萌 邢雨辉
潘达 徐海根 孙红英

1570 西藏横断山区溪流细菌beta多样性组分对气
候和水体环境的响应

李明家 吴凯媛 孟凡凡 沈吉 刘勇勤
肖能文 王建军

封面: 黄河三角洲湿地位于东营市的黄河入海口, 是世界上暖温带最年轻的湿地生态系统。该湿地不但具有丰富的生物资源, 而且是东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线的“中转站”, 在生物多样性保护与生态功能恢复方面发挥着重要作用。2016-2017年的调查结果表明, 黄河三角洲潮间带和近岸浅海大型底栖动物物种组成发生了明显变化(详见本期1511-1522页李宝泉等的文章)。封面图片展示了8只天鹅在黄河三角洲湿地芦苇丛中越冬觅食。(摄影者: 杨斌)

BIODIVERSITY SCIENCE

Vol. 28 No. 12 December 2020

CONTENTS

Special Feature: Biodiversity Conservation along the Yellow River

Editorial

- 1445 **Biodiversity conservation along the Yellow River should emphasize the complex spatial heterogeneity**

Shenglei Fu

- 1447 **Biodiversity conservation strategies for the Yellow River basin based on the Three Conditions Framework**

Yue Cao, Shuyu Hou, Zixuan Zeng, Xiaoshan Wang, Fangyi Wang, Zhicong Zhao and Rui Yang

- 1459 **The status, distribution patterns, and conservation gap for bird diversity in the Yellow River basin, China**

Fei Duan and Sheng Li

- 1469 **Wetland water bird biodiversity conservation strategies in the Yellow River basin**

Gongqi Sun, Mingxiang Zhang and Guangchun Lei

- 1483 **Discussion of existing protection for three waterbirds' habitats in the Yellow River basin nature reserves, based on satellite tracking**

Yuxi Wang, Yanbo Xie, Nyambayar Batbayar, Baoguang Zhu, Shubin Dong, Anna Barma, Anton Sasin and Lei Cao

- 1496 **Species diversity and conservation of freshwater fishes in the Yellow River basin**

Yahui Zhao, Yingchun Xing, Binbin Lü, Chuanjiang Zhou, Wenbo Yang and Kai Zhao

- 1511 **Species composition and long-term variation of macrobenthos in intertidal zone and offshore areas of the Yellow River Delta**

Baoquan Li, Shaoyu Jiang, Juanzhang Lü, Linlin Chen, Lang Yan, Chunyun Liu, Xiaojing Li, Bo Song and Xinzheng Li

- 1523 **Geographic patterns and environmental determinants of angiosperm and terrestrial vertebrate species richness in the Yellow River basin**

Yuan Sun, Weigang Hu, Shuran Yao, Ying Sun and Jianming Deng

- 1533 **Effects of bio-invasion on the Yellow River basin ecosystem and its countermeasures**

Wandong Yin, Mingke Wu, Baoliang Tian, Hongwei Yu, Qiyun Wang and Jianqing Ding

Original Papers

- 1546 **Canopy structure is an important factor driving local-scale woody plant functional beta diversity**

Changyan Zhou, Bin Wang, Yun Deng, Junjie Wu, Min Cao and Luxiang Lin

- 1558 **Biodiversity and spatiotemporal variations of benthic macroinvertebrates in the Baoying Lake, Yangzhou, Jiangsu**

Rui Hu, Ruxiao Wang, Shiyu Du, Meng Li, Yuhui Xing, Da Pan, Haigen Xu and Hongying Sun

- 1570 **Beta diversity of stream bacteria in Hengduan Mountains: The effects of climatic and environmental variables**

Mingjia Li, Kaiyuan Wu, Fanfan Meng, Ji Shen, Yongqin Liu, Nengwen Xiao and Jianjun Wang

Cover Illustration: The Yellow River Delta (YRD) wetland located in the Yellow River Estuary in Dongying City, is the youngest wetland ecosystem in the warm temperate zone of the world. The YRD wetland not only has rich biological resource but also is an important stopover site for migrant birds along the East Asian-Australasian Flyway (EAAF) in China, playing a major role in protecting the biodiversity and restoring the ecological functions. Significant change was found in species composition of macrobenthos in the intertidal zone and offshore areas of the YRD (see pages 1511–1522 of this issue). This picture displays eight swans overwintering and feeding among reeds in YRD wetland. (Photographed by Bin Yang)



•编者按•

黄河流域生物多样性保护应考虑 复杂的空间异质性

傅声雷*

(河南大学环境与规划学院, 河南开封 475004)

Biodiversity conservation along the Yellow River should emphasize the complex spatial heterogeneity

Shenglei Fu*

College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng, Henan 475004

2019年9月, 习近平总书记在河南郑州主持召开了黄河流域生态保护和高质量发展座谈会, 明确指出黄河流域生态保护和高质量发展, 同京津冀协同发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设、长三角一体化发展一样, 是重大国家战略。黄河流域生态保护和高质量发展是事关中华民族伟大复兴的千秋大计。

黄河全长约5,464 km, 流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省(自治区), 流域面积75万km²。黄河流域在我国生物多样性保护和生态功能维持方面具有重要意义, 《中国生物多样性保护优先区域范围》(2015年)划定的35个生物多样性保护优先区域中, 涉及黄河流域的有6个; 《全国生态功能区划(修编版)》(2015年)在全国划定了63个重要生态功能区, 涉及黄河流域的有10个, 山水林田湖草生态保护修复工程共25个试点中, 涉及黄河流域的有7个。

黄河流域人类活动频繁, 过度放牧、采砂、排污、围垦等严重影响着黄河流域的生态系统健康, 而且黄河流域生态系统类型多样并对全球变化敏感, 导致生态系统结构和功能退化以及生物多样性降低。例如: 自20世纪以来, 黄河三角洲进行了大规模的围海造田以及海水养殖, 造成河流和沼泽湿地面积减少, 而水库、水田、虾池、滩涂湿地面积明显增加(张高生等, 2009)。围海造田和海水养殖同

时也导致黄河口和邻近海域湿地面积减少和富营养化问题, 赤潮已造成了大量的经济损失, 以致浮游动物、浮游植物、鱼类和底栖动物多样性也明显下降。另外, 因湿地广泛遭受破坏, 导致湿地生态系统的重要指示物种——湿地水鸟成为全球受威胁比例最高的生物类群之一。

《生物多样性》自创刊以来, 一直聚焦于生物多样性形成和维持机制的研究以及生物多样性及其栖息地的保护。2019年12月16日, 《生物多样性》编辑部和河南大学联合举办了“黄河流域生物多样性保护论坛”, 邀请了全国生物多样性研究领域知名专家共同研讨, 部分专家会后撰写相关论文, 形成了“黄河流域生物多样性保护专题”。曹越等(2020)将“为实现生物多样性保护和可持续利用的全球三类分区”实施框架应用于黄河流域。他们将国土空间分为城市与农田、共享景观和大量荒野三类分区。基于该框架, 描述了黄河流域三类分区的空间格局, 进而识别了黄河流域三类分区中五类生物多样性的直接威胁因素, 最后以系统性的思路提出黄河流域的生物多样性保护策略。段菲和李晟(2020)以IUCN与国际鸟盟发布的鸟类分布图层为基础, 同时收集了黄河流域2009–2019年的鸟类实地观测记录, 发现黄河流域鸟类整体物种多样性由南向北递减, 以黄河上中游四川、甘肃、陕西的高原与山地内鸟种最为丰富, 而受威胁鸟类物种多样性热点

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: fsl@vip.henu.edu.cn

区则在黄河中下游,以下游黄河三角洲及邻近平原区为受威胁鸟类最主要集中分布区。区域内国家级自然保护区大多分布在黄河上游,对黄河下游的受威胁物种覆盖程度较低,保护空缺较严重。建议着重加强中下游自然保护区建设与能力提升,增加对中下游受威胁鸟种的保护力度。孙工棋等(2020)的研究表明,全球气候变化、水资源过度利用、水环境污染、栖息地丧失等是导致黄河流域水鸟多样性下降的主要原因,并提出了建立以国家公园为主体的湿地保护地体系,开展濒危候鸟栖息地修复和强化黄河流域综合管理的体制机制建设等建议。王昱熙等(2020)对3种长距离迁徙水鸟进行了卫星追踪,分析了它们在黄河流域活动的时间和利用的土地类型,并使用核密度法拟合了其家域,评估了黄河流域自然保护区对它们栖息地的保护效力。发现3种鸟类对于裸地、草地和农田的利用偏向于被动选择,而对于湿地和水体的利用表现为主动选择,这为长距离迁徙水鸟及其栖息地保护策略制定提供了科学依据;黄河流域自然保护区网络对这些水鸟栖息地的保护尚存空缺,有必要进一步优化与扩展。赵亚辉等(2020)介绍了黄河流域鱼类研究的历史、淡水鱼类的物种组成、整体分布格局、特有性、濒危性,以及鱼类多样性在黄河上、中、下游等特点,发现梯级水电开发、水资源过度利用、外来物种入侵、水域污染和过度捕捞都是导致目前黄河鱼类多样性大幅降低的重要因素,但对各河段和支流的影响不一,空间异质性大,应做出有针对性的保护部署。李宝泉等(2020)发现黄河三角洲湿地大型底栖动物个体呈小型化趋势,潮间带大型底栖动物优势种发生了明显变化。总体表现为:自20世纪90年代末至今,个体大的甲壳类和软体动物经

济类群逐渐被个体小的多毛类、双壳类和甲壳类取代;主要驱动力包括黄河来水量与输沙量的减少、过度捕捞、赤潮频发和互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵严重等。孙远等(2020)发现环境异质性和气候共同决定了黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物物种丰富度格局,而人类使用土地面积并不是影响黄河流域动植物物种丰富度格局的主要因素。建议在未来的研究中应针对不同区域筛选出更精准的环境驱动因子或选用更多不同类别的环境异质性因子进行分析以更深入理解物种多样性格局的成因。殷万东等(2020)从黄河流经九省区外来入侵生物的传入特征、传播途径、种群动态、成灾机制以及入侵生物对黄河流域重要生物资源和生态系统的影响等方面进行综述,并提出了防控黄河流域生物入侵、保护黄河流域健康的生态系统的措施和对策。两栖类和爬行类动物在黄河流域也有广泛分布,一些学者在不同期刊对此进行了专门报道,但还需要在生物地理学和生态功能方面开展更深入的研究。

黄河流域上游多为高寒草地、草甸和湿地,中游多为荒漠草原、稀树草原和温带典型草原,下游主要为河漫滩湿地、河口三角洲和农田,生态系统类型多种多样,空间异质性复杂,因此黄河流域生物多样性保护策略的制定必须充分考虑流域不同地段的生态系统类型和空间异质性。

文中引用的文献参见附录(<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021003-1.pdf>)

(责任编辑: 闫文杰)

傅声雷 (2020) 黄河流域生物多样性保护应考虑复杂的空间异质性. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1445–1446. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021003>

参考文献

- Cao Y, Hou SY, Zeng ZX, Wang XS, Wang FY, Zhao ZC, Yang R (2020) Biodiversity conservation strategies for the Yellow River basin based on the Three Conditions Framework. *Biodiversity Science*, 28, 1447–1458. (in Chinese with English abstract) [曹越, 侯姝戎, 曾子轩, 王小珊, 王方邑, 赵智聪, 杨锐 (2020) 基于“三类分区框架”的黄河流域生物多样性保护策略. 生物多样性, 28, 1447–1458.]
- Duan F, Li S (2020) The status, distribution patterns, and conservation gap for bird diversity in the Yellow River basin, China. *Biodiversity Science*, 28, 1459–1468. (in Chinese with English abstract) [段菲, 李晟 (2020) 黄河流域鸟类多样性现状、分布格局及保护空缺. 生物多样性, 28, 1459–1468.]
- Li BQ, Jiang SY, Lü JZ, Chen LL, Yan L, Liu CY, Li XJ, Song B, Li XZ (2020) Species composition and long-term variation of macrobenthos in intertidal zone and offshore areas of the Yellow River Delta. *Biodiversity Science*, 28, 1511–1522. (in Chinese with English abstract) [李宝泉, 姜少玉, 吕卷章, 陈琳琳, 闫朗, 刘春云, 李晓静, 宋博, 李新正 (2020) 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成及长周期变化. 生物多样性, 28, 1511–1522.]
- Sun GQ, Zhang MX, Lei GC (2020) Wetland water bird biodiversity conservation strategies in the Yellow River basin. *Biodiversity Science*, 28, 1469–1482. (in Chinese with English abstract) [孙工棋, 张明祥, 雷光春 (2020) 黄河流域湿地水鸟多样性保护对策. 生物多样性, 28, 1469–1482.]
- Sun Y, Hu WG, Yao SR, Sun Y, Deng JM (2020) Geographic patterns and environmental determinants of angiosperm and terrestrial vertebrate species richness in the Yellow River basin. *Biodiversity Science*, 28, 1523–1532. (in Chinese with English abstract) [孙远, 胡维刚, 姚树冉, 孙颖, 邓建明 (2020) 黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物丰富度格局及其影响因子. 生物多样性, 28, 1523–1532.]
- Wang YX, Xie YB, Batbayar N, Zhu BG, Dong SB, Barma A, Sasin A, Cao L (2020) Discussion of existing protection for three waterbirds' habitats in the Yellow River basin nature reserves, based on satellite tracking. *Biodiversity Science*, 28, 1483–1495. (in Chinese with English abstract) [王昱熙, 谢彦波, Batbayar N, 朱宝光, 董树斌, Barma A, Sasin A, 曹垒 (2020) 基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对3种水鸟栖息地的保护现状. 生物多样性, 28, 1483–1495.]
- Yin WD, Wu MK, Tian BL, Yu HW, Wang QY, Ding JQ (2020) Effects of bio-invasion on the Yellow River basin ecosystem and its countermeasures. *Biodiversity Science*, 28, 1533–1545. (in Chinese with English abstract) [殷万东, 吴明可, 田宝良, 于宏伟, 王麒云, 丁建清 (2020) 生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策. 生物多样性, 28, 1533–1545.]
- Zhang GS, Li KQ, Zhan LW (2009) Dynamics of wetland and protection measures for the modern Yellow River Delta. *Ecology and Environmental Sciences*, 18, 394–398. (in Chinese with English abstract) [张高生, 李克勤, 战立伟 (2009) 现代黄河三角洲湿地动态变化及保护对策. 生态环境学报, 18, 394–398.]
- Zhao YH, Xing YC, Lü BB, Zhou CJ, Yang WB, Zhao K (2020) Species diversity and conservation of freshwater fishes in the Yellow River basin. *Biodiversity Science*, 28, 1496–1510. (in Chinese with English abstract) [赵亚辉, 邢迎春, 吕彬彬, 周传江, 杨文波, 赵凯 (2020) 黄河流域淡水鱼类多样性和保护. 生物多样性, 28, 1496–1510.]



•研究报告•

基于“三类分区框架”的黄河流域生物多样性保护策略

曹越 侯姝彧 曾子轩 王小珊 王方邑 赵智聪 杨锐*

(清华大学国家公园研究院/清华大学建筑学院, 北京 100084)

摘要: 黄河流域生态保护与高质量发展已上升为重大国家战略, 研究黄河流域的生物多样性保护策略具有重要意义。本文将“为实现生物多样性保护和可持续利用的全球三类分区”实施框架(简称“三类分区框架”)应用于黄河流域。该框架将国土空间分为城市与农田(C1景观)、共享景观(C2景观)和大面积荒野(C3景观)三类分区。基于该框架, 首先描述了黄河流域三类分区的空间格局; 进而基于文献研究, 识别了黄河流域三类分区中5类生物多样性的直接威胁因素, 包括栖息地丧失和退化、气候变化、污染、过度开发与不可持续的利用和外来物种入侵; 最后以系统性的思路从国土空间规划、自然保护地、生态城市、生态农业、生态工程和河流生态系统6个方面, 提出黄河流域的生物多样性保护策略。本文的分析框架也有潜力应用于其他区域的生物多样性保护策略研究。

关键词: 生物多样性; 自然保护地; 空间规划; 城市; 乡村; 荒野

Biodiversity conservation strategies for the Yellow River basin based on the Three Conditions Framework

Yue Cao, Shuyu Hou, Zixuan Zeng, Xiaoshan Wang, Fangyi Wang, Zhicong Zhao, Rui Yang*

Institute for National Parks, Tsinghua University/ School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract: Ecological conservation and high-quality development in the Yellow River basin have become national focuses for China. Therefore, it is important to study the biodiversity conservation strategies for the Yellow River basin. This paper utilizes the implementation framework of “Three Global Conditions for Biodiversity Conservation and Sustainable Use”, which divides all landscapes into three categories: cities and farms (C1 landscapes), shared lands (C2 landscapes), and large wild areas (C3 landscapes). This framework considers biodiversity conservation for all landscapes and is conducive for the implementation of conservation strategies. Here, we apply the three conditions framework to China on a regional scale. We first analyze the spatial pattern of the three conditions in the Yellow River basin. We then identify the direct threats to biodiversity in this region based on a literature review. Finally, we put forward some possible systematic biodiversity conservation strategies for this region.

The spatial pattern of the three conditions in the Yellow River basin. The Yellow River basin mainly consists of C1 and C2 landscapes, comprising 45.5% and 52.9% of the basin area, respectively. C1 landscapes are highly modified by human activity and are widely distributed in the Loess Plateau and the North China Plain. C2 landscapes are mainly distributed in the Ordos Plateau and the upper reach of the Yellow River. C3 landscapes are mainly distributed at the source region of the Yellow River on the Qinghai-Tibet Plateau and in the northwest region of the Ordos Plateau, taking up merely 1.6% of the basin area.

Direct threats to biodiversity in the Yellow River basin. Direct threats to biodiversity include: (1) Habitat loss and degradation. Urban expansion and industrial/mining development in C1 and C2 landscapes have directly resulted in habitat loss and degradation. The expansion of agricultural areas has led to reduction of natural habitats and wetlands. Additionally, road construction has resulted in habitat fragmentation and dam

收稿日期: 2020-04-15; 接受日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(51978365)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yru@mails.tsinghua.edu.cn

construction is threatening the river ecosystem. (2) Climate change. Climate warming and drying has negatively impacted C3 landscapes. In some C2 landscapes, vegetation has degraded. In C1 landscapes, climate change may further increase the demand for agricultural production, putting more pressures on nature. (3) Pollution. Cities and farms in C1 and C2 landscapes produce a large amount of waste, resulting in water, soil, air and noise pollution. (4) Over exploitation. The large demand for water due to over exploitation of agriculture and animal husbandry, excessive tourism development, and unnecessary construction projects all have negatively affected biodiversity. (5) Invasive species. The Yellow River is at risk of invasive species invasions due to aquaculture, aquatic trade and release activities.

Biodiversity conservation strategies in the Yellow River basin. Various ecological protection projects in the Yellow River basin have already seen success. In an effort to focus on biodiversity conservation, we propose the following six additional strategies: (1) Realizing “conservation covering all landscapes” through spatial planning. (2) Improvement of the protected areas system. (3) Systematically improving production and ecological efficiency in agriculture. (4) Building ecological cities. (5) Improving biodiversity conservation in ecological engineering projects. (6) Strengthening the overall protection of the river ecosystem in this region.

Key words: biodiversity; protected area; spatial planning; urban area; rural area; wild area

2019年9月, 习近平总书记在河南郑州主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会, 明确指出黄河流域在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位, “保护黄河是事关中华民族伟大复兴和永续发展的千秋大计。黄河流域生态保护和高质量发展, 同京津冀协同发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设、长三角一体化发展一样, 是重大国家战略”。新时代的黄河流域高质量发展需要协调人类活动与生态环境的关系, 最终实现生态保护与高质量发展的协同(陆大道和孙东琪, 2019; 樊杰等, 2020)。

黄河流域位于 $96^{\circ}53'-119^{\circ}05' E$, $32^{\circ}10'-41^{\circ}50' N$ 之间, 横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和淮海平原, 流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省(自治区), 流域面积 75 万 km^2 。黄河流域在我国国土生态安全格局中具有重要地位, 特别是在生物多样性保护和生态功能维持方面, 黄河流域中的多个地区具有国家重要性: (1)《中国生物多样性保护优先区域范围》(2015 年)划定的 35 个生物多样性保护优先区域中, 涉及黄河流域的有 6 处, 包括羌塘-三江源、祁连山、西鄂尔多斯-贺兰山-阴山、六盘山-子午岭、秦岭以及太行山生物多样性保护优先区域; (2)《全国生态功能区划(修编版)》(2015 年)在全国划定了 63 个重要生态功能区, 其中涉及黄河流域的有 10 处, 包括三江源水源涵养与生物多样性保护重要区、甘南山地水源涵养重要区、川西北水源涵养与生物多样性保

护重要区、祁连山水源涵养重要区、西鄂尔多斯-贺兰山-阴山生物多样性保护与防风固沙重要区、鄂尔多斯高原防风固沙重要区、黄土高原土壤保持重要区、秦岭-大巴山生物多样性保护与水源涵养重要区、太行山区水源涵养与土壤保持重要区以及鲁中山区土壤保持重要区; (3)山水林田湖草生态保护修复工程共 25 个试点中, 涉及黄河流域的有 7 处, 包括甘肃祁连山、青海祁连山、宁夏石嘴山、内蒙古乌梁素海、陕西黄土高原、河南南太行以及山东泰山。

综上, 黄河流域中有多处区域在生态保护方面具有国家重要性。由于生物多样性保护是维持生态功能和促进高质量发展的根基, 因此开展黄河流域生物多样性保护策略研究具有重要意义。本文基于 2019 年 Harvey Locke 等提出的“为实现生物多样性保护和可持续利用的全球三类分区”实施框架(Three global conditions for biodiversity conservation and sustainable use: An implementation framework, 简称“三类分区框架”) (Locke et al, 2019), 分析了黄河流域三类分区的空间格局, 以及其中生物多样性面临的威胁, 并据此提出黄河流域生物多样性保护策略。

本研究首次探索三类分区框架在我国区域尺度中的应用, 有助于为我国生物多样性保护、国土空间规划、自然保护地体系建设等生态实践提供新的视角和分析框架。本研究选择三类分区框架对黄河流域进行分析的原因包括: (1)三类分区框架突破

了仅在自然保护地内保护生物多样性的局限性,这一框架覆盖全部国土空间,强调在所有国土空间中的生物多样性保护同等重要,但存在各自的特征和差异。(2)三类分区框架与我国国土空间规划的框架有相似性,该框架将国土景观分为城市与农田(cities and farms, 分区1/C1景观)、共享景观(shared lands, 分区2/C2景观)和大面积荒野(large wild areas, 分区3/C3景观),而我国国土空间规划强调生产空间、生活空间、生态空间的科学布局,因此基于三类分区框架的研究有助于从生物多样性保护的角度的国土空间规划提供支持。(3)三类分区框架是一种面向2020年后全球生物多样性保护的研究和规划框架。探索这一框架在我国的应用,有利于重新审视区域尺度上的生物多样性保护策略,也有助于发展这一框架。

1 基于人类影响程度的三类分区框架

2019年,世界自然保护联盟全球自然保护地委员会“后爱知目标”工作组组长Harvey Locke等提出了三类分区框架(Locke et al, 2019)。该分区基于土地集约利用区面积占比(包括建设用地、农用地、牧草地)以及人类影响程度(人类足迹数据)进行三类分区的划定。在全球尺度上,城市与农田、共享景观、大面积荒野分别占陆地面积的17.7%、55.7%和26.5%。这一划定总体上是基于人类足迹或荒野度的概念,三类分区分别为人类影响程度最高、中等和最低的区域(Locke et al, 2019)。该框架指出三类分区对于生物多样性保护均很重要,但保护策略存在差异:对于城市和农田,关键保护策略包括保护濒危物种、保护所有仅存的原始生态系统斑块、保护高质量农田、发展可再生农业、避免向淡水中排放氮、保护传粉者、加强生态修复、建设绿色城市等;对于共享景观,关键保护策略包括建立具有生态代表性和景观连通性的自然保护地、加强对关键生物多样性区域的保护、修复和保护生态过程与本地种群、确保自然资源的可持续利用等;对于大面积荒野,关键保护策略包括维持生态完整性及生态过程、限制工业发展、建立大面积的自然保护地及社区保护地等。

三类分区框架可视作一种生物多样性就地保护策略。现有的生物多样性就地保护策略主要包括:(1)针对已有的保护地,从保护地空间布局、保护地

连通性、保护地管理有效性等方面提出提升策略。(2)呼吁在对生物多样性保护重要的区域扩展或新建保护地。例如“半球方案”(Half-Earth)(Wilson, 2016)、生物多样性关键区域(key biodiversity areas)(Eken et al, 2004)、完整森林景观(intact forest landscapes)(Potapov et al, 2008)等。(3)基于国土空间区划特点提出针对不同分区的不同保护策略,如自然保护综合地理区划(郭子良, 2016)等。第三类策略与前两类相比,强调对国土空间的“全域保护”。三类分区框架可视作第三类策略的进一步发展,其核心特征是将生物多样性保护置于全部国土空间中进行考虑,而不仅仅是在自然保护地和荒野地之中考虑。同时该框架在分类上更加简洁,易于形成对国土空间的直观认识,并面向保护策略的实施。在国土空间全域整体的视角下,准确识别生物多样性的威胁因素并制定有针对性的保护策略,有助于实现生态保护与高质量发展的双重目标。

2 黄河流域三类分区空间格局

2.1 黄河流域三类分区空间识别

对Locke等(2019)发布的全球三类分区空间数据按照黄河流域边界进行提取,形成黄河流域三类分区地图。为弥补全球尺度数据分辨率和准确性的不足,同时使用我国2015年土地利用数据、荒野度数据与荒野地斑块数据(Cao et al, 2019)、生物多样性保护优先区域分布作为参照,如图1所示。

(1)三类分区空间格局(图1, 图2a)。黄河流域主要由C1和C2景观组成,分别占流域面积的45.5%与52.9%。受人类影响最大的C1景观广泛分布于黄土高原与华北平原。C2景观主要分布于鄂尔多斯高原与黄河上游,在黄土高原仅有零散分布。C3景观仅占流域面积的1.6%,主要分布于黄河源与鄂尔多斯高原的西北区域,是流域内人类干扰程度最低和荒野度最高的区域。

(2)土地集约利用区空间格局(图2b)。土地集约利用区包括建设用地与农用地,主要分布于华北平原和黄土高原。其中农用地占流域面积的26.4%,在黄河中下游与渭河两岸集中分布,在黄土高原零散分布;建设用地占流域面积的3.0%,集中分布于省会城市(西宁、兰州、银川、西安、呼和浩特、太原、郑州、济南)以及包头、三门峡、洛阳等黄河沿线主要城市。集中分布的建设用地与农用地主要位于C1

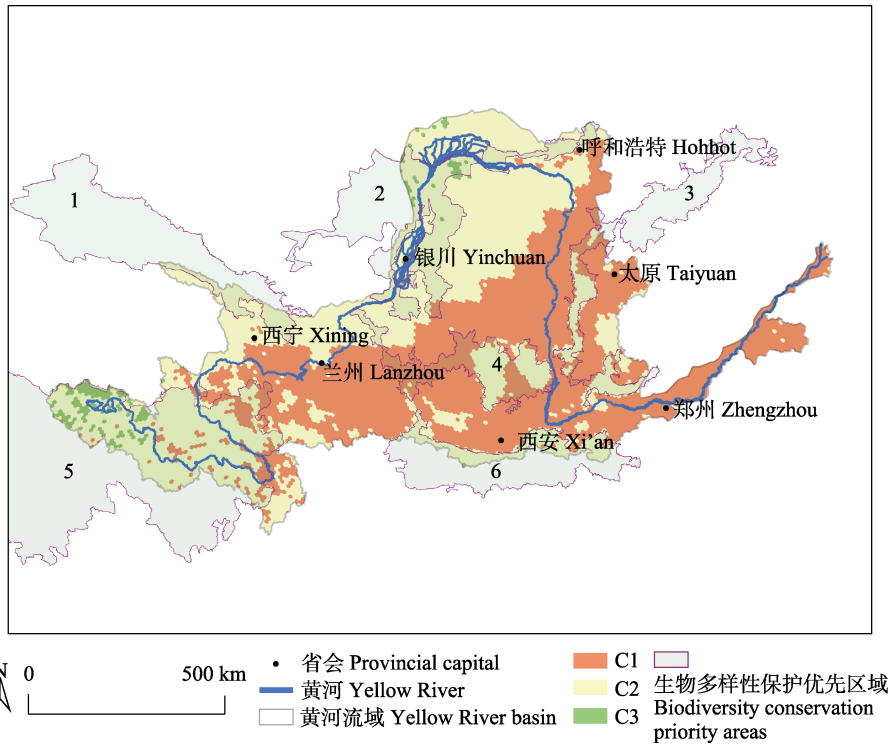


图1 黄河流域三类分区空间格局与生物多样性保护优先区域。涉及的6处生物多样性保护优先区域包括: 1. 祁连山; 2. 西鄂尔多斯-贺兰山-阴山; 3. 太行山; 4. 六盘山-子午岭; 5. 羌塘-三江源; 6. 秦岭。

Fig. 1 Spatial distribution of three conditions and biodiversity conservation priority areas in the Yellow River basin. Biodiversity Conservation Priority Areas include: 1. Qilian Mountains; 2. West Ordos-Helan Mountains-Yin Mountains; 3. Taihang Mountains; 4. Liupan Mountains-Ziwu Mountains; 5. Qiangtang-Sanjiangyuan; 6. Qinling.

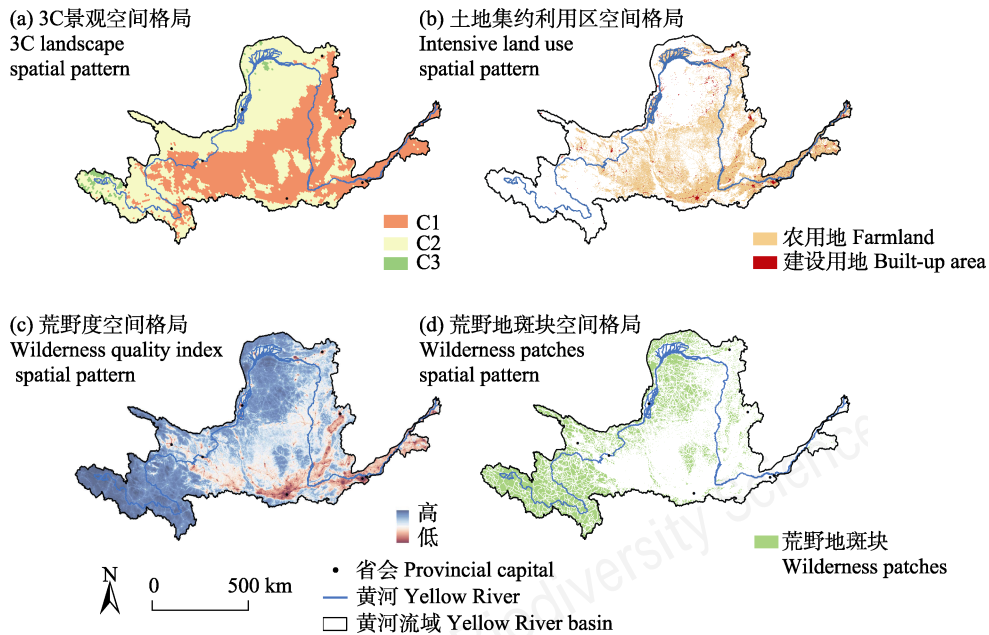


图2 黄河流域三类分区的空间格局^①

Fig. 2 Spatial pattern of three conditions in the Yellow River basin^①

① 数据来源: 黄河流域边界和土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据(<http://www.resdc.cn/>); 3C景观数据来自Locke et al, 2019; 荒野度和荒野地斑块数据来自Cao et al, 2019。地理坐标系为GCS WGS 84, 投影坐标系为Asia North Albers Equal Area Conic。

景观中;非集中分布的农用地也存在于C2景观中;C3景观中基本不包含建设用地和农用地。

(3) 荒野度空间格局(图2c)。荒野度能够反映景观未被人类干扰的程度(Cao et al, 2019)。在黄河流域内,荒野度呈现由西向东逐渐递减的空间格局。高荒野度的区域主要分布于黄河源、鄂尔多斯高原、子午岭、吕梁山等;低荒野度的区域主要分布于华北平原、渭河两岸、晋中盆地以及城市区域。黄河流域内包含了多个高荒野度区域,但仅有黄河源与西鄂尔多斯高原部分区域被界定为C3景观。

(4) 荒野地斑块空间格局(图2d)。荒野地斑块具有明确的空间边界,识别标准为具有自然的土地覆盖、无机动车道路且无人类居民点(Cao et al, 2019)。流域内荒野地斑块面积共21.8万km²,占流域总面积的27%,主要分布于黄河源、鄂尔多斯高原、子午岭、黄龙山、吕梁山、六盘山等区域。

2.2 黄河流域三类分区的现状

(1) C1景观。C1景观主要由城市和农田组成,人类影响程度较高,集中分布在黄土高原地区和平原地区。黄河流域城乡、工矿、居民用地总面积为24,536 km²,占流域总面积的3.03%^①。2017年,黄河流域城镇化率为55.7%,略低于全国平均水平(赵建吉等, 2020)。一方面,人口向城市的集中减轻了C3和C2景观的生态压力;另一方面,城市的快速扩张和粗放发展也导致了栖息地破碎化、环境污染等问题。黄河流域超过78%的地级市为生态滞后型城市(赵建吉等, 2020),并且黄河沿岸分布有大量造纸、纺织、印染等高污染产业(张敏, 2015)。另外,黄河流域耕地共213,293 km²^①,占流域总面积的26.34%。农业景观对生物多样性存在双向影响:一方面,农业改变了自然生态系统的结构和功能,对区域生物多样性产生负面影响(Norris, 2008);另一方面,农业生态系统对生物多样性维持和人类生存具有重要价值。黄河流域的生态保护与高质量发展直接关系到我国的粮食安全(方兰和李军, 2019)。同时,保护农田生物多样性对实现生物多样性保护具有重要作用,例如朱鹮(*Nipponia nippon*)的保护是该区域中的一个典型案例(Li et al, 2020)。

(2) C2景观。C2景观主要分布于内蒙古鄂尔多斯高原与甘肃、青海等黄河中上游地区。其中秦岭

和中条山一带等水热条件较好的区域具有较高的生物多样性(董雪蕊等, 2019)。然而,人类生产生活高度依赖脆弱的生态环境,例如秦岭、六盘山、吕梁山等区域中存在经济发展与生态保护的潜在冲突(Quan et al, 2008; 潘景璐, 2013; 孙从建等, 2019)。在C2景观中,已开展退耕还林还草等生态工程,持续改善了区域生态环境(李相儒等, 2015)。

(3) C3景观。C3景观主要分布于青藏高原的黄河源头区域与鄂尔多斯高原的西北区域,在特殊的气候和地理条件下形成了独特的生态系统,具有很高的生物多样性保护价值。其中,黄河源属于高寒大陆性气候,具有高寒草地、高寒湿地等独特的生态系统,是雪豹(*Uncia uncia*)、藏羚羊(*Pantholops hodgsonii*)、藏野驴(*Equus kiang*)、黑颈鹤(*Grus nigricollis*)等珍稀野生动物的重要栖息地(董锁成等, 2002)。鄂尔多斯高原属于温带大陆性气候,具有丰富的荒漠特有种,拥有四合木(*Tetraena mongolica*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、半日花(*Helianthemum soongolicum*)、绵刺(*Potaninia mongolica*)等国家重点保护残遗种(韩秀珍等, 2002)。然而在全球气候变化与人类影响的双重威胁下,黄河流域的C3景观正面临草地退化、荒漠化、土壤盐碱化等问题,持续威胁当地的生物多样性。

总体上,黄河流域的C1、C2、C3景观具有不同的生物多样性特征,面临不同的威胁。本研究进一步针对3C景观中的典型区域(C1景观选取关中平原城市群、黄河三角洲等;C2景观选取秦岭、六盘山、子午岭、吕梁山等;C3景观选取黄河源、鄂尔多斯高原等),进行文献检索和归纳分析,识别生物多样性面临的直接威胁因素,进而提出相应的保护策略。

3 黄河流域三类分区中生物多样性的直接威胁因素

生物多样性的5类直接威胁因素包括栖息地丧失和退化、气候变化、污染、过度开发与不可持续的利用、外来物种入侵。每一种直接威胁因素都与具体的空间位置有关。我们基于文献研究,归纳出黄河流域中生物多样性面临的主要威胁。

3.1 栖息地丧失和退化

黄河流域栖息地丧失和退化的问题包括:(1) C1景观中的城市扩张和C2景观中的工矿建设导致

^① 数据来源:中国科学院资源环境科学数据中心,2015年中国土地利用现状遥感监测数据库1 km土地利用数据集。

生境减少或破碎化。1980–2015年,黄河流域内城乡工矿建设用地增加6,794 km² (张冉等, 2019); 渭河河岸的大量湿地生境被城市建设占用, 导致湿地生境丧失和生物多样性下降(Li Q et al, 2013); 乌海市由于城市扩张和煤炭开采, 当地特有濒危植物四合木的生境面积在1990–2020年间下降了35.8% (王光明, 2012; 秦山和潮洛濛, 2014)。(2) C1和C2景观中农用地扩张导致自然栖息地减少和湿地缩减。2005–2015年, 黄河流域中有约1,200 km²的新增耕地, 其中吴忠–乌海区域和榆林有较多未利用地转变为耕地; 包头、渭南、洛阳、郑州有较多湿地转变为耕地; 滨州、泰安有少量湿地转变为耕地。(3) 道路等基础设施扩张导致栖息地破碎化。例如道路建设对黄河三角洲的湿生植物产生了较大干扰, 出现较为明显的湿生植物衰退和中生、旱生物种的入侵(王天巍, 2008)。(4) 河流大坝建设对流域栖息地产生负面影响。虽然黄河中众多的水利设施在防洪等多方面具有重要价值, 但也破坏了典型湿地生态系统的结构和功能(肖春艳, 2016), 例如三门峡水库的修建导致当地水生态环境恶化, 造成当地13种鱼类绝迹(郭乔羽和杨志峰, 2005)。

3.2 气候变化

气候变化对黄河流域3C景观产生了负面影响:(1) C3景观中, 黄河源区的气温和降水发生了明显变化(孙扬波等, 2009; 张照玺等, 2015), 从20世纪60年代末开始大约40年间, 该地区气温年增量0.03°C, 区域气候暖干化, 与过度放牧等因素共同导致冻土退化和栖息地破碎化等问题, 威胁当地动植物生存(Li N et al, 2013)。(2) C2景观中, 近年来黄土高原中森林和灌木生态系统的降水量增加, 而干旱和半干旱地区则由于温度上升和降水减少导致局部地区的植被退化(肖强等, 2016)。此外, 气候暖干化也是湿地退化的重要因素(肖春艳, 2016), 例如沿海地区的黄河三角洲极易因气候变化的影响而发生退化(Liu et al, 2020), 随着海平面上升、对海岸的侵蚀加剧、风暴潮等自然灾害的加剧, 湿地的淹没面积扩大, 导致群落生存空间被破坏^①。(3) C1景观中, 气候变化可能进一步加大农业发展对资源的需求, 对生态环境造成威胁。例如宁蒙引黄灌溉区近年的典型作物需水量和总灌溉需水量显著增加

(蒋飞卿等, 2019); 此外, 在气候变化背景下黄河流域未来的降水量呈减小趋势, 而主要作物小麦(*Triticum aestivum*)、春玉米(*Zea mays*)的灌溉需水量将增加^②。

3.3 污染

C1和C2景观中城市、工业与农业的发展产生大量固体、液体、气体废弃物, 造成水污染、土壤污染、空气污染、噪声污染等问题, 严重影响流域生物多样性:(1) 污染直接威胁流域生物多样性。如C1景观中, 由于农药和化肥的大量施用, 导致生态失衡、生物多样性降低(宇振荣等, 2019); C2景观中, 秦岭由于矿场建设破坏了水质, 威胁到大鳞黑线鲃(*Atrilinea macrolepis*)与国家二级重点保护鱼类秦岭细鳞鲑(*Brachymystax lenok tsinlingensis*)、虎嘉鲑(*Hucho taimen*)的栖息地(周小愿等, 2010), 黄河三角洲的污染导致22种鱼类在当地绝迹(潘怀剑和田家怡, 2001)。(2) 重金属污染埋下生态安全隐患。污水排放、大气污染物沉降、雨水对固体废弃物的冲刷等导致大量重金属进入生态环境, 相当一部分存留在河流沉积物中^③。重金属在黄河流域湿地中的两栖类(韩瑞杰等, 2019)、鱼类(李吉锋和刘楠楠, 2019)体内富集, 对黄河三角洲黑嘴鸥(*Larus saundersi*)的孵化也有负面影响^④; 甚至C3景观中三江源的土壤(何林华和高小红, 2016)、湿地, 以及鄂尔多斯高原荒漠植被中也存在一定程度的重金属污染^⑤。

3.4 过度开发与不可持续的利用

大量生产生活用水需求、农牧业过度开发、不适宜的旅游开发、工程建设等对黄河流域生物多样性造成负面影响:(1) 黄河生态水量不足。黄河以全国2%的河川径流量, 负担着我国12%人口、15%耕地的供水任务, 长期“与河争水”导致鱼类栖息地缩小甚至丧失。尽管黄河水资源统一管理和南水北调等调水工程对黄河断流的现象有所缓解, 但仍存在较严重的生态流量赤字。(2) C1与C2景观中, 农业灌溉用水量增加, 导致湿地退化, 例如若尔盖湿地

① 刘丽云 (2007) 黄河三角洲湿地演化及其驱动力研究. 硕士学位论文, 山东师范大学, 济南.

② 张瑞涵 (2019) 气候变化条件下黄河流域的作物灌溉需水量. 硕士学位论文, 西安理工大学, 西安.

③ 王霞 (2014) 黄河上游典型地区底泥重金属调查与污染评价. 硕士学位论文, 兰州交通大学, 兰州.

④ 张风姣 (2018) 重金属对黄河三角洲湿地鸟类的影响. 硕士学位论文, 曲阜师范大学, 曲阜.

⑤ 马慧 (2017) 东阿拉善–西鄂尔多斯九种荒漠植物重金属分布特征. 硕士学位论文, 内蒙古大学, 呼和浩特.

内的莎草科湿生物种逐渐被禾本科杂草和菊科等旱生物种取代,进而威胁珍稀濒危鸟类(崔丽娟, 2019)。(3)不适宜的人类活动在C2景观中造成负面影响,例如秦岭大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)栖息地(邓怀庆, 2013)与子午岭自然保护区的非可持续性旅游活动导致森林栖息地破碎化(张景群等, 2005)。(4) C3景观中,三江源地区的过度放牧对野生动物栖息地造成威胁(Yang et al, 2019)。

3.5 外来物种入侵

黄河流域中,干支流以及黄河三角洲面临外来物种入侵的威胁:(1)黄河干支流中,由于水产养殖、水产贸易、放生等原因出现了较多外来鱼种,外来鱼种持续增多且有向高海拔扩散的趋势,已经改变了当地鱼类区系组成,严重影响鱼类多样性(李芳等, 2008; 唐文家和何德奎, 2015; 侯淑敏等, 2016; Xie et al, 2018)。(2)黄河三角洲地区(C1景观),外来物种米草(*Spartina anglica*)对当地底栖动物、滩涂昆虫、滩涂浮游动物、滩涂浮游植物、底泥微生物和滩涂鸟类造成了显著的负面影响(朱士文等, 2012);另外,泥螺(*Bullacta exarata*)作为人工养殖苗种被引入黄河三角洲地区,对四角蛤蜊(*Maetra veneriformis*)、毛蚶(*Scapharca subcrenata*)、缢蛏(*Sinonovacula constricta*)等当地传统底栖贝类造成巨大威胁,导致当地海域滩涂生物多样性下降(赵文溪等, 2017)。

4 黄河流域生物多样性保护策略

上文总结了黄河流域中5类生物多样性直接威胁因素。事实上,部分区域的生物多样性同时受到多种威胁因素的影响,不同区域中多种威胁因素的相对重要性也存在差异。例如,黄河河流与湿地生态系统面临的多种威胁包括:城市建设用地占用河道湿地、水利工程破坏河流的连通性和“自由流淌”特征、气候变化导致流域降水量减少与湿地退化、水污染严重影响河流湿地、生产生活用水需求导致河流生态流量不足与湿地退化、外来物种入侵导致河流生物多样性下降等。因此,在研究黄河流域生物多样性保护策略时,既需要考虑某一类威胁因素在各类空间中的影响,也需要考虑在某一类空间中多种威胁因素的综合影响。

针对黄河流域三类分区中生物多样性的直接威胁因素,依托我国的生物多样性保护体制,提出

以下6项生物多样性保护策略。部分策略会同时涉及三类分区中的二类或三类,但不同分区中的侧重点存在差异,部分策略则重点针对某一类分区。

4.1 在国土空间规划中实现“全域保护”

三类分区框架与“生产-生活-生态空间”(简称“三生空间”)存在一定的对应关系。生活空间与生产空间主要对应C1景观中的城市和农田区域;生态空间则以C3景观为主,也包括C1和C2景观中的重要生态区域。为实现生物多样性保护,应在各类国土空间中设置不同的生物多样性保护目标,采取控制威胁因素的措施,即实现“全域保护”。在国土空间生态保护修复中,应充分评估各类景观空间中的威胁因素,并对三类景观有不同的保护侧重点:(1)在C1景观中,准确评估城市和农业活动存在的影响,识别对生物多样性保护重要的区域并进行管理,关注对道路建设、居民点扩张和土地利用变化的管控。(2)在C2景观中,应保护和恢复自然保护地与荒野地的连通性。(3)在C3景观中,应制定措施以保护大面积荒野地的生态完整性,避免破碎化。

4.2 优化完善自然保护地体系

黄河流域尤其是中游和下游地区仍然存在明显的保护空缺,建议在三类分区中统筹布局自然保护地和“其他基于区域的有效保护措施”(Other effective area-based conservation measures, OECMs),并在三类分区中突出不同的保护地管理重点:(1) C3景观中,由于已经建立了大面积的保护地(如三江源国家公园体制试点区),因此提升保护地管理有效性是重点。如在黄河源地区,应进一步统筹协调自然保护与原住居民的生产生活活动,加强对于神山圣湖等自然圣境的保护。(2) C2景观中,探索基于“再野化”的自然保护地建设和管理路径。识别对于生物多样性完整性和连通性重要且具有“再野化”可行性的区域,如黄土高原、南太行地区等乡村人口减少、土地废弃或实施退耕还林的地区,宜在科学研究论证的基础上消除或减弱人类干扰、恢复自然过程、保护和恢复关键种、设置生态廊道等(杨锐和曹越, 2019)。(3) C1景观中,应加强城市保护地的建设,加强城市生物多样性保护实践,并减少城市和农田产生的污染。

4.3 系统提升农业的生产效率与生态效率

为减少农业生产对生物多样性造成的威胁,黄河流域C1和C2景观中的农业区域可重点从以下方

面进行改善: (1)由于黄河流域水资源与耕地资源高度不匹配(张晓涛和于法稳, 2012), 应针对流域特征在耕作方式及技术应用等方面研发新方法、应用适宜技术, 提升能源资源的节约集约利用效率。(2)在山水林田湖草综合治理中, 应系统性地进行高标准农田与绿色农田建设选点, 加强重要地区农业生产方式的引导、管理与监测, 推动耕地质量与生态涵养功能的保护提升。(3)在后备耕地开发利用过程中, 须充分评估气候环境和水文资源条件以及生态影响, 建设兼具生产效率与生态效率的农田, 真正实现资源节约型和环境友好型的“两型农业”。

4.4 推进生态城市建设

位于C1景观中的城市, 其产生的污染与资源消耗会对C2、C3景观产生间接影响。黄河流域的呼和浩特、洛阳市、石嘴山市、晋城市等作为“国家森林城市”, 在森林生态网络和生态文化建设等方面可作为黄河流域生态城市发展的先导力量; 在此基础上, 应进一步加强生态城市建设, 具体措施包括: 改善城市绿色空间, 增加城市绿地连通性, 注重城市绿地生物多样性营造; 促进城市节能减排; 引导高污染、高耗能产业转型, 发展绿色产业并推广可再生能源等(沈清基等, 2010)。此外, 应提高公众的可持续发展意识, 提倡低碳环保的生活方式。

4.5 在生态工程中加强生物多样性保护

随着20世纪末退耕还林与退牧还草等工程的开展, 黄河源区与黄土高原等地区的植被覆盖率显著增加(郭永强等, 2019; 修丽娜等, 2019), 区域景观格局得到改善(张海燕等, 2015)。然而, 区域生物多样性与生态系统功能仍然有待提升, 部分人工林内物种组成单一、乔灌木比例不均衡(孙浩等, 2016; 何志华等, 2017)。为此, 建议在黄河流域的生态工程中, 进一步加强对生物多样性的保护和恢复。应提倡基于自然的解决方案, 并从工程性修复转向以保护优先与自然恢复为主(杨锐和曹越, 2019)。例如, 在植被修复工程中, 应避免大面积纯林斑块聚集, 而应以混交林形成镶嵌斑块(何志华等, 2017); 在草原生态保护和修复工程中, 不宜简单地将人类活动完全排除, 而应找到放牧活动与生物多样性保护的平衡点(Li et al, 2016)。

4.6 加强黄河河流生态系统整体保护

随着治污、治沙、水量调控等工程的开展, 黄河水质得到了较大改善。然而当前针对黄河的保护

主要聚焦于水环境, 未来则需要进一步加强对流域生物多样性的保护。具体措施包括: 加强全流域污染治理; 建设节水型社会, 提高用水效率, 保证河道生态流量; 加强水利工程的生态环境评估, 提高河流连通性(李云成等, 2017); 加强对珍稀濒危鱼类和重要湿地的保护; 加强河岸保护, 恢复自然河道; 加强河流健康的监测与调控, 防止黄河生态系统进一步退化。

5 结论和讨论

本文基于“为实现生物多样性保护和可持续利用的全球三类分区”实施框架, 识别了黄河流域三类分区的空间格局以及生物多样性的直接威胁因素, 并以系统性的思路从国土空间规划、自然保护地体系、生态农业、生态城市、生态工程、河流生态系统6个方面提出黄河流域的生物多样性保护策略。

黄河流域的三类分区虽然状态各异且面临不同的压力, 但对于生物多样性保护都具有十分重要的意义。同时, 每一类空间所面临的威胁都可能源自于其他空间。这也说明了国土空间规划中“三生空间”以及“三条控制线”(生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界)不是割裂的关系, 生态红线可以位于对整体生态系统重要的生产和生活空间中, 生产和生活空间也应不同程度地承担生物多样性保护的功能。

研究的局限性与未来研究方向包括: (1)三类分区的精确划定。本文使用了全球尺度三类分区的数据对黄河流域进行研究, 未来可使用更高精度的数据进行三类分区的划定。另外, 三类分区与我国国土空间规划的对应关系不完全, 未来可进一步探讨三类分区框架与我国国土空间规划的关系, 并为国土空间规划提供生物多样性保护规划的视角和方法。(2)威胁因素的定量化表征。本文使用了文献研究法来识别威胁因素, 未能涵盖现有文献中研究基础较少的区域, 未来需要引入专家访谈和更多基础数据集, 完善威胁因素的定量化表征。应基于土地利用和土地覆被变化、气候变化、污染排放、水资源承载力、栖息地适宜性、物种入侵等空间数据集, 对威胁因素进行量化, 进一步提升保护策略的针对性; 并结合生态系统服务价值、地方特有物种分布、濒危物种分布等数据集, 评估生物多样性保护价值, 分析重点保护区域和威胁因素之间的关系。(3)三类

分区与自然保护地的交叉分析。未来可结合各类自然保护地的边界和分区数据,分析自然保护地体系与三类空间的关系,进一步识别三类空间中的保护空缺。(4)三类分区框架的拓展应用。本文以黄河流域为例尝试应用了三类分区框架,未来可探索推广至其他区域。该框架的系统性思路,可在流域、生物多样性保护优先区、生态功能区等范围内应用,以支持生物多样性保护规划。

参考文献

- Cao Y, Carver S, Yang R (2019) Mapping wilderness in China: Comparing and integrating Boolean and WLC approaches. *Landscape and Urban Planning*, 192, 103636.
- Cui LJ (2019) Wetland protection and management in the Yellow River basin. *Democracy and Science*, (1), 53–56. (in Chinese) [崔丽娟 (2019) 黄河流域湿地的保护与管理. *民主与科学*, (1), 53–56.]
- Deng HQ (2013) Habitat Quality Evaluation and Protection Management of Giant Panda (*Ailuropoda melanoleuca qinlingensis*) in Foping County, Shaanxi Province. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [邓怀庆 (2013) 陕西佛坪大熊猫栖息地质量评价及保护管理研究. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Dong SC, Zhou CJ, Wang HY (2002) Ecological crisis and countermeasures of the Three Rivers' Headstream Regions. *Journal of Natural Resources*, 17, 713–720. (in Chinese with English abstract) [董锁成, 周长进, 王海英 (2002) “三江源”地区主要生态环境问题与对策. *自然资源学报*, 17, 713–720.]
- Dong XR, Zhang H, Zhang MG (2019) Explaining the diversity and endemic patterns based on phylogenetic approach for woody plants of the Loess Plateau. *Biodiversity Science*, 27, 1269–1278. (in Chinese with English abstract) [董雪蕊, 张红, 张明昱 (2019) 基于系统发育的黄土高原地区木本植物多样性及特有性格局. *生物多样性*, 27, 1269–1278.]
- Eken G, Bennun L, Brooks TM, Darwall W, Fishpool LDC, Foster M, Knox D, Langhammer P, Matiku P, Radford E, Salaman P, Sechrest W, Smith ML, Spector S, Tordoff A (2004) Key biodiversity areas as site conservation targets. *BioScience*, 54, 1110–1118.
- Fan J, Wang YF, Wang YX (2020) High quality regional development research based on geographical units: Discuss on the difference in development conditions and priorities of the Yellow River basin compared to the Yangtze River basin. *Economic Geography*, 40(1), 1–11. (in Chinese with English abstract) [樊杰, 王亚飞, 王怡轩 (2020) 基于地理单元的区域高质量发展研究——兼论黄河流域同长江流域发展的条件差异及重点. *经济地理*, 40(1), 1–11.]
- Fang L, Li J (2019) Ecological protection and high quality development of the Yellow River basin from the perspective of food security. *Chinese Journal of Environmental Management*, 11(5), 5–10. (in Chinese with English abstract) [方兰, 李军 (2019) 粮食安全视角下黄河流域生态保护与高质量发展. *中国环境管理*, 11(5), 5–10.]
- Guo QY, Yang ZF (2005) Post-project ecological analysis for the Sanmenxia dam. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25, 580–585. (in Chinese with English abstract) [郭乔羽, 杨志峰 (2005) 三门峡水利枢纽工程生态影响后评价. *环境科学学报*, 25, 580–585.]
- Guo YQ, Wang NJ, Chu XS, Li C, Luo XQ, Feng H (2019) Analyzing vegetation coverage changes and its reasons on the Loess Plateau based on Google Earth Engine. *China Environmental Science*, 39, 4804–4811. (in Chinese with English abstract) [郭永强, 王乃江, 褚晓升, 李成, 罗晓琦, 冯浩 (2019) 基于Google Earth Engine分析黄土高原植被覆盖变化及原因. *中国环境科学*, 39, 4804–4811.]
- Guo ZL (2016) Analysis on the Effectiveness of Nature Reserve Network and Natural Conservation Geographical Regionalization of China. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [郭子良 (2016) 中国自然保护综合地理区划与自然保护区体系有效性分析. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Han RJ, Ren YC, Huang T, Yang C, Wang ZY, Jia DH, Zhang XF, Si WT (2019) Study on pollution degree and bio-concentration of heavy metals in three types of wetlands in Baotou, China. *Environmental Engineering*, 37(1), 29–34. (in Chinese with English abstract) [韩瑞杰, 任逸晨, 黄涛, 杨畅, 王志勇, 贾戴辉, 张雪峰, 司万童 (2019) 包头市三类湿地中重金属污染程度及生物富集研究. *环境工程*, 37(1), 29–34.]
- Han XZ, Ma JW, Buheasier, Ma CF, Qin SH (2002) The application of ETM and sample sites statistic data to study the distribution pattern of endangered rare plants in west Ordos Plateau. *Journal of Remote Sensing*, 6(2), 136–141, 165. (in Chinese with English abstract) [韩秀珍, 马建文, 布和敖斯尔, 马超飞, 秦树辉 (2002) 利用卫星ETM与样方统计数据研究西鄂尔多斯珍稀濒危植物种群分布规律. *遥感学报*, 6(2), 136–141, 165.]
- He LH, Gao XH (2016) Assessment of potential ecological risk for soil heavy metals in Sanjiang Source Region: A case study of Yushu County, Qinghai Province. *Journal of Agro-Environment Science*, 35, 1071–1080. (in Chinese with English abstract) [何林华, 高小红 (2016) 三江源区土壤重金属的累积特征及潜在生态风险评价——以青海省玉树县为例. *农业环境科学学报*, 35, 1071–1080.]
- He ZH, Zhu YF, Qiu YL, Xu LH (2017) Effects of human intervention on the composition and diversity of plant community in Ziwuling area. *Journal of Northwest Forestry University*, 32(6), 87–95. (in Chinese with English abstract) [何志华, 朱岩峰, 邱雅林, 徐丽恒 (2017) 不同人为干预方式对子午岭植物群落组成及多样性的影响. *西北林学院学报*, 32(6), 87–95.]

- Hou SM, Li WP, Wang YC, Wen SE, Li HB, Gao Z (2016) The current situation of aquatic animals invasion of Shaanxi stretch of the Yellow River. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 46(1), 82–86. (in Chinese with English abstract) [侯淑敏, 李维平, 王益昌, 问恩恩, 李海滨, 高志 (2016) 黄河陕西段水生动物入侵现状分析. *西北大学学报(自然科学版)*, 46(1), 82–86.]
- Jiang FQ, Dong ZC, Wu H, Bian JQ, Zhong DY, Wang WZ, Jia YF, Zhu HS, Liu MY, Wang Y (2019) Response of irrigation water demand to changing environment in Yellow River irrigation area in Ningxia and Inner Mongolia. *Journal of China Hydrology*, 39(5), 35–39, 7. (in Chinese with English abstract) [蒋飞卿, 董增川, 吴晗, 卞佳琪, 钟敦宇, 王文卓, 贾一飞, 朱寒松, 刘墨阳, 王尧 (2019) 宁夏引黄灌区灌溉需水对变化环境的响应. *水文*, 39(5), 35–39, 7.]
- Li F, Zhang JJ, Yuan YF, Feng H, Zhang JY, Yang XZ (2008) Present situation and problems on fish introduction in Yellow River system. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 36, 15024–15026. (in Chinese with English abstract) [李芳, 张建军, 袁永锋, 冯慧, 张军燕, 杨兴中 (2008) 黄河流域鱼类引种现状及存在问题. *安徽农业科学*, 36, 15024–15026.]
- Li JF, Liu NN (2019) Risk evaluation of the heavy metal pollution in fish from the junction of Yellow River, Weihe River and Luohe River. *Chinese Journal of Fisheries*, 32(4), 50–54. (in Chinese with English abstract) [李吉锋, 刘楠楠 (2019) 黄渭洛三河交汇处鱼类重金属污染风险评价. *水产学杂志*, 32(4), 50–54.]
- Li L, Hu R, Huang J, Bürgi M, Zhu Z, Zhong J, Lü Z (2020) A farmland biodiversity strategy is needed for China. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 772–774.
- Li N, Wang GX, Liu GS, Lin Y, Sun XY (2013) The ecological implications of land use change in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers, China. *Regional Environmental Change*, 13, 1099–1108.
- Li Q, Song JX, Wei AL, Zhang B (2013) Changes in major factors affecting the ecosystem health of the Weihe River in Shaanxi Province, China. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 7, 875–885.
- Li XL, Perry G, Brierley GJ (2016) Grassland ecosystems of the Yellow River Source Zone: Degradation and restoration. In: *Landscape and Ecosystem Diversity, Dynamics and Management in the Yellow River Source Zone* (eds Brierley G, Li X, Cullum C, Gao J), pp. 137–165. Springer, Cham.
- Li XR, Jin Z, Zhang XB, Zhou WJ (2015) Analysis of ecosystem management of the Loess Plateau during the past 60 years and suggestions for the future development. *Journal of Earth Environment*, 6, 248–254. (in Chinese with English abstract) [李相儒, 金钊, 张信宝, 周卫健 (2015) 黄土高原近60年生态治理分析及未来发展建议. *地球环境学报*, 6, 248–254.]
- Li YC, Wang RL, Lou GY (2017) Overall framework of water ecological protection and restoration in Huangshui River basin. *Journal of Hydroecology*, 38(6), 11–18. (in Chinese with English abstract) [李云成, 王瑞玲, 娄广艳 (2017) 湟水流域水生态保护与修复研究. *水生态学杂志*, 38(6), 11–18.]
- Liu JK, Engel BA, Wang Y, Zhang GF, Zhang ZM, Zhang MX (2020) Multi-scale analysis of hydrological connectivity and plant response in the Yellow River Delta. *Science of the Total Environment*, 702, 134889.
- Locke H, Ellis EC, Venter O, Schuster R, Ma KP, Shen XL, Woodley S, Kingston N, Bhola N, Strassburg BBN, Paulsch A, Williams B, Watson JEM (2019) Three global conditions for biodiversity conservation and sustainable use: An implementation framework. *National Science Review*, 6, 1080–1082.
- Lu DD, Sun DQ (2019) Development and management tasks of the Yellow River basin: A preliminary understanding and suggestion. *Acta Geographica Sinica*, 74, 2431–2436. (in Chinese with English abstract) [陆大道, 孙东琪 (2019) 黄河流域的综合治理与可持续发展. *地理学报*, 74, 2431–2436.]
- Norris K (2008) Agriculture and biodiversity conservation: Opportunity knocks. *Conservation Letters*, 1, 2–11.
- Pan HJ, Tian JY (2001) Water pollution in the Yellow River Delta and its effects on fresh water fish species diversity. *Fisheries Science*, 20(4), 17–20. (in Chinese with English abstract) [潘怀剑, 田家怡 (2001) 黄河三角洲水质污染对淡水鱼类多样性的影响. *水产科学*, 20(4), 17–20.]
- Pan JL (2013) The Study on Impact of Development to Qinling Biodiversity Conservation Based on the Pressure of Habitat. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [潘景璐 (2013) 基于生境压力的发展对秦岭生物多样性保护影响研究. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Potapov P, Yaroshenko A, Turubanova S, Dubinin M, Laestadius L, Thies C, Aksenov D, Egorov A, Yesipova Y, Glushkov I, Karpachevskiy M, Kostikova A, Manisha A, Tsybikova E, Zhuravleva I (2008) Mapping the world's intact forest landscapes by remote sensing. *Ecology and Society*, 13, art51.
- Qin S, Chao LM (2014) The impact of anthropogenic disturbance on landscape of *Tetraena mongolica* shrub in the Wuhai City. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 6346–6354. (in Chinese with English abstract) [秦山, 潮洛濛 (2014) 人为干扰对乌海市四合木小灌木景观的影响. *生态学报*, 34, 6346–6354.]
- Quan B, Römkens MJM, Tao JJ, Li BC, Li CK, Yu GH, Chen QC (2008) Spatial-temporal pattern and population driving force of land use change in Liupan Mountains region, southern Ningxia, China. *Chinese Geographical Science*, 18, 323–330.
- Shen QJ, An C, Liu CS (2010) A discussion on the connotation, characteristics, and basic principles of

- planning/construction of the low carbon eco-city. *Urban Planning Forum*, 190(5), 48–57. (in Chinese with English abstract) [沈清基, 安超, 刘昌寿 (2010) 低碳生态城市的内涵、特征及规划建设的基本原理探讨. *城市规划学刊*, 190(5), 48–57.]
- Sun CJ, Li XM, Zhang WQ, Chen W, Wang JR (2019) Evaluation of ecological security in poverty-stricken region of Lüliang Mountain based on the remote sensing image. *China Environmental Science*, 39, 5352–5360. (in Chinese with English abstract) [孙从建, 李晓明, 张文强, 陈伟, 王佳瑞 (2019) 基于遥感信息的吕梁山贫困区生态安全评价. *中国环境科学*, 39, 5352–5360.]
- Sun H, Liu XY, Xiong W, Wang YH, Liu B, Yu PT (2016) Comprehensive assessment on hydrological functions of the four typical forests in Liupan Mountains. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 30(7), 85–89. (in Chinese with English abstract) [孙浩, 刘晓勇, 熊伟, 王彦辉, 刘彬, 于澎涛 (2016) 六盘山四种典型森林生态水文功能的综合评价. *干旱区资源与环境*, 30(7), 85–89.]
- Sun YB, Sun F, Liu JF, Xia J, Wang L (2009) Analysis on demand of climate change responded by the Yellow River basin. *Yellow River*, 31(4), 16–18, 124. (in Chinese) [孙扬波, 孙凤, 刘吉峰, 夏军, 王玲 (2009) 黄河流域应对气候变化的需求分析. *人民黄河*, 31(4), 16–18, 124.]
- Tang WJ, He DK (2015) Investigation on alien fishes in Qinghai Province, China (2001–2014). *Journal of Lake Sciences*, 27, 502–510. (in Chinese with English abstract) [唐文家, 何德奎 (2015) 青海省外来鱼类调查(2001–2014年). *湖泊科学*, 27, 502–510.]
- Wang GM (2012) The Study on Landscape Pattern of *Tetraena mongolia* Influenced by Human Disturbance in Wuhai. PhD dissertation, Inner Mongolia University, Hohhot. (in Chinese with English abstract) [王光明 (2012) 近二十年人为干扰对乌海市四合木景观格局影响研究. 博士学位论文, 内蒙古大学, 呼和浩特.]
- Wang TW (2008) The Study of Road Network Characters and Its Ecological Impact in Yellow River Delta. PhD dissertation, Huazhong Agricultural University, Wuhan. (in Chinese with English abstract) [王天巍 (2008) 黄河三角洲道路网络特征及其对生态影响的研究. 博士学位论文, 华中农业大学, 武汉.]
- Wilson EO (2016) *Half-earth: Our Planet's Fight for Life*. Liveright Publishing Corporation, New York.
- Xiao CY (2016) Study on Degradation Features and Restoration Approaches of Downstream Riparian Wetland from the Xiaolangdi Dam of the Yellow River. PhD dissertation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo. (in Chinese with English abstract) [肖春艳 (2016) 小浪底大坝下游滨河湿地退化特征及修复途径研究. 博士学位论文, 河南理工大学, 焦作.]
- Xiao Q, Tao JP, Xiao Y (2016) Dynamic vegetation cover change over the past 10 years on the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 7594–7602. (in Chinese with English abstract) [肖强, 陶建平, 肖洋 (2016) 黄土高原近10年植被覆盖的动态变化及驱动力. *生态学报*, 36, 7594–7602.]
- Xie JY, Tang WJ, Yang YH (2018) Fish assemblage changes over half a century in the Yellow River, China. *Ecology and Evolution*, 8, 4173–4182.
- Xiu LN, Yan CZ, Qian DW, Xing ZP (2019) Analysis of spatial-temporal change and driving forces of vegetation in Loess Plateau under background of ecological engineering. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39(4), 214–221, 228. (in Chinese with English abstract) [修丽娜, 颜长珍, 钱大文, 幸赞品 (2019) 生态工程背景下黄土高原植被变化时空特征及其驱动力. *水土保持通报*, 39(4), 214–221, 228.]
- Yang F, Shao QQ, Jiang ZG (2019) A population census of large herbivores based on UAV and its effects on grazing pressure in the Yellow-River-Source National Park, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, E4402.
- Yang R, Cao Y (2019) Rewilding: New ideas for ecological protection and restoration projects of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 8763–8770. (in Chinese with English abstract) [杨锐, 曹越 (2019) “再野化”: 山水林田湖草生态保护修复的新思路. *生态学报*, 39, 8763–8770.]
- Yu ZR, Yang XM, Chen YJ (2019) Ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in Nantaihang area, Henan Province: Integrated landscape management. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 8886–8895. (in Chinese with English abstract) [宇振荣, 杨新民, 陈雅杰 (2019) 河南省南太行地区山水林田湖草生态保护与修复. *生态学报*, 39, 8886–8895.]
- Zhang HY, Fan JW, Shao QQ (2015) Land use/land cover change in the grassland restoration program areas in China, 2000–2010. *Progress in Geography*, 34, 840–853. (in Chinese with English abstract) [张海燕, 樊江文, 邵全琴 (2015) 2000–2010年中国退牧还草工程区土地利用/覆被变化. *地理科学进展*, 34, 840–853.]
- Zhang JQ, Chen C, Zhang ZY (2005) Evaluation of tourist resources and analysis of development condition in Ziwuling Natural Reserve. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 33(5), 44–48, 52. (in Chinese with English abstract) [张景群, 陈诚, 张兆胤 (2005) 子午岭自然保护区旅游资源与开发利用评价. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 33(5), 44–48, 52.]
- Zhang M (2015) Shocking pollution of the Yellow River, *Ecological Economy*, 31(2), 6–9. (in Chinese) [张敏 (2015) 触目惊心的黄河污染. *生态经济*, 31(2), 6–9.]
- Zhang R, Wang YM, Chang JX, Li YY (2019) Response of land use change to human activities in the Yellow River basin based on water resources division. *Journal of Natural Resources*, 34, 274–287. (in Chinese with English abstract) [张冉, 王义民, 畅建霞, 黎云云 (2019) 基于水资源分区

- 的黄河流域土地利用变化对人类活动的响应. 自然资源学报, 34, 274–287.]
- Zhang XT, Yu FW (2012) Analysis of the matching status between economic development and water resources in the Yellow River basin. *China Population, Resources and Environment*, 22(10), 1–6. (in Chinese with English abstract) [张晓涛, 于法稳 (2012) 黄河流域经济发展与水资源匹配状况分析. *中国人口·资源与环境*, 22(10), 1–6.]
- Zhang ZX, Hu CH, Li SH, Wang JJ, Li XM (2015) Temporal and spatial variation characteristics of extreme temperature index from 1961 to 2010 in the Yellow River basin. *Meteorological and Environmental Sciences*, 38(2), 48–53. (in Chinese with English abstract) [张照玺, 胡彩虹, 李世豪, 王纪军, 李雪梅 (2015) 黄河流域1961–2010年极端气温指数的时空变化特征. *气象与环境科学*, 38(2), 48–53.]
- Zhao JJ, Liu Y, Zhu YK, Qin SL, Wang YH, Miao CH (2020) Spatiotemporal differentiation and influencing factors of the coupling and coordinated development of new urbanization and ecological environment in the Yellow River basin. *Resources Science*, 42, 159–171. (in Chinese with English abstract) [赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 秦胜利, 王艳华, 苗长虹 (2020) 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素. *资源科学*, 42, 159–171.]
- Zhao WX, Song JJ, Yu CY, Liu Y, Liu YW, Guan SG, Yu DD (2017) Research progress on invasion and dispersion of *Bullacta exarata* in the Yellow River Delta. *Ocean Development and Management*, 34(S2), 142–147. (in Chinese with English abstract) [赵文溪, 宋静静, 于超勇, 刘莹, 刘元文, 官曙光, 于道德 (2017) 黄河三角洲区域泥螺入侵与扩散研究进展. *海洋开发与管理*, 34(S2), 142–147.]
- Zhou XY, Jin WR, Han YH, Gao HW, Chen YY (2010) Species diversity of wild fishes and its protection measures in ecological protection zone of Qinling Mountains. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 29, 403–408. (in Chinese with English abstract) [周小愿, 金卫荣, 韩亚慧, 高宏伟, 陈媛媛 (2010) 秦岭生态保护区野生鱼类的物种多样性及其保护对策. *山地农业生物学报*, 29, 403–408.]
- Zhu SW, Pan XL, Li XQ, Liu C (2012) Effects of exotic species *Spartina anglica* on ecological environment of the Yellow River Delta. *Shandong Agricultural Sciences*, 44(3), 73–75, 83. (in Chinese with English abstract) [朱士文, 潘秀莲, 李秀启, 刘超 (2012) 外来物种米草对黄河三角洲生态环境的影响. *山东农业科学*, 44(3), 73–75, 83.]

(责任编辑: 徐卫华 责任编辑: 黄祥忠)



•研究报告•

黄河流域鸟类多样性现状、分布格局及保护空缺

段菲 李晟*

(北京大学生命科学学院, 北京 100871)

摘要: 黄河流域幅员辽阔, 多样的地理气候、植被类型及人类活动塑造了多样化的生物多样性格局。本研究以IUCN与国际鸟盟发布的鸟类分布图层为基础, 同时收集了黄河流域2009–2019年的鸟类实地观测记录, 包括观鸟记录、GBIF数据库、红外相机监测及其他实地调查的鸟类数据, 共得到35,026条鸟类实地观测有效记录。汇总结果显示, 黄河流域记录有鸟类物种662种, 占中国鸟类物种总数的45.81%。这些鸟类分属于23目83科, 其中雀形目物种数最多(384种, 占本目全国物种总数的46.83%), 其次为鸽形目(67种, 占50.00%)和雁形目(39种, 占72.22%)。黄河流域受威胁鸟类共计121种, 其中有37种和52种分别在IUCN红色名录和《中国脊椎动物红色名录》中被列为受威胁物种(即评估级别为极危、濒危或易危), 22种和73种被分别列为国家I级和II级重点保护野生动物。这些受威胁鸟种多为地栖性、体型大、营养级高或具有长距离迁徙习性的物种。黄河流域鸟类整体物种多样性由南向北递减, 以黄河上中游四川、甘肃、陕西的高原与山地内鸟种最为丰富, 而受威胁鸟类物种多样性热点区则在黄河中下游, 下游黄河三角洲及邻近平原区为受威胁鸟类最主要集中分布区。黄河流域内48个国家级自然保护区共覆盖鸟种数504种(占黄河流域鸟类总种数的76.13%), 其中受威胁鸟种92种(占黄河流域受威胁鸟种数的76.03%)。区域内国家级自然保护区大多分布在黄河上游, 对黄河下游的受威胁物种覆盖程度较低, 保护空缺较严重。对此, 我们建议着重加强中下游自然保护区建设与能力提升, 增加对中下游受威胁鸟种的保护力度, 在保护策略上应当积极探索高强度土地利用下的多样化保护机制。

关键词: 黄河流域; 鸟类多样性; 受威胁鸟类; 分布格局; 物种编目; 自然保护区; 保护空缺

The status, distribution patterns, and conservation gap for bird diversity in the Yellow River basin, China

Fei Duan, Sheng Li*

School of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871

Abstract: The Yellow River basin has diverse geographical conditions, climatic conditions, vegetation types, and human activities, all of which shapes the biodiversity patterns for different taxa across this region. Here, we collected bird occurrence data in the Yellow River basin during 2009–2019. We combined data from the range layers published by the IUCN and BirdLife International with 35,026 field observation records (i.e., birdwatching records from the China Bird Report, eBird, and GBIF, camera-trapping records and other field records). We identified 662 bird species (accounting for 45.81% of the total number of bird species in China) occurring in the Yellow River basin, belonging to 23 orders and 83 families. Passeriformes has the highest number of species (384, accounting for 46.83% of the species of this order in China), followed by Charadriiformes (67 species, 50.00%) and Anseriformes (39 species, 72.22%). We identified 121 species that are considered threatened. From these species, 37 are listed by the IUCN Red List and 52 species are listed by the Red List of China's Vertebrates as threatened (i.e., CR, EN or VU), and 22 species are listed as Class-I and 73 species as Class-II national key protected species in China. Birds listed as threatened were typically characterized by having a terrestrial lifestyle, large body size, high trophic level, and migrated long distances. Total species richness was observed on a gradient decreasing from south to north. The southern upriver areas of plateaus and mountains in Sichuan, Gansu, and Shaanxi had the highest species richness. However,

收稿日期: 2020-06-29; 接受日期: 2020-09-28

基金项目: 生态环境部生物多样性调查、观测与评估项目(2019HJ2096001006)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: shengli@pku.edu.cn

threatened bird richness showed a different spatial pattern with hotspots primarily located in the middle and lower reaches of Yellow River, especially on the lowlands near the delta. We identified 48 national nature reserves in the Yellow River basin, covering a total of 504 bird species (76.13% of the region), among which 92 were threatened (76.03%). These national nature reserves were mostly located in the upper reaches of the Yellow River. The coverage of threatened species in the lower reaches was low, which indicates a major gap on protected area coverage. We propose the need to strengthen the construction of protected areas in the middle and lower reaches, specifically for the protection of threatened birds. To conserve the rich bird diversity under high-intensity land use in the Yellow River basin, an integrative framework with diversified conservation strategies is critically needed.

Key words: Yellow River basin; bird diversity; threatened birds; distribution pattern; species inventory; protected area; conservation gap

黄河全长约5,464 km, 为我国第二长河, 自西而东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原四个地貌单元(贺振和贺俊平, 2012)。区域内山脉蜿蜒, 海拔范围跨度大, 地貌多样, 包括山地、平原、丘陵地带。整个黄河流域属于中纬度地带, 区域内各地区间因地形与大气环流、季风环流影响, 气候差异比较明显。黄河流经青海、甘肃、陕西、山西、山东等9个省区。在我国政治、经济、文化发展过程中, 人类活动对黄河流域的影响逐渐增加。黄河流域多样的自然地理条件、气候植被类型及人类活动历史等因素决定了区域内生物物种的分布、组成与多样性空间格局。

鸟类是生态系统中重要的功能类群, 在自然生态系统中占据不同的营养级, 具有控制猎物种群、清理动物残骸、传播植物种子、促进物质循环等重要的生态功能(Sekercioglu, 2006)。同时, 鸟类对自然或人为造成的环境变化反应比较敏感, 数量众多、分布广泛且易于观察, 因此经常被作为生物多样性监测中的指示动物类群(Bryce et al, 2002; Gregory et al, 2003)。黄河流域内鸟类物种丰富, 区内草原、森林、湿地、农田等多种多样的环境为不同的鸟类物种提供了适宜生境。例如, 黄河流域内的湿地是很多迁徙鸟类的重要繁殖地、停歇地或越冬地。黄河上游的四川若尔盖湿地是青藏高原特有物种黑颈鹤(*Grus nigricollis*)的重要繁殖地(蒋政权等, 2014), 而下游的黄河三角洲滨海湿地是东亚-澳大利西亚迁徙路线(East Asian-Australasian flyway)上众多涉禽、游禽类候鸟的重要中转停歇地(Li et al, 2019)。然而, 我们目前对黄河流域范围内整体的鸟类物种多样性现状及其空间分布格局仍了解较少, 区域内现有保护地网络对受威胁鸟类物

种的覆盖情况也缺乏系统研究。这些信息的缺乏已成为全流域生物多样性保护规划与管理中亟待解决的问题。

对生物多样性进行长期系统的监测是保护生物多样性的基础, 由此我们可以进行生物多样性保护成效的评估, 制定合理的保护策略与规划(马克平, 2011)。我国是全球鸟类多样性最丰富的国家之一, 《中国鸟类分类与分布名录(第三版)》共收录我国鸟类1,445种, 隶属于26目109科497属, 包括我国特有鸟类93种(郑光美, 2017)。长期以来, 我国已开展了大量的鸟类多样性基础性调查编目工作和动态监测工作, 包括鸟类环志、样线调查等(崔鹏等, 2013)。近年来, 我国还建立了全国鸟类多样性观测网络(China BON-Birds), 在多省区开展繁殖期鸟类和越冬水鸟观测。初步观测结果发现, 部分滨海湿地作为越冬水鸟栖息地, 因围垦开发, 生态环境破坏严重, 在此越冬的水鸟生存情况面临威胁(徐海根等, 2018)。

除了环志、样点/样线调查等传统监测手段, 近20年公众科学(citizen science)活动(张健等, 2013)和红外相机监测(李晟等, 2014; 朱淑怡等, 2017)的快速发展也为我国的鸟类监测提供了新的手段与思路。公众科学活动招募社会公众共同参与野外观测、数据收集与数据处理, 为科学研究与保护管理提供了广泛且大量的数据与资源, 极大地推动了相关领域的数据积累与研究进程(Miller-Rushing et al, 2012)。观鸟(bird watching)是一类广受欢迎的公众科学活动, 同时也是一种自然文化活动, 近年来在中国吸引了越来越多的观鸟爱好者参与其中。许多省市成立了观鸟协会, 如成都观鸟协会(<http://www.scbirds.org.cn>)、福建省观鸟会([http://](http://www.scbirds.org.cn)

www.fjbirds.org)等, 积极地推动观鸟活动的开展与普及。与此同时, 国内也建立了中国观鸟记录中心(<http://www.birdreport.cn/>)等观鸟记录平台, 供观鸟爱好者提交与分享观鸟记录, 并建立有专家审核的制度, 以保证发布记录的可靠性。这些观鸟记录包含鸟种信息、观测时间、观测地点、观测记录者等信息, 可以作为鸟类监测的基础数据, 用于进一步的分析研究(斯幸峰和丁平, 2011; 李雪艳等, 2012; 张健等, 2013)。红外相机技术作为一种非损伤性调查手段, 在我国鸟类多样性监测和区域性编目工作中也起到了重要的作用。红外相机技术主要适用于对鸡形目等地栖型鸟类及林下层活动的鸟类进行探测与记录(Li et al, 2010; 李晟等, 2014; 朱淑怡等, 2017), 在森林中上层专门设置的红外相机也可用于监测部分林冠层鸟类(房以好等, 2018)。随着红外相机在各省区的广泛应用, 这些红外相机监测网络也为区域性和全国的鸟类多样性编目与监测提供了大量的高精度、高质量的鸟类物种分布数据(朱淑怡等, 2017)。

本研究以黄河流域的鸟类为研究对象, 以IUCN红色名录鸟类分布图层为基础, 收集汇总黄河流域来源于观鸟记录、GBIF数据库、红外相机监测与其他实地调查的鸟类实地观测数据, 主要用于以下分析: (1)系统评估黄河流域内鸟类物种组成, 完善黄河区域鸟类编目, 为保护管理提供基础性本底数据; (2)结合多样性现状, 探究黄河流域鸟类多样性的空间分布格局; (3)结合当前国家级自然保护区的空间分布, 探究目前自然保护区空缺情况。本研究的结果将为黄河流域鸟类多样性的保护提供可靠的基础信息, 可以为全流域保护策略、保护规划的制定提供参考。

1 研究方法

1.1 物种记录与编目

本研究以黄河流域作为研究区域, 空间范围依据中国科学院地理科学与资源研究所的资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)发布的中国一级河流域矢量图层。在ArcGIS 10.5中把黄河流域范围的矢量图层转换为Asia North Albers Equal Area Conic投影坐标系, 流域的投影面积为 $80.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。区域内鸟类分布数据来源包括IUCN分布数据与实地观测数据。其中IUCN分布数据来

源于IUCN红色名录(<https://www.iucnredlist.org/>)与国际鸟盟(BirdLife International, <http://www.birdlife.org/>)发布的全球鸟类物种分布数据。下载全球鸟类分布数据(v10, ArcGIS Shapefile格式)后, 在ArcGIS 10.5中按黄河流域边界进行裁剪, 得到在黄河流域有分布的鸟类物种名单。鸟类实地观测数据来源于以下4个方面: (1)公众科学观鸟记录数据, 包括中国观鸟记录中心(<http://www.birdreport.cn/>)中自1998年至今在黄河流域范围内的正式发布记录; (2)eBird观鸟数据集(<https://ebird.org/>)在黄河流域范围内的正式发布记录; (3)全球生物多样性信息网络(Global Biodiversity Information Facility, GBIF)提供的除eBird数据集外的黄河流域范围内鸟类物种分布记录(GBIF Occurrence Download, <https://doi.org/10.15468/dl.epjhxv>); (4)其他鸟类分布记录, 包括红外相机监测的鸟类记录数据, 黄河流域内公开发表的红外相机监测数据中鸟类物种的分布记录(朱淑怡等, 2017), 以及研究区域内公开发表的研究文献中的鸟类区域性分布记录(附录1)。我们对不同的数据集采取统一的时间范围, 选用2009–2019年间的记录。

以《中国鸟类分类与分布名录(第三版)》(郑光美, 2017)为分类参考系统。对实地观测数据, 结合ArcGIS 10.5 (ESRI Inc., USA)与GoogleMap (<https://www.google.com/maps>)获得各记录点的经纬度坐标信息。单个鸟种在单个位点上被观测到(无论在该位点被观测到多少次以及多少个体)记为1条有效记录。对不同来源的鸟类实地观测记录数据进行审核, 删除存在明显错误与偏差的记录以及存疑记录, 对相同位点的同一鸟种记录进行去重。整理后共得到35,026条有效记录(图1, 表1, 附录2)。

1.2 多样性空间分布

本研究以黄河流域作为研究区域, 以IUCN物种分布图层为基础, 分析研究区域内鸟类物种多样性的空间分布。在ArcGIS 10.5中按黄河流域边界裁剪后的鸟类分布矢量图层转换为Asia North Albers Equal Area Conic投影坐标系的栅格图层, 栅格空间分辨率为1 km。对全部物种的栅格图层进行叠加, 计算每个 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 像素中的鸟类物种数, 得到黄河流域的鸟类物种多样性(species richness)的空间分布图。

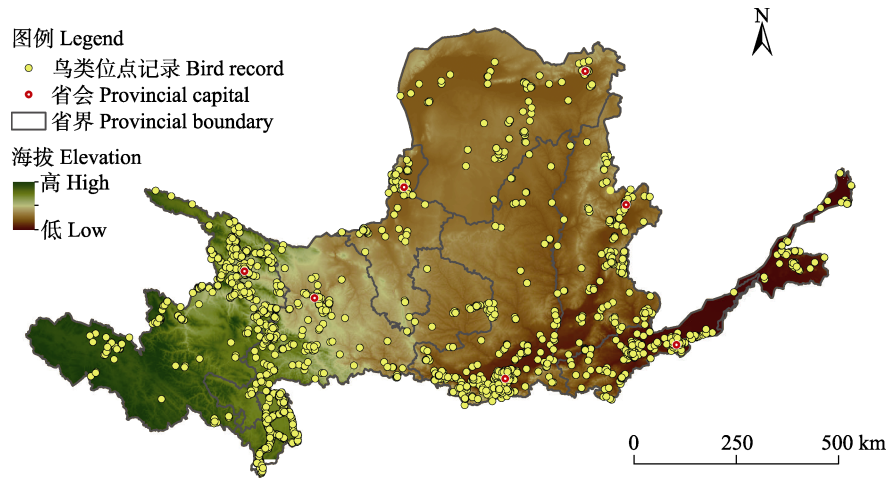


图1 黄河流域2009–2019年鸟类实地观测记录位点

Fig. 1 Locations of bird observation records in the Yellow River basin during 2009–2019

表1 黄河流域2009–2019年鸟类实地观测记录来源与数据量

Table 1 Summary of bird field observation data in the Yellow River basin during 2009–2019

数据来源 Data source	起止时间 Time	有效记录条目数 No. of valid records	鸟种数 No. of recorded species
中国观鸟记录中心 China Birdreport	2009.1–2019.6	20,112	576
eBird数据库 eBird dataset	2009.5–2019.6	14,387	488
GBIF数据库(不包含eBird) GBIF dataset (eBird excluded)	2009.5–2019.6	197	197
其他分布记录(红外相机监测数据及文献记录) Other records (camera-trapping surveys and literature records)	2011–2019	330	163
合计 Total		35,026	598

1.3 自然保护区空缺分析

筛选出研究区域内的受威胁鸟种, 筛选标准为: (1)在IUCN红色名录中被评估为极危(CR)、濒危(EN)和易危(VU)的物种; (2)在《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016)中被评估为极危(CR)、濒危(EN)和易危(VU)的物种; (3)被列为中国国家I级和II级重点保护野生动物的物种。基于多样性空间分布分析中得到的鸟类物种多样性空间分布图层, 计算每个1 km × 1 km像素中的受威胁鸟类物种数。将黄河流域内有边界图层的48个国家级自然保护区(附录3)边界的矢量图层与受威胁鸟种的分布图层进行叠加, 评估这些受威胁鸟类物种被国家级保护区覆盖的数量、比例与自然保护区空缺。

2 结果

2.1 鸟类物种多样性及组成

研究结果显示, IUCN分布数据中黄河流域共包含鸟类525种, 实地观测数据中共包含鸟类598种;

两者汇总后, 黄河流域共记录有鸟类物种662种(表2, 附录2), 占全国鸟类物种总数的45.81% (郑光美, 2017)。这662种鸟类分属于23目83科, 其中雀形目物种数最多, 共384种(占本目全国鸟种总数的46.83%), 其次为鸽形目(67种, 占50.00%)和雁形目(39种, 占72.22%)。除红鹳目(100%)外, 鸊鷉目被记录到的物种比例最高, 占本目全国鸟种总数的80.00%, 其次为雁形目(72.22%)和沙鸡目(66.67%)。在雀形目中, 科的水平上记录到物种数最多的依次是鹡鸰科(62种)、燕雀科(41种)与柳莺科(34种)。有分属9目的27科各自仅记录到1个物种(附录2)。

2.2 受威胁鸟种组成及特征

黄河流域受威胁鸟类共121种, 分属13目27科。其中, 在IUCN红色名录中被评估为极危(CR)的有3种, 分别为青头潜鸭(*Aythya baeri*)、白鹤(*Grus leucogeranus*)、黄胸鹀(*Emberiza aureola*); 评估为濒危(EN)的有9种, 包括中华秋沙鸭(*Mergus squamatus*)、大杓鹀(*Numenius madagascariensis*)、

表2 黄河流域鸟类物种组成及其在国内占比情况

Table 2 Number of bird species recorded in the Yellow River basin and their proportion in China

类群 Taxonomic group	记录物种数 No. of species	全国物种数 Total no. of species in China	%	类群 Taxonomic group	记录物种数 No. of species	全国物种数 Total no. of species in China	%
鸡形目 Galliformes	21	64	32.81	扇尾莺科 Cisticolidae	2	11	18.18
雁形目 Anseriformes	39	54	72.22	苇莺科 Acrocephalidae	4	16	25.00
鸚鵡目 Podicipediformes	4	5	80.00	鳞胸鸚鵡科 Pnoeypygidae	1	4	25.00
红鸚目 Phoenicopteriformes	1	1	100.00	蝗莺科 Locustellidae	7	18	38.89
鸽形目 Columbiformes	8	31	25.81	燕科 Hirundinidae	7	14	50.00
沙鸡目 Pteroclidiformes	2	3	66.67	鸭科 Pycnonotidae	5	22	22.73
夜鹰目 Caprimulgiformes	5	22	22.73	柳莺科 Phylloscopidae	34	50	68.00
鸚形目 Cuculiformes	10	20	50.00	树莺科 Cettiidae	10	19	52.63
鸚形目 Otidiformes	1	3	33.33	长尾山雀科 Aegithalidae	7	8	87.50
鹤形目 Gruiformes	17	29	58.62	莺鹟科 Sylviidae	18	37	48.65
鸚形目 Charadriiformes	67	134	50.00	绣眼鸟科 Zosteropidae	5	12	41.67
潜鸟目 Gaviiformes	2	4	50.00	林鸚科 Timaliidae	4	27	14.81
鸚形目 Procellariiformes	2	16	12.50	幽鸚科 Pellorneidae	1	18	5.56
鸚形目 Ciconiiformes	2	7	28.57	噪鸚科 Leiothrichidae	15	68	22.06
鳾鸟目 Suliformes	4	11	36.36	旋木雀科 Certhiidae	4	7	57.14
鸚形目 Pelecaniformes	18	35	51.43	鸚科 Sittidae	5	12	41.67
鹰形目 Accipitriformes	35	55	63.64	鸚鹞科 Troglodytidae	1	1	100.00
鸚形目 Strigiformes	15	32	46.88	河乌科 Cinclidae	2	2	100.00
犀鸟目 Bucerotiformes	1	6	16.67	棕鸟科 Sturnidae	5	21	23.81
佛法僧目 Coraciiformes	5	23	21.74	鸚科 Turdidae	20	37	54.05
啄木鸟目 Piciformes	12	43	27.91	鸚科 Muscicapidae	62	105	59.05
隼形目 Falconiformes	7	12	58.33	戴菊科 Regulidae	1	2	50.00
雀形目 Passeriformes*	384	820	46.83	太平鸟科 Bombycillidae	2	2	100.00
黄鹡科 Oriolidae	1	7	14.29	啄花鸟科 Dicaeidae	3	6	50.00
莺雀科 Vireonidae	2	6	33.33	花蜜鸟科 Nectariniidae	1	13	7.69
山椒鸟科 Campephagidae	4	11	36.36	岩鸚科 Prunellidae	7	9	77.78
卷尾科 Dicruridae	3	7	42.86	朱鸚科 Urocynchramidae	1	1	100.00
王鸚科 Monarchidae	1	5	20.00	梅花雀科 Estrildidae	1	8	12.50
伯劳科 Laniidae	8	12	66.67	雀科 Passeridae	12	13	92.31
鸚科 Corvidae	15	29	51.72	鸚鹞科 Motacillidae	16	20	80.00
玉鸚科 Stenostiridae	1	2	50.00	燕雀科 Fringillidae	41	61	67.21
山雀科 Paridae	15	23	65.22	铁爪鸚科 Calcariidae	1	2	50.00
攀雀科 Remizidae	2	3	66.67	鸚科 Emberizidae	17	30	56.67
百灵科 Alaudidae	9	14	64.29				
文须雀科 Panuridae	1	1	100.00	合计 Total	662	1,445	45.81

*雀形目包含物种数较多, 各类群生态差异较大, 因此单列出各科记录物种数与比例。

*Passeriformes is the order of the highest number of species with broad variation of habitats, so details are listed for each family under Passeriformes.

东方白鸚(*Ciconia boyciana*)等; 评估为易危(VU)的有25种, 包括绿尾虹雉(*Lophophorus lhuysii*)、鸿雁(*Anser cygnoid*)、大鸚(*Otis tarda*)等。在《中国脊椎动物红色名录》中被评估为极危(CR)的有2种, 即青

头潜鸭、白鸚; 评估为濒危(EN)的有22种, 包括长尾鸭(*Clangula hyemalis*)、猎隼(*Falco cherrug*)、卷尾鸚鹞(*Pelecanus crispus*)等; 评估为易危(VU)的有28种, 包括红喉雉鸚(*Tetraophasis obscurus*)、斑胁田

鸡(*Zapornia paykullii*)、金雕(*Aquila chrysaetos*)等。被列为国家I级和II级重点保护野生动物的分别有22种与73种。在所有这些受威胁物种中,物种数最多的为鹰形目(34种,占总受威胁鸟种数的28.10%),其次为雀形目(18种,占14.88%)、鸮形目(15种,占12.40%)和雁形目及鸡形目(各13种,各占10.74%)。从生物特征看,这些受威胁鸟类包括3个主要的类群:(1)鸡形目的大型地栖留鸟,如斑尾榛鸡(*Bonasa sewerzowi*)、藏雪鸡(*Tetraogallus tibetanus*)等;(2)鹤类等具有长距离迁徙习性的大型鸟类,如蓑羽鹤(*Grus virgo*)、灰鹤(*G. grus*)、白头鹤(*G. monacha*)、黑颈鹤等;(3)在生态系统中处于高营养级的捕食性猛禽,如金雕(*Aquila chrysaetos*)、猎隼(*Falco*

cherrug)等。总体来看,黄河流域面临威胁的主要类群是地栖性、体型较大、营养级较高或具有长距离迁徙习性的鸟类物种。

2.3 鸟类多样性空间分布格局

鸟类物种多样性的空间分布结果显示,黄河流域鸟类物种多样性整体上呈现由南向北递减的格局:以黄河上中游四川北部、甘肃南部、陕西南部的高原与山地区域最为丰富,如四川西北部的若尔盖湿地,甘肃南部和陕西南部的秦岭北坡区域(图2a);在黄河流域下游的黄河三角洲及邻近平原区也有较高的多样性;而青海西部、宁夏北部和陕西北部到内蒙古南部区域的鸟类物种多样性则相对较低。

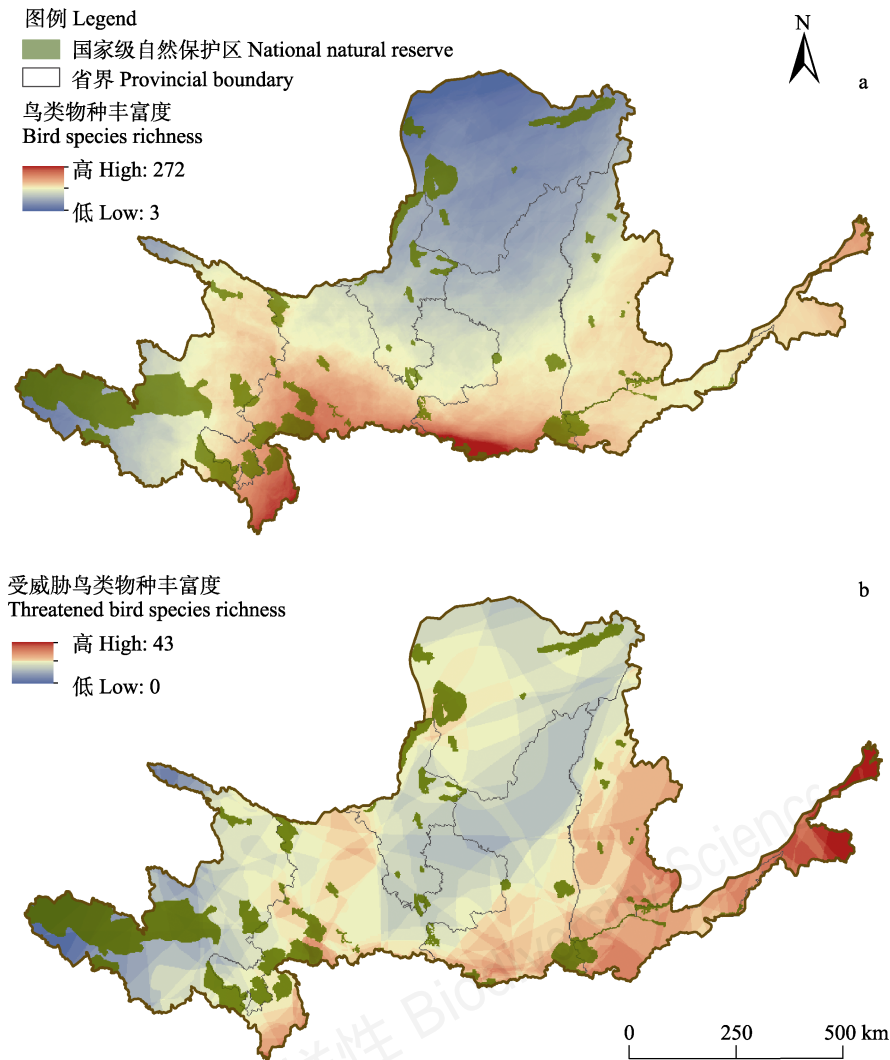


图2 黄河流域鸟类物种多样性空间分布。(a)全部鸟类物种;(b)受威胁鸟类物种。

Fig. 2 Bird species richness in the Yellow River basin. (a) All bird species; (b) Threatened bird species.

黄河流域受威胁鸟种多样性与全部鸟类多样性呈现不同的空间分布格局。受威胁鸟种的物种多样性整体上由东向西递减: 受威胁物种多样性热点区域在黄河中下游, 以山东东北部的黄河三角洲及下游平原区为最高, 河南北部、山西东南部次之; 四川西北部、甘肃南部、陕西南部的受威胁物种多样性也相对较高; 而青海西部、陕西北部、内蒙古南部的受威胁鸟类多样性相对较低(图 2b)。

2.4 自然保护区空缺

黄河流域有 48 个国家级自然保护区(附录 3), 在黄河流域内面积为 7.97 万 km², 共覆盖鸟类 504 种(占黄河流域总种数的 76.13%), 其中包含受威胁鸟类 92 种(占黄河流域受威胁鸟类种数的 76.03%)。国家级自然保护区覆盖了较多的鸟种数, 但是从空间分布来看, 这些国家级自然保护区大多分布在黄河上游, 如青海的三江源国家级自然保护区, 以及保护高原湿地生态系统的甘肃黄河首曲国家级自然保护区, 保护高寒沼泽湿地及黑颈鹤等珍稀物种的四川若尔盖湿地国家级自然保护区等。在黄河中游有以褐马鸡(*Crossoptilon mantchuricum*)为保护对象的陕西韩城黄龙山褐马鸡国家级自然保护区、延安黄龙山褐马鸡国家级自然保护区, 山西的庞泉沟国家级自然保护区、芦芽山国家级自然保护区、五鹿山国家级自然保护区等。在黄河下游有河南新乡黄河湿地鸟类国家级自然保护区和黄河三角洲国家级自然保护区。覆盖鸟类种数较多的有陕西周至国家级自然保护区、陕西太白山国家级自然保护区、甘肃洮河国家级自然保护区, 覆盖受威胁鸟种数较多的有黄河三角洲国家级自然保护区、河南新乡黄河湿地鸟类国家级自然保护区、山西蟒河猕猴国家级自然保护区。整体而言, 在黄河中下游, 国家级保护区覆盖面积较小, 对受威胁物种热点区的覆盖度比较低。黄河下游地区处于鸟类东亚-澳大利西亚迁徙路线上重要的停歇地, 该区域有可以为这些候鸟提供用于停歇、觅食的平原与湿地环境, 目前存在较大的自然保护区空缺(图 2)。

3 讨论

3.1 黄河流域鸟类分布现状与保护空缺

黄河流域多样的自然地理条件为不同的鸟类提供了栖息环境, 共覆盖了全国近一半的鸟类物种, 包含了不同生态类型的鸟类, 如栖息于高原沼泽

地、湖泊及河滩地带的黑颈鹤等, 栖息于高山灌丛、高山草甸和裸岩地带的雪鹑(*Lerwa lerwa*)等, 喜林中溪流、河谷、草甸、水塘的中华秋沙鸭等, 迁徙季出现于沿海沼泽、河口沙洲的大杓鹬等。从地理区系来看, 黄河流域处于秦岭-淮河线以北, 以古北种占优势(张荣祖, 2011)。从黄河流域整体鸟类多样性格局来看, 热点区域位于四川西北部及秦岭北坡, 受威胁鸟类的分布热点区位于黄河下游。黄河中下游区域有较多适宜鸟类栖息、停歇的平原、农田与滩涂湿地环境, 但目前国家级自然保护区覆盖程度较低。同时, 随着城市工业建设、农田利用、海水养殖业等的不断发展, 不同类型的湿地存在被占用和破坏的情况, 水域污染使得水质下降, 严重影响了湿地生物多样性和生态环境的健康发展(张晓龙等, 2007)。对此, 我们建议在本底调查的科研基础上, 对区域的物种资源和地理环境进行统一考量, 制定有效的长期保护规划, 保护及恢复湿地生态功能。在受威胁鸟类集中分布的关键区域采取多方措施加强保护力度, 包括新建保护区、提升现有保护区级别、建立保护小区、在非保护区的关键栖息地开展专项保护行动等, 以填补当前保护空缺。

3.2 保护与管理

3.2.1 完善黄河流域生物编目

生物编目作为自然地理区域的基础性本底资料, 在各个学科如生态学、生物地理学、保护生物学等均有广泛应用, 能为保护管理者在保护生物多样性、制定土地利用规划方案、评估环境影响等方面提供科学依据(马克平, 2015)。黄河流域是我国的重要生态区域, 在气候调节、资源配置、人类生产生活等方面都起到重要作用。完善该区域生物编目, 建立黄河流域生物多样性数据库, 能够为生物多样性和生物资源管理提供科学数据, 进而研究生物多样性空间分布及形成机制, 开展长期动态监测。我们建议逐步完善黄河流域各物种的编目, 开展生物编目和监测项目, 进行野外的物种调查、各平台机构的数据收集并请各物种类群的专家进行数据的筛选鉴定, 最后建立黄河流域生物多样性数据库, 并根据不同物种的属性设定长期监测方案或种群动态跟踪调查等, 以便及时更新数据库, 保证本底资料的有效性和科学性。此外, 黄河流域作为人类高度影响的区域, 在进行监测项目的时候, 要在进

行生物数据调查的同时, 兼顾人类活动数据的调查与更新。

3.2.2 加强中下游自然保护区建设与能力提升

对于目前黄河中下游存在的保护空缺, 我们建议提高黄河流域中下游自然保护区的建设能力, 合理有效提升物种保护经验和技術, 制定和完善保护与管理法规, 对于围垦开发, 应当加强规范湿地垦殖的制度, 严禁对生物多样性热点区进行过度开发, 加强湿地生态重建是维持及恢复区域多样性的重要任务。

在过去的50年中, 黄河三角洲湿地生态系统发生了巨大变化, 主要是黄河径流和泥沙排放量减少以及石油勘探、道路建设和沼泽开垦的增加所致, 使得自然湿地和鸟类栖息地发生退化(Cao et al, 2008; Bi et al, 2011; Wang et al, 2013)。黄河三角洲国家级自然保护区是以保护新生湿地生态系统和濒危鸟类为主的湿地自然保护区, 其丰富的浮游生物吸引了大量过境和生存繁殖的鸟类, 是黑嘴鸥(*Saundersilarus saundersi*)的全球三大繁殖地之一, 是东方白鹳(*Ciconia boyciana*)重要的繁殖栖息地(丁洪安, 2013)。对于迁徙的水鸟而言, 潮间带是其主要停歇区, 沿海滩涂的质量和可利用性对其迁徙中途补充能量进而继续迁徙有重要影响, 目前的研究低估了其迁徙路线上的热点区域, 对其中途停歇地的保护力度还应加强(Li et al, 2019)。对于迁徙物种应定期监测其动态、种群数量的变化、活动范围、栖息地的资源环境变化、景观破碎程度等, 以便对其越冬地及中途停歇地采取有效保护措施。因此需要更多地监测识别迁徙物种越冬地、停歇地, 增加保护面积, 提高保护效率。

3.2.3 探索高强度土地利用下的多样化保护机制

在黄河流域人口密集、土地利用率高的区域, 如何在保护物种栖息地的同时保障地区经济持续发展及经济效益不受损失是当前需要探讨的问题。比如黄河河套地区至中下游地区的麦田是大鸨最重要的越冬地, 很多地区的农田区在冬季能够为越冬的鹤类、雁类提供谷粒等主要食物(Li et al, 2020)。人类农业活动密集的区域其实可以为很多鸟类提供食物资源, 如濒危物种黄胸鹀喜出现在稻田、自然湿地、草丛中, 以植物种子为食, 但是近年来因为人类过度捕捉而濒临灭绝。这种情况下, 必须脱离传统的保护模式, 不能将人类用地与生物

多样性热点区域分开考虑, 而应探索新的多样化的保护机制, 使得城市用地、农业用地与物种栖息地成为一个互惠的生态体系。从以往单一物种的保护发展到对整个生态系统的可持续保护, 把自然资源、地理环境、农业生产、围垦开发等作为影响因素, 把物种保护成效、经济产出等作为影响结果, 建立更为全面的物种保护机制。

4 展望

本研究通过整合多源的鸟类观测数据, 分析了黄河流域鸟类多样性现状、空间分布格局及保护空缺。以IUCN物种分布图层为代表的全球物种多样性数据具有物种覆盖面全、数据开放等优势, 适合用于大尺度分析与保护规划; 但在用于区域尺度(例如流域)的具体分析时, 这类数据也存在空间分辨率粗糙、难以核实、容易高估实际分布区等局限。鸟类实地观测数据具有数据覆盖面广、数据量大、准确度较高等特点, 是对传统鸟类监测体系的补充。随着公众科学的不断发展, 观鸟爱好者的逐渐增多, 未来还会不断有数据的更新与积累, 能够更进一步推动科研工作的发展。在今后的研究中, 可以把这些基于实地观测、包含空间位置信息的数据与多源环境变量(例如地形、气候、植被、土地利用、人类活动强度等)相结合, 使用物种分布模型(species distribution models, SDMs)对各鸟类物种的适宜栖息地和潜在分布区进行预测, 获得整个区域内更高空间分辨率、空间覆盖更为全面的鸟类多样性分布数据, 为大尺度保护规划的落地和局域尺度上的精细管理提供支持。我们提倡积极对多源数据进行整合, 建立共享平台, 充分利用各方数据, 提升鸟类多样性的监测能力, 提高鸟类分布数据的精度, 利用公众科学数据逐步完善区域监测网络, 为黄河流域的生态规划提供科学依据, 推动黄河流域生态安全建设。

致谢: 感谢中国观鸟记录中心、eBird、GBIF平台提供的开放数据。感谢北京大学薛皓晨、刘宗壮在鸟类位点核对中提供的帮助, 感谢朱淑怡在红外相机文献汇总与相关鸟类数据整理中的协助, 感谢阙品甲博士和申小莉博士在鸟类分布记录审核中提供的帮助。

参考文献

- Bi XL, Wang B, Lu QS (2011) Fragmentation effects of oil wells and roads on the Yellow River Delta, North China. *Ocean & Coastal Management*, 54, 256–264.
- Bryce SA, Hughes RM, Kaufmann PR (2002) Development of a bird integrity index: Using bird assemblages as indicators of riparian condition. *Environmental Management*, 30, 294–310.
- Cao MC, Liu GH (2008) Habitat suitability change of red-crowned crane in Yellow River Delta Nature Reserve. *Journal of Forestry Research*, 19, 141–147.
- Cui P, Xu HG, Ding H, Wu J, Cao MC, Chen L (2013) Status quo, problems and countermeasures of birds monitoring in China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 29, 403–408. (in Chinese with English abstract) [崔鹏, 徐海根, 丁晖, 吴军, 曹铭昌, 陈炼 (2013) 我国鸟类监测的现状、问题与对策. *生态与农村环境学报*, 29, 403–408.]
- Ding HA (2013) Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve. *Wetland Science and Management*, (3), 2–3. (in Chinese) [丁洪安 (2013) 山东黄河三角洲国家级自然保护区. *湿地科学与管理*, (3), 2–3.]
- Fang YH, Ren GP, Gao Y, Zhang SX, Wang HH, Li YP, Huang ZP, Cui LW, Xiao W (2018) Impact of ground and canopy camera-trapping installation on wildlife monitoring. *Biodiversity Science*, 26, 717–726. (in Chinese with English abstract) [房以好, 任国鹏, 高颖, 张淑霞, 王浩瀚, 李延鹏, 黄志旁, 崔亮伟, 肖文 (2018) 红外相机安放于地面和林冠层对野生动物监测结果的影响. *生物多样性*, 26, 717–726.]
- Gregory RD, Noble DG, Field RH, Marchant JH, Gibbons DW (2003) Using birds as indicators of biodiversity. *Ornis Hungarica*, 12, 11–24.
- He Z, He JP (2012) Spatio-temporal variation of vegetation cover based on SPOT-VGT in Yellow River Basin. *Ecology and Environmental Sciences*, 21, 1654–1659. (in Chinese with English abstract) [贺振, 贺俊平 (2012) 基于 SPOT-VGT 的黄河流域植被覆盖时空演变. *生态环境学报*, 21, 1655–1659.]
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red List of China's Vertebrates. *Biodiversity Science*, 24, 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. *生物多样性*, 24, 500–551.]
- Jiang ZQ, Li FS, Ran JH, Zhang B, Wang B, Zhang M, Li H (2014) Numbers and breeding success of black-necked cranes (*Grus nigricollis*) at Ruergai Nature Reserve, Sichuan Province. *Zoological Research*, 35, 12833. (in Chinese with English abstract) [蒋政权, 李凤山, 冉江洪, 张波, 王彬, 张曼, 李华 (2014) 四川若尔盖湿地国家级自然保护区黑颈鹤种群数量及繁殖. *动物学研究*, 35, 128–133.]
- Li J, Hughes AC, Dudgeon D (2019) Mapping wader biodiversity along the East Asian–Australasian flyway. *PLoS ONE*, 14, e0210552.
- Li L, Hu RC, Huang JK, Bürgi M, Zhu ZY, Zhong J, Lü Z (2020) A farmland biodiversity strategy is needed for China. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 772–774.
- Li S, McShea WJ, Wang DJ, Shao LK, Shi XG (2010) The use of infrared-triggered cameras for surveying phasianids in Sichuan Province, China. *Ibis*, 152, 299–309.
- Li S, Wang DJ, Xiao ZS, Li XH, Wang TM, Feng LM, Wang Y (2014) Camera-trapping in wildlife research and conservation in China: Review and outlook. *Biodiversity Science*, 22, 685–695. (in Chinese with English abstract) [李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云 (2014) 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景. *生物多样性*, 22, 685–695.]
- Li XY, Liang L, Gong P, Liu Y, Liang FF (2012) Bird watching in China reveals bird distribution changes. *Chinese Science Bulletin*, 57, 2956–2963. (in Chinese) [李雪艳, 梁璐, 宫鹏, 刘阳, 梁菲菲 (2012) 中国观鸟数据揭示鸟类分布变化. *科学通报*, 57, 2956–2963.]
- Ma KP (2011) Assessing progress of biodiversity conservation with monitoring approach. *Biodiversity Science*, 19, 125–126. (in Chinese) [马克平 (2011) 监测是评估生物多样性保护进展的有效途径. *生物多样性*, 19, 125–126.]
- Ma KP (2015) Species catalogue of China: A remarkable achievement in the field of biodiversity science in China. *Biodiversity Science*, 23, 137–138. (in Chinese) [马克平 (2015) 中国生物多样性编目取得重要进展. *生物多样性*, 23, 137–138.]
- Miller-Rushing AJ, Primack RB, Bonney R (2012) The history of public participation in ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10, 285–290.
- Sekercioglu CH (2006) Increasing awareness of avian ecological function. *Trends in Ecology & Evolution*, 21, 464–471.
- Si XF, Ding P (2011) History, status of monitoring land birds in Europe and America and countermeasures of China. *Biodiversity Science*, 19, 303–310. (in Chinese with English abstract) [斯幸峰, 丁平 (2011) 欧美陆地鸟类监测的历史、现状与我国的对策. *生物多样性*, 19, 303–310.]
- Wang H, Gao J, Ren LL, Kong Y, Li H, Li L (2013) Assessment of the red-crowned crane habitat in the Yellow River Delta Nature Reserve, East China. *Regional*

- Environmental Change, 13, 115–123.
- Xu HG, Cui P, Zhu XJ, Yong F, Yi JF, Zhang WW, Li JQ, Tong WJ, Jiang B, Cai L (2018) Progress in construction of China Bird Diversity Observation Network (China BON-Birds). *Journal of Ecology and Rural Environment*, 34, 1–11. (in Chinese with English abstract) [徐海根, 崔鹏, 朱筱佳, 雍凡, 伊剑锋, 张文文, 李佳琦, 童文君, 江波, 蔡蕾 (2018) 全国鸟类多样性观测网络 (China BON-Birds) 建设进展. *生态与农村环境学报*, 34, 1–11.]
- Zhang J, Chen SB, Chen B, Du YJ, Huang XL, Pan XB, Zhang Q (2013) Citizen science: Integrating scientific research, ecological conservation and public participation. *Biodiversity Science*, 21, 738–749. (in Chinese with English abstract) [张健, 陈圣宾, 陈彬, 杜彦君, 黄晓磊, 潘绪斌, 张强 (2013) 公众科学: 整合科学研究、生态保护和公众参与. *生物多样性*, 21, 738–749.]
- Zhang RZ (2011) *Zoogeography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (2011) 中国动物地理. 科学出版社, 北京.]
- Zhang XL, Li PY, Liu YL, Xu XY, Cao CX, Shan K (2007) Studies on the wetland of the Yellow River Delta: A review. *Marine Sciences*, 31(7), 81–85. (in Chinese) [张晓龙, 李培英, 刘月良, 徐兴永, 曹成效, 单凯 (2007) 黄河三角洲湿地研究进展. *海洋科学*, 31(7), 81–85.]
- Zheng GM (2017) *A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China*, 3rd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2017) 中国鸟类分类与分布名录(第三版). 科学出版社, 北京.]
- Zhu SY, Duan F, Li S (2017) Promoting diversity inventory and monitoring of birds through the camera-trapping network in China: Status, challenges and future outlook. *Biodiversity Science*, 25, 1114–122. (in Chinese with English abstract) [朱淑怡, 段菲, 李晟 (2017) 基于红外相机网络促进我国鸟类多样性监测: 现状、问题与前景. *生物多样性*, 25, 1114–1122.]

(责任编辑: 王彦平 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 黄河流域内部分鸟类研究文献及会议论文

Appendix 1 Supplement of literature and conference data of bird records in the Yellow River basin, China
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020259-1.pdf>

附录2 黄河流域鸟类物种名录(数据截至2019年9月)

Appendix 2 List of bird species in the Yellow River basin, China (Updated by September, 2019)
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020259-2.pdf>

附录3 黄河流域的国家级自然保护区

Appendix 3 List of national nature reserves in the Yellow River basin, China
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020259-3.pdf>

段菲, 李晟 (2020) 黄河流域鸟类多样性现状、分布格局及保护空缺. 生物多样性, 28(12): 1459–1468.
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020259>

附录1 黄河流域内部分鸟类研究文献及会议论文

Appendix 1 Supplement of literature and conference data of bird records in the Yellow River basin, China

年份	题目	期刊
Year	Title	Journal
2011	甘肃省鸟类新纪录——白腰文鸟	四川动物
2013	红外触发相机在贺兰山自然保护区野生动物监测中的应用研究	宁夏农业科技
2015	红外自动相机技术在野生动物监测中的应用——以历山国家级自然保护区为例	山西林业科技
2016	周至自然保护区鸟类多样性动态监测	陕西林业科技
2016	运用红外相机对太行山猕猴国家级自然保护区(济源)鸟兽多样性的调查	兽类学报
2016	太白山自然保护区大熊猫冬栖地动物多样性监测	陕西林业科技
2016	山东鸟类新纪录——大红鹳	山东师范大学学报(自然科学报)
2017	基于红外相机技术的太白山自然保护区野生动物监测	西北林学院学报
2018	陕西省子午岭国家级自然保护区和桥山省级自然保护区及周边地区鸟兽的红外相机监测	生物多样性
2018	陕西省鸟类新纪录——小滨鹬	四川动物
2019	甘肃连城国家级自然保护区地栖鸟兽红外相机初步监测	野生动物学报
2019	内蒙古大青山国家级自然保护区鸟类兽类物种多样性调查	内蒙古师范大学
2019	兴隆山自然保护区运用红外相机监测工作初报	绿色科技
2019	陕西省新纪录——长嘴半蹼鹬	四川动物
2019	甘肃兰州发现小太平鸟	动物学杂志
2019	宁夏六盘山发现蓝鹀	动物学杂志
2016	第二届野生动物多样性监测学术研讨会	
2018	第三届野生动物多样性监测学术研讨会(西双版纳)	

附录 2 黄河流域鸟类物种名录(数据截至 2019 年 9 月)。I: 国家 I 级重点保护野生动物; II: 国家 II 级重点保护野生动物; IUCN 红色名录等级和中国脊椎动物红色名录等级: CR 极危; EN 濒危; VU 易危; NT 近危; LC 低危。O: 实地观测记录; I: IUCN 红色名录分布图层记录。否: 物种在 IUCN 的分布图层没有被国家级自然保护区覆盖。分类系统参考《中国鸟类分类与分布名录(第三版)》(郑光美, 2017)。*因银鸥类鸟种在野外辨识困难, 故均按“银鸥 *Larus argentatus*”处理。

Appendix 2 List of bird species in the Yellow River basin, China (Updated by September, 2019). I, Class-I national protected wild animals; II, Class-II national protected wild animals; The IUCN Red List and the Red List of China's Vertebrates: Critically endangered-CR; Endangered-EN; Vulnerable-VU; Near Threatened-NT; Least Concern-LC. Recording type: O-Observation records; I-IUCN Redlist; N: The distribution layer of species in IUCN Redlist is not covered by national natural reserves. The taxonomy system was referred to A Checklist and Distribution of the Birds of China (Third Edition) (Zheng, 2017). *Because of the difficulty in field identification of herring gulls, they were all treated as *Larus argentatus* species.

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered

(一) 鸡形目 Galliformes

(1) 雉科 Phasianidae

斑尾榛鸡	<i>Tetrastes sewerzowi</i>	I	NT	NT	O, I	
雪鹑	<i>Lerwa lerwa</i>		LC	NT	O, I	
红喉雉鹑	<i>Tetraophasis obscurus</i>	I	LC	VU	O, I	
黄喉雉鹑	<i>Tetraophasis szechenyii</i>		VU	LC	O, I	否 N
暗腹雪鸡	<i>Tetraogallus himalayensis</i>	II	NT	LC	I	
藏雪鸡	<i>Tetraogallus tibetanus</i>	II	NT	LC	O, I	
石鸡	<i>Alectoris chukar</i>		LC	LC	O, I	
大石鸡	<i>Alectoris magna</i>		NT	LC	O, I	
斑翅山鹑	<i>Perdix dauurica</i>		LC	LC	O, I	
高原山鹑	<i>Perdix hodgsoniae</i>		LC	LC	O, I	
鹌鹑	<i>Coturnix japonica</i>		LC	NT	O, I	
血雉	<i>Ithaginis cruentus</i>	II	NT	LC	O, I	
红腹角雉	<i>Tragopan temminckii</i>	II	NT	LC	O, I	否 N
勺鸡	<i>Pucrasia macrolopha</i>	II	LC	LC	O, I	
绿尾虹雉	<i>Lophophorus lhuysii</i>	I	EN	VU	O, I	
白马鸡	<i>Crossoptilon crossoptilon</i>		NT	NT	O	否 N
褐马鸡	<i>Crossoptilon mantchuricum</i>	I	VU	VU	O, I	
蓝马鸡	<i>Crossoptilon auritum</i>	II	NT	LC	O, I	
白冠长尾雉	<i>Syrnaticus reevesii</i>		EN	VU	I	
环颈雉	<i>Phasianus colchicus</i>		LC	LC	O, I	
红腹锦鸡	<i>Chrysolophus pictus</i>	II	NT	LC	O, I	

(二) 雁形目 Anseriformes

(2) 鸭科 Anatidae

鸿雁	<i>Anser cygnoid</i>		VU	VU	O, I	
豆雁	<i>Anser fabalis</i>		LC	LC	O, I	
短嘴豆雁	<i>Anser serrirostris</i>		NA	LC	O	
灰雁	<i>Anser anser</i>		LC	LC	O, I	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
白额雁	<i>Anser albifrons</i>	II	LC	LC	O, I	
小白额雁	<i>Anser erythropus</i>		VU	VU	O, I	
斑头雁	<i>Anser indicus</i>		LC	LC	O, I	
黑雁	<i>Branta bernicla</i>			LC	I	
红胸黑雁	<i>Branta ruficollis</i>	II		VU	O	否 N
疣鼻天鹅	<i>Cygnus olor</i>	II	NT	LC	O, I	
小天鹅	<i>Cygnus columbianus</i>	II	NT	LC	O, I	
大天鹅	<i>Cygnus cygnus</i>	II	NT	LC	O, I	
翘鼻麻鸭	<i>Tadorna tadorna</i>		LC	LC	O, I	
赤麻鸭	<i>Tadorna ferruginea</i>		LC	LC	O, I	
鸳鸯	<i>Aix galericulata</i>		NT	LC	O	否 N
棉凫	<i>Nettapus coromandelianus</i>		EN	LC	O	否 N
赤膀鸭	<i>Mareca strepera</i>		LC	LC	O	否 N
罗纹鸭	<i>Mareca falcata</i>		NT	NT	O, I	
赤颈鸭	<i>Mareca penelope</i>		LC	LC	O, I	
绿头鸭	<i>Anas platyrhynchos</i>		LC	LC	O, I	
斑嘴鸭	<i>Anas zonorhyncha</i>		LC	LC	O, I	
针尾鸭	<i>Anas acuta</i>		LC	LC	O	否 N
绿翅鸭	<i>Anas crecca</i>		LC	LC	O, I	
琵嘴鸭	<i>Spatula clypeata</i>		LC	LC	O	否 N
白眉鸭	<i>Spatula querquedula</i>		LC	LC	O	否 N
花脸鸭	<i>Sibirionetta formosa</i>		NT	LC	O, I	
赤嘴潜鸭	<i>Netta rufina</i>		LC	LC	O	否 N
红头潜鸭	<i>Aythya ferina</i>		LC	VU	O	否 N
青头潜鸭	<i>Aythya baeri</i>		CR	CR	O, I	
白眼潜鸭	<i>Aythya nyroca</i>		NT	NT	O, I	
凤头潜鸭	<i>Aythya fuligula</i>		LC	LC	O	否 N
斑背潜鸭	<i>Aythya marila</i>		LC	LC	O, I	否 N
斑脸海番鸭	<i>Melanitta fusca</i>		NT	VU	O, I	
长尾鸭	<i>Clangula hyemalis</i>		EN	VU	O	否 N
鹊鸭	<i>Bucephala clangula</i>		LC	LC	O, I	
斑头秋沙鸭	<i>Mergellus albellus</i>		LC	LC	O, I	
普通秋沙鸭	<i>Mergus merganser</i>		LC	LC	O, I	
红胸秋沙鸭	<i>Mergus serrator</i>		LC	LC	O, I	
中华秋沙鸭	<i>Mergus squamatus</i>	I	EN	EN	O, I	

(三) 鸕鷀目 Podicipediformes

(3) 鸕鷀科 Podicipedidae

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
小鸊鷉	<i>Tachybaptus ruficollis</i>		LC	LC	O, I	
凤头鸊鷉	<i>Podiceps cristatus</i>		LC	LC	O, I	
角鸊鷉	<i>Podiceps auritus</i>	II	NT	VU	O	否 N
黑颈鸊鷉	<i>Podiceps nigricollis</i>		LC	LC	O	否 N
(四)红鹳目 Phoenicopteriformes						
(4)红鹳科 Phoenicopteridae						
大红鹳	<i>Phoenicopterus roseus</i>			LC	O	否 N
(五)鸽形目 Columbiformes						
(5)鸠鸽科 Columbidae						
原鸽	<i>Columba livia</i>		LC	LC	O	否 N
岩鸽	<i>Columba rupestris</i>		LC	LC	O, I	
雪鸽	<i>Columba leuconota</i>		LC	LC	O, I	
斑林鸽	<i>Columba hodgsonii</i>		LC	LC	O, I	
山斑鸠	<i>Streptopelia orientalis</i>		LC	LC	O, I	
灰斑鸠	<i>Streptopelia decaocto</i>		LC	LC	O, I	
火斑鸠	<i>Streptopelia tranquebarica</i>		LC	LC	O, I	
珠颈斑鸠	<i>Streptopelia chinensis</i>		LC	LC	O, I	
(六)沙鸡目 Pteroclidiformes						
(6)沙鸡科 Pteroclididae						
西藏毛腿沙鸡	<i>Syrrhaptes tibetanus</i>		LC	LC	O, I	
毛腿沙鸡	<i>Syrrhaptes paradoxus</i>		LC	LC	O, I	
(七)夜鹰目 Caprimulgiformes						
(7)夜鹰科 Caprimulgidae						
普通夜鹰	<i>Caprimulgus indicus</i>		LC	LC	O, I	
(8)雨燕科 Apodidae						
短嘴金丝燕	<i>Aerodramus brevirostris</i>		NT	LC	O	否 N
白喉针尾雨燕	<i>Hirundapus caudacutus</i>		LC	LC	O, I	
普通雨燕	<i>Apus apus</i>		LC	LC	O, I	
白腰雨燕	<i>Apus pacificus</i>		LC	LC	O, I	
(八)鹎形目 Cuculiformes						
(9)杜鹃科 Cuculidae						
红翅凤头鹎	<i>Clamator coromandus</i>		LC	LC	O, I	
噪鹎	<i>Eudynamys scolopaceus</i>		LC	LC	O, I	
乌鹎	<i>Surniculus lugubris</i>		LC	LC	O	否 N
大鹰鹎	<i>Hierococcyx sparveroides</i>		LC	LC	O, I	
北棕腹鹰鹎	<i>Hierococcyx hypertyrhus</i>		LC	LC	I	
小杜鹃	<i>Cuculus poliocephalus</i>		LC	LC	O, I	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
四声杜鹃	<i>Cuculus micropterus</i>		LC	LC	O, I	
中杜鹃	<i>Cuculus saturatus</i>		LC	LC	O, I	
东方中杜鹃	<i>Cuculus optatus</i>		LC	LC	O	否 N
大杜鹃	<i>Cuculus canorus</i>		LC	LC	O, I	
(九) 鸫形目 Otidiformes						
(10) 鸫科 Otididae						
大鸫	<i>Otis tarda</i>	I	EN	VU	O, I	
(十) 鹑形目 Gruiformes						
(11) 秧鸡科 Rallidae						
西秧鸡	<i>Rallus aquaticus</i>		LC	LC	O, I	
普通秧鸡	<i>Rallus indicus</i>		LC	LC	O, I	否 N
红脚田鸡	<i>Zapornia akool</i>		LC	LC	O	否 N
小田鸡	<i>Zapornia pusilla</i>		LC	LC	O, I	
红胸田鸡	<i>Zapornia fusca</i>		NT	LC	O, I	
斑胁田鸡	<i>Zapornia paykullii</i>		VU	NT	O, I	
白胸苦恶鸟	<i>Amaurornis phoenicurus</i>		LC	LC	O, I	
董鸡	<i>Gallinula cinerea</i>		LC	LC	O, I	
黑水鸡	<i>Gallinula chloropus</i>		LC	LC	O, I	
白骨顶	否 <i>Noulica atra</i>		LC	LC	O, I	
(12) 鹤科 Gruidae						
白鹤	<i>Grus leucogeranus</i>	I	CR	CR	O	否 N
白枕鹤	<i>Grus vipio</i>	II	EN	VU	I	
蓑羽鹤	<i>Grus virgo</i>	II	LC	LC	O, I	
丹顶鹤	<i>Grus japonensis</i>	I	EN	EN	I	
灰鹤	<i>Grus grus</i>	II	NT	LC	O	否 N
白头鹤	<i>Grus monacha</i>	I	EN	VU	O	否 N
黑颈鹤	<i>Grus nigricollis</i>	I	VU	VU	O, I	
(十一) 鹬形目 Charadriiformes						
(13) 鸕嘴鹬科 Ibisornithidae						
鸕嘴鹬	<i>Ibisornitha struthersii</i>		NT	LC	O, I	
(14) 反嘴鹬科 Recurvirostridae						
黑翅长脚鹬	<i>Himantopus himantopus</i>		LC	LC	O, I	
反嘴鹬	<i>Recurvirostra avosetta</i>		LC	LC	O	否 N
(15) 鹧鸪科 Charadriidae						
凤头麦鸡	<i>Vanellus vanellus</i>		LC	NT	O, I	
灰头麦鸡	<i>Vanellus cinereus</i>		LC	LC	O, I	
金鸪	<i>Pluvialis fulva</i>		LC	LC	O	否 N

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
灰鸽	<i>Pluvialis squatarola</i>		LC	LC	O	否 N
长嘴剑鸽	<i>Charadrius placidus</i>		NT	LC	O, I	
金眶鸽	<i>Charadrius dubius</i>		LC	LC	O, I	
环颈鸽	<i>Charadrius alexandrinus</i>		LC	LC	O, I	
蒙古沙鸽	<i>Charadrius mongolus</i>		LC	LC	O, I	
铁嘴沙鸽	<i>Charadrius leschenaultii</i>		LC	LC	O, I	
东方鸽	<i>Charadrius veredus</i>		LC	LC	O, I	
(16) 彩鹬科 Rostratulidae						
彩鹬	<i>Rostratula benghalensis</i>		LC	LC	O, I	
(17) 水雉科 Jacanidae						
水雉	<i>Hydrophasianus chirurgus</i>		NT	LC	O	否 N
(18) 鹬科 Scolopacidae						
丘鹬	<i>Scolopax rusticola</i>		LC	LC	O	否 N
孤沙锥	<i>Gallinago solitaria</i>		LC	LC	O, I	
针尾沙锥	<i>Gallinago stenura</i>		LC	LC	O	否 N
大沙锥	<i>Gallinago megala</i>		LC	LC	O, I	
扇尾沙锥	<i>Gallinago gallinago</i>		LC	LC	O	否 N
长嘴半蹼鹬	<i>Limnodromus scolopaceus</i>			LC	O	否 N
黑尾膝鹬	<i>Limosa limosa</i>		LC	NT	O, I	
斑尾膝鹬	<i>Limosa lapponica</i>		NT	NT	O	否 N
中杓鹬	<i>Numenius phaeopus</i>		LC	LC	O	否 N
白腰杓鹬	<i>Numenius arquata</i>		NT	NT	O, I	
大杓鹬	<i>Numenius madagascariensis</i>		VU	EN	O, I	
鹤鹬	<i>Tringa erythropus</i>		LC	LC	O	否 N
红脚鹬	<i>Tringa totanus</i>		LC	LC	O, I	
泽鹬	<i>Tringa stagnatilis</i>		LC	LC	O	否 N
青脚鹬	<i>Tringa nebularia</i>		LC	LC	O	否 N
白腰草鹬	<i>Tringa ochropus</i>		LC	LC	O	否 N
林鹬	<i>Tringa glareola</i>		LC	LC	O	否 N
翘嘴鹬	<i>Xenus cinereus</i>		LC	LC	O	否 N
矶鹬	<i>Actitis hypoleucos</i>		LC	LC	O	否 N
翻石鹬	<i>Arenaria interpres</i>		LC	LC	O	否 N
三趾滨鹬	<i>Calidris alba</i>		LC	LC	O	否 N
红颈滨鹬	<i>Calidris ruficollis</i>		LC	NT	O, I	
小滨鹬	<i>Calidris minuta</i>			LC	O	否 N
青脚滨鹬	<i>Calidris temminckii</i>		LC	LC	O	否 N
长趾滨鹬	<i>Calidris subminuta</i>		LC	LC	O	否 N

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
尖尾滨鹬	<i>Calidris acuminata</i>		LC	LC	O, I	
阔嘴鹬	<i>Calidris falcinellus</i>		LC	LC	O	否 N
流苏鹬	<i>Calidris pugnax</i>		LC	LC	O	否 N
弯嘴滨鹬	<i>Calidris ferruginea</i>		LC	NT	O	否 N
黑腹滨鹬	<i>Calidris alpina</i>		LC	LC	O	否 N
红颈瓣蹼鹬	<i>Phalaropus lobatus</i>		LC	LC	O	否 N
(19)三趾鹬科 Turnicidae						
黄脚三趾鹬	<i>Turnix tanki</i>		LC	LC	O, I	
(20)燕鹬科 Glareolidae						
普通燕鹬	<i>Glareola maldivarum</i>		LC	LC	O, I	
(21)鸥科 Laridae						
棕头鸥	<i>Chroicocephalus brunnicephalus</i>		LC	LC	O	否 N
红嘴鸥	<i>Chroicocephalus ridibundus</i>		LC	LC	O, I	
黑嘴鸥	<i>Saundersilarus saundersi</i>		VU	VU	O, I	
小鸥	<i>Hydrocoloeus minutus</i>	II	NT	LC	O, I	
遗鸥	<i>Ichthyaetus relictus</i>	I	EN	VU	O, I	
渔鸥	<i>Ichthyaetus ichthyaetus</i>		LC	LC	O	否 N
黑尾鸥	<i>Larus crassirostris</i>		LC	LC	O, I	否 N
普通海鸥	<i>Larus canus</i>		LC	LC	O, I	
北极鸥	<i>Larus hyperboreus</i>		LC	LC	I	否 N
西伯利亚银鸥	<i>Larus smithsonianus</i>		LC	LC	I	
灰背鸥	<i>Larus schistisagus</i>		LC	LC	I	
鸥嘴噪鸥	<i>Gelochelidon nilotica</i>		LC	LC	O, I	
红嘴巨燕鸥	<i>Hydroprogne caspia</i>		LC	LC	O, I	
白额燕鸥	<i>Sternula albifrons</i>		LC	LC	O, I	
普通燕鸥	<i>Sterna hirundo</i>		LC	LC	O, I	
灰翅浮鸥	<i>Chlidonias hybrida</i>		LC	LC	O, I	
白翅浮鸥	<i>Chlidonias leucopterus</i>		LC	LC	O, I	
银鸥*	<i>Larus argentatus</i>		LC		O	
(22)海雀科 Alcidae						
扁嘴海雀	<i>Synthliboramphus antiquus</i>		NT	LC	I	否 N
(十二)潜鸟目 Gaviiformes						
(23)潜鸟科 Gaviidae						
红喉潜鸟	<i>Gavia stellata</i>		LC	LC	I	否 N
黑喉潜鸟	<i>Gavia arctica</i>		LC	LC	I	否 N
(十三)鸕形目 Procellariiformes						

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
(24) 海燕科 Hydrobatidae						
黑叉尾海燕	<i>Hydrobates monorhis</i>			NT	I	否 N
(25) 鸺科 Procellariidae						
白额鸺	<i>Calonectris leucomelas</i>			NT	I	否 N
(十四) 鸛形目 Ciconiiformes						
(26) 鸛科 Ciconiidae						
黑鸛	<i>Ciconia nigra</i>	I	VU	LC	O, I	
东方白鸛	<i>Ciconia boyciana</i>		EN	EN	O, I	
(十五) 鵀鸟目 Suliformes						
(27) 鵀鸟科 Sulidae						
褐鵀鸟	<i>Sula leucogaster</i>	II	LC	LC	I	否 N
(28) 鸬鹚科 Phalacrocoracidae						
海鸬鹚	<i>Phalacrocorax pelagicus</i>	II	NT	LC	I	否 N
普通鸬鹚	<i>Phalacrocorax carbo</i>		LC	LC	O, I	
绿背鸬鹚	<i>Phalacrocorax capillatus</i>			LC	I	
(十六) 鸛形目 Pelecaniformes						
(29) 鸛科 Threskiornithidae						
朱鸛	<i>Nipponia nippon</i>	I	EN	EN	O	否 N
彩鸛	<i>Plegadis falcinellus</i>	II		LC	O	否 N
白琵鸛	<i>Platalea leucorodia</i>	II	NT	LC	O, I	
(30) 鹭科 Ardeidae						
大麻鹭	<i>Botaurus stellaris</i>		LC	LC	O	否 N
黄斑苇鹭	<i>Ixobrychus sinensis</i>		LC	LC	O, I	
紫背苇鹭	<i>Ixobrychus eurhythmus</i>		LC	LC	O, I	
栗苇鹭	<i>Ixobrychus cinnamomeus</i>		LC	LC	O, I	
黑苇鹭	<i>Ixobrychus flavicollis</i>		LC	LC	O	否 N
夜鹭	<i>Nycticorax nycticorax</i>		LC	LC	O, I	
绿鹭	<i>Butorides striata</i>		LC	LC	O, I	
池鹭	<i>Ardeola bacchus</i>		LC	LC	O, I	
牛背鹭	<i>Bubulcus ibis</i>		LC	LC	O	否 N
苍鹭	<i>Ardea cinerea</i>		LC	LC	O, I	
草鹭	<i>Ardea purpurea</i>		LC	LC	O, I	
大白鹭	<i>Ardea alba</i>		LC	LC	O, I	
中白鹭	<i>Ardea intermedia</i>		LC	LC	O	否 N
白鹭	<i>Egretta garzetta</i>		LC	LC	O, I	
(31) 鸬鹚科 Pelecanidae						
卷羽鸬鹚	<i>Pelecanus crispus</i>	II	EN	NT	O, I	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
(十七)鹰形目 Accipitriformes						
(32)鹰科 Accipitridae						
鸮	<i>Pandion haliaetus</i>		NT	LC	O, I	
黑翅鸢	<i>Elanus caeruleus</i>	II	NT	LC	O	否 N
胡兀鹫	<i>Gypaetus barbatus</i>	I	NT	NT	O, I	
凤头蜂鹰	<i>Pernis ptilorhynchus</i>	II	NT	LC	O, I	
黑冠鹃隼	<i>Aviceda leuphotes</i>	II	LC	LC	O	否 N
高山兀鹫	<i>Gyps himalayensis</i>	II	NT	NT	O, I	
秃鹫	<i>Aegypius monachus</i>	II	NT	NT	O, I	
蛇雕	<i>Spilornis cheela</i>	II	NT	LC	O	否 N
短趾雕	<i>Circaetus gallicus</i>	II	NT	LC	O, I	
鹰雕	<i>Nisaetus nipalensis</i>	II	NT	LC	O	否 N
乌雕	<i>Clanga clanga</i>	II	EN	VU	O, I	
靴隼雕	<i>Hieraaetus pennatus</i>	II	VU	LC	O	否 N
草原雕	<i>Aquila nipalensis</i>	II	VU	EN	O, I	
白肩雕	<i>Aquila heliaca</i>	I	EN	VU	O, I	
金雕	<i>Aquila chrysaetos</i>	I	VU	LC	O, I	
白腹隼雕	<i>Aquila fasciata</i>	II	VU	LC	O	否 N
凤头鹰	<i>Accipiter trivirgatus</i>	II	NT	LC	O	否 N
赤腹鹰	<i>Accipiter soloensis</i>	II	LC	LC	O, I	
日本松雀鹰	<i>Accipiter gularis</i>	II	LC	LC	O, I	
松雀鹰	<i>Accipiter virgatus</i>	II	LC	LC	O, I	
雀鹰	<i>Accipiter nisus</i>	II	LC	LC	O, I	
苍鹰	<i>Accipiter gentilis</i>	II	NT	LC	O, I	
白头鹞	<i>Circus aeruginosus</i>	II	NT	LC	O	否 N
白腹鹞	<i>Circus spilonotus</i>	II	NT	LC	O	否 N
白尾鹞	<i>Circus cyaneus</i>	II	NT	LC	O, I	
鹊鹞	<i>Circus melanoleucos</i>	II	NT	LC	O	否 N
黑鸢	<i>Milvus migrans</i>	II	LC	LC	O, I	
玉带海雕	<i>Haliaeetus leucoryphus</i>	I	EN	EN	O, I	
白尾海雕	<i>Haliaeetus albicilla</i>	I	VU	LC	O, I	
灰脸鵟鹰	<i>Butastur indicus</i>	II	NT	LC	O	否 N
毛脚鵟	<i>Buteo lagopus</i>	II	NT	LC	I	
大鵟	<i>Buteo hemilasius</i>	II	VU	LC	O, I	
普通鵟	<i>Buteo japonicus</i>	II	LC	LC	O	否 N
欧亚鵟	<i>Buteo buteo</i>	II	LC	LC	O	否 N
棕尾鵟	<i>Buteo rufinus</i>	II	NT	LC	O	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered

(十八) 鸮形目

Strigiformes

(33) 鸱鸃科 Strigidae

领角鸮	<i>Otus lettia</i>	II	LC	LC	O	否 N
北领角鸮	<i>Otus semitorques</i>	II	LC	LC	O, I	
红角鸮	<i>Otus sunia</i>	II	LC	LC	O, I	
雕鸮	<i>Bubo bubo</i>	II	NT	LC	O, I	
黄腿渔鸮	<i>Ketupa flavipes</i>	II	EN	LC	O, I	
灰林鸮	<i>Strix aluco</i>	II	NT	LC	O, I	
长尾林鸮	<i>Strix uralensis</i>	II	NT	LC	I	
四川林鸮	<i>Strix davidi</i>	II	VU	LC	O	
领鸺鹠	<i>Glaucidium brodiei</i>	II	LC	LC	O, I	
斑头鸺鹠	<i>Glaucidium cuculoides</i>	II	LC	LC	O, I	
纵纹腹小鸮	<i>Athene noctua</i>	II	LC	LC	O, I	
鬼鸮	<i>Aegolius funereus</i>	II	VU	LC	O	否 N
日本鹰鸮	<i>Ninox japonica</i>	II		LC	I	
长耳鸮	<i>Asio otus</i>	II	LC	LC	O, I	
短耳鸮	<i>Asio flammeus</i>	II	NT	LC	O, I	

(十九) 犀鸟目 Bucerotiformes

(34) 戴胜科 Upupidae

戴胜	<i>Upupa epops</i>		LC	LC	O, I	
----	--------------------	--	----	----	------	--

(二十) 佛法僧目 Coraciiformes

(35) 佛法僧科 Coraciidae

三宝鸟	<i>Eurystomus orientalis</i>		LC	LC	O, I	
-----	------------------------------	--	----	----	------	--

(36) 翠鸟科 Alcedinidae

蓝翡翠	<i>Halcyon pileata</i>		LC	LC	O, I	
普通翠鸟	<i>Alcedo atthis</i>		LC	LC	O, I	
冠鱼狗	<i>Megaceryle lugubris</i>		LC	LC	O, I	
斑鱼狗	<i>Ceryle rudis</i>		LC	LC	O	否 N

(二十一) 啄木鸟目 Piciformes

(37) 啄木鸟科 Picidae

蚁鴷	<i>Jynx torquilla</i>		LC	LC	O, I	
斑姬啄木鸟	<i>Picumnus innominatus</i>		LC	LC	O, I	
棕腹啄木鸟	<i>Dendrocopos hyperythrus</i>		LC	LC	O, I	
小星头啄木鸟	<i>Dendrocopos kizuki</i>		LC	LC	I	
星头啄木鸟	<i>Dendrocopos canicapillus</i>		LC	LC	O, I	
赤胸啄木鸟	<i>Dendrocopos cathpharius</i>		LC	LC	O	否 N

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
黄颈啄木鸟	<i>Dendrocopos darjellensis</i>		LC	LC	I	否 N
白背啄木鸟	<i>Dendrocopos leucotos</i>		LC	LC	O, I	
大斑啄木鸟	<i>Dendrocopos major</i>		LC	LC	O, I	
三趾啄木鸟	<i>Picooides tridactylus</i>		LC	LC	O, I	
黑啄木鸟	<i>Dryocopus martius</i>		LC	LC	O, I	
灰头绿啄木鸟	<i>Picus canus</i>		LC	LC	O, I	
(二十二)隼形目 Falconiformes						
(38)隼科 Falconidae						
黄爪隼	<i>Falco naumanni</i>	II	VU	LC	O, I	
红隼	<i>Falco tinnunculus</i>	II	LC	LC	O, I	
红脚隼	<i>Falco amurensis</i>	II	NT	LC	O, I	
灰背隼	<i>Falco columbarius</i>	II	NT	LC	O	否 N
燕隼	<i>Falco subbuteo</i>	II	LC	LC	O, I	
猎隼	<i>Falco cherrug</i>	II	EN	EN	O, I	
游隼	<i>Falco peregrinus</i>	II	NT	LC	O, I	否 N
(二十三)雀形目 Passeriformes						
(39)黄鹡科 Oriolidae						
黑枕黄鹡	<i>Oriolus chinensis</i>		LC	LC	O, I	
(40)莺雀科 Vireonidae						
红翅鵙鹑	<i>Pteruthius aeralatus</i>		LC	LC	I	否 N
淡绿鵙鹑	<i>Pteruthius xanthochlorus</i>		NT	LC	O, I	
(41)山椒鸟科 Campephagidae						
暗灰鵙鹑	<i>Lalage melaschistos</i>		LC	LC	O, I	
小灰山椒鸟	<i>Pericrocotus cantonensis</i>		LC	LC	O, I	
灰山椒鸟	<i>Pericrocotus divaricatus</i>		LC	LC	O, I	
长尾山椒鸟	<i>Pericrocotus ethologus</i>		LC	LC	O, I	
(42)卷尾科 Dicruridae						
黑卷尾	<i>Dicrurus macrocercus</i>		LC	LC	O, I	
灰卷尾	<i>Dicrurus leucophaeus</i>		LC	LC	O, I	
发冠卷尾	<i>Dicrurus hottentottus</i>		LC	LC	O, I	
(43)王鹟科 Monarchidae						
寿带	<i>Terpsiphone incei</i>		NT	LC	O, I	
(44)伯劳科 Laniidae						
虎纹伯劳	<i>Lanius tigrinus</i>		LC	LC	O, I	
牛头伯劳	<i>Lanius bucephalus</i>		LC	LC	O, I	
红尾伯劳	<i>Lanius cristatus</i>		LC	LC	O, I	
荒漠伯劳	<i>Lanius isabellinus</i>		LC	LC	O, I	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
棕背伯劳	<i>Lanius schach</i>		LC	LC	O, I	
灰背伯劳	<i>Lanius tephronotus</i>		LC	LC	O, I	
灰伯劳	<i>Lanius excubitor</i>		LC	LC	O, I	
楔尾伯劳	<i>Lanius sphenocercus</i>		LC	LC	O, I	
(45) 鸦科 Corvidae						
黑头噪鸦	<i>Perisoreus internigrans</i>		VU	VU	O, I	
松鸦	<i>Garrulus glandarius</i>		LC	LC	O, I	
灰喜鹊	<i>Cyanopica cyanus</i>		LC	LC	O, I	
红嘴蓝鹊	<i>Urocissa erythroryncha</i>		LC	LC	O, I	
喜鹊	<i>Pica pica</i>		LC	LC	O, I	
黑尾地鸦	<i>Podoces hendersoni</i>		VU	LC	O, I	
星鸦	<i>Nucifraga caryocatactes</i>		LC	LC	O, I	
红嘴山鸦	<i>Pyrrhocorax pyrrhocorax</i>		LC	LC	O, I	
黄嘴山鸦	<i>Pyrrhocorax graculus</i>		LC	LC	O, I	
达乌里寒鸦	<i>Corvus dauuricus</i>		LC	LC	O, I	
秃鼻乌鸦	<i>Corvus frugilegus</i>		LC	LC	O, I	
小嘴乌鸦	<i>Corvus corone</i>		LC	LC	O, I	
白颈鸦	<i>Corvus pectoralis</i>		NT	VU	O, I	
大嘴乌鸦	<i>Corvus macrorhynchos</i>		LC	LC	O, I	
渡鸦	<i>Corvus corax</i>		LC	LC	O, I	
(46) 玉鹡科 Stenostiridae						
方尾鹡	<i>Culicicapa ceylonensis</i>		LC	LC	O, I	
(47) 山雀科 Paridae						
火冠雀	<i>Cephalopyrus flammiceps</i>		LC	LC	O	否 N
黄眉林雀	<i>Sylviparus modestus</i>		LC	LC	O	否 N
黑冠山雀	<i>Periparus rubidiventris</i>		LC	LC	O, I	
煤山雀	<i>Periparus ater</i>		LC	LC	O, I	
黄腹山雀	<i>Pardaliparus venustulus</i>		LC	LC	O, I	
褐冠山雀	<i>Lophophanes dichrous</i>		LC	LC	O, I	
白眉山雀	<i>Poecile superciliosus</i>		NT	LC	O, I	
红腹山雀	<i>Poecile davidi</i>		LC	LC	O, I	
沼泽山雀	<i>Poecile palustris</i>		LC	LC	O, I	
褐头山雀	<i>Poecile montanus</i>		LC	LC	O, I	
四川褐头山雀	<i>Poecile weigoldicus</i>		LC	LC	O	
灰蓝山雀	<i>Cyanistes cyanus</i>		LC	LC	I	
地山雀	<i>Pseudopodoces humilis</i>		LC	LC	O, I	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
大山雀	<i>Parus cinereus</i>		LC	LC	O, I	
绿背山雀	<i>Parus monticolus</i>		LC	LC	O, I	
(48)攀雀科 Remizidae						
白冠攀雀	<i>Remiz coronatus</i>		LC	LC	I	
中华攀雀	<i>Remiz consobrinus</i>		LC	LC	O, I	
(49)百灵科 Alaudidae						
蒙古百灵	<i>Melanocorypha mongolica</i>		VU	LC	O, I	
长嘴百灵	<i>Melanocorypha maxima</i>		LC	LC	O, I	
大短趾百灵	<i>Calandrella brachydactyla</i>		LC	LC	O, I	
细嘴短趾百灵	<i>Calandrella acutirostris</i>		LC	LC	O, I	
短趾百灵	<i>Alaudala cheleensis</i>		LC	LC	O, I	
凤头百灵	<i>Galerida cristata</i>		LC	LC	O, I	
云雀	<i>Alauda arvensis</i>		LC	LC	O, I	
小云雀	<i>Alauda gulgula</i>		LC	LC	O, I	
角百灵	<i>Eremophila alpestris</i>		LC	LC	O, I	
(50)文须雀科 Panuridae						
文须雀	<i>Panurus biarmicus</i>		LC	LC	O, I	
(51)扇尾莺科 Cisticolidae						
棕扇尾莺	<i>Cisticola juncidis</i>		LC	LC	O, I	
山鹪莺	<i>Prinia crinigera</i>		LC	LC	O, I	
(52)苇莺科 Acrocephalidae						
东方大苇莺	<i>Acrocephalus orientalis</i>		LC	LC	O, I	
黑眉苇莺	<i>Acrocephalus bistrigiceps</i>		LC	LC	O, I	
钝翅苇莺	<i>Acrocephalus concinens</i>		LC	LC	O, I	
厚嘴苇莺	<i>Arundinax aedon</i>		LC	LC	O, I	
(53)鳞胸鹧鸪科 Pnoepyidae						
小鳞胸鹧鸪	<i>Pnoepyga pusilla</i>		LC	LC	O, I	
(54)蝗莺科 Locustellidae						
四川短翅蝗莺	<i>Locustella chengi</i>			LC	I	
斑胸短翅蝗莺	<i>Locustella thoracica</i>		LC	LC	O, I	
北短翅蝗莺	<i>Locustella davidi</i>			LC	O	否 N
中华短翅蝗莺	<i>Locustella tacsanowskia</i>		LC	LC	O, I	
矛斑蝗莺	<i>Locustella lanceolata</i>		NT	LC	O, I	
北蝗莺	<i>Locustella ochotensis</i>		LC	LC	I	
小蝗莺	<i>Locustella certhiola</i>		LC	LC	O, I	
(55)燕科 Hirundinidae						
崖沙燕	<i>Riparia riparia</i>		LC	LC	O	否 N

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
淡色崖沙燕	<i>Riparia diluta</i>		LC	LC	O, I	
家燕	<i>Hirundo rustica</i>		LC	LC	O, I	
岩燕	<i>Ptyonoprogne rupestris</i>		LC	LC	O, I	
毛脚燕	<i>Delichon urbicum</i>		LC	LC	O	否 N
烟腹毛脚燕	<i>Delichon dasypus</i>		LC	LC	O, I	
金腰燕	<i>Cecropis daurica</i>		LC	LC	O, I	
(56) 鹎科 Pycnonotidae						
领雀嘴鹎	<i>Spizixos semitorques</i>		LC	LC	O, I	
黄臀鹎	<i>Pycnonotus xanthorrhous</i>		LC	LC	O, I	
白头鹎	<i>Pycnonotus sinensis</i>		LC	LC	O, I	
绿翅短脚鹎	<i>Ixos mcclllandii</i>		LC	LC	O	否 N
黑短脚鹎	<i>Hypsipetes leucocephalus</i>		LC	LC	O, I	
(57) 柳莺科 Phylloscopidae						
褐柳莺	<i>Phylloscopus fuscatus</i>		LC	LC	O, I	
烟柳莺	<i>Phylloscopus fulgiventis</i>		LC	LC	O, I	
黄腹柳莺	<i>Phylloscopus affinis</i>		LC	LC	O, I	
华西柳莺	<i>Phylloscopus occisinensis</i>		LC	LC	O	
棕腹柳莺	<i>Phylloscopus subaffinis</i>		LC	LC	O, I	
灰柳莺	<i>Phylloscopus griseolus</i>		LC	LC	I	
棕眉柳莺	<i>Phylloscopus armandii</i>		LC	LC	O, I	
巨嘴柳莺	<i>Phylloscopus schwarzi</i>		LC	LC	O, I	
橙斑翅柳莺	<i>Phylloscopus pulcher</i>		LC	LC	O, I	
灰喉柳莺	<i>Phylloscopus maculipennis</i>		LC	LC	O	否 N
甘肃柳莺	<i>Phylloscopus kansuensis</i>		LC	LC	O, I	
云南柳莺	<i>Phylloscopus yunnanensis</i>		LC	LC	O, I	
黄腰柳莺	<i>Phylloscopus proregulus</i>		LC	LC	O, I	
淡黄腰柳莺	<i>Phylloscopus chloronotus</i>		LC	LC	O	否 N
四川柳莺	<i>Phylloscopus forresti</i>		LC	LC	O, I	
黄眉柳莺	<i>Phylloscopus inornatus</i>		LC	LC	O, I	
淡眉柳莺	<i>Phylloscopus humei</i>		LC	LC	O, I	
极北柳莺	<i>Phylloscopus borealis</i>		LC	LC	O	否 N
暗绿柳莺	<i>Phylloscopus trochiloides</i>		LC	LC	O, I	
双斑绿柳莺	<i>Phylloscopus plumbeitarsus</i>		LC	LC	O, I	
淡脚柳莺	<i>Phylloscopus tenellipes</i>		LC	LC	I	
乌嘴柳莺	<i>Phylloscopus magnirostris</i>		LC	LC	O, I	
冕柳莺	<i>Phylloscopus coronatus</i>		LC	LC	O, I	
西南冠纹柳莺	<i>Phylloscopus reguloides</i>	I	LC	LC	O	否 N

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
冠纹柳莺	<i>Phylloscopus claudiae</i>		LC	LC	O, I	
峨眉柳莺	<i>Phylloscopus emeiensis</i>		LC	LC	O, I	
白斑尾柳莺	<i>Phylloscopus ogilviegranti</i>		LC	LC	O, I	
黑眉柳莺	<i>Phylloscopus ricketti</i>		LC	LC	O, I	
金眶鹟莺	<i>Seicercus burkii</i>		LC	LC	O	否 N
灰冠鹟莺	<i>Seicercus tephrocephalus</i>		LC	LC	O, I	
比氏鹟莺	<i>Seicercus valentini</i>		LC	LC	O, I	
峨眉鹟莺	<i>Seicercus omeiensis</i>		LC	LC	I	
淡尾鹟莺	<i>Seicercus soror</i>		LC	LC	I	
栗头鹟莺	<i>Seicercus castaniceps</i>		LC	LC	O	否 N
(58)树莺科 Cettiidae						
棕脸鹟莺	<i>Abruscoptes albogularis</i>		LC	LC	O	否 N
短翅树莺	<i>Horornis diphone</i>		LC	LC	O	否 N
远东树莺	<i>Horornis canturians</i>		LC	LC	O, I	
强脚树莺	<i>Horornis fortipes</i>		LC	LC	O, I	
黄腹树莺	<i>Horornis acanthizoides</i>		LC	LC	O, I	
异色树莺	<i>Horornis flavovivaceus</i>		LC	LC	O, I	
大树莺	<i>Cettia major</i>		LC	LC	I	
棕顶树莺	<i>Cettia brunnifrons</i>		LC	LC	I	否 N
栗头树莺	<i>Cettia castaneocoronata</i>		LC	LC	O, I	否 N
鳞头树莺	<i>Urosphena squameiceps</i>		LC	LC	I	
(59)长尾山雀科 Aegithalidae						
北长尾山雀	<i>Aegithalos caudatus</i>			LC	O	否 N
银喉长尾山雀	<i>Aegithalos glaucogularis</i>		LC	LC	O, I	
红头长尾山雀	<i>Aegithalos concinnus</i>		LC	LC	O, I	
黑眉长尾山雀	<i>Aegithalos bonvaloti</i>		LC	LC	O	否 N
银脸长尾山雀	<i>Aegithalos fuliginosus</i>		LC	LC	O, I	
花彩雀莺	<i>Leptopocile sophiae</i>		LC	LC	O, I	
凤头雀莺	<i>Leptopocile elegans</i>		NT	LC	O, I	
(60)莺鹟科 Sylviidae						
白喉林莺	<i>Sylvia curruca</i>		LC	LC	O, I	
漠白喉林莺	<i>Sylvia minula</i>		LC	LC	O	
荒漠林莺	<i>Sylvia nana</i>		LC	LC	O, I	
金胸雀鹟	<i>Lioparus chrysotis</i>		LC	LC	I	
宝兴鹟雀	<i>Moupinia poecilotis</i>		LC	LC	I	
白眉雀鹟	<i>Fulvetta vinipectus</i>		LC	LC	O, I	
中华雀鹟	<i>Fulvetta striaticollis</i>		LC	LC	O, I	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
棕头雀鹛	<i>Fulvetta ruficapilla</i>		LC	LC	O, I	
褐头雀鹛	<i>Fulvetta cinereiceps</i>		LC	LC	O, I	
山鹛	<i>Rhopophilus pekinensis</i>		LC	LC	O, I	
红嘴鸦雀	<i>Conostoma aemodium</i>		LC	LC	I	
三趾鸦雀	<i>Cholornis paradoxus</i>		NT	LC	I	
白眶鸦雀	<i>Sinosuthora conspicillata</i>		NT	LC	O, I	
棕头鸦雀	<i>Sinosuthora webbiana</i>		LC	LC	O, I	
灰冠鸦雀	<i>Sinosuthora przewalskii</i>		EN	VU	I	
黄额鸦雀	<i>Suthora fulvifrons</i>		LC	LC	I	否 N
点胸鸦雀	<i>Paradoxornis guttaticollis</i>		LC	LC	O, I	
震旦鸦雀	<i>Paradoxornis heudei</i>		NT	NT	O	否 N
(61) 绣眼鸟科 Zosteropidae						
栗耳凤鹛	<i>Yuhina castaniceps</i>		LC	LC	O	否 N
白领凤鹛	<i>Yuhina diademata</i>		LC	LC	O, I	
黑颈凤鹛	<i>Yuhina nigrimenta</i>		LC	LC	I	
红胁绣眼鸟	<i>Zosterops erythropleurus</i>		LC	LC	O, I	
暗绿绣眼鸟	<i>Zosterops japonicus</i>		LC	LC	O, I	
(62) 林鹛科 Timaliidae						
斑胸钩嘴鹛	<i>Erythrogonys gravivox</i>		LC	LC	O, I	
棕颈钩嘴鹛	<i>Pomatorhinus ruficollis</i>		LC	LC	O, I	
斑翅鹛	<i>Spelaeornis troglodytoides</i>		LC	LC	I	
红头穗鹛	<i>Cyanoderma ruficeps</i>		LC	LC	O, I	
(63) 幽鹛科 Pellorneidae						
灰眶雀鹛	<i>Alcippe morrisonia</i>		LC	LC	O, I	
(64) 噪鹛科 Leiothrichidae						
矛纹草鹛	<i>Babax lanceolatus</i>		LC	LC	O, I	
画眉	<i>Garrulax canorus</i>		NT	LC	O, I	
黑额山噪鹛	<i>Garrulax sukatschewi</i>		VU	VU	O, I	
灰翅噪鹛	<i>Garrulax cineraceus</i>		LC	LC	O, I	
斑背噪鹛	<i>Garrulax lunulatus</i>		LC	LC	O, I	
大噪鹛	<i>Garrulax maximus</i>		LC	LC	O, I	
眼纹噪鹛	<i>Garrulax ocellatus</i>		NT	LC	I	
黑脸噪鹛	<i>Garrulax perspicillatus</i>		LC	LC	O, I	
白喉噪鹛	<i>Garrulax albogularis</i>		LC	LC	O, I	
黑领噪鹛	<i>Garrulax pectoralis</i>		LC	LC	O, I	
山噪鹛	<i>Garrulax davidi</i>		LC	LC	O, I	
白颊噪鹛	<i>Garrulax sannio</i>		LC	LC	O	否 N

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
橙翅噪鹛	<i>Trochalopteron elliotii</i>		LC	LC	O, I	
黑顶噪鹛	<i>Trochalopteron affine</i>		LC	LC	O, I	否 N
红嘴相思鸟	<i>Leiothrix lutea</i>		LC	LC	O, I	
(65)旋木雀科 Certhiidae						
欧亚旋木雀	<i>Certhia familiaris</i>		LC	LC	O, I	
霍氏旋木雀	<i>Certhia hodgsoni</i>		LC	LC	O, I	
高山旋木雀	<i>Certhia himalayana</i>		LC	LC	O, I	
四川旋木雀	<i>Certhia tianquanensis</i>		VU	NT	O, I	
(66)鸺科 Sittidae						
普通鸺	<i>Sitta europaea</i>		LC	LC	O, I	
栗臀鸺	<i>Sitta nagaensis</i>		LC	LC	I	否 N
黑头鸺	<i>Sitta villosa</i>		NT	LC	O, I	
白脸鸺	<i>Sitta leucopsis</i>		NT	LC	O, I	否 N
红翅旋壁雀	<i>Tichodroma muraria</i>		LC	LC	O, I	
(67)鹟科 Troglodytidae						
鹟	<i>Troglodytes troglodytes</i>		LC	LC	O, I	
(68)河乌科 Cinclidae						
河乌	<i>Cinclus cinclus</i>		LC	LC	O, I	
褐河乌	<i>Cinclus pallasii</i>		LC	LC	O, I	
(69)椋鸟科 Sturnidae						
八哥	<i>Acridotheres cristatellus</i>		LC	LC	O, I	
丝光椋鸟	<i>Spodiopsar sericeus</i>		LC	LC	O	否 N
灰椋鸟	<i>Spodiopsar cineraceus</i>		LC	LC	O, I	
北椋鸟	<i>Agropsar sturninus</i>		LC	LC	O, I	
紫翅椋鸟	<i>Sturnus vulgaris</i>		LC	LC	O	否 N
(70)鸫科 Turdidae						
白眉地鸫	<i>Geokichla sibirica</i>		LC	LC	O, I	
淡背地鸫	<i>Zoothera mollissima</i>	I	LC	LC	O	否 N
长尾地鸫	<i>Zoothera dixonii</i>		LC	LC	O, I	
虎斑地鸫	<i>Zoothera aurea</i>		LC	LC	O	否 N
小虎斑地鸫	<i>Zoothera dauma</i>		LC	LC	O, I	
灰背鸫	<i>Turdus hortulorum</i>		LC	LC	O, I	
乌灰鸫	<i>Turdus cardis</i>		LC	LC	O	否 N
灰翅鸫	<i>Turdus boulboul</i>		LC	LC	O	否 N
欧亚乌鸫	<i>Turdus merula</i>		LC	LC	O	否 N
乌鸫	<i>Turdus mandarinus</i>		LC	LC	O, I	
灰头鸫	<i>Turdus rubrocanus</i>		LC	LC	O, I	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
棕背黑头鹟	<i>Turdus kessleri</i>		LC	LC	O, I	
褐头鹟	<i>Turdus feae</i>		VU	VU	O, I	
白眉鹟	<i>Turdus obscurus</i>		LC	LC	O, I	
白腹鹟	<i>Turdus pallidus</i>		LC	LC	O, I	
黑喉鹟	<i>Turdus atrogularis</i>		LC	LC	O, I	
赤颈鹟	<i>Turdus ruficollis</i>		LC	LC	O, I	
红尾斑鹟	<i>Turdus naumanni</i>		LC	LC	O, I	
斑鹟	<i>Turdus eunomus</i>		LC	LC	O, I	
宝兴歌鹟	<i>Turdus mupinensis</i>		LC	LC	O, I	
(71) 鹟科 Muscicapidae						
棕头歌鹟	<i>Larvivora ruficeps</i>		EN	EN	I	
栗腹歌鹟	<i>Larvivora brunnea</i>		LC	LC	O, I	
蓝歌鹟	<i>Larvivora cyane</i>		LC	LC	O	否 N
红喉歌鹟	<i>Calliope calliope</i>		LC	LC	O, I	
黑胸歌鹟	<i>Calliope pectoralis</i>		NT	LC	I	
白须黑胸歌鹟	<i>Calliope tschebaiewi</i>		NT	LC	O, I	
黑喉歌鹟	<i>Calliope obscura</i>		EN	VU	O, I	
金胸歌鹟	<i>Calliope pectardens</i>		VU	NT	I	
白腹短翅鹟	<i>Luscinia phoenicuroides</i>		LC	LC	O, I	
蓝喉歌鹟	<i>Luscinia svecica</i>		LC	LC	O, I	
红胁蓝尾鹟	<i>Tarsiger cyanurus</i>		LC	LC	O	否 N
蓝眉林鹟	<i>Tarsiger rufilatus</i>			LC	O, I	
白眉林鹟	<i>Tarsiger indicus</i>		LC	LC	I	否 N
金色林鹟	<i>Tarsiger chrysaeus</i>		LC	LC	O, I	否 N
蓝短翅鹟	<i>Brachypteryx montana</i>		LC	LC	I	
鹡鹑	<i>Copsychus saularis</i>		LC	LC	O, I	否 N
白喉红尾鹟	<i>Phoenicurus schisticeps</i>		LC	LC	O, I	
蓝额红尾鹟	<i>Phoenicurus frontalis</i>		LC	LC	O, I	
贺兰山红尾鹟	<i>Phoenicurus alaschanicus</i>		LC	NT	O, I	
赭红尾鹟	<i>Phoenicurus ochruros</i>		LC	LC	O, I	
黑喉红尾鹟	<i>Phoenicurus hodgsoni</i>		LC	LC	O, I	
北红尾鹟	<i>Phoenicurus aureoreus</i>		LC	LC	O, I	
红腹红尾鹟	<i>Phoenicurus erythrogastrus</i>		LC	LC	O, I	
红尾水鹟	<i>Rhyacornis fuliginosa</i>		LC	LC	O, I	
白顶溪鹟	<i>Chaimarrornis leucocephalus</i>		LC	LC	O, I	
白尾蓝地鹟	<i>Myiomela leucurum</i>		LC	LC	O, I	
紫啸鹟	<i>Myophonus caeruleus</i>		LC	LC	O, I	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
蓝大翅鸫	<i>Grandala coelicolor</i>		LC	LC	O, I	
小燕尾	<i>Enicurus scouleri</i>		LC	LC	O, I	
白额燕尾	<i>Enicurus leschenaulti</i>			LC	O, I	
黑喉石鹇	<i>Saxicola maurus</i>		LC	LC	O, I	
灰林鹇	<i>Saxicola ferreus</i>		LC	LC	O, I	
沙鹇	<i>Oenanthe isabellina</i>		LC	LC	O, I	
穗鹇	<i>Oenanthe oenanthe</i>		LC	LC	O, I	
白顶鹇	<i>Oenanthe pleschanka</i>		LC	LC	O, I	
漠鹇	<i>Oenanthe deserti</i>		LC	LC	O, I	
白背矶鹇	<i>Monticola saxatilis</i>		LC	LC	O, I	
蓝矶鹇	<i>Monticola solitarius</i>		LC	LC	O, I	
栗腹矶鹇	<i>Monticola rufiventris</i>		LC	LC	I	
白喉矶鹇	<i>Monticola gularis</i>		LC	LC	O, I	
灰纹鹇	<i>Muscicapa griseisticta</i>		LC	LC	O	否 N
乌鹇	<i>Muscicapa sibirica</i>		LC	LC	O, I	
北灰鹇	<i>Muscicapa dauurica</i>		LC	LC	O	否 N
棕尾褐鹇	<i>Muscicapa ferruginea</i>		LC	LC	O, I	
白眉姬鹇	<i>Ficedula zanthopygia</i>		LC	LC	O, I	
绿背姬鹇	<i>Ficedula elisae</i>		NT	LC	O, I	
鸫姬鹇	<i>Ficedula mugimaki</i>		LC	LC	O	否 N
锈胸蓝姬鹇	<i>Ficedula sordida</i>		LC	LC	O, I	
橙胸姬鹇	<i>Ficedula strophiatea</i>		LC	LC	O, I	
红胸姬鹇	<i>Ficedula parva</i>			LC	O	否 N
红喉姬鹇	<i>Ficedula albicilla</i>		LC	LC	O, I	
棕胸蓝姬鹇	<i>Ficedula hyperythra</i>		LC	LC	O	否 N
灰蓝姬鹇	<i>Ficedula tricolor</i>		LC	LC	O, I	
玉头姬鹇	<i>Ficedula sapphira</i>		LC	LC	I	
白腹蓝鹇	<i>Cyanoptila cyanomelana</i>		LC	LC	O	否 N
白腹暗蓝鹇	<i>Cyanoptila cumatilis</i>		LC	NT	I	
铜蓝鹇	<i>Eumyias thalassinus</i>		LC	LC	O, I	
蓝喉仙鹇	<i>Cyornis rubeculoides</i>		LC	LC	O	否 N
中华仙鹇	<i>Cyornis glaucicomans</i>		LC	LC	I	
棕腹大仙鹇	<i>Niltava davidi</i>		LC	LC	O	否 N
棕腹仙鹇	<i>Niltava sundara</i>		LC	LC	O, I	
棕腹蓝仙鹇	<i>Niltava vivida</i>		LC	LC	I	否 N
(72)戴菊科 Regulidae						
戴菊	<i>Regulus regulus</i>		LC	LC	O, I	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
(73)太平鸟科 Bombycillidae						
太平鸟	<i>Bombycilla garrulus</i>		LC	LC	O, I	
小太平鸟	<i>Bombycilla japonica</i>		LC	NT	O, I	
(74)啄花鸟科 Dicaeidae						
黄腹啄花鸟	<i>Dicaeum melanozanthum</i>		LC	LC	I	否 N
纯色啄花鸟	<i>Dicaeum concolor</i>		LC	LC	I	
红胸啄花鸟	<i>Dicaeum ignipectus</i>		LC	LC	I	
(75)花蜜鸟科 Nectariniidae						
蓝喉太阳鸟	<i>Aethopyga gouldiae</i>		LC	LC	O, I	
(76)岩鹇科 Prunellidae						
领岩鹇	<i>Prunella collaris</i>		LC	LC	O, I	
鹇岩鹇	<i>Prunella rubeculoides</i>		LC	LC	O, I	
棕胸岩鹇	<i>Prunella strophiata</i>		LC	LC	O, I	
棕眉山岩鹇	<i>Prunella montanella</i>		LC	LC	O, I	
褐岩鹇	<i>Prunella fulvescens</i>		LC	LC	O, I	
贺兰山岩鹇	<i>Prunella koslowi</i>		VU	LC	O, I	
栗背岩鹇	<i>Prunella immaculata</i>		LC	LC	O, I	
(77)朱鹀科 Urocynchramidae						
朱鹀	<i>Urocynchramus pylzowi</i>		NT	LC	O, I	
(78)梅花雀科 Estrildidae						
白腰文鸟	<i>Lonchura striata</i>		LC	LC	O	否 N
(79)雀科 Passeridae						
黑顶麻雀	<i>Passer ammodendri</i>		LC	LC	I	
家麻雀	<i>Passer domesticus</i>		LC	LC	O	否 N
山麻雀	<i>Passer cinnamomeus</i>		LC	LC	O, I	
麻雀	<i>Passer montanus</i>		LC	LC	O, I	
石雀	<i>Petronia petronia</i>		LC	LC	O, I	
白斑翅雪雀	<i>Montifringilla nivalis</i>		LC	LC	O, I	
藏雪雀	<i>Montifringilla henrici</i>		LC	LC	O, I	
褐翅雪雀	<i>Montifringilla adamsi</i>		LC	LC	O, I	
白腰雪雀	<i>Onychostruthus taczanowskii</i>		LC	LC	O, I	
黑喉雪雀	<i>Pyrgilauda davidiana</i>		LC	LC	I	
棕颈雪雀	<i>Pyrgilauda ruficollis</i>		LC	LC	O, I	
棕背雪雀	<i>Pyrgilauda blanfordi</i>		LC	LC	O, I	
(80)鹡鸰科 Motacillidae						
山鹡鸰	<i>Dendronanthus indicus</i>		LC	LC	O, I	
西黄鹡鸰	<i>Motacilla flava</i>		LC	LC	O	否 N

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
黄鹡鸰	<i>Motacilla tschutschensis</i>		LC	LC	O, I	
黄头鹡鸰	<i>Motacilla citreola</i>		LC	LC	O, I	
灰鹡鸰	<i>Motacilla cinerea</i>		LC	LC	O, I	
白鹡鸰	<i>Motacilla alba</i>		LC	LC	O, I	
田鸫	<i>Anthus richardi</i>		LC	LC	O, I	
东方田鸫	<i>Anthus rufulus</i>		LC	LC	O	否 N
布氏田鸫	<i>Anthus godlewskii</i>		LC	LC	O, I	
林鸫	<i>Anthus trivialis</i>		LC	LC	O, I	否 N
树鸫	<i>Anthus hodgsoni</i>		LC	LC	O, I	
北鸫	<i>Anthus gustavi</i>		LC	LC	I	
粉红胸鸫	<i>Anthus roseatus</i>		LC	LC	O, I	
红喉鸫	<i>Anthus cervinus</i>		LC	LC	O	否 N
黄腹鸫	<i>Anthus rubescens</i>		LC	LC	O	否 N
水鸫	<i>Anthus spinoletta</i>		LC	LC	O, I	
(81)燕雀科 Fringillidae						
苍头燕雀	<i>Fringilla coelebs</i>		LC	LC	O	否 N
燕雀	<i>Fringilla montifringilla</i>		LC	LC	O, I	
黄颈拟蜡嘴雀	<i>Mycerobas affinis</i>		LC	LC	O, I	
白点翅拟蜡嘴雀	<i>Mycerobas melanozanthos</i>		LC	LC	O, I	
白斑翅拟蜡嘴雀	<i>Mycerobas carnipes</i>		LC	LC	O, I	
锡嘴雀	<i>Coccothraustes coccothraustes</i>		LC	LC	O	否 N
黑尾蜡嘴雀	<i>Eophona migratoria</i>		LC	LC	O, I	
黑头蜡嘴雀	<i>Eophona personata</i>		NT	LC	O	否 N
褐灰雀	<i>Pyrrhula nipalensis</i>		LC	LC	O	否 N
灰头灰雀	<i>Pyrrhula erythaca</i>		LC	LC	O, I	
蒙古沙雀	<i>Bucanetes mongolicus</i>			LC	O, I	
巨嘴沙雀	<i>Rhodospiza obsoleta</i>		LC	LC	O, I	
赤朱雀	<i>Agraphospiza rubescens</i>		LC	LC	O, I	
暗胸朱雀	<i>Procarduelis nipalensis</i>		LC	LC	I	
林岭雀	<i>Leucosticte nemoricola</i>		LC	LC	O, I	
高山岭雀	<i>Leucosticte brandti</i>		LC	LC	O, I	
普通朱雀	<i>Carpodacus erythrinus</i>		LC	LC	O, I	
拟大朱雀	<i>Carpodacus rubicilloides</i>		NT	LC	O, I	
大朱雀	<i>Carpodacus rubicilla</i>		LC	LC	O, I	
红眉朱雀	<i>Carpodacus pulcherrimus</i>		LC	LC	O, I	
中华朱雀	<i>Carpodacus davidianus</i>	I	LC	LC	O	
曙红朱雀	<i>Carpodacus waltoni</i>		LC	LC	O, I	

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
棕朱雀	<i>Carpodacus edwardsii</i>		LC	LC	I	
淡腹点翅朱雀	<i>Carpodacus verreauxii</i>		LC	LC	O, I	
酒红朱雀	<i>Carpodacus vinaceus</i>		LC	LC	O, I	
沙色朱雀	<i>Carpodacus stoliczkae</i>		LC	LC	O, I	
藏雀	<i>Carpodacus roborowskii</i>		VU	LC	O, I	
长尾雀	<i>Carpodacus sibiricus</i>		LC	LC	O, I	
北朱雀	<i>Carpodacus roseus</i>		LC	LC	O, I	
斑翅朱雀	<i>Carpodacus trifasciatus</i>		LC	LC	O, I	
喜山白眉朱雀	<i>Carpodacus thura</i>		LC	LC	O	否 N
白眉朱雀	<i>Carpodacus dubius</i>		LC	LC	O, I	
红胸朱雀	<i>Carpodacus puniceus</i>		LC	LC	O, I	
红眉松雀	<i>Carpodacus subhimachala</i>		LC	LC	I	
金翅雀	<i>Chloris sinica</i>		LC	LC	O, I	
黑头金翅雀	<i>Chloris ambigua</i>		LC	LC	O	否 N
黄嘴朱顶雀	<i>Linaria flavirostris</i>		LC	LC	O, I	
白腰朱顶雀	<i>Acanthis flammea</i>		LC	LC	O, I	
红交嘴雀	<i>Loxia curvirostra</i>		LC	LC	O, I	
藏黄雀	<i>Spinus thibetanus</i>		NT	LC	O, I	
黄雀	<i>Spinus spinus</i>		LC	LC	O, I	
(82)铁爪鹀科 Calcariidae						
铁爪鹀	<i>Calcarius lapponicus</i>		NT	LC	O, I	
(83)鹀科 Emberizidae						
蓝鹀	<i>Emberiza siemsseni</i>		LC	LC	O, I	
白头鹀	<i>Emberiza leucocephalos</i>		LC	LC	O, I	
灰眉岩鹀	<i>Emberiza godlewskii</i>		LC	LC	O, I	
三道眉草鹀	<i>Emberiza cioides</i>		LC	LC	O, I	
白眉鹀	<i>Emberiza tristrami</i>		NT	LC	O	否 N
栗耳鹀	<i>Emberiza fucata</i>		LC	LC	O, I	
小鹀	<i>Emberiza pusilla</i>		LC	LC	O	否 N
黄眉鹀	<i>Emberiza chrysophrys</i>		LC	LC	O	否 N
田鹀	<i>Emberiza rustica</i>		LC	VU	O, I	
黄喉鹀	<i>Emberiza elegans</i>		LC	LC	O, I	
黄胸鹀	<i>Emberiza aureola</i>		EN	CR	O	否 N
栗鹀	<i>Emberiza rutila</i>		LC	LC	O	否 N
藏鹀	<i>Emberiza koslowi</i>		VU	NT	O, I	
灰头鹀	<i>Emberiza spodocephala</i>		LC	LC	O, I	
苇鹀	<i>Emberiza pallasi</i>		LC	LC	O, I	

段菲, 李晟 (2020) 黄河流域鸟类多样性现状、分布格局及保护空缺. 生物多样性, 28(12): 1459–1468.
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020259>

中文名	拉丁名	国家保护级别	中国红色名录等级	IUCN 红色名录等级	记录方式	国家级自然保护区是否覆盖
Chinese name	Scientific name	National protection category	China redlist	IUCN redlist	Recording type	National nature reserves covered
红颈苇鹀	<i>Emberiza yessoensis</i>		NT	NT	I	否 N
芦鹀	<i>Emberiza schoeniclus</i>		LC	LC	O, I	

附录3 黄河流域的国家级自然保护区

Appendix 3 List of national nature reserves in the Yellow River basin, China

名称	地区	保护对象	类型
Name	Area	Protect object	Type
青海			
1. 大通北川河源区	大通回族土族自治县	高原森林生态系统及白唇鹿、冬虫夏草等	森林生态
2. 三江源	玉树县、囊谦县、杂多	珍稀动物及湿地、森林、高寒草甸等	内陆湿地
3. 循化孟达	循化撒拉族自治县	森林生态系统及珍稀生物物种	森林生态
甘肃			
4. 黄河首曲	玛曲县	黄河首曲高原湿地生态系统	内陆湿地
5. 尕斯库勒湖	碌曲县	黑颈鹤等野生动物、高寒沼泽湿地森林生态	野生动物
6. 莲花山	康乐县、临潭县、卓尼	森林生态系统	森林生态
7. 连城	永登县	森林生态系统及祁连柏、青扦等物种	森林生态
8. 祁连山	酒泉市	森林及野生动物	森林生态
9. 秦州珍稀水生野生动物	天水市秦州区	大鲵、秦岭细鳞鲑、山溪鲵、中国林蛙等	野生动物
10. 太子山	临夏回族自治州、甘南	水源涵养林及野生动植物	森林生态
11. 大统-崆峒山	平凉市崆峒区	温带落叶阔叶林生态系统及野生动植物	森林生态
12. 洮河	卓尼县、临潭县	森林生态系统	森林生态
13. 兴隆山	榆中县	森林生态系统	森林生态
14. 漳县珍稀水生野生动物	漳县	细鳞鲑及其生境	野生动物
四川			
15. 若尔盖湿地	若尔盖县	高寒沼泽湿地及黑颈鹤等野生动物	内陆湿地
宁夏			
16. 白芨滩	灵武市	天然柠条母树林及沙生植被 荒漠生态系统、湿地生态系统及珍稀野生动	荒漠生态
17. 哈巴湖	盐池县	物	荒漠生态
18. 火石寨丹霞地貌	西吉县	丹霞地貌地质遗迹及自然人文景观	地质遗迹
19. 贺兰山	银川市西夏区、永宁县	森林生态系统、野生动植物资源	森林生态
20. 罗山	吴忠市红寺堡区、同心	珍稀野生动植物及森林生态系统	森林生态
21. 六盘山	泾源县、隆德县、固原	水源涵养林及野生动物	森林生态
22. 云雾山	固原市原州区	黄土高原半干旱区典型草原生态系统	草原草甸
23. 沙坡头	中卫市	自然沙生植被及人工治沙植被	荒漠生态
内蒙古			
24. 大青山	呼和浩特市	森林生态系统	森林生态
25. 鄂托克恐龙遗迹化石	鄂托克旗	恐龙足迹化石	古生物遗迹
26. 鄂尔多斯遗鸥	鄂尔多斯市	遗鸥及其生境	野生动物
27. 哈腾套海	磴口县	绵刺及荒漠草原、湿地生态系统	荒漠生态
28. 西鄂尔多斯	鄂托克旗、乌海市	四合木等濒危植物及荒漠生态系统	野生植物
陕西			
29. 韩城黄龙山褐马鸡	韩城市	褐马鸡及其生境	野生动物

名称	地区	保护对象	类型
Name	Area	Protect object	Type
30. 陇县秦岭细鳞蛙	陇县	细鳞蛙及其生境	野生动物
31. 牛背梁	柞水县、西安市长安区	扭角羚等珍稀动物及其栖息地	野生动物
32. 太白山	太白、眉县、周至县	森林生态系统、自然历史遗迹	森林生态
33. 延安黄龙山褐马鸡	黄龙县、宜川县	褐马鸡及其生境	野生动物
34. 子午岭	富县	森林生态系统及豹、黑鹳、金雕等濒危动物	森林生态
35. 周至	周至县	金丝猴等野生动物及其生境	野生动物
山西			
36. 黑茶山	兴县	森林生态系统及褐马鸡	森林生态
37. 芦芽山	宁武县、岢岚县、五寨	褐马鸡及华北落叶松、云杉次生林	野生动物
38. 历山	垣曲、沁水、翼城等县	森林植被及金钱豹、金雕等野生动物	森林生态
		油松林和辽东栎林等暖温带落叶阔叶林生态	
39. 灵空山	沁源县、古县	系统	森林生态
40. 庞泉沟	交城县、方山县	褐马鸡及华北落叶松、云杉等森林生态系统	野生动物
41. 五鹿山	蒲县、隰县	褐马鸡及其生境	野生动物
42. 阳城莽河猕猴	阳城县	猕猴等珍稀野生动植物	野生动物
河南			
43. 伏牛山	西峡县、内乡县、南召 三门峡、洛阳、焦作、济	过渡带森林生态系统	森林生态
44. 黄河湿地	源等	湿地生态、珍稀鸟类	内陆湿地
45. 太行山猕猴	济源、焦作、新乡	猕猴及森林生态系统	野生动物
46. 小秦岭	灵宝市	暖温带森林生态系统及珍稀动植物	森林生态
47. 新乡黄河湿地鸟类	新乡市	天鹅、鹤类等珍禽及湿地生态系统	内陆湿地
山东			
48. 黄河三角洲	东营市垦利县、利津县	河口湿地生态系统及珍禽	海洋海岸



•综述•

黄河流域湿地水鸟多样性保护对策

孙工棋^{1,2} 张明祥^{1,2} 雷光春^{1,2*}

1 (北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083)

2 (黄河流域生态保护国家林草局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 黄河是中华文明的发源地, 被誉为母亲河, 是两岸社会经济保障的保障, 切实保护好黄河流域湿地生态系统, 事关中华民族伟大复兴的千秋大计。黄河流域湿地总面积为391万ha, 其中80.4%分布在上游, 中游和下游分别仅12.5%和7.1%。黄河流域是东亚-澳大利西亚候鸟迁徙路线和中亚候鸟迁徙路线上水鸟的关键栖息地, 一些迁徙水鸟最关键的栖息地均分布在黄河流域, 如黑颈鹤(*Grus nigricollis*)、白鹤(*G. leucogeranus*)、丹顶鹤(*G. japonensis*)、斑头雁(*Anser indicus*)、大鸨(*Otis tarda*)、东方白鹳(*Ciconia boyciana*)、大天鹅(*Cygnus cygnus*)、疣鼻天鹅(*C. olor*)、青头潜鸭(*Aythya baeri*)等。尽管黄河流域湿地提供的水资源仅占全国的2%, 但维持着全国12%的人口饮水安全和15%的耕地用水, 湿地生态系统的脆弱性较高。截至2017年底, 黄河流域已建立各类湿地自然保护区230处, 其中国家公园2处、国家级自然保护区9处、地方级自然保护区68处、国家湿地公园145处、省级湿地公园6处, 湿地保护率达到65%, 高于我国湿地保护53%的平均水平。然而, 流域尺度现有水鸟生物多样性保护仍然面临不少挑战, 包括全球气候变化、水资源过度利用、水环境污染、栖息地丧失等。为此, 我们提出了建立以国家公园为主体的湿地保护地体系、开展濒危候鸟栖息地修复和强化黄河流域综合管理的体制机制建设等建议。

关键词: 黄河流域; 湿地; 水鸟; 生物多样性; 保护对策; 水资源管理

Wetland water bird biodiversity conservation strategies in the Yellow River basin

Gongqi Sun^{1,2}, Mingxiang Zhang^{1,2}, Guangchun Lei^{1,2*}

1 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083

2 Key Laboratory of Ecological Protection in the Yellow River Basin of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083

Abstract: The Yellow River plays an important Part Chinese History, and is considered the mother river for China. The river basin is rich in wetland resources, which helps social and economic development. Therefore, effective conservation of this wetland ecosystem is important for China's future prosperity. According to the 2nd National Wetland Inventory, there are 3.91 million hectares (ha) of wetlands in the river basin. Most wetlands are distributed in the upstream part of the river (80.4%). Whereas, the middle reaches and lower reaches of the river account for 12.5% and 7.1% of wetlands, respectively. Wetlands are key habitats for migratory water birds in the East Asia-Australasia flyway, and the Central Asia Flyway. Some species are critically endangered depending on the Yellow River wetlands, such as *Grus nigricollis*, *G. leucogeranus*, *G. japonensis*, *Anser indicus*, *Otis tarda*, *Ciconia boyciana*, *Cygnus cygnus*, *C. olor*, *Aythya baeri*. Although the river basin retains only 2% of the country's water resources, it provides drinking water for 12% of the country's population and irrigation for 15% of the country's arable land. Unfortunately, the wetland ecosystem is relatively fragile and in need of conservation. To protect the Yellow River wetland ecosystem, 230 wetland protected areas have been established. These protected areas include 2 national parks, 9 national nature reserves, 68 local nature reserves, 145 national wetland parks, and 6 provincial wetland parks. The rate of wetlands being protected exceeds 65%, which is above than national average 53%. However, current conservation efforts are still unable to mitigate key challenges such as climate change, over exploitation of

收稿日期: 2020-06-04; 接受日期: 2020-11-03

基金项目: 第二次青藏高原科学考察研究(2019QZKK0304)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: guangchun.lei@foxmail.com

water resources, pollution, and the degradation of habitats for water birds. A list of comprehensive wetland biodiversity conservation strategies has been proposed which include: establishing a river basin protected area system, conserving and restoring key habitats for endangered water birds, and strengthening an integrating the river basin management with effective mechanisms.

Key words: Yellow River; wetlands; water birds; biodiversity; conservation strategies; water management

全球20%的鸟类以湿地为主要栖息地(Cristina et al, 2010)。然而,因湿地普遍遭受破坏,湿地水鸟是全球受威胁比例最高的类群之一。第四次全球水鸟种群评估(WPE4)结果显示,近6%的水鸟种群已灭绝,40%处于下降趋势,34%保持稳定,仅有17%处于增长趋势(Almond et al, 2020)。其中,亚洲湿地水鸟种群下降趋势最为明显,62%的已知种群呈现下降和灭绝趋势。湿地水鸟是湿地生态系统的重要指示物种,其多样性及变化反映了湿地水质水量、生态服务功能及植被组成等生态特征(Grabas et al, 2008)。气候变化、围垦、工农业污染、城市化进程、土地利用变化等导致湿地减少和退化,对全球水鸟的分布格局及种群变化产生了重要影响(Ramsar Convention Secretariat, 2018)。全球共有9大候鸟迁徙路线,其中中亚、东亚-澳大利西亚和西太平洋3条迁徙路线经过中国,因此,中国湿地在全球水鸟保护中具有重要意义。

黄河是我国重要的生态屏障,横跨青藏高原、黄土高原、华北平原,拥有三江源、祁连山等多个国家公园和国家重点生态功能区,以仅占全国2%的水资源量支撑着12%的人口饮水安全和15%的耕地用水(曹静宇等, 2018; 陈耀, 2019; 樊杰等, 2020)。黄河流域湿地类型多样,包括近海与海岸、河流、湖泊、沼泽和人工湿地5类,总面积390万ha(表1),约占全国湿地面积的6%。黄河流域的湿地以沼泽和河流为主,其中沼泽湿地233.79万ha,占全流域湿地总面积的59.9%,河流湿地102.94万ha,占26.4%。上游源头、中游河套地区以及河口三角洲地区等湿地水鸟资源丰富,在全球水鸟保护中发挥着重要作用,为中亚和东亚-澳大利西亚两大迁徙路线上的水鸟提供了重要的繁殖地、停歇地和越冬地。然而,黄河流域湿地生态系统的脆弱性较高,气候变化、过牧、采沙、排污、围垦等均影响着黄河流域的湿地生态健康(张金良等, 2018; 樊杰等, 2020)。本研究回顾了黄河流域湿地的空间分布格局及水鸟多样性分布的关键区域和保护现状,剖析了

该区域湿地资源面临的主要问题,提出了水鸟多样性保护与管理的建议,旨在为黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的实施提供科学依据。

表1 黄河流域各类型湿地面积($\times 10^4$ ha)

Table 1 Areas of different types of wetland the Yellow River basin ($\times 10^4$ ha)

湿地类 Wetland	湿地型 Wetland type	面积 Areas
近海与海岸湿地 Coastal	河口水域 Estuary	0.38
	淤泥质海滩 Mudflats	3.76
	潮间盐沼 Tidal	0.60
	三角洲/沙洲/沙岛 Delta	0.28
	浅海水域 Sublittoral	1.50
	小计 Sub-total	6.52
河流湿地 River	永久性河流 Permanent river	59.78
	季节性或间歇性河流 Seasonal river	15.22
	洪泛平原 Floodplain	27.95
	小计 Sub-total	102.94
湖泊湿地 Lake	永久性淡水湖 Permanent freshwater lake	20.60
	永久性咸水湖 Permanent saline lake	1.93
	季节性淡水湖 Seasonal freshwater lake	0.17
	季节性咸水湖 Seasonal saline lake	3.79
	小计 Sub-total	26.49
沼泽湿地 Marshes	沼泽化草甸 Fen	203.94
	季节性咸水沼泽 Seasonal saline marshes	6.99
	内陆盐沼 Intermittent saline swamp	5.99
	森林沼泽 Swamp forest	0.04
	灌丛沼泽 Swamp shrub	4.40
	草本沼泽 Swamp grass	12.43
	地热湿地 Geothermy wetland	0.0008
	淡水泉/绿轴 Freshwater spring	0.0025
	小计 Sub-total	233.79
人工湿地 Artificial	库塘 Reservoir	14.59
	运河、输水河 Canal	3.40
	稻田/冬水田 Paddy	0.77
	水产养殖场 Aquafarm	1.70
	盐田 Saltern	1.41
	小计 Sub-total	20.46
总计 Total		390.20

1 黄河流域湿地候鸟栖息地及水鸟多样性

1.1 黄河上游栖息地及多样性

黄河上游包括龙羊峡以上的黄河源区及龙羊峡—河口镇的上游区域, 湿地总面积为313.66万ha (表2)。其中, 河源区湿地面积219.08万ha, 占黄河上游湿地总面积的69.9%; 龙羊峡—河口镇湿地总面积94.58万ha (国家林业局调查规划设计院, 2016)。

黄河源头以沼泽化草甸湿地和泥炭地为主, 包括面积达185.80万ha的若尔盖湿地(占黄河源区湿地总面积的84.8%) (马骅等, 2019), 是黑颈鹤(*Grus nigricollis*)、斑头雁(*Anser indicus*)的主要繁殖地(李扎西姐等, 2017)。其次是湖泊湿地, 面积15.8万ha (占河源区湿地总面积的7.8%) (国家林业局调查规划设计院, 2016)。鄂陵湖、扎陵湖、星海等湖泊湿地是全球水鸟保护的关键区域, 为黑颈鹤、灰鹤(*Grus grus*)、斑头雁、赤麻鸭(*Tadorna ferruginea*)、玉带海雕(*Haliaeetus leucoryphus*)、大鵟(*Buteo hemilasius*)、红隼(*Falco tinnunculus*)、猎隼(*F. cherrug*)等提供了重要栖息地, 是中亚迁徙路线上的主要候鸟繁殖地和停歇地(窦亮等, 2013)。本课题组自2016年起对河源区进行水鸟生物多样性监测, 每年记录到的水鸟数量为26,000余只, 其中记录到的斑头雁最大种群数量约7,000只, 占全球种群的12.5%; 赤麻鸭数量为6,030只, 占全球种群的8.5%; 棕头鸥(*Larus brunnicephalus*)约4,000只, 占全球种群的2.9%; 普通鸬鹚(*Phalacrocorax carbo*)数量为2,755只, 占全球种群数量的2.76%; 针尾鸭(*Anas acuta*)数量为4,844只, 占全球种群数量的2% (表3)。

源头的河流湿地总面积为14.35万ha, 占河源区湿地总面积的7.1%, 400余条大小河流纵横交错, 与源头沼泽湿地和湖泊湿地交织(国家林业局调查规划设计院, 2016)。河流水域、浅滩为鹤类(主要为

黑鹳(*Ciconia nigra*)、鸬鹚类、雁鸭类等提供了停歇地(张国钢等, 2013)。

源头之下的龙羊峡—河口镇以河流湿地和河套地区的湖泊—沼泽湿地为主体, 其中, 河套地区的关键栖息地, 如宁夏沙湖、内蒙古乌海和乌梁素海是国内外著名候鸟栖息地, 位于东亚—澳大利西亚及中亚—印度两条迁徙路线上, 是重要的水鸟繁殖地和停歇地(李长看等, 2010; Zhang et al, 2017), 为超过全球16%的疣鼻天鹅(*Cygnus olor*)、11%的大天鹅(*Cygnus cygnus*)、16%的大鸨(*Otis tarda*)、28.6%的青头潜鸭(*Aythya baeri*)、35.6%的白骨顶(*Fulica atra*)、4%的棕头鸥、7.8%的红嘴鸥(*Larus ridibundus*)、6%的凤头鸊鷉(*Podiceps cristatus*)和6.35%的黑翅长脚鸬(*Himantopus himantopus*)提供了栖息地(李长看等, 2019)。

1.2 黄河中游栖息地及多样性

黄河中游包括第二阶梯的内蒙古高原和黄土高原, 从甘肃河口镇到河南花园口, 河段及流域湿地总面积约48.79万ha (表2), 占黄河流域湿地总面积的12.5% (国家林业局, 2015)。优质的湿地资源为众多水鸟提供了栖息地, 有22种水鸟的种群数量超过迁徙路线上该物种种群数量的1%, 主要以三门峡和黄河故道为栖息地, 是中游湿地水鸟多样性保护的关键地区(表4) (李淑红等, 2017; 何冰和王保星, 2018)。

黄河中游以河流湿地为主, 面积为38.26万ha, 占中游湿地总面积的78.4%。黄河故道是全球水鸟迁徙的重要通道, 是大鸨在东亚的重要越冬栖息地(赵文珍等, 2018)。2007—2017年间针对河南黄河湿地水鸟多样性的调查结果显示, 大鸨最大观测种群数量为352只, 占东亚种群总数的20% (Alonso & Palacin, 2010; 李长看等, 2013; 朱龙飞等, 2018)。

表2 黄河流域各类湿地面积(分布比例 %)

Table 2 Area (proportion) of all kinds of wetlands in the Yellow River basin

湿地类 Wetland	全流域 Basin ($\times 10^4$ ha)	上游 Upper reach ($\times 10^4$ ha)	中游 Middle reach ($\times 10^4$ ha)	下游 Lower reach ($\times 10^4$ ha)
近海与海岸湿地 Coastal	655.16 (1.7%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	6.52 (23.5%)
河流湿地 River	102.94 (26.4%)	48.80 (15.6%)	38.26 (78.4%)	15.88 (57.2%)
湖泊湿地 Lake	26.49 (6.8%)	26.10 (8.3%)	0.36 (0.7%)	0.02 (0.1%)
沼泽湿地 Marshes	233.79 (59.9%)	229.29 (73.1%)	1.66 (3.4%)	2.85 (10.2%)
人工湿地 Artificial	20.46 (5.2%)	9.46 (3.0%)	8.51 (17.5%)	2.49 (9.0%)
合计 Total	390.20 (100.0%)	313.66 (100%)	48.79 (100%)	27.76 (100%)

表3 黄河源区生物多样性关键区域(扎陵湖和鄂陵湖)水鸟物种及数量

Table 3 Water bird species and quantity in the biodiversity key areas of the source area in the Yellow River (Zhaling Lake and Eling Lake)

鸟种 Species	最大观测数 Max. count	1%标准 1% criterion
斑头雁 <i>Anser indicus</i>	7,000	560
赤麻鸭 <i>Tadorna ferruginea</i>	6,030	710
针尾鸭 <i>Anas acuta</i>	4,844	2,400
凤头潜鸭 <i>Aythya fuligula</i>	34	2,400
普通秋沙鸭 <i>Mergus merganser</i>	46	710
凤头鸕鹚 <i>Podiceps cristatus</i>	214	350
黑颈鸕鹚 <i>Podiceps nigricollis</i>	19	1,000
黑鹳 <i>Ciconia nigra</i>	2	1
普通鸕鹚 <i>Phalacrocorax carbo</i>	2,755	1,000
骨顶鸡 <i>Fulica atra</i>	143	20,000
灰鹤 <i>Grus grus</i>	16	10
黑颈鹤 <i>Grus nigricollis</i>	8	100
蒙古沙鸨 <i>Charadrius mongolus</i>	72	790
红脚鹬 <i>Tringa totanus</i>	28	1,000
青脚滨鹬 <i>Calidris temminckii</i>	1	1,000
普通燕鸥 <i>Glareola maldivarum</i>	318	28,800
棕头鸥 <i>Larus brunnicephalus</i>	4,000	1,400
渔鸥 <i>Ichthyaetus ichthyaetus</i>	500	1,000
普通燕鸥 <i>Sterna hirundo</i>	318	1,000

1%标准即占全球迁徙路线上鸟类种群数量的1%，为衡量全球重要鸟区(IBA)的关键标准。

1% criterias is 1% of the bird population on the global migration routes, which is the key criterias to measure the global important bird areas (IBA).

2018年河南民权黄河故道的水鸟调查发现，该区为青头潜鸭的重要栖息地，其最大观测种群数量143只(李长看等, 2019)(表4)。

其次为人工湿地，面积为8.51万ha，占中游湿地总面积的17.4%。三门峡是大天鹅的关键越冬地，每年有超过全球11%的大天鹅种群来此越冬^①。这里水鸟资源丰富，调查记录有国家I级保护水鸟东方白鹳(*Ciconia boyciana*)、黑鹳、大鸨、白尾海雕(*Haliaeetus albicilla*)、白肩雕(*Aquila heliaca*)、金雕(*A. chrysaetos*)、玉带海雕、白头鹤(*Grus monacha*)、丹顶鹤(*Grus japonensis*)和白鹤(*G. leucogeranus*)，国家II级保护水鸟白鹈鹕(*Pelecanus onocrotalus*)、小天鹅(*Cygnus columbianus*)、鸳鸯(*Aix galericulata*)、

表4 黄河中游22种超过迁徙路线上种群数量1%的迁徙水鸟详细信息

Table 4 Twenty-two migratory water birds over 1% of the population in the middle reach of the Yellow River

鸟种 Species	最大观测数量 Max. count	1%标准 1% criterion
凤头鸕鹚 <i>Podiceps cristatus</i>	1,500	250
黑颈鸕鹚 <i>Podiceps nigricollis</i>	130	100
大天鹅 <i>Cygnus cygnus</i>	6,600	600
疣鼻天鹅 <i>Cygnus olor</i>	332	20
赤颈鸭 <i>Anas penelope</i>	5,500	5,000
赤膀鸭 <i>Anas strepera</i>	6,300	5,000
赤嘴潜鸭 <i>Netta rufina</i>	1,855	1,000
骨顶鸡 <i>Fulica atra</i>	35,630	1,000
黑翅长脚鹬 <i>Himantopus himantopus</i>	1,587	250
金眶鸨 <i>Charadrius dubius</i>	260	250
棕头鸥 <i>Larus brunnicephalus</i>	4,000	1,000
红嘴鸥 <i>Larus ridibundus</i>	7,781	1,000
遗鸥 <i>Larus relictus</i>	143	120
普通燕鸥 <i>Sterna hirundo</i>	700	250
大鸨 <i>Otis tarda</i>	352	22
青头潜鸭 <i>Aythya baeri</i>	143	5
普通鸕鹚 <i>Phalacrocorax carbo</i>	2,800	1,000
白琵鹭 <i>Platalea leucorodia</i>	1,860	100
苍鹭 <i>Ardea cinerea</i>	10,000	10,000
夜鹭 <i>Nycticorax nycticorax</i>	15,000	10,000
黑尾塍鹬 <i>Limosa limosa</i>	2,600	1,600
鸕鹚 <i>Phalacrocorax carbo</i>	3,000	1000

蓑羽鹤(*Anthropoides virgo*)、白额雁(*Anser albifrons*)等(时良等, 2009)。

1.3 黄河下游栖息地及多样性

黄河下游从河南花园口到河口，湿地总面积27.76万ha(表2)，占黄河湿地总面积的7.1%。下游湿地主要以河流、滨海和沼泽湿地为主。

黄河下游的河流湿地主要为雁鸭类和鹭类提供栖息地，是全球鸟类迁徙的重要通道。河流湿地面积为15.88万ha，占下游湿地总面积的57.2%，为黑鹳、白额雁、大天鹅、小天鹅、鸳鸯、灰鹤、苍鹭(*Ardea cinerea*)等提供了繁殖地和越冬地。沼泽湿地面积为2.85万ha，占下游湿地总面积的10.2%，主要为依河流湿地分布的河漫滩和草甸沼泽湿地，为苍鹭、大白鹭、灰鹤、大鸨等提供了繁殖地和迁徙停歇地。

滨海湿地面积为6.52万ha，占黄河下游湿地总面积的23.5%，这里有全世界暖温带最年轻、保存最

① 李刚 (2007) 内蒙古河套灌区节水对乌梁素海的影响研究. 硕士学位论文, 中国农业科学院研究生院, 北京.

完整、总面积最大的滨海湿地——黄河三角洲湿地(国家林业局, 2015; 刘佳琦等, 2017; 卢英俊等, 2018)。这里为东北亚内陆-环西太平洋和东亚-澳大利西亚两大鸟类迁徙路线上的重要停歇地、越冬地和繁殖地, 在此栖息的鸟类中有24种超过全球种群数量的1%, 被誉为鸟类重要的“国际机场”(张晓龙等, 2009; 黄子强等, 2018a; 吕丽, 2019^①)。黄河三角洲自然保护区内有7种鹤类栖息, 为全球种群54.5%的丹顶鹤、12.93%的疣鼻天鹅、13.13%的豆雁(*Anser fabalis*)、39.6%的青头潜鸭提供了越冬栖息地(王刚, 2010^②; 董林水等, 2018; 黄子强等, 2018a), 为占全球种群5.17%的斑尾塍鹬(*Limosa lapponica*)、5.4%的黑尾塍鹬(*L. limosa*)、14%的东方白鹳、14.12%的黑嘴鸥(*Larus saundersi*)、18.6%的黑腹滨鹬(*Calidris alpina*)、63.68%的灰斑鸻(*Pluvialis squatarola*)、97.3%的环颈鸻(*Charadrius alexandrinus*)、97.7%的白腰杓鹬(*Numenius arquata*)等提供了重要的繁殖栖息地(张晓龙等, 2009; 王刚, 2010^②; 吕丽, 2019^①) (表5)。

2 黄河流域湿地水鸟面临的主要威胁

黄河流域湿地候鸟保护面临的主要问题是水鸟适宜栖息地面积锐减, 栖息地质量下降。与1980年相比, 2016年黄河流域湿地面积减少了13%, 流域湿地面积总体上呈下降趋势(国家林业局, 2015; 赵勇等, 2020)。其中湖泊湿地减少24.9%, 沼泽湿地减少20.9%, 部分天然湿地改造成为人工湿地, 导致人工湿地增加了60.0% (王根绪等, 2004; 王瑞玲等, 2013)。水资源量短缺已成为黄河流域湿地保护与管理面临的主要问题, 自1972年起黄河流域开始出现断流, 20世纪90年代其年均耗水量近300亿m³ (李建华等, 2004; 李政海等, 2007)。赵勇等(2020)对黄河流域2016年的缺水状态进行了识别, 发现全流域年缺水量为114.1亿m³, 主要体现在农业生产、地下水超采及河流生态需水短缺。据黄河流域水资源保护局公布的数据, 2018年黄河干流及支流共145个断面中IV类以下水质断面17个, 共占全流域水质断面总数的22.7% (<http://www.yrcc.gov.cn/>

表5 黄河三角洲25种超过迁徙路线上种群数量1%的迁徙水鸟

Table 5 Twenty-five migratory water birds over 1% of the population in the Yellow River Delta

鸟种 Species	最大观测数量 Max. count	1%标准 1% criterion
大天鹅 <i>Cygnus cygnus</i>	2,000	600
丹顶鹤 <i>Grus japonensis</i>	218	4
灰鹤 <i>Grus grus</i>	102	10
白鹤 <i>Grus leucogeranus</i>	1,500	35
东方白鹳 <i>Ciconia boyciana</i>	350	25
豆雁 <i>Anser fabalis</i>	72,200	5,500
疣鼻天鹅 <i>Cygnus olor</i>	194	15
青头潜鸭 <i>Aythya baeri</i>	198	5
黑嘴鸥 <i>Larus saundersi</i>	1,200	85
黑尾塍鹬 <i>Limosa limosa</i>	8,564	1,600
白腰杓鹬 <i>Numenius arquata</i>	9,766	100
斑尾塍鹬 <i>Limosa lapponica</i>	13,976	2,700
中杓鹬 <i>Numenius phaeopus</i>	2,626	400
红腰杓鹬 <i>Numenius madagascariensis</i>	1,125	210
鹤鹑 <i>Tringa erythropus</i>	594	100
泽鹑 <i>Tringa stagnatilis</i>	3,803	900
青脚鹑 <i>Tringa nebularia</i>	701	400
翘嘴鹑 <i>Xenus cinereus</i>	1,022	360
黑腹滨鹬 <i>Calidris alpina</i>	24,236	1,300
红颈滨鹬 <i>Calidris ruficollis</i>	3,282	3,200
红腹滨鹬 <i>Calidris canutus</i>	638	560
尖尾滨鹬 <i>Calidris acuminata</i>	2,920	1,600
灰斑鸻 <i>Pluvialis squatarola</i>	15,921	2,500
环颈鸻 <i>Charadrius alexandrinus</i>	24,313	250
蒙古沙鸻 <i>Charadrius mongolus</i>	371	350

other/hhgb/)。黄河流域湿地面临的威胁存在空间异质性特征, 这从不同角度影响了其水鸟多样性。上游湿地主要是全球气候变化、过牧和农业灌溉退水污染导致湿地退化, 中游主要是围垦和农业面源污染, 下游受水资源短缺、围垦和外来物种入侵影响较大。

2.1 黄河上游水鸟面临主要威胁

全球气候变化导致鸟类栖息地面积减少, 1975–2000年湿地面积平均每年减少0.54% (Ramsar Convention Secretariat, 2018)。2000年后由于温度明显上升, 河源区呈现出明显的暖湿化趋势, 2000–2007年湿地面积增加了29.63% (燕云鹏等, 2015)。其中, 湖泊湿地受全球气候变化影响显著, 数量呈现出先减后增的趋势(Ramsar Convention

① 吕丽 (2019) 黄河三角洲湿地鸟类多样性及其生境选择. 硕士学位论文, 山东农业大学, 泰安。
② 王刚 (2010) 黄河三角洲湿地鸟类群落研究. 硕士学位论文, 曲阜师范大学, 曲阜。

Secretariat, 2018; 李凤霞等, 2009)。若尔盖湖泊数量由20世纪80年代末期的4,000多个锐减至2002年的不足2,000个, 其数量减少了50%以上, 面积减少了近3,000 km² (游宇驰等, 2018; 马骅等, 2019)。1987–2002年间, 鄂陵湖和扎陵湖的水位下降了1 m以上(赵阳等, 2018; 张克新等, 2020)。2007年后全球气候变暖导致冰川融化, 湖泊水位上升, 湿地面积呈现大幅增长(杜际增等, 2015)。湖泊湿地水文节律变化对水鸟栖息地质量影响较大, 水鸟的多样性和种群数量呈现下降趋势, 尤其是鄂陵湖–扎陵湖的水鸟种群锐减, 黑颈鹤、灰鹤、斑头雁等的繁殖地和停歇地受到严重威胁(高红梅等, 2019)。

人类活动干扰导致适宜栖息地面积减少, 栖息地质量下降, 主要是过牧对沼泽草甸和高寒泥潭沼泽湿地的影响。20世纪80年代后期, 黄河上游湿地出现了沼泽–沼泽化草甸–草甸–沙漠化–荒漠化逆向演替趋势, 湿地面积锐减(王根绪等, 2004; 温小洁和姚顺波, 2018; 杨瑞瑞等, 2018)。近10年来, 仅鸟梁素海的水鸟就减少近百种(灵燕, 2018^①; 赵格日乐图等, 2018), 疣鼻天鹅、棕头鸥和红嘴鸥等重要水鸟的繁殖栖息地受到威胁(李长看等, 2019)

点源污染导致水鸟栖息地质量下降。地表水和地下水污染对黄河上游湿地生态产生重要影响(张少文, 2005)。黄河上游水质较好, 但点源污染在城市河段的干支流较为严重, 并存在空间异质性特点, 即支流污染程度明显高于干流(张威和付新峰, 2011)。20世纪80年代前污染主要来源于大中城市和工业区发展; 80年代后, 在原有污染河段未能得到有效控制的情况下, 水污染范围不断扩大(齐贺停和汪雁, 2004)。地下水在重大污染源附近和地表水受污染严重的区域也受到污染(高宗军和冯国平, 2020), 仅包头市区每年的1.29亿m³废污水在通过沟渠进入黄河前, 就有320万m³渗入地下, 导致区域的潜水优良率仅为潜水总面积的37.3%。上游地区的面源污染主要集中在兰州以下的灌溉农业发达地区。灌溉等对黄河流域水资源的影响增大, 河流水文受闸坝调节和农业灌溉的影响较大, 灌区节水与水淹平衡的矛盾突出(沈彦俊等, 2018), 水文节律受闸坝影响较大, 影响上游湿地生态特征, 从而对水鸟栖息地质量产生较大影响并影响了上游湿

地的水鸟多样性。2001–2019年调查结果显示, 水鸟种数呈现出减少趋势, 由2001年的95种(马强等, 2003)减少到2019年的87种(高红梅等, 2019)。

2.2 黄河中游水鸟面临主要威胁

黄河中游, 围垦导致水鸟栖息地面积减少, 农业面源污染使得水鸟栖息地质量下降。黄河流域为农业文明的发祥地, 农业经济发达, 湿地围垦问题突出, 影响了黄河中游水沙平衡, 导致水资源过度消耗、水质水量下降。湿地退化, 水鸟栖息地面积减少、质量下降(高鹏, 2010)。而且黄河中游的农田灌溉回水导致的土壤盐渍化问题突出(李冬雪等, 2020)。中游水系的污染主要来自上游重工业区污染物排放和农业面源污染(张和军和孟庆伟, 2006)。黄河中游农业面源污染严重, 影响了湿地生态系统特征, 水鸟栖息地质量受影响较大, 水鸟生物多样性和种群数量都受到影响。据不完全统计, 1987–2002年, 黄河中游湿地面积减少20% (王根绪等, 2004; 王瑞玲等, 2013)。同时, 水沙双减对黄河下游及河口地区也会产生综合影响, 中游的黄土沟壑区淤地坝疏于管理, 存在极端降雨引发垮塌和大规模土沙流出的风险(沈彦俊等, 2018)。湿地面积减少导致水鸟栖息地也不同程度地减少, 水鸟多样性呈现下降趋势。

2.3 黄河下游水鸟面临主要威胁

黄河三角洲湿地在全球水鸟保护中占有重要地位, 作为东亚–澳大利西亚候鸟迁徙的重要通道, 其水鸟多样性和种群变化受到全球广泛关注(Wang et al, 2001; 李群等, 2006)。黄河干流水利工程的建设形成清水下泄, 对河槽产生冲刷, 悬河减少, 由悬河引发的洪水灾害问题得到解决, 但随之引发的湿地水文节律变化等生态问题凸显, 洪泛平原等湿地面积减少, 水鸟适宜栖息地面积减少。水量减少导致黄河下游水资源短缺, 引发断流, 严重威胁水鸟种群(李政海等, 2007; 沈彦俊等, 2018; 田冰, 2018)。

河口三角洲湿地资源丰富, 但面临河道断流、入海水量减少、河口淡水三角洲湿地退化、外来种入侵等问题(王延贵等, 2018; 张金良等, 2018)。2000年之前, 由于泥沙的淤积, 黄河三角洲湿地以平均每年2,000–3,000 ha的速度形成新的滨海陆地。之后, 受黄河来水水沙限制, 淤积速率逐年减弱, 有些近海滩区已消失(郎坤等, 2019; 李冬雪等,

① 灵燕 (2018) 内蒙古鸟梁素海非雀形目鸟类时空分布特征及保护管理研究. 硕士学位论文, 内蒙古师范大学, 呼和浩特.

2020)。通过卫星遥感影像解译发现, 1984—2000年河口湿地面积减少了50%以上, 其生物多样性遭到严重破坏, 水鸟适宜栖息地大面积减少, 水鸟种群数量下降(董林水等, 2018; 张晓龙等, 2007)。

外来物种入侵是黄河三角洲湿地水鸟保护面临的另一重要问题。自20世纪60年代以来, 黄河三角洲区域的互花米草(*Spartina alterniflora*)面积逐年递增, 有研究显示, 2010—2015年互花米草年均变化率为91%, 总面积约2,000 ha (刘明月, 2018)。互花米草的入侵对滨海湿地生态系统产生了重要影响, 对植物群落、底栖生物群落结构影响较大, 进而影响滨海湿地水鸟食源和栖息地质量, 对水鸟多样性产生重要影响。有数据显示, 米草(*Spartina anglica*)分布区的鸟种数量仅为非米草分布区鸟种数量的30% (朱士文等, 2012)。

3 黄河流域湿地水鸟多样性保护现状

3.1 黄河流域自然保护地体系建设现状

截至2017年底, 黄河流域共有湿地类型自然保护地230处。其中, 包括三江源和祁连山国家公园2处; 若尔盖、黄河三角洲、新乡黄河湿地水鸟、河南黄河湿地等国家级自然保护区9处, 省级湿地类型自然保护区54处, 县级自然保护区14处, 国家湿地公园145处, 省级湿地公园6处。有青海扎陵湖湿地、青海鄂陵湖湿地、四川若尔盖湿地国家级自然保护区、鄂尔多斯遗鸥国家级自然保护区和山东黄河三角洲湿地等国际重要湿地5处。共有湿地保护面积255.67万ha, 湿地保护率为65.1%。与2013年全国第二次湿地资源调查结果(国家林业局, 2015)相比, 4年间黄河流域的湿地保护面积增加了23.1万ha, 湿地保护率增加了5.8%, 对黄河流域的湿地水鸟形成了有效保护。

尽管黄河流域湿地保护地空间上能够满足湿地水鸟的保护需求, 但存在保护地空间及管理上交叉重叠和保护管理目标不明确等问题, 管理体制机制有待进一步理顺, 管理有效性有待提高。

3.2 黄河流域水资源保护管理现状

2001年由黄河流域水资源保护局编制完成了《黄河流域水资源保护规划》, 详细分析了黄河流域的水资源开发利用、流域社会经济和自然环境状况, 为解决黄河断流、水资源分配不均等问题, 实现黄河流域水生态良性循环、水资源永续利用和促

进社会经济的可持续发展提供了重要保障。

为了有效解决黄河水资源合理利用问题, 经国务院第142次常务会议通过, 2006年8月开始实施《黄河水量调度条例》(以下简称“条例”, http://www.gov.cn/zw/gk/2006-07/28/content_348927.htm)。该条例通过水量分配、水量调度、应急调度、监督管理和法律法规等方面, 规范了黄河流域水资源管理, 旨在加强黄河水量的统一调度, 实现黄河水资源的可持续利用, 促进黄河流域及相关地区经济社会发展和生态环境的改善。该条例的实施也为黄河流域的湿地保护与管理提供了重要保障, 有效解决了黄河流域断流、水鸟栖息地面积萎缩等问题。

3.3 黄河流域主体功能区及生态补偿试点建设

全国生态功能区划将黄河流域湿地生态系统的主导功能划分为土壤保持、水源涵养、洪水调蓄、生物多样性保护和防风固沙等(图1)。近年来, 为了更好地发挥黄河流域湿地生态系统的服务功能, 针对黄河流域不同区域, 积极推动生态功能区管理体系建设。

黄河上游主要是江河源区、内蒙古高原陇中荒漠草原和高寒草甸生态区, 主要实现生物多样性保护、水源涵养和防风固沙等服务功能(王瑞玲等, 2013)。该区有三江源湿地和若尔盖湿地2处国际重要湿地, 为禁止开发区和重点生态功能区; 玛曲湿地和曼则塘湿地2处省级重要湿地为重点生态功能区(国家林业局, 2015)。

黄河中游以农业、草原生态区为主, 有黄土高原农业与草原生态区、内蒙古中部草原生态区、汾渭盆地农业生态区、燕山—太行山山地落叶阔叶林生态区等。重要湿地主要为黄河漫滩、侧渗补给湿地, 主要提供水源涵养、土壤保持、防风固沙等服务功能(郑志飞, 2007^①; 张金良等, 2018)。该区有河南黄河湿地和新乡黄河湿地2处国家级重要湿地, 为禁止开发区; 黄河三门峡湿地、青铜峡库区湿地、乌梁素海湿地、沙湖湿地、杭锦淖尔湿地、南海子湿地、陕西黄河湿地、运城湿地、郑州黄河湿地和开封柳园口湿地10处省级重要湿地, 其中黄河三门峡湿地为重点开发区域, 其余均为限制开发区(国家林业局, 2015; 李山羊等, 2016)。黄河三门峡和青铜峡库区湿地为黄河干流水库, 作为黄河流域的重

^① 郑志飞 (2007) 黄河下游水量水质与生态联合调度系统研究. 硕士学位论文, 河海大学, 南京.

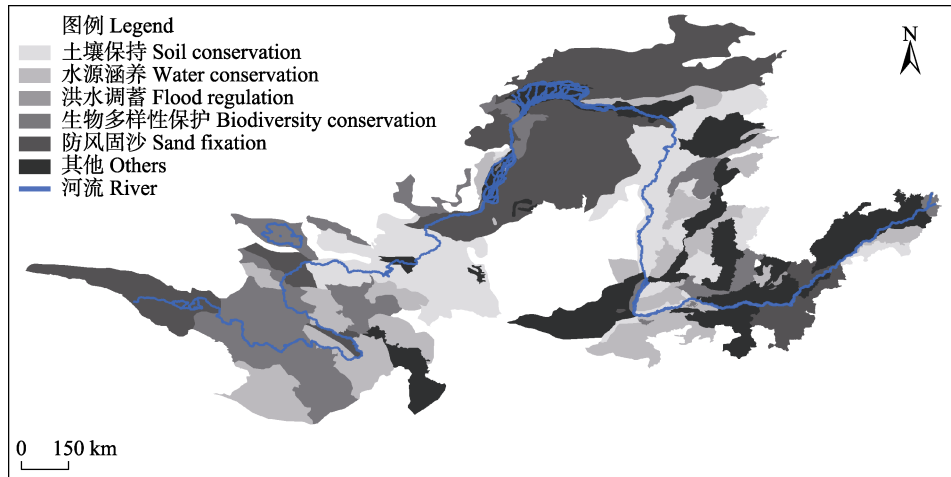


图1 黄河流域生态功能区

Fig. 1 The ecological function zones of the Yellow River basin

大水利枢纽(国家林业局, 2015), 对黄河干流具有重要的水量调蓄等功能。而乌梁素海、沙湖、杭锦淖尔、南海子湿地则为黄河漫滩侧渗补给湿地, 主要发挥水土保持、防风固沙等功能(王瑞玲等, 2013)。

黄河下游以华北平原农业生态区为主, 重要湿地为黄河三角洲湿地, 为国家级重要湿地, 是禁止开发区。具有人工引黄河水补给湿地的功能, 主要提供防风固沙、水源涵养和生物多样性保护等服务功能(张晓龙等, 2009; 宋红丽等, 2019; 李冬雪等, 2020)。

2020年4月由财政部、生态环境部、水利部和国家林业和草原局四部委联合发布了《支持引导黄河全流域建立横向生态补偿机制试点实施方案》(以下简称《方案》)。该《方案》深入贯彻习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会及中央财经委员会第六次会议上的重要讲话精神, 提出建立黄河流域生态补偿机制管理平台、中央财政安排引导资金和鼓励地方加快建立多元化横向生态补偿机制等措施, 加快构建流域综合管理体制, 推动黄河流域共抓大保护, 协同推进大治理, 为水鸟栖息地保护提供了有力保障。

4 黄河流域湿地水鸟保护存在的问题及建议

本文针对黄河流域湿地水鸟资源特色及其保护面临的主要问题, 提出了黄河流域湿地保护体系建设、湿地生态修复、流域综合管理及能力建设等方面的建议, 为进一步保护黄河流域湿地水鸟提供参考。

4.1 完善黄河流域自然保护地体系建设

黄河流域自然保护地体系建设需与国家保护地体系建设衔接, 建设以国家公园为主体、自然保护区为基础、湿地公园为补充的保护体系, 填补保护地空缺。应利用好世界自然遗产、东亚-澳大利西亚迁飞网络、国际湿地城市、国际重要湿地等全球化保护管理平台, 提升区域湿地保护管理能力。根据国家公园生态系统完整性、原真性保护, 全民公益、全民共享的基本原则, 结合黄河流域湿地空间分布与候鸟栖息地关键节点的格局, 建设黄河源头的三江源国家公园和若尔盖国家公园, 以及黄河三角洲国家公园, 在中游布局一批国家级自然保护区, 在城市周边布局数量众多的湿地公园。

4.1.1 增设国家公园

(1)三江源国家公园黄河源区。黄河上游的湿地主要分布在黄河源区, 为禁止和限制开发区, 水功能区保护和水源涵养是该区湿地保护的重点。该区生态脆弱性较高, 应以源头湿地保护为重点, 上游湿地保护为主体, 建立黄河源区及上游水鸟栖息地保护体系。该区现已建立三江源国家公园, 为源头区湿地资源及关键水鸟栖息地的保护提供了保障。扎陵湖-鄂陵湖和星星海保护区整合为三江源国家公园黄河源区, 总面积191万ha。对三江源国家公园黄河源区的黑颈鹤、赤麻鸭、斑头雁等水鸟形成了有效保护。

(2)祁连山国家公园。为维护青藏高原生态平衡、维持绿洲稳定、保障黄河流域和河西内陆河径流补给的重任, 甘肃、青海两省整合了甘肃祁连山

国家级自然保护区、甘肃盐池湾国家级自然保护区和青海祁连山省级自然保护区,以及甘肃天祝三峡国家森林公园、甘肃马蹄寺省级森林公园、甘肃冰沟河省级森林公园和青海仙米国家森林公园、青海祁连黑河源国家湿地公园,共同建立了祁连山国家公园,总面积502.37万ha。对黄河流域上游黑颈鹤、蓑羽鹤、灰鹤、大白鹭、大天鹅、斑头雁、赤麻鸭等湿地水鸟的关键栖息地形成了有效保护。

(3)若尔盖国家公园。根据河源区湿地空间分布特征及湿地资源特色,建议整合若尔盖县的1个国家级、2个省级、2个县级自然保护区,以及红原、阿坝和甘肃省玛曲县、碌曲县在内的各类保护地,建设若尔盖国家公园(张国钢等,2013;马骅等,2019)。

(4)黄河三角洲国家公园。理顺黄河三角洲湿地保护管理体制机制,建立以黄河三角洲国家公园为主体的河口湿地保护体系,提高河口湿地保护管理效率。对黄河三角洲等水鸟栖息地实行严格保护,减少人类活动干扰,在现有保护地的基础上,实现科学管理、提高保护有效性是该区水鸟保护需要解决的关键问题。近年来,国际社会对黄河三角洲湿地保护工作的关注度不断提高,国家和地方政府也正在大力推动黄河三角洲作为黄渤海湿地世界自然遗产二期申报的重点区域。如何利用好世界自然遗产的国际化平台,加强黄河三角洲湿地的保护管理,以及如何利用世界自然遗产的全球品牌效应,提高其湿地生态系统的服务功能,是未来黄河三角洲湿地水鸟资源保护与合理利用需要考虑的关键问题。

4.1.2 晋升国家级自然保护区

建议在现有黄河湿地国家级自然保护区、郑州黄河国家级自然保护区和滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区基础上,晋升沙湖和乌梁素海为国家级自然保护区。这些区域为鹤类、雁鸭类、鸨鹬类等提供了重要的迁徙停歇地,尤其是滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区为鸨鹬类提供了繁殖地和停歇地;乌梁素海为全球超过16%的疣鼻天鹅、35.6%的白骨顶和7.8%的红嘴鸥提供了繁殖栖息地。鉴于上述区域已满足迁飞区鸟区网络纳入的标准,即满足其支持IUCN易危、濒危、极度濒危物种或受威胁的生态群落;或定期支持20,000只或更多的迁徙水鸟;或定期地支持超过一个迁徙水鸟种

群或亚种某一种群1%的个体,建议将上述国家级及需晋升国家级的自然保护区纳入迁飞区鸟区网络。通过全球迁飞水鸟的协同保护,以国际化的建设及管理标准进行管理,提高水鸟保护有效性与管理效率。

4.1.3 建设湿地公园

结合黄河流域湿地水鸟的分布情况、湿地资源的空间分布特点、社会经济发展状况以及流域国家公园、自然保护区等保护地布局,依据湿地公园建设的标准和要求,建设以黄河流域湿地资源保护为主,兼顾区域社会经济发展需求的湿地公园,对国家公园和自然保护区保护空缺进行补充,对黄河流域湿地水鸟形成完整有效的保护。

4.2 推进黄河流域湿地水鸟栖息地修复

黄河流域的东西跨度大,水鸟多样性资源空间分布差异性较大,从黄河源头到河口湿地水鸟多样性保护面临的问题不同,其湿地水鸟栖息地修复所要解决的问题也存在差异。

上游湿地为中亚水鸟迁徙的重要通道及斑头雁、黑颈鹤等珍稀濒危水鸟的重要栖息地,为有效解决水鸟数量下降的趋势,需对该区关键水鸟制定科学有效的保护行动计划(郭斌等,2018;赵娜娜等,2019)。黄河源区受全球气候变化的影响,生态系统类型发生变化,关键湿地水鸟栖息地变化或丧失。通过对关键水鸟栖息地进行近自然恢复,减少人类活动的干扰,降低其变化和丧失的速度,扩大栖息地面积,应对全球气候变化,减缓气候变化对湿地水鸟的影响,是该区湿地水鸟栖息地修复需要解决的关键问题(高红梅等,2019)。

黄河中游地区湿地是大鸨、黑鹳、大天鹅、青头潜鸭等珍稀濒危水鸟的重要栖息地。处理好黄河两岸湿地与工农业发展之间的关系是中游水鸟栖息地保护修复的关键。时良等(2009)对黄河中游湿地1998-2008年越冬水鸟的调查发现,其水鸟种群数量均呈现下降的趋势,其中大鸨、疣鼻天鹅、青头潜鸭等的种群数量均下降50%以上。减少黄河中游湿地的点面源污染对水鸟栖息地及水鸟食源的影响是中游湿地水鸟种群保护的主要目标。做好黄河中游湿地的保护恢复,需重点抓好流域水土保持和污染治理,部分区域要以自然恢复为主,减少人为干扰,对水体污染严重的支流,需着力推进湿地生态环境治理工程,恢复湿地生态功能。在自然条

件允许的地方,要大力建设旱作梯田、淤地坝等,为大鸨等关键物种保护提供适宜生境和优质食源。

黄河三角洲是黄河下游湿地水鸟保护的重点区域。作为黄渤海湿地的重要组成部分,黄河三角洲的生物多样性资源丰富,是东亚-澳大利西亚水鸟迁飞路线的重要繁殖、越冬和停歇地。近年来,黄河三角洲湿地水鸟多样性发生了较大变化,2008-2014年间,其水鸟种数由2008年的72种减少到了2014年的45种,减少了20%以上(王刚,2010^①;黄子强等,2018b)。如何着力做好下游河段地上悬河治理和风险防控工作,促进河流生态系统健康,加强滨海湿地水鸟栖息地的保护管理,提高水鸟多样性,是黄河下游湿地作为水鸟栖息地保护与修复的重点。同时,互花米草、泥螺等入侵物种防控治理工程的实施也是黄河三角洲水鸟栖息地修复需要解决的关键问题。

4.3 实施流域综合管理

构建黄河流域生态补偿机制,广开资金来源,为黄河流域关键候鸟栖息地的保护与修复提供资金保障,建立全流域的湿地监测与第三方评估机制,支持并提高黄河流域湿地保护网络的运行效率,推动黄河流域综合管理各项制度和机制的落实。黄河水利委员会机构现有职责主要以水资源管理为主,包括流域水资源的合理开发利用、管理和监督及保护;流域内的水旱灾害防治、水文监测管理、水资源开发、水土流失防治、水政监察和水行政执法、农村水利及水能资源开发、流域控制性水利工程管理等(胡国华等,2004;傅小城等,2010)。在现有生态文明建设大背景下,需要将其职能进一步扩展到全流域,包括水鸟资源等各生态要素的管理、加强黄河流域保护管理能力建设,尤其是水鸟监测、研究、保护和栖息地管理人才的培养;建立全流域科研监测体系,提高黄河流域湿地水鸟资源的保护有效性和管理效率。

在黄河上游,建议以三江源、祁连山、甘南黄河上游、川西北高原湿地水源涵养区等为重点,推进实施一批重大生态保护修复和建设工程,提升该区湿地生态系统的水源涵养能力,做好黄河上游城市化和农业灌溉引发的点面源污染防控工作,是上游流域综合治理的关键(陈孝泉和苟新京,2002;王

树洲和魏智,2005)。

黄河中游流域综合管理的关键是解决工农业生产导致的点面源污染问题。银川平原、河套平原黄灌区农业灌溉回水引发黄河流域湿地地面源污染,农田的引黄灌溉水中盐分含量较高导致土壤盐渍化。有研究显示,2000年前后河套平原每年引黄水量50亿吨以上,累积灌区总盐量约有185万吨,其中有害盐分占比近30%。内蒙古区域内的黄河水系主要受呼和浩特和包头工业废水、生活污水和垃圾等严重污染,其排放量占内蒙古自治区排放总量约49%(郝向英等,2000;黄锦辉等,2006)。

除解决上、中、下游及河口区域各自存在的关键问题外,作为流域生态系统,黄河流域湿地的水鸟多样性保护还需要协调上、中、下游之间的关系,利用流域综合管理的手段与方法解决区域间湿地资源的合理配置、污染治理、合理利用等问题,保护黄河流域湿地水鸟多样性和湿地生态系统完整性,真正实现黄河流域湿地生态可持续发展。

参考文献

- Almond REA, Grooten M, Petersen T (2020) WWF (2020) Living Planet Report 2020—Bending the Curve of Biodiversity Loss. WWF, Gland.
- Alonso JC, Palacin C (2010) The world status and population trends of the great bustard (*Otis tarda*): 2010 Update. *Chinese Birds*, 1(2), 141-147.
- Cao JY, Wang N, Qiao ZX, Ding YY, Liu Y (2018) Coupling analysis of urbanization and economic transformation in the Yellow River basin. *Henan Science*, 36, 1288-1296. (in Chinese with English abstract) [曹静宇, 王妞, 乔增轩, 丁银盈, 刘勇 (2018) 黄河流域中心城市城镇化与经济转型耦合分析. *河南科学*, 36, 1288-1296.]
- Chen Y (2019) The strategy of the thinking point of the ecological conservation and the high quality development of the Yellow River basin. *Regional Economic Review*, (1), 8-11. (in Chinese) [陈耀 (2019) 黄河流域生态保护和高质量发展战略的思考要点. *区域经济评论*, (1), 8-11.]
- Chen XQ, Gou XJ (2002) Research on the Eco-environmental Protection in the Source Regions of the Yangtze, Yellow and Lancang rivers. Qinghai People's Press, Xining. (in Chinese) [陈孝泉, 苟新京 (2002) 三江源自然保护区生态环境. 青海人民出版社, 西宁.]
- Cristina GM, Russell AM, Tracy AF, Lan JH, Amy JU, Thomas MB (2010) Fresh Water the Essence of Life. PEFC Certified Paper, Beijing.
- Dong LS, Song AY, Ren YH, Mei ZX, Liu X (2018) Avian diversity of different habitats in typical city of the Yellow River delta. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 32, 156-162. (in Chinese with English

^① 王刚 (2010) 黄河三角洲湿地鸟类群落研究. 硕士学位论文, 曲阜师范大学, 曲阜.

- abstract) [董林水, 宋爱云, 任月恒, 梅增霞, 刘霄 (2018) 黄河三角洲地区城市绿地鸟类多样性研究. 干旱区资源与环境, 32, 156–162.]
- Dou L, Li H, Li FS, Zhang M, Zheng ZR, Ran JH (2013) Survey on the black-necked cranes during the breeding period at Sichuan Ruoerggai Wetland National Nature Reserve. *Sichuan Journal of Zoology*, 32, 770B. (in Chinese with English abstract) [窦亮, 李华, 李凤山, 张曼, 郑志荣, 冉江洪 (2013) 四川若尔盖湿地国家级自然保护区繁殖期黑颈鹤调查. 四川动物, 32, 770–773.]
- Du JZ, Wang GX, Yang Y, Zhang T, Mao TX (2015) Temporal and spatial variation of the distributive pattern and driving force analysis in the Yangtze River and Yellow River source regions wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 6173–6182. (in Chinese with English abstract) [杜际增, 王根绪, 杨燕, 张涛, 毛天旭 (2015) 长江黄河源区湿地分布的时空变化及成因. 生态学报, 35, 6173–6182.]
- Fan J, Wang YF, Wang YX (2020) High quality regional development research based on geographical units: Discuss on the difference in development conditions and priorities of the Yellow River basin compared to the Yangtze River basin. *Economic Geography*, 40(1), 4–11. (in Chinese with English abstract) [樊杰, 王亚飞, 王怡轩 (2020) 基于地理单元的区域高质量发展研究——兼论黄河流域同长江流域发展的条件差异及重点. 经济地理, 40(1), 1–11.]
- Fu XC, Ye L, Xu YY, Cai QH (2010) Survey of water quality and benthos in the Yellow River basin. *Ecological Science*, 29, 1–7. (in Chinese with English abstract) [傅小城, 叶麟, 徐耀阳, 蔡庆华 (2010) 黄河主要水系水环境与底栖动物调查研究. 生态科学, 29, 1–7.]
- Gao HM, Cai ZY, Qin W, Huang YG, Wu T, Chi XW, Zhang JJ, Miao ZY, Song PF, Lian XM, Zhang TZ (2019) Species diversity of birds in the Three-River-Source National Park. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 8254–8270. (in Chinese with English abstract) [高红梅, 蔡振媛, 覃雯, 黄岩淦, 吴彤, 迟翔文, 张婧捷, 苗紫燕, 宋鹏飞, 连新明, 张同作 (2019) 三江源国家公园鸟类物种多样性研究. 生态学报, 39, 8254–8270.]
- Gao P (2010) Streamflow and Sediment Discharge Change Trend and Its Response to Human Activities in the Middle Reaches of the Yellow River. PhD dissertation, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [高鹏 (2010) 黄河中游水沙变化及其对人类活动的响应. 博士学位论文, 中国科学院研究生院, 北京.]
- Gao ZJ, Feng GP (2020) Analysis on the trend and cause of water and sediment in the Yellow River. *Ground Water*, 42(1), 147–151. (in Chinese with English abstract) [高宗军, 冯国平 (2020) 黄河水沙变化趋势及成因分析. 地下水, 42(1), 147–151.]
- Grabas GP, Crewe TL, Timmermans S (2008) Bird Community Indicators. Ramsar Convention Secretariat, Gland.
- Guo B, Wang S, Zhang H, Wang MT (2018) Change characteristics of growth period of natural grass in Zoige wetland and its response to climate change. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 38(2), 49–57. (in Chinese with English abstract) [郭斌, 王珊, 张菡, 王明田 (2018) 若尔盖湿地天然牧草生育期变化特征及其对气候变化的响应. 高原山地气象研究, 38(2), 49–57.]
- Hao XY, Hong X, Wu D, Guo BS (2000) Present situation of water environment in the middle reach of the Yellow River. *Journal of inner mogolia technology and economy*, 6(1), 42–65. (in Chinese) [郝向英, 红霞, 乌地, 郭博书 (2000) 黄河中游水体水环境现状. 内蒙古科技与经济, 6(1), 42–65.]
- He B, Wang BX (2018) The value of wetland ecosystem services in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 46(6), 104–109. (in Chinese with English abstract) [何冰, 王保星 (2018) 陕西黄河湿地省级自然保护区湿地生态系统服务价值研究. 陕西林业科技, 46(6), 104–109.]
- Hu GH, Zhao PL, Xiao XQ (2004) Sediment characteristics of Yellow River and their influence on water environment. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 35(8), 17–20. (in Chinese with English abstract) [胡国华, 赵沛伦, 肖翔群 (2004) 黄河泥沙特性及对水环境的影响. 水利水电技术, 35(8), 17–20.]
- Huang JH, Shi XX, Zhang Q, Li CY, Xu XL (2006) Characteristic of ecological system and target identification of ecological protection of the Yellow River. *Soil and Water Conservation in China*, (12), 14–17, 56. (in Chinese with English abstract) [黄锦辉, 史晓新, 张蕾, 李翠玉, 徐晓琳 (2006) 黄河生态系统特征及生态保护目标识别. 中国水土保持, (12), 14–17, 56.]
- Huang ZQ, Che CG, Tan HT, Bi ZG, Liu WH, Zhang XT, Zhang SY, Li DL (2018a) Investigation on the diversity and population of waterbird in the Yellow River Delta Nature Reserve. *Shandong Forestry Science And Technology*, (2), 41–45, 48. (in Chinese with English abstract) [黄子强, 车纯广, 谭海涛, 毕正刚, 刘伟华, 张希涛, 张树岩, 李东来 (2018a) 黄河三角洲水鸟多样性调查及种群数量监测. 山东林业科技, (2), 41–45, 48.]
- Huang ZQ, Guan S, Jin LY, Zhang SY, Che CG, Zhu SY, Li DL (2018b) Composition and diversity of waterbirds' community in north of the Yellow River Estuary in 2016. *Wetland Science*, 16, 735–741. (in Chinese with English abstract) [黄子强, 关爽, 金麟雨, 张树岩, 车纯广, 朱书玉, 李东来 (2018b) 2016年黄河入海口北侧水鸟群落组成及多样性. 湿地科学, 16, 735–741.]
- Investigation Planning and Design Institute of State Forestry Administration (2016) The Digital Map of Chinese Wetland Resources: Yellow River Basin. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [国家林业局调查规划设计院 (2016) 中国湿地资源电子图集: 黄河流域. 中国林业出版社, 北京.]
- Lang K, Zhao GX, Wang WQ, Zhang SM, Xiao Y (2019) Analysis of the land use dynamic characteristics in the typical region of the Yellow River delta for the last 10 years. *Geospatial Information*, 17(5), 75–80. (in Chinese with English abstract) [郎坤, 赵庚星, 王文倩, 张素铭, 肖杨

- (2019) 黄河三角洲典型区近10a土地利用动态特征分析. 地理空间信息, 17(5), 75–80.]
- Li CK, Li J, Deng PY, Ma C, Li ZX (2019) Analysis of the avifauna and species diversity of birds in the natural wetland park along Minquan ancient Yellow River course. *Journal of Henan Agricultural University*, 53, 591–600. (in Chinese with English abstract) [李长看, 李杰, 邓培渊, 马超, 李忠信 (2019) 民权黄河故道国家湿地公园鸟类区系和物种多样性分析. 河南农业大学学报, 53, 591–600.]
- Li CK, Zhang GY, Wang W (2010) Research on the impact of global warming on the birds distribution of Zhengzhou Yellow River wetland. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38, 2962–2963, 2990. (in Chinese with English abstract) [李长看, 张光宇, 王威 (2010) 气候变暖对郑州黄河湿地鸟类分布的影响. 安徽农业科学, 38, 2962–2963, 2990.]
- Li CK, Zhao HP, Deng PY, Zhao ZY, Li ZZ (2013) The avifauna and diversity of birds in Zhengzhou Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 43, 416–422. (in Chinese with English abstract) [李长看, 赵海鹏, 邓培渊, 赵宗英, 李振中 (2013) 郑州黄河湿地省级自然保护区鸟类区系和多样性. 河南大学学报(自然科学版), 43, 416–422.]
- Li DX, Xie T, Ma X, Cui BS, Wu X, Che CG, Zhang XT (2020) Temporal and spatial pattern evolution of hydrological connectivity of the old track of Yellow River in Diaokouhe from 1985 to 2015. *Environmental Ecology*, 2, 10–16. (in Chinese with English abstract) [李冬雪, 谢焱, 马旭, 崔保山, 吴霞, 车纯广, 张希涛 (2020) 1985–2015年刁口河黄河故道区域河流水文连通时空演变规律. 环境生态学, 2, 10–16.]
- Li FX, Chang GG, Xiao JS, Zhou BR, Fu Y (2009) Relationship between wetlands changes and climate change in the Yellow River source region. *Journal of Natural Resources*, 24, 683–690. (in Chinese with English abstract) [李凤霞, 常国刚, 肖建设, 周秉荣, 伏洋 (2009) 黄河源区湿地变化与气候变化的关系研究. 自然资源学报, 24, 683–690.]
- Li JH, Feng L, Wu LQ (2004) Genetic analysis of water interception of Yellow River. *Northwest Hydropower*, (3), 58–61. (in Chinese with English abstract) [李建华, 冯黎, 吴来群 (2004) 黄河断流的成因分析. 西北水电, (3), 58–61.]
- Li Q, Yan SX, Yan L, Huang JH, Zhao Y (2006) The human activity influence on the Yellow River wetland and birds' ecological habitat—For example with the white swan garden of the Yellow River of Sanmenxia. *Henan Science*, 24, 749–753. (in Chinese with English abstract) [李群, 闫双喜, 阎亮, 黄锦辉, 赵勇 (2006) 人类活动对黄河湿地鸟类生态栖息地影响——以三门峡黄河白天鹅观赏园建设为例. 河南科学, 24, 749–753.]
- Li SH, Meng WY, Chen LX, Li YF, Gao RY, Ru WD, Sun MH, Dai Q, Zhang GG, Lu J (2017) The spring waterbird community and home range of the whooper swan (*Cygnus cygnus*) at the upper and middle reaches of Yellow River in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 1910–1916. (in Chinese with English abstract) [李淑红, 孟维悦, 陈丽霞, 李云锋, 高如意, 茹文东, 孙孟和, 戴强, 张国钢, 陆军 (2017) 黄河中上游春季迁徙期水鸟群落及大天鹅活动特征. 生态学杂志, 36, 1910–1916.]
- Li SY, Guo HM, Huang SF, Ma JW, Liu HY, Sun YY (2016) Variation in Hetao basin wetlands from 1973 to 2014. *Resources Science*, 38(1), 19–29. (in Chinese with English abstract) [李山羊, 郭华明, 黄诗峰, 马建威, 刘海燕, 孙亚勇 (2016) 1973–2014年河套平原湿地变化研究. 资源科学, 38(1), 19–29.]
- Li ZH, Wang HM, Han GD, Han JW, Gao JX (2007) Review on the flow-break in the lower reaches of Yellow River. *Ecology and Environment*, 16, 686–690. (in Chinese with English abstract) [李政海, 王海梅, 韩国栋, 韩经纬, 高吉喜 (2007) 黄河下游断流研究进展. 生态环境, 16, 686–690.]
- Li ZXJ, Zeng Q, He YB, Duo HR, Wen L, Lei GC (2017) Response model of egg-laying and incubation dates of *Anser indicus* at Dan Island in Qinghai Lake to air temperature and normalized differential vegetation index. *Wetland Science*, 15, 369–374. (in Chinese with English abstract) [李扎西姐, 曾晴, 何玉邦, 朵海瑞, 文力, 雷光春 (2017) 青海湖蛋岛斑头雁产卵及孵化日期对气温和归一化植被指数的响应模型. 湿地科学, 15, 369–374.]
- Liu JQ, Zhang BH, Li YZ, Yu LJ, Wu XQ (2017) Identification and zoning of wetland ecological red line in Yellow River delta. *Environmental Science and Management*, 42(12), 146–150, 173. (in Chinese with English abstract) [刘佳琦, 张保华, 栗云召, 于良巨, 吴晓青 (2017) 黄河三角洲湿地生态保护红线区选划研究. 环境科学与管理, 42(12), 146–150, 173.]
- Liu MY (2018) Remote Sensing Analysis of *Spartina alterniflora* in the Coastal Areas of China During 1990 to 2015. PhD dissertation, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun. (in Chinese with English abstract) [刘明月 (2018) 中国滨海湿地互花米草入侵遥感监测及变化分析. 博士学位论文, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春.]
- Lu YJ, Wang D, Deng SX (2018) Environmental assessment and ecological impact of wetland in the Yellow River Delta. *Sichuan Environment*, 37(3), 141–146. (in Chinese with English abstract) [芦英俊, 王东, 邓术兴 (2018) 黄河三角洲湿地环境评价及生态影响. 四川环境, 37(3), 141–146.]
- Ma H, Wang YF, Ning Y, Wu GJ, Guo JL, Tan YC, Li CY, Lin HY (2019) Dynamic analysis of landscape pattern of the plateau wetland of Zoige County. *Forest Resources Management*, (1), 109–115. (in Chinese with English abstract) [马骅, 王义飞, 宁宇, 武高洁, 郭菊兰, 谭月臣,

- 李春义, 林海晏 (2019) 若尔盖县高原湿地景观格局动态分析研究. *林业资源管理*, (1), 109–115.]
- Ma Q, Su HL, Li DQ (2003) Investigation of avifauna distribution in the water origin of Three Rivers Nature Reserve. *Journal of Beijing Forestry University*, 25(5), 51–54. (in Chinese with English abstract) [马强, 苏化龙, 李迪强 (2003) 青海三江源自然保护区鸟类分布状况初步研究. *北京林业大学学报*, 25(5), 51–54.]
- Qi HT, Wang Y (2004) Water environmental protection issues in the development of water resources in natural river resources. *Ground Water*, 26(2), 142–144. (in Chinese with English abstract) [齐贺停, 汪雁 (2004) 天然河流水资源开发中的水环境保护问题. *地下水*, 26(2), 142–144.]
- Ramsar Convention Secretariat (2018) *Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and Their Services to People*. Ramsar Convention Secretariat, Gland.
- Shen YJ (2018) Eco-environmental protection and sustainable utilization of water resources in the Yellow River basin. *Democracy and Science*, (6), 16–19. (in Chinese) [沈彦俊 (2018) 黄河流域生态环境保护与水资源可持续利用. *民主与科学*, (6), 16–19]
- Shi L, Dong R, Yu XP (2009) Winter avian community of Yellow River wetland in Shaanxi. *Chinese Journal of Zoology*, 44, 83–93. (in Chinese with English abstract) [时良, 董荣, 于晓平 (2009) 陕西省黄河湿地冬季鸟类群落初步研究. *动物学杂志*, 44, 83–93.]
- Song HL, Mou XJ, Liu XT (2019) Anthropogenic effect on wetland vegetation growth in the Yellow River delta. *Ecology and Environmental Sciences*, 28, 2307–2314. (in Chinese with English abstract) [宋红丽, 牟晓杰, 刘兴土 (2019) 人为干扰活动对黄河三角洲滨海湿地典型植被生长的影响. *生态环境学报*, 28, 2307–2314.]
- State Forestry Administration (2015) *China Wetlands Resources*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [国家林业局 (2015) 中国湿地资源. 中国林业出版社, 北京.]
- Tian B (2018) The review of the studies in recent decades on ecological environment evolution and vicissitude of the towns and cities in the middle and lower reaches of the Yellow River. *Journal of Pingdingshan University*, 33(6), 72–79. (in Chinese with English abstract) [田冰 (2018) 近几十年来黄河中下游地区生态环境变迁与城镇兴衰研究综述. *平顶山学院学报*, 33(6), 72–79.]
- Wang GX, Ding YJ, Wang J, Liu SY (2004) Land ecological changes and evolutionary patterns in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers in recent 15 years. *Acta Geographica Sinica*, 59, 163–173. (in Chinese with English abstract) [王根绪, 丁永建, 王建, 刘时银 (2004) 近15年来长江黄河源区的土地覆被变化. *地理学报*, 59, 163–173.]
- Wang GX, Qian J, Cheng GD (2001) Eco-environmental degradation and causal analysis in the source region of the Yellow River. *Environmental Geology*, 40, 884–890.
- Wang RL, Lian Y, Wang XG, Hao FQ, Peng B, Huang JH, Lou GY, Ge L (2013) Study on the overall framework of water ecological protection and restoration of the Yellow River basin. *Yellow River*, 35(10), 107–114. (in Chinese with English abstract) [王瑞玲, 连煜, 王新功, 郝伏勤, 彭勃, 黄锦辉, 姜广艳, 葛雷 (2013) 黄河流域水生态保护与修复总体框架研究. *人民黄河*, 35(10), 107–114.]
- Wang YG, Chen K, Chen Y, Liu Q (2018) Variations in runoff and erosion and their distributions in the Yellow River basin. *Science of Soil and Water Conservation*, 16(5), 120–128. (in Chinese with English abstract) [王延贵, 陈康, 陈吟, 刘茜 (2018) 黄河流域产流侵蚀及其分布特性的变异. *中国水土保持科学*, 16(5), 120–128.]
- Wang SZ, Wei Z (2005) Countermeasures for urban water environment construction in the upper reaches of the Yellow River basin. *Rural Water Conservancy and Hydropower in China*, (11), 46–48. (in Chinese) [王树洲, 魏智 (2005) 黄河流域上游城市水环境建设对策. *中国农村水利水电*, (11), 46–48.]
- Wen XJ, Yao SB (2018) Spatial and temporal changes of vegetation coverage response to human activity intensity in the middle and upper reaches of the Yellow River. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 47, 607–614. (in Chinese with English abstract) [温小洁, 姚顺波 (2018) 黄河中上游植被覆盖与人类活动强度的时空动态演化. *福建农林大学学报 (自然科学版)*, 47, 607–614.]
- Yan YP, Xu H, Xing Y, Liu G, Liu JY, Wang YF (2015) Response regularity of wetland area changing according to climate changes in the 3-river source area from 1975 to 2007. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (S2), 5–10. (in Chinese) [燕云鹏, 徐辉, 邢宇, 刘刚, 刘建宇, 王怿飞 (2015) 1975–2007年间三江源不同源区湿地变化特点及对气候变化的响应. *测绘通报*, (S2), 5–10.]
- Yang RR, Yi GH, Zhang TB, Li JJ, Bie XJ, Xia J, Shen YL (2018) Vegetation coverage change and how it drives climatic factors in the Zoige region from 2000 to 2015. *Pratacultural Science*, 35, 2822–2835. (in Chinese with English abstract) [杨瑞瑞, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 别小娟, 夏杰, 申一林 (2018) 2000–2015年若尔盖地区植被覆盖度变化及气候因子驱动分析. *草业科学*, 35, 2822–2835.]
- You YC, Li ZW, Li XL (2018) Land cover change in Zoige Plateau during 1990–2011. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 38 (2), 60–69. (in Chinese with English abstract) [游宇驰, 李志威, 李希来 (2018) 1990–2011年若尔盖高原土地覆盖变化. *水利水电科技进展*, 38 (2), 60–69.]
- Zhang GG, Dai Q, Liu DP, Hou YQ, Lu J, Shen Y, Du K (2013) The seasonal dynamic on waterbird population at Ruoergai marshes, China. *Chinese Journal of Zoology*, 48, 742–749. (in Chinese with English abstract) [张国钢, 戴强, 刘冬平, 侯韵秋, 陆军, 沈尤, 杜科 (2013) 若尔盖湿地

水鸟资源季节变化. 动物学杂志, 48, 742–749.]

- Zhang HJ, Meng QW (2006) Evaluation on quality of shallow groundwater in lower reaches of Yellow River (Henan section). *Ground Water*, 28, 29–32. (in Chinese with English abstract) [张和军, 孟庆伟 (2006) 黄河下游(河南段)浅层地下水质量评价. *地下水*, 28, 29–32.]
- Zhang JL, Liu SY, Bao RC, Zhang RH (2018) Ecological management mode of the lower Yellow River floodplain and impact assessment—“Study on ecological reconstruction and management of the floodplains in the lower Yellow River” (V). *Yellow River*, 40(11), 1–4, 33. (in Chinese with English abstract) [张金良, 刘生云, 暴入超, 张瑞海 (2018) 黄河下游滩区生态治理模式与效果评价——“黄河下游滩区生态再造与治理研究”之五. *人民黄河*, 40(11), 1–4, 33.]
- Zhang KX, Dong XG, Liao KT, Jiang ZC, Cao LG (2020) Characteristics of seasonal changes in extreme temperature and their relativity with ENSO in the Yellow River basin from 1960 to 2017. *Research of Soil and Water Conservation*, 27, 185–192. (in Chinese with English abstract) [张克新, 董小刚, 廖空太, 蒋志成, 曹立国 (2020) 1960–2017年黄河流域极端气温的季节变化特征及其ENSO的相关性分析. *水土保持研究*, 27, 185–192.]
- Zhang SW (2005) Yellow River Annual Runoff Analysis and Its Forecast. PhD dissertation Sichuan University, Chengdu. (in Chinese with English abstract) [张少文 (2005) 黄河流域天然年径流变化特征分析及其预测. 博士学位论文, 四川大学, 成都.]
- Zhang W, Fu XF (2011) Present status of water ecology and countermeasures for adaptability of climate change of the Yellow River basin. *Yellow River*, 33(5), 51–53, 150. (in Chinese with English abstract) [张威, 付新峰 (2011) 黄河流域水生态现状与气候变化适应性对策. *人民黄河*, 33(5), 51–53, 150.]
- Zhang XL, Li P, Liu LJ, Li PY, Shan K (2009) Biodiversity and its protection in the Yellow River delta wetland. *Coastal Engineering*, 28(3), 33–39. (in Chinese with English abstract) [张晓龙, 李萍, 刘乐军, 李培英, 单凯 (2009) 黄河三角洲湿地生物多样性及其保护. *海岸工程*, 28(3), 33–39.]
- Zhang XL, Li PY, Liu YL, Xu XY, Cao CX, Shan K (2007) Studies on the wetland of the Yellow River delta A review. *Marine Science*, 31(7), 81–85. (in Chinese with English abstract) [张晓龙, 李培英, 刘月良, 徐兴永, 曹成效, 单凯 (2007) 黄河三角洲湿地研究进展. *海洋科学*, 31(7), 81–85.]
- Zhang YM, Jiao SW, Jia YF, Zeng Q, Feng DD, Lei GC (2017) Spatial and temporal variations in waterbird communities and its implications for ecosystem management in a large temperate arid wetland of Northwest P. R. China. *Avian Biology Research*, 10, 119–128.
- Zhao G, Gao M, Ling Y (2018) Analysis on dynamic change and its causes of Passeriformes in Wuliangshuai during the last 30 years. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 47, 507–510. (in Chinese with English abstract) [赵格日乐图, 高敏, 灵燕 (2018) 近30年乌梁素海雀形目鸟类动态变化及原因分析. *内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版)*, 47, 507–510.]
- Zhao NN, Wang HN, Zhang BB, Liu J, Xu WG, Yu YL (2019) Runoff variation in Zoige wetland basin and its response to climate change. *Water Resources Protection*, 35(5), 40–47. (in Chinese with English abstract) [赵娜娜, 王贺年, 张贝贝, 刘佳, 徐卫刚, 于一雷 (2019) 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应. *水资源保护*, 35(5), 40–47.]
- Zhao WZ, Wang HR, Zhao ZY, Liu BX, Guo L, Zhang JH, Li JP, Ma XF, Hao ZX (2018) Survey of the resources of great bustard wintering in Henan Province. *Chinese Journal of Wildlife*, 39, 685–688. (in Chinese with English abstract) [赵文珍, 王恒瑞, 赵宗英, 刘冰许, 郭凌, 张建华, 李进萍, 马小峰, 郝志香 (2018) 河南省越冬大鸨资源调查. *野生动物学报*, 39, 685–688.]
- Zhao Y, He F, He GH, Li HH, Wang LZ, Chang HY, Zhu YN (2020) Review the phenomenon of Yellow River cutoff from a whole perspective and identification of current water shortage. *Yellow River*, 42(4), 42–46. (in Chinese with English abstract) [赵勇, 何凡, 何国华, 李海红, 王丽珍, 常免宇, 朱永楠 (2020) 全域视角下黄河断流再审视与现状缺水识别. *人民黄河*, 42(4), 42–46.]
- Zhao Y, Hu CH, Zhang XM, Wang YS, Cheng C, Yin XL, Xie M (2018) Analysis on runoff and sediment regimes and its causes of the Yellow River in recent 70 years. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34, 112–119. (in Chinese with English abstract) [赵阳, 胡春宏, 张晓明, 王友胜, 成晨, 殷小琳, 谢敏 (2018) 近70年黄河流域水沙情势及其成因分析. *农业工程学报*, 34, 112–119.]
- Zhu LF, Liu YY, Guo YM, Ban YT, Song KM, Niu HX, Bu YZ (2018) Wintering ecology of great bustard (*Otis tarda*) in Xinxiang Yellow River Wetland. *Chinese Journal of Wildlife*, 39, 584–587. (in Chinese with English abstract) [朱龙飞, 刘莹莹, 郭玉明, 班永田, 宋克明, 牛红星, 卜艳珍 (2018) 新乡黄河湿地大鸨的越冬生态研究. *野生动物学报*, 39, 584–587.]
- Zhu SW, Pan XL, Li XQ, Liu C (2012) Effects of exotic species *Spartina anglica* on ecological environment of the Yellow River delta. *Shandong Agricultural Sciences*, 44(3), 73–75, 83. (in Chinese with English abstract) [朱士文, 潘秀莲, 李秀启, 刘超 (2012) 外来物种米草对黄河三角洲生态环境的影响. *山东农业科学*, 44(3), 73–75, 83.]

(责任编辑: 李俊生 责任编辑: 黄祥忠)



•研究报告•

基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对3种水鸟栖息地的保护现状

王昱熙¹ 谢彦波¹ Nyambayar Batbayar⁵ 朱宝光⁴ 董树斌⁴ Anna Barma⁷
Anton Sasin⁶ 曹 垒^{2,3*}

1 (中国科学技术大学, 合肥 230026) 2 (中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

3 (中国科学院大学, 北京 100049) 4 (洪河国家级自然保护区, 建三江, 黑龙江 156332)

5 (蒙古野生动物科学与保护中心, 蒙古乌兰巴托市苏赫巴托尔区 14210)

6 (俄罗斯阿穆尔社会生态联盟公共环境组织, 俄罗斯布拉戈维申斯克 675000)

7 (世界自然基金会俄罗斯阿穆尔分会, 俄罗斯符拉迪沃斯托克 690003)

摘要: 自然保护区是生物多样性保护的重要形式, 对于迁徙水鸟而言, 它的规划尤为重要。本研究于2016–2018年间在中国、蒙古国和俄罗斯捕捉6只斑头雁(*Anser indicus*)、5只白琵鹭(*Platalea leucorodia*)和10只东方白鹳(*Ciconia boyciana*)进行卫星追踪, 探讨了黄河流域自然保护区对它们栖息地的保护现状。基于4年累积获取的844,592条高频数据, 分析了这21只水鸟在黄河流域活动的的时间和利用的土地类型, 并使用核密度法拟合了3种鸟类的家域。结果表明: 3种鸟类均利用黄河流域湿地作为迁徙途中的停歇地, 其中一部分白琵鹭幼鸟利用黄河流域湿地作为度夏地, 一部分东方白鹳利用黄河三角洲湿地作为越冬地; 3种水鸟在黄河流域内的土地利用情况存在差异, 斑头雁对草地(49.0%)、裸地(26.2%)与水体(22.5%)的利用率较高, 白琵鹭对农田(42.1%)、草地(19.8%)和湿地(19.6%)的利用率较高, 东方白鹳对湿地(49.8%)、农田(34.5%)和水体(4.6%)的利用率较高; 斑头雁核心的50%家域被现有保护区完全覆盖, 而白琵鹭和东方白鹳核心的50%家域被现有保护区的覆盖度分别为1.6%和0, 表明后2种水鸟的栖息地极大可能存在保护空缺; 同时对覆盖范围内土地类型自身占比进行分析, 发现3种鸟类对于裸地、草地和农田的利用偏向于被动选择, 而对于湿地和水体的利用表现为主动选择。基于卫星追踪获得的高频数据可以准确反映3种水鸟在黄河流域的停歇情况、土地利用情况及潜在栖息位点。在黄河流域自然保护区的进一步规划中, 应关注白琵鹭和东方白鹳适宜生境的保护状况, 并建立覆盖全面的保护区。

关键词: 斑头雁; 白琵鹭; 东方白鹳; 卫星遥测追踪; 黄河自然保护区; 保护现状

Discussion of existing protection for three waterbirds' habitats in the Yellow River basin nature reserves, based on satellite tracking

Yuxi Wang¹, Yanbo Xie¹, Nyambayar Batbayar⁵, Baoguang Zhu⁴, Shubin Dong⁴, Anna Barma⁷, Anton Sasin⁶, Lei Cao^{2,3*}

1 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Honghe National Nature Reserve, Jiansanjiang, Heilongjiang 156332, China

5 Wildlife Science and Conservation Center of Mongolia, Sukhbaatar District 14210, Mongolia

6 Public Environmental Organization "AmurSEU", Blagoveshchensk 675000, Russia

7 WWF-Russia, Amur Branch, Vladivostok 690003, Russia

Abstract: Nature reserves represent an important form of biodiversity conservation, and their presence is particularly crucial for migratory waterbirds. From 2016–2018, six Bar-headed Geese (*Anser indicus*), five Eurasian Spoonbills (*Platalea leucorodia*) and ten Oriental Storks (*Ciconia Boyciana*) were captured in

收稿日期: 2020-08-16; 接受日期: 2021-01-18

基金项目: 中国生物多样性监测与研究网络(Sino BON)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: caolei@ustc.edu.cn

China, Mongolia and Russia. During the tracking period, 844,592 pieces of high-frequency GPS tracking data were obtained, we analyzed the duration that these birds spent in the Yellow River basin and, the land cover types during their stay. Then we simulated the home range of the three species using kernel density estimation. The results showed that the Yellow River basin wetlands are used as a stopover site during the migration of these three waterbirds. Some juveniles of the Eurasian Spoonbills use the land as a summering area, and some of the Oriental Storks use it as a wintering area. There are differences in land cover of three waterfowl in the Yellow River basin. The Bar-headed Goose used the grassland (49.0%), bare land (26.2%) and water (22.5%). The Eurasian Spoonbill used the cropland (42.1%), grassland (19.8%) and wetland (19.6%). The Oriental Stork used the wetland (49.8%), cropland (34.5%) and water (4.6%). Our study found that 50% of the home range of the Bar-headed Goose overlaps with the existing nature reserves, while the home range of the Eurasian Spoonbill and the Oriental Stork only overlap 1.6% and 0 with existing nature reserves, respectively. The habitats of these latter two species are in need of greater protection. At the same time, by analyzing the proportion of land types in the coverage area, we found that the birds' utilization of bare land, grassland and cropland is more passive, while the utilization of wetland and water is active. The results detail the movement and living characteristics of three waterfowl in the Yellow River. Given the lack of overlap between their habitats and existing nature reserves, it will be important to establish comprehensive protected areas for Eurasian Spoonbills and Oriental Storks as part of further development of the Yellow River nature reserves.

Key words: Bar-headed Goose; Eurasian Spoonbill; Oriental Stork; satellite telemetry; Yellow River nature reserve; protection status

湿地作为国际上备受关注的重要生态系统,为众多濒危、易危或受威胁物种提供了适宜栖息地(IUCN, 2010)。零度等温线以北的黄河流域湿地覆盖率低于全国平均水平,但以自然湿地为主(崔丽娟, 2019)。这些湿地是东亚-澳大利西亚迁徙路线(East Asian-Australasian Flyway)、中亚迁徙路线(Central Asian Flyway)与西太平洋迁徙路线(West Pacific Flyway)的一部分(Wetlands International, 2013)。作为迁徙水鸟重要的停歇地、繁殖地和越冬地,黄河流域湿地为丹顶鹤(*Grus japonensis*)、白鹤(*G. leucogeranus*)、白枕鹤(*G. vipio*)、白头鹤(*G. monacha*)与东方白鹳(*Ciconia boyciana*)等许多濒危鸟类提供了适宜生境(李淑红等, 2017; 何冰等, 2018; 黄子强等, 2018; 连海燕等, 2018; 张国钢等, 2018)。

迁徙水鸟作为国际重要湿地的表征参数(Volker et al, 2015),与湿地生态系统保护息息相关(IUCN, 2010)。而了解水鸟与环境之间关系最紧迫的任务是明确水鸟在繁殖地、停歇地和越冬地的生态需求(Berthold & Terrill, 1991),但想要准确获取这些信息,必须依赖于科学有效的技术。

卫星追踪在研究候鸟运动和环境选择方面,尤其是在识别繁殖地、停歇地和越冬地上取得了良好

效果。例如前人通过追踪识别了白鹤、白枕鹤和东方白鹳的重要越冬地鄱阳湖(Kanai et al, 2002; Higuchi et al, 2004; Shimazaki et al, 2004); Ueta等(2003)结合遥感影像研究了虎头海雕(*Haliaeetus pelagicus*)从春季迁徙到繁殖结束其栖息地的变化; Bishop等(2015)使用该技术进行了鸟类运动的研究,通过追踪斑头雁(*Anser indicus*)提出了鸟类飞越喜马拉雅山脉的“过山车理论”。

目前,设立自然保护区并扩大保护面积仍是生物多样性保护行动计划和保护公约的主要措施和目的(Joppa et al, 2008; Juffe-Bignoli et al, 2014)。我国的自然保护地主要分为3种类型:国家公园、自然保护区和自然公园(余莉等, 2020)。截至2017年,我国已经建立各类自然保护区2,750个,总面积1,470,000 km²,约占全部国土面积的14.9%,居世界第2位(NBS, 2017)。在黄河流域内,自然保护区从国家级到县级共有157个,主要集中分布在黄河源头扎陵湖-鄂陵湖、青海湖和祁连山脉。随着自然保护区的不断建成,评估其保护区网络对生态系统和指示物种的保护状况,是优化保护区网络的重要措施之一。而目前利用卫星追踪技术来评估黄河自然保护区对湿地和水鸟保护效力的研究鲜有报道。

我国基于野外实地调查鸟类数量和分布已在

黄河流域设立了众多自然保护区(Wang et al, 2012; Zhang et al, 2017)。但迁徙鸟类作为湿地的指示类群之一,其运动时空跨度大且年际变化多,这样仅基于野外实地调查数据规划保护区可能会遗漏一些潜在重要栖息地。卫星追踪技术能够为追踪个体和群体的保护提供有效的手段(Beatty et al, 2014)。例如:杨秀林等(2020)通过卫星追踪白鹤迁徙,识别了黄河三角洲自然保护区周边有1个重要的白鹤停歇地未被保护。因此将卫星追踪与野外实地调查结合,能够为未来保护区科学规划提供新的途径。

本研究以在黄河流域栖息的3种重要水鸟为研究对象,使用卫星追踪和卫星遥测技术,监测分析它们在黄河流域内的活动时长、停歇和土地利用情况,以期了解这3种水鸟与黄河流域湿地之间的依赖关系,同时评估黄河流域自然保护区对3种水鸟栖息地的保护现状,以期为未来黄河流域自然保护区的进一步规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 卫星遥测追踪技术

卫星遥测追踪技术具有追踪范围广、时间跨度长、定位信息准确、数据多样化的优点(薛亚东等, 2020)。通过定时回传数据,研究人员不仅能够获得个体精确的位置数据,还可以获得海拔、温度、光照等环境信息,以及三轴加速度等行为信息。

现行的发射器终端有Argos系统和GPS/GSM系统两种。Argos系统是一套集定位和数据传输于一体的卫星网络,由6颗极轨卫星组成,通过卫星绕地球运转,接收追踪器的信号,并将信号传回地面接收站,同时通过使用多普勒定位技术实现对追踪个体的定位(Douglas et al, 2012)。GPS/GSM系统使用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)进行定位,使用全球移动通信系统(Global System for Mobile Communications, GSM)进行数据传输(Kays et al, 2015)。相对于Argos系统,GPS/GSM系统定位精度和频率更高,可为迁徙研究提供大量的优质数据。

1.2 3种水鸟及捕捉追踪情况

鸟类群落的多样性与其依赖的栖息地密切相关。根据生态习性以及对栖息地的选择偏好(Grant et al, 2012),水鸟通常分为8个相对稳定的生态类群:鸬鹚类、雁鸭类、秧鸡类、鸨鹬类、鸥类、鹭类、

鹤类和鹳类(Li et al, 2013)。水鸟形态决定了其食性,例如雁鸭类大多杂食,鹭类和鹳类则多以鱼类为主。在斑块尺度和区域尺度下,栖息地水深、盐分、植被类型、植被覆盖度、植被高度等因子对于水鸟的分布起着关键作用(Tavares et al, 2014)。邵明勤等(2016)研究发现浅水河漫滩能够为小天鹅(*Cygnus columbianus*)提供重要的栖息地。为了全面地探讨不同类群水鸟栖息地的保护现状,本研究选择了不同食性和不同形态的3种水鸟——斑头雁、白琵鹭(*Platalea leucorodia*)和东方白鹳进行追踪研究。

(1)斑头雁隶属鸭科雁属(*Anser*),其繁殖地在中亚地区、蒙古国和中国(青海、西藏、新疆)的湖泊,越冬地位于印度和缅甸北部、中国西南部高原地区与长江中下游流域(Carboneras et al, 2016)。迁徙路线主要是中亚迁徙路线,广泛利用我国西部包括黄河流域在内的大量湿地,包括扎陵湖、鄂陵湖、冬给错那湖、尕拉拉错、玛多黄河、木里、当曲、玛曲黄河、羊卓雍错等(Takekawa et al, 2009; 刘冬平, 2010)。本课题组于2018年7月8日在蒙古国捕捉了6只斑头雁,均为成鸟,包括1只雌鸟和5只雄鸟,安装Ornitela公司背包式追踪器后放飞(附录1)。Ornitela公司的背包式追踪器是一种防水的太阳能式GPS发射器,设备按照固定时间间隔记录带时间戳的经纬度,并以固定时长通过手机网络进行数据传输。安装的追踪器重量小于捕捉个体体重的3%,不会干扰其飞行与生存(Bodey et al, 2018)。追踪的6只斑头雁共完成8次完整的秋季迁徙与2次完整的春季迁徙。为了保证数据的完整性,未死亡个体的数据截止时间选取到2019年12月31日。除了个体BHG002与BHG005各有2次完整的秋季迁徙与1次完整的春季迁徙外,其余个体都仅有1次完整秋季迁徙;除个体BHG001与BHG006是在迁徙过程中死亡导致数据缺失外,其余4只个体迁徙数据缺失是由于设备电量耗尽导致的。绑定斑头雁的设备在2016–2017年的定位频率为2 h,2018年设备升级后,定位频率优化为10 min,回传频率均为12 h,累计获得288,770条追踪数据。

(2)东方白鹳是一种大型涉禽,国家一级保护动物,同时也是IUCN濒危动物(IUCN, 2010)。东方白鹳繁殖于俄罗斯远东西伯利亚东南部以及我国东北地区(Carboneras et al, 2016)。黄河三角洲是它的主要停歇地,而且近年来逐渐有个体在此繁殖和

越冬(薛委委等, 2010; 陈军林, 2011^①; 程磊和周立志, 2017)。本课题组2016年、2018年与2019年在其繁殖期间于中国洪河国家级自然保护区(47°47' N, 133°40' E)、俄罗斯阿穆尔河区域和Bastak地区共捕捉东方白鹳幼鸟10只, 分别安装HQXS和Ornitela公司的背包式追踪器(附录1)。HQXS设备与Ornitela设备相同, 也是一种防水的太阳能电池供电的背包式GPS发射器。研究期间共计获得10次完整的秋季迁徙, 每只个体1次。为保证数据完整性, 对未死亡个体结束时间选取到2020年6月1日。除个体OS001和OS008因死亡导致数据缺失外, 其余8只个体迁徙数据缺失是长期失联导致。Ornitela设备的定位频率为10 min, 回传频率为12 h; HQXS设备的定位频率为1 h, 回传频率为24 h, 累计追踪数据304,592条。

(3)白琵鹭是一种鹳科琵鹭属(*Platalea*)的鸟类, 其分布范围广, 在欧洲、西亚和东亚繁殖, 在非洲、地中海区域、印度、斯里兰卡区域、中国东南部和日本越冬(Carboneras et al, 2016)。在黄河流域, 白琵鹭的栖息地包括黄河三角洲湿地、河南黄河湿地和山西运城湿地等(马朝红等, 2008; 赵文强, 2016^②; 黄子强等, 2018)。研究所追踪的5只白琵鹭是2018年7月16–17日于蒙古国的Jiree River捕捉, 包括4只幼鸟和1只成鸟, 同样安装Ornitela公司的背包式追踪器(附录1)。为保证数据完整性, 未死亡个体的结束时间选取到2019年12月31日。其中2只个体仅完成1次秋季迁徙, 其余3只拥有2次完整的秋季迁徙和1次完整的春季迁徙。除个体ES005因死亡导致数据缺失外, 其余4只迁徙数据缺失是长期失联导致的。设备的定位频率为10 min, 回传频率为12 h, 共计获得追踪数据251,230条。

1.3 定位数据处理及行为划分

对获得的位点数据集进行筛选, 去除无效和定位精度过低的数据。对于每个设备数据集进行去重处理, 并按照时间顺序重排。将数据集转为kml文件导入谷歌地球。为研究各物种在黄河流域的运动, 我们将个体迁徙轨迹与黄河流域边界(黄河流域基础数据集, 2002)进行叠加, 使用R语言的data.table包对黄河流域边界内的位点进行提取。共得到6只

斑头雁个体的35,171条数据, 5只白琵鹭个体的75,643条数据, 10只东方白鹳个体的91,577条数据。

参照Wang等(2018)将水鸟迁徙过程划分为“飞行”和“非飞行”两种状态。使用“首次通过时间”划分为高迁徙段与低迁徙段, 从而识别长距离迁徙途中的出发时间、到达时间与迁徙范围(Wang et al, 2018)。而“非飞行”状态指不满足净平方位移(NSD)与阶段持续时长之比大于150 km/d与NSD大于150 km, 或者不满足NSD与持续时间之比大于75 km/d与NSD大于300 km的阶段, NSD即为位点间的最小距离。将两种状态的位点标记为不同的颜色, 导入谷歌地球判断每只个体每种状态维持的时间段, 即开始的时间节点与结束的时间节点。如果非飞行的状态持续时间大于48 h, 则该范围被视为1个停歇地。按照这样的划分标准, 将每只追踪个体的春季迁徙或秋季迁徙过程划分为飞行和停歇状态不断变换的连续过程, 并获得每种状态对应的时间段。

使用R语言的dplyr包计算斑头雁、白琵鹭和东方白鹳个体的迁徙参数。其中迁徙距离是指从迁徙开始到迁徙完成累积的飞行距离, 不包括个体在停歇地的活动。迁徙持续时间是从繁殖/越冬区域出发到达越冬/繁殖区域之间的时间。通过提取每只个体迁徙途中停歇地的数量, 计算1次迁徙期间在所有停歇地花费的累积时间作为中途停歇时间。飞行时长是迁徙持续时间减去中途停歇时间, 迁徙距离除以飞行时间得到飞行速度。黄河流域内停歇、度夏或越冬的时长是指追踪个体进入黄河流域第一个位点至离开黄河流域第一个位点之间的时长, 并计算它们在黄河流域的活动时间在迁徙中的占比。

1.4 位点密度分析

使用ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013)导入追踪个体在黄河流域的所有数据, 通过渔网分析将黄河流域划分为10 km × 10 km网格, 统计每只追踪个体回传位点落在单元网格内的数量, 删去没有位点分布的网格。

为了分析追踪物种在黄河流域活动期间对不同区域利用的差异, 我们将位点分布最多的网格定义为100%, 从而排除设备追踪时间长短不一致和数据量不一致所产生的分析差异。对于追踪个体而言, 此网格即是追踪物种活动热度最高的区域。按照每个网格中位点数除以100%网格中的位点数, 得到网格的位点密度值, 使用不同色阶表示不同的位点密度。其中小于3%的网格设置为蓝色,

① 陈军林 (2011) 黄河三角洲繁殖东方白鹳生境选择和环境容纳量分析. 硕士学位论文, 安徽大学, 合肥.

② 赵文强 (2016) 山西运城湿地省级自然保护区鸟类多样性研究. 硕士学位论文, 山西大学, 太原.

3%–10%为绿色, 10%–20%为黄色, 20%–50%为橙色, 50%–100%为红色。

1.5 家域分析与栖息地划分

核密度估计法(Kie et al, 2010)是通过假设动物运动符合某种特定的概率分布, 从而模拟所研究物种的家域范围。概率模型能够较好地区分动物对不同空间的利用强度, 目前核密度估计法被认为是最适合的家域估算模型。使用R语言的adehabitatHR包(Calenge, 2006)中镶嵌的核密度估计法对追踪物种在黄河流域活动的位点进行家域模拟。为更好了解其物种家域的核心区, 对于每个物种分别绘制90%、75%和50%三种类型的家域。

另外, 在拟合中我们并没有删除黄河流域内被划定为飞行状态的位点, 因为有研究提到长距离迁徙水鸟在迁徙过程中对飞行路径上的生境具有选择倾向性(Alerstam, 2011), 我们尝试将这部分数据也纳入分析, 以期识别重要迁徙路径和栖息地。

将拟合的家域导入ArcGIS 10.2中, 分别计算不同范围家域的面积值。其中50%家域是追踪物种活动的核心区域, 随着家域拟合范围的增大, 物种活动的范围也会更发散, 并尽可能多地覆盖追踪个体活动的区域。通过3种追踪水鸟在黄河流域活动家域模拟, 我们获得了水鸟栖息地划分的数据基础, 将3种水鸟核心家域进行叠加, 获得适宜栖息地的划分范围。

1.6 土地覆被数据和计算

使用精度为10 m的FROM-GLC10 (Gong et al, 2019)土地覆被数据, 利用R语言中的raster包提取黄河流域内各物种追踪位点的土地类型, 使用Excel 2016计算重要栖息地内的土地利用类型占比。结合家域分析结果, 利用ArcGIS 10.2提取黄河流域内各物种三类家域内的土地类型, 使用Excel 2016计算土地类型占比。同时, 利用ArcGIS 10.2提取位点密度分析结果中的核心网格(即橙色和红色网格), 并对网格中土地类型占比进行分析。

2 结果

2.1 黄河流域湿地对3种迁徙水鸟的重要性

斑头雁在迁徙中在黄河流域停歇(图1)。根据Zhang等(2020)的研究, 本研究追踪的6只斑头雁按照迁徙路径可划分为蒙古国–中国日喀则(MtoT)种群和蒙古国–印度/孟加拉国(MtoA)种群。MtoT迁徙

路线的2只个体(BHG003和BHG005)的繁殖地在蒙古国, 越冬地位于中国西藏日喀则, 每次迁徙均在黄河流域停歇。它们秋季迁徙总时长为149 d, 而在黄河流域内的活动时长为111.2 d, 占秋季迁徙总时长的75.3%; 春季迁徙的总时长为62.2 d, 黄河流域活动时长为25.3 d, 占比40.7% (表1), 因此MtoT种群的春秋迁徙均高度依赖黄河流域的湿地。MtoA迁徙路线的4只个体(BHG001、BHG002、BHG004和BHG006)的繁殖地在蒙古国, 越冬地在印度/孟加拉国。它们的秋季迁徙总时长为401.9 d, 而黄河流域内总时长为109.8 d, 占总时长的27.3%; 春季迁徙总时长为40.7 d, 未在黄河流域内停歇(表1)。相比MtoT种群, MtoA种群春、秋季迁徙对黄河流域的依赖性较弱(附录2)。在迁徙中, 斑头雁的停歇地位于扎陵湖–鄂陵湖及其周边区域和青海省北部的木里镇(图2)。

追踪的5只白琵鹭均在蒙古国繁殖, 在中国长江中下游流域越冬, 黄河流域是其迁徙途中重要的停歇地和度夏区(图1)。当作为停歇地时, 秋季迁徙的总时间为466.2 d, 在黄河流域内活动的时长为172.9 d, 占比为37.1% (表1)。春季迁徙总时间为39.1 d, 在黄河流域内活动的时长为32.9 d, 占比达到84.1% (表1)。而且有2只幼鸟(ES001、ES003)第2年于黄河流域河套平原一带度夏。这表明白琵鹭在迁徙中极其依赖黄河流域湿地, 尤其是河套平原一带的湿地还是幼鸟重要的度夏区。白琵鹭在迁徙过程中, 还会集中利用宁夏平原–陕西黄河沿岸地区和山西中西部地区进行停歇(图2)。

东方白鹳黑龙江繁殖种群的越冬地在黄河三角洲或长江中下游。追踪的10只幼鸟在捕捉当年均在黄河三角洲越冬, 其中3只个体(OS002、OS003、OS007)拥有第2年完整迁徙, 但它们第2年成年后选择到长江中下游流域越冬(表1)。目前, 东方白鹳在黄河流域内的重要栖息地集中在黄河三角洲(图2)。

综上所述, 3种水鸟在迁徙途中, 虽然在黄河流域的活动类型有所差异, 但其停歇地、度夏地或越冬地均高度依赖黄河流域湿地。尤其是扎陵湖–鄂陵湖、青海省北部木里镇、宁夏平原–陕西黄河沿岸、河套平原、山西中西部和黄河三角洲高度支持了3种水鸟的迁徙与生存。

2.2 3种水鸟在黄河流域的家域和土地利用

家域和土地利用联合分析反映了物种活动的

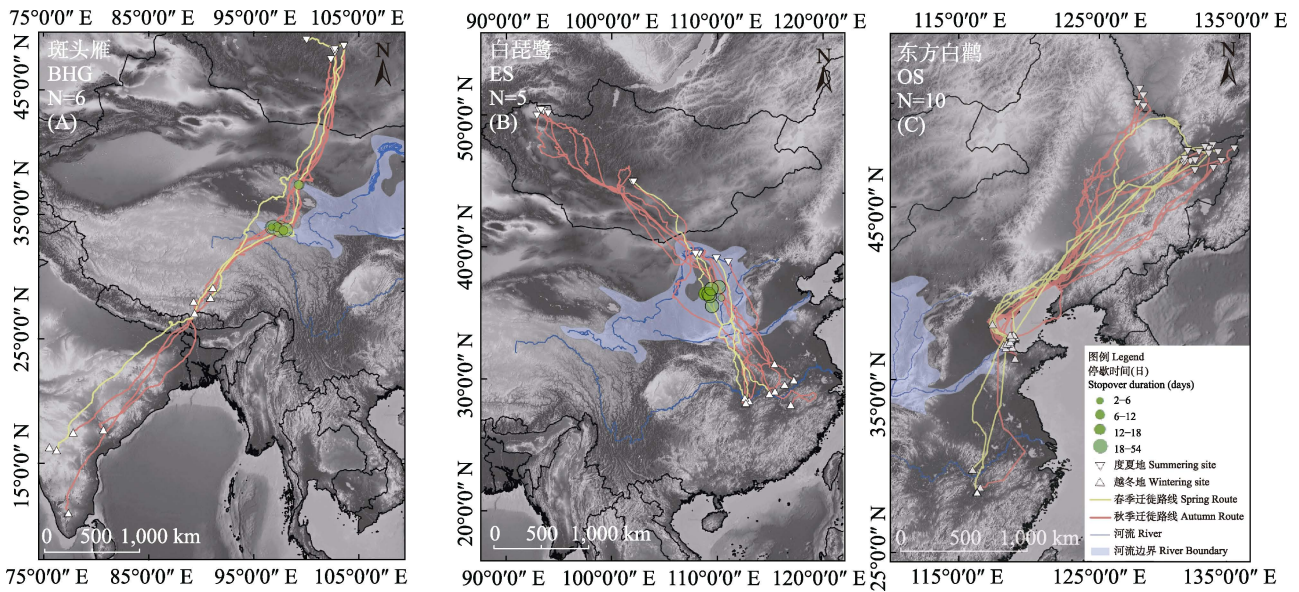


图1 追踪的3种水鸟的迁徙路线图。(A) 6只斑头雁的春秋迁徙路线: 繁殖地位于蒙古国, 越冬地在中国西藏日喀则与印度/孟加拉国, 迁徙过程中主要在黄河流域停歇。(B) 5只白琵鹭的春秋迁徙路线: 繁殖地在蒙古国, 越冬地在长江中下游流域, 迁徙中在黄河流域停歇或度夏。(C) 10只东方白鹳的春秋迁徙路线: 在黄河流域越冬。红线代表秋季迁徙路线, 黄线代表春季迁徙路线, 倒三角表示度夏位点, 正三角表示越冬位点, 绿色圆圈代表迁徙过程在黄河流域的停歇地与停歇时长, 蓝线代表黄河与长江, 浅蓝色阴影代表黄河流域(Jiang, 2015)。

Fig. 1 The map of the migration route of three waterbirds by tracking their life history. (A) The spring and autumn migration routes of 6 Bar-headed Geese. The breeding area is Mongolia, and the wintering areas are Shigatse of Tibet of China and India/Bangladesh. The Species mainly stops in the Yellow River basin. (B) The spring and autumn migration routes of 5 Eurasian Spoonbills. The breeding area is Mongolia, the wintering area is the middle and lower reaches of the Yangtze River, and it stops or spends summer in the Yellow River basin during migration. (C) The spring and autumn migration routes of 10 Oriental Storks, overwintering in the Yellow River basin. The red line represents the autumn migration route, the yellow line represents the spring migration route, the inverted triangle represents the summering sites, the forward triangle represents the wintering sites, the green circle represents the location and period of the stopover in the Yellow River basin, the blue line represents the Yellow River and the Yangtze River and the light blue shadow represents the Yellow River basin (Jiang, 2015).

表 1 三种迁徙水鸟在黄河流域内活动情况与利用类型

Table 1 Activities and utilization types of three migratory waterbirds in the Yellow River basin (YRB)

物种 Species	种群 Population	季节 Season	黄河流域内时长 Staging in YRB (d)	迁徙时长 Migration duration (d)	时间占比 Percentage	利用类型 Utilization type
斑头雁 Bar-headed Goose	蒙古国-中国日喀则	秋季 Autumn	111.2	149	75.3%	停歇地 Stopover site
	MtoT	春季 Spring	25.3	62.2	40.7%	
	蒙古国-印度/孟加拉国	秋季 Autumn	109.8	401.9	27.3%	停歇地 Stopover site
	MtoA	春季 Spring	0	40.7	0.0%	
白琵鹭 Eurasian Spoonbill	蒙古国-长江	秋季 Autumn	172.9	466.2	37.1%	停歇地 Stopover site
	Mongolia-Yangtze River	春季 Spring	32.9	39.1	84.1%	
	-	-	321.4	-	100.0%	度夏地 Summering site
东方白鹳 Oriental Stork	黑龙江繁殖种群 Heilongjiang breeding population	-	1351.7	-	100.0%	越冬地 Wintering site

范围(图3)与生境选择偏好(附录3)。通过核密度法对斑头雁2个重要栖息地的拟合计算表明, 在扎陵湖-鄂陵湖区拟合的3种家域面积分别为3,332.8 km² (90%)、1,399.8 km² (75%)和367.4 km² (50%) (表3);

斑头雁在该区域内利用的土地类型为草地(50.9%)、裸地(28.0%)、水体(14.7%)和湿地(6.4%)。斑头雁在青海省木里镇的家域面积为61.8 km² (90%)、27.3 km² (75%)和3.5 km² (50%) (表3), 主要利用的土地

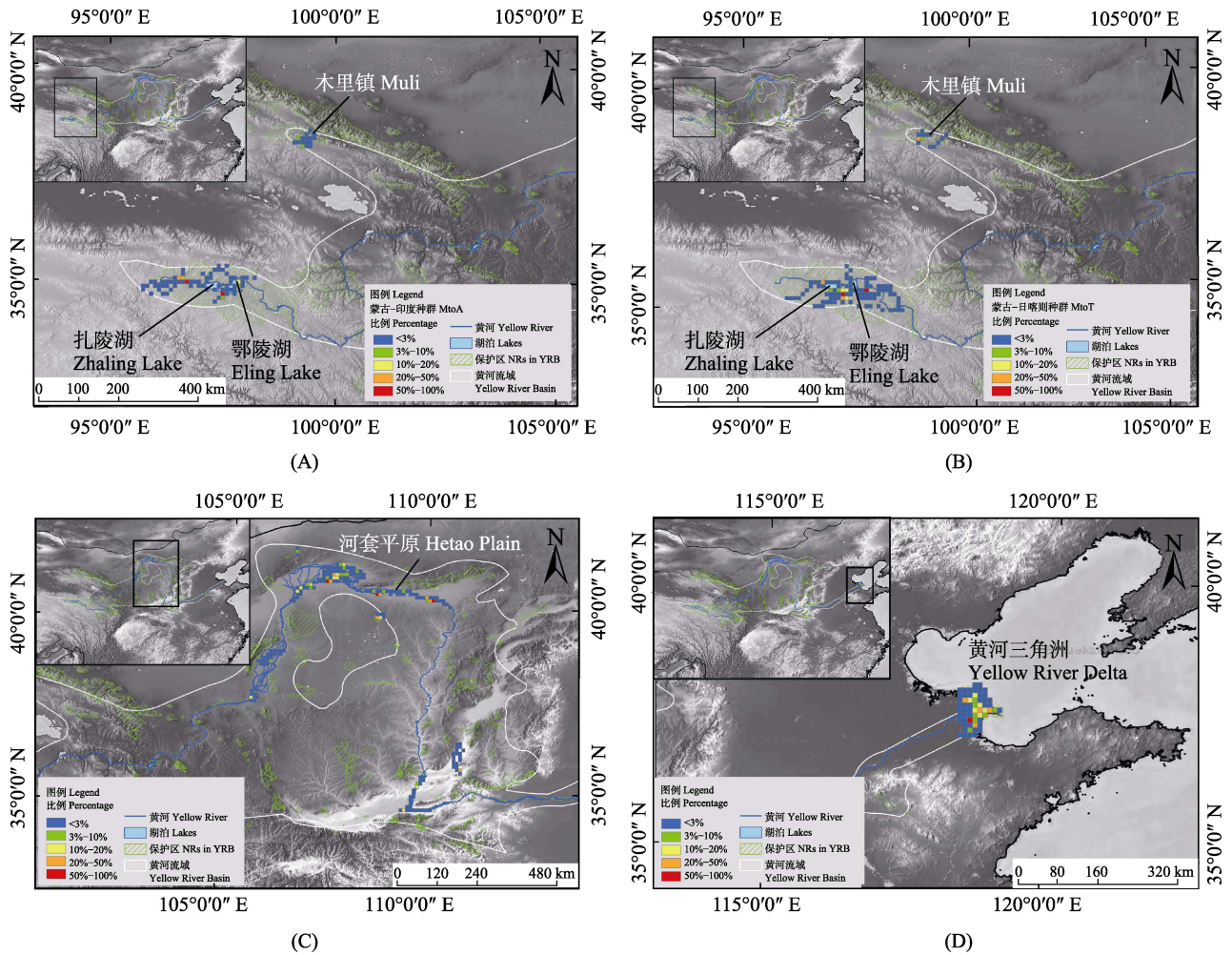


图2 3种水鸟在黄河流域活动位点的密度分析图。(A)和(B)分别为斑头雁MtoT (蒙古国-中国日喀则)种群和MtoA (蒙古国-印度/孟加拉国)种群在黄河流域内的重要栖息地; (C)白琵鹭蒙古-长江种群在黄河流域内的重要栖息地; (D)东方白鹤黑龙江繁殖种群在黄河流域的重要栖息地。蓝线为黄河, 白线为黄河流域边界, 绿色网格阴影区域为黄河流域自然保护区范围。黄河流域的位点密度使用3% (蓝)、3%–10% (绿)、10%–20% (黄)、20%–50% (橙)与50–100% (红)进行分级标注(Jiang, 2015)。
 Fig. 2 Density diagram of the sites of three waterbirds in the Yellow River basin. (A) and (B) showed the important habitats of the MtoT population and the MtoA population of the Bar-headed Goose; (C) showed the important habitat of the Eurasian Spoonbill; (D) showed the important habitat of the Oriental Stork. The blue line is the Yellow River, the white line is the boundary of the Yellow River basin, and the area shaded by the green grid is the Yellow River basin nature reserves. The site density of the Yellow River basin is marked with 3% (blue), 3%–10% (green), 10%–20% (yellow), 20%–50% (orange) and 50%–100% (red) (Jiang, 2015).

类型是草地(49.0%)、裸地(26.2%)、水体(22.5%)和湿地(2.3%)。对斑头雁2个重要栖息地的3种家域自身的土地类型进行占比计算, 发现50%的核心区湿地与水体占比极低, 分别为0.5%与1.2%, 而与之相反的是斑头雁对水体和湿地利用较高(表2), 利用比达到8.7倍和16.9倍, 这表明斑头雁对于水体和湿地的利用更偏向主动选择, 而对于栖息地本身高度分布的草地与裸地则可能偏向于被动选择。

白琵鹭重要栖息地的家域面积为63,064.6 km² (90%)、31,660.7 km² (75%)和6,428.4 km² (50%) (表3)。所利用的土地类型为农田(42.1%)、草地 (19.8%)、

湿地(19.6%)和水体(11.1%) (表2)。同时, 50%核心区的湿地和水体占比极低, 分别为1.1%和1.6%, 但利用比达17.8倍和6.9倍。白琵鹭对占比较高的裸地(28.5%)的利用率极低(3.4%), 表明在重要栖息地内白琵鹭仍然偏好选择湿地和水体, 且较少利用裸地(表2)。

东方白鹤的重要栖息地集中在黄河流域三角洲地区, 拟合家域的面积分别为330.6 km² (90%)、91.7 km² (75%)和8.1 km² (50%) (表3)。由于分布集中, 因此主要利用2种土地类型: 湿地(49.8%)和农田(34.5%) (表2)。对50%家域范围内的土地类型进

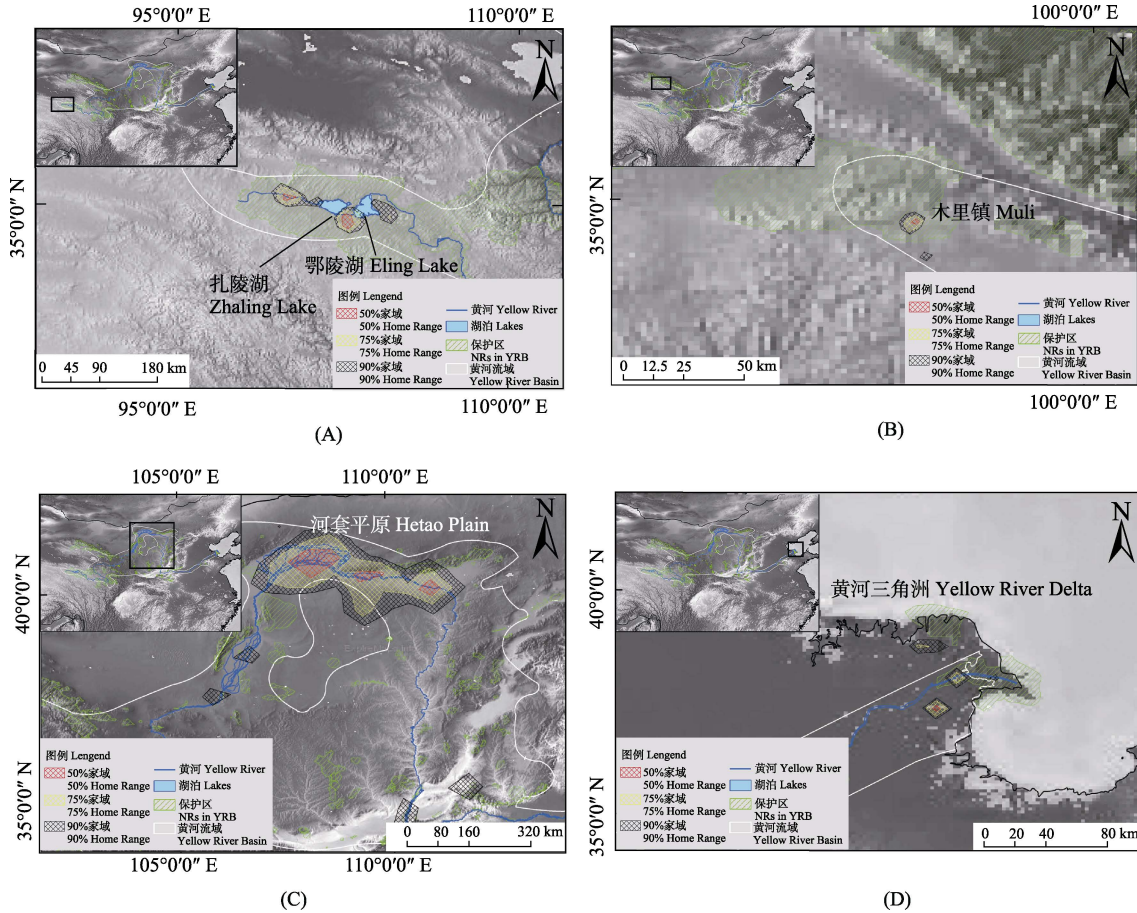


图3 3种水鸟在扎陵湖-鄂陵湖(A)、木里镇(B)、河套平原(C)和黄河三角洲(D)的家域范围。黑色网格、黄色网格、红色网格分别为90%、75%和50%活动区域拟合的家域范围。蓝线为黄河,绿色网格阴影区域为黄河流域自然保护区,白色区域为黄河流域边界,蓝色区域为湖泊范围。

Fig. 3 The home range of three waterbirds in the Zhaling-Eling lake (A), Muli Town (B), Hetao Plain (C), and the Yellow River Delta (D). The black shade, the yellow shade and the red shade are 90%, 75%, and 50% of the home range fitted. The blue line is the Yellow River, the green grid shaded area is the Yellow River basin nature reserves, the white line area is the boundary of the Yellow River basin, and the blue area is the lakes.

表 2 黄河流域 3 种水鸟重要栖息地与家域的土地利用情况

Table 2 Three important habitats of waterbirds in the Yellow River basin and land use in their home ranges

物种 Species	栖息地 Habitat	农田 Cropland	森林 Forest	草地 Grassland	灌丛 Shrubland	湿地 Wetland	水体 Water	人工地表 Artificial surface	裸地 Bare land
斑头雁 Bar-headed Goose	木里镇 Muli Town	0.0%	0.0%	49.0%	0.0%	2.3%	22.5%	0.0%	26.2%
	扎陵湖-鄂陵湖 Zhaling-Eling lake	0.0%	0.0%	50.9%	0.0%	6.4%	14.7%	0.0%	28.0%
	50%家域 Home range-50%	0.0%	0.0%	84.9%	0.0%	0.5%	1.2%	0.0%	13.4%
	75%家域 Home range-75%	0.0%	0.0%	74.4%	0.0%	0.3%	5.7%	0.0%	19.6%
	90%家域 Home range-90%	0.0%	0.0%	66.8%	0.0%	0.6%	7.7%	0.0%	24.9%
白琵鹭 Eurasian Spoonbill	河套平原 Hetao Plain	42.1%	0.7%	19.8%	0.0%	19.6%	11.1%	3.3%	3.4%
	50%家域 Home range-50%	55.2%	0.1%	7.4%	2.2%	1.1%	1.6%	3.9%	28.5%
	75%家域 Home range-75%	34.5%	1.5%	13.9%	1.3%	0.8%	1.5%	2.5%	44.0%
	90%家域 Home range-90%	31.7%	2.7%	27.7%	0.4%	0.5%	0.9%	3.8%	32.3%
东方白鹳 Oriental Stork	黄河三角洲 Yellow River Delta	34.5%	0.0%	4.5%	0.0%	49.8%	4.60%	6.6%	0.0%
	50%家域 Home range-50%	69.8%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	14.3%	15.7%	0.0%
	75%家域 Home range-75%	61.0%	0.0%	0.6%	0.0%	0.6%	24.0%	13.7%	0.1%
	90%家域 Home range-90%	64.5%	0.0%	3.3%	0.0%	2.7%	19.1%	8.1%	2.3%

表 3 黄河流域 3 种水鸟家域与自然保护区重叠情况

Table 3 Overlapping in the Yellow River basin nature reserves and home ranges of three waterfowl

	家域范围 Home range	面积 Area (km ²)	重叠面积 Overlapping area (km ²)	重叠率 Overlapping rate
斑头雁 Bar-headed Goose	50%	370.9	370.9	100.0%
	75%	1,427.1	1,427.1	100.0%
	90%	3,394.6	3,386.1	99.8%
白琵鹭 Eurasian Spoonbill	50%	6,428.4	105.2	1.6%
	75%	31,660.7	951.6	3.0%
	90%	63,064.6	3,090.4	4.9%
东方白鹳 Oriental Stork	50%	8.1	0.0	0.0%
	75%	91.7	27.2	29.6%
	90%	330.6	76.6	23.2%

行统计分析, 结果表明湿地仅占0.1%, 因此东方白鹳对于湿地的利用表现出强选择, 而对于农田生境的利用偏向于弱选择(表2)。

综合考虑3种水鸟的家域与土地利用联合分析结果, 我们发现: 在黄河流域内扎陵湖-鄂陵湖、青海省木里镇、宁夏平原与陕西黄河沿岸、内蒙古河套平原、山西中西部和黄河三角洲对于长距离迁徙水鸟的生存可能起着至关重要的作用, 因此需要提高对这些区域的关注。同时, 在这些重要栖息地内需提高对水鸟高度依赖的湿地与水体生境的关注。

2.3 黄河流域自然保护区对3种水鸟栖息地的保护现状

将斑头雁家域与黄河流域自然保护区进行叠加, 计算得到90%家域、75%家域、50%家域的重叠面积分别为3,386.1 km²(重叠率99.8%)、1,427.1 km²(重叠率100.0%)和370.9 km²(重叠率100.0%), 表明黄河流域内斑头雁的两个重要栖息地得到了现有保护区的有效保护(表3)。而白琵鹭90%家域的重叠面积为3,090.4 km²(重叠率4.9%), 75%家域的重叠面积为951.6 km²(重叠率3.0%), 50%家域重叠面积为105.2 km²(重叠率1.6%)。东方白鹳90%家域、75%家域的重叠面积分别为76.6 km²(重叠率23.2%)和27.2 km²(重叠率29.6%), 50%家域的重叠面积为0。目前, 白琵鹭和东方白鹳的重要栖息地被保护比例较低, 表明一些可能的重要栖息地存在保护空缺。

综上所述, 斑头雁由于重要栖息地位于扎陵湖-鄂陵湖和青海湖与祁连山脉区域, 已受到现有自然保护区的高度保护。然而主要利用河套平原与黄河三角洲的其他两种水鸟, 其潜在的栖息地受保护比例较低, 因此需要结合野外实地调查数据来印证潜在栖息地的存在, 并优化目前自然保护区的范围,

以便更好保护这些生境与鸟类。

3 讨论

3.1 3种水鸟对黄河流域的依赖性

黄河流域内的湿地位于东亚-澳大利西亚、中亚和西太平洋迁徙路线上, 是众多迁徙水鸟的停歇地、繁殖地和越冬地(张孚允和杨若莉, 1997)。本研究结果证明了不论是斑头雁蒙古国-中国日喀则种群还是蒙古国-印度/孟加拉国种群, 黄河湿地都是水鸟迁徙中依赖的重要湿地。两个种群在黄河的平均活动时长都达到了一个月以上。我们的调查发现, 斑头雁在黄河流域内共有2个重要栖息地, 即黄河源头姊妹湖——扎陵湖、鄂陵湖和青海省北部木里镇, 主要停歇在扎陵湖-鄂陵湖区域。这些湿地可以为斑头雁提供能量补给和休息场所, 结合西藏东部斑头雁种群的庞大数量(约80,000只, Zhang et al, 2020)推测, 很可能有大量个体在迁徙过程中会利用黄河流域。因此黄河流域的停歇地对该物种的迁徙起到了不可或缺的作用。

在蒙古国繁殖的白琵鹭种群不仅利用河套平原进行停歇, 而且少数幼鸟还会出现度夏的情况, 实地调查证明了河套平原是白琵鹭重要的栖息地场所(高敏等, 2018)。追踪发现原本在蒙古国繁殖的白琵鹭幼鸟在次年春季迁徙并未返回繁殖地, 而是在河套平原度夏。据此我们提出如下假设: 相比经验丰富的成鸟, 第1年幼鸟的经验和飞行能力均较弱, 在长距离迁徙过程中会面临更多的风险, 再加上到达繁殖地会面临强烈的竞争, 因此迁徙途中选择了更短距离且能够支持度夏的黄河流域湿地。

黄河三角洲是东方白鹳重要的越冬地, 该物种在此地的越冬平均时长达到4个月以上。我们研究

中的10只幼鸟在第1年越冬时均利用了该地区,利用率极高。其中有次年完整迁徙数据的个体,它们在第2年到达长江中下游流域越冬。这与白琵鹭幼鸟迁徙现象一致。因此未来需要详细对比成鸟与幼鸟在第1年迁徙中的迁徙策略,并结合遥感数据和气象数据,来验证我们的假设是否成立。

3.2 3种水鸟对黄河流域栖息地的利用

不同类群的水鸟由于形态特征和生活习性等的差异,会选择不同的湿地栖息。同时,湿地生态系统中的植被、水体状况和食物丰度等因素,也会影响水鸟的选择利用。斑头雁是鸭科雁属的典型物种之一,在繁殖期间主要取食11科19种植物,莎草科植物是其主要取食对象,中后期也会采食小眼子菜(*Potamogeton pusillus*)、海韭菜(*Triglochin maritimum*)等水生植物(马映荣等, 2020)。东方白鹳与白琵鹭均为食鱼的水鸟,它们对觅食地的水深具专一性,而且东方白鹳觅食地和休息地的水深都显著大于白琵鹭,这与2种水鸟觅食的行为密切相关(张笑辰等, 2014)。黄河流域湿地拥有丰富的动植物资源,例如扎陵湖-鄂陵湖区域拥有467种植物,共有苔草属(*Carex*)、眼子菜属(*Potamogeton*)等154个植物属(蔡延玲, 2016),能够为迁徙水鸟提供优良的食物资源。

本研究结果表明,斑头雁、白琵鹭和东方白鹳表现出对水体和湿地的选择倾向性,而对生境中占比较高的草地、农田和人工地表没有表现出选择倾向性。正因为迁徙水鸟均偏好在湿地和水面觅食、休憩和睡眠,对水体和湿地的高度依赖是符合预期的。虽然3种水鸟对占比极高的生境没有表现出强选择性,但仍然需要结合野外实地调查数据来研究这些生境与其利用之间的关系。

3.3 黄河自然保护区的保护现状及卫星追踪对保护区规划的意义

中国地大物博,在黄河流域栖息的鸟类数量众多,建设保护区不仅是为了保护生态环境,更重要的是保护生物多样性。黄河流域面积大、湿地类型广泛、横跨多个候鸟迁徙的重要路线,其生态价值不言而喻。保护黄河湿地要从保护植被、维持水分、减少人类干扰等多个方面综合考虑。2019年,习近平总书记在河南主持召开了黄河流域生态保护和高质量发展座谈会,他强调要共同抓好大保护,协同推进大治理,让黄河成为造福人民的幸福河。保

护黄河是事关中华民族伟大复兴和永续发展的千秋大计。国家对于环境保护要立足于长远利益,“绿水青山就是金山银山”。必须维持好工业发展导致的人类社会扩张与生态环境建设之间的平衡。根据生态环境部2019年5月发布的《全国自然保护区名录》,国内2000年新增保护区307个。从2000-2010年,中国109个国家级自然保护区的核心区、缓冲区和试验区的人为干扰分别减少了7%, 4%和5% (Xu et al, 2016),表明建立自然保护区能够有效减少人为干扰。虽然保护区建设逐年加强,但根据杨秀林等(2020)的研究结果,现在的保护区规划并没有很好地保护鸟类在迁徙过程中的重要位点,很多重要的位点仍有保护空缺。特别是黄河流域自然保护区集中分布在水资源丰富的上游地区,在中下游地区分布松散,因此更需要评估保护区网络对于水鸟的保护效力。

本研究发现,家域集中在黄河源头扎陵湖和鄂陵湖的斑头雁,其活动范围已被保护区完全覆盖,而,白琵鹭和东方白鹳在黄河中下游的栖息地被保护比例较低,但考虑到这些数据来源于少量追踪个体,再加上个体差异,本研究发现的潜在栖息地是否是这2种水鸟的重要栖息地,仍然需要结合野外实地调查数据进行佐证。但从分析结果中可以看出,其栖息地确实存在保护空缺,因此有必要对黄河自然保护区网络进行优化与扩展。

这3种水鸟在栖息地中高度依赖于湿地和水面。虽然黄河流域陆表水域从2000-2019年呈现上升趋势,但水域面积扩大主要集中在黄河上游流域,黄河中游区域,尤其是河套平原的湖库面积仍在缩小(Gao et al, 2020)。近年研究发现丹顶鹤等水鸟在黄河三角洲地区的综合生境格局在1986-2007年间发生了明显变化,不适宜生境面积由1986年的48.64%增加到2007年的64.73%;适宜生境面积减少,由1986年的51.39%减至2007年的35.04% (张婷婷等, 2019)。伴随着淡水资源短缺、水污染和人类活动的影响,在1999-2015年,经过黄河三角洲的鸕鹚类水鸟从187,296只减少到了74,412只(张晓龙等, 2009)。这些现象反映出黄河流域水鸟栖息地面临严重威胁,因而在自然保护区的进一步规划中,不仅需要关注可能存在的潜在栖息地,也需要对湿地和水面进行针对性的保护,避免湿地退化和生物多样性降低。

通过卫星追踪,能够有效获得停歇地的候鸟数据。停歇地相比繁殖地和越冬地,受到环境的影响更大,同时不同候鸟对于停歇地的选择不同,即使是同一个种群的个体,在不同年份也会出现停歇地选择上的差异。卫星追踪的方法从原先的定性分析转变为一种半定量的分析方式,可与野外实地鸟类调查数据方法相结合来发掘潜在重要栖息地,并探讨栖息地保护现状。这种方法可以推广至许多珍贵鸟类,尤其是大型鸟类的保护工作上,使得栖息地规划更加科学、合理。

致谢: 感谢野外捕捉团队的贡献。另外,中国洪河国家级自然保护区、俄罗斯阿穆尔河地区和 Bastak 保护区对野外捕捉工作提供支持;刘彩莲同学对数据分析提供帮助;本文责任编辑及中国科学院生态环境研究中心郑桂梅老师和匿名审稿专家对本文提供诸多建设性意见,在此一并感谢。

参考文献

- Alerstam T (2011) Optimal bird migration revisited. *Journal of Ornithology*, 152, 5–23.
- Basic Dataset of the Yellow River Basin (2002) National Data Center for Glacier, Permafrost and Desert Science (www.ncdc.ac.cn). (in Chinese) [黄河流域基础数据集 (2002) 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (www.ncdc.ac.cn).] (accessed on 2020-08-01)
- Beatty WS, Kesler DC, Webb EB, Raedeke AH, Naylor LW, Humburg DD (2014) The role of protected area wetlands in waterfowl habitat conservation: Implications for protected area network design. *Biological Conservation*, 176, 144–152.
- Berthold P, Terrill SB (1991) Recent advances in studies of bird migration. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 22, 357–378.
- Bishop CM, Spivey RJ, Hawkes LA, Batbayar N, Chua B, Frappell PB, Milsom WK, Natsagdorj T, Newman SH, Scott GR, Takekawa JY, Wikelski M, Butler PJ (2015) The roller coaster flight strategy of bar-headed geese conserves energy during Himalayan migrations. *Science*, 347, 250–254.
- Bodey TW, Cleasby IR, Bell F, Parr N, Schultz A, Votier SC, Bearhop S (2018) A phylogenetically controlled meta-analysis of biologging device effects on birds: Deleterious effects and a call for more standardized reporting of study data. *Methods in Ecology and Evolution*, 9, 946–955.
- Cai YL (2016) Investigation of wild plants in Zhaling Lake-Eling Lake Protection Zone. *Beijing Agriculture*, (3), 109–111. (in Chinese) [蔡延玲 (2016) 扎陵湖-鄂陵湖保护分区野生植物调查. *北京农业*, (3), 109–111.]
- Calenge C (2006) The package “adehabitat” for the R software: A tool for the analysis of space and habitat use by animals. *Ecological Modelling*, 197, 516–519.
- Carboneras C, Jutglar F, Kirwan GM, Christie DA, Sharpe CJ (2016) *Handbook of the Birds of the World Alive*. Lynx Edicions, Barcelona.
- Cheng L, Zhou LZ (2017) Nest Site Selection of the Oriental Stork in the Yellow River Delta. The Thirteenth National Symposium on Wildlife Ecology and Resource Protection and the 6th Western China Zoology Symposium. (in Chinese) [程磊, 周立志 (2017) 黄河三角洲繁殖东方白鹳巢址选择的研究. 第十三届全国野生动物生态与资源保护学术研讨会暨第六届中国西部动物学学术研讨会.]
- Cui LJ (2019) Protection and management of wetlands in the Yellow River basin. *Democracy & Science*, (1), 5356. (in Chinese) [崔丽娟 (2019) 黄河流域湿地的保护与管理. *民主与科学*, (1), 53–56.]
- Douglas DC, Weinzierl R, Davidson SC, Kays S, Wikelski M, Bohrer G (2012) Moderating Argos location errors in animal tracking data. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 999–1007.
- ESRI (2013) ArcGIS Desktop: Release 10.2. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- Gao JX, Wang YC, Hou P, Wan HW, Zhang WG (2020) Temporal and spatial variation characteristics of land surface water area in the Yellow River basin in recent 20 years. *Journal of Hydraulic Engineering*, 51, 1157–1164.
- Gao M, Ling Y, Zhao G (2018) Study on the ecological distribution and dynamics of Ciconiiformes in Wuliangshuai. *Journal of Inner Mongolia Normal University*, 47, 141–145. (in Chinese) [高敏, 灵燕, 赵格日乐图 (2018) 乌梁素海鹳形目鸟类生态分布和动态变化研究. *内蒙古师范大学学报*, 47, 141–145.]
- Gong P, Liu H, Zhang MN, Li CC, Wang J, Huang HB, Clinton N, Ji LY, Li WY, Bai YQ, Chen B, Xu B, Zhu ZL, Yuan C, Suen HP, Guo J, Xu N, Li WJ, Zhao YY, Yang J, Yu CQ, Wang X, Fu HH, Yu L, Dronova I, Hui FM, Cheng X, Shi XL, Xiao FJ, Liu QF, Song LC (2019) Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 64, 370–373.
- Grant SB, Saphores JD, Feldman DL, Hamilton AJ, Fletcher TD, Cook PLM, Stewardson M, Sanders BF, Levin LA, Ambrose RF, Deletic A, Brown R, Jiang SC, Rosso D, Cooper WJ, Marusic I (2012) Taking the “waste” out of “wastewater” for human water security and ecosystem sustainability. *Science*, 337, 681–686.
- He B, Wang BX (2018) The value of wetland ecosystem services in Shaanxi Yellow River Wetland Provincial Nature Reserve. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 46(6), 104–109. (in Chinese with English abstract) [何冰, 王保星 (2018) 陕西黄河湿地省级自然保护区湿地生态系统服务价值研究. *陕西林业科技*, 46(6), 104–109.]
- Higuchi H, Pierre JP, Krever V, Andronov V, Fujita G, Ozaki

- K, Goroshko O, Ueta M, Smirensky S, Mita N (2004) Using a remote technology in conservation: Satellite tracking white-naped cranes in Russia and Asia. *Conservation Biology*, 18, 136–147.
- Huang ZQ, Che CG, Tan HT, Bi ZG, Liu WH, Zhang XT, Zhang SY, Li DL (2018) Investigation on the diversity and population of waterbird in the Yellow River Delta Nature Reserve. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 48, 41–45, 48. (in Chinese with English abstract) [黄子强, 车纯广, 谭海涛, 毕正刚, 刘伟华, 张希涛, 张树岩, 李东来 (2018) 黄河三角洲水鸟多样性调查及种群数量监测. *山东林业科技*, 48, 41–45, 48.]
- IUCN (International Union for Conservation of Nature) (2010) *The Ramsar Handbooks for the Wise Use of Wetlands*, 4th edn. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland.
- Jiang H (2015) Global administrative boundary data. National Earth System Science Data Center, National Science & Technology Infrastructure of China. <http://www.geodata.cn>, accessed on 2020-08-01.
- Joppa LN, Loarie SR, Pimm SL (2008) On the protection of “protected areas”. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 105, 6673–6678.
- Juffe-Bignoli D, Burgess ND, Bingham H, Belle EMS, de Lima MG, Deguignet M, Bertzky B, Milam AN, Martinez-Lopez J, Lewis E (2014) *Protected Planet Report 2014*. UNEP-WCMC, Cambridge, UK.
- Kanai Y, Nagendran M, Ueta M, Markin Y, Rinne J, Sorokin AG, Higuchi H, Archibald GW (2002) Discovery of breeding grounds of a Siberian Crane *Grus leucogeranus* flock that winters in Iran, via satellite telemetry. *Bird Conservation International*, 12, 327–333.
- Kays R, Crofoot MC, Jetz W, Wikelski M (2015) Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet. *Science*, 348(6240).
- Kie JG, Matthiopoulos J, Fieberg J, Powell RA, Cagnacci F, Mitchell MS, Gaillard JM, Moorcroft PR (2010) The home-range concept: Are traditional estimators still relevant with modern telemetry technology? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365, 2221–2231.
- Li DL, Chen SH, Lloyd H, Zhu SY, Shan K, Zhang ZW (2013) The importance of artificial habitats to migratory waterbirds within a natural/artificial wetland mosaic, Yellow River Delta, China. *Bird Conservation International*, 23, 184–198.
- Li SH, Meng WY, Chen LX, Li YF, Gao RY, Ru WD, Sun MH, Dai Q, Zhang GG, Lu J (2017) The spring waterbird community and home range of the Whooper Swan *Cygnus cygnus* at the upper and middle reaches of Yellow River in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 1910–1916. (in Chinese with English abstract) [李淑红, 孟维悦, 陈丽霞, 李云锋, 高如意, 茹文东, 孙孟和, 戴强, 张国钢, 陆军 (2017) 黄河中上游春季迁徙期水鸟群落及大天鹅活动特征. *生态学杂志*, 36, 1910–1916.]
- Lian HY, Wu LX, Cao AL, Zhang XS (2018) Bird Diversity in Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 48(4), 44–46, 62. (in Chinese) [连海燕, 吴立新, 曹爱兰, 张孝帅 (2018) 山东黄河三角洲国家级自然保护区鸟类多样性. *山东林业科技*, 48(4), 44–46, 62.]
- Liu DP (2010) Breeding Movement and Migration of Bar-headed Goose (*Anser indicus*) at Qinghai Lake and Spatial-temporal Relationship with HPAI Outbreaks. PhD dissertation. Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing. (in Chinese) [刘冬平 (2010) 青海湖斑头雁(*Anser indicus*)的繁殖期活动性、迁徙路线及其与禽流感暴发的时空关系. 博士学位论文, 中国林业科学研究院, 北京.]
- Ma CH, Ma SZ, Wei XY, Wang WL (2008) Waterbird resources in Yellow River Wetland National Nature Reserve in Mengjin, Henan. *Sichuan Journal of Zoology*, 27, 902–904. (in Chinese with English abstract) [马朝红, 马书钊, 韦晓彦, 王文林 (2008) 河南黄河湿地国家级自然保护区孟津段水鸟资源调查. *四川动物*, 27, 902–904.]
- Ma YR, Wan LX, Luo HD, Jia YY (2020) Analysis of dietary of bar-headed geese inhabited in Gansu Yanchiwan National Nature Reserve in breeding period. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 34, 166–171. (in Chinese with English abstract) [马映荣, 万丽霞, 罗宏德, 贾阳阳 (2020) 甘肃盐池湾国家级自然保护区斑头雁繁殖期食性分析. *干旱区资源与环境*, 34, 166–171.]
- NBS (National Bureau of Statistics) (2017) *China Statistical Yearbook*. China Statistics Press, Beijing.
- Shao MQ, Jiang JH, Dai NH (2016) Micro-habitat use of water birds in Poyang Lake and its response to water level during non-breeding period. *Chinese Journal of Ecology*, 35, 2759–2767. (in Chinese with English abstract) [邵明勤, 蒋剑虹, 戴年华 (2016) 鄱阳湖非繁殖期水鸟的微生物境利用及对水位的响应. *生态学杂志*, 35, 2759–2767.]
- Shimazaki H, Tamura M, Higuchi H (2004) Migration routes and important stopover sites of endangered Oriental Storks (*Ciconia boyciana*) as revealed by satellite tracking. *Memoirs of the National Institute of Polar Research Special Issue*, 58, 162–178.
- Takekawa JY, Heath SR, Douglas DC, Perry WM, Javed S, Newman SH, Suwal RN, Rahmani AR, Choudhury BC, Prosser DJ, Yan B, Hou Y, Batbayar N, Natsagdorj T, Bishop CM, Butler PJ, Frepell PB, Milson WK, Scott GR, Hawkes LA, Wikelski M (2009) Geographic variation in Bar-headed Geese *Anser indicus*: Connectivity of wintering areas and breeding grounds across a broad front. *Wildfowl*, 59, 100–123.
- Tavares DC, Guadagnin DL, de Moura JF, Siciliano S, Merico A (2015) Environmental and anthropogenic factors structuring waterbird habitats of tropical coastal lagoons: Implications for management. *Biological Conservation*, 186, 12–21.
- Ueta M, Mcgrady MJ, Nakagawa H, Sato F, Masterov VN (2003) Seasonal change in habitat use in Steller’s Sea Eagles (*Haliaeetus pelagicus*). *Oryx*, 37, 110–114.
- Volker M, Rakhyn EK, Casey S (2015) When implementation works: A comparison of Ramsar Convention

- implementation in different continents. *Environmental Science and Policy*, 51, 95–105.
- Wang X, Barter M, Cao L, Lei JY, Fox AD (2012) Changes in the distribution and abundance of wintering Lesser White-fronted Geese *Anser erythropus* in eastern China. *Bird Conservation International*, 22(2), 128.
- Wang X, Cao L, Bysykatova I, Xu ZG, Fox AD (2018) The Far East taiga forest: Unrecognized inhospitable terrain for migrating Arctic-nesting waterbirds? *PeerJ*, 6, e4353.
- Wetlands International (2013) *Waterbird Population Estimates*, 5th edn. Wetlands International, Wageningen.
- Xu W, Li X, Pimm SL, Hull V, Zhang JJ, Zhang L, Xiao Y, Zheng H, Ouyang ZY (2016) The effectiveness of the zoning of China's protected areas. *Biological Conservation*, 204, 231–236.
- Xue WW, Zhou LZ, Zhu SY, Shan K, Wang LD, Xu RX (2010) Breeding ecology of oriental white stork (*Ciconia boyciana*) in the migratory stopover site. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 16, 832–838 (in Chinese with English abstract) [薛委委, 周立志, 朱书玉, 单凯, 王立东, 许仁鑫 (2010) 迁徙停歇地东方白鹳繁殖生态研究. *应用与环境生物学报*, 16, 828–832.]
- Xue YD, Li DQ, Li J (2020) Habitat selection and migration pattern of wild Bactrian camel (*Camelus ferus*) in the Kumtag Desert, China based on satellite tracking and positioning technology. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(10), 192–198. (in Chinese with English abstract) [薛亚东, 李迪强, 李佳 (2020) 基于卫星追踪定位技术的库姆塔格沙漠野骆驼生境利用和迁移规律. *林业科学*, 56(10), 192–198.]
- Yang XL, Jiang HX, Zou CL, Wang Y, Lin BQ, Li LS (2020) Changes in migration pattern and important stopover sites of the eastern population of Siberian cranes. *Scientia Silvae Sinicae*, 56(2), 123–133. (in Chinese with English abstract) [杨秀林, 江红星, 邹畅林, 王永, 林宝庆, 李连山 (2020) 白鹤东部种群迁徙模式与重要中途停歇地的变化. *林业科学*, 56(2), 123–133.]
- Zhang FY, Yang RL (1997) *Bird Migration Research of China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [张孚允, 杨若莉 (1997) 中国鸟类迁徙研究. 中国林业出版社, 北京.]
- Zhang JJ, Xie YB, Li LX, Batbayar N, Deng XQ, Damba I, Meng FJ, Cao L, Fox AD (2020) Assessing site-safeguard effectiveness and habitat preferences of Bar-headed Geese (*Anser indicus*) at their stopover sites within the Qinghai-Tibet Plateau using GPS/GSM telemetry. *Avian Research*, 11, 1–13.
- Zhang L, Wang X, Zhang J, Ouyang ZY, Chan S, Crosby M, Watkins D, Martinez J, Su LY, Yu Y, Szabo J, Cao L, Fox AD (2017) Formulating a list of sites of waterbird conservation significance to contribute to China's Ecological Protection Red Line. *Bird Conservation International*, 27, 153–166.
- Zhang TT, Peng ZJ, Zhou DQ, Lu CH (2019) Research progress on habitat selection of red-crowned crane (*Grus japonensis*) in China. *Chinese Journal of Zoology*, 54, 134–144. (in Chinese with English abstract) [张婷婷, 彭昭杰, 周大庆, 鲁长虎 (2019) 我国丹顶鹤栖息地选择研究进展. *动物学杂志*, 54, 134–144.]
- Zhang XC, Jin BS, Chen JK, Wu JD, Liu GH, Ma ZJ (2014) Relationship between habitat use of four waterbird species and water depth and food resource in Poyang Lake. *Chinese Journal of Zoology*, 49, 657–665. (in Chinese with English abstract) [张笑辰, 金斌松, 陈家宽, 吴建东, 刘观华, 马志军 (2014) 鄱阳湖四种水鸟的栖息地利用与水深和食物的关系. *动物学杂志*, 49, 657–665.]
- Zhang XL, Li P, Liu LJ, Li PY, Shan K (2009) Biodiversity and its protection in the Yellow River Delta wetland. *Coastal Engineering*, 28, 3339. (in Chinese with English abstract) [张晓龙, 李萍, 刘乐军, 李培英, 单凯 (2009) 黄河三角洲湿地生物多样性及其保护. *海岸工程*, 28, 33–39.]

(责任编辑: 丁平 责任编辑: 周玉荣)

附录 Supplementary Material

附录1 追踪物种个体信息

Appendix 1 Tracking individual information of species studied
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020328-1.pdf>

附录2 黄河流域内追踪物种停歇信息

Appendix 2 Tracking species stopover information in the Yellow River basin
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020328-2.pdf>

附录3 黄河流域内3种水鸟土地利用补充结果

Appendix 3 Supplementary results of land use of three waterfowl in the Yellow River basin
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020328-3.pdf>

王昱熙, 谢彦波, Nyambayar Batbayar, 朱宝光, 董树斌, Anna Barma, Anton Sasin, 曹垒 (2020) 基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对 3 种水鸟栖息地的保护现状. 生物多样性, 28, 1483–1495. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020328>

附录 1 追踪物种个体信息

Appendix 1 Tracking individual information of species studied

我们所追踪的 6 只斑头雁个体均为 2018 年 7 月 8 日在蒙古国西部捕捉, 追踪器设备厂商为 Ornitela, 产品型号为 OT-E25-3G, 产品类型均为背包式, 产品重量为 25 克。

表 A1 追踪器绑定斑头雁个体信息总表

Table A1 Summary table of Bar-headed Geese (*Anser indicus*) fitted with solar-powered GPS telemetry devices

编号 Bird ID	种群 Population	性别 Sex	年龄 Age	体重 Weight (g)	迁徙时间 Migration time	迁徙开始 Departure time	迁徙结束 Arrival time	进入黄河 Arrival in Yellow River	离开黄河 Departure in Yellow River
BHG001	MtoA	雄性 Male	成鸟 Adult	2,950	Autumn, 2018	2018/9/11	2018/11/20	2018/9/12	2018/10/1
BHG002	MtoA	雄性 Male	成鸟 Adult	2,350	Autumn, 2018	2018/9/13	2018/11/20	2018/9/20	2018/10/10
					Spring, 2019	2019/3/7	2019/4/17	—	—
					Autumn, 2019	2019/9/11	2019/11/24	2019/9/14	2019/10/28
BHG003	MtoT	雄性 Male	成鸟 Adult	2,360	Autumn, 2018	2018/9/19	2018/10/28	2018/9/21	2018/10/25
BHG004	MtoA	雌性 Female	成鸟 Adult	2,200	Autumn, 2018	2018/8/26	2018/12/25	2018/9/30	2018/10/24
BHG005	MtoT	雄性 Male	成鸟 Adult	2,500	Autumn, 2018	2018/9/13	2018/10/29	2018/9/19	2018/10/25
					Spring, 2019	2019/4/4	2019/6/6	2019/4/11	2019/5/8
					Autumn, 2019	2019/9/12	2019/11/14	2019/9/13	2019/10/28
BHG006	MtoA	雄性 Male	成鸟 Adult	2,500	Autumn, 2018	2018/9/11	2018/11/20	2018/9/30	2018/10/3

我们所追踪的 5 只白琵鹭个体均为 2018 年 7 月 16–17 日在蒙古国 Jiree River 捕捉, 追踪器设备厂商为 Ornitela, 产品型号为 OT-E25-3G, 产品类型均为背包式, 产品重量为 25 克。

表 A2 追踪器绑定白琵鹭个体信息总表

Table A2 Summary table of Eurasian Spoonbills (*Platalea leucorodia*) fitted with solar-powered GPS telemetry devices

编号 Bird ID	年龄 Age	体重 Weight (g)	迁徙时间 Migration time	迁徙开始 Departure time	迁徙结束 Arrival time	进入黄河 Arrival in Yellow River	离开黄河 Departure in Yellow River
ES001	幼鸟 Juvenile	1,860	Autumn, 2018	2018/8/5	2018/11/19	2018/10/5	2018/11/9
			Spring, 2019	2019/5/1	2019/5/16	2019/5/2	—
			Autumn, 2019	2019/10/10	2019/10/29	—	2019/10/12
ES002	幼鸟 Juvenile	1,910	Autumn, 2018	2018/8/22	2018/10/29	2018/9/19	2018/10/26
			Spring, 2019	2019/5/17	2019/6/8	2019/5/17	2019/6/5
			Autumn, 2019	2019/9/26	2019/10/20	2019/9/27	2019/10/19
ES003	幼鸟 Juvenile	2,170	Autumn, 2018	2018/9/2	2018/11/19	2018/9/28	2018/9/29
			Spring, 2019	2019/5/1	2019/5/2	2019/5/2	—
			Autumn, 2019	2019/10/24	2019/10/30	—	2019/10/27
ES004	成鸟 Adult	2,320	Autumn, 2018	2018/8/7	2018/10/30	2018/9/27	2018/10/21
ES005	幼鸟 Juvenile	1,830	Autumn, 2018	2018/8/26	2018/11/15	2018/9/2	2018/10/22

王昱熙, 谢彦波, Nyambayar Batbayar, 朱宝光, 董树斌, Anna Barma, Anton Sasin, 曹垒 (2020) 基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对 3 种水鸟栖息地的保护现状. 生物多样性, 28, 1483–1495. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020328>

我们所追踪的 10 只东方白鹳个体在中国洪河国家级自然保护区、俄罗斯阿穆尔河地区和 Bastak 地区捕捉, 均为幼鸟, 性别未知。追踪器设备厂商为 Ornitela 和 HQXS, 产品类型均为背包式。

表 A3 追踪器绑定东方白鹳个体信息总表

Table A3 Summary table of Oriental Storks (*Ciconia boyciana*) fitted with solar-powered GPS telemetry devices

编号 Bird ID	体重 Weight (g)	捕捉时间 Capture Time	越冬年份 Year	进入黄河 Arrival in Yellow River	离开黄河 Departure in Yellow River
OS001	4,005	2018/6/11	Winter, 2018	2018/11/8	2019/4/17
OS002	3,950	2016/7/1	Winter, 2016	2016/12/14	2017/5/8
OS003	3,650	2016/7/1	Winter, 2016	2016/11/14	2017/4/22
OS004	3,760	2019/7/2	Winter, 2019	2019/11/13	2020/5/6
OS005	4,875	2019/7/2	Winter, 2019	2019/11/18	2020/3/2
OS006	5,135	2019/6/29	Winter, 2019	2019/11/18	2020/3/8
OS007	4,425	2018/6/18	Winter, 2018	2018/12/6	2019/4/5
OS008	4,690	2019/7/3	Winter, 2019	2019/11/28	2020/3/2
OS009	3,805	2019/6/30	Winter, 2019	2019/11/4	2020/2/10
OS010	3,955	2019/6/29	Winter, 2019	2019/11/1	2020/5/2

王昱熙, 谢彦波, Nyambayar Batbayar, 朱宝光, 董树斌, Anna Barma, Anton Sasin, 曹垒 (2020) 基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对 3 种水鸟栖息地的保护现状. 生物多样性, 28, 1483–1495. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020328>

附录 2 黄河流域内追踪物种停歇信息

Appendix 2 Tracking species stopover information in the Yellow River basin (YRB)

表 A1 黄河流域斑头雁停歇信息表

Table A1 Staging and migration duration of Bar-headed Geese (*Anser indicus*)

种群 Population	季节 Season	年份 Year	编号 Bird ID	黄河流域内时长 Staging in YRB (d)	迁徙时长 Migration duration (d)	时间占比 Percentage	位点数 GPS fixes number
MtoT 蒙古-日喀则	秋季 Autumn	2018	BHG003	34.5	38.9	88.7%	4,983
			BHG005	35.9	46.8	76.7%	5,175
			BHG005	40.8	63.3	64.5%	5,866
	平均值 ± 标准差			37.1 ± 3.3	49.7 ± 12.5	74.6%	
	春季 Spring	2019	BHG005	25.3	62.2	40.7%	3,652
			平均值 ± 标准差			25.3	62.2
总计 Total				136.5	211.2	64.6%	19,676
MtoA 蒙古-印度/ 孟加拉国	秋季 Autumn	2018	BHG001	17.9	70.0	25.6%	2,268
			BHG002	20.1	67.5	29.8%	2,901
			BHG004	24.1	120.3	20.0%	3,493
			BHG006	3.5	70.8	4.9%	531
			BHG002	44.2	73.3	60.3%	6,302
			平均值±标准差			22.0 ± 14.7	80.4 ± 22.4
	春季 Spring	2019	BHG002	0.0	40.7	0.0%	0
			平均值 ± 标准差			0.0	40.7
总计 Total				109.8	442.6	24.8%	15,495

表 A2 白琵鹭迁徙及黄河流域内时长信息表

Table A2 Staging and migration duration of Eurasian Spoonbill (*Platalea leucorodia*)

种群 Population	季节 Season	年份 Year	编号 BirdID	黄河流域内时 长 Staging in YRB (d)	迁徙时长 Migration duration (d)	时间占比 Percentage	位点数 GPS fixes number	
蒙古国-长江 Mongolia-The Yangtze River	秋季 Autumn	2018	ES001	34.8	106.0	32.8%	5,007	
			ES002	37.0	68.0	54.4%	5,324	
			ES003	1.3	78.3	1.6%	177	
			ES004	23.9	83.9	28.5%	3,446	
			ES005	50.2	81.2	61.7%	7,136	
	2019	ES001	2.2	19.0	11.6%	321		
		ES002	22.8	24.2	94.2%	3,248		
		ES003	0.8	5.7	14.8%	92		
	平均值 ± 标准差			21.6 ± 18.7	58.3 ± 36.7	37.1%		
	总计 Total				172.9	466.2	37.1%	24,751
	春季 Spring	2019	ES001	13.7	15.3	90.1%	1,979	
ES002			18.6	22.2	83.9%	2,671		
ES003			0.6	1.7	33.3%	80		
平均值 ± 标准差			11.0 ± 9.3	13.0 ± 10.4	84.1%			
总计 Total				32.9	39.1	84.1%	4,730	
总计 Total				205.8	505.3	40.7%	29,481	

附录 3 黄河流域内 3 种水鸟土地利用补充结果

Appendix 3 Supplementary results of land use of three waterfowl species in the Yellow River basin

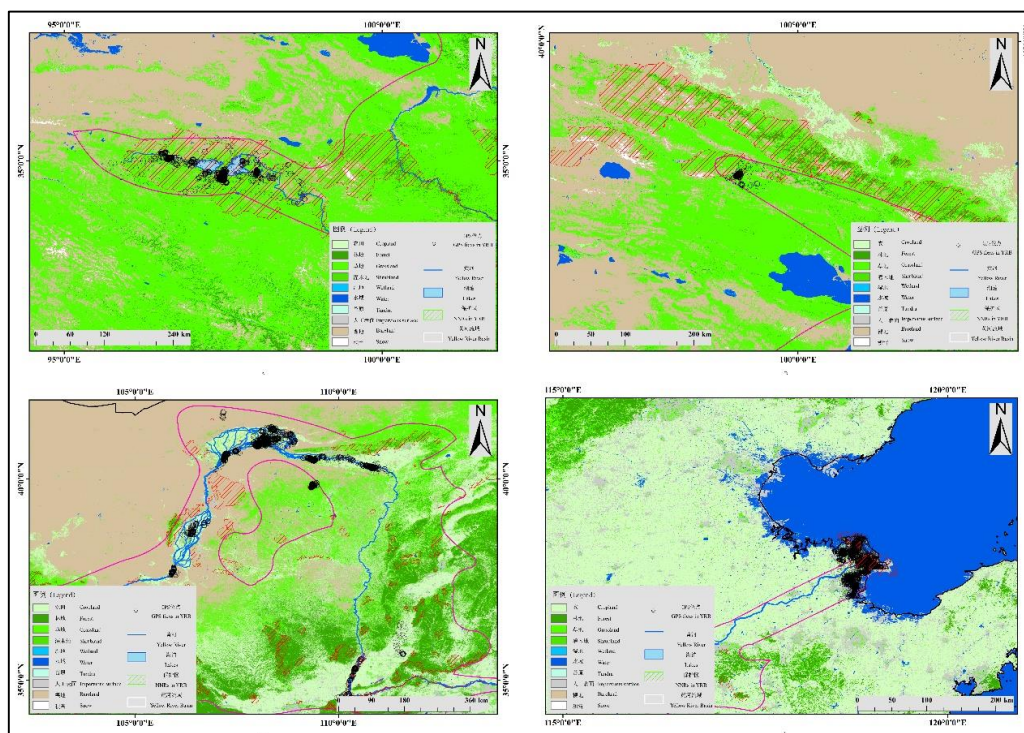


图 A1 三种水鸟在黄河流域内位点的分布情况与土地覆被利用情况。(A) 斑头雁在青海省木里镇区域的位点分布和土地利用情况；(B) 斑头雁在扎陵湖和鄂陵湖区域位点分布和土地利用情况；(C) 白琵鹭在黄河流域位点分布和土地利用情况；(D) 东方白鹳在黄河流域位点分布和土地利用情况。黑圈表示利用位点，蓝线表示黄河，紫线表示黄河流域边界，多彩阴影区表示不同的土地覆被类型（农田、森林、草地、灌木地、湿地、水体、人工地表、裸地、冰雪覆被）。

Fig. A1 Land use of the three waterbirds in Yellow River basin. (A) Points distribution and land use of Bar-headed Goose in Muli, Qinghai province; (B) Points distribution and land use of Bar-headed Goose in Zhaling Lake and Eling Lake; (C) Points distribution and land use of Eurasian Spoonbill in Yellow River Basin; (D) Points distribution and land use of Oriental Stork in Yellow River Basin. The black circle indicates utilization points, the blue line indicates the Yellow River, the purple line indicates the boundary of the Yellow River basin, and the colorful shaded areas indicate different land cover types (cropland, forest, grassland, shrubland, wetland, water, impervious surface, bareland, snow).

王昱熙, 谢彦波, Nyambayar Batbayar, 朱宝光, 董树斌, Anna Barma, Anton Sasin, 曹垒 (2020) 基于卫星追踪探讨黄河流域自然保护区对3种水鸟栖息地的保护现状. 生物多样性, 28, 1483–1495. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020328>

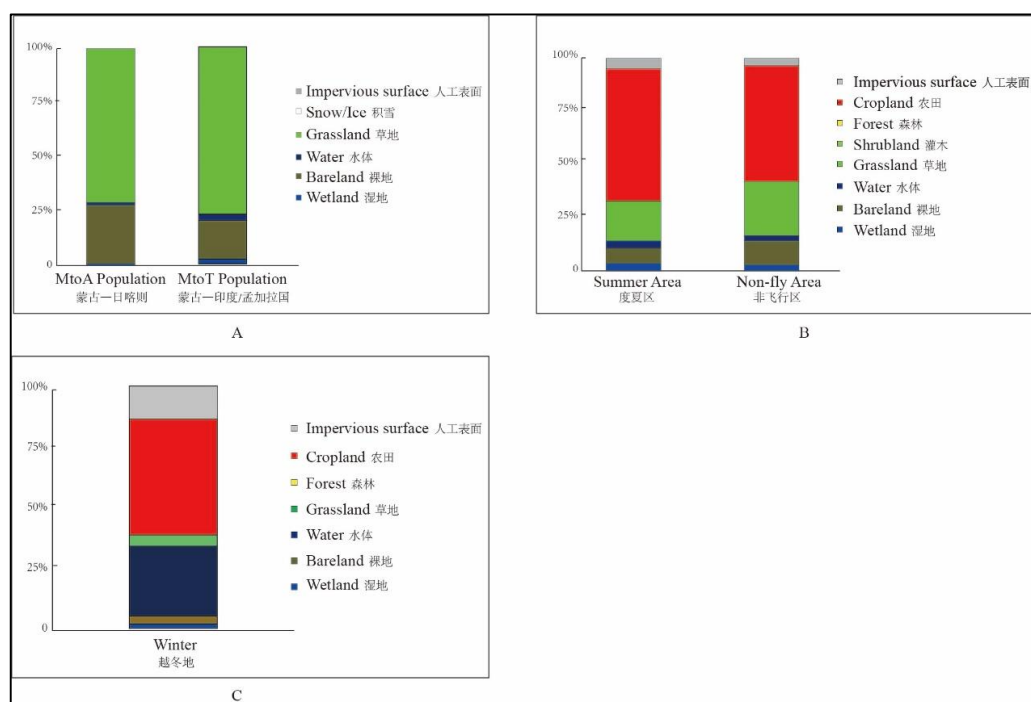


图 A2 三种水鸟在黄河流域内位点密度图中高利用率(红色与橙色)的土地利用情况。(A) 斑头雁两个种群在核心密度区的土地覆被类型; (B) 白琵鹭在核心密度区的土地覆被类型; (C) 东方白鹳在核心密度区的土地覆被类型。

Fig. A2 Land use of the three waterbirds in high utilization rates grids (red & orange grids). (A) The land cover types of the two populations of the Bar-headed Goose in the core density area; (B) The land cover types of the Eurasian Spoonbill in the density area; (C) The land cover types of the two populations of the Oriental Stork in the core density area.



•综述•

黄河流域淡水鱼类多样性和保护

赵亚辉^{1#*} 邢迎春^{2#} 吕彬彬^{3#} 周传江⁴ 杨文波² 赵 凯^{5*}

1 (中国科学院动物研究所, 中国科学院动物进化与系统学重点实验室, 北京 100101)

2 (中国水产科学研究院资源与环境研究中心, 北京 100141)

3 (陕西格林维泽环保技术服务有限公司, 西安 710075)

4 (河南师范大学水产学院, 河南新乡 453007)

5 (中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008)

摘要: 本文介绍了黄河流域鱼类研究的历史、淡水鱼类的物种组成、整体分布格局、特有性、濒危性, 以及鱼类多样性在黄河上、中、下游等的特点。历史上对于黄河鱼类多样性的研究, 历经了四个阶段, 从最初的零星记录一直到现阶段的深入研究。综合历史记录和野外调查, 已知黄河流域分布的淡水鱼类共计147种, 隶属于12目21科78属, 其中鲤形目种类占据绝对优势。另外, 全流域黄河特有种计有27种, 受危物种24种, 分别占总数的18.37%和16.32%。同中国主要江河相比, 黄河鱼类在高级分类阶元上的多样性较高, 但物种多样性则处在较低水平; 尽管黄河特有鱼类和受危物种比例低于全国平均水平, 但上游特有鱼类和珍稀濒危鱼类的占比很高。目前黄河鱼类多样性大幅降低, 现状调查仅能采获历史记录种类的53.06%。梯级水电开发、水资源过度利用、外来物种、水域污染和过度捕捞都是威胁鱼类多样性的重要因素, 但对各河段和支流的影响不一, 应做出有针对性的保护部署。

关键词: 黄河; 可持续发展; 淡水鱼类; 中国特有种; 濒危物种

Species diversity and conservation of freshwater fishes in the Yellow River basin

Yahui Zhao^{1#*}, Yingchun Xing^{2#}, Binbin Lü^{3#}, Chuanjiang Zhou⁴, Wenbo Yang², Kai Zhao^{5*}

1 Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 Research Center for Resources and Environment Protection, Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100141

3 Shaanxi Green Wiser Environmental Protection Technology Co. Ltd., Xi'an 710075

4 College of Fisheries, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007

5 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008

Abstract: This paper firstly reviews the research history on fish taxonomy and species diversity of the Yellow River basin. It includes four stages from the beginning of a few records on fish distributed in the river to now with deep studies covering biodiversity, zoogeography, phylogeny, and conservation. Based on the research literatures, museum database and records, and our own field surveys in the past 15 years throughout the entire basin, we discuss the species richness, distribution pattern, endemism, and threatened species of the freshwater fishes in the Yellow River basin. A total of 147 species, belonging to 78 genera, 21 families, and 12 orders, are distributed in the Yellow River. Among them, fishes from the order Cypriniformes are dominant. There are 27 endemic species to the river and 24 threatened species, accounting for 18.37% and 16.32% of the total number of freshwater fish species of the river, respectively. Moreover, species diversity varied among the upper, middle, and lower reaches of the Yellow River. Comparing to other major rivers in China, the species richness is at a lower level although the diversity at higher taxon levels is relatively high. Proportions of endemic and threatened species of the Yellow River are lower than the average level of the

收稿日期: 2020-07-07; 接受日期: 2020-08-15

基金项目: 生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)、中国生物多样性监测与研究网络-内陆水体鱼类多样性监测专项网、青海省自然科学基金项目(2020-ZJ-912)

共同第一作者 Co-first authors

*共同通讯作者 Co-author for correspondence. E-mail: zhaoyh@ioz.ac.cn; zhaokai@nwipb.cas.cn

entire nation. However, the upper reach has large proportions of both endemic and threatened species, which should be drawn more attention for future conservation. At present, the species diversity of freshwater fish is rapidly decreasing. Our thorough field investigations may collect only 53.06% of the total species. Cascade hydropower development, over-exploitation of water resources, invasive species, water pollution, and overfishing are major threats to the fish species of the Yellow River. The main stream and tributaries may face different threat that need targeted strategies for the conservation of freshwater fishes in the future.

Key words: Yellow River; sustainable development; freshwater fishes; endemic species; threatened species

黄河是少数跨越我国三大地形阶梯的河流,为中国第二长河。作为中华文明的发源地之一,从古至今,黄河在中国经济社会发展和生态安全方面均具有十分重要的地位。黄河流域生态保护和高质量发展已经上升为重大国家战略,鱼类作为水生生态系统的重要组成部分,在过去很长一段时期里受到人类经济社会发展的影响而发生了较大变化,因此从流域层面对黄河鱼类多样性组成进行系统总结和回顾,可为未来进行更有针对性的保护和恢复提供科学依据。

1 黄河流域的水系概况和发育历史

黄河发源于青海省曲麻莱县麻多乡郭洋村巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,流经鄂尔多斯高原、黄土高原和黄淮海平原,最后注入渤海(尤联元和杨景春, 2013; 蔡建元, 2017)。黄河干流河道全长 5,464 km, 流域面积 79.47 万 km² (陆孝平和富曾慈, 2010)。由于黄河每年夹带大量泥沙进入河口地区,河道长度和流域面积也在不断扩大, 2010–2012 年第一次全国水利普查(标准时点 2011 年 12 月 31 日)结果显示,黄河干流全长为 5,687 km, 流域面积为 81.31 万 km²。黄河流域总流域面积超过 50 万 km² 的河流共计 4,157 条, 包括山地河流 4,013 条, 平原河流 114 条; 其中流域面积大于 10,000 km² 的支流共有 16 条(蔡建元, 2017)。

根据水沙特性、地形和地质条件,黄河干流分为上、中、下游。上游从河源到内蒙古自治区托克托县河口村,河道长 3,471.6 km; 其中黄河干流青海省玛多县以上属河源段。中游从托克托县河口村至河南省郑州附近的桃花峪,河道长 1,206 km, 其中河口村至禹门口为峡谷河段,两岸支流众多。下游自桃花峪至河口,河道长 786.6 km, 其中利津以下为黄河河口段(陆孝平和富曾慈, 2010)。流域内较重要的一级支流包括洮河、湟水—大通河、祖厉河、

清水河、乌加河、大黑河、无定河、汾河、渭河、洛河、沁河等。主要的湖泊有鄂陵湖、扎陵湖、乌梁素海、盐池、红碱淖、沙湖、岗纳格玛错、阿涌贡玛、星海湖、尕斯库勒湖等(蔡建元, 2017)。这些复杂的干支流形态和生境的多样性,奠定了黄河鱼类多样性的发育基础。

黄河流域地势差别很大,自西向东逐渐降低。第一阶梯为青藏高原,海拔在 4,000 m 以上,北部祁连山是与内蒙古高原的分界;第二阶梯大致以太行山为东界,海拔为 1,000–2,000 m;第三阶梯由太行山系以东至滨海,东部海拔一般在 500 m 以下(王文杰等, 2017)。黄河总落差 4,448 m, 河源区大部流行于青藏高原面上,河道迂回曲折、河水清浅、多湖泊沼泽,随后切过祁连山向东的余脉,形成峡谷和川地相间分布的形式,水流湍急,水头总落差达 1,300 m 以上(吕拉昌和李文翎, 2012); 河源区比降为 1.2‰, 多石峡以下至托克托县的黄河上游区的比降为 1.5‰ (许炯心等, 2013)。因此,黄河上游蕴藏了大量水能资源,是中国 13 个大型水电基地之一(蒋立哲和王慧芳, 2011)。中游上段由北向南穿行于晋陕峡谷之中,河长虽然只有 725 km,水头落差却达到 607 m; 随后河水冲出禹门口,进入汾渭盆地,接纳了汾、泾、渭、洛等支流,水量大增且夹带大量泥沙,河道很不稳定,主流摆动频繁。中游两岸大部分为黄土高原,是黄河泥沙的主要来源地(许炯心等, 2013)。下游穿行于黄淮海平原,总落差约为 93 m, 平均约为 0.12‰, 河道高悬于地面之上,洪水威胁较大(王文杰等, 2017)。

黄河流域的地貌格局奠定于燕山运动,流域西高东低的地貌轮廓产生于喜马拉雅运动第二幕(许炯心等, 2013)。古黄河形成的时间不晚于上新世初期,当时各内陆水系相互串联贯通,东流入海(李荣全, 1988)。上新世末至早更新世初期,受青藏高原隆起的影响,古黄河中游被湖泊分割,原贯通入海

的古黄河消失。现今黄河是第四纪古湖消亡之后在古黄河故道基础上再次出现的河流(李荣全, 1993)。研究显示, 黄河完全切穿三门峡古湖, 贯通东流入海的时间大约为15万年前(王苏民等, 2001)。而黄河河口则随着黄河大规模南北迁移摆动而变迁, 在渤海湾和苏北海岸都形成了不同规模的三角洲, 中全新世以后, 海平面不断下降, 海岸线逐渐退到现在的位置(张兰生等, 2012)。全新世期间, 黄河除9.6–8.5 ka BP和1,128–1,855 AD两度从苏北流入黄海之外, 其余时间均流向东北入渤海(张兰生等, 2012)。黄河这样的发育历史也深刻影响了黄河鱼类多样性的形成。例如河套地区鱼类组成与汾渭平原有很大差异, 就与黄河发育的不同阶段有关(李思忠, 1981)。

2 黄河鱼类多样性的研究简史

2.1 国外博物学家考察记录阶段(1874–1931)

1874年, 法国鱼类学家Sauvage Henri Émile和Dabry de Thiersant描述了采自山西的细尾条鳅(*Nemachilus bipartitus*, 现归并为北方泥鳅*Misgurnus mohoity*) (Sauvage & Dabry de Thiersant, 1874), 揭开了以现代科学方法研究黄河鱼类的序幕。随后一批西方博物学家先后报道了黄河上游(Herzenstein, 1888; Günther, 1898)、中游(Pappenheim, 1908; Nichols, 1925, 1926)、下游(Mori, 1928, 1929; Fowler, 1931)的鱼类。这一阶段的特点是研究比较零散, 以描述鱼类新物种及物种记录为主, 且全部是由国外科学家完成的。

2.2 中国学者研究的初始阶段(1932–1958)

20世纪30年代, 一批受西方现代科学训练的学者陆续回国, 对中国鱼类开始进行调查和研究。以张春霖1932年发表的*A New Fish From Kaifeng*为标志(Tchang, 1932a), 黄河鱼类研究开始进入了以中国学者为主导的时代。同年张春霖还报道了采自开封的鱼类约25种(Tchang, 1932b)。1933年, 张春霖在《中国鲤类志》中进一步记载黄河流域(中、下游)鱼类约40种(Tchang, 1933)。傅桐生和张春霖在1933年记录开封鱼类8科25属30种(Fu & Tchang, 1933)。傅桐生1934年记录河南辉县产鱼类约38种(Fu, 1934)。方炳文1935年报道了产于西宁的巴氏条鳅(*Nemachilus pappenheimi*, 现为黄河高原鳅*Triplophysa pappenheimi*) (Fang, 1935)。日本学者森

为三同期在黄河中、下游一带也做了大量调查工作(Mori, 1936)。然而随着抗日战争全面爆发, 调查研究工作也陷于停滞, 只有一些零星报道, 其中张春霖1941年记录河南境内黄河鱼类约54种(Tchang, 1941)。受当时研究状况和交通条件限制, 上述这些调查研究工作主要集中于黄河中、下游地区, 对于上、中游的一些重要河流(如渭河等)基本都没有覆盖。中华人民共和国成立以后, 王香亭等(1956)对兰州附近分布的包括黄河高原鳅(*Triplophysa pappenheimi*)、黄河裸裂尻鱼(*Schizopygopsis pylzovi*)等在约18种鱼类进行了详细记录。

这一阶段对于黄河流域鱼类的研究仍以分类描述和物种记录为主, 研究区域主要集中于黄河中、下游地区, 尽管收集的信息较之前已有很大进步, 但尚不成系统, 还未从流域的角度进行整合。

2.3 系统研究阶段(1959–1986)

20世纪50年代, 中国科学院动物研究所对黄河干流及其附属水体进行了渔业生物学基础调查, 完成了《黄河渔业生物学基础初步调查报告》(中国科学院动物研究所鱼类组与无脊椎动物组, 1959), 标志着黄河鱼类研究进入了全流域大尺度阶段。之后中国科学院动物研究所李思忠发表了《黄河鱼类区系探讨》(李思忠, 1965), 文中全面记载鱼类14目27科96属153种, 同时还首次从动物地理的角度探讨了黄河鱼类区系的组成。1981–1983年, 原国家水产总局组织了“黄河水系渔业资源调查”, 在调查结果的基础上出版了《黄河水系渔业资源》一书, 书中记录了鱼类191种或亚种, 隶属于15目32科116属(何志辉和谢祚浑, 1986)。

除全流域研究外, 对于一些重要支流也有调查。例如山西师范学院生物系(1960)发表了《汾河渔业生物学基础调查》; 黄洪富等(1965)在《渭河中段鱼类调查研究》中记载了38种(亚种)鱼类; 宋世良和王香亭(1983)对渭河上游鱼类进行了调查, 报道鱼类23种。此外, 一些区域性鱼类调查也覆盖了黄河流域相关地区。例如曹文宣和邓中麟(1962)、曹文宣和伍献文(1962)对四川西部鱼类的研究过程中, 记述了黄河上游分布的一批裂腹鱼亚科和高原鳅属(*Triplophysa*)的种类; 赵肯堂(1963)报道了内蒙古呼和浩特鱼类15种; 武云飞和陈瑗(1979)记录青海省果洛和玉树地区(包括上游的扎陵湖和鄂陵湖)鱼类28种, 含3新种和1新亚种; 1979–1980年, 甘肃

省农业科学院水产研究所对黄河玛曲段鱼类资源进行了初步调查(刘阳光, 1981); 1980–1983年, 内蒙古自治区水产研究所和南开大学生物系对乌梁素海、哈素海及黄河干流内蒙古段进行了渔业资源综合调查(旭日干, 2013)。

本阶段对于黄河流域鱼类的研究已经站到了流域层面, 从黄河上游到河口对全流域的鱼类多样性进行了系统总结, 使得我们第一次对黄河流域的鱼类区系组成有了一个全面的认识。

2.4 扩展研究阶段(1987年至今)

这一阶段的研究工作, 以1987年出版的《秦岭鱼类志》(陕西省动物研究所等, 1987)和1989年出版的《青海经济动物志: 鱼纲》(武云飞和吴翠珍, 1989)为标志, 逐渐辐射和扩展到流域内的各行政省区和重要地理区, 认识范围和深度进一步扩大。《秦岭鱼类志》围绕中国重要的南北分界线秦岭, 对其鱼类多样性及分布进行了详细探讨, 书中记述了黄河流域鱼类99种和亚种, 同时还和相邻的长江水系进行了对比, 成为重要地理区鱼类多样性研究的代表。而《青海经济动物志: 鱼纲》则是青海第一部系统性的鱼类志。这些著作对各行政区划内黄河流域鱼类进行了分类订正和详细记录, 为现今研究流域鱼类多样性变化提供了重要的历史本底记录。后来又相继有《四川鱼类志》(丁瑞华, 1994)、《山东鱼类志》(成庆泰和周才武, 1997)、《内蒙古动物志: 圆口纲、鱼纲》(旭日干, 2013)、《黄河流域鱼类图志》(蔡文仙等, 2013)、《黄河鱼类志》(李思忠, 2015)、《黄河陕西段渔业资源评价》(王丰和沈红保, 2020)等著作出版, 这些都成为研究黄河鱼类的重要参考资料。

近年来应用生物多样性、群落结构和生物完整性等方法对黄河鱼类进行多样性分析的工作也不断涌现, 从黄河上游(李柯懋等, 2012; 申志新等, 2014)、中游(王益昌等, 2017; 林鹏程等, 2019a; 沈红保等, 2019)、下游(杨柏贺等, 2019)到黄河口(王娇等, 2018)的不同河段的鱼类多样性基本都有涵盖。另外从遗传多样性的角度探讨不同种类种群分化、物种演化和动物地理(Duan et al, 2009; 张艳萍等, 2013), 使得对黄河鱼类多样性的研究走向纵深。

黄河鱼类多样性的研究经历了从“认识–了解–总结–深入”的阶段, 同时针对黄河流域人类社会经济发展对于鱼类资源的影响也有一定程度的探讨

(唐文家等, 2006; 李芳等, 2008; 权全等, 2018; 王丰, 2020)。但如果从全国层面来看, 与长江和珠江流域鱼类研究相比, 目前对于黄河流域鱼类多样性的认识在广度和深度上还有明显不足。面对黄河流域生态保护和高质量发展的要求, 还有大量的基础工作需要完成。

3 黄河鱼类的多样性

3.1 鱼类多样性组成

综合历史标本采集记录、已发表的各类文献, 以及作者多年在黄河流域开展调查工作的结果, 对黄河流域自然分布的鱼类进行统计, 并对同物异名等分类学问题进行了订正后, 对黄河流域自然分布的鱼类进行统计, 并对同物异名等分类学问题进行了订正。涵盖的物种包括纯淡水生活的种类, 以及江海洄游鱼类。广盐性适应的河口鱼类不计入, 有些古籍中或引述他人研究而未有明确标本记录的物种亦未计入。

总结得出: 黄河(含干流、支流及附属湖泊)共有土著鱼类147种, 隶属于12目21科78属。在目级组成上, 鲤形目鱼类共有115种, 占到鱼类总种数的78%, 远远多于其他目; 鲇形目鱼类11种, 占总数的8%; 鲈形目排在第三位, 但也只有8种鱼类, 占总数的5%; 其余各目的种类均不足4种, 有7个目分别只有1种鱼类(图1)。

在科级水平上, 鲤形目鲤科和条鳅科的鱼类最多, 其中鲤科计有86种, 占黄河鱼类总种数的58.5%, 条鳅科20种, 占总种数的13.6%; 鲇形目的鲿科位居第三, 共有9种, 占总种数的6.1%; 其余各科鱼类数量均不足3种(图2)。鲤形目和鲤科鱼类是黄河鱼类区系组成中最重要的组分, 这与中国整体上的淡水鱼类区系组成特点相吻合(张春光和赵亚辉, 2016)。黄河鱼类在目级和科级水平表现出较高的多样性, 在中国内陆水体分布的土著鱼类共有17目, 黄河拥有其中12目, 占比为70.6%; 而在中国淡水鱼类的47个科中, 黄河有21科, 也占到了总数的44.7%。

此外, 在中国鲤科鱼类的12个亚科中, 黄河流域拥有其中的11个, 只有适合暖水性生活的野鲮亚科鱼类在黄河没有分布记录, 因此在鲤科亚科层级上的多样性也是比较高的。在这些亚科中, 鮡亚科

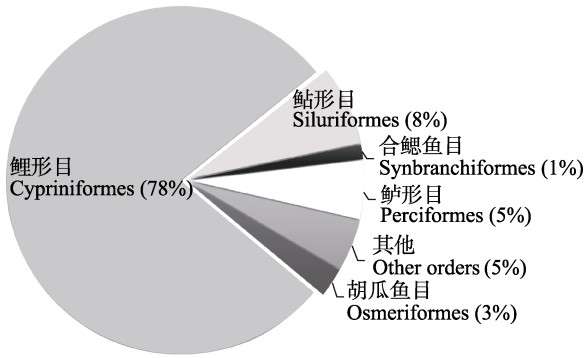


图1 黄河流域淡水鱼类目级组成。其他目包括鲟形目、鲑形目、鳗鲡目、鲱形目、颌针鱼目、刺鱼目、鲇形目。

Fig. 1 Freshwater-fish composition of the Yellow River in order level. Other orders include Acipenseriformes, Salmoniformes, Anguilliformes, Clupeiformes, Beloniformes, Gasterosteiformes, and Scorpaeniformes.

鱼类的占比最高, 计有30种, 占到黄河鲤科鱼类总种数的34.8%; 其次为雅罗鱼亚科和鲃亚科, 各有7种, 分别占鲤科鱼类总种数的8.1% (图3)。

然而从物种数量上分析, 黄河分布的鱼类只占到中国淡水鱼类总种数的8.9%, 在中国七大主要水系中只能排在第三位, 远低于珠江和长江鱼类的数量(表1)。秦岭-淮河是中国南北分界线, 黄河在北方的各主要水系中, 鱼类物种多样性是最高的(表1)。然而如果考虑到流域面积的大小, 则呈现出不同的多样性格局。单位流域面积分布(万km²)的物种数量以珠江为最高, 达到11.06种, 而黄河则只有1.95种, 在中国七大江河中排在倒数第二位, 仅略高于黑龙江的1.46种(表1)。

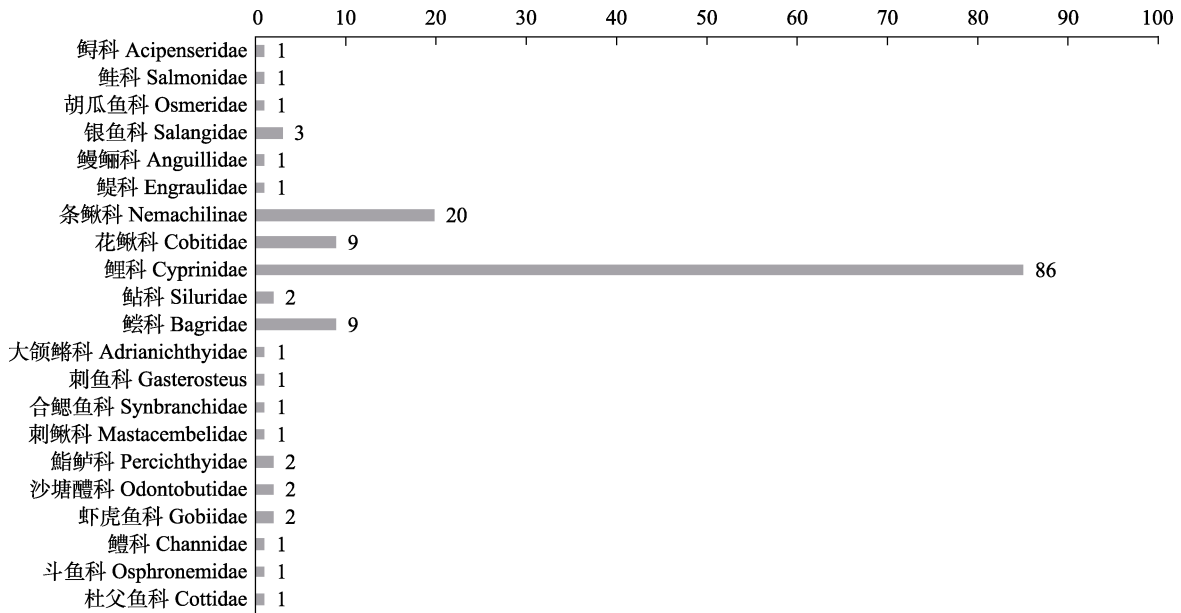


图2 黄河流域淡水鱼类科级组成

Fig. 2 Freshwater-fish composition of the Yellow River at family level

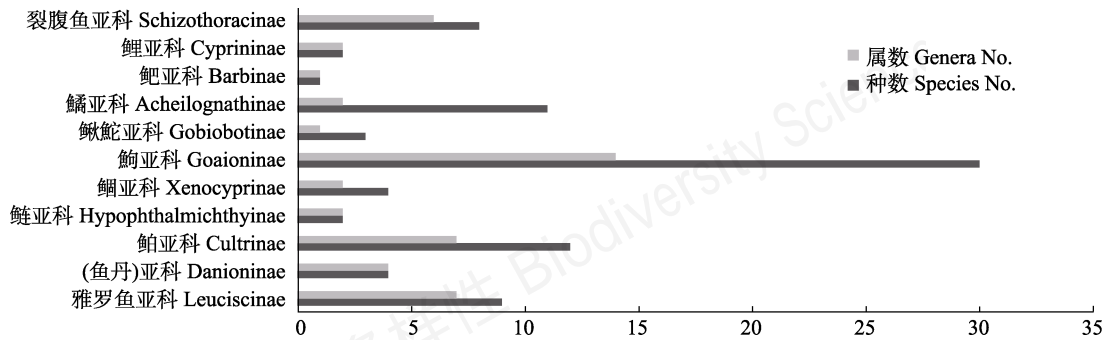


图3 黄河流域鲤科鱼类的亚科组成

Fig. 3 Cyprinid fish composition of the Yellow River at subfamily level

表1 中国七大江河水系鱼类物种数量比较

Table 1 Comparison of species richness among seven major river basins in China

水系 River basins	种数 Species no.	干流长度 River length (km)	流域面积 Basin area ($\times 10^4$ km ²)	单位流域面积 物种数 Species no. /10,000 km ²
黑龙江 Heilongjiang River	132	1,899	90.24	1.46
辽河 Liaohe River	82	1,345	22.11	3.71
海河 Haihe River	83	1,090	26.55	3.13
黄河 Yellow River	147	5,463.6	75.24	1.95
淮河 Huaihe River	113	1,000	19.12	5.91
长江 Yangtze River	405	6,300	180	2.25
珠江 Pearl River	489	2,214	44.2	11.06

黑龙江、淮河、长江和珠江的鱼类数据来自于He等(2020), 辽河和海河的鱼类数据来自于Xing等(2016); 干流长度和流域面积数据来自于陆孝平和富曾慈(2010)。Fish data of the Heilongjiang, Huaihe, Yangtze, and Pearl rivers were from He et al, 2020; fish data of the Liaohe and Haihe Rivers were from Xing et al, 2016. Data of river length and basin area were from Lu & Fu (2010).

3.2 特有种、珍稀濒危物种

黄河分布有中国特有鱼类69种, 占流域物种总数的46.9%; 其中黄河特有种只有27种, 占黄河鱼类总数的18.4%。而珠江和长江的流域特有种数量

分别占到流域淡水鱼类总数的48.3%和42.7% (He et al, 2020)。在黄河流域分布的特有种中, 有些物种分布区范围极其狭窄, 例如邵阳高原鳅(*Triplophysa heyangensis*), 目前仅知分布于陕西合阳县一条流入黄河的支流中(朱松泉, 1992)。因此这些物种的栖居环境一旦受到人为活动的扰动, 极易造成种群衰竭而濒危。

根据2016年《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016), 共有143种黄河鱼类被评估(表2), 其中评估为极危(CR)的有4种, 濒危(EN)的10种, 易危(Vulnerable, VU)的10种, 属于受威胁等级的物种合计有24种, 占到所有鱼类总种数的16.3%; 低于20.4%的全国平均水平(曹亮等, 2016)。而评价为近危(NT)和无危(LC)的分别有5种和94种, 两者合计占到评估鱼类总数的69.2%。数据缺乏(DD)的有20种, 占到评估总数的14.0% (蒋志刚等, 2016; 曹亮等, 2016)。

在受威胁鱼类中属于黄河特有种的有11种, 占到受威胁鱼类总种数的45.8%; 而在黄河特有鱼类中, 目前被评估为受威胁物种的占比则为40.7%, 也就是说无论从哪个角度看, 黄河鱼类中既是黄河特有种又同时受到严重威胁的物种比例是非常高的。

表2 黄河流域濒危鱼类组成

Table 2 Composition of threatened fishes in the Yellow River basin

	极危 CR	濒危 EN	易危 VU	近危 NT	无危 LC	数据缺乏 DD	未评估 Unevaluated
上游 Upper reach	2	6	8	2	19	5	0
中游 Middle reach	1	4	5	4	72	11	3
下游 Lower reach	2	3	1	1	78	13	2
全流域 River basin	4	10	10	5	94	20	4

表3 黄河上、中、下游鱼类物种丰富度比较

Table 3 Comparison of species richness among the upper, middle and lower reaches of the Yellow River

	目 Order	科 Family	鲤科中的亚科数量 Subfamily in Cyprinidae	物种 Species	干流河道长度 River length (km)	流域面积 River basin (10,000 km ²)	物种数量/1,000 km 河长 No. of species/per 1,000 km river length	物种数量/10,000 km ² 流域面积 No. of species/10,000 km ² river basin
上游 Upper reach	3	4	5	44	3,471.6	42.82	12.67	1.03
中游 Middle reach	8	14	11	100	1,206	34.38	82.92	2.91
下游 Lower reach	11	20	10	101	786.6	2.27	128.40	44.49
全流域 River basin	12	21	11	147	5,464	79.47	26.90	1.85

3.3 黄河上、中、下游鱼类多样性的差异

黄河上、中、下游在鱼类多样性、特有种、受威胁物种的组成上也显示出不同的特点。从物种数量上分析,上、中、下游物种数量分别为44种、100种和101种(表3),各占鱼类总数的29.9%、68.0%和68.7%。

尽管黄河上游流域面积超过整个流域的一半,达到了全流域面积的53.9% (陆孝平和富曾慈, 2010),然而从鱼类物种丰富度上看,上游鱼类数量最少,且物种组成也相对简单,只有3个目(表3),即鲤形目、鲇形目和刺鱼目。其中刺鱼目只有一种,即中华多刺鱼(*Pungitius sinensis*),主要分布在上游下段的河套地区,大致从临河到托克托河段,以及乌梁素海、哈素海等(旭日干, 2013);而鲇形目物种数量亦很少,只有3种。故在黄河上游分布的鱼类主要集中在鲤形目的少数类群中,例如条鳅科高原鳅属有15种,鲤科裂腹鱼亚科有7种,这两个类群的鱼类就占到了上游鱼类总数的一半,体现了典型的青藏高原鱼类区系的特点。因此从物种丰富度和物种组成上看,黄河上游鱼类在高级分类阶元和物种层级上,均呈现出单调的多样性特征。

相反,黄河中游和下游则表现出相对较高的多样性。黄河中游的100种鱼类来自于8目14科,而下游的101种鱼类则来自于11目20科(表3)。如果考虑到河流长度和流域面积,则这种现象更为明显(表3)。中游虽然河道长度只有上游的大约1/3,但是两岸支流众多,特别是渭河,是黄河最大的支流,干流全长830 km,流域面积达到了13.48万km²,占到黄河中游整个流域面积的39.21% (陆孝平和富曾慈, 2010)。渭河很多支流发源于秦岭北麓,生境多样,因此也孕育了不少特有种,其中仅渭河流域陕西段就记载有鱼类47种(沈红保等, 2019)。其他像汾河(河流长度693.8 km)、无定河(491.2 km)、沁河(485.1 km)等都是汇入黄河中游(陆孝平和富曾慈, 2010)。中游包括很多大型支流,且生境较上游更加多样化,是黄河中游鱼类多样性较高的主要原因。现代黄河下游河道基本上限制在防洪大堤或大堤与山脚之间,流域面积2.27万km² (陆孝平和富曾慈, 2010),因此下游单位面积内的鱼类物种数量远远大于上游和中游(表3)。历史上黄河下游不断摆动,特别是发生了多次“夺淮入海”,在黄河26次改道中,有15次影响到淮河(许炯心等, 2013),因此使得整个华北

平原的鱼类区系在各河系之间产生了充分交融,这也是黄河下游鱼类多样性较高的一个重要原因。

黄河上、中、下游在鱼类特有性和受威胁物种方面也存在显著区别,但恰恰与物种丰富度呈现相反的格局。上游分布有黄河特有鱼类17种(表4),主要集中在鲤形目条鳅科的高原鳅属(6种)和鲤形目鲤科的裂腹鱼亚科(4种)等,占到上游鱼类种数的38.6% (表4),亦即大约每5种上游鱼类中,就有2种为黄河特有。此外,在这17种黄河特有鱼类中,只见于黄河上游的就有10种,包括黄河高原鳅、黄河雅罗鱼(*Leuciscus chuanchicus*)、骨唇黄河鱼(*Chuanchia labiosa*)等,占到了全流域特有鱼类总数的37.0%。中游分布有黄河特有鱼类16种,占中游所有鱼类的16.0% (表4);其中只在中游分布的有6种,占流域特有鱼类的22.2%。黄河上游和中游基本穿行于中国地势上的第一和第二阶梯,自然环境与下游相差较大,微生境更加多样,是造成上、中游特有种较多的原因之一。加之现代黄河形成比较晚近,上、中游和下游在较长时间内处于相对隔绝的格局,这是上、中游特有种较多的另外一个主要原因。故只见于上、中游而不见于下游的黄河特有鱼类合计就有21种,占全部特有鱼类的77.78%。特有鱼类这一分布特点,在未来进行全流域保护规划时应该特别引起注意。

黄河上游分布有16种受威胁物种,占到上游物种总数的36.4%;而中游和下游则分别有10种和6种受威胁物种,占比分别为10.0%和5.9%,均低于流域平均水平(表4)。值得注意的是,在上游的这些受威胁物种中,有8种是黄河上游特有的,占到上游受威胁物种的一半。从另一角度看,在11种黄河上游特有鱼类中,有72.7%的种类属于受威胁物种,其中极危(CR) 1种,濒危(EN) 5种,易危(VU) 2种。因此黄河上游表现出了高特有性和高濒危性的鱼类多样性特点,这也是黄河流域生态大保护需要着重考虑的。

黄河上、中、下游鱼类在物种组成、特有性、濒危性,以及鱼类多样性现状特点总结如表5。

3.4 黄河鱼类区系的形成

现代黄河鱼类区系的形成,大体肇始于中新世,这时鲃属(*Barbus*)、鲤属(*Cyprinus*)、雅罗鱼属(*Leuciscus*)等都已广泛分布于亚洲北部到欧洲之间(李思忠, 2015)。至上新世时,古黄河形成,此时的

表4 黄河上、中、下游鱼类特有种和受威胁物种比较

Table 4 Comparison of endemic and threatened fish species among the upper, middle and lower reaches of the Yellow River

	黄河特有鱼类 Endemic species	黄河特有鱼类百分比 Percentage of endemic species (%)	受威胁物种 Threatened species	受威胁物种百分比 % of threatened species
上游 Upper reach	17	38.6	16	36.4
中游 Middle reach	16	16.0	10	10.0
下游 Lower reach	5	5.0	6	5.9
全流域 River basin	27	18.4	24	16.3

表5 黄河上、中、下游鱼类多样性特点

Table 5 Characters of fish diversity among the upper, middle and lower reaches of the Yellow River

	鱼类物种组成 Species composition	黄河特有鱼类占比 Proportion of endemic species to the Yellow River	受威胁物种占比 Proportion of threatened species	鱼类多样性现状 Current status of fish diversity
上游 Upper reach	单调 Simple	高 High	高 High	一般 Average
中游 Middle reach	丰富 Rich	较低 Relatively low	较低 Relatively low	较差 Relatively poor
下游 Lower reach	丰富 Rich	低 Low	低 Low	差 Poor

鱼类区系已经接近现代的样貌,特别是在江河平原区,很多都是现生属的种类。第四纪以来,现黄河中游地区青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)已很普遍(李思忠, 2015),这与当时黄河中游被湖泊分割,存在大水体有关。现代黄河重新贯通后,下游摆动剧烈,因此还吸纳了邻近河流和黄淮平原的一些种类,最终形成现今的黄河鱼类区系格局。

在生物地理区划上,黄河流域全部位于古北区,但是却跨越了多个亚区或小区。黄河上游和中、下游由于在地质历史上的差异,其鱼类区系实际也有各自的形成过程。黄河上游特别是河源区,基本位于青藏高原夷平面上,鱼类以裂腹鱼亚科和高原鳅属的种类为主,这是伴随着上新世青藏高原的急剧抬升而逐渐演化形成的。例如由原始鲃亚科特化而成的裂腹鱼类向高原四周辐射,并在黄河上游形成一些特有属、种,如黄河鱼属(*Chuanchia*)、扁咽齿鱼属(*Platypharodon*),以及花斑裸鲤(*Gymnocypris eckloni eckloni*)等。然而当古黄河贯通时,上游区地势已抬升至相当高度,河道落差大,因此黄河东部的江河平原鱼类如鲃亚科、鲴亚科和鲢亚科等的种类都未能进一步分布到河套地区(李思忠, 1981, 2015),造成了现今黄河上游和中、下游地区在鱼类区系组成上的差异。

4 黄河鱼类现状

本文部分作者自2007年以来对黄河流域干流及主要支流等的调查显示,目前黄河鱼类的多样性衰退比较明显。多年调查中尚可以采集到的土著鱼类约78种,只占到全流域的53.1%,有几乎一半的种类完全或部分从黄河流域主要水体消失。例如日本学者森为三1928年曾在黄河下游采集到2尾达氏鲟(*Acipenser dabryanus*)标本,体长2,400–2,700 mm,应为成熟个体(李思忠, 2015),之后20世纪60年代有采自烟台的标本,但再无黄河的记录(李思忠, 1987)。李思忠(1965, 1987, 2015)曾根据古文献记录,认为黄河亦应分布有中华鲟(*Acipenser sinensis*)、鳊(*Huso dauricus*)和白鲟(*Psephurus gladius*)等,由于没有确实的标本记录,本文暂不将这些鱼类计入。但仍可看出,黄河流域在历史上可能是这些鱼类的边缘分布区,由于气候变化等因素使得这些鱼类不见于现代黄河。然而鱼类多样性丧失的绝大部分发生于近几十年,且普遍发生于黄河的上、中、下游以及干、支流。

2008年,对黄河干流(上、中、下游及河口)的调查只发现49种淡水鱼类(茹辉军等, 2010)。2009–2013年间对黄河龙羊峡以上干流及附属湖泊(扎陵湖、鄂陵湖等)进行的调查显示,只有10种上游土著鱼类可以被采集到(申志新等, 2014)。而龙羊峡

到刘家峡黄河干流,历史上至少分布有刺鮡(*Acanthogobio guentheri*)、厚唇裸重唇鱼(*Gymnodiptychus pachycheilus*)、极边扁咽齿鱼(*Platypharodon extremus*)、骨唇黄河鱼、黄河裸裂尻鱼、花斑裸鲤(*Gymnocypris eckloni eckloni*)和似鲇高原鳅(*Triplophysa siluroides*)等7种珍稀或特有鱼类。根据近年的调查,其中厚唇裸重唇鱼、极边扁咽齿鱼、骨唇黄河鱼已经基本退出这一河段,其分布区进一步向上游退缩。在黄河中游,2010–2012年在山西段调查发现42种土著鱼类(赵瑞亮等,2014)。2013–2014年对干流陕西段的调查也得出相似的结果,去除引入种后,共采集到鱼类45种(王丰和沈红保,2020),只占中游鱼类的45.45%,其中鲢、鳙等极可能是人工增殖放流的结果。黄河下游干流段的情况同样不乐观,2013年对下游9个断面的调查只发现了27种鱼类,占下游鱼类总数的26.73%(刘洪波和菅浩然,2019)。通过对黄河干流指示性鱼类种群完整度的分析,黄河上游指示鱼类完整度指数为0.43,中游段为0.29,下游为0.11,全流域平均为0.28,处于0.21–0.40之间,可以看出黄河鱼类种群整体处于严重缺失状态(待发表数据)。

黄河支流也存在类似现象。例如2016–2017年对渭河的调查显示,相较于20世纪80年代调查结果,鱼类物种数量减少36种,相似度仅为0.49,为中等不相似,且物种组成的变化也十分明显(沈红保等,2019)。2016年在下游最大支流大汶河的调查只发现鱼类18种,综合其他因子评价,大汶河流域水生态系统健康状况整体处于较差和极差状态(温家华等,2018)。整体上看,无论黄河干流还是主要支流,鱼类多样性都处于严重衰退当中。

5 黄河鱼类多样性面临的威胁

5.1 水电开发

1979年全国水力资源普查结果显示,黄河流域水力资源理论蕴藏量4,054.8万kW,年平均发电量3,552亿kW·h,占全国水力资源理论蕴藏量59,221.8亿kW·h的6%。73.3%的水力资源分布在黄河干流上,其中集中分布在上游的玛曲至青铜峡和下游的河口村至花园口两个河段,分别占干流的53.9%和32.1%。支流水力资源蕴藏量主要集中在3条主要支流洮河、湟水和渭河,这3条支流均在黄河中上游(<http://www.yrcc.gov.cn/hhyl/hhgg/qh/slzy/201108/t2>

0110814_103524.html)。在黄河中上游,对于鱼类多样性产生的最大威胁来自于水力开发。黄河上游以龙羊峡为界,龙羊峡(不含)以上按13级开发,梯级电站总装机容量约792万kW;龙羊峡至青铜峡河段布置了25个梯级电站,总装机容量约1,700万kW(安盛勋,2004)。中游以禹门口为界,上段的黄河北干流将进行至少6级开发,禹门口以下的河段目前已修建了三门峡和小浪底水利枢纽(丁双跃和郑卫国,2002)。

黄河流域共有大、中型水库219座,其中大型水库34座(水利部黄河水利委员会黄河水资源公报,<http://www.yrcc.gov.cn/other/hhgb/>)。水电站/水库对于鱼类多样性的影响是多方面的,首先水体从“河流相”向“湖泊相”的剧烈转变,导致适合流水生境生存的物种退出库区,同时却为很多适合静水生活的外来物种创造了良好空间(Paukert & Galat, 2010)。特别是首尾相连的梯级水库,将使大段河流的原生环境被彻底改变。例如龙羊峡–刘家峡河段长约420 km,共规划了14座水电站,从上到下依次为龙羊峡、拉西瓦、尼那、山坪、李家峡、直岗拉卡、康扬、公伯峡、苏只、黄丰、积石峡、大河家、炳灵和刘家峡。自20世纪50年代刘家峡开工建设以来,除山坪外基本均已建成,是黄河上游已建和在建水电梯级最为集中的河段。所建电站基本上首尾相连,使得一些适应流水生境的黄河上、中游特有裂腹鱼类,如厚唇裸重唇鱼(VU)、极边扁咽齿鱼(EN)和骨唇黄河鱼(EN),已经完全退出龙羊峡–刘家峡河段。另外,大坝的建设也阻断了河流的纵向连通性,使得一些洄游性鱼类难以完成生活史。例如降河产卵的日本鳗鲡(*Anguilla japonica*),历史上可以分布到关中盆地以及晋南洪洞、翼城、新绛等地(李思忠,2015),但由于三门峡等水库的存在,目前在陕西等地的黄河水体已无法发现自然生存的日本鳗鲡个体(王丰和沈红保,2020)。

水库对于一些产漂流性卵鱼类的影响更是首当其冲,在黄河流域最典型的例子就是北方铜鱼(*Coreius septentrionalis*)。北方铜鱼是黄河特有鱼类,青海贵德到山东都曾分布(李思忠,2015),过去一直是黄河重要的渔业对象。在黄河上游,青铜峡大坝建成(1960年截流)后,宁夏河段的北方铜鱼年产量即从约15 t降至几千斤,大坝以下河段则几乎绝迹(何志辉,1987)。黄河中游小浪底水库建库前,在

孟津至郑州河段北方铜鱼繁殖期捕捞量都在150 kg以上,且多为成熟个体;然而随着大坝截流(1997年),产卵场破坏,水环境发生改变,没有足够流水空间满足北方铜鱼的繁殖需求,导致北方铜鱼种群数量迅速下降(郭严军,2008)。目前该种濒危等级已从1998年的濒危(EN)提升到极危(CR)(乐佩琦和陈宜瑜,1998;蒋志刚等,2016)。作者在2007年以后长时间对黄河鱼类的调查中,再未发现北方铜鱼。类似大坝对产漂流性卵鱼类如圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)的影响,也显著发生在长江流域(林鹏程等,2019b)。

如前所述,黄河上游在鱼类多样性上的一个特点就是虽然物种数量不多,但是黄河特有鱼类、濒危物种的占比很高,其中不少种类对环境条件的要求很高,分布区又很狭窄,极易受到水电站/水库的影响而导致种群大幅衰退,甚至面临整个物种从地球上消失的重大生态风险。如何处理好黄河上、中游特有鱼类的保护与水电开发之间的矛盾,是关乎未来黄河流域高质量发展的关键之一。

5.2 水资源过度利用

黄河水资源量十分匮乏,其水资源总量仅占全国的2.6%,在全国七大江河中居第4位。人均水资源量905 m³,亩均水资源量381 m³,分别是全国人均、亩均水资源量的1/3和1/5。然而黄河却承载了全国15%耕地和12%人口的供水任务(李文学,2016),同时要向流域外区域调水,为经济社会发展提供帮助,因此黄河是我国水资源供需矛盾最突出的流域之一。黄河断流自1972年首次出现后逐渐加剧,20世纪90年代几乎每年均有发生,1997年下游利津站曾连续断流226天。之后经过统一调度黄河水量,于1999年后实现了连续20年不断流(赵勇等,2020)。然而黄河流域水资源的供需矛盾并没有解决,2018年黄河总取水量为516.22亿m³,总耗水量则为415.93亿m³(水利部黄河水利委员会黄河水资源公报, <http://www.yrcc.gov.cn/other/hhgb/>),水资源利用率达到80.6%,远超国际公认的40%警戒线(赵钟楠等,2020)。所以在保证干流不断流的情况下,主要支流水量开始大幅衰减,河道缺水问题大范围向支流扩散。1980–2016年遥感监测显示,黄河湿地面积降幅已达到12.5%(赵勇等,2020)。过去断流的影响对于黄河下游干流的鱼类更加明显,目前则蔓延到黄河中下游的一些重要支流。河流断流对一

些定居性鱼类影响更加显著,不但使得适生的水生环境消失,且因频繁发生在鱼类繁殖期,影响一些产沉粘性卵鱼类的种群增殖。

5.3 水域污染

黄河流域城镇化进程加快,人口聚集,废污水排放量增加;加之天然来水减少,河道稀释自净能力和纳污能力降低,使得黄河流域水污染问题比较突出(王文杰等,2017)。近年来随着治污力度的不断加大,水污染情况得到较大程度的缓解,黄河流域水质整体呈逐步改善趋势(吕振豫和穆建新,2017)。《2018年黄河水资源公报》显示,黄河干流水质较好,无V类和劣V类水质河段,IV类水质河长只占2.2%,集中于潼关断面。然而黄河主要支流的水质则不容乐观,IV类、V类、劣V类水质河长分别占评价河长的10.7%、6.8%和16.1%。流域内水功能区达标率也只有63.3%。支流通常分布一些适应溪流流水生境的小型鱼类如花鲢(*Hemibarbus maculatus*)、潘氏鳅鲇(*Gobiobotia pappenheimi*)等,这些鱼类通常对水质变化比较敏感,严重的水体污染会导致这些鱼类在局部水域消失。恶劣的水质除了影响鱼类的正常生理功能外,对受精卵和仔鱼的影响也尤为明显,致使种群不能得到及时补充。因此在一些水污染较严重的水体中,只有一些耐污能力较强的物种如鲫(*Carassius auratus*)、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)等才能够生存下来,多样性异常单调。

5.4 外来物种

外来物种已逐渐成为威胁黄河全流域鱼类多样性的重要因素之一。多数外来鱼类是因为水产养殖而主动引入,其中既有从国外引入的,也有从中国东部地区或其他水系引入的;另外有些小型野杂鱼类,则是伴随引入物种进入到新水体的;近年来宗教放生也成为外来种引入的一个重要途径。

在黄河上游段,因水库渔业的发展,20世纪90年代在龙羊峡、李家峡水库等从丹麦引入了虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*);之后又引入了池沼公鱼(*Hypomesus olidus*)和大银鱼(*Protosalanx chinensis*);高白鲑(*Coregonus peled*)等则是从俄罗斯引入;而麦穗鱼、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)等则是随着鲤(*Cyprinus carpio*)、鲫一起引入的(唐文家等,2006)。在2005–2010年间对黄河上游茨哈峡至积石峡段鱼类多样性的调查发现,干流中的外来鱼类多达21种,其中17种已经能够自然繁殖,相反该河段

只能采集到16种土著种类(唐文家和何德奎, 2013), 外来鱼类的数量已经超过本地物种。中游陕西段调查发现的外来鱼类也已经达到了至少14种(或品种), 这还不包括诸如克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)、拟鳄龟(*Chelydra serpentina*)等其他外来水生生物(王丰和沈红保, 2020), 近年来作者在中游的调查还新发现了原产于欧洲和中亚等地的梭鲈(*Lucioperca lucioperca*)。此外黄河下游还报道有雀鳢(*Lepidosteus sp.*), 应是放生的结果。

根据作者不完全统计, 目前黄河流域至少存在34种(或品种)外来鱼类, 其中20种是从国外引进, 14种是从国内其他水系(或黄河下游引至上游)引入。外来物种对本地土著鱼类的影响是多方面的, 除了通过竞争、捕食等作用直接影响土著鱼类种群, 还会携带一些病原体, 对土著鱼类产生进一步危害。此外, 有些物种通过和本地鱼类的杂交, 破坏了原有野生种群的遗传多样性。例如德国镜鲤(*Cyprinus carpio var. specularis*)与黄河土著鲤的杂交后代在流域内已经非常普遍(李芳等, 2008)。此外, 水库生境进一步放大了某些外来物种的影响, 对上、中游一些特有鱼类产生严重威胁。目前针对黄河流域严重的外来物种问题, 已经不能局限于引种上的管理, 一方面应该建立外来物种监测体系对其种群数量和扩散范围进行跟踪, 另一方面应该制定外来物种控制和土著鱼类复壮预案, 在重点水域通过人工干预, 减轻外来鱼类带来的不利影响。

5.5 渔业捕捞

20世纪50–60年代, 黄河渔业资源丰富, 例如黄河上游鄂陵湖花斑裸鲤的产量在1960年曾达到525 t(唐文家等, 2006)。但自70年代开始, 黄河鱼类资源量开始减少, 80年代仅及50年代的15%–20%(何志辉, 1987)。目前黄河流域渔业资源严重衰退, 过去一些重要资源性鱼类(如北方铜鱼)已经濒临灭绝, 很多水域的鱼类组成主要以一些广布种甚至外来种为主, 同时出现鱼类小型化、低龄化的现象。过度捕捞在历史上曾经对黄河鱼类产生过重要影响, 但是随着野生渔业资源的衰退, 相较于其他影响因素, 目前以渔业为目的的捕捞活动对野生鱼类多样性的影响已不再显著。随着国家进一步推行禁渔期和禁渔区制度, 相信未来专业的捕捞活动对于流域鱼类多样性的影响将进一步下降, 但是对于采用非法渔具渔法进行的偷捕盗捕, 应坚决予以杜

绝。

如果从区域上分析, 对黄河上游鱼类多样性影响最大的是梯级修建的水电站(水库), 以及外来物种的影响。在这两个因素综合作用下, 上游的一些黄河特有鱼类濒临灭绝, 这将是未来流域保护的重点。中游和下游则主要受到水资源分配不均衡、水域污染等的影响。支流则受制于小水电、水体污染等因素。因此未来制定流域鱼类多样性保护方案时, 应分析不同水域的具体威胁, 针对主要矛盾加以解决。

参考文献

- An SX (2004) A summary of hydropower planning on the upper reach of the Yellow River. *Northwest Hydropower*, (3), 1–5. (in Chinese with English abstract) [安盛勋 (2004) 黄河上游水电规划综述. *西北水电*, (3), 1–5.]
- Cai JY (2017) Census Report on Basic Information of Rivers and Lakes in China. China Water & Power Press, Beijing. (in Chinese) [蔡建元 (2017) 河湖基本情况普查报告. 中国水利水电出版社, 北京.]
- Cai WX, Zhang JJ, Wang SW (2013) Atlas of Fishes in the Yellow River Basin. Northwest Agriculture and Forestry University Press, Yangling. (in Chinese) [蔡文仙, 张建军, 王守文 (2013) 黄河流域鱼类图志. 西北农林科技大学出版社, 杨凌.]
- Cao L, Zhang E, Zang CX, Cao WX (2016) Evaluating the status of China's continental fish and analyzing their causes of endangerment through the red list assessment. *Biodiversity Science*, 24, 598–609. (in Chinese with English abstract) [曹亮, 张鹗, 臧春鑫, 曹文宣 (2016) 通过红色名录评估研究中国内陆鱼类受威胁现状及其成因. *生物多样性*, 24, 598–609.]
- Cheng QT, Zhou CW (1997) The Fishes of Shandong. Shandong Science and Technology Press, Jinan. (in Chinese) [成庆泰, 周才武 (1997) 山东鱼类志. 山东科学技术出版社, 济南.]
- Department of Biology, Shanxi Normal University (1960) Investigation on fisheries biology of the Fenhe River. *Journal of Shanxi Normal University*, (3), 1–26. (in Chinese) [山西师范学院生物系 (1960) 汾河渔业生物学基础调查. *山西师范学院学报*, (3), 1–26.]
- Ding RH (1994) The Fishes of Sichuan. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. (in Chinese) [丁瑞华 (1994) 四川鱼类志. 四川科学技术出版社, 成都.]
- Ding SY, Zheng WG (2002) Effects of hydropower development on management of ecological environment in the middle reaches of the Yellow River. *China Water Resources*, (3), 58, 75. (in Chinese) [丁双跃, 郑卫国 (2002) 黄河中游水电开发对生态环境治理的作用. *中国*

- 水利, (3), 58, 75.]
- Duan ZY, Zhao K, Peng ZG, Li JB, Diogo R, Zhao XQ, He SP (2009) Comparative phylogeography of the Yellow River schizothoracine fishes (Cyprinidae): Vicariance, expansion, and recent coalescence in response to the Quaternary environmental upheaval in the Tibetan Plateau. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 53, 1025–1031.
- Fang PW (1935) On some *Nemacheilus* fishes of North-Western China and adjacent territory in the Berlina Zoological Museum's collection, with descriptions of two new species. *Sinensia*, 6, 749–767.
- Fish Group and Invertebrate Group, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences (1959) Preliminary Investigation Report on Fisheries Biology of the Yellow River. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院动物研究所鱼类组与无脊椎动物组 (1959) 黄河渔业生物学基础初步调查报告. 科学出版社, 北京.]
- Fowler HW (1931) Collection of fresh water fishes obtained chiefly at Tsinan. *Peking Natural History Bulletin*, 5, 27–31.
- Fu TS (1934) Study of the fishes of Pai-Chuan. *Bulletin of the Honan Museum*, 1, 47–102.
- Fu TS, Tchang TL (1933) The study of the fishes of Kaifeng, Part I. *Bulletin of the Honan Museum*, 1, 1–45.
- Günther A (1898) Report on a collection of fishes from Newchwang, North China. *Annals and Magazine of Natural History*, 7, 257–263.
- Guo YJ (2008) Influences of Xiaolangdi Reservoir on *Coreius septentrionalis* and its conservation strategy. *Henan Fisheries*, (4), 7–8. (in Chinese) [郭严军 (2008) 谈小浪底水库对北方铜鱼生态的影响及对策. 河南水产, (4), 7–8.]
- He DK, Sui XY, Sun HY, Tao J, Ding CZ, Chen YF, Chen YY (2020) Diversity, pattern and ecological drivers of freshwater fish in China and adjacent areas. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 30, 387–404.
- He ZH (1987) Fishery resource research on Yellow River system. *Journal of Dalian Fisheries College*, (1), 63–66. (in Chinese) [何志辉 (1987) 黄河水系渔业资源调查. 大连水产学院学报, (1), 63–66.]
- He ZH, Xie ZH (1986) Fishery Resource of Yellow River System. Liaoning Science and Technology Press, Dalian. (in Chinese) [何志辉, 谢祚浑 (1986) 黄河水系渔业资源. 辽宁科学技术出版社, 大连.]
- Herzenstein S (1888) Fische. In: *Wissenschaftliche Resultate der von N. M. Przewalski nach Central-Asien unternommenen Reisen*, pp. 91–98. *Zoologischer Theil*, Wien.
- Huang HF, Zheng SC, Jiang XP (1965) Fish investigation in the middle section of the Weihe River. In: *Reports and Abstracts Presented at a Meeting Commemorating the 30th Anniversary of the China Zoological Society*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [黄洪富, 郑士川, 江希平 (1965) 渭河中段鱼类调查研究. 见: 中国动物学会三十周年学术讨论会论文摘要汇编. 科学出版社, 北京.]
- Jiang LZ, Wang HF (2011) Analysis of areas soil erosion in the development of the hydropower station on upstream of Yellow River. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 42, 470–474. (in Chinese with English abstract) [蒋立哲, 王慧芳 (2011) 黄河上游水电开发对区域水土流失的影响分析. 沈阳农业大学学报, 42, 470–474.]
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red List of China's Vertebrates. *Biodiversity Science*, 24, 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 500–551.]
- Li F, Zhang JJ, Yuan YF, Feng H, Zhang JY, Yang XZ (2008) Present situation and problems on fish introduction in Yellow River system. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 36, 15024–15026. (in Chinese with English abstract) [李芳, 张建军, 袁永锋, 冯慧, 张军燕, 杨兴中 (2008) 黄河流域鱼类引种现状及存在问题. 安徽农业科学, 36, 15024–15026.]
- Li KM, Shen ZX, Ye HY (2012) Fish diversity research and protection measures of Banduo section in Yellow River. *Hebei Fisheries*, (7), 26–29. (in Chinese with English abstract) [李柯懋, 申志新, 冶海云 (2012) 黄河班多段鱼类多样性初步研究及保护对策. 河北渔业, (7), 26–29.]
- Li RQ (1988) The relationship between developments of the Yellow River and the Yongding River, and the evolution of fossil lake of drainage basin in the Cenozoic Era. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, (4), 84–93. (in Chinese with English abstract) [李荣全 (1988) 黄河、永定河发育历史与流域新生代古湖演变间的相互关系. 北京师范大学学报(自然科学版), (4), 84–93.]
- Li RQ (1993) The formation and change of the Yellow River. In: *Geomorphologic Characteristics and Evolution of China*, pp. 52–59. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese) [李荣全 (1993) 黄河的形成与变迁. 见: 中国地貌特征与演化, 52–59页. 海洋出版社, 北京.]
- Li SZ (1965) Discussion on the fish fauna of the Yellow River. *Chinese Journal of Zoology*, (5), 217–222. (in Chinese) [李思忠 (1965) 黄河鱼类区系的探讨. 动物学杂志, (5), 217–222.]
- Li SZ (1981) Studies on Zoogeographical Divisions for Fresh Water Fishes of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李思忠 (1981) 中国淡水鱼类的分布区划. 科学出版社, 北京.]

- Li SZ (1987) Distribution of fishes from Acipenseriformes in China. *Chinese Journal of Zoology*, 22(4), 35–40. (in Chinese) [李思忠 (1987) 中国鲟形目鱼类地理分布的研究. *动物学杂志*, 22(4), 35–40.]
- Li SZ (2015) *Fishes of the Yellow River*. The Sueichan Press, Keelung. (in Chinese) [李思忠 (2015) 黄河鱼类志. 水产出版社, 基隆.]
- Li WX (2016) Benefits analysis of the Yellow River harnessment and protection in the last 70 years. *Yellow River*, 38(10), 1–6. (in Chinese with English abstract) [李文学 (2016) 黄河治理开发与保护70年效益分析. *人民黄河*, 38(10), 1–6.]
- Lin PC, Li SZ, Qin XC, Cheng WX, Liu HZ (2019a) Pattern of fish diversity and assemblage structure in the middle and lower reaches of the Yiluo River, Yellow River. *Journal of Lake Sciences*, 31, 482–492. (in Chinese with English abstract) [林鹏程, 李淑贞, 秦祥朝, 程卫习, 刘焕章 (2019a) 黄河伊洛河中下游鱼类多样性及群落结构. *湖泊科学*, 31, 482–492.]
- Lin PC, Wang CL, Liu F, Liu M, Liu HZ, Wang XM, Yu J, Zhu X (2019b) Current status and conservation planning of fish biodiversity in the upper Yangtze River basin in the context of hydropower development. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 43(Suppl.), 130–143. (in Chinese with English abstract) [林鹏程, 王春伶, 刘飞, 刘猛, 刘焕章, 王小明, 于江, 朱昕 (2019b) 水电开发背景下长江上游流域鱼类保护现状与规划. *水生生物学报*, 43(增刊), 130–143.]
- Liu HB, Jian HR (2019) Investigation on fish resources in the lower reaches of the Yellow River. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 47(19), 110–112, 131. (in Chinese with English abstract) [刘洪波, 菅浩然 (2019) 黄河下游鱼类资源调查研究. *安徽农业科学*, 47(19), 110–112, 131.]
- Liu YG (1981) Discussion on fishery status and the stock enhancement in the Maqu section of the Yellow River. *Freshwater Fisheries*, (3), 37–40. (in Chinese) [刘阳光 (1981) 黄河玛曲段渔业现状及其增殖途径的探讨. *淡水渔业*, (3), 37–40.]
- Lü LC, Li WL (2012) *Geography of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吕拉昌, 李文翎 (2012) 中国地理. 科学出版社, 北京.]
- Lu XP, Fu ZC (2010) *General Introduction to Major River Systems in China*. China Water & Power Press, Beijing. (in Chinese) [陆孝平, 富曾慈 (2010) 中国主要江河水系概览. 中国水利水电出版社, 北京.]
- Lü ZY, Mu JX (2017) Study on spatial and temporal evolution feature of water quality in Yellow River basin. *Yellow River*, 39(4), 66–70, 77. (in Chinese with English abstract) [吕振豫, 穆建新 (2017) 黄河流域水质污染时空演变特征研究. *人民黄河*, 39(4), 66–70, 77.]
- Mori T (1928) *Freshwater Fishes from Tsi-nan, China, with description of five new species*. *Japanese Journal of Zoology*, 2, 61–72.
- Mori T (1929) Addition to the fish fauna of Tsi-nan, China, with descriptions of two new species. *Japanese Journal of Zoology*, 2, 383–385.
- Mori T (1936) *Studies on the Geographical Distribution of Freshwater Fishes in Eastern Asia*. Keijo Imperial University, Chosen.
- Nichols JT (1925) Some Chinese fresh-water fishes. 4. Gudgeons of the genus *Coriparieus*. 5. Gudgeons of related to the European *Gobio gobio*. 6. New gudgeons of the genus *Gnathopogon* and *Leucogobio*. *American Museum Novitates*, 181, 1–8.
- Nichols JT (1926) Some Chinese fresh-water fishes. 16. Concerning gudgeons related to *Pseudogobio* and two new species of it. 17. Two new rhodeins. *American Museum Novitates*, 214, 1–7.
- Pappenheim P (1908) *Pisces*. In: *Filchner Wissenschaftliche Ergebnisse der Expedition Filchner nach China und Tibet (1903–1905)*. Jena, 10, 107–124.
- Paukert CP, Galat DL (2010) Warmwater rivers. In: *Inland Fisheries Management in North America (3rd edn)*, pp. 699–730. American Fisheries Society, Bethesda.
- Quan Q, Wang Y, Tian KD, Wu ZG (2018) Impact of hydraulic projects on indigenous fish and its protection in the upper reaches of Yellow River. *Environmental Impact Assessment*, 40(6), 63–66. (in Chinese with English abstract) [权全, 王炎, 田开迪, 武志刚 (2018) 黄河上游羊曲水电站对土著鱼类的影响与保护. *环境影响评价*, 40(6), 63–66.]
- Ru HJ, Wang HJ, Zhao WH, Shen YQ, Wang Y, Zhang XK (2010) Fishes in the mainstream of the Yellow River: assemblage characteristics and historical changes. *Biodiversity Science*, 181, 179–186. (in Chinese with English abstract) [茹辉军, 王海军, 赵伟华, 沈亚强, 王勇, 张晓可 (2010) 黄河干流鱼类群落特征及其历史变化. *生物多样性*, 181, 179–186.]
- Sauvage HÉ, Dabry de Thiersant CP (1874) Notes sur les poissons des eaux douces de Chine. *Annales des Sciences Naturelles, Paris (Zoologie et Paléontologie)*, (Sér. 6), 1, 1–18.
- Shaanxi Institute of Zoology, Institute of Hydrobiology of the Chinese Academy of Sciences, Department of Biology of Lanzhou University (1987) *Fishes in Qinling Mountains Area*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陕西省动物研究所, 中国科学院水生生物研究所, 兰州大学生物系 (1987) 秦岭鱼类志. 科学出版社, 北京.]
- Shen HB, Li RJ, Lü BB, Zhang JY, Yin XW, Wang YC, Wang ZQ, Wang F (2019) Characteristics of fish community structure in the Weihe River of Shaanxi section. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 43, 1311–1319. (in Chinese with English abstract) [沈红保, 李瑞娇, 吕彬彬, 张军燕, 殷旭旺, 王益昌, 王忠乾, 王丰 (2019) 渭河陕西段鱼类群落结构组成及变化研究. *水生生物学报*, 43, 1311–1319.]
- Shen ZX, Wang GJ, Li KM, Jian SL, Chen YQ, Guan HT

- (2014) The situation and protection measures of fish resources in upstream of Longyang Valley of the Yellow River. *Journal of Hydroecology*, 35(1), 70–76. (in Chinese with English abstract) [申志新, 王国杰, 李柯懋, 简生龙, 陈燕琴, 关弘弢 (2014) 黄河龙羊峡上游鱼类资源现状及保护对策. *水生态学杂志*, 35(1), 70–76.]
- Song SL, Wang XT (1983) Notes on fishes fauna of the upper reaches of Weihe River in China. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 19(4), 120–128. (in Chinese) [宋世良, 王香亭 (1983) 渭河上游鱼类区系研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 19(4), 120–128.]
- Tang WJ, He DK (2013) Fish resource survey on Cihaxia to Jishixia stretches in the upper reaches of Yellow River (2005–2010). *Journal of Lake Sciences*, 25, 600–608. (in Chinese with English abstract) [唐文家, 何德奎 (2013) 黄河上游茨哈峡至积石峡段鱼类资源调查(2005–2010年). *湖泊科学*, 25, 600–608.]
- Tang WJ, Shen ZX, Jian SL (2006) Endangered and rare fish species of the Yellow River in Qinghai Province and their conservation strategy. *Reservoir Fisheries*, 26(1), 57–60. (in Chinese) [唐文家, 申志新, 简生龙 (2006) 青海省黄河珍稀濒危鱼类及保护对策. *水利渔业*, 26(1), 57–60.]
- Tchang TL (1932a) A new fish from Kaifeng. *Bulletin of the Fan Memorial Institute of Biology*, 3, 211–217.
- Tchang TL (1932b) Some Chinese cyprinoid fish synonyms (I). *Bulletin of the Fan Memorial Institute of Biology*, 3, 237–251.
- Tchang TL (1933) The study of Chinese cyprinoid fishes, part I. *Zoologia Sinica (B)*, 2, 1–247.
- Tchang TL (1941) List of fishes from Ho-nan. *Peking Nature and History Bulletin*, 16, 79–84.
- Tsao WS, Tun CL (1962) Notes on the Schizothoracid fishes from western Szechwan and adjacent territory. *Acta Hydrobiologica Sinica*, (2), 27–50. (in Chinese) [曹文宣, 邓中麟 (1962) 四川西部及其邻近地区的裂腹鱼类. *水生生物学集刊*, (2), 27–50.]
- Tsao WS, Wu HW (1962) An investigation of the fish biology and fishery problems in Ganzi-Apa region of western Szechwan Province. *Acta Hydrobiologica Sinica*, (2), 79–110. (in Chinese) [曹文宣, 伍献文 (1962) 四川西部甘孜阿坝地区鱼类生物学及渔业问题. *水生生物学集刊*, (2), 79–110.]
- Wang F (2020) Conservation status and suggestions on the fishery environment of the Yellow River. *China Fisheries*, (1), 47–50. (in Chinese) [王丰 (2020) 黄河渔业生态环境保护现状及建议. *中国水产*, (1), 47–50.]
- Wang F, Shen HB (2020) Evaluation on Fishery Resources of the Shaanxi Section of the Yellow River. Northwest Agriculture and Forestry University Press, Yangling. (in Chinese) [王丰, 沈红保 (2020) 黄河陕西段渔业资源评价. 西北农林科技大学出版社, 杨凌.]
- Wang J, Zhang CL, Xue Y, Ren YP, Xu BD (2018) Taxonomic diversity of fish community in the Yellow River Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 40(4), 86–95. (in Chinese with English abstract) [王娇, 张崇良, 薛莹, 任一平, 徐宾铎 (2018) 黄河口鱼类群落分类学多样性的研究. *海洋学报*, 40(4), 86–95.]
- Wang SM, Wu XH, Zhang ZK, Jiang FC, Xue B, Tong GB, Tian GQ (2001) Environment change and eastward flow of the Yellow River based on the sedimentary records of Sanmen ancient lake. *Science in China (Series D)*, 31, 760–768. (in Chinese) [王苏民, 吴锡浩, 张振克, 蒋复初, 薛滨, 童国榜, 田国强 (2001) 三门古湖沉积记录的环境变迁与黄河贯通东流研究. *中国科学(D辑)*, 31, 760–768.]
- Wang WJ, Jiang WG, Fang Z, Wang W, Guo QZ (2017) Ten-year Change of Ecological Environments in the Yellow River Basin. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王文杰, 蒋卫国, 房志, 王维, 国巧真 (2017) 黄河流域生态环境十年变化评估. 科学出版社, 北京.]
- Wang XT, He RL, Zhao HM (1956) Fishes of the Yellow River near Lanzhou. *Bulletin of Biology*, (8), 14–19. (in Chinese) [王香亭, 贺汝良, 赵宏谟 (1956) 兰州附近黄河的鱼类. *生物学通报*, (8), 14–19.]
- Wang YC, Shen HB, Zhang JY, Chen YY, Yu B (2017) Species composition and community diversity of fishes in Shaanxi section of Yellow River mainstream. *Freshwater Fisheries*, 47(1), 56–60. (in Chinese with English abstract) [王益昌, 沈红保, 张军燕, 陈媛媛, 余斌 (2017) 黄河干流陕西段鱼类种类组成及群落多样性. *淡水渔业*, 47(1), 56–60.]
- Wen JH, Xu ZH, Wu W, Qi ZH (2018) Study on water ecosystem evaluation in Dawen River Basin. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 16(3), 118–124. (in Chinese with English abstract) [温家华, 徐征和, 武玮, 祁泽慧 (2018) 大汶河流域水生态系统健康评价研究. *南水北调与水利科技*, 16(3), 118–124.]
- Wu YF, Chen Y (1979) Notes on fishes from Golog and Yushu region of Qinghai Province, China. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 4, 287–296. (in Chinese with English abstract) [武云飞, 陈瑗 (1979) 青海省果洛和玉树地区的鱼类. *动物分类学报*, 4, 287–296.]
- Wu YF, Wu CZ (1989) *Economical Animals of Qinghai: Pisces*. Qinghai People's Publishing House, Xining. (in Chinese) [武云飞, 吴翠珍 (1989) 青海经济动物志: 鱼纲. 青海人民出版社, 西宁.]
- Xing YC, Zhang CG, Fan EY, Zhao YH (2016) Freshwater fishes of China: Species richness, endemism, threatened species and conservation. *Diversity and Distributions*, 22, 358–370.
- Xu JX, Shi CX, You LY (2013) Fluvial geomorphology. In: *Geomorphology of China*, pp. 113–187. Science Press, Beijing. (in Chinese) [许炯心, 师长兴, 尤联元 (2013) 河流地貌. 见: *中国地貌*, 113–187页. 科学出版社, 北京.]
- Xu RG (2013) *Fauna Inner Mongolia (Volume 1): Cyclostomata, Pisces*. Inner Mongolia University Press, Huhhot. (in Chinese) [旭日干 (2013) 内蒙古动物志(第一

卷): 圆口纲, 鱼纲. 内蒙古大学出版社, 呼和浩特.]

- Yang BH, Ma SQ, Wang M, Xu ZX, Yin XW (2019) Relationship between fish community and environmental factors in Jinan region in autumn. *Chinese Journal of Fisheries*, 32(3), 34–38. (in Chinese with English abstract) [杨柏贺, 马思琦, 王汨, 徐宗学, 殷旭旺 (2019) 秋季济南地区鱼类群落结构及其与环境因子的关系. *水产学杂志*, 32(3), 34–38.]
- You LY, Yang JC (2013) *Geomorphology of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [尤联元, 杨景春 (2013) 中国地貌. 科学出版社, 北京.]
- Yue PQ, Chen YY (1998) *China Red Data Book of Endangered Animals: Pisces*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [乐佩琦, 陈宜瑜 (1998) 中国濒危动物红皮书: 鱼类. 科学出版社, 北京.]
- Zhang CG, Zhao YH (2016) *Species Diversity and Distribution of Inland Fishes in China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张春光, 赵亚辉 (2016) 中国内陆鱼类物种与分布. 科学出版社, 北京.]
- Zhang LS, Ye Y, Zeng ZZ (2012) Changes of river systems and formation of natural geographical environments of three major plains in the east of China. In: *China's Palaeogeography: The Formation of Natural Geographical Environments*, pp. 306–366. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张兰生, 叶瑜, 曾早早 (2012) 江河水系演化与东部三大平原自然地理环境的形成. 见: 中国古地理-中国自然环境的形成, 306–366页. 科学出版社, 北京.]
- Zhang YP, Lou ZY, Wang T, Du YY, Jiao WL (2013) Population genetic diversity of *Triplophysa siluroides* in Maqu section in upper reaches of Yellow River. *Freshwater Fisheries*, 43(6), 86–89. (in Chinese with English abstract) [张艳萍, 娄忠玉, 王太, 杜岩岩, 焦文龙 (2013) 黄河玛曲段似鲇高原鳅的种群遗传多样性. *淡水渔业*, 43(6), 86–89.]
- Zhao KT (1963) A survey of the fishes of the Hoh-hot, Inner Mongolia. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science)*, (1), 63–69. (in Chinese with English abstract) [赵肯堂 (1963) 呼和浩特的鱼类调查. *内蒙古大学学报(自然科学)*, (1), 63–69.]
- Zhao RL, Zhu GQ, Hu ZP, Li LH (2014) Fish composition and distributions of spawning ground, nursery ground and wintering ground in Shanxi section of the mainstream Yellow River. *Chinese Journal of Fisheries*, 27(3), 6–11. (in Chinese with English abstract) [赵瑞亮, 朱国清, 胡振平, 李利红 (2014) 黄河干流山西段鱼类组成及其产卵场、索饵场和越冬场分布的调查. *水产学杂志*, 27(3), 6–11.]
- Zhao Y, He F, He GH, Li HH, Wang LZ, Chang HY, Zhu YN (2020) Review the phenomenon of Yellow River cutoff from a whole perspective and identification of current water shortage. *Yellow River*, 42(4), 42–46. (in Chinese with English abstract) [赵勇, 何凡, 何国华, 李海红, 王丽珍, 常奂宇, 朱永楠 (2020) 全域视角下黄河断流再审视与现状缺水识别. *人民黄河*, 42(4), 42–46.]
- Zhao ZN, Zhang Y, Li YY, Yuan Y, Tian Y (2020) Preliminary thoughts on the supports of water conservancy for ecological conservation and high-quality development in the Yellow River basin. *Water Resources Planning and Design*, (2), 1–3. (in Chinese) [赵钟楠, 张越, 李原园, 袁勇, 田英 (2020) 关于黄河流域生态保护与高质量发展水利支撑保障的初步思考. *水利规划与设计*, (2), 1–3.]
- Zhu SQ (1992) Three new species of Nemacheilinae fishes from China (Cypriniformes: Cobitidae). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 17, 241–247. (in Chinese with English abstract) [朱松泉 (1992) 中国条鳅亚科鱼类三新种(鲤形目: 鳅科). *动物分类学报*, 17, 241–247.]

(责任编辑: 陈小勇 责任编辑: 时意专)



•研究报告•

黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成及长周期变化

李宝泉^{1,2} 姜少玉^{1,3} 吕卷章⁴ 陈琳琳^{1,2} 闫朗¹ 刘春云¹
李晓静^{1,2} 宋博¹ 李新正^{2,3,5,6*}

1 (中国科学院烟台海岸带研究所海岸带生物学与生物资源保护实验室, 山东烟台 264003)

2 (中国科学院海洋大科学中心, 山东青岛 266071)

3 (中国科学院大学, 北京 100049)

4 (山东黄河三角洲国家级自然保护区管理委员会, 山东东营 257091)

5 (中国科学院海洋研究所海洋生物分类与系统演化实验室, 山东青岛 266071)

6 (青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋生物与生物技术功能实验室, 山东青岛 266071)

摘要: 黄河三角洲湿地是渤海重要的生态功能区, 在生物多样性保护与生态功能恢复方面发挥着重要作用。为系统研究该区域内大型底栖动物群落物种组成及时空分布, 作者在该区域典型潮间带和近岸浅海(5 m以浅水域)布设11个断面, 分别于2016年8月和11月, 2017年5月、8月和11月进行3个季节取样。结果显示: 黄河三角洲潮间带和邻近海域共发现大型底栖动物187种。其中, 潮间带分布119种, 近岸浅海分布99种。黄河三角洲潮间带和近海大型底栖动物物种组成均具有明显的时空差异。与历史资料相比, 黄河三角洲潮间带和近岸浅海大型底栖动物物种组成发生了明显变化, 动物个体呈小型化趋势。总体表现为自20世纪90年代末至今, 个体大的甲壳动物和软体动物经济类群逐渐被个体小且经济价值较低的多毛类、双壳类和甲壳动物取代。引起上述变化的原因复杂, 主要驱动力包括黄河来水量与输沙量的减少、人类活动(过度捕捞、开发力度加大)和互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵。
关键词: 黄河三角洲; 生物多样性; 湿地; 大型底栖动物群落; 物种组成

Species composition and long-term variation of macrobenthos in intertidal zone and offshore areas of the Yellow River Delta

Baoquan Li^{1,2}, Shaoyu Jiang^{1,3}, Juanzhang Lü⁴, Linlin Chen^{1,2}, Lang Yan¹, Chunyun Liu¹, Xiaojing Li^{1,2}, Bo Song¹, Xinzheng Li^{2,3,5,6*}

1 Key Laboratory of Coastal Biology and Bioresource Utilization, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003

2 Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Yellow River Delta National Nature Reserve Management Committee, Dongying, Shandong 257091

5 Department of Marine Organism Taxonomy & Phylogeny, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071

6 Laboratory for Marine Biology and Biotechnology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266071

Abstract: The Yellow River Delta wetlands play a major role in protecting the biodiversity and ecological function of the Bohai Sea. To understand the species diversity and spatio-temporal dynamics of macrobenthic community in this region, five surveys were carried out in intertidal zone and offshore areas in August and November 2016, May, August and November 2017, respectively. Results showed that 187 macrobenthic species were identified in surveyed areas, of which, 119 species were found in the intertidal zone and 99 in offshore areas. Obvious variation was found in the spatio-temporal distribution pattern of

收稿日期: 2020-09-24; 接受日期: 2021-01-13

基金项目: 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23050304; XDA23050202)和中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC041)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lixzh@qdio.ac.cn

species composition. Compared to historical records, individuals of certain species presented a miniaturization trend in body size. The dominant species composition also has undergone an obvious change from large-sized crustacean and mollusc species toward small-sized polychaete, bivalve and crustacean species. Possible factors responsible for these changes are complex, including a decrease of water inflow and sediment transport by the Yellow River combined with human activities (overfishing and increasing exploitation) and other factors, e.g., salinity decrease and the invasion of *Spartina alterniflora* happened in the Yellow River Delta.

Key words: Yellow River Delta; biodiversity; wetlands; macrobenthic community; species composition

黄河三角洲作为典型的海岸带生态系统,具有丰富的生物资源。近些年来,由于受入海径流、黄河携带泥沙以及入海口人类活动的多重影响(丁平兴, 2013),黄河三角洲湿地正面临着天然湿地面积减少、生物多样性降低、生态系统服务功能下降等多种问题。如,黄河径流量和携沙量的减少,致使黄河三角洲年均造陆面积由1976–1979年的32.5 km²/年下降为1996–2002年的2.7 km²/年,尤其是1996–2002年期间的干旱影响较为严重(张治昊和胡春宏, 2007)。学术界普遍认为侵蚀和掩埋等地质作用,以及湿地景观的变化造就了现代黄河三角洲的复杂模式(张晓龙和李培英, 2008; 孙晓宇等, 2011; 吴晶晶等, 2018)。由于黄河三角洲湿地具有重要的生态作用,上述湿地面积缩减和生境的变化必然会影响到该区域的生物多样性,进而影响河口–海洋生态系统的稳定性。

实现黄河三角洲湿地的生态保护与高质量发展已上升至国家战略,习近平总书记于2019年9月18日在郑州主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会,强调黄河流域要加强生态环境保护,指出“下游的黄河三角洲是我国暖温带最完整的湿地生态系统,要做好保护工作,促进河流生态系统健康,提高生物多样性”。

大型底栖动物种类繁多,在海洋生态系统中的物质循环和能量流动以及生态系统平衡与稳定中发挥着重要作用(田胜艳等, 2009)。大型底栖动物不仅是许多甲壳动物、鱼类和鸟类重要的食物来源,也包括许多经济型贝类和甲壳动物(Yan et al, 2017)。根据生态系统多稳态理论,在受环境变化和人类活动干扰下,大型底栖动物群落并不会全部崩溃,但会引起物种组成的变化,这也使得底栖动物经常作为生态系统健康状况的长周期生物指示种(Rees et al, 1991)。

黄河口区域底栖生物的调查以潮下带和

近海区域相对较多,也有学者开展了黄河三角洲潮间带生物多样性(蔡学军和田家怡, 2000; 董贯仓等, 2012a; 冷宇等, 2013)及大型底栖生物生态研究(王晓晨等, 2008; 李佳芮, 2011^①),但之前的调查在调查断面和站位设置上不够密集,调查次数上也不足,导致对物种组成的变化掌握不够。同时,之前对黄河口近海大型底栖动物的研究多是采用采泥器定量取样,采用底拖网调查的工作较少。底拖网相较于采泥器可以更容易采集反应敏捷、游泳能力较强的大型底上动物,是对该区域大型底栖动物群落调查的有力补充。

因此,本工作的目的是基于黄河三角洲潮间带和近岸浅海5个航次的调查,较全面地掌握该区域大型底栖动物物种多样性现状、所有物种及优势种组成的时空变化特征,并探讨引起变化的驱动因素,为黄河三角洲湿地的保护和修复提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 站位设置和样品采集

在黄河三角洲保护区潮间带布设11条调查断面(C1–C11),每条断面在高潮区、中潮区和低潮区各设置1个采样站,合计33个采样站(图1)。分别于2016年8月(夏季)和11月(秋季),2017年5月(春季)、8月和11月进行调查,每个采样站使用25 cm × 25 cm × 30 cm的取样框取4个样方。样品经0.5 mm孔径的网筛淘洗后挑选置于90%的酒精中固定保存。

与潮间带断面相对应,在近岸海区设置11个底拖网采样站位(T1–T11)(图1)。租用当地渔船,使用当地常用的底拖网进行采样,底拖网的最小网目是0.7 cm,每次拖网船速不大于3节,拖网30–60 min不等,具体以拖网沉底和起网为起止时间,利用

^① 李佳芮 (2011) 黄河三角洲潮间带大型底栖生物生态学研究. 硕士学位论文, 中国海洋大学, 青岛.

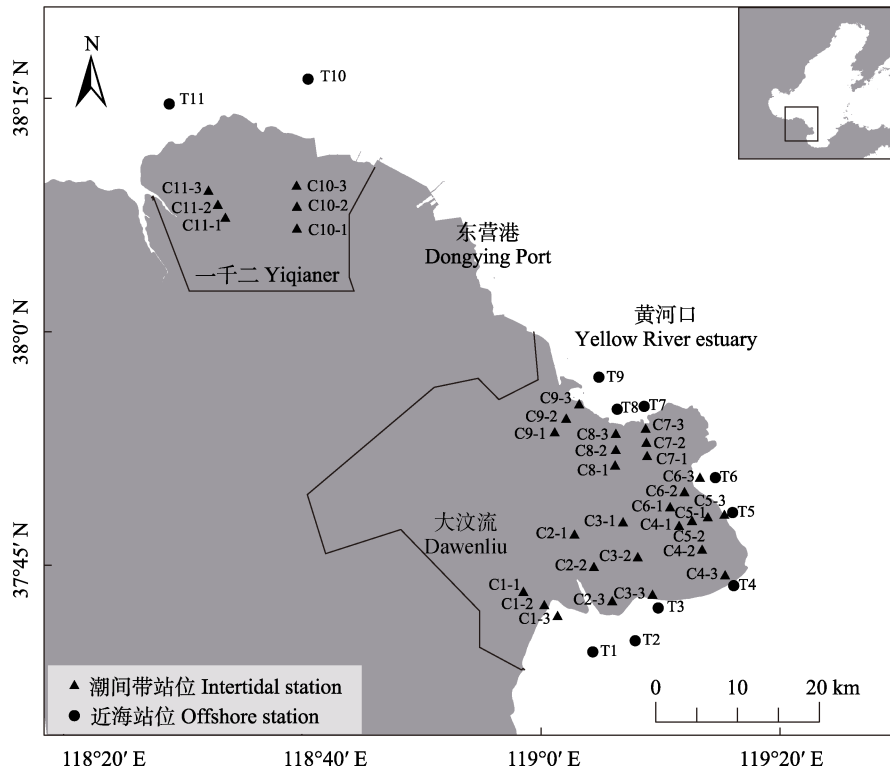


图1 黄河三角洲大型底栖动物多样性调查站位

Fig. 1 Survey stations of macrobenthos diversity in the Yellow River Delta

GPS 记录起始拖网位点。获得的样品用 75% 酒精现场固定保存。

样品带回实验室进行物种鉴定、计数和称重(湿重, 精度 0.001 g)。样品的处理、保存、称重均按照《海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)进行。

1.2 物种多样性和优势种分析

群落优势度和多样性指数计算公式如下:

$$\text{优势度(陈亚瞿等, 1995): } Y = (n_i/N) \times f_i \quad (1)$$

$$\text{Shannon-Wiener多样性指数(Shannon \& Weaver, 1949): } H' = -\sum P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

Margalef物种丰富度指数(Margalef, 1968):

$$D = (S - 1) / \log_2 N \quad (3)$$

Pielou均匀度指数(Pielou, 1975):

$$J = H' / \log_2 S \quad (4)$$

式中, N 为采集的大型底栖动物总个体数; n_i 为第 i 种底栖动物的个体数; f_i 为物种 i 在各站位出现的频率; S 为采泥样品中的总种数; P_i 为第 i 种的个体数与样品中的总个体数的比值(n_i/N); 定义 $Y > 0.02$ 的种为优势种(陈亚瞿等, 1995)。

采用Excel进行数据整理, SPSS 19.0进行方差分析。

2 结果

2.1 潮间带大型底栖动物物种组成

2016–2017年5个航次在潮间带共获大型底栖动物119种, 隶属于7门7纲23目60科89属。其中环节动物多毛类29种, 占24.37%; 甲壳动物35种, 占29.41%; 软体动物45种, 占37.82%; 鱼类7种, 占5.88%; 其他动物3种, 占2.52%。在不同潮区内, 也存在分带现象, 其中低潮区82种, 中潮区和高潮区各70种。物种组成存在一定的季节波动, 但总物种数和各类群物种数在季节间差异不显著, 其中总物种数春季高于夏秋两季; 多毛类物种数季节变化明显, 春秋两季相对较多; 软体动物和甲壳动物始终为优势类群(图2)。

共检获大型底栖动物优势种12种, 其中多毛类3种、甲壳动物3种、软体动物4种、鱼类2种(表1)。出现次数较多的为多毛类丝异蚓虫(*Heteromastus filiformis*, 4次), 其次为日本刺沙蚕(*Hediste japonica*,

3次)和光滑河蓝蛤(*Potamocorbula laevis*, 3次)。优势种组成呈现明显的季节变化,具体表现为:2016年8月4种,为光滑河蓝蛤、丝异蚓虫、日本刺沙蚕和日本大眼蟹(*Macrophthalmus japonicus*);2016年11月3种,即丝异蚓虫、日本刺沙蚕和光滑河蓝蛤;2017年5月4种,为日本刺沙蚕、光滑河蓝蛤、彩虹明樱蛤(*Iridona iridescens*)和丝异蚓虫;2017年8月6种,为薄荚蛭(*Siliqua pulchella*)、朝鲜刺糠虾(*Orientomysis koreana*)、弹涂鱼(*Periophthalmus modestus*)、秉氏泥蟹(*Ilyoplax pingi*)、浅古铜吻沙蚕(*Glycera subaenea*)和黄鳍刺虾虎鱼(*Acanthogobius flavimanus*);2017年11月3种,为大螺赢蜚(*Corophium major*)、彩虹明樱蛤和丝异蚓虫。

2.2 潮间带大型底栖动物长周期变化

2.2.1 物种组成的变化

20世纪90年代末以来,黄河三角洲潮间带大型底栖动物的物种数存在较明显的年际变化。呈现3个不同阶段:第一阶段,即20世纪90年代,物种数较高(蔡学军和田家怡,2000),群落中以个体较大的甲壳动物和软体动物占优势地位,环节动物多毛类物种数较前两者少;第二阶段,即2005–2010年,总物种数较1996年减少较为明显,约为1996年的1/3至1/5(郑莉,2007^①;王志忠等,2010;董贯仓等,2012a;刘志杰,2013)。优势类群在2005年为环节多毛类、软体动物和甲壳动物(刘志杰,2013),2008年,

软体动物和甲壳动物的物种数上升,环节动物多毛类的物种数下降(王志忠等,2010);之后,多毛类、软体动物和甲壳动物的物种数保持相近水平;第三阶段,即2016–2017年,群落总种数趋于稳定,并有逐步增加的态势。但随着时间的推移,环节动物多毛类种数增多而甲壳动物物种数降低。

2.2.2 优势种的变化

自20世纪90年代末至今,群落中的优势种发生了明显变化,具体表现为个体较小的多毛类、双壳类和甲壳动物逐步取代了原先个体大且经济价值高的甲壳动物和软体动物(表2,图3)。1996年,优势种为较大型的甲壳动物如日本大眼蟹、天津厚蟹(*Helice tientsinensis*)、豆形拳蟹(*Pyrhila pismus*)等,

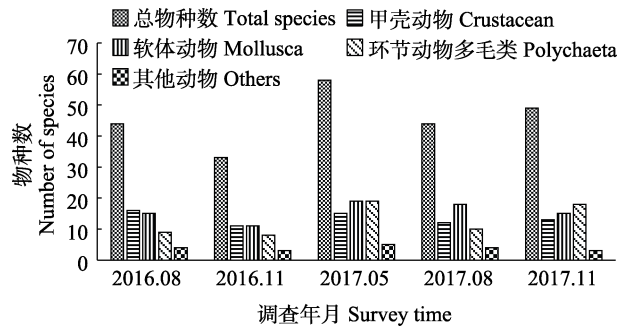


图2 黄河三角洲潮间带大型底栖动物物种数季节变化
Fig. 2 Seasonal changes in the species number of macrobenthos in intertidal zone of the Yellow River Delta

表1 黄河三角洲潮间带不同季节大型底栖动物优势种

Table 1 Dominant species of macrobenthos in different seasons in the intertidal zone of the Yellow River Estuary

类群 Group	物种 Species	2016.08	2016.11	2017.05	2017.08	2017.11
多毛类 Polychaeta	丝异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	0.056	0.074	0.035	—	0.066
	日本刺沙蚕 <i>Hediste japonica</i>	0.030	0.043	0.190	—	—
	浅古铜吻沙蚕 <i>Glycera subaenea</i>	—	—	—	0.021	—
甲壳动物 Crustacean	日本大眼蟹 <i>Macrophthalmus japonicus</i>	0.029	—	—	—	—
	秉氏泥蟹 <i>Ilyoplax pingi</i>	—	—	—	0.024	—
	朝鲜刺糠虾 <i>Orientomysis koreana</i>	—	—	—	0.048	—
软体动物 Mollusca	彩虹明樱蛤 <i>Iridona iridescens</i>	—	—	0.064	—	0.120
	大螺赢蜚 <i>Corophium major</i>	—	—	—	—	0.220
	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	0.250	0.039	0.081	—	—
	薄荚蛭 <i>Siliqua pulchella</i>	—	—	—	0.060	—
鱼类 Fish	弹涂鱼 <i>Periophthalmus modestus</i>	—	—	—	0.028	—
	黄鳍刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius flavimanus</i>	—	—	—	0.020	—

—表示该种未出现。“—” means no survey data.

① 郑莉 (2007) 黄河河口湿地大型底栖动物群落结构和多样性研究. 硕士学位论文, 山东农业大学, 山东泰安.

以及双壳类如文蛤 (*Meretrix meretrix*)、缢蛏 (*Sinonovacula constricta*)等; 2005–2008年, 双壳类在数量和生物量上均占明显优势, 形成以光滑河蓝蛤和四角蛤蜊 (*Mactra quadrangularis*)为优势种的群落。2010年, 多毛类日本刺沙蚕等占据优势地位, 但同时光滑河蓝蛤、彩虹明樱蛤、四角蛤蜊等双壳类物种的优势地位有所增加。至2016年本次调查, 小型的丝异蚓虫和日本刺沙蚕都成为优势种, 在2017年大螺赢蛭和彩虹明樱蛤也成为优势种。对比20世纪90年代的个体较大经济价值高的优势种, 目

前群落优势种多为个体小且经济价值较低的物种, 反映了黄河三角洲潮间带底栖动物小型化、低值化的变化趋势。

2.3 近岸浅海大型底栖动物物种组成

2016–2017年, 黄河三角洲近岸浅海共采集大型底栖动物99种, 其中底栖性鱼类27种, 占总物种数的27.27%; 软体动物33种, 占33.33%; 甲壳动物36种, 占总物种数的36.36%; 棘皮动物2种, 刺胞动物1种。物种数随调查月份不同而有所波动, 但总物种数和各类群物种数季节间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表2 黄河三角洲潮间带大型底栖动物优势种的年际变动

Table 2 Temporal changes of dominant species of macrobenthos in the intertidal zone of the Yellow River Estuary

调查时间 Survey time	优势种 Dominant species	优势度 Dominant value	文献 References
1996. 4–11	文蛤 <i>Meretrix meretrix</i>	–	Cai & Tian, 2000
	缢蛏 <i>Sinonovacula constricta</i>	–	
	四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	–	
	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	–	
	彩虹明樱蛤 <i>Iridona iridescens</i>	–	
	托氏蛤螺 <i>Umbonium thomasi</i>	–	
	日本大眼蟹 <i>Macrophthalmus japonicus</i>	–	
	天津厚蟹 <i>Helice tientsinensis</i>	–	
	豆形拳蟹 <i>Pyrhila pisum</i>	–	
	双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>	–	
	日本刺沙蚕 <i>Hediste japonica</i>	–	
	齿吻沙蚕属一种 <i>Nephtys</i> sp.	–	
	2005. 8	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	
四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>		0.043	
彩虹明樱蛤 <i>Iridona iridescens</i>		0.033	
寡节甘吻沙蚕 <i>Glycinde gurjanovae</i>		0.021	
2008.5, 2008.8	四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	–	Wang et al, 2010
	泥螺 <i>Bullacta caurina</i>	–	
	双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>	–	
	彩虹明樱蛤 <i>Iridona iridescens</i>	–	
	天津厚蟹 <i>Helice tientsinensis</i>	–	
	青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>	–	
	豆形拳蟹 <i>Pyrhila pisum</i>	–	
	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	–	
	托氏蛤螺 <i>Umbonium thomasi</i>	–	
	短文蛤 <i>Meretrix petechialis</i>	–	
2010.5, 2010.8	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	0.332	Dong et al, 2012b
	彩虹明樱蛤 <i>Iridona iridescens</i>	0.064	
	泥螺 <i>Bullacta caurina</i>	0.045	
	托氏蛤螺 <i>Umbonium thomasi</i>	0.043	
	短文蛤 <i>Meretrix petechialis</i>	0.043	
	拟沼螺属一种 <i>Assiminea</i> sp.	0.026	
	双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>	0.025	
	日本刺沙蚕 <i>Hediste japonica</i>	0.025	
	四角蛤蜊 <i>Mactra quadrangularis</i>	0.023	

表2 (续) Table 2 (continued)

调查时间 Survey time	优势种 Dominant species	优势度 Dominant value	文献 References
2016. 8	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	0.250	本研究 This study
	丝异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	0.056	
	日本刺沙蚕 <i>Hediste japonica</i>	0.030	
	日本大眼蟹 <i>Macrophthalmus japonicus</i>	0.029	
2016. 11	丝异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	0.074	
	日本刺沙蚕 <i>Hediste japonica</i>	0.043	
	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	0.039	
2017. 5	日本刺沙蚕 <i>Hediste japonica</i>	0.190	
	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	0.081	
	彩虹明樱蛤 <i>Iridona iridescens</i>	0.064	
2017. 8	丝异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	0.035	
	薄荚蛭 <i>Siliqua pulchella</i>	0.060	
	朝鲜刺糠虾 <i>Orientomysis koreana</i>	0.048	
	弹涂鱼 <i>Periophthalmus modestus</i>	0.028	
	秉式泥蟹 <i>Ilyoplax pingi</i>	0.024	
	浅古铜吻沙蚕 <i>Glycera subaenea</i>	0.021	
2017. 11	黄鳍刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius flavimanus</i>	0.020	
	大螺赢蜚 <i>Corophium major</i>	0.220	
	彩虹明樱蛤 <i>Iridona iridescens</i>	0.120	
	丝异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	0.066	

“-”为无调查数据。“-” means no survey data.

夏秋两季的总物种数比春季略高, 鱼类物种数夏季最多。

优势种有14种, 其中软体动物4种, 甲壳动物9种, 鱼类1种。优势地位比较明显的是纵肋织纹螺(*Nassarius variciferus*)、黄海褐虾(*Crangon uritai*)、脊尾白虾(*Exopalaemon carinicauda*)、葛氏长臂虾(*Palaemon gravieri*)和矛尾虾虎鱼(*Chaeturichthys stigmatias*)。

优势种也存在明显的季节性变化, 其中, 2016年8月6种, 为纵肋织纹螺、葛氏长臂虾、黄海褐虾、脊尾白虾、矛尾虾虎鱼和中国蛤蜊(*Macra chinensis*); 2016年11月6种, 为脊尾白虾、黄海褐虾、矛尾虾虎鱼、纵肋织纹螺、狭颚绒螯蟹(*Neeriocheir leptognathus*)和葛氏长臂虾; 2017年5月9种, 为寄居蟹(*Pagurus minutus*)、豆形拳蟹、脊尾白虾、中国蛤蜊、纵肋织纹螺、葛氏长臂虾、日本鲟(*Charybdis japonica*)、扁玉螺(*Neverita didyma*)和矛尾虾虎鱼; 2017年8月4种, 为纵肋织纹螺、豆形拳蟹、矛尾虾虎鱼和葛氏长臂虾; 2017年11月8种, 为纵肋织纹螺、矛尾虾虎鱼、日本褐虾(*Crangon hakodatei*)、扁

玉螺、葛氏长臂虾、口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)、日本鲟和脉红螺(*Rapana venosa*)。

不同采样区域优势种的空间分布差异性较明显, 以2016年8月为例, 在黄河口南部“大汶流”附近海域以小型纵肋织纹螺、日本拟平家蟹(*Heikeopsis japonica*)和红带织纹螺(*Nassarius succinctus*)为主要优势种; 黄河入海口区域以葛氏长臂虾、纵肋织纹螺和中国蛤蜊为主要优势种; 在黄河口北侧的“一千二”附近海域则是以脊尾白虾和葛氏长臂虾为主要优势种(图4)。

2.4 近岸浅海大型底栖动物资源物种组成长期变化

张旭等(2010)于2007年5月在黄河口近海进行底拖网调查, 共采集到大型底栖动物28种, 其中, 鱼类11种, 甲壳动物9种, 软体动物8种。本研究2017年5月调查共采集到大型底栖动物44种, 其中甲壳动物20种, 软体动物16种, 鱼类6种, 棘皮动物2种。相比于10年前的黄河口海域底栖动物调查结果, 甲壳动物和软体动物物种数明显增加, 鱼类明显减少。

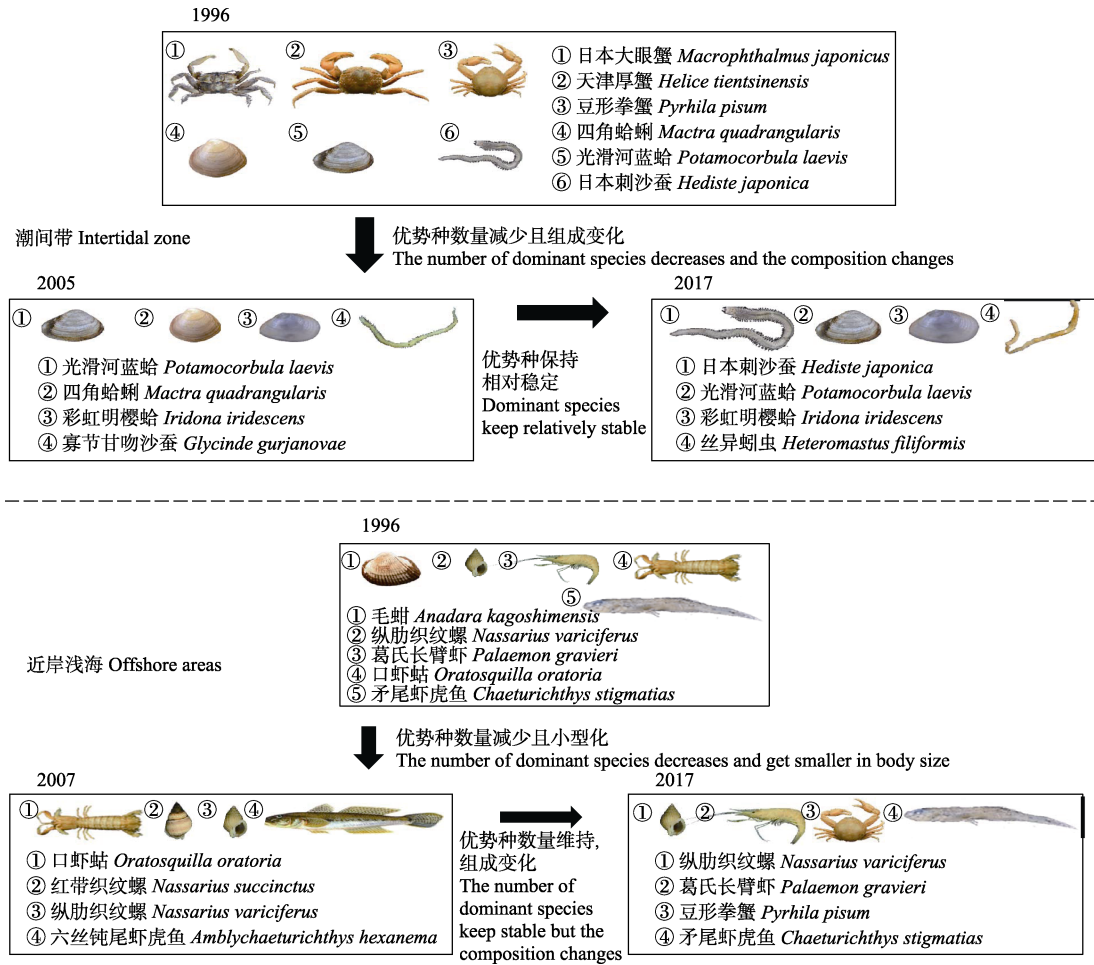


图3 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物优势种长周期演变

Fig. 3 Long-term succession of dominant species of macrobenthos in the intertidal zone and offshore areas of the Yellow River Delta

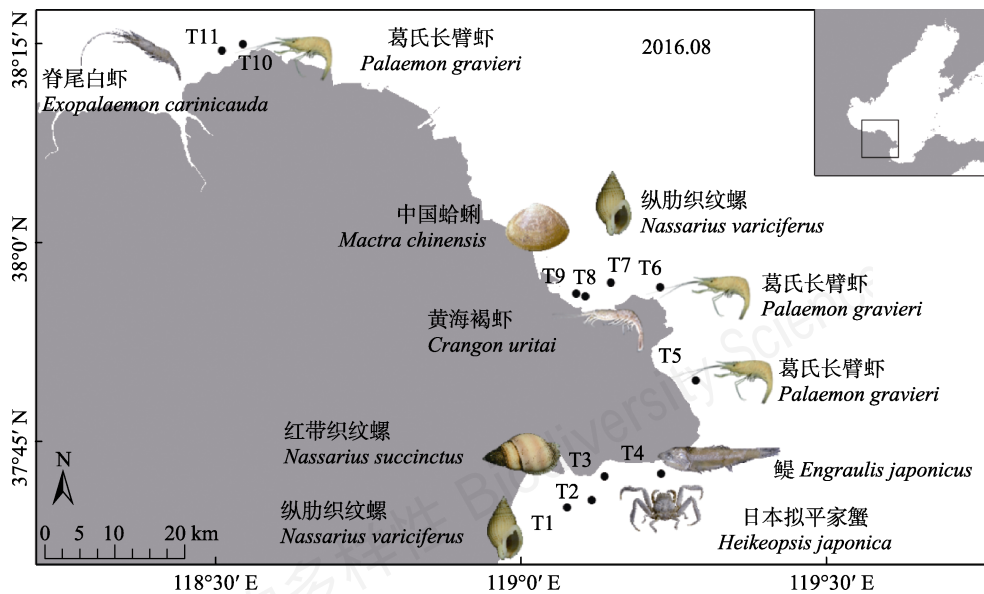


图4 黄河三角洲近岸浅海2016年8月各站位的优势种

Fig. 4 The spatial distribution of dominant species composition in offshore areas of the Yellow River Delta in August 2016

表3 黄河口近岸浅海大型底栖动物物种数的年际变动
Table 3 Interannual changes in the number of macrobenthos species in the offshore areas of the Yellow River Delta

调查时间 Survey time	物种 Species	参考文献 References
1996. 2; 1996. 5; 1996. 8; 1996.11	毛蚶 <i>Anadara kagoshimensis</i> 小刀蛭 <i>Culrellus attenuatus</i> 纵肋织纹螺 <i>Nassarius variciferus</i> 脊尾白虾 <i>Exopalaemon carinicauda</i> 葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i> 口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i> 绒毛细足蟹 <i>Raphidopus ciliatus</i> 三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i> 矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmaticas</i> 棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i> 短吻舌鳎 <i>Cynoglossus abbreviatus</i>	Gao & Tian, 1999
2007.5	口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i> 红带织纹螺 <i>Nassarius succinctus</i> 纵肋织纹螺 <i>Nassarius variciferus</i> 六丝钝尾虾虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>	Zhang et al, 2010
2017.5	寄居蟹 <i>Pagurus minutus</i> 豆形拳蟹 <i>Pyrhila pisum</i> 脊尾白虾 <i>Exopalaemon carinicauda</i> 中国蛤蜊 <i>Mactra chinensis</i> 纵肋织纹螺 <i>Nassarius variciferus</i> 葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i> 日本鲟 <i>Charybdis japonica</i> 扁玉螺 <i>Neverita didyma</i> 矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	本研究 This study

黄河三角洲近岸浅海优势种组成也发生了明显的年际变化(表 3, 图 3)。20 世纪 90 年代, 优势种尚有较多大型软体动物和甲壳动物及经济鱼类, 如毛蚶(*Anadara kagoshimensis*)、小刀蛭(*Cultellus attenuatus*)、脊尾白虾、葛氏长臂虾、口虾蛄、三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)、短吻舌鳎(*Cynoglossus abbreviatus*)等(高六礼和田家怡, 1999)。2007 年优势种只有 4 种, 小型软体动物和虾虎鱼就有 3 种, 具体包括纵肋织纹螺、红带织纹螺和六丝钝尾虾虎鱼(*Amblychaeturichthys hexanema*) (张旭等, 2010)。本研究(2017 年)调查的优势种包括纵肋织纹螺、扁玉螺、葛氏长臂虾、寄居蟹、豆形拳蟹和矛尾虾虎鱼。二十多年来, 群落中以小型甲壳动物和软体动物占主导地位, 优势种已明显小型化。

3 讨论

3.1 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成时空变化

黄河口海域季节变化明显, 夏季水温较高, 适宜暖温性和暖水性生物栖息和繁殖, 冬季水温较低, 适宜喜低温环境的生物栖息和繁衍, 其优越的生态环境使其成为多种生物产卵、索饵和栖息的场所(邓景耀和金显仕, 2000; 朱鑫华等, 2001)。黄河三角洲潮间带大型底栖动物群落主要由软体动物、甲壳动物和多毛类组成。其种类组成时空差异明显, 从季节而言, 春季的物种数高于夏秋两季, 但不同于李佳芮(2011)^①对黄河口的调查结果, 其结果显示秋季的物种数高于春季。这可能是由于各研究间取样范围不同造成了不同的季节变化规律。从优势种组成而言, 潮间带大型底栖动物优势种主要有丝异蚓虫、日本刺沙蚕和光滑河蓝蛤等多毛类和小型贝类。近 20 年来, 黄河三角洲潮间带优势种呈现个体大且经济价值较高的甲壳动物和软体动物逐步被个体较小且经济价值较低的多毛类、双壳类和甲壳动物取代的现象。

近年来, 黄河淡水输入量的逐年减少, 一方面直接引起黄河入海口临近海域表层盐度增加, 进一步影响到那些适宜低盐环境海洋生物的生长发育和一些鱼类的产卵数量; 另一方面也降低了河口营生物入海量和海洋生产力水平。海洋生境的变化是造成底栖生物物种多样性、数量和群落改变的主要驱动力(王全超等, 2013; Li et al, 2017)。本次调查发现黄河三角洲近岸浅海大型底栖动物群落中甲壳动物(36种)、鱼类(27种)和软体类(33种)占主体地位, 其中鱼类的物种数在不同季节变化较大, 2016年8月检获15种, 而2017年5月仅有6种。与20世纪末相比, 黄河三角洲近岸浅海大型底栖动物优势种组成发生了明显变化, 1996年以中大型的经济种居多, 而2007年和本研究以小型、低经济价值种居多。这也说明了黄河口邻近海域底栖生物虽然有一定程度的恢复, 但群落组成已经发生明显变化。

潮间带处于陆海过渡地带, 受陆海理化因子交替影响环境条件复杂多变, 且人类活动干扰频繁, 是国内外学者一直关注的研究区域(Morton &

① 李佳芮 (2011) 黄河三角洲潮间带大型底栖生物生态学研究. 硕士学位论文, 中国海洋大学, 青岛.

Morton, 1983)。一般而言, 潮间带区域内由于高、中和低潮区的环境差别较大, 大型底栖动物存在明显的分带现象, 即低潮区种数最多, 向高潮区依次递减, 体现了分布的连续性(Edgar & Barrett, 2002; Honkoop et al, 2006)。也有研究发现, 物种数和密度在中潮区最高, 而生物量在低潮区最大(Spruzen et al, 2008), 这与不同区域的环境异质性存在差异有关。黄河三角洲潮间带大型底栖动物的种类数量分布与生境理化性质及表层水体营养水平等都有较大关系(夏江宝等, 2009)。本次调查也发现, 黄河三角洲潮间带在不同潮区内也存在分带现象, 其中低潮区82种, 中潮区和高潮区各70种。由于高潮区和中潮区沉积物类型基本一致, 物种数在高、中潮区的分布相同, 而低潮区分布物种较多, 与滩涂上潮沟水系的连通性较好直接相关。自2002年实施的黄河调水调沙计划及受较强海洋动力的作用, 使得黄河口南部近几年开始出现冲蚀现象(杨江平等, 2013)。同时, 近年来该区域海水养殖尾水和污染物的排放均显著增加了黄河三角洲邻近海域水体中的无机氮浓度, 造成营养盐结构失衡(张继民等, 2010, 2012)。潮间带和近海环境因子的剧烈变化可能是造成该区域大型底栖动物群落结构变化的主要原因。

3.2 物种多样性变化的成因分析

本研究发现黄河三角洲潮间带和近岸浅海大型底栖动物物种组成和优势种都发生了明显变化, 个体也呈小型化趋势, 总体表现为自20世纪90年代末至今, 个体大的甲壳动物和软体动物经济类群逐渐被个体小的多毛类、双壳类和甲壳动物取代。引起上述变化的原因推测有以下几点。

(1)黄河淡水输入量与输沙量的减少。黄河淡水输入量和输沙量的减少直接加剧了三角洲海岸变化, 引起黄河口南部的海岸线侵蚀。1855年以来, 黄河三角洲平均每年形成21.3 km²的新滩涂(国家海洋局北海监测中心数据), 但在1986–1996年期间, 面积反而每年平均减少将近26 km²。滩涂面积的减少以及沉积物粒径的变化必然影响到黄河口潮间带和临近海域的大型底栖动物群落。此外, 黄河入海淡水量明显减少, 导致黄河口及邻近海域海水盐度明显上升, 以及黄河口西北部和南部营养盐逐年减少。而盐度的变化则限制了河口区生物的空间分布范围(Laprise & Dodson, 1993), 使得某些生物较

难适应剧烈变化的生境(Miller et al, 1985)。海水盐度的变化还会直接影响底栖生物的数量分布, 是造成底栖动物群落结构时空差异的重要原因。已有研究表明, 黄河水资源调度在常规年份需保证30亿m³入海淡水量, 才能营造近海河口低盐产卵场与栖息地环境(谷源泽等, 2019)。

(2)人为开发力度加大。受人类活动加剧的影响, 黄河三角洲呈现湿地面积减少、生物物种数和生态连通性降低的态势(刘玉斌等, 2019)。生态连通性的降低反映了人类活动和自然因素双重干扰下黄河三角洲海岸带生态系统格局及其物质、能量、生物、信息流等的变化(刘玉斌等, 2019)。此外, 近岸浅海区域的过度捕捞尤其是底拖网对大型底栖动物资源也产生明显的影响, 导致经济种衰退, 群落多样性降低。

(3)互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵。2003年互花米草被列入我国16种首批外来入侵种名单(Li et al, 2009; 鞠瑞亭等, 2012)。黄河三角洲地区为了消浪护堤、促淤造陆、改善海滩生态环境等目的, 于1990年前后在“五号桩”附近引种互花米草(张帆等, 2008), 由于互花米草有极强的耐盐、耐淹、繁殖和扩散能力, 引种后在我国海岸带快速蔓延, 截止到2019年, 黄河三角洲地区的互花米草面积已经达到4,300 ha, 对沿海滩涂湿地的生物多样性维持及生态安全造成了严重威胁(Li et al, 2009)。互花米草入侵在一定程度上改变了原沉积物的理化特征, 增加了土壤的含水量, 降低了土壤盐度, 并进一步影响到当地的生物群落和生态系统(彭容豪, 2009)。互花米草发达的根系影响了底栖动物的栖息和生长。互花米草入侵已严重影响黄河三角洲的生物多样性(陈中义, 2004; 田家怡等, 2008; 马强等, 2017; 陈潘等, 2019)。

参考文献

- Cai XJ, Tian JY (2000) Study on the diversity of intertidal zone animals in the Yellow River Delta. *Transaction of Oceanology and Limnology*, (4), 45–52. (in Chinese with English abstract) [蔡学军, 田家怡 (2000) 黄河三角洲潮间带动物多样性的研究. *海洋湖沼通报*, (4), 45–52.]
- Chen P, Zhang Y, Zhu XJ, Lu CH (2019) Ecological effects of invasion by the smooth cordgrass *Spartina alterniflora* on birds. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 2282–2290. (in Chinese with English abstract) [陈潘, 张燕, 朱晓静, 鲁长虎 (2019) 互花米草入侵对鸟类的生态影响. *生态学报*, 39,

2282–2290.]

- Chen YQ, Xu ZL, Wang YL, Hu FX, Hu H, Gu GC (1995) An ecological study on zooplankton in plume front zone of Changjiang (Yangtze) River estuarine area. I. Biomass distribution of dominant species. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2(1), 49–58. (in Chinese with English abstract) [陈亚瞿, 徐兆礼, 王云龙, 胡方西, 胡辉, 谷国传 (1995) 长江口河口锋区浮游动物生态研究. I. 生物量及优势种的平面分布. *中国水产科学*, 2(1), 49–58.]
- Chen ZY (2004) Ecological Impacts of the Introduced *Spartina alterniflora* Invasions in the Coastal Ecosystems of Chongming Dongtan, the Yangtze River Estuary. PhD dissertation, Fudan University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [陈中义 (2004) 互花米草入侵国际重要湿地崇明东滩的生态后果. 博士学位论文, 复旦大学, 上海.]
- Deng JY, Jin XS (2000) Study on fishery biodiversity and its conservation in Laizhou Bay and Yellow River Estuary. *Zoological Research*, 21, 76–82. (in Chinese with English abstract) [邓景耀, 金显仕 (2000) 莱州湾及黄河口水域渔业生物多样性及其保护研究. *动物学研究*, 21, 76–82.]
- Ding PX (2013) Evolution and Cause Analysis of Typical Coastal Zones in China During the Last 50 Years. Science Press, Beijing. (in Chinese) [丁平兴 (2013) 近50年我国典型海岸带演变过程与原因分析. 科学出版社, 北京.]
- Dong GC, Li XQ, Gao YF, Liu F, Qin YG, Wang YN (2012a) Community characteristics and space-time variances of the water area macrozoobenthos in the Huanghe River Delta. *Marine Environmental Science*, 31, 229–232. (in Chinese with English abstract) [董贯仓, 李秀启, 高云芳, 刘峰, 秦玉广, 王亚楠 (2012a) 黄河三角洲湿地水域底栖动物群落结构及其时空差异. *海洋环境科学*, 31, 229–232.]
- Dong GC, Li XQ, Liu F, Zhu SW, Liu C, Qin YG (2012b) Community characteristics of macrozoobenthos and environmental quality assessment in intertidal zone of the Huanghe Delta. *Marine Environmental Science*, 31, 370–374. (in Chinese with English abstract) [董贯仓, 李秀启, 刘峰, 朱士文, 刘超, 秦玉广 (2012b) 黄河三角洲潮间带底栖动物群落结构分析及环境质量评价. *海洋环境科学*, 31, 370–374.]
- Edgar GJ, Barrett NS (2002) Benthic macrofauna in Tasmanian estuaries: Scales of distribution and relationships with environmental variables. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 270, 1–24.
- Gao LL, Tian JY (1999) Diversity and protective measures of zoobenthos around the Huanghe Delta area. *Marine Environmental Science*, 18, 39–44. (in Chinese with English abstract) [高六礼, 田家怡 (1999) 黄河三角洲附近海域底栖动物多样性及其保护措施. *海洋环境科学*, 18, 39–44.]
- Gu YZ, Xu CL, Zhang ZH, Bi NS, Zhao LL, Liu YF, Zhou B (2019) Response of fresh water from Yellow River to marine ecological regulation. *Yellow River*, 41(8), 68–75. (in Chinese with English abstract) [谷源泽, 徐丛亮, 张朝晖, 毕乃双, 赵林林, 刘艳芬, 周斌 (2019) 黄河入海淡水对海洋生态调控响应研究. *人民黄河*, 41(8), 68–75.]
- Honkoop PJC, Pearson GB, Lavaleye MSS, Piersma T (2006) Spatial variation of the intertidal sediments and macrozoobenthic assemblages along Eighty-mile Beach, North-western Australia. *Journal of Sea Research*, 55, 278–291.
- Ju RT, Li H, Shih CJ, Li B (2012) Progress of biological invasions research in China over the last decade. *Biodiversity Science*, 20, 581–611. (in Chinese with English abstract) [鞠瑞亭, 李慧, 石正人, 李博 (2012) 近十年中国生物入侵研究进展. *生物多样性*, 20, 581–611.]
- Laprise R, Dodson JJ (1993) Nature of environmental variability experienced by benthic and pelagic animals in the St. Lawrence Estuary, Canada. *Marine Ecology Progress Series*, 94, 129–139.
- Leng Y, Liu YT, Liu S, Zhang HL, Zhang AJ, Liu XD (2013) Community structure and diversity of macrobenthos in southern intertidal zone of Yellow River Delta, China. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 3054–3062. (in Chinese with English abstract) [冷宇, 刘一霆, 刘霜, 张洪亮, 张爱君, 刘旭东 (2013) 黄河三角洲南部潮间带大型底栖动物群落结构及多样性. *生态学杂志*, 32, 3054–3062.]
- Li B, Liao CZ, Zhang XD, Chen HL, Wang Q, Chen ZY, Gan XJ, Wu JH, Zhao B, Ma ZJ, Cheng XL, Jiang LF, Chen JK (2009) *Spartina alterniflora* invasions in the Yangtze River Estuary, China: An overview of current status and ecosystem effects. *Ecological Engineering*, 35, 511–520.
- Li BQ, Li XJ, Bouma TJ, Soissons LM, Cozzoli F, Wang QC, Zhou ZQ, Chen LL (2017) Analysis of macrobenthic assemblages and ecological health of Yellow River Delta, China, using AMBI & M-AMBI assessment method. *Marine Pollution Bulletin*, 119, 23–32.
- Liu YB, Li BQ, Wang YJ, Chen LL, Li XW, Hou XY (2019) Evaluation of ecological connectivity in the coastal zone of Laizhou Bay-Yellow River Delta based on ecosystem service value. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 7514–7524. (in Chinese with English abstract) [刘玉斌, 李宝泉, 王玉珏, 陈琳琳, 李晓炜, 侯西勇 (2019) 基于生态系统服务价值的莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性评价. *生态学报*, 39, 7514–7524.]
- Liu ZJ (2013) Study on the Regional Differentiation and Evolution of Coastal Wetland in Yellow River Delta. PhD dissertation, Ocean University of China, Qingdao. (in Chinese with English abstract) [刘志杰 (2013) 黄河三角洲滨海湿地环境区域分异及演化研究. 博士学位论文, 中国海洋大学, 青岛.]
- Ma Q, Wu W, Tang CD, Niu DL, Wu JH, Ma ZJ (2017) Effects of habitat restoration on the diversity of bird and macrobenthos in the Chongming Dongtan wetland. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 41(1), 9–14. (in Chinese with English abstract) [马强, 吴巍, 汤臣栋, 钮栋梁, 吴纪华, 马志军 (2017) 崇明东滩湿地

- 互花米草治理对鸟类及底栖动物多样性的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 41(1), 9-14.]
- Margalef R (1968) Perspectives in Ecological Theory. University of Chicago Press, Chicago.
- Miller JM, Crowder LB, Moser ML (1985) Migration and utilization of estuarine nurseries by juvenile fishes: An evolutionary perspective. Contributions in Marine Science, 27, 338-352.
- Morton B, Morton J (1983) The Sea Shore Ecology of Hong Kong. Hong Kong University Press, Hong Kong.
- Peng RH (2009) The Effect of Exotic Plant *Spartina alterniflora* on Ecosystem Nitrogen Cycling in Estuarine Salt Marsh: A case study at Dongtan Wetland, Chongming Island, Shanghai. PhD dissertation, Fudan University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [彭容豪 (2009) 互花米草对河口盐沼生态系统氮循环的影响. 博士学位论文, 复旦大学, 上海.]
- Pielou EC (1975) Ecological Diversity. Wiley-Interscience, New York.
- Rees HL, Help C, Vincx M, Parker MM (1991) Benthic communities: Use in monitoring point-source discharges. Techniques in Marine Environmental Sciences, 16, 1-70.
- Shannon CE, Weaver W (1949) The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana.
- Spruzen FL, Richardson AMM, Woehler EJ (2008) Spatial variation of intertidal macroinvertebrates and environmental variables in Robbins Passage wetlands, NW Tasmania. Hydrobiologia, 598, 325-342.
- Sun XY, Su FZ, Lü TT, Zhang TY, Wu D, Fu M (2011) Analysis of temporal-spatial changes in wetlands over the Yellow River Estuary. Resources Science, 33, 2277-2284. (in Chinese with English abstract) [孙晓宇, 苏奋振, 吕婷婷, 仇天宇, 吴迪, 付敏 (2011) 黄河三角洲湿地资源时空变化分析. 资源科学, 33, 2277-2284.]
- Tian JY, Yu X, Shen BZ, Li JQ (2008) Effect of an alien invasive species *Spartina anglica* on birds in shoal in Yellow River Delta. Journal of Environmental Management College of China, 18(3), 87-90. (in Chinese with English abstract) [田家怡, 于祥, 申保忠, 李建庆 (2008) 黄河三角洲外来入侵物种米草对滩涂鸟类的影响. 中国环境管理干部学院学报, 18(3), 87-90.]
- Tian SY, Zhang WL, Zhang R (2009) Role of macrobenthos in marine ecosystem. Journal of Salt and Chemical Industry, 38(2), 50-54. (in Chinese with English abstract) [田胜艳, 张文亮, 张锐 (2009) 大型底栖动物在海洋生态系统中的作用. 盐业与化工, 38(2), 50-54.]
- Wang QC, Han QX, Li BQ (2013) Macrobenthic fauna in the intertidal and offshore areas of Zhangzi Island. Biodiversity Science, 21, 15-22. (in Chinese with English abstract) [王全超, 韩庆喜, 李宝泉 (2013) 辽宁獐子岛马牙滩潮间带及近岸海区大型底栖动物群落特征. 生物多样性, 21, 15-22.]
- Wang XC, Li XZ, Wang HF, Li BQ, Wang JB, Yu ZS (2008) Macrobenthic ecology of the intertidal zones of Chajiandao, Dakouhedao and Wangzidao of Yellow River Estuary in autumn. Chinese Journal of Zoology, 43(6), 77-82. (in Chinese with English abstract) [王晓晨, 李新正, 王洪法, 李宝泉, 王金宝, 于子山 (2008) 黄河口岔尖岛、大口河岛和望子岛潮间带秋季大型底栖动物生态学调查. 动物学杂志, 43(6), 77-82.]
- Wang ZZ, Duan DX, Zhang JL, Chen SJ, Du XH, Liu YC, Sui KG, Zhao L (2010) A study on macrobenthic biomass of the Yellow River Estuary intertidal in 2008. Journal of Guangdong Ocean University, 30(4), 29-35. (in Chinese with English abstract) [王志忠, 段登选, 张金路, 陈述江, 杜兴华, 刘艳春, 隋凯港, 赵磊 (2010) 2008年黄河入海口潮间带大型底栖动物生物量研究. 广东海洋大学学报, 30(4), 29-35.]
- Wu JJ, Li YZ, Yu LJ, Gao M, Wu XQ, Bi XL (2018) Dynamic changes and driving factors of landscape connectivity for natural wetland in Yellow River Delta. Ecology and Environmental Sciences, 27, 71-78. (in Chinese with English abstract) [吴晶晶, 栗云召, 于良巨, 高猛, 吴晓青, 毕晓丽 (2018) 黄河三角洲自然湿地景观连接度动态变化及其驱动因素分析. 生态环境学报, 27, 71-78.]
- Xia JB, Li CR, Xu JW, Zheng L, Liu LJ (2009) Quantitative characteristics of macrobenthos in the Yellow River Delta estuary. Ecology and Environmental Sciences, 18, 1368-1373. (in Chinese with English abstract) [夏江宝, 李传荣, 许景伟, 郑莉, 刘立杰 (2009) 黄河三角洲滩涂区大型底栖动物群落数量特征. 生态环境学报, 18, 1368-1373.]
- Yan J, Xu Y, Sui JX, Li XZ, Wang HF, Zhang BL (2017) Long-term variation of the macrobenthic community and its relationship with environmental factors in the Yangtze River Estuary and its adjacent area. Marine Pollution Bulletin, 123, 339-348.
- Yang JP, Li GX, Xu JS (2013) Coastline evolution near the Yellow River mouth and stability analysis of the nearby artificial island. Marine Geology & Quaternary Geology, 33(2), 33-40. (in Chinese with English abstract) [杨江平, 李广雪, 徐继尚 (2013) 黄河口岸线演变及人工岛稳定性分析. 海洋地质与第四纪地质, 33(2), 33-40.]
- Zhang F, Liu CA, Jiang Y (2008) Study of the tidal salt marsh wetland degradation mechanism. Ocean Development and Management, 25, 99-101. (in Chinese) [张帆, 刘长安, 姜洋 (2008) 滩涂盐沼湿地退化机制研究. 海洋开发与管理, 25, 99-101.]
- Zhang JM, Liu S, Yin WH, Yang JQ, Ye SF (2012) Primary indicators of integrated carrying capacity in the region of the Yellow River Estuary and its application. Marine Science Bulletin, 31, 496-501. (in Chinese with English abstract) [张继民, 刘霜, 尹韦翰, 杨建强, 叶属峰 (2012) 黄河口区域综合承载力评估指标体系初步构建及应用. 海洋通报, 31, 496-501.]
- Zhang JM, Liu S, Zhang Q, Li QL (2010) Population variation

- of phytoplankton around Yellow River Estuary. *Marine Environmental Science*, 29, 834–837. (in Chinese with English abstract) [张继民, 刘霜, 张琦, 李钦亮 (2010) 黄河口附近海域浮游植物种群变化. *海洋环境科学*, 29, 834–837.]
- Zhang X, Zhang XM, Gao TX (2010) Comparative analysis on catch composition with two fishing gears at Yellow River Estuary in spring. *South China Fisheries Science*, 6(1), 59–67. (in Chinese with English abstract) [张旭, 张秀梅, 高天翔 (2010) 春季黄河口海域2种网具渔获物组成的比较分析. *南方水产*, 6(1), 59–67.]
- Zhang XL, Li PY (2008) Coastal erosion and its environmental effect in the Modern Yellow River Delta. *Marine Environmental Science*, 27, 475–479. (in Chinese with English abstract) [张晓龙, 李培英 (2008) 现代黄河三角洲的海岸侵蚀及其环境影响. *海洋环境科学*, 27, 475–479.]
- Zhu XH, Miao F, Liu D, Xian WW (2001) Spatiotemporal pattern and dominant component of fish community in the Yellow River Estuary and its adjacent waters. *Studia Marina Sinica*, 43, 141–151. (in Chinese with English abstract) [朱鑫华, 缪锋, 刘栋, 钱薇薇 (2001) 黄河口及邻近海域鱼类群落时空格局与优势种特征研究. *海洋科学集刊*, 43, 141–151.]
- Zhang ZH, Hu CH (2007) Variation of processes of flow and sediment and its effect on epeirogenesis of seacoast in the Yellow River estuary. *Advances in Water Science*, 18, 336–341. (in Chinese with English abstract) [张治昊, 胡春宏 (2007) 黄河口水沙过程变异及其对河口海岸造陆的影响. *水科学进展*, 18, 336–341.]
- (责任编辑: 徐奎栋 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种名录

Appendix 1 Macrobenthic species list in the intertidal zone and offshore areas of the Yellow River Delta
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020164-1.pdf>

李宝泉, 姜少玉, 吕卷章, 陈琳琳, 闫朗, 刘春云, 李晓静, 宋博, 李新正 (2020) 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成及长周期变化. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1511–1522. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020164>

附录1 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种名录

Appendix 1 Macrobenthic species list in the intertidal zone and offshore areas of the Yellow River Delta

物种名 Species name	2016.08		2016.11		2017.05		2017.08		2017.11	
	潮间带	近岸浅海	潮间带	近岸浅海	潮间带	近岸浅海	潮间带	近岸浅海	潮间带	近岸浅海
甲壳动物 Crustacean										
秉氏泥蟹 <i>Ilyoplax pingi</i>	+				+		+		+	
博氏双眼钩虾 <i>Ampelisca bocki</i>										+
朝鲜刺糠虾 <i>Orientomysis koreana</i>					+		+			+
朝鲜马尔他钩虾 <i>Melita koreana</i>			+		+		+			+
大螯蜚 <i>Grandidierella</i> sp.					+					+
大螺赢蜚 <i>Corophium major</i>										+
东方新糠虾 <i>Neomysis orientalis</i>		+	+	+						
东方长眼虾 <i>Ogyrides orientalis</i>		+		+						
豆形拳蟹 <i>Pyrhila pisum</i>	+	+		+	+	+		+		+
端正拟关公蟹 <i>Paradorippe polita</i>				+						
葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>		+		+			+		+	+
钩虾一种 <i>Gammarus</i> sp.	+		+							
光背节鞭水虱 <i>Synidotea laevidorsalis</i>		+		+						
螺赢蜚属一种 <i>Corophium</i> sp.			+							
海岸水虱 <i>Ligia oceanica</i>						+				
河螺赢蜚 <i>Monocorophium acherusicum</i>			+				+			
红线黎明蟹 <i>Matuta planipes</i>		+				+		+		+
厚蟹属 <i>Helice</i> sp.	+									
黄海褐虾 <i>Crangon uritai</i>		+		+		+				
脊尾白虾 <i>Exopalaemon carinicauda</i>		+		+		+				+

李宝泉, 姜少玉, 吕卷章, 陈琳琳, 闫朗, 刘春云, 李晓静, 宋博, 李新正 (2020) 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成及长周期变化. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1511–1522. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020164>

寄居蟹 <i>Pagurus benedicti</i>		+		+		+		+		+
锯齿长臂虾 <i>Palaemon serrifer</i>	+									
锯额瓷蟹 <i>Pisidia serratifrons</i>								+		
锯脚泥蟹 <i>Ilyoplax dentimerosa</i>	+			+						+
颗粒拟关公蟹 <i>Paradorippe granulata</i>		+		+		+		+		+
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>		+		+		+		+	+	+
宽身大眼蟹 <i>Macrophthalmus (Macrophthalmus) abbreviatus</i>						+		+		+
隆线强蟹 <i>Eucrate crenata</i>		+		+		+		+		+
泥虾 <i>Laomedea astacina</i>	+									
拟棒鞭水虱 <i>Cleantiella isopus</i>		+								
拟厚蟹属一种 <i>Helicana</i> sp.	+					+				
平尾棒鞭水虱 <i>Cleantioides planicauda</i>				+						
强壮藻钩虾 <i>Ampithoe valida</i>	+									
日本大螯蜚 <i>Grandierella japonica</i>	+		+			+				+
日本大眼蟹 <i>Macrophthalmus (Mareotis) japonicus</i>	+		+	+		+		+	+	+
日本鼓虾 <i>Alpheus japonicus</i>		+		+		+		+		+
日本褐虾 <i>Crangon hakodatei</i>								+		+
日本拟平家蟹 <i>Heikeopsis japonica</i>	+			+		+		+	+	+
日本绒螯蟹 <i>Eriocheir japonica</i>										+
日本鲟 <i>Charybdis (Charybdis) japonica</i>	+			+		+		+		+
日本游泳水虱 <i>Natatolana japonensis</i>										+
绒毛近方蟹 <i>Hemigrapsus penicillatus</i>						+		+		+
绒毛细足蟹 <i>Raphidopus ciliatus</i>				+				+		
肉球近方蟹 <i>Hemigrapsus sanguineus</i>						+		+		
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>				+		+		+		+
双斑鲟 <i>Charybdis (Gonionoptunus) bimaculata</i>								+		+

李宝泉, 姜少玉, 吕卷章, 陈琳琳, 闫朗, 刘春云, 李晓静, 宋博, 李新正 (2020) 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成及长周期变化. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1511–1522. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020164>

渤海格鳞虫 <i>Gattyana pohaiensis</i>		+		+		+
叉毛矛毛虫 <i>Phylo ornatus</i>						
刺缨虫 <i>Potamilla</i> sp.				+		+
短叶索沙蚕 <i>Lumbrineris japonica</i>	+	+	+		+	+
多鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys polybranchia</i>						
钩小蛇锥虫 <i>Boccardiella hamata</i>		+		+		+
寡节甘吻沙蚕 <i>Glycinde gurjanovae</i>				+		+
管缨虫 <i>Chone infundibuliformis</i>				+		+
加州齿吻沙蚕 <i>Nephtys californiensis</i>		+				
尖刺缨虫 <i>Perkinsiana acuminata</i>	+	+	+		+	+
尖锥虫 <i>Scoloplos armiger</i>		+				
膜质伪才女虫 <i>Pseudopolydora kempfi</i>		+			+	+
囊叶齿吻沙蚕 <i>Nephtys caeca</i>	+			+		
拟特须虫 <i>Paralacydonia paradoxa</i>				+		
浅古铜吻沙蚕 <i>Glycera subaenea</i>				+	+	
强吻沙蚕 <i>Glycera robusta</i>				+		+
日本刺沙蚕 <i>Hediste japonica</i>	+		+		+	+
乳突半突虫 <i>Phyllodoce papillosa</i>				+		+
深钩毛虫 <i>Sigambra bassi</i>	+			+		+
双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>				+		+
丝异蚓虫 <i>Heteromastus filiformis</i>	+			+		
吻蛇锥虫 <i>Boccardia proboscidea</i>				+		
缨鳃虫 <i>Sabella spallanzanii</i>					+	+
长双须虫 <i>Eteone longa</i>	+				+	
长吻沙蚕 <i>Glycera chirori</i>					+	+
长锥虫 <i>Leitoscoloplos pugettensis</i>	+				+	+

李宝泉, 姜少玉, 吕卷章, 陈琳琳, 闫朗, 刘春云, 李晓静, 宋博, 李新正 (2020) 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成及长周期变化. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1511–1522. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020164>

中锐吻沙蚕 <i>Glycera unicornis</i>								+			+	
锥唇吻沙蚕 <i>Glycera onomichiensis</i>		+									+	
鱼类 Fish												
斑鲈 <i>Konosirus punctatus</i>												+
半滑舌鳎 <i>Cynoglossus semilaevis</i>			+									
大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>			+			+						
单鳍鲻 <i>Draculo mirabilis</i>			+									
弹涂鱼 <i>Periophthalmus modestus</i>		+				+				+		+
弹涂鱼属一种 <i>Periophthalmus</i> sp.											+	
多棘小公鱼 <i>Stolephorus shantungensis</i>			+									
方氏云鳎 <i>Pholis fangi</i>								+				
褐牙鲈 <i>Paralichthys olivaceus</i>											+	
黑棘鲷 <i>Acanthopagrus schlegelii</i>											+	
黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>			+								+	
黄鳍刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius flavimanus</i>								+		+		
假睛东方鲀 <i>Takifugu pseudommmus</i>			+									
焦氏舌鳎 <i>Cynoglossus joyneri</i>									+		+	+
拉氏狼牙虾虎鱼 <i>Odontamblyopus lacepedii</i>											+	
莱氏舌鳎 <i>Cynoglossus lighti</i>			+			+			+		+	+
狼虾虎鱼 <i>Odontamblyopus rubicundus</i>			+			+			+			
六丝钝尾虾虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>							+			+		
矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>			+			+		+	+		+	+
普氏吻虾虎鱼 <i>Acentrogobius pflaumii</i>		+									+	
七棘裸身虾虎鱼 <i>Gymnogobius heptacanthus</i>									+			
日本带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i>											+	
日本海马 <i>Hippocampus mohnikei</i>		+				+			+		+	+

李宝泉, 姜少玉, 吕卷章, 陈琳琳, 闫朗, 刘春云, 李晓静, 宋博, 李新正 (2020) 黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成及长周期变化. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1511–1522. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020164>

石鲈 <i>Kareius bicoloratus</i>		+		+					+
松江鲈 <i>Trachidermus fasciatus</i>		+		+					
鳀 <i>Engraulis japonicus</i>		+							
纹缟虾虎鱼 <i>Tridentiger trignocephalus</i>								+	
五带高鳍虾虎鱼 <i>Pterogobius zacalles</i>		+							
星点东方鲀 <i>Takifugu niphobles</i>									+
长丝犁突虾虎鱼 <i>Myersina filifer</i>		+							
棘皮动物 Echinodermata									
棘刺锚参 <i>Protankyra bidentata</i>		+						+	+
日本倍棘蛇尾 <i>Amphioplus japonicus</i>								+	
其他 others									
海葵 <i>Actiniaria</i> sp.				+				+	+
海绵一种 Porifera									+
纽虫 Nemertinea		+						+	



•研究报告•

黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物 丰富度格局及其影响因子

孙 远 胡维刚 姚树冉 孙 颖 邓建明*

(兰州大学生命科学学院, 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 生物多样性的尺度空间分布格局及其形成机制一直是生态学和生物地理学的核心内容。黄河流域是我国重要的生态屏障, 明确该区域动植物多样性分布格局及其影响因素, 对我国黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。本研究通过收集黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物分布数据, 结合气候、环境异质性和人类活动等信息, 探讨了黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物物种丰富度格局及其主要影响因素。结果表明, 黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物物种丰富度在区域尺度具有相似分布格局: 南部山地动植物物种丰富度最高, 而东部高寒区和北部干旱区物种丰富度最低。回归树模型表明, 冠层高度范围和净初级生产力范围分别是黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物物种丰富度最重要的预测因子; 当移除空间自相关影响后, 环境异质性和气候因子依然对区域尺度的动植物物种丰富度具有较高且相似的解释度。表明环境异质性和气候共同决定了黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物物种丰富度格局, 而人类使用土地面积并不是影响黄河流域动植物物种丰富度格局的主要因子。因此, 在未来的研究中若针对不同区域筛选出更精准的环境驱动因子或选用更多不同类别的环境异质性因子进行分析, 将有助于更深入理解物种多样性格局的成因。

关键词: 被子植物; 陆栖脊椎动物; 空间分布格局; 气候; 环境异质性; 黄河流域

Geographic patterns and environmental determinants of angiosperm and terrestrial vertebrate species richness in the Yellow River basin

Yuan Sun, Weigang Hu, Shuran Yao, Ying Sun, Jianming Deng*

School of Life Sciences, State Key Laboratory of Grassland Agro-Ecosystem, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract: Large-scale spatial distribution patterns of biodiversity and understanding the mechanisms that form these patterns are core questions for the fields of ecology and biogeography. The Yellow River basin is an important ecological barrier in China. Therefore, understanding the distribution patterns of plant and animal richness and what influences these patterns for is important for the ecological conservation and high-quality development of the Yellow River basin. Here, we used collected data for several variables (species spatial distribution, climate, environmental heterogeneity, and human activity) to explore the spatial distribution patterns of species richness and their main influencing factors for angiosperms and terrestrial vertebrates in the Yellow River basin. We found that the species richness for angiosperms and terrestrial vertebrates had similar distribution patterns at regional scale. Species richness was highest in the southern mountain region and lowest in the eastern alpine region and the northern arid region. Tree regression models showed that the canopy height range was the most important predictor for angiosperm species richness and net primary productivity range was the most important predictor for terrestrial vertebrate species richness. When the spatial autocorrelation was removed, environmental heterogeneity and climatic factors still had important and similar explanations for species richness at regional scale. The results indicate that species richness is determined by environmental heterogeneity and climate. Human activity was not a main influencing factor for species richness pattern. For future research, choosing more accurate environmental

收稿日期: 2020-09-01; 接受日期: 2020-12-15

基金项目: 生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)、国家自然科学基金项目(31770430, 31700463)、国家科技基础资源调查专项项目(2019FY102002)和甘肃省创新基地和人才计划(第二批)项目(20190323)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: dengjm@lzu.edu.cn

driving factors for different regions or selecting different types of environmental heterogeneity factors for analyses will help with understanding the causes of species diversity patterns more deeply.

Key words: angiosperms; terrestrial vertebrates; spatial distribution patterns; climate; environmental heterogeneity; Yellow River basin

生物多样性的尺度空间分布格局及其形成机制一直是生态学和生物地理学的核心内容,同时也是实施生物多样性保护(比如优先保护区域的划定等)必不可少的参考依据(Kerr & Packer, 1997; Kreft & Jetz, 2007; Jenkins et al, 2013)。想要探究生物多样性的尺度分布格局,就必须先明确某个特定区域内所有物种的实际分布范围。通常情况下,动植物多样性的尺度分布信息主要是通过检索文献资料(包括动植物志书、图鉴等)、标本查阅以及野外调查等方式获取。近年来,我国已经开展了大量的野外调查工作,比如“中国山地植物物种多样性调查计划”等(方精云等, 2004)。但我国地域辽阔、地形复杂,是世界上生物多样性最丰富的12个地区之一,野外调查难度极大,研究依然薄弱。

目前,国内关于动植物多样性尺度分布格局的研究涉及诸多生物类群,主要包括:哺乳动物(林鑫等, 2009; Xu et al, 2016)、鸟类(Zhao et al, 2006; 林鑫等, 2009)、两栖动物(Zhao et al, 2006)、爬行动物(Xu et al, 2014)和维管植物(Wang et al, 2011; Li et al, 2013; Xu et al, 2016; Lu et al, 2018)等。同时,国内外学者也提出了不同的假说用于解释生物多样性分布格局,例如现代气候假说(Currie, 1991; O'Brien, 1998; O'Brien et al, 2000)、环境异质性假说(Shmida & Wilson, 1985; Kerr & Packer, 1997; Stein et al, 2014)、历史成因假说(Ricklefs, 1987)以及人类活动影响(Vitousek et al, 1997; Newbold et al, 2015)等。这些假说并不互相排斥,往往共同解释了生物多样性的空间格局(Kreft & Jetz, 2007)。然而,目前对于何种假说或者因子主要解释了生物多样性的空间分布格局,依然存在广泛争议。

毫无疑问,生物多样性正面临着来自人类活动导致的各方面压力,例如生境退化或转变、直接采挖或砍伐、环境污染以及气候变化等(Tittensor et al, 2014; 蒋志刚等, 2016)。然而,人类活动对生物多样性的影响在不同空间尺度上不尽相同。例如,有研究表明人类活动显著降低了局域生物多样性。

Newbold等(2015)通过量化局域生物多样性对土地利用改变的响应发现,在人类活动影响最严重的生境中,物种丰富度平均降低76.5%,总多度降低39.5%。在区域尺度上,人类活动如何影响生物多样性仍缺乏一致的结论。比如,有研究表明,人类活动对我国木本植物和陆栖脊椎动物物种丰富度仅具有很微弱的影响(Wang et al, 2011; Xu et al, 2014);人口密度与不同类群物种丰富度之间存在正相关关系(Luck, 2007)。

黄河是我国第二大河,发源于青海省巴颜喀拉山,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东 9 个省(区)。黄河干流通常以内蒙古的河口镇和河南郑州的桃花峪为分界点,划分为上、中、下游。黄河流域内地势西高东低,高差悬殊,形成自西而东、由高及低的三级阶梯,总面积约为 79.5 万 km²,涵盖南温带、中温带和高原气候区,属于干旱、半干旱和半湿润地带,主要植被类型包括荒漠、草原、灌木、森林等。黄河流域是我国重要的生态屏障,其生态保护与高质量发展已上升为重大国家战略,研究该区域生物多样性分布格局及其形成机制具有重要意义。到目前为止,我国生物多样性的尺度格局及其形成机制的研究大多在全国或省级尺度上进行,缺乏专门针对黄河流域的区域尺度研究。全国尺度的研究表明,黄河流域动植物多样性普遍较低(林鑫等, 2009; Xu et al, 2016; Lu et al, 2018),但其影响因素仍不明确。

鉴于此,本文以黄河流经的 66 个地市(州、盟)为研究区域(总面积约为 160 万 km²),根据相关地理位置进一步将其划分为上游、中游和下游(图 1),通过收集被子植物和陆栖脊椎动物(主要包括哺乳动物、两栖动物和鸟类)物种分布数据,结合气候、环境异质性和人类活动(人类使用土地面积)等信息,初步探讨了黄河流域动植物物种多样性格局及其成因。在气候变化和人类活动不断加剧的背景下,本研究将为维持该区域生态安全和高质量发展提供基础数据与理论依据。

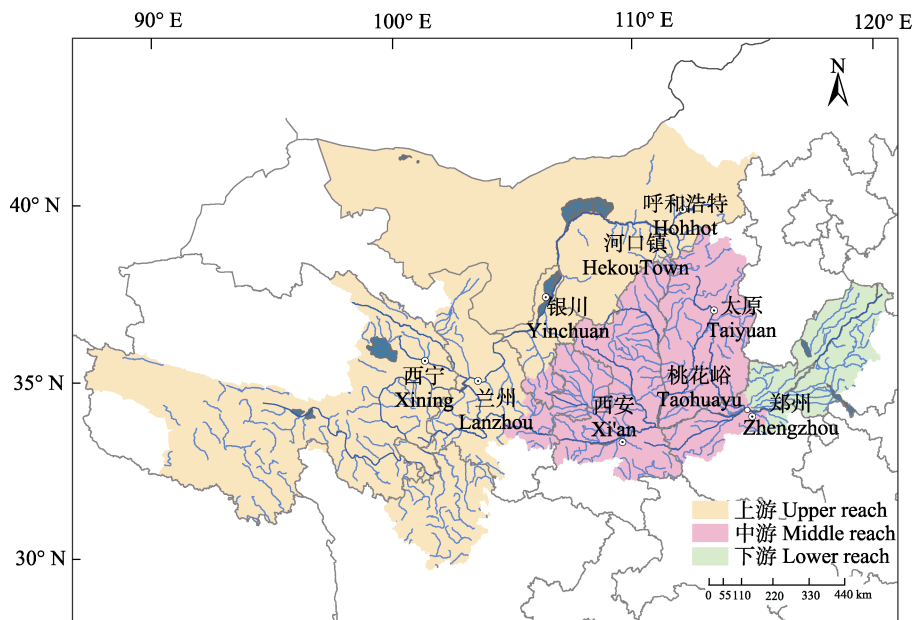


图1 黄河流域地市(州、盟)位置示意图

Fig. 1 Location of the cities (prefecture or league) involved in the Yellow River basin

1 材料和方法

1.1 物种分布数据

本研究中被子植物分布数据主要来源于Lu等(2018), 哺乳动物和两栖动物分布数据来源于国际自然保护联盟(Union for Conservation of Nature, IUCN; www.iucn.org), 鸟类分布数据来源于国际鸟盟(Birdlife International; www.birdlife.org)。本文定义的黄河流域范围为黄河干流及其支流所流经的所有地级行政区, 黄河流域边界数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>), 中国地图和地市行政边界数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。为了消除调查面积对物种丰富度的影响, 将黄河流域边界范围图层在ArcGIS 10.5中重采样为100 km×100 km的等面积栅格, 共得到222个栅格, 同时去除面积小于4,000 km²的栅格, 最后统计单个栅格内出现的物种数量。

1.2 环境因子数据

为了分析环境因子对黄河流域动植物多样性格局的影响, 本文使用了4类共11个环境预测变量(表1)。包括: (1)气候因子, 包括年平均温度(mean annual temperature, TEM)、年降水量(mean annual precipitation, PRE)、温度季节性(temperature

seasonality, TSN) 和降水季节性(precipitation seasonality, PSN); (2)净初级生产力(net primary productivity, NPP); (3)环境异质性因子(各因子在单个栅格内的跨幅), 包括温度范围(temperature range, TEM.ra)、降水范围(precipitation range, PRE.ra)、海拔范围(elevation range, ELE.ra)、NPP范围(NPP range, NPP.ra)和冠层高度范围(vegetation height range, HEL.ra); (4)人类使用土地面积(human used areas, HUA)。在构建模型前, 使用方差膨胀因子(variance inflation factors, VIF)和Pearson相关系数检测预测因子之间的共线性, 发现NPP和NPP.ra、TEM.ra和ELEV.ra之间具有强烈的共线性(VIF>10)。为了最小化共线性的影响, 去除了NPP和TEM.ra, 使得所有变量的VIF值都小于10且变量之间的相关系数小于0.85。

以上环境数据中, 气候数据来自于WorldClim数据库(Hijmans et al, 2005), 图2a、2b分别表示黄河流域年均温和年降水量的分布图。海拔地形数据来源于美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM) (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>; 图2c)。净初级生产力数据来自于蒙大拿大学的美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)对地观测系列卫星(Earth Observing

表1 黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物丰富度以及各环境变量的基本统计信息

Table 1 Descriptive statistics of species richness and environmental variables in the Yellow River basin

	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean
物种丰富度 Species richness			
被子植物 Angiosperms	279	5,076	1,301
陆栖脊椎动物 Terrestrial vertebrates	81	528	232
环境因子 Environmental variables			
人类使用土地面积 Human used areas (HUA, km ²)	0.00	9,967.42	2,337.76
年均温 Mean annual temperature (TEM, °C)	-7.50	14.53	5.04
温度季节性 Temperature seasonality (TSN, °C)	6.01	13.63	9.70
年降水量 Annual precipitation (PRE, mm)	36.04	979.78	404.99
降水季节性 Precipitation seasonality (PSN, mm)	68.62	117.98	95.84
净初级生产力 Net primary productivity (NPP, gC/m ²)	0.22	674.55	207.16
温度范围 Temperature range (TEM.ra, °C)	0.60	23.70	7.61
降水范围 Precipitation range (PRE.ra, mm)	17.00	523.00	174.28
海拔范围 Elevation range (ELE.ra, m)	33.00	5,048.00	1,356.22
净初级生产力范围 Net primary productivity range (NPP.ra, gC/m ²)	1.20	1,274.60	397.63
冠层高度范围 Canopy height range (HEI.ra, m)	3.00	43.00	24.05

Satellites, EOS) 项目 (<http://www.ntsg.umd.edu/project/modis/mod17.php>; 图2d)。冠层高度数据来自全球森林冠层高度数据(Simard et al, 2011; 图2e)。以上数据空间分辨率约为1 km × 1 km。人类活动数据来源于全国地理信息资源目录服务系统平台的GlobeLa-nd30 数据集 (<http://www.webmap.cn/mapDataAction.do?method=globalLandCover>; 图2f), 空间分辨率为30 m × 30 m, 一个栅格里面的人类使用土地面积为人造表面和耕地面积的总和。

1.3 统计分析

使用多元回归树(multivariate regression trees, MRT; De'Ath & Fabricius, 2000)和多元线性回归模型分析物种丰富度与预测变量之间的关系。

回归树的构建包括两个过程: 一是树的构建。即采用二元递归分解法。回归树每次都选择当前数据集中具有最小Gini信息增益的特征作为节点, 将数据集分解到不同子集当中。二是树的修剪。以上过程产生的树往往比较大, 对训练集很可能过度拟合。采用1-SE规则(De'Ath et al, 2002)对树进行修剪, 即与具有最小交叉验证相对误差(cross-validated relative error)的树之间的差异小于1个标准误且分裂次数更少的树视为最优树。我们分别将被子植物物种丰富度和陆栖脊椎动物物种丰富度作为响应变量, 相应环境因子作为预测变量(表1), 建立多

元回归树模型。

多元线性回归采用最小二乘法(ordinary least squares, OLS)进行拟合, 同样分别将动植物物种丰富度作为因变量, 上述环境因子作为自变量进行分析(表1)。需要说明的是, 鉴于被子植物物种丰富度会影响陆栖脊椎动物物种丰富度, 当使用多元线性回归分析动物物种丰富度与预测变量关系时, 将被子植物物种丰富度作为预测变量之一进行拟合。物种丰富度数据通常呈现非正态分布, 为了避免数据分布的偏态对统计分析带来的影响, 在进行多元回归分析前, 将动植物物种丰富度数据进行对数(log)转换; 同时为了使模型系数可以比较, 也将所有环境因子进行Z分数标准化处理。最优线性回归模型使用R语言中的step()函数并结合赤池信息量准则(Akaike Information Criterion, AIC)来确定(Burnham & Anderson, 2002)。由于空间自相关性会影响回归模型的解释力, 使用Moran's I方法评估多元回归模型残差的空间自相关性。由于多元回归模型的残差具有显著的空间自相关性($P < 0.05$), 进一步使用最优模型中的预测变量建立空间自回归模型(spatial linear simultaneous autoregressive error model, SAR)。使用Pseudo- R^2 (非空间成分模型预测值和实际值之间的相关系数的平方)来衡量预测变量对物种丰富度的解释能力(Kissling & Carl, 2008), 并通过偏

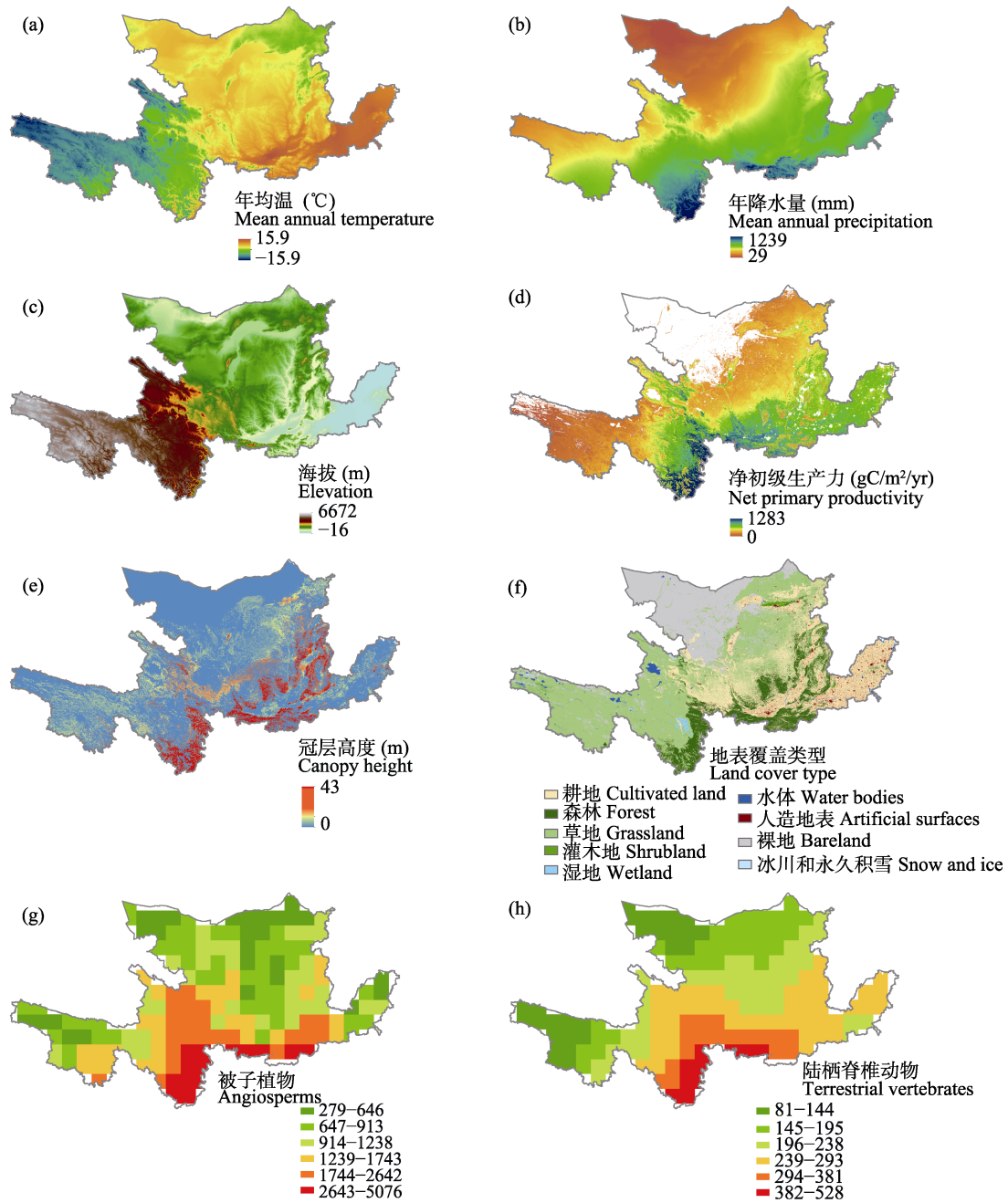


图2 黄河流域环境变量分布图以及被子植物和陆栖脊椎动物物种丰富度的空间格局

Fig. 2 Distribution of environmental variables and spatial pattern of species richness of angiosperms and terrestrial vertebrates in the Yellow River basin

回归系数比较预测变量间的相对重要性。

本文的统计分析在 R 3.6.1 (R Development Core Team, 2019)中进行, 其中, 多元回归树模型和空间自回归模型模型分别利用使用R语言中的rpart程序包和spdep程序包中的相关代码进行。

2 结果

图 2g 和图 2h 显示, 黄河流域动植物物种丰富

度均呈现明显的地区差异。黄河流域南部地区动植物物种最为丰富, 主要为四川阿坝藏族自治州以及陕西南部靠近秦岭一带; 流域上游的青海省东部、甘肃省大部分区域动植物物种丰富度也较高。流域东部的玉树藏族自治州东北部区域, 北部的阿拉善、鄂尔多斯等内蒙古西部区域以及流域中部的陕西北部区域是动植物物种丰富度最贫乏的地区; 流域下游的华北平原被子植物丰富度也较低, 陆栖脊

推动物种丰富度呈中等水平。

在使用被子植物和陆栖脊椎动物数据构建回归树时,都只有9个变量中的5个被使用(图3)。对被子植物而言,回归树包含8个分支,解释了物种丰富度总变异的86%。其中,最重要的影响因子是冠层高度范围。回归树第一个节点以冠层高度范围(33 m)为界分为两支,解释了总变异的50%。冠层高

度范围大于33 m的区域为高物种丰富度区域,该区域内,海拔范围是影响被子植物物种丰富度格局的最重要因子,解释了总变异的18%。冠层高度大于33 m且海拔范围大于3,005 m的区域,拥有黄河流域最高的被子植物物种丰富度,平均为3,841个种。相反,冠层高度范围小于33 m的区域具有较低或中等水平的被子植物多样性,该区域内,被子植物物

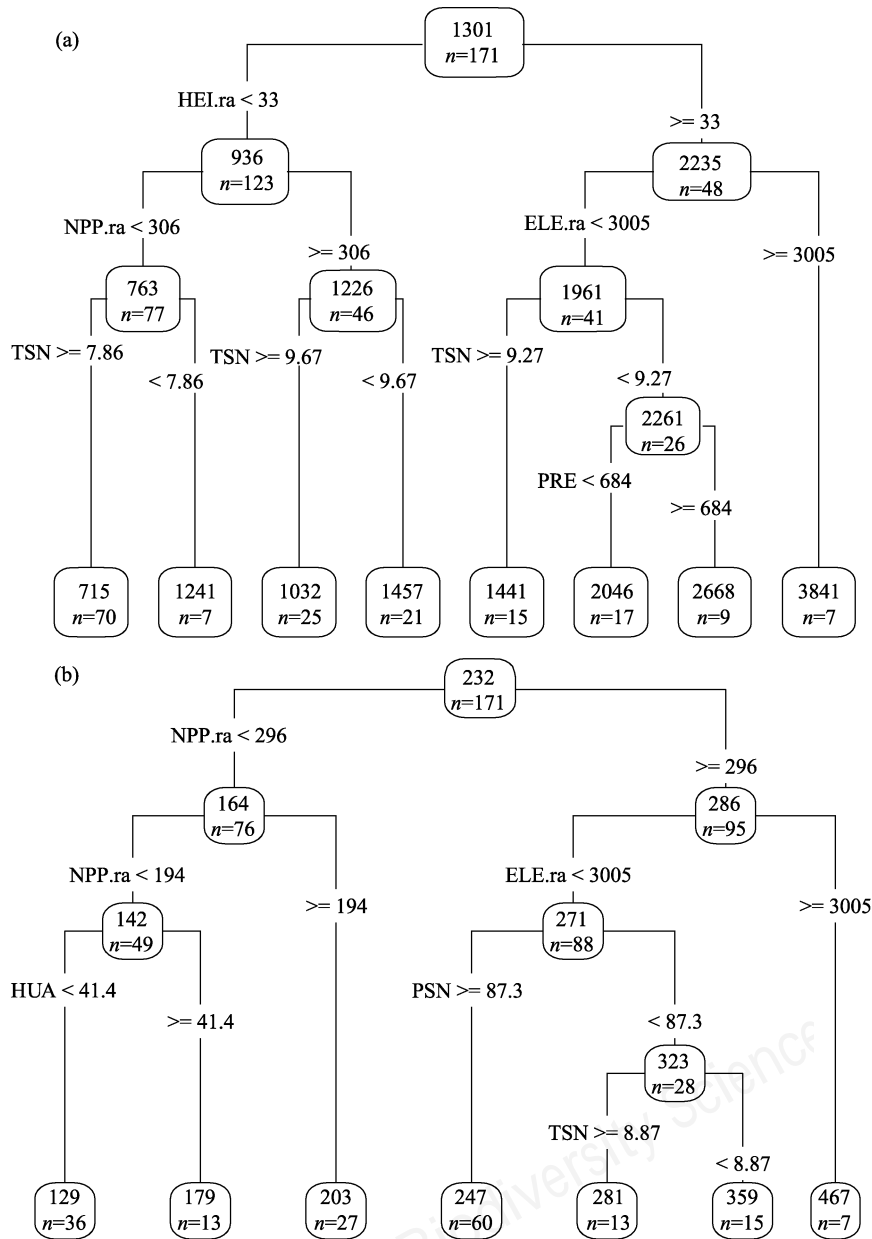


图3 黄河流域被子植物(a)和陆栖脊椎动物(b)物种丰富度的回归树分析。HEI.ra: 冠层高度范围; NPP.ra: 净初级生产力范围; TSN: 温度季节性; ELE.ra: 海拔范围; PRE: 年降水量; HUA: 人类使用土地面积; PSN: 降水季节性。

Fig. 3 Regression tree analysis of species richness of angiosperms (a) and terrestrial vertebrates (b) HEI.ra, Vegetation height range; NPP.ra, Net primary productivity range; TSN, Temperature seasonality; ELE.ra, Elevation range; PRE, Mean annual precipitation; HUA, Human used areas; PSN, Precipitation seasonality.

种丰富度与NPP范围呈正相关关系;以NPP范围(306 gC/m²)为界,回归树被进一步分为两支,温度季节性在这两支中均与被子植物物种丰富度呈负相关。这些节点单独只能解释<6%的总变异。对陆栖脊椎动物而言,回归树模型解释了物种丰富度总变异的92%。其中,NPP范围是最重要的影响因子,解释了总变异的52%;其次为海拔范围,解释了总变异的20%。与被子植物一致,海拔范围大于3,005 m的区域拥有最高的陆栖脊椎动物物种丰富度。

多元回归模型分别解释了被子植物和陆栖脊椎动物物种丰富度总变异的79%和87%。由于空间自回归(SAR)模型去除了空间自相关的影响,解释度有所降低,分别为62%和69%。由表2得出,各变量在解释动植物物种丰富度格局中的重要性在不同回归模型间有所差异。对于被子植物物种丰富度而言,多元回归模型显示,降水季节性与海拔范围是最重要的预测因子,而空间自回归模型表明除了上述两个因子外,温度季节性和冠层高度范围也同等重要。在多元回归和空间自回归模型中,被子植物物种丰富度与海拔范围和冠层高度范围均呈正

表2 被子植物和陆栖脊椎动物物种丰富度的多元线性回归和空间自回归(SAR)模型分析结果

Table 2 Results of ordinary least squares (OLS) and simultaneous autoregressive (SAR) models for species richness of angiosperms and terrestrial vertebrates

预测因子 Predictor	被子植物 Angiosperms		陆栖脊椎动物 Terrestrial vertebrates	
	coef _{OLS}	coef _{SAR}	coef _{OLS}	coef _{SAR}
人类使用土地面积 (HUA)	-	-	-	-
年均温 (TEM)	-	-	0.05**	0.09***
温度季节性 (TSN)	-0.09**	-0.13*	0.07*	-0.14***
年降水量 (PRE)	-	-	0.11***	0.04
降水季节性 (PSN)	-0.17***	-0.13**	-0.04*	0
净初级生产力 (NPP)	-	-	-	-
降水范围 (PRE.ra)	0.05	0.07*	0.02	0.02***
海拔范围 (ELE.ra)	0.15***	0.11**	-	-
净初级生产力范围 (NPP.ra)	0.09*	0.03	0.17***	0.01
冠层高度范围 (HEL.ra)	0.07	0.12**	-	0.04
被子植物丰富度 (Plant)	-	-	0.11**	0.04*
AIC	28.58	-26.79	-200.12	-515.81
R ²	0.79	0.62	0.87	0.69

预测因子缩写的含义同表1 Abbreviations of the predictors correspond to those in Table 1. **P*<0.05; ***P*<0.01; ****P*<0.001.

相关,而与降水季节性和温度季节性均呈负相关。该结果表明,在气候季节性变化小且环境异质性高的区域被子植物物种丰富度较高。对于陆栖脊椎动物物种丰富度而言,多元回归模型显示,NPP范围是其最重要的影响因子,其次是年均降水量和被子植物物种丰富度;而空间自回归模型表明,其最重要的影响因子为温度季节性,其次为年均温。因此,不同统计模型在确定黄河流域脊椎动物物种丰富度最佳预测因子方面还存在较大的不确定性。总体而言,不同模型间各环境变量在解释动植物物种丰富度格局时有所差异,回归树模型表明环境异质性对动植物多样性格局具有重要影响,而线性回归模型则表明气候因子与环境异质性同等重要。

3 讨论

黄河流域生物多样性最丰富的区域主要集中在山地,比如青藏高原东部山区、陕西省南部秦岭山区以及四川省北部岷山和邛崃山区。这与之前在不同空间尺度上得到的结果一致。比如Li等(2013)研究了新疆维管植物和哺乳动物的空间分布格局,发现维管植物物种丰富度最高的区域是阿尔泰山西部以及天山中西部,山区哺乳动物物种丰富度也高于盆地;在全国尺度上,山区的维管植物和哺乳动物物种丰富度同样高于周边区域,包括我国动植物物种最为丰富的横断山脉、秦岭、喜马拉雅东南部等地区(Xu et al, 2016)。此外,全球34个生物多样性热点区域中的大部分也都位于山地(<http://www.biodiversityhotspots.org>)。这主要是因为山地具有较大的海拔高差,覆盖了多样的地质、地形和气候梯度,因此较高的环境异质性使得山地比周边低地拥有更高的生物多样性(Becker et al, 2007; Moeslund et al, 2013)。

尽管对于生物多样性大尺度格局的形成机制存在诸多解释,但大多研究认为当代气候是生物多样性最重要的影响因素。比如Wang等(2011)通过研究中国木本植物分布格局发现,最冷季温度是预测木本植物丰富度最重要的因子。Qian (2013)发现温度季节性变化是中国木本植物物种丰富度的最佳预测因子。Kreft和Jetz (2007)通过对全球维管植物的研究发现,植物物种丰富度的地理格局受多个环境因子的共同影响,但与潜在蒸散量(potential evapotranspiration, PET)和湿润天数(wet days)相关

的气候因子起主导作用。本研究中回归树模型显示,环境异质性是被子植物和陆栖脊椎动物物种丰富度最重要的预测变量。环境异质性高的区域,动植物物种丰富度也高。比如冠层高度范围大于33 m的区域(主要为山地)的被子植物物种丰富度(平均值为2,235种)远大于其他区域(平均值为936种)。此外,空间自回归模型表明,环境异质性和气候变量对被子植物和陆栖脊椎动物物种丰富度具有相似的解释度(表2)。这些结果说明环境异质性和气候是影响黄河流域被子植物和陆栖脊椎动物多样性的重要因素,并共同决定了其大尺度分布格局。

环境异质性可以通过3种主要机制影响生物多样性:(1)环境异质性高的区域拥有更多样的栖息地类型和更丰富的可利用资源,进而通过提供更多的生态位促进物种共存(Currie, 1991);(2)环境异质性高的区域在环境条件不利时为生物群落提供了避难所,从而降低了种群灭绝的风险(Svenning & Skov, 2007);(3)高环境异质性通过生境隔离或生理生态适应增加了物种分化的可能性(Hughes & Eastwood, 2006; Xing & Ree, 2017)。对环境异质性的定量计算方式有很多种,主要包括环境因子的范围(比如海拔范围)、标准差(SD)、变异系数(CV)以及指数等。不同的环境异质性度量包含不同的信息,反应了环境异质性对生物多样性的不同影响机制(Stein & Kreft, 2015)。本研究主要使用了单个网格内各环境因子的变化范围来度量环境异质性,主要反映了该区域内环境梯度的宽幅,且与生态位的宽度直接相关。因此,本研究发现的环境异质性与动植物物种丰富度之间的正相关关系表明了环境异质性通过提供更多的生态位促进该区域物种的共存。然而,环境异质性对物种丰富度格局的影响往往具有区域地理或气候依赖性(Xu et al, 2016; Kerr et al, 2017),环境异质性更可能在可利用能量高的区域占主导地位。例如Kerr等(1997)发现在北美潜在蒸散量大于1,000 mm的高热量区域,环境异质性是影响哺乳动物丰富度地理分异的主要因素。Xu等(2016)发现在中国海拔低于1,900 m的区域,海拔是影响维管植物空间分布的主要因子。

与局域尺度相比,人类活动在区域尺度上对物种丰富度的影响仍具有较大的不确定性。黄河中游的黄土高原以及下游的华北平原具有广阔的耕地分布(图2c),黄河上游的青藏高原是过度放牧的区

域,生境退化或丧失以及直接采挖或砍伐往往是影响生物多样性的重要因素(蒋志刚等, 2016)。由于特定区域内耕地和城镇建设用地等人为活动的扩张,动植物生境逐步减少,种群数量与物种丰富度下降,加之人类活动导致的生境同质化也会降低生物群落间的 β 多样性,最终该区域的 γ 多样性将受到抑制(Newbold et al, 2015)。然而,本研究结果显示,人类活动并不是影响区域尺度动植物物种丰富度格局的主要因子,人类土地使用面积仅在NPP范围小于 194 g C/m^2 的区域内与陆栖脊椎动物物种丰富度呈正相关关系(图3)。这一结果与Wang等(2011)对中国木本植物和Xu等(2014)对中国脊椎动物多样性格局的研究结果一致,可能的原因是人类活动对动植物物种丰富度空间变异的解释度受研究区域空间尺度的影响(Sarr et al, 2005; Wang et al, 2011)。也可能是由于人类活动涉及众多方面,很多都难以量化,而选用的表征人类活动的因子,比如国内生产总值和人口密度(Wang et al, 2011)等,并不能很好地代表全部人类活动。因此,在区域尺度上,人类活动对物种丰富度格局的影响仍有待进一步研究。

基于回归树模型和线性回归模型的分析结果,表明现代气候因子和环境异质性对黄河流域动植物物种多样性格局均具有重要影响。该研究结果表明在未来的自然保护尤其生物多样性保护的规划与执行过程中,需要科学地考虑和利用环境异质性对生物多样性的影响。不过,在未来的研究中若针对不同区域筛选出更精准的环境驱动因子或选用更多不同类别的环境异质性因子进行分析,将有助于更深入理解物种多样性格局的成因。虽然我们的结果并没有发现人类活动对物种丰富度格局的直接影响,但人类活动依然有可能通过影响未来气候并加速生境同质化等,间接对物种多样性造成重要的负面影响。

参考文献

- Becker A, Körner C, Brun JJ, Guisan A, Tappeiner U (2007) Ecological and land use studies along elevational gradients. *Mountain Research and Development*, 27, 58–65.
- Burnhan KP, Anderson DR (2002) Model selection and multi-model inference: A practical information-theoretic approach. *Technometrics*, 45, 181–181.
- Currie DJ (1991) Energy and large-scale patterns of animal- and plant-species richness. *The American Naturalist*, 137, 27–49.

- De'Ath G (2002) Multivariate regression trees: A new technique for modeling species-environment relationships. *Ecology*, 83, 1105–1117.
- De'Ath G, Fabricius KE (2000) Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology*, 81, 3178–3192.
- Dong XR, Zhang H, Zhang MG (2019) Explaining the diversity and endemic patterns based on phylogenetic approach for woody plants of the Loess Plateau. *Biodiversity Science*, 27, 1269–1278. (in Chinese with English abstract) [董雪蕊, 张红, 张明罡 (2019) 基于系统发育的黄土高原地区木本植物多样性及特有性格局. *生物多样性*, 27, 1269–1278.]
- Fang JY, Shen ZH, Tang ZY, Wang ZH (2004) The protocol for the survey plan for plant species diversity of China's mountains. *Biodiversity Science*, 12, 59. (in Chinese with English abstract) [方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 王志恒 (2004) “中国山地植物物种多样性调查计划”及若干技术规范. *生物多样性*, 12, 5–9.]
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965–1978.
- Hughes C, Eastwood R (2006) Island radiation on a continental scale: Exceptional rates of plant diversification after uplift of the Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 103, 10334–10339.
- Jenkins CN, Pimm SL, Joppa LN (2013) Global patterns of terrestrial vertebrate diversity and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 110, E2602–E2610.
- Jiang ZG, Li LL, Luo ZH, Tang SH, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Feng ZJ, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Ping XG, Fang HX (2016) Evaluating the status of China's mammals and analyzing their causes of endangerment through the red list assessment. *Biodiversity Science*, 24, 552–567. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 李立立, 罗振华, 汤宋华, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 冯祚建, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 平晓鸽, 方红霞 (2016) 通过红色名录评估研究中国哺乳动物受威胁现状及其原因. *生物多样性*, 24, 552–567.]
- Kerr JT, Packer L (1997) Habitat heterogeneity as a determinant of mammal species richness in high-energy regions. *Nature*, 385, 252–254.
- Kissling WD, Carl G (2008) Spatial autocorrelation and the selection of simultaneous autoregressive models. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 59–71.
- Kreft H, Jetz W (2007) Global patterns and determinants of vascular plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 5925–5930.
- Legendre P, Legendre L (1998) *Numerical Ecology*. Elsevier, Amsterdam.
- Li LP, Wang ZH, Zerbe S, Abdusalih N, Tang ZY, Ma M, Yin LK, Mohammad A, Han WX, Fang JY (2013) Species richness patterns and water-energy dynamics in the drylands of northwest China. *PLoS ONE*, 8, e66450.
- Lin X, Wang ZH, Tang ZY, Zhao SQ, Fang JY (2009) Geographic patterns and environmental correlates of terrestrial mammal species richness in China. *Biodiversity Science*, 17, 652–663. (in Chinese with English abstract) [林鑫, 王志恒, 唐志尧, 赵淑清, 方精云 (2009) 中国陆栖哺乳动物物种丰富度的地理格局及其与环境因子的关系. *生物多样性*, 17, 652–663.]
- Lu LM, Mao LF, Yang T, Ye JF, Liu B, Li HL, Sun M, Miller JT, Mathews S, Hu HH, Niu YT, Peng DX, Chen YH, Smith SA, Chen M, Xiang KL, Le CT, Dang VC, Lu AM, Soltis PS, Soltis DE, Li JH, Chen ZD (2018) Evolutionary history of the angiosperm flora of China. *Nature*, 554, 234–238.
- Luck GW (2007) A review of the relationships between human population density and biodiversity. *Biological Reviews*, 82, 607–645.
- Moeslund JE, Arge L, Bøcher PK, Dalgaard T, Svenning JC (2013) Topography as a driver of local terrestrial vascular plant diversity patterns. *Nordic Journal of Botany*, 31, 129–144.
- Newbold T, Hudson LN, Hill SLL, Contu S, Lysenko I, Senior RA, Börger L, Bennett DJ, Choimes A, Collen B, Day J, de Palma A, Díaz S, Echeverria-Londoño S, Edgar MJ, Feldman A, Garon M, Harrison MLK, Alhousseini T, Ingram DJ, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia DLP, Martin CD, Shai MR, Novosolov M, Yuan P, Phillips HRP, Purves DW, Robinson A, Simpson J, Tuck SL, Weiher E, White HJ, Ewers RM, Mace GM, Scharlemann JPW, Purvis A (2015) Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520, 45–50.
- O'Brien EM, Field R, Whittaker RJ (2000) Climatic gradients in woody plant (tree and shrub) diversity: Water-energy dynamics, residual variation, and topography. *Oikos*, 89, 588–600.
- O'Brien EM (1998) Water-energy dynamics, climate, and prediction of woody plant species richness: An interim general model. *Journal of Biogeography*, 25, 379–398.
- Qian H (2013) Environmental determinants of woody plant diversity at a regional scale in China. *PLoS ONE*, 8, e75832.
- R Core Team (2019) R: A Language and Environment for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>. (accessed on 2019-09-01)
- Ricklefs RE (1987) Community diversity: Relative roles of local and regional processes. *Science*, 235, 167–171.
- Sarr DA, Hibbs DE, Huston MA (2005) A hierarchical perspective of plant diversity. *Quarterly Review of Biology*, 80, 187–212.
- Shmida A, Wilson MV (1985) Biological determinants of species-diversity. *Journal of Biogeography*, 12, 1–20.
- Simard M, Pinto N, Fisher JB, Baccini A (2011) Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal*

- of Geophysical Research: Biogeosciences, 116, 1–12.
- Stein A, Gerstner K, Kreft H (2014) Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. *Ecology Letters*, 17, 866–880.
- Stein A, Kreft H (2015) Terminology and quantification of environmental heterogeneity in species-richness research. *Biological Reviews*, 90, 815–836.
- Svenning JC, Skov F (2007) Ice age legacies in the geographical distribution of tree species richness in Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 16, 234–245.
- Tittensor DP, Walpole M, Hill SLL, Boyce DG, Britten GL, Burgess ND, Butchart SHM, Leadley PW, Regan EC, Alkemade R, Baumung R, Bellard C, Bouwman L, Bowles-Newark NJ, Chenery AM, Cheung WWL, Christensen V, Cooper HD, Crowther AR, Dixon MJR, Galli A, Gaveau V, Gregory RD, Gutierrez NL, Hirsch TL, Höft R, Januchowski-Hartley SR, Karmann M, Krug CB, Leverington FJ, Loh J, Lojenga RK, Malsch K, Marques A, Morgan DHW, Mumby PJ, Newbold T, Noonan-Mooney K, Pagad SN, Parks BC, Pereira HM, Robertson T, Rondinini C, Santini L, Scharlemann JPW, Schindler S, Sumaila UR, Teh LSL, van Kolck J, Visconti P, Ye YM (2014) A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science*, 346, 241–244.
- Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM (1997) Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277, 494–499.
- Wang ZH, Fang JY, Tang ZY, Lin X (2011) Patterns, determinants and models of woody plant diversity in China. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278, 2122–2132.
- Xing YW, Ree RH (2017) Uplift-driven diversification in the Hengduan Mountains, a temperate biodiversity hotspot. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 114, E3444–E3451.
- Xu C, Huang ZYX, Chi T, Chen BJW, Zhang MJ, Liu MS (2014) Can local landscape attributes explain species richness patterns at macroecological scales? *Global Ecology and Biogeography*, 23, 436–445.
- Xu HG, Cao MC, Wu Y, Cai L, Cao Y, Wu J, Lei JC, Le ZF, Ding H, Cui P (2016) Disentangling the determinants of species richness of vascular plants and mammals from national to regional scales. *Scientific Reports*, 6, 21988.
- Zhang ZD, Yu YW, Hua LM, Pu X, Wang HC, Liang TG (2014) Analysis of the distribution pattern of wild vascular plant diversity in Gansu Province, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 23, 22–30. (in Chinese with English abstract) [张志达, 于应文, 花立民, 蒲训, 王虎成, 梁天刚 (2014) 甘肃省野生维管植物多样性分布格局分析. *草业学报*, 23, 22–30.]
- Zhao SQ, Fang JY, Peng CH, Tang ZY (2006) Relationships between species richness of vascular plants and terrestrial vertebrates in China: Analyses based on data of nature reserves. *Diversity and Distributions*, 12, 189–194.

(责任编辑: 王志恒 责任编辑: 周玉荣)



•综述•

生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策

殷万东^{#*} 吴明可[#] 田宝良 于宏伟 王麒云 丁建清

(河南大学生命科学学院作物逆境适应与改良国家重点实验室, 河南开封 475004)

摘要: 黄河流域健康的生态系统是沿黄地区生态保护和高质量发展的核心。然而, 随着经济高速发展和人类活动增加, 大量的外来生物传入并占据黄河流域生态位。这些外来生物在黄河流域的大肆扩繁给黄河流域本土生物和生态系统带来了严重威胁, 甚至严重影响人类健康。因此, 研究黄河流域的外来生物入侵问题, 并提出保护对策, 对于黄河流域生态保护和高质量发展具有重大意义。本文主要从黄河流经九省区(包含黄河流域)外来入侵生物的传入特征、传播途径、种群动态、成灾机制以及入侵生物对黄河流域重要生物资源和生态系统的影响等方面进行综述, 并提出了防控黄河流域生物入侵、保护黄河流域健康的生态系统的措施和对策。

关键词: 黄河流域; 黄河九省区; 生物入侵; 生态系统; 生物多样性

Effects of bio-invasion on the Yellow River basin ecosystem and its countermeasures

Wandong Yin^{#*}, Mingke Wu[#], Baoliang Tian, Hongwei Yu, Qiyun Wang, Jianqing Ding

State Key Laboratory of Crop Stress Adaptation and Improvement, School of Life Sciences, Henan University, Kaifeng, Henan 475004

Abstract: A healthy ecosystem in the Yellow River basin is central to ecological protection and high-quality development along the Yellow River region. However, the rapid development in the economy and increase in human activity has resulted in a large number of invasive species being introduced into the Yellow River basin and occupying native species ecological niches. The outbreak and spread of invasive species pose a serious threat to native organisms and ecosystems in the Yellow River basin and can even seriously affect human health. Therefore, it is important for the ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin to study the invasion of alien species in the Yellow River basin and to put forward strategies for the protection of native species. Here, we review the bio-invasion characteristics, transmission approaches and mechanisms in the nine provinces of Yellow River basin, and the effects of bio-invasion on the biological resources and ecological system in the Yellow River basin. We then suggest measures and countermeasures to reduce current effects of bio-invasion, protect the Yellow River healthy ecosystems, and ensure high-quality development.

Key words: Yellow River basin; nine provinces and regions along the Yellow River; biological invasion; ecosystem; biological diversity

黄河是我国第二大河, 也是孕育中华文明的母亲河。黄河流域西起青藏高原, 东至渤海, 南自秦岭, 北抵阴山, 流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等九省区, 干流全长约5,400 km, 总流域面积超75万km², 流域内总人

口约4.2亿, 占全国人口的近1/3 (李开明等, 2013)。黄河流域既是我国的矿产资源富集区, 也是农产品主产区, 更是一道重要的生态屏障, 在我国的农业发展、经济繁荣和生态安全等方面均具有重要的战略地位(陈耀等, 2020)。然而, 由于自然和人为等多

收稿日期: 2020-05-20; 接受日期: 2020-11-02

基金项目: 河南省重大公益专项——黄河中下游滩涂生态保护关键技术体系研究(201300311300)和河南省高等学校重点科研项目(20A180008)

共同第一作者 Co-first authors

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wojiaowandong1@163.com

种因素的影响,黄河流域生态环境变得极其脆弱。因此,如何维持黄河流域生态系统的健康和稳定成为当前沿黄地区高质量发展和生态保护的核心。

生物入侵作为全球性环境问题,严重影响着入侵地的生态安全、经济发展及人类健康(万方浩等, 2002; Ding et al, 2008)。外来物种的入侵会改变原有生物的地理分布和自然生态系统的结构与功能,导致生态灾害暴发及生物多样性的丧失,进而威胁到人类生存环境,以及农林牧副渔业的发展(鞠瑞亭等, 2012; 吴昊和丁建清, 2014)。近几十年来,随着经济的高速发展和人类活动的加剧,大量的外来生物已经传入并占据了黄河流域生态位,对黄河流域本土生物及生态系统造成了严重威胁(赵怀浩等, 2011)。例如,三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)作为黄河流域常见的入侵杂草,由于其较强的化感作用和快速生长繁殖特性,常抑制周围植株生长并侵占自然资源,对黄河流域的生态环境和生物多样性造成巨大威胁(李振宇和解焱, 2002; 苑晓雯, 2011^①; 邓玲姣和邹知明, 2012)。而从流域角度综合探究入侵生物对流域及周边生物多样性和生态安全的影响,不仅有利于维持黄河流域生态系统的结构稳定性,还将为制定黄河流域生物多样性的保护对策,减少外来有害生物对当地的危害提供理论依据(邱建生等, 2019)。因此,研究黄河流域的外来生物入侵问题,并提出保护对策,对于黄河流域生态保护和高质量发展具有重大意义。

目前,已有研究报道了生物入侵对珠江和长江等流域的水生和陆生生物多样性、生态环境和水资源的影响(陈家长等, 2010; 冯洪超等, 2015; 高宇等, 2017)。然而黄河流域因其自身的特异性,如干流长、地势多变、地形复杂,且流域内人口众多,发展模式以农业生产为主(陈耀等, 2020; 张红武, 2020),急需开展生物入侵对于黄河流域(农业)生态系统和生物多样性影响的研究。虽然我国对于生物入侵的认知和防治技术已显著提高,关于黄河流域生物入侵的研究也逐渐增多(刘庆年等, 2006; 李芳等, 2008),但是生物入侵对黄河流域生态环境和生物多样性的影响仍然缺乏系统性研究和论述。因此,本文在文献调研黄河流域所在九省区外来物种发生现状的基础上,综述黄河流域九省区入侵物种的

发生特点、入侵途径、成灾机制,以及生物入侵对于黄河流域生态系统的影响,并提出相应的防治对策。这对于黄河流域生态保护和有害生物治理具有很好的借鉴意义。

1 黄河流域所在九省区外来入侵物种的发生特点

黄河流域地貌特征复杂、气候环境多样(严昌荣等, 2006),可以为不同种类的动植物提供合适的栖息场所。鉴于黄河流域生物入侵的报道相对较少,而外来物种在黄河流域所在九省区的入侵势必会对黄河流域生态安全造成潜在威胁,我们对黄河所在九省区(包含黄河流域)的生物入侵文献和书籍进行调研和整理。结果发现:黄河流经九省区外来入侵植物达194种(附录1),隶属于49科128属。其中种类最多的为菊科,含24属35种;豆科次之,含15属26种(图1)。根据植物生活型统计,草本植物占73.19%,包括一年生草本植物80种,多年生草本植物77种,其他植物(藤本植物、肉质植物、灌木和乔木)占26.81%。外来入侵动物(昆虫纲、鱼纲、两栖纲、爬行纲等)达90种,隶属于22目53科,其中昆虫纲最多(7目52种),约占入侵动物物种数的58%;其次是鱼纲,共计30种,而鲈形目种数占鱼纲总数的1/4(图1)。由此可见,黄河流经九省区的外来动植物种类繁多,分布区域广泛,潜在暴发危害的风险性较大。

IUCN公布的最危险的100种入侵物种中,有16种在黄河流经九省区建立了自然种群(附录2),包括入侵河流、池塘、湖泊等水生生境的凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、入侵农田生态系统的重要害虫烟粉虱(*Bemisia tabaci*)、入侵黄河自然水域的鱼类虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、入侵草地等生境的红火蚁(*Solenopsis invicta*)、入侵黄河滩涂湿地的大米草(*Spartina anglica*)等。而生态环境部公布的71种有重大危害的外来入侵物种名单中,已有40种入侵到黄河流经九省区(附录3),包括有“植物杀手”之称的黄顶菊(*Flaveria bidentis*),该物种目前已经扩散至黄河中下游地区的河南、山东、山西境内(郑志鑫等, 2018);自然湿地的“超级入侵植物”互花米草(*Spartina alterniflora*)和大米草,目前已经广泛分布于黄河三角洲绝大多数滩涂地(解雪峰等, 2020);滩涂地的“软体杀手”泥螺(*Bullacta exarata*),

① 苑晓雯 (2011) 黄河流域河南段菊科主要外来种对不同环境梯度的适应性研究. 硕士学位论文, 河南大学, 开封.

目前已经遍布黄河下游滩涂地潮间带(刘童等, 2018)。这些危害性极大的入侵物种在黄河流经九省区的暴发危害及蔓延, 会为黄河流域生态系统的健康发展带来极大的安全隐患。

在黄河九省区, 外来物种侵入的生态系统复杂多样, 目前遍布于农田、果园、牧场、城市、路域、草地、林地、湿地、淡水等陆地和水域生态系统(图 2)。其中, 入侵路域生态系统的外来物种数最多, 达 103 种, 这表明发达的交通运输网会促进物种的入侵和扩散; 其次为农田生态系统(其中入侵动物 30 种, 植物 59 种)。而黄河流域, 尤其是中下游地区, 作为中原粮仓, 外来物种对其农田生态系统的侵入暴发势必会对粮食生产造成不利影响。值得注意的是, 淡水生态系统(河流、湖泊、池塘等)中的入侵动植物已高达 64 种, 这对于黄河流域的淡水供应有极大的安全隐患。此外, 我们发现这些外来物种来源

于全球各大洲(南极洲除外), 其中起源于北美洲的最多, 有 113 种, 占总物种数的 39.65%; 而原产地为非洲和大洋洲的最少, 分别占 13.33% 和 2.46%。

黄河流域所在各省区均有几十种甚至上百种入侵生物发生, 且入侵物种丰富度呈现出由西往东递增的趋势(图 3)。黄河下游的山东省由于地势特殊, 且黄河三角洲形成的独特湿地生态系统为外来生物提供了良好的栖息环境, 因此入侵物种丰富度最高, 约占黄河九省区入侵物种总数的 15%。而位于黄河上游的宁夏和青海的入侵种较少, 各占 8% 左右。这可能与气候差异以及人口、交通、贸易密集程度有关。尤其是宁夏和青海两个地区的平均海拔较高, 盆地所占范围广, 且多处于荒漠地带, 地形地貌复杂, 因此大多数外来生物很难在该地区进行建群和扩散。而黄河中下游地区属于半湿润的气候环境, 人口较多, 交通运输发达, 贸易往来频繁,

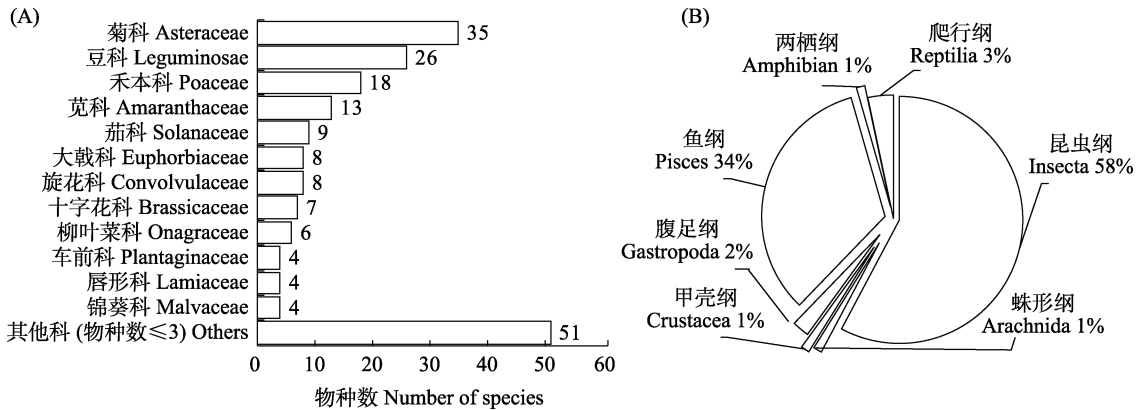


图 1 黄河流经九省区外来入侵植物(左)和动物(右)分类图
Fig. 1 Classification charts of alien invasive plants (left) and animals (right) in nine provinces along the Yellow River

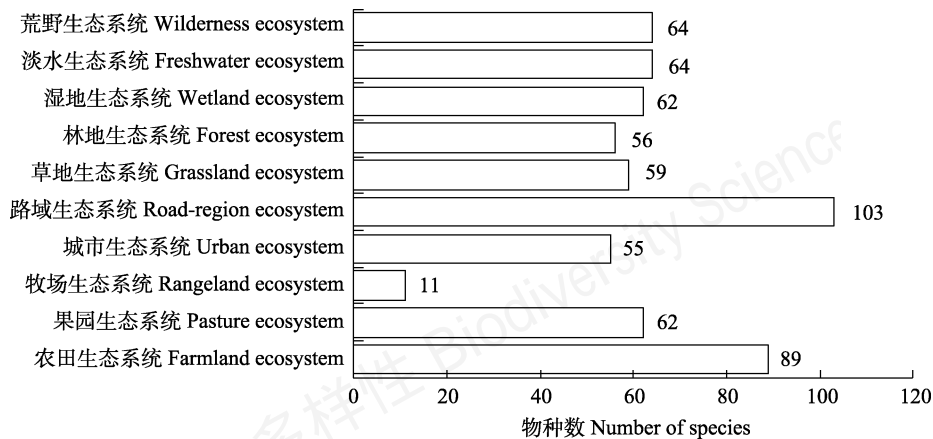


图 2 黄河流经九省区外来生物入侵在不同生态系统的数量分布
Fig. 2 The number of invasive species in different ecosystems in nine provinces along the Yellow River

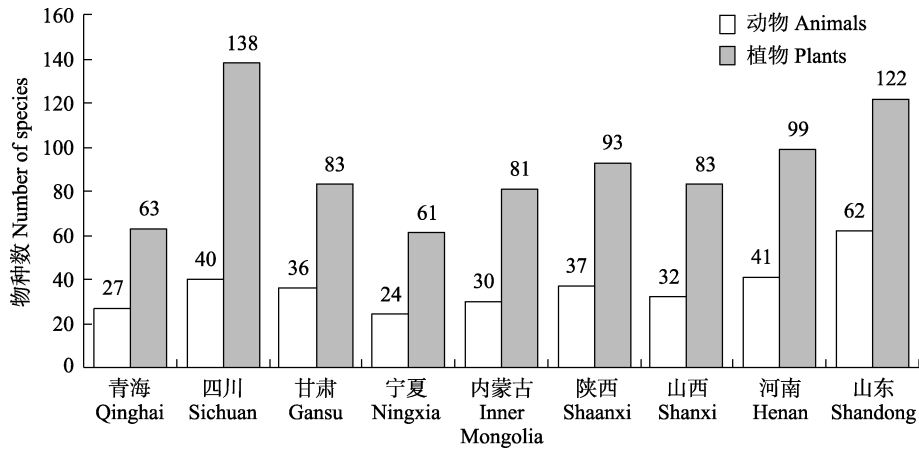


图3 黄河流经九省区外来入侵生物丰富度分布图

Fig. 3 Distribution chart of alien invasive species richness in nine provinces along the Yellow River

这些条件均有利于外来物种的入侵和扩散。值得注意的是, 由于黄河上游四川段在纬度上偏南, 温度、光照等气候条件适宜, 地貌特征复杂, 因此四川段外来物种丰富度也较高, 约占总数的14%。

2 外来物种入侵的主要途径及发展趋势

同多数生物入侵途径相似, 黄河流域的外来物种主要通过人类活动有意或者无意引入。其中, 作为有用物种引进、随着交通工具或者货物进入和自然扩散是三种最主要的途径。而且, 我们发现许多物种的引进扩散并非由单一途径导致(图4)。近些年, 黄河流域的运输业、旅游业及贸易往来的飞速发展以及西部大开发的推进, 为物种入侵及扩散提供了绝佳条件。

(1) 高价值物种引进。由于在原产地表现出良好的应用价值, 许多物种被有意引入黄河九省区的陆生和水生生境。然而, 由于管理不善或者人为疏忽, 造成了物种的逃逸并在野外建立自然种群完成入侵。我们发现, 黄河流经九省区的入侵物种中有61.4% (植物136种, 动物37种)是通过人为引进有用物种的方式侵入的(图4)。例如, 用于防风固堤和改良土壤的互花米草, 被引入黄河三角洲后迅速扩张, 目前在黄河滩涂地成为优势物种(路峰和王昕, 2017; 汪方芳等, 2020); 作为饲料引种的凤眼莲和空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)在黄河中下游地区发生严重(吴彤等, 2007); 作为优良牧草引入到内蒙古地区的紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、白花草木樨(*Melilotus albus*)等极易排挤本地牧草, 破坏当地牧

区的生态平衡(张璞进等, 2019); 用于观赏的加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)、铜锤草(*Oxalis corymbosa*)等, 在山东济南、河南郑州等地区的公园引入种植, 现已逸生为野生杂草(吴彤等, 2007; 李长看等, 2011); 当作宠物引入的鳄龟(*Chelydra serpentina*)目前已出现在黄河中游自然水域(张红星, 2010); 作为水产引种到黄河流域的泥螺、克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)等, 由于养殖管理不善, 已经扩散到自然生境并造成不同程度的危害(李成和谢锋, 2004; 刘童等, 2018)。在黄河上游地区, 许多有价值的鱼类如斑点叉尾鮰(*Ictalurus punctatus*)、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)等被人为引入并在自然水域饲养, 严重影响土著物种生存(蒋红等, 2007; 张登成和郑娇莉, 2019)。有用物种的引入对当地的

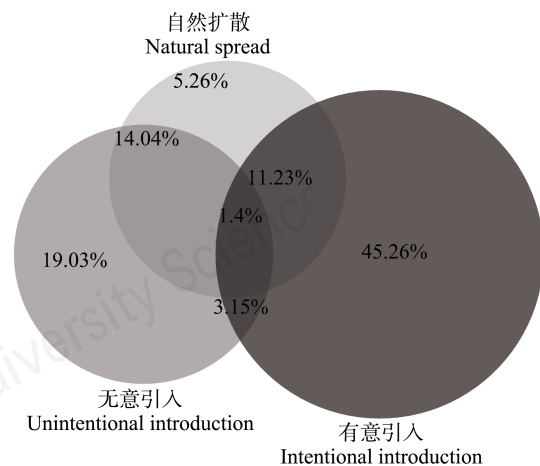


图4 黄河流经九省区入侵生物引入方式分布占比

Fig. 4 Ratio of introduction mode of alien invasive species in nine provinces along the Yellow River

经济社会发展无疑有促进作用,但同时又为生物入侵提供了条件。作为黄河流域外来物种入侵的最重要途径,如何引入和规范管理有价值的外来物种是保护黄河流域生物多样性急需解决的重要问题。

(2)发达的交通工具和网络。交通工具和货物运输是大多数物种入侵我国的主要途径(吴昊和丁建清, 2014)。通过文献调研发现, 38.25%的入侵物种通过交通工具或者货物侵入黄河流域所在九省区。黄河流域,尤其是中下游地区,地处中国南北过渡带,交通发达,人口众多且流动性大,贸易往来频繁,旅游业繁盛,这对于物种入侵和扩散提供了便利条件。而西部大开发的推进,交通运输网的进一步完善,将会加大黄河上游地区物种入侵的速度。此外,黄河流域滩涂地保护、退耕还林、水土流失控制、防风固沙、水域污染治理等措施的进一步实施,均需大面积引进和种植外来物种,这会增加外来物种入侵黄河流域的风险。随着黄河流域农业、经济及社会一体化发展,人类活动导致的外来物种入侵及传播速度将会进一步加快。

(3)自然扩散传入。大多数外来种自身扩散能力有限,但是可以借助风力、水流等自然力传播。而黄河九省区有31.57%的外来物种通过自然扩散进入。如近年在全球暴发危害的迁飞性害虫草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*), 2016年首次在非洲暴发危害,然而借助气象条件,短短16个月入侵了超过21个国家和地区(Stokstad, 2017)。在中国, 2019年1月首次发现草地贪夜蛾侵入云南省江城县,但至5月就已经快速扩散到黄河流域的四川、河南等地(姜玉英等, 2019)。

3 外来种成灾机制

3.1 黄河变道和人类活动的影响

大量研究表明,丰富的生物多样性和复杂的生态系统是抵御外来物种入侵的重要基础(White & Shurin, 2007; Frankow-Lindberg et al, 2009)。诸多理论如干扰假说(disturbance hypothesis)、空生态位假说(empty niche hypothesis)、多样性阻抗假说(biotic resistance hypothesis)等均表明,生物多样性较低的生境更容易被外来生物成功入侵(徐承远等, 2001; 王明娜等, 2014)。而黄河变道和人类开垦活动使得黄河流域陆生和水生生境严重破坏,导致生态结构极不稳定,生物多样性丧失,对外来生物的抵抗力

减弱,这使得外来物种在黄河流域可能极易建立种群,并快速扩散。

据史料记载(阎海青, 2009),黄河曾经历过8次变道,每次变道均对生态系统稳定性造成毁灭性打击,这也为外来物种的入侵提供了机会。近200年内,黄河发生过两次大的变道。1855年,黄河在河南铜瓦厢改道,使得黄水北徙。河患下移至黄河下游,且发生频率增多,对黄河下游生态系统稳定性和生物多样性造成更严重的危害(韩广轩等, 2011)。据统计,自1855年黄河改道至清末的57年间,黄河下游每年均有大小不等的黄河决溢事件发生,致使大面积的草木、庄稼、动物等被淹没。洪水及其所携带的大量泥沙,破坏了三角洲地区的自然地貌,毁坏植被,淤塞河道,造成水系紊乱。此外,由于洪水灾害,形成大面积的盐碱地,危害农林作物的生长(杨立建等, 2020)。1938年郑州花园口黄河决堤,致使洪水泛滥于豫、苏、皖3省44县市,几十亿吨的泥沙顺着决口涌入平原,淤塞河道,淹没田野,改变地质,形成危害严重的黄泛区。每年汛期,洪水都会泛滥回流倒灌,淹没农田和植被。洪水过后常引起蝗灾,蝗虫取食进一步毁坏农林作物和地表植被,对当地农林牧副渔业及生态环境稳定性造成严重破坏(钮本良, 1996; 喻宗仁等, 2004)。黄河变道导致的原有生物多样性降低、生境破坏和空白生态位的出现等均为外来物种的侵入定殖提供了条件。

人类活动的过度干扰导致黄河流域环境不断恶化,生物多样性丧失,从而使生态系统结构与稳定性进一步降低,使得黄河流域极易被外来生物侵入并暴发危害。黄河的主要特点是“水少沙多、水沙异源、时空分布不均匀”(王颖和张永战, 1998)。因此,流域周边的耕作理念多以“广种薄收、围湖造田”为主,这导致黄河流域耕作无序、毁林开荒现象严重,致使黄河流域植被破坏和水土流失逐年加剧,生态环境不断恶化(张小云, 2015; 王威和夏如兵, 2019)。据考古和历史记载,黄河中游曾经草木茂盛,生物种类繁多,但是由于土地肥沃,气候适宜,交通及灌溉引水便利,黄河中下游滩涂地一直是我国重要的粮棉和畜牧产品生产基地(郑利民, 2007; 吴泽宁等, 2019)。然而,过度开发利用以及黄河水患常年发生导致下游滩区生态环境恶化,同时大量垦殖、发展农牧业导致了流域中生物多样性锐减,如:随着围湖造田面积日益增加,湿地面积日益减少,

使得三角洲大量植物或水生动物消失,尤其是近岸流域的浮游生物、底栖生物及洄游性生物减少和死亡的现象频发,而黄河口的大多水域已丧失保护鱼类产卵功能,甚至发生赤潮灾害(高玉玲等, 2004; 李红娟等, 2009)。此外,在农业生产过程中,人们为了提高土壤质量,保证作物生长,往往会向土壤中大量输入化学肥料,而这些肥料恰好成为入侵植物的温床,例如,氮磷添加对黄河三角洲入侵植物互花米草的研究证明,土壤中氮磷含量的增加可显著增强互花米草对本土芦苇(*Phragmites communis*)的竞争能力^①。

3.2 较强的适应进化能力的影响

无论是动物还是植物,入侵种通常具有较强的环境适应能力,尤其是在较差的生境仍可以成功存活,这使得外来种在与土著种竞争中具有空白资源优势,这也是内禀优势假说(*inherent superiority hypothesis*)的核心观点。例如,黄河中下游区域作为中国重要的粮食主产区,干旱缺水一直是粮食生产的一大难题(曹永强等, 2014)。而入侵黄河中下游农田系统的节节麦(*Aegilops tauschii*)对干旱有较强的耐受性,其可通过改变叶片形态和生理特性以快速适应生境变化,从而提高自身的竞争力(王宁等, 2019)。再如,入侵黄河流域四川段的马缨丹(*Lantana camara*)生命力和适应性极强,在极度缺水 and 土壤贫瘠生境仍能快速生长,并且对不同生境表现出高度的适应性,在旷野、山沟底、山坡、草地、路边等生境均能定殖扩繁(林英等, 2008; 张春梅等, 2016)。此外,黄河水环境的恶化会对多数水生动物造成严重影响,而入侵动物自身的较强适应性反而成为其快速入侵繁殖的有利条件。比如:入侵黄河上游地区的克氏原螯虾,由于具有生境适应性广、抗逆性强等特点,所以当逃逸到水生动物较少的污染水环境后,能够迅速建立野生种群,形成单一优势群落,进一步影响水生生物的多样性(蔡凤金等, 2010)。

3.3 天敌逃逸的影响

自然界中,每种生物均有自身的天敌。生物与其天敌长期的适应进化,相互制约,使其种群数量能够保持动态平衡。然而,外来种传入新的生境,通常会缺失专食性天敌制约,导致生物控制机制丧

失,使得外来物种的种群数量短期内大幅增加,暴发成灾(Keane & Crawley, 2002; Ren & Zhang, 2009)。而且,由于天敌的缺失,外来生物可以把更多的能量分配于自身生长繁殖、抗逆性增强和竞争能力提高等方面,进而加速自身的扩散(Blossey & Nötzold, 1995; Huang et al, 2010; Jack & Friesen, 2019)。例如,在黄河流域河南段普遍发生的空心莲子草,由于逃离了其原产地专食性昆虫和病原微生物的制约,对于广食性昆虫和温度胁迫的抗性能力显著强于本土同属植物,这导致未来气候变暖趋势下,入侵植物竞争力还会进一步提高(潘晓云等, 2007; 刘珍, 2019^②)。

4 生物入侵对黄河流域生态系统的危害

4.1 对生物多样性的影响

外来生物在入侵地大量的繁殖和疯狂的扩张,不但占据空生态位,而且会通过竞争挤占本土物种的生态位,导致本地种生活习性、生长繁殖、种群动态发生改变,甚至引起本地物种的灭绝,进而引发连锁性灭绝效应,降低生物多样性。例如,引种到黄河三角洲进行养殖的泥螺,在养殖过程中由于出现逃逸现象,使得适应力极强的泥螺在自然生境内迅速繁殖和扩散,短时间内成为黄河三角洲区域滩涂地的优势种,对本地传统贝类的生存产生极大威胁(蒋万钊, 2014)。同时其体表能分泌一种毒素黏液,导致其他贝类缺氧窒息死亡,降低滩涂地生物多样性,严重破坏黄河三角洲的生态平衡(赵文溪等, 2017; Chen et al, 2020)。互花米草引入黄河三角洲后快速扩繁,其密布区几乎已无其他本土植物存活,而仅存互花米草单一群落(张俪文等, 2018; Xie et al, 2019)。此外,互花米草导致滩涂地栖息环境发生变化,使得土著物种如盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)和芦苇开始向陆地迁移^③。而这又会影响到本土植物群落为食或作为栖息地的微生物种群、昆虫种群、大型游泳动物和鸟类等的多样性和丰富度,使得生物多样性显著降低(侯栋梁等, 2015; Yang et al, 2018; 解雪峰等, 2020)。

② 刘珍 (2019) 增温对入侵植物空心莲子草与本土植食性昆虫互作关系的影响。硕士学位论文, 河南大学, 开封。

③ 乔沛阳 (2019) 黄河三角洲入侵植物互花米草物理、化学防治研究。硕士学位论文, 内蒙古大学, 呼和浩特。

① 王炳臣 (2014) 氮磷添加对黄河三角洲滨海湿地互花米草入侵影响。硕士学位论文, 青岛科技大学, 山东青岛。

4.2 对群落生态系统的影响

外来物种的暴发还会引起入侵地生境的极大改变, 导致本土生物不再适宜生存, 造成环境恶化, 破坏生态系统的结构和功能, 严重影响群落生态系统的稳定性。例如, 作为饲料引入中国的凤眼莲, 目前广泛分布于黄河流域(潘怀剑和田家怡, 2001; 杜卫兵等, 2002; 黄文邨等, 2019), 其以较强的繁殖能力和逆境适应能力, 可以快速扩繁甚至覆盖整个池塘、湖泊等水生生境, 从而形成致密的草垫(附录4), 遮挡了光线, 并过度消耗水体内氧气和养分, 增强了水体的酸性, 改变了水体的理化性质, 从而严重影响水体中的其他植物和动物的生存, 而动植物的大量死亡又为病原体的滋生提供了适宜场所, 从而使得水质恶化, 水生生态系统彻底失衡(丁建清, 2002; 李礼等, 2018)。

4.3 对人类健康福祉和经济财产的影响

多样化的生物群落和稳定的生态系统可以为人类提供稳定的生态系统服务(ecosystem services), 这对于人类生存至关重要(Díaz et al, 2019; Weiskopf et al, 2020)。然而, 外来种的侵入暴发会严重影响生态系统的服务功能, 对人类的生命财产安全造成不良影响。首先, 外来物种暴发会降低生态系统的农产品供给服务, 直接造成重大的农林牧渔业等的经济损失。如入侵农田生态系统的恶性杂草节节麦和毒麦(*Lolium temulentum*), 因其竞争力极强, 严重影响小麦等粮食作物的产量, 目前节节麦在黄河流域的陕西、河南等小麦产区已有较分布(田朝阳等, 2005; 苏亚蕊等, 2011)。迁飞型入侵害虫(如草地贪夜蛾)寄主范围极其广泛, 对农作物安全造成极大的影响(杨普云等, 2019)。林木业生产上的重大检疫害虫美国白蛾(*Hyphantria cunea*)和松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus*)一旦暴发, 其危害对于林业生产往往是毁灭性打击, 目前在黄河中下游地区已有发生危害的报道(褚栋等, 2009)。而黄河流域作为我国农产品的主产区, 尤其是黄河流经的中下游地区是我国的主要粮仓, 生物入侵在农田生态系统的暴发危害将会对我国的粮食生产以及社会稳定造成严重影响。然而, 目前近90种外来生物已经侵入黄河流域的农田生态系统中, 若不及时有效控制, 将会给我国粮食生产带来巨大打击(闫素丽等, 2011; 郭屹立等, 2013; 陈怡平和傅伯杰, 2019;

耿明全, 2020)。外来物种暴发还会降低生态系统水资源的供应, 目前黄河流域水体污染严重, 可利用水资源十分紧张, 而外来生物的入侵大大降低了黄河水资源的可利用性(章光新等, 2004; 张晓龙, 2005; 姜文来, 2010; 刘峰, 2015), 例如, 在黄河三角洲, 反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)作为外来入侵植物, 种子在含水量较高的环境下能够迅速萌发, 其暴发危害需吸收大量土壤水分, 严重影响其他植物的水资源供给(鲁萍等, 2010; 赵怀浩等, 2011)。相似地, 牛筋草(*Eleusine indica*)在黄河流域广泛分布, 其根系发达, 有效截获土壤水分, 亦可造成土壤中水资源的短缺^①。此外, 除了直接的经济损失, 国家每年需要投入大量的人力和物力治理暴发危害的入侵生物。例如, 全国范围内每年投入上百亿元治理凤眼莲, 但凤眼莲极快的扩繁速度, 使得治理工作收效甚微, 因此呈现出年年治理、年年泛滥的现象(李博等, 2004)。

再者, 外来物种入侵还会影响生态系统的文化服务功能, 如河道、湖泊等被凤眼莲入侵, 会导致水质恶化, 臭气熏天, 影响人们的休闲生活。已入侵黄河中下游地区的豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)会引起严重的过敏反应, 如哮喘和皮炎等, 是世界性毒草(周忠实等, 2015)。在豚草开花季节, 过敏体质的人不得不戴上口罩或者远离豚草发生地, 严重影响正常的生活(附录5)。

5 黄河流域生物入侵防治对策

5.1 政府部门统筹安排, 加大基础理论研究

政府统筹安排, 加强立法监督, 加大执法力度, 对于破坏生态系统行为予以严厉处罚, 加强对黄河流域原有生态系统和生物多样性的保护和修复, 提高其自身抵抗和恢复水平。整合黄河流域各大高校、科研单位相关资源, 加大生物入侵的基础研究和人才培养, 并通过实地调查进一步探明黄河流域生物入侵种类、数量和发生程度, 探究入侵机制, 建立模型预测适生区域及潜在生态危害等, 为有效的防控措施提供理论基础。此外, 建立外来物种相关信息数据库, 实现区域信息共享, 方便相关部门和公众查看。同时, 利用先进的分子科学技术, 建

^① 王新玲 (2016) 牛筋草与棉花的竞争作用及对草甘膦的抗药性研究. 硕士学位论文, 中国农业科学院, 北京.

立黄河流域外来物种种质基因库和数据库,加强基因水平的研究,探究防控新途径。最终建立黄河流域科学有效的生物入侵防控体系,从而实现长治久安的良好生态局面。

5.2 严格规范引种制度,完善引种后的监管

目前,人为引种是黄河流域外来物种入侵的重要途径,近半数的外来动植物入侵是有用物种引入后逃逸造成的。然而,经济发展和人们精神文化的供给又离不开外来物种的引进。因此,建立严格的外来物种准入制度,立法完善引种后的监管势在必行。引种时应加强动植物检疫,从源头上控制外来物种的入侵。针对黄河流域现状,建立统一的引种综合评价中心,从严要求引种前申报、专家评估及审批;强化引种过程中检疫部门的科学检疫,避免有害生物的带入;重视引种后的监管,建立引入物种档案追踪制度,并实现网络共享,实行“谁引进谁负责”机制,避免人为管理不善导致的自然逃逸而造成的外来物种的入侵危害。此外,由于黄河流域植树造林、滩涂地改造、环境绿化等需要引入大量的苗木,引种后可先通过区域示范,明确外来种在当地的生态扩繁表现,在确定安全无害后,再进行大面积的应用和推广。

5.3 提高监测预警水平,加强民众防范意识

提高外来生物入侵的监测预警水平,建立覆盖全区域的动态监测网。针对外来种发生情况分级别监测和防控,如低等级别监控尚在人工饲养或种植阶段的外来种;中等级别预警和铲除已经逃逸并未建立稳定自然种群的外来种;重点部署和防控已经局部暴发危害和具有暴发危害潜力的外来种。此外,对于具有较强迁飞能力的外来物种如草地贪夜蛾、东亚飞蝗(*Locusta migratoria manilensis*)等,因其一旦侵入,危害迅速且巨大,应该建立专门的监测预警中心,并制定相应的应急处理措施。由于黄河滩涂地土质松软,土壤理化性质适宜,极为适合蝗虫产卵繁殖,这也是过去黄河流域蝗灾频发的重要原因,因此滩涂地的自然保护区要重点监测蝗虫的发生动态,以免发生大规模的蝗灾。同时,加强宣传教育,提高民众的科学防范意识和处置能力,形成全民参与氛围,及时发现并处理已形成自然群落的外来物种,杜绝危险的外来物种饲养和放生,使得外来物种在可控阈值内最大程度为当地居民带来经济利益。

5.4 因地制宜,加强流域分段式管理,生态保护与农业发展协同推进

由于黄河流域自身的特异性,既是我国重要的生态屏障,也是农业生产的主要区域。因此,防治生物入侵既要考虑生态环境,又要关注农业生产,而不能简单地把防治措施应用于黄河的全部流域,避免“一刀切”的管理方式。

根据习近平总书记的指导思想,生物入侵的治理也要从实际出发,注重生态环境的保护。在整体流域上统筹谋划,上、中、下游和干支流协同推进治理。同时,流域内进行分段式管理,将黄河流域治理划分责任区至各个州县,从排查、引种到监管、治理都有相对应的部门负责。还应建立相关的研究站以供实时监测,从而更好地把各个流域的特点和当地入侵现状相结合,为黄河流域生态保护提出科学有效的治理办法。

黄河流域农业生态复杂,类型多样,而黄河流域上、中、下游在农林牧副渔业上的发展各有特点,在进行防治过程中,应因地制宜,针对发生情况采取相应的预防或治理措施。黄河上游地区以牧业发展为主,辅以旱作农业,过度放牧给外来毒杂草提供了入侵机会。因此应提前进行杂草入侵的风险预估,以预防为主,避免大面积危害农田和草地生态系统,同时应加强改善草地退化现象,维持生态平衡。而黄河中下游地区是重要的农业发展区域,受自然和人为因素影响,入侵生物在该地区农田生态系统中发生种类较多,但多数还处于潜伏阶段,尚未暴发成灾,应重点以监测为主,辅助进行针对性防治,为促进黄河全流域高质量发展奠定基石。

参考文献

- Blossey B, Nötzold R (1995) Evolution of increased competitive ability in invasive nonindigenous plants: A hypothesis. *Journal of Ecology*, 83, 887–889.
- Cai FJ, Wu ZJ, He N, Ning L, Huang CM (2010) Research progress in invasion ecology of *Procambarus clarkia*. *Chinese Journal of Ecology*, 29, 124–132. (in Chinese with English abstract) [蔡凤金, 武正军, 何南, 宁蕾, 黄乘明 (2010) 克氏原螯虾的入侵生态学研究进展. *生态学杂志*, 29, 124–132.]
- Cao YQ, Zhang TT, Wang XF, Xu D, Lu L (2014) Revision and application of the PDSI index in the Yellow River Basin. *Resources Science*, 36, 1810–1815. (in Chinese with English abstract) [曹永强, 张亭亭, 王学风, 徐丹, 路璐 (2014) 黄河流域帕尔默干旱指数的修正及应用. *资源科*

- 学, 36, 1810–1815.]
- Chen JC, Shen GM, Meng SL, Qu JH (2010) Investigation and study on the aquaculture alien species in the lower reaches of Yangtze River. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26, 315–319. (in Chinese with English abstract) [陈家长, 沈公铭, 孟顺龙, 瞿建宏 (2010) 长江下游流域水产养殖外来物种调查研究. *中国农学通报*, 26, 315–319.]
- Chen MM, Ke YH, Bai JH, Li P, Liu MY, Gong ZN, Zhou DM (2020) Monitoring early stage invasion of exotic *Spartina alterniflora* using deep-learning super-resolution techniques based on multisource high-resolution satellite imagery: A case study in the Yellow River Delta, China. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 92, 1–14.
- Chen Y, Zhang KY, Chen XD, Liao YH, Song BT, Huang H, Wang XC (2020) Ecological protection and high-quality development in the Yellow River basin. *Regional Economic Review*, (1), 8–22. (in Chinese) [陈耀, 张可云, 陈晓东, 廖元和, 宋丙涛, 黄寰, 王喜成 (2020) 黄河流域生态保护和高质量发展. *区域经济评论*, (1), 8–22.]
- Chen YP, Fu BJ (2019) On the construction of ecological civilization in the Yellow River Basin. *Chinese Science News*, 2019-12-20. (in Chinese) [陈怡平, 傅伯杰 (2019) 关于黄河流域生态文明建设的思考. *中国科学报*, 2019-12-20.]
- Chu D, Liu KC, Zhang Z, Yu Y (2009) Current status of biological invasion in Shandong Province and its management strategies: Thoughts on invasion of alien species *Hyphantria cunea* (Drury). *Shandong Agricultural Sciences*, 43, 121–124. (in Chinese with English abstract) [褚栋, 刘开昌, 张正, 于毅 (2009) 山东省生物入侵的现状及其防控对策——由入侵物种美国白蛾大暴发引发的思考. *山东农业科学*, 43, 121–124.]
- Deng LJ, Zou ZM (2012) Growth regularity, seed propagation and control effect of *Bidens pilosa*. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 25, 1460–1463. (in Chinese with English abstract) [邓玲姣, 邹知明 (2012) 三叶鬼针草生长、繁殖规律与防除效果研究. *西南农业学报*, 25, 1460–1463.]
- Díaz S, Settele J, Brondízio E, Ngo H, Guèze M, Agard J, Arneth A, Balvanera P, Brauman K, Butchart S, Chan K, Garibaldi L, Ichii K, Liu J, Subrmanian S, Midgley G, Miloslavich P, Molnár Z, Obura D, Pfaff A, Polasky S, Purvis A, Razaque J, Reyers B, Chowdhury R, Shin Y, Visseren-Hamakers I, Wilis K, Zayas C (2019) Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on biodiversity and ecosystem services. *Natural Resources & Environment*, 45, 665–686.
- Ding JQ (2002) The mechanism of biological invasion and its effect on ecosystem safety. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 4(4), 16–20. (in Chinese with English abstract) [丁建清 (2002) 外来生物的入侵机制及其对生态安全的影响. *中国农业科技导报*, 4(4), 16–20.]
- Ding JQ, Richard NM, Lu P, Ren MX, Huang HW (2008) China's booming economy is sparking and accelerating biological invasions. *BioScience*, 58, 317–324.
- Du WB, Ye YZ, Zhang XY, Yuan ZL (2002) Study on the foreing harmful plant in Henan. *Henan Science*, 21, 52–55. (in Chinese with English abstract) [杜卫兵, 叶永忠, 张秀艳, 袁志良 (2002) 河南主要外来有害植物的初步研究. *河南科学*, 21, 52–55.]
- Feng HC, Chen XR, Li ZW, Han ZJ (2015) Harm of aquatic plant invasion on aquatic ecosystem. *Fishery Guide to be Rich*, (3), 28–30. (in Chinese) [冯洪超, 陈秀荣, 李振武, 韩志娟 (2015) 水生植物入侵对水生生态系统的危害. *渔业致富指南*, (3), 28–30.]
- Frankow-Lindberg BE, Brophy C, Collins RP, Connolly J (2009) Biodiversity effects on yield and unsown species invasion in a temperate forage ecosystem. *Annals of Botany*, 103, 913–921.
- Gao Y, Liu JY, Zhang TT, Feng GP, Zhang T, Yang G, Zhuang P (2017) Escaped aquacultural species promoted the alien species invasion in the Yangtze River: A case study of sturgeons. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 1739–1745. (in Chinese with English abstract) [高宇, 刘鉴毅, 张婷婷, 冯广朋, 张涛, 杨刚, 庄平 (2017) 水产养殖逃逸对长江外来种入侵影响: 以鲟鱼为例. *生态学杂志*, 36, 1739–1745.]
- Gao YL, Lian Y, Zhu TQ (2004) Thoughts on the conservation of fish resources in the Yellow River. *Yellow River*, 26(10), 12–14. (in Chinese) [高玉玲, 连煜, 朱铁群 (2004) 关于黄河鱼类资源保护的思考. *人民黄河*, 26(10), 12–14.]
- Geng MQ (2020) Analysis on the comprehensive improvement project of the Yellow River control and protection in Henan Province. *Yellow River*, 42(9), 76–80. (in Chinese with English abstract) [耿明全 (2020) 黄河下游河南段治理与保护综合提升工程分析. *人民黄河*, 42(9), 76–80.]
- Guo YL, Ding SY, Su S, Lu XL, Yuan XW, Guo JJ, Li QX (2013) Distribution patterns of alien herbs in the Yiluo River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 5438–5447. (in Chinese with English abstract) [郭屹立, 丁圣彦, 苏思, 卢训令, 苑晓雯, 郭静静, 李乾玺 (2013) 伊洛河流域外来草本植物分布格局. *生态学报*, 33, 5438–5447.]
- Han GX, Li YZ, Yu JB, Xu JW, Wang GM, Zhang ZD, Mao PL, Liu YH (2011) Evolution process and related driving mechanisms of Yellow River Delta since the diversion of Yellow River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 467–472. (in Chinese with English abstract) [韩广轩, 栗云召, 于君宝, 许景伟, 王光美, 张志东, 毛培利, 刘玉虹 (2011) 黄河改道以来黄河三角洲演变过程及其驱动机制. *应用生态学报*, 22, 467–472.]
- Hou DL, He DJ, Hong W, You WB, Wu LY, Ji ZR, Xiao SH (2015) Influence of invasive *Spartina alterniflora* on soil ecosystem in coastal wetland. *Wetland Science & Management*, 11(4), 67–72. (in Chinese with English abstract) [侯栋梁, 何东进, 洪伟, 游巍斌, 巫丽芸, 纪志荣, 肖石红 (2015) 入侵种互花米草影响我国滨海湿地土壤生态系统的研究进展. *湿地科学与管理*, 11(4), 67–72.]

- Huang W, Siemann E, Wheeler SG, Zou JW, Carrillo J, Ding JQ (2010) Resource allocation to defense and growth are driven by different responses to generalist and specialist herbivory in an invasive plant. *Journal of Ecology*, 98, 1157–1167.
- Huang WY, Cai T, Gong HH, Meng XC, Liao ZJ, Guo J (2019) Comparative study on biomass in water hyacinth and several raw water plants. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 41, 108–112. (in Chinese with English abstract) [黄文邺, 蔡涛, 龚姮姮, 蒙雪婵, 廖照江, 郭坚 (2019) 凤眼莲与几种水生植物所含生物物质的比较研究. 三峡大学学报(自然科学版), 41, 108–112.]
- Jack CN, Friesen ML (2019) Rapid evolution of *Medicago polymorpha* during invasion shifts interactions with the soybean looper. *Ecology and Evolution*, 9, 10522–10533.
- Jiang H, Xie SG, Zhao WQ, Chang JB (2007) Changes of fish assemblages after construction of Ertan Reservoir in Yalongjiang River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 13, 532–539. (in Chinese with English abstract) [蒋红, 谢嗣光, 赵文谦, 常剑波 (2007) 二滩水电站水库形成后鱼类种类组成的演变. 水生生物学报, 13, 532–539.]
- Jiang WL (2010) Study on the adaptive strategy for China's water resources problems. *Science and Society*, (2), 24–29. (in Chinese) [姜文来 (2010) 应对我国水资源问题适应性战略研究. 科学与社会, (2), 24–29.]
- Jiang WZ (2014) Study on the distribution, growth and control techniques of mud snails in the Yellow River Delta. *Hebei Fisheries*, (4), 11–12. (in Chinese) [蒋万钊 (2014) 黄河三角洲泥螺分布、生长规律的演变及控制技术研究. 河北渔业, (4), 11–12.]
- Jiang YY, Liu J, Xie MC, Li YH, Yang JJ, Zhang ML, Qiu K (2019) Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019. *Plant Protection*, 45(6), 10–19. (in Chinese with English abstract) [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 李亚红, 杨俊杰, 张曼丽, 邱坤 (2019) 2019年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测. 植物保护, 45(6), 10–19.]
- Ju RT, Li H, Shih CJ, Li B (2012) Progress of biological invasions research in China over the last decade. *Biodiversity Science*, 20, 581–611. (in Chinese with English abstract) [鞠瑞亭, 李慧, 石正人, 李博 (2012) 近十年中国生物入侵研究进展. 生物多样性, 20, 581–611.]
- Keane RM, Crawley MJ (2002) Exotic plant invasions and the enemy release hypothesis. *Trends in Ecology & Evolution*, 17, 164–170.
- Li B, Liao CZ, Gao L, Luo YQ, Ma ZJ (2004) Strategic management of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), an invasive alien plant. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 43, 267–274. (in Chinese with English abstract) [李博, 廖成章, 高雷, 骆亦其, 马志军 (2004) 入侵植物凤眼莲管理中的若干生态学问题. 复旦学报(自然科学版), 43, 267–274.]
- Li C, Xie F (2004) Invasion of bullfrog (*Rana catesbeian* Show) in China and its management strategies. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 10, 95–98. (in Chinese with English abstract) [李成, 谢锋 (2004) 牛蛙入侵新案例与管理对策分析. 应用与环境生物学报, 10, 95–98.]
- Li CK, Zhang YX, Jia YX, Zhang GY (2011) Research on investigation into the alien invasive biological species in Henan Province and measure for it. *Journal of Henan Agricultural University*, 45, 672–677. (in Chinese with English abstract) [李长看, 张云霞, 贾元翔, 张光宇 (2011) 河南省生物入侵种调查及对策研究. 河南农业大学学报, 45, 672–677.]
- Li F, Zhang JJ, Yuan YF, Feng H, Zhang JY, Yang XZ (2008) Present situation and problems on fish introduction in Yellow River system. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 36, 15024–15026. (in Chinese with English abstract) [李芳, 张建军, 袁永锋, 冯慧, 张军燕, 杨兴中 (2008) 黄河流域鱼类引种现状及存在问题. 安徽农业科学, 36, 15024–15026.]
- Li HJ, Yuan YF, Li YD, Zhang JJ (2009) Research progress of aquatic biological resources in the Yellow River basin. *Hebei Fisheries*, (10), 1–3. (in Chinese) [李红娟, 袁永锋, 李引娣, 张建军 (2009) 黄河流域水生生物资源研究进展. 河北渔业, (10), 1–3.]
- Li KM, Li X, Wang CY, Qiao YJ (2013) Research on the environmental effect caused by climate change in the source region of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35, 1183–1192. (in Chinese with English abstract) [李开明, 李绚, 王翠云, 乔艳君 (2013) 黄河源区气候变化的环境效应研究. 冰川冻土, 35, 1183–1192.]
- Li L, Lin YB, Liu C (2018) Review on biological characteristics and management strategies of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 46(3), 60–62. (in Chinese with English abstract) [李礼, 林艺滨, 刘灿 (2018) 入侵植物凤眼莲的生物学特性及生态管理对策. 安徽农业科学, 46(3), 60–62.]
- Li ZY, Xie Y (2002) *Alien Invasive Species in China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [李振宇, 解焱 (2002) 中国外来入侵种. 中国林业出版社, 北京.]
- Lin Y, Dai ZC, Si CC, Du DL (2008) A study survey and prospect on invasive condition and invasive mechanism of *Lantana camara* L. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science)*, 26, 87–93. (in Chinese with English abstract) [林英, 戴志聪, 司春灿, 杜道林 (2008) 入侵植物马缨丹(*Lantana camara*)入侵状况及入侵机理研究概况与展望. 海南师范大学学报(自然科学版), 26, 87–93.]
- Liu F (2015) Preliminary Study of Pollution, Degradation and Remediation in Aquatic Ecosystem of Yellow River Delta Wetland. PhD dissertation, Ocean University of China, Qingdao. (in Chinese with English abstract) [刘峰 (2015) 黄河三角洲湿地水生态系统污染、退化与湿地修复的初步研究. 博士学位论文, 中国海洋大学, 青岛.]
- Liu QN, Liu JZ, Liu JT, Meng XD (2006) Preliminary study on the alien invasive and harmful biotics in the Yellow River Delta. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 37, 581–585. (in Chinese with English abstract) [刘庆年, 刘俊展, 刘京涛, 孟向东 (2006) 黄河

- 三角洲外来入侵有害生物的初步研究. 山东农业大学学报(自然科学版), 37, 581–585.]
- Liu T, Liu YW, Wang YJ, Zou Y, Wu YY, Li QC, Song AH (2018) Biological characteristic of *Bullacta exarata* population in intertidal zone of Yellow River Delta, China. Fisheries Science & Technology Information, 45, 347–351. (in Chinese with English abstract) [刘童, 刘元文, 王英俊, 邹琰, 吴莹莹, 李翹楚, 宋爱环 (2018) 黄河口三角洲潮间带泥螺群体的生物学特性研究. 水产科技情报, 45, 347–351.]
- Lu F, Wang X (2017) General situation of the introduction and genetic diversity of *Spartina alterniflora*. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 47, 107–112. (in Chinese with English abstract) [路峰, 王昕 (2017) 互花米草引种及遗传多样性研究进展. 山东林业科技, 47, 107–112.]
- Lu P, Liang H, Wang HY, Bai YM, Gao FJ, Song G, Wu Y, Tian QY (2010) Research progress on exotic invasive weed *Amaranthus retroflexus*. Chinese Journal of Ecology, 29, 1662–1670. (in Chinese with English abstract) [鲁萍, 梁慧, 王宏燕, 白雅梅, 高凤杰, 宋戈, 吴岩, 田秋阳 (2010) 外来入侵杂草反枝苋的研究进展. 生态学杂志, 29, 1662–1670.]
- Niu BL (1996) Fifty years of harnessing the lower reaches of the Yellow River. Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute, 9(3), 5–7. (in Chinese) [钮本良 (1996) 黄河下游治理五十年述要. 黄河水利教育, 9(3), 5–7.]
- Pan HJ, Tian JY (2001) Alien harmful plants in Shandong Province. Plant Quarantine, 23(4), 245–246. (in Chinese) [潘怀剑, 田家怡 (2001) 山东省的外来有害植物. 植物检疫, 23(4), 245–246.]
- Pan XY, Geng YP, Alejandro SOSA, Zhang WJ, Li B, Chen JK (2007) Invasive *Alternanthera philoxeroides*: Biology, ecology and management. Acta Phytotaxonomica Sinica, 13, 884–900. (in Chinese with English abstract) [潘晓云, 耿宇鹏, Alejandro SOSA, 张文驹, 李博, 陈家宽 (2007) 入侵植物喜旱莲子草——生物学、生态学及管理. 植物分类学报, 13, 884–900.]
- Qiu JS, Zhang NN, Tian MJ, Xu ZZ, Ban QM (2019) Influence of invasive alien species on people's livelihood and ecology in North & South Pan River and Hongshui River Valley. Guizhou Forestry Science and Technology, 47(4), 18–22. (in Chinese with English abstract) [邱建生, 张念念, 田茂娟, 徐泽洲, 班启明 (2019) 外来入侵物种对南北盘江及红水河流域民生和生态的影响研究. 贵州林业科技, 47(4), 18–22.]
- Ren MX, Zhang QG (2009) The relative generality of plant invasion mechanisms and predicting future invasive plants. Weed Research, 49, 449–460.
- Stokstad E (2017) New crop pest takes Africa at lightning speed. Science, 356, 473–474.
- Su YR, Liu XH, Zhang DL, Li S (2011) Screening and analysis of pre-harvest sprouting resistant germplasm from *Aegilops tauschii* in the middle reaches of the Yellow River. Journal of Plant Genetic Resources, 12, 1004–1009. (in Chinese with English abstract) [苏亚蕊, 刘新浩, 张大乐, 李锁 (2011) 黄河中游地区节节麦抗穗发芽的鉴定与分析. 植物遗传资源学报, 12, 1004–1009.]
- Tian CY, Li JZ, Xu JW, Zheng XJ, Zhu CS (2005) Studies on the alien invasive plants and their control in Henan Province. Journal of Henan Agricultural Sciences, 34, 31–34. (in Chinese with English abstract) [田朝阳, 李景照, 徐景文, 郑晓军, 朱长山 (2005) 河南外来入侵植物及防除研究. 河南农业科学, 34, 31–34.]
- Wan FH, Guo JY, Wang DH (2002) Alien invasive species in China: Their damages and management strategies. Biodiversity Science, 10, 119–125. (in Chinese with English abstract) [万方浩, 郭建英, 王德辉 (2002) 中国外来入侵生物的危害与管理对策. 生物多样性, 10, 119–125.]
- Wang FF, Yan JG, Ma X, Qiu DD, Cui BS (2020) Decomposition characteristics of vegetation litter of *Suaeda salsa* and *Spartina alterniflora* in saltmarsh of the Yellow River Estuary, China. Journal of Natural Resources, 35, 480–492. (in Chinese with English abstract) [汪芳芳, 闫家国, 马旭, 邱冬冬, 崔保山 (2020) 黄河口盐沼湿地盐地碱蓬和互花米草凋落物的分解特征. 自然资源学报, 35, 480–492.]
- Wang MN, Dai ZC, Qi SS, Wang XY, Du DL (2014) Main hypotheses and research progress of invasive mechanism of alien plants. Jiangsu Agricultural Sciences, 42, 378–382. (in Chinese with English abstract) [王明娜, 戴志聪, 祁珊珊, 王晓莹, 杜道林 (2014) 外来植物入侵机制主要假说及其研究进展. 江苏农业科学, 42, 378–382.]
- Wang N, Yuan ML, Chen H, Li ZZ, Zhang MX (2019) Effects of drought stress and rewatering on growth and physiological characteristics of invasive *Aegilops tauschii* seedlings. Acta Prataculturae Sinica, 28, 70–78. (in Chinese with English abstract) [王宁, 袁美丽, 陈浩, 李真真, 张铭鑫 (2019) 干旱胁迫及复水对入侵植物节节麦幼苗生长及生理特性的影响. 草业学报, 28, 70–78.]
- Wang W, Xia RB (2019) On the reasons for the increase of floods in the Yellow River during the little ice age in Ming and Qing dynasties—Based on the perspective of climate change. Journal of Western, (5), 42–45. (in Chinese) [王威, 夏如兵 (2019) 试论明清小冰期黄河水患增多的原因——基于气候变化的视角. 西部学刊, (5), 42–45.]
- Wang Y, Zhang YZ (1998) Human activities and the influence of the Yellow River cutoff and coastal environment. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 44(3), 3–5. (in Chinese with English abstract) [王颖, 张永战 (1998) 人类活动与黄河断流及海岸环境影响. 南京大学学报(自然科学版), 44(3), 3–5.]
- Weiskopf SR, Rubenstein MA, Crozier LG, Gaichas S, Griffis R, Halofsky JE, Hyde KJW, Morelli TL, Morissette JT, Muñoz RC, Pershing AJ, Peterson DL, Poudel R, Staudinger MD, Sutton-Grier AE, Thompson L, Vose J, Weltzin JF, Whyte KP (2020) Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. Science of the Total Environment, 733, 1–13.

- White LF, Shurin JB (2007) Diversity effects on invasion vary with life history stage in marine macroalgae. *Oikos*, 116, 1193–1203.
- Wu H, Ding JQ (2014) Recent progress in invasion ecology. *Chinese Science Bulletin*, 59, 438–448. (in Chinese with English abstract) [吴昊, 丁建清 (2014) 入侵生态学最新研究动态. *科学通报*, 59, 438–448.]
- Wu T, Li JX, Dai J, Wang RQ (2007) Floristic characteristics and spatial distribution patterns of alien plants in Shandong Province. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 489–494. (in Chinese with English abstract) [吴彤, 李俊祥, 戴洁, 王仁卿 (2007) 山东省外来植物的区系特征及空间分布. *生态学杂志*, 26, 489–494.]
- Wu ZN, Huang SQ, Di DY, Wang HL (2019) Study on the value and spatial distribution of water resources in agricultural system of the Yellow River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage*, 38, 93–100. (in Chinese with English abstract) [吴泽宁, 黄硕俏, 狄丹阳, 王慧亮 (2019) 黄河流域农业系统水资源价值及其空间分布研究. *灌溉排水学报*, 38, 93–100.]
- Xie BH, Han GX, Qiao PY, Guan B (2019) Effects of mechanical and chemical control on invasive *Spartina alterniflora* in the Yellow River Delta, China. *PeerJ*, 7, e7665.
- Xie XF, Sun XM, Wu T, Jiang GJ, Pu LJ, Xiang Q (2020) Impact of *Spartina alterniflora* invasion on coastal wetland ecosystem: Advances and prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 1–11. (in Chinese with English abstract) [解雪峰, 孙晓敏, 吴涛, 蒋国俊, 濮励杰, 项琦 (2020) 互花米草入侵对滨海湿地生态系统影响研究进展. *应用生态学报*, 31, 1–11.]
- Xu CY, Zhang WJ, Lu BR, Chen JK (2001) Progress in studies on mechanisms of biological invasion. *Biodiversity Science*, 9, 430–438. (in Chinese with English abstract) [徐承远, 张文驹, 卢宝荣, 陈家宽 (2001) 生物入侵机制研究进展. *生物多样性*, 9, 430–438.]
- Yan CR, Mei XR, He WQ, Yang J (2006) Status and characteristics of conservation tillages in Yellow River Basin. *Journal of Agro-Environment Science*, 25, 844–847. (in Chinese with English abstract) [严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 杨捷 (2006) 黄河流域保护性耕作技术的应用现状及特点. *农业环境科学学报*, 25, 844–847.]
- Yan HQ (2009) The influence of the diversion of the Yellow River on the Yellow River Delta in 1855. *Chinese Literature and History*, 29(4), 17–20. (in Chinese) [阎海青 (2009) 1855年黄河改道对黄河三角洲的影响. *文史知识*, 29(4), 17–20.]
- Yan SL, Huangfu CH, Li G, Zuo ZJ, Ma J, Yang DL (2011) Effects of replacement control with four forage species on bacterial diversity of soil invaded by *Flaveria bidentis*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 45–55. (in Chinese with English abstract) [闫素丽, 皇甫超河, 李刚, 左照江, 马杰, 杨殿林 (2011) 四种牧草植物替代控制对黄顶菊入侵土壤细菌多样性的影响. *植物生态学报*, 35, 45–55.]
- Yang LJ, Ma XC, Jia JJ, Yan J, Luan ZD (2020) Impacts of channel shifts and interannual sediment load reducing of the Yellow River on the grain size characteristics of sediments in the Shandong mud wedge over the past 100 years. *Haiyang Xuebao*, 42(1), 78–89. (in Chinese) [杨立建, 马小川, 贾建军, 阎军, 栾振东 (2020) 近百年来黄河改道及输沙量变化对山东半岛泥质楔沉积物粒度特征的影响. *海洋学报*, 42(1), 78–89.]
- Yang PY, Zhu XM, Guo JF, Wang ZY (2019) Strategy and advice for managing the fall armyworm in China. *Plant Protection*, 45(4), 1–6. (in Chinese with English abstract) [杨普云, 朱晓明, 郭井菲, 王振营 (2019) 我国草地贪夜蛾的防控对策与建议. *植物保护*, 45(4), 1–6.]
- Yang W, Jeelanib N, Zhu HZ, Luo YQ, Cheng XL, An SQ (2018) Alterations in soil bacterial community in relation to *Spartina alterniflora* Loisel. invasion chronosequence in the eastern Chinese coastal wetlands. *Applied Soil Ecology*, 135, 38–43.
- Yu ZR, Dou SZ, Zhao PC, Liu GC, Zhang C, Pei F (2004) Relationship between changes of Dongping Lake and shifting of the Yellow River in Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 6, 469–479. (in Chinese with English abstract) [喻宗仁, 窦素珍, 赵培才, 刘桂成, 张成, 裴放 (2004) 山东东平湖的变迁与黄河改道的关系. *古地理学报*, 6, 469–479.]
- Zhang CM, Zhang CF, Zhu QQ, Jia YX, Luo X, Zhang SR, Li Y, Li T (2016) Physiological response and subcellular distribution of copper in *Lantana camara* L. *Journal of Agro-Environment Science*, 35, 21–28. (in Chinese with English abstract) [张春梅, 张长锋, 朱青青, 贾永霞, 罗弦, 张世熔, 李云, 李婷 (2016) 马缨丹对铜的生理响应及亚细胞分布特征. *农业环境科学学报*, 35, 21–28.]
- Zhang DC, Zheng JL (2019) Preliminary study on invasion of alien fish species after construction of hydropower projects. *Yangtze River*, 50(2), 83–89. (in Chinese with English abstract) [张登成, 郑娇莉 (2019) 水电工程建设前后外来鱼类入侵问题初步研究. *人民长江*, 50(2), 83–89.]
- Zhang GX, Deng W, He Y (2004) Groundwater crisis and sustainable agricultural development in North China. *Arid Land Geography*, 27, 437–441. (in Chinese with English abstract) [章光新, 邓伟, 何岩 (2004) 我国北方地下水危机与可持续农业的发展. *干旱区地理*, 27, 437–441.]
- Zhang HW (2020) Problems and countermeasures in the protection and development of the Yellow River basin. *Yellow River*, 42(3), 1–10. (in Chinese with English abstract) [张红武 (2020) 黄河流域保护和发展存在的问题与对策. *人民黄河*, 42(3), 1–10.]
- Zhang HX (2010) The ecological threat of alien turtle or turtle category to original types in Yellow River Basin. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 17, 328–330. (in Chinese with English abstract) [张红星 (2010) 黄河中游流域外来龟、鳖类对原有种类的生态威胁. *现代农业科*

- 技, 17, 328–330.]
- Zhang LW, Zhao YJ, Wang AD, Feng GH, Song JB, Xie BH, Han GX, Lü JZ, Zhu SY (2018) Genetic variation and spread of *Spartina alterniflora* in the Yellow River Delta. *Wetland Science*, 16, 1–8. (in Chinese with English abstract) [张俐文, 赵亚杰, 王安东, 冯光海, 宋建彬, 谢宝华, 韩广轩, 吕卷章, 朱书玉 (2018) 黄河三角洲互花米草的遗传变异和扩散. *湿地科学*, 16, 1–8.]
- Zhang PJ, Zhao LQ, Liang CX, Zhang GL, Zhang QQ, Yue L, Xu BY, Yang J, Zhang PQ, Qing H (2019) Risk assessment of alien invasive plants in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Ecology*, 38, 1973–1981. (in Chinese with English abstract) [张璞进, 赵利清, 梁晨霞, 张国龙, 张迁迁, 岳丽, 徐步云, 杨劼, 张培青, 清华 (2019) 内蒙古外来植物入侵风险评价. *生态学杂志*, 38, 1973–1981.]
- Zhang XL (2005) The Environmental Change and Degradation of Modern Yellow River Delta Coastal Wetland. PhD dissertation, Ocean University of China, Qingdao, Shandong. (in Chinese with English abstract) [张晓龙 (2005) 现代黄河三角洲滨海湿地环境演变及退化研究. 博士学位论文, 中国海洋大学, 山东青岛.]
- Zhang XY (2015) The relationship between the Yellow River flood and the ecological environment change of the Yellow River Delta in the Qing Dynasty—A case study of the Dongying section of the Yellow River. *China Water Transport*, 15(10), 192–194. (in Chinese) [张小云 (2015) 清代黄河水患与黄河三角洲生态环境变迁的关系——以黄河东营段为例. *中国水运*, 15(10), 192–194.]
- Zhao HH, Tian JY, Cheng JG, Xia JB, Li Y, Guan YP (2011) Distribution of alien invasive pest species and its comprehensive control in Yellow River Delta. *Journal of Binzhou University*, 27(6), 31–36. (in Chinese with English abstract) [赵怀浩, 田家怡, 程建光, 夏江宝, 李媛, 管银屏 (2011) 黄河三角洲地区外来入侵有害生物的种类分布与防治. *滨州学院学报*, 27(6), 31–36.]
- Zhao WX, Song JJ, Yu CY, Liu Y, Liu YW, Guan SG, Yu DD (2017) Research progress on invasion and dispersion of *Bullacta exarata* in the Yellow River Delta. *Ocean Development and Management*, 34(S2), 142–147. (in Chinese with English abstract) [赵文溪, 宋静静, 于超勇, 刘莹, 刘元文, 官曙光, 于道德 (2017) 黄河三角洲区域泥螺入侵与扩散研究进展. *海洋开发与管理*, 34(S2), 142–147.]
- Zheng LM (2007) Grain safety in water diversion areas in lower reaches of the Yellow River. *China Water Resources*, (13), 46–48. (in Chinese with English abstract) [郑利民 (2007) 黄河下游引黄灌区粮食安全问题浅析. *中国水利*, (13), 46–48.]
- Zheng ZX, Wang R, Zhang FJ, Wan FH (2018) The geographic distribution pattern and spatiotemporal dynamic of the invasive alien plant *Flaveria bidentis* (Asteraceae) in China. *Journal of Biosafety*, 27, 295–299. (in Chinese with English abstract) [郑志鑫, 王瑞, 张凤娟, 万方浩 (2018) 外来入侵植物黄顶菊在中国的地理分布格局及其时空动态. *生物安全学报*, 27, 295–299.]
- Zhou ZS, Guo JY, Wan FH (2015) Review on management of *Ambrosia artemisiifolia* using natural enemy insects. *Chinese Journal of Biological Control*, 31, 657–665. (in Chinese with English abstract) [周忠实, 郭建英, 万方浩 (2015) 利用天敌昆虫治理豚草的研究进展. *中国生物防治学报*, 31, 657–665.]

(责任编辑: 鞠瑞亭 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 黄河流经九省区中的外来入侵植物和入侵动物

Appendix 1 Alien invasive plants and animals in nine provinces of the Yellow River
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020208-1.xlsx>

附录2 IUCN公布的最危险入侵物种在黄河九省区的分布情况

Appendix 2 Distribution of the most dangerous invasive species announced by IUCN in nine provinces along the Yellow River
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020208-2.pdf>

附录3 生态环境部公布的重大危害外来物种在黄河九省区的分布情况

Appendix 3 Distribution of the most harmful alien species announced by Ministry of Ecology and Environment in nine provinces of the Yellow River
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020208-3.pdf>

附录4 凤眼莲在池塘暴发危害场景

Appendix 4 The outbreak of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in ponds
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020208-4.pdf>

附录5 居民区附近处于开花期的豚草

Appendix 5 *Ambrosia artemisiifolia* in flowering stage near residential area
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020208-5.pdf>

附录2 IUCN公布的最危险入侵物种在黄河九省区的分布情况

Appendix 2 Distribution of the most dangerous invasive species announced by IUCN in nine provinces along the Yellow River

物种 Species	分布地点 Distribution area									参考文献 Reference
	青海 Qinghai	四川 Sichuan	甘肃 Gansu	宁夏 Ningxia	内蒙古 Neimongol	山西 Shanxi	陕西 Shaanxi	河南 Henan	山东 Shandong	
红耳彩龟 <i>Trachemys scripta elegans</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	刘丹等, 2011; 顾丽华, 2018
德国镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	–	–	–	–	–	–	√	–	√	侯淑敏等, 2016
大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	√	徐海根和强胜, 2017
红罗非鱼 <i>Oreochromis mossambicus × O. niloticus</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	√	陆成伟等, 2020
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	√	–	–	–	–	√	√	–	√	唐文家和何德奎, 2015
蟾胡子鲈 <i>Clarias batrachus</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	√	徐海根和强胜, 2017
食蚊鱼 <i>Gambusia affinis</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	魏洁菲, 2019
牛蛙 <i>Rana catesbiana</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	周伟等, 2012
红火蚁 <i>Solenopsis invicta</i>	–	√	–	–	–	–	–	–	–	邹勤等, 2020
烟粉虱 <i>Bemisia tabaci</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	杨益芬等, 2020
大米草 <i>Spartina anglica</i>	–	–	–	–	–	–	–	√	√	齐艳红等, 2004
黑荆 <i>Acacia mearnsii</i>	–	√	–	–	–	–	–	–	–	周伟佳等, 2011
荆豆 <i>Ulex europaeus</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	蒲芝谷等, 1981
乳浆大戟 <i>Euphorbia Esula</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	田兰婷等, 2016
银合欢 <i>Leucaena leucocephala</i>	–	√	–	–	–	–	–	√	√	李登峰等, 2020
凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>	–	√	–	–	–	–	–	√	√	秦智雅等, 2016

√ 表示入侵生物在该省份已有分布记载; – 表示入侵生物在该省份尚无分布记载。

√ indicates that this invasive species has been recorded in this province; – indicates that this invasive species has not been recorded in this province.

参考文献

Gu LH (2018) Ecological killer—Brazilian tortoise. Environment and Development, 30, 188–189. (in Chinese with English abstract) [顾丽华 (2018)]

- 殷万东, 吴明可, 田宝良, 于宏伟, 王麒云, 丁建清 (2020) 生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1533–1545. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020208>
- 生态杀手——巴西龟. 环境与发展, 30, 188–189.]
- Hou SM, Li WP, Wang YC, Wen SE, Li HB, Gao Z (2016) The current situation of aquatic animals invasion of Shaanxi stretch of the Yellow River. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 46, 82–86. (in Chinese with English abstract) [侯淑敏, 李维平, 王益昌, 问思恩, 李海滨, 高志 (2016) 黄河陕西段水生动物入侵现状分析. 西北大学学报(自然科学版), 46, 82–86.]
- Li DF, Feng QH, Hu ZD, Xu JR (2020) Comparative study on photosynthetic physiological and chlorophyll fluorescence characteristics of *Leucaena leucocephala* in wet and dry season, Jinsha River dry-hot valley, China. Acta Ecologica Sinica, 40, 4105–4113. (in Chinese with English abstract) [李登峰, 冯秋红, 胡宗达, 徐静茹 (2020) 金沙江干热河谷新银合欢(*Leucaena leucocephala*)的光合与荧光特征干湿季对比研究. 生态学报, 40, 4105–4113.]
- Liu D, Shi HT, Liu YX, Wang JC, Gong SP, Wang J, Shen L (2011) Investigation on the distribution of red eared turtle in China. Bulletin of Biology, 46(6), 18–21. (in Chinese) [刘丹, 史海涛, 刘宇翔, 汪继超, 龚世平, 王剑, 沈兰 (2011) 红耳龟在我国分布现状的调查. 生物学通报, 46(6), 18–21.]
- Lu CW (2014) Effects of Environmental Factors on the Growth of Red Tilapia and Sex Determination. Master's dissertation, Fuzhou University, Fuzhou. (in Chinese with English abstract) [陆成伟 (2014) 环境因子对红罗非鱼生长及性别决定的影响研究. 硕士学位论文, 福州大学, 福州.]
- Pu ZG, Jiang XW, Jia KK, Xie QT (1981) Preliminary test on the content of H-resistant substance in seeds and leaves of *Vitex negundo*. Forensic Science and Technology, 6, 12–14. (in Chinese) [蒲芝谷, 蒋心文, 贾康康, 谢其天 (1981) 对我省荆豆种子和叶子含抗H物质的初步试验. 刑事技术, 6, 12–14.]
- Qi YH, Zhao YH, Yin XQ (2004) Ecological distribution of biological invasion in China. Ecology and Environmental Sciences, 13, 414–416. (in Chinese with English abstract) [齐艳红, 赵映慧, 殷秀琴 (2004) 中国生物入侵的生态分布. 生态环境, 13, 414–416.]
- Qin ZY, Tao JY, Hu C, Ruan AD (2016) Distribution, influence and control measures of *Eichhornia crassipes* in China. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 44, 81–84. (in Chinese with English abstract) [秦智雅, 陶景怡, 胡辰, 阮爱东 (2016) 我国水域水葫芦的分布·影响·防治措施. 安徽农业科学, 44, 81–84.]
- Tang WJ, He DK (2015) Investigation on alien fishes in Qinghai Province, China (2001–2014). Journal of Lake Sciences, 27, 502–510. (in Chinese with English abstract) [唐文家, 何德奎 (2015) 青海省外来鱼类调查(2001–2014年). 湖泊科学, 27, 502–510.]
- Tian LT, Zhao XY, Wang NG, Li W, Peng Y, Cai X (2016) FTIR spectra and their taxonomic significance of nine *Euphorbia* species in Shaanxi. Bulletin of Botanical Research, 36, 310–315. (in Chinese with English abstract) [田兰婷, 赵雪艳, 王宁果, 李伟, 彭勇, 蔡霞 (2016) 陕西9种大戟属植物红外光谱分析及其分类学意义. 植物研究, 36, 310–315.]
- Wei JF (2019) Morphological Characteristics Affect Individual Mate Choice Decisions in Female and Male Western Mosquito Fish (*Gambusia affinis*). Master's dissertation, Northwest A & F University, Xi'an. (in Chinese with English abstract) [魏洁菲 (2019) 形态特征对雌雄两性西部食蚊鱼配偶选择决策的影响. 硕士学位论文, 西北农林科技大学, 西安.]

殷万东, 吴明可, 田宝良, 于宏伟, 王麒云, 丁建清 (2020) 生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1533–1545. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020208>

Xu HG, Qiang S (2017) China Invasive Alien Species. Science Press, Beijing. (in Chinese) [徐海根, 强胜 (2017) 中国外来入侵生物. 科学出版社, 北京.]

Yang YF, Yan FF, Zhang RP, Huang Y, Shen XX, Li MY (2020) Progresses in the biology, forecast and management technology of *Bemisia tabaci*. Anhui Agricultural Science Bulletin, 26, 101–103. (in Chinese with English abstract) [杨益芬, 闫芳芳, 张瑞平, 黄岩, 沈祥祥, 李茂业 (2020) 烟粉虱的生物学特性、测报及防控技术研究进展. 安徽农学通报, 26, 101–103.]

Zhou W, Zhao H, Yang X (2012) Prediction of potential geographic distribution areas for *Rana catesbiana* and *Mikania micrantha* in China using GARP Modeling System. Journal of Southwest Forestry University, 32(1), 51–55. (in Chinese with English abstract) [周伟, 赵衡, 杨熙 (2012) 利用GARP生态位模型预测牛蛙和薇甘菊在中国的地理分布. 西南林业大学学报, 32(1), 51–55.]

Zhou WJ, Wu YY, Zheng SS, Zheng QQ, Li Q, Ding BY (2011) Allelopathic effect of *Acacia mearnsii* on the seed germination of several plants. Bulletin of Botanical Research, 31, 235–240. (in Chinese with English abstract) [周伟佳, 吴颖胤, 郑思思, 郑倩倩, 李琼, 丁炳扬 (2011) 黑荆(*Acacia mearnsii*)对几种林下植物种子萌发的化感作用. 植物研究, 31, 235–240.]

Zou Q, Xiao M, Jiang X, Hong J, Chen KL, Chen X, Cao YQ (2020) Dynamics of imported red fire ant *Solenopsis invicta* in Xichang of Sichuan Province. Journal of Xichang University (Natural Science Edition), 34, 54–56. (in Chinese with English abstract) [邹勤, 肖蒙, 蒋鑫, 洪杰, 陈开兰, 陈旭, 曹艳秋 (2020) 四川西昌红火蚁消长规律. 西昌学院学报 (自然科学版), 34, 54–56.]

附录3 生态环境部公布的重大危害外来物种在黄河九省区的分布情况

Appendix 3 Distribution of the most harmful alien species announced by Ministry of Ecology and Environment in nine provinces of the Yellow River

物种 Species	分布地点 Distribution area									参考文献 Reference
	青海 Qinghai	四川 Sichuan	甘肃 Gansu	宁夏 Ningxia	内蒙古 Neimongol	山西 Shanxi	陕西 Shaanxi	河南 Henan	山东 Shandong	
紫茎泽兰 <i>Eupatorium adenophorum</i>	-	√	-	-	-	-	-	-	-	赵浩宇等, 2020
喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	-	√	-	√	√	√	√	√	√	刘伟, 2012
豚草 <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	-	√	-	-	-	-	-	√	√	王晓红, 2019
毒麦 <i>Lolium temulentum</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	何剑和渊建民, 2003; 冯晶, 2016
互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	√	栾兆擎等, 2020
凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>	-	√	-	-	-	-	-	√	√	秦智雅等, 2016
假高粱 <i>Sorghum halepense</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	√	雷军成和徐海根, 2011
美国白蛾 <i>Hyphantria cunea</i>	-	-	-	-	-	-	√	√	√	李淑贤, 2009; 潘孟等, 2020
红脂大小蠹 <i>Dendroctonus valens</i>	-	-	-	-	-	√	√	√	-	姚剑等, 2008
蔗扁蛾 <i>Opogona sacchari</i>	-	√	√	-	-	√	-	√	√	沈幼莲, 2008
牛蛙 <i>Rana catesbiana</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	周伟等, 2012
反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	刘伟, 2006
钻叶紫菀 <i>Aster subulatus</i>	√	√	-	-	-	-	√	√	-	徐海根和强胜, 2017
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	邓玲姣和邹知明, 2012
小白酒草 <i>Conyza canadensis</i>	-	√	√	-	√	√	√	√	√	徐海根等, 2004
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	√	√	√	√	√	√	√	√	√	王瑞等, 2010
尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	√	王瑶瑶, 2019
悬铃木方翅网蝽 <i>Corythucha ciliata</i>	√	√	√	-	-	-	√	√	√	鞠瑞亭和李博, 2010
扶桑绵粉蚧 <i>Phenacoccus solenopsis</i>	-	√	-	-	-	-	-	-	-	王玉生, 2019
垂序商陆 <i>Phytolacca americana</i>	-	√	-	-	-	√	√	√	√	徐海根和强胜, 2017

殷万东, 吴明可, 田宝良, 于宏伟, 王麒云, 丁建清 (2020) 生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1533–1545. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020208>

√ 表示入侵生物在该省份已有分布记载; — 表示入侵生物在该省份尚无分布记载。

√ indicates that this invasive species has been recorded in this province; — indicates that this invasive species has not been recorded in this province.

参考文献

- Cao LY (2013) Causes and control of weed damage of wild oat in wheat field. Pesticide Market News, 14(29), 41–42. (in Chinese) [曹立耘 (2013) 麦田野燕麦草害上升原因及防除. 农药市场信息, 14(29), 41–42.]
- Deng LJ, Zou ZM (2012) Growth regularity, seed propagation and control effect of *Bidens pilosa*. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 25, 1460–1463. (in Chinese with English abstract) [邓玲姣, 邹知明 (2012) 三叶鬼针草生长、繁殖规律与防除效果研究. 西南农业学报, 25, 1460–1463.]
- Feng J (2016) Study on Pest Risk Analysis for the Importation of Alfalfa Hay (*Medicago sativa*) from Sudan. Master's dissertation, Zhejiang University, Hangzhou. (in Chinese with English abstract) [冯晶 (2016) 进境苏丹苜蓿草风险分析与评估研究. 硕士学位论文, 浙江大学, 杭州.]
- Fu JP (2012) The Spatial Pattern of *Phytolacca americana* Linn. and its Control Techniques in Sandy Coastal Shelter Forests. Master's dissertation, Shandong Agricultural University, Taian. (in Chinese with English abstract) [付俊鹏 (2012) 沙质海岸防护林垂序商陆的空间分布格局及其防控技术研究. 硕士学位论文, 山东农业大学, 泰安.]
- Guo XY, Zhang JZ, Guo WD, Lu C (2012) Biological characteristics, hazards and prevention and control of alien invasive plants—*Solanum rostratum*. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 35(6), 73–75. (in Chinese with English abstract) [郭晓艳, 张精哲, 郭卫东, 陆超 (2012) 外来入侵植物——黄花刺茄的生物学特性、危害与防控. 内蒙古林业调查设计, 35(6), 73–75.]
- He J, Yuan JM (2003) Comprehensive control measures of poisonous wheat in Chenggu County. Plant Quarantine, 25(2), 124. (in Chinese) [何剑, 渊建民 (2003) 城固县毒麦的综合治理措施. 植物检疫, 25(2), 124.]
- He P, Ma Q (2018) Distribution and control of cockroaches in China. Journal of Medical Pest Control, 34, 868–872. (in Chinese with English abstract) [贺盼, 马强 (2018) 我国蜚蠊的分布及防制概况. 医学动物防制, 34, 868–872.]
- Huang H, Mao HY, Chen C, Peng J, Huang W (2020) Epidemic situation monitoring and comprehensive control countermeasures of rice water weevil in Xinyang. China Agricultural Technology Extension, 36(1), 85–88. (in Chinese) [黄华, 毛红彦, 陈昌, 彭娟, 黄伟 (2020) 信阳地区稻水象甲疫情监测与综合防控对策. 中国农技推广, 36(1), 85–88.]
- Huo XB (2015) Invasion of *Blattella germanica* and its infestation management in urban environment in China. Chinese Journal of Vector Biology and Control, 26, 114–116. (in Chinese with English abstract) [霍新北 (2015) 我国城市德国小蠊的入侵及预防控制. 中国媒介生物学及控制杂志, 26, 114–116.]
- Ju RT, Li B (2010) Sycamore lace bug, *Corythucha ciliata*, an invasive alien pest rapidly spreading in urban China. Biodiversity Science, 18, 638–646. (in Chinese with English abstract) [鞠瑞亭, 李博 (2010) 悬铃木方翅网蝽: 一种正在迅速扩张的城市外来入侵害虫. 生物多样性, 18, 638–646.]
- Lei JC, Xu HG (2011) Prediction of the potential distribution of the alien invasive plant *Sorghum halepense* in China. Plant Protection, 37(3), 87–92. (in Chinese with English abstract) [雷军成, 徐海根 (2011) 外来入侵植物假高粱在我国的潜在分布区分析. 植物保护, 37(3), 87–92.]
- Li HB, Wu SA (2013) Introduction to a new invasive pest, *Ceroplastes rusci* (Linnaeus) (Hemiptera : Coccoidea : Coccidae). Chinese Journal of Applied Entomology, 50, 1295–1300. (in Chinese with English abstract) [李海斌, 武三安 (2013) 外来入侵新害虫——无花果蜡蚧. 应用昆虫学报, 50, 1295–1300.]
- Li SX, Gao BJ, Zhang DF, Ning C, Qu JL (2009) Studies of risk assessment of *Hypanthia cunea* (Drury). Chinese Agricultural Science Bulletin, 25, 202–206. (in Chinese with English abstract) [李淑贤, 高宝嘉, 张东风, 宁超, 屈金亮 (2009) 美国白蛾危险性评估研究. 中国农学通报, 25, 202–206.]
- Liu BY, Pan YZ, Zhao YD, Cai L, Hou Y, Yang H, Zhang JF (2011) Effects of Pb stress on nutrient accumulation and allocation of *Ageratum conyzoides*. Journal of Agro-Environment Science, 30, 435–442. (in Chinese with English abstract) [刘碧英, 潘远智, 赵杨迪, 蔡蕾, 侯艳, 杨慧, 张建芳 (2011) Pb 胁迫对藿香蓟(*Ageratum conyzoides*)营养积累与分配的影响. 农业环境科学学报, 30, 435–442.]
- Liu W (2006) Geographical Range and Possible Distribution Prediction of Several Main Species in *Amaranthus* in the World. Master's dissertation, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [刘伟 (2006) 苋属入侵种的可能分布区预测及相关环境因子分析. 硕士学位论文, 中国科学院植物研究所, 北京.]
- Liu W (2012) Research on the Biocontrol Technology, Mechanism and Utilization of Alligator Weed (*Alternanthera philoxeroides*). Master's

殷万东, 吴明可, 田宝良, 于宏伟, 王麒云, 丁建清 (2020) 生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1533–1545. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020208>

- dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [刘伟 (2012) 喜旱莲子草的生物防治技术、机理及资源化利用研究. 硕士学位论文, 华东师范大学, 上海.]
- Liu XM, Zhao YQ, Chen J (2013) Research progress on diseases and control techniques of *Procambarus clarkii* in China. *China Fisheries*, 56(10), 64–66. (in Chinese) [刘训猛, 赵宜清, 陈静 (2013) 我国克氏原螯虾病害及防治技术研究进展. 中国水产, 56(10), 64–66.]
- Luan ZQ, Yan DD, Xue YY, Shi D, Xu DD, Liu B, Wang LB, An YT (2020) Research progress on the ecohydrological mechanisms of *Spartina alterniflora* invasion in coastal wetlands. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 37, 469–476. (in Chinese with English abstract) [栾兆擎, 闫丹丹, 薛媛媛, 史丹, 徐丹丹, 刘彬, 王立波, 安玉亭 (2020) 滨海湿地互花米草入侵的生态水文学机制研究进展. 农业资源与环境学报, 37, 469–476.]
- Min YY (2017) A Preliminary Study on the Comparison of the Efficiency of Crayfish and Crab Culture in Jiangnan Area. Master's dissertation, Yangtze University, Jingzhou. (in Chinese with English abstract) [闵云艺 (2017) 江汉地区虾蟹养殖模式效益比较的初步研究. 硕士学位论文, 长江大学, 荆州.]
- Pan M, Sun XJ, Zou B (2020) Rapid control methods of *Hyphantria cunea* in Nanyang City. *Xiandai Horticulture*, 43(9), 191. (in Chinese) [潘孟, 孙新杰, 邹波 (2020) 南阳市美国白蛾快速防控方法. 现代园艺, 43(9), 191.]
- Qi XX (2006) Effect of *Flaveria bidentis* Invasion on Plant Community and Soil Biological Community of Invaded Soil. Master's dissertation, Shenyang Agricultural University, Shenyang. (in Chinese with English abstract) [祁小旭 (2019) 黄顶菊对入侵地植物群落和土壤生物群落特征的影响. 硕士学位论文, 沈阳农业大学, 沈阳.]
- Qin ZY, Tao JY, Hu C, Ruan AD (2016) Distribution, influence and control measures of *Eichhornia crassipes* in China. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 44, 81–84. (in Chinese with English abstract) [秦智雅, 陶景怡, 胡辰, 阮爱东 (2016) 我国水域水葫芦的分布·影响·防治措施. 安徽农业科学, 44, 81–84.]
- Shen YL (2008) Review on the research of *Opogona sacchari*. Zhejiang Entomological Society: Zhejiang Science and Technology Association, 174–179. Hangzhou. (in Chinese) [沈幼莲 (2008) 蔗扁蛾研究综述. 浙江省昆虫学会: 浙江省科学技术协会. 174–179. 杭州.]
- Sun XF (2020) An analysis of the invasion mechanism of invasive plant *Solidago canadensis*. *Horticulture & Seed*, 40(1), 20–22. (in Chinese with English abstract) [孙晓方 (2020) 浅析入侵植物加拿大一枝黄花的入侵机理. 园艺与种苗, 40(1), 20–22.]
- Wang M, Bao M, Ao TG, Ren LL, Luo YQ (2017) Population distribution patterns and ecological niches of two *Sirex* species damaging *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54, 924–932. (in Chinese with English abstract) [王明, 保敏, 敖特根, 任利利, 骆有庆 (2017) 两种共同危害樟子松的树蜂的种群分布格局及生态位对比. 应用昆虫学报, 54, 924–932.]
- Wang R (2006) Historical Reconstruction of Invasion and Expansion and Potential Spread of Some Threatening Invasive Alien Species in China. Master's dissertation, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [王瑞 (2006) 我国严重威胁性外来入侵植物入侵与扩散历史过程重建及其潜在分布区的预测. 硕士学位论文, 中国科学院, 北京.]
- Wang R, Wang YZ, Wan FH (2010) Spatiotemporal expansion pattern and potential spread of invasive alien plant *Erigeron annuus* (Asteraceae) in China. *Chinese Journal of Ecology*, 29, 1068–1074. (in Chinese with English abstract) [王瑞, 王印政, 万方浩 (2010) 外来入侵植物一年蓬在中国的时空扩散动态及其潜在分布区预测. 生态学杂志, 29, 1068–1074.]
- Wang XH (2019) Harm and control of *Ambrosia artemisiifolia* to grassland. *Animal Husbandry in Xinjiang*, 34(4), 44–46. (in Chinese) [王晓红 (2019) 杂草豚草对草原的危害及防控. 新疆畜牧业, 34(4), 44–46.]
- Wang YS (2019) Distribution Pattern and Genetic Structure of *Pheracocns Sotenopsis* Tinsley and Distribution Pattern of Its Parasitoid Wasps in China. PhD dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [王玉生 (2019) 扶桑绵粉蚧在中国的地理分布与遗传结构及其寄生蜂的地理分布格局研究. 博士学位论文, 中国农业科学院, 北京.]
- Wang YY (2019) Gonad Development Examination and Temporal and Spatial Expression Pattern Analysis of Sex Differentiation Related Genes in High Temperature Treated Female *Nile Tilapia*. Master's dissertation, Shandong Agricultural University, Taian. (in Chinese with English abstract) [王瑶瑶 (2019) 高温处理的尼罗罗非鱼性腺分化过程及性别决定相关基因时空表达模式研究. 硕士学位论文, 山东农业大学, 泰安.]
- Wei JF (2019) Morphological Characteristics Affect Individual Mate Choice Decisions in Female and Male Western Mosquito Fish (*Gambusia affinis*). Master's dissertation, Northwest A & F University, Xi'an. (in Chinese with English abstract) [魏洁菲 (2019) 形态特征对雌雄两性西部食蚊鱼配偶选择决策的影响. 硕士学位论文, 西北农林科技大学, 西安.]
- Wei SH, Qu Z, Zhang CX, Li YJ, Li XJ (2006) Invasive alien species giant ragweed (*Ambrosia trifida* L.) and its risk assessment. *Plant Protection*, 44(4), 14–19. (in Chinese with English abstract) [魏守辉, 曲哲, 张朝贤, 李咏军, 李香菊 (2006) 外来入侵物种三裂叶豚草(*Ambrosia trifida* L.)及其风险分析. 植物保护, 44(4), 14–19.]

殷万东, 吴明可, 田宝良, 于宏伟, 王麒云, 丁建清 (2020) 生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1533–1545. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020208>

- Wu WJ, Wu J, Huang YY (2019) Risk analysis of *Solenopsis invicta* in Panxi area of Sichuan Province. *Applicable Technologies for Rural Areas*, 22(11), 50–52. (in Chinese) [吴文佳, 吴劫, 黄跃跃 (2019) 四川省攀西地区全国植物检疫性有害生物红火蚁风险性分析. 农村实用技术, 22(11), 50–52.]
- Wu YM, Jin B, Gu ZR (2018) The distribution and control of *Cydia pomonella* (L.). *Studies on Insects in Central China*, 14, 150–157. (in Chinese with English abstract) [吴永美, 金彪, 谷志容 (2018) 苹果蠹蛾的分布及防控. 华中昆虫研究, 14, 150–157.]
- Xu HG, Qiang S (2017) *China Invasive Alien Species* (revised edition). Science Press, Beijing. (in Chinese) [徐海根, 强胜 (2017) 中国外来入侵生物. 科学出版社, 北京.]
- Yao J, Zhang LW, Yu XF (2008) Advances in red turpentine bark beetle, *Dendroctonus valens* LeConte. *Journal of Anhui Agricultural University*, 52, 416–420. (in Chinese with English abstract) [姚剑, 张龙娃, 余晓峰 (2008) 入侵害虫红脂大小蠹的研究进展. 安徽农业大学学报, 52, 416–420.]
- Zhao HY, Chen XJ, Liu JD, Liu SN, Zhu JY, Zhou XG (2020) Suggestions on prevention and control of several major invasive pests in Sichuan Province. *Sichuan Agriculture and Agricultural Machinery*, 27(2), 51–52. (in Chinese) [赵浩宇, 陈晓娟, 刘俊豆, 刘胜男, 朱建议, 周小刚 (2020) 四川几种主要入侵有害生物防治建议. 四川农业与农机, 27(2), 51–52.]
- Zheng DS (2010) Diversity of oat in China. *Journal of Plant Genetic Resources*, 11, 249–252. (in Chinese with English abstract) [郑殿升 (2010) 中国燕麦的多样性. 植物遗传资源学报, 11, 249–252.]
- Zhou W, Zhao H, Yang X (2012) Prediction of potential geographic distribution areas for *Rana catesbiana* and *Mikania micrantha* in China using GARP Modeling System. *Journal of Southwest Forestry University*, 32(1), 51–55. (in Chinese with English abstract) [周伟, 赵衡, 杨熙 (2012) 利用 GARP 生态位模型预测牛蛙和薇甘菊在中国的地理分布. 西南林业大学学报, 32(1), 51–55.]

殷万东, 吴明可, 田宝良, 于宏伟, 王麒云, 丁建清 (2020) 生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1533–1545. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020208>

附录4 凤眼莲在池塘暴发危害场景

Appendix 4 The outbreak of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in ponds



殷万东, 吴明可, 田宝良, 于宏伟, 王麒云, 丁建清 (2020) 生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1533–1545. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020208>

附录5 居民区附近处于开花期的豚草

Appendix 5 *Ambrosia artemisiifolia* in flowering stage near residential area





•研究报告•

林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta多样性形成的重要驱动力

周昌艳^{1,2} 王彬^{1,3} 邓云^{1,2,4} 乌俊杰⁵ 曹敏^{1*} 林露湘^{1,4*}

1 (中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 昆明 650223)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (云南大学生态学与环境学院暨云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650091)

4 (云南西双版纳森林生态系统国家野外科学观测研究站, 云南勐腊 666303)

5 (大理大学农学与生物科学学院, 云南大理 671003)

摘要: 功能性状beta多样性反映了群落间功能性状组成的差异, 解析其形成机制是群落生态学研究的核心内容之一。本研究以云南西双版纳热带季节雨林20 ha动态监测样地为研究对象, 测定木本植物11个重要的功能性状, 采用多度加权的平均最近邻体性状距离度量不同取样尺度的功能性状beta多样性, 基于距离矩阵的多元回归方法解析林冠结构差异、环境异质性、空间距离在功能性状beta多样性格局形成中的相对作用。结果表明, 对于所有木本植物个体(DBH ≥ 1 cm)而言, 同时考虑林冠结构、环境和空间距离的模型为解释功能性状beta多样性格局的最优模型; 在3个不同取样尺度上, 林冠结构差异和环境距离都对功能性状beta多样性具有较大的解释力, 且随着取样尺度的增大而上升, 空间距离的作用基本可以忽略。本研究证实了林冠结构是局域尺度木本植物功能性状beta多样性格局形成的重要驱动力, 这一发现更新了环境异质性和空间距离是驱动功能性状beta多样性格局形成的主要因素的传统认知, 为将来研究功能性状beta多样性形成机制提供新的视角, 并证实了取样尺度在解析木本植物功能性状beta多样性格局形成机制中的重要性。

关键词: 环境异质性; 空间距离; 热带季节雨林; 森林动态监测样地; 西双版纳

Canopy structure is an important factor driving local-scale woody plant functional beta diversity

Changyan Zhou^{1,2}, Bin Wang^{1,3}, Yun Deng^{1,2,4}, Junjie Wu⁵, Min Cao^{1*}, Luxiang Lin^{1,4*}

1 CAS Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 School of Ecology and Environmental Sciences & Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, Yunnan University, Kunming 650091

4 National Forest Ecosystem Research Station at Xishuangbanna, Mengla, Yunnan 666303

5 College of Agriculture and Biology, Dali University, Dali, Yunnan 671003

Abstract: Functional beta diversity refers to the variation of functional composition between communities. Exploring the mechanisms underlying functional beta diversity is a central theme in community ecology. We measured 11 important functional traits of woody plants in 20 ha forest dynamics plot in Xishuangbanna tropical seasonal rainforest and used abundance-weighted mean nearest neighbor trait distance to quantify the functional beta diversity at different sampling scales. We revealed the relative importance of canopy structure, environmental heterogeneity, and spatial distance on functional beta diversity using multiple regressions on distance matrices. Our results showed that, for all woody plant individuals with DBH ≥ 1 cm, the best model to explain the functional beta diversity was one including canopy structure, environment, and spatial distance. At each of the three sampling scales, canopy structure and environment had relatively large

收稿日期: 2020-03-09; 接受日期: 2020-06-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0500202)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: caom@xtbg.ac.cn; linluxa@xtbg.ac.cn

explanatory power and increased with increasing sampling scale, while the relative importance of spatial distance was negligible. Our findings corroborate that environmental heterogeneity and spatial distance are the two main factors driving functional beta diversity, and we provide new mechanistic insights by including the effects of canopy cover at local scales.

Key words: environmental heterogeneity; spatial distance; tropical seasonal rainforest; forest dynamics plot; Xishuangbanna

Beta多样性是指物种组成在不同时空尺度上的差异, 作为连接alpha多样性和gamma多样性的纽带, 是生态学研究的核心内容之一(Whittaker, 1960; Lande, 1996)。目前, beta多样性格局的形成和维持机制是生态学理论研究的重点内容(陈圣宾等, 2010; Xing & He, 2018)。

通常认为 beta 多样性格局的形成主要由环境过滤和扩散限制这两个生态过程驱动(Legendre et al, 2009; Liu et al, 2015; Qiao et al, 2015; Page et al, 2018)。环境过滤指非生物环境对该环境中的生物进行适应性筛选的过程(Kraft et al, 2015), 环境条件差异越大, 群落间物种组成的差异就越大, 此时环境因子能够很好地解释 beta 多样性格局(Valencia et al, 2004; Fernandez-Gongonget al, 2013)。扩散限制指物种未能将种子扩散到适合其萌发、存活和生长的地点(Hubbell, 2006), 扩散限制的存在使得群落间物种组成的相似性随着空间距离的增加而下降, 空间距离能够很好地解释 beta 多样性格局(Hubbell, 2001; 牛克昌等, 2009)。大量研究表明, beta 多样性格局的形成并不是单一过程的作用, 往往是环境过滤和扩散限制共同作用的结果, 只是在不同森林类型或不同取样尺度它们的相对重要性不同(Bin et al, 2010; Myers et al, 2013; Yang et al, 2015; Page et al, 2018)。

以往对beta多样性的研究主要基于物种维度(Condit et al, 2002; Legendre et al, 2009; 李新辉等, 2016; Page et al, 2018), 然而物种之间并不是相互独立的, 例如, 功能性状在物种间的差异程度是不同的(Swenson et al, 2011; Siefert et al, 2013; Swenson, 2013)。例如, Qian和Ricklefs (2000)研究发现, 对于欧洲、亚洲以及美洲的温带植物来说, 在物种beta多样性较高的情况下功能性状beta多样性却仍然较低。因此, 基于物种维度研究beta多样性格局的形成机制具有一定的局限性, 并不能很好地揭示驱动beta多样性格局形成的作用力。于是, 基于功

能性状维度对beta多样性的研究开始不断增多(Swenson et al, 2012; Wang et al, 2015, 2019; Asefa et al, 2019), 为群落生态学研究提供了新的视角。

各种自然扰动导致的林窗形成将触发森林群落的生长循环, 当森林群落处于不同的生长循环阶段时, 林冠结构具有很大的差异, 例如林冠高度在林窗形成后不断增高直至森林成熟期, 群落中的物种组成和多样性也随之不断发生变化(曹敏等, 2000)。林冠结构的变异导致的森林光环境的空间异质性是更新生态位分化的重要前提条件, 并进一步导致群落物种组成和多样性发生空间变异(Grubb, 1977; Gómez-Aparicio et al, 2006; Philipson et al, 2012; 杨建宇等, 2015)。因此我们认为, 林冠结构差异同样是森林木本植物beta多样性格局形成的驱动力之一。林冠结构特征可以由平均林冠高度、最大林冠高度、林冠高度的标准差等指标来反映。因此, 定量化林冠结构差异对beta多样性的作用是可行的。

以往的研究已经认识到森林结构能够影响物种多样性, 且森林结构参数与树种多样性指数之间存在显著的相关性和因果关系(Hakkenberg et al, 2016; Zhang et al, 2016; Chu et al, 2019)。然而, 物种多样性相似的群落的物种组成也可能存在巨大差异, 森林结构与物种多样性的关系研究并不能解决影响物种组成空间变异的机制问题。我们假设, 林冠结构差异和环境异质性与空间距离一样, 是森林群落间功能性状beta多样性格局形成的重要驱动力。本研究以西双版纳热带季节雨林20 ha动态监测地中DBH ≥ 1 cm的所有木本植物个体为研究对象, 结合树种功能性状、环境因子(土壤和地形)和林冠结构参数, 采用基于距离矩阵的多元回归(multiple regressions on distance matrices, MRM)方法解析林冠结构差异、环境异质性和空间距离在局域尺度木本植物功能性状beta多样性格局形成中的相对作用。

1 材料与方法

1.1 研究区域

云南西双版纳热带季节雨林20 ha动态监测样地(简称版纳大样地, 坐标21°36' N, 101°34' E)位于西双版纳傣族自治州勐腊县补蚌村南贡山东部斑马山山脚, 东西长500 m, 南北宽400 m, 整个样地向西偏斜19°。该区属于热带季风气候, 雨季和旱季交替明显, 每年5–10月属于雨季, 11月到次年4月属于旱季, 年均降水量1,193–2,491 mm, 年平均气温21.4℃。西双版纳的地带性植被主要是热带雨林, 土壤是由白垩纪系砂岩发育而成的砖红壤, 呈酸性(Cao et al, 2006; 兰国玉等, 2008)。样地包含3条沟谷, 每条沟谷的底部较平缓, 但两侧山坡的坡度比较陡, 沟谷底部以及两侧坡面是望天树(*Parashorea chinensis*)占优势的热带季节雨林(Zhu et al, 2006)。林冠上层高达50–60 m, 中下层乔木主要有假海桐(*Pittosporopsis kerrii*)、云树(*Garcinia cowa*)、蚁花(*Mezzettiopsis creaghii*)、染木树(*Saprosma ternata*)、红光树(*Knema furfuracea*)和木奶果(*Baccaurea ramiflora*)等。在样地的山脊部分是大约50–60年前刀耕火种弃耕后发展起来的次生林, 其优势种为短刺锥(*Castanopsis echidnocarpa*)。版纳大样地于2012年完成第二次清查, 此次调查共记录DBH ≥ 1 cm的木本植物共91,222株, 隶属于76科221属397种。本研究所使用的木本植物组成数据来自于2012年的清查数据。

1.2 植物功能性状测定

本研究共测定了木本植物11个重要功能性状, 以反映叶片、木质和种子的功能权衡(Cornelissen et al, 2003; Pérez-Harguindeguy et al, 2013), 包括叶面积(LA, cm²)、叶片厚度(LT, mm)、比叶面积(SLA, cm²/g)、叶干物质含量(LDMC, mg/g)、叶片碳含量(LCC, mg/g)、叶片氮含量(LNC, mg/g)、叶片磷含量(LPC, mg/g)、叶片钾含量(LKC, mg/g)、种子重量(SA, g)、最大树高(MH, m)和木质密度(WD, g/cm³)。于2013年9–10月进行叶片采样, 2014年完成化学元素和木质密度的测定, 共完成397种木本植物2,530个个体的叶片样品采集, 并测定其功能性状。

测定过程如下: (1)在版纳大样地中, 选取长势良好的成年个体作为取样个体, 样地中大于5个个体的树种选取5株, 而小于5个个体的树种, 则在样

地周边进行补采, 每个树种采集的个体数不少于3株。(2)在每个植株冠层外围向阳面采集3片以上健康完好叶片, 采集的叶片均包含完整的叶柄, 叶片采集后将其放入自封袋中带回实验室。(3)每个个体选取3片叶子, 在千分之一精度电子天平称出叶片鲜重, 随后将叶片放在扫描仪上扫描, 使用imageJ图像处理软件计算叶面积(Abramoff et al, 2004)。(4)采用游标卡尺测量每个叶片的近叶柄处、叶片中部和近叶尾处的叶片厚度。(5)随后将叶片样品放入信封, 置于70℃烘箱中烘72 h至恒重, 称量叶片干重, 使用叶面积除以叶片干重计算比叶面积; 将叶片干重除以叶片鲜重计算叶干物含量。(6)去掉叶柄后, 将叶片磨碎, 测定叶片碳、氮、磷、钾含量(乌俊杰, 2016)。(7)种子重量数据来自样地种子雨实测和《中国木本植物种子》(国家林业局国有林场和林木种苗工作总站, 2001), 树种最大高度通过查询《中国植物志》获取(中国科学院中国植物志编辑委员会, 1959–2004)。(8)木质密度测量方法如下: 使用生长锥钻取树芯, 通过水替代法测量出树芯的体积, 随后将树芯放入70℃烘箱中烘72 h至恒重后称重, 将树芯的干重除以体积即为木质密度(Chave et al, 2006)。对于没有实测木质密度的树种, 采用样地同属平均木质密度; 如果同属具有木质密度数据的树种少于3个, 则使用样地同科平均木质密度, 如果同科具有木质密度数据的树种少于3个, 则使用样地所有树种的平均木质密度。

1.3 环境因子测定

本研究将版纳大样地分别划分为500个20 m × 20 m、80个50 m × 50 m和20个100 m × 100 m的小样方, 测定上述不同取样尺度单元的土壤因子和地形因子。

土壤因子包括全碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、有效氮(AN)、有效磷(AP)、有效钾(AK)、土壤容量(SB)和pH值。以版纳大样地400 m × 500 m平面坐标系为基础, 将其划分为30 m × 30 m的规则网格, 以这些网格的252个节点为基本点, 在每个基本点上随机选取坐标系8个方向中的1个方向进行延伸取样, 在选定方向上随机选取距离基本点2 m、5 m或者2 m、15 m或者5 m、15 m三个组合中的一个分别取样, 共756个取样点(John et al, 2007; 胡跃华, 2010)。进行土壤取样之前, 先去除表层凋落物和腐殖质层, 取样深度为矿质土层0–10 cm处。

用10 cm高的环刀取3~5次, 共计500 g左右, 将新鲜土样装入自封袋内带回实验室。选取部分样品采用烘干法测定土壤容重, 剩余的土壤样品与相同对应点的土壤样品混合, 用于土壤元素分析。全氮含量用凯氏定氮法测定; 全钾和全磷含量分别采用ICP-AES测定和HClO₄-HF消解; 有效氮含量的测定采用碱解扩散法; 有效磷含量采用0.03 mol/L NH₄F-0.025 mol/L HCl浸提, 钼锑抗比色法测定; 有效钾含量采用1 mol/L CH₃COONH₄浸提和ICP-AES测定; pH值采用电位计法(胡跃华, 2010)。采用基于半变异函数的普通Kriging法进行插值, 以得到不同取样尺度单元的土壤变量(Cressie, 1990; Diggle et al, 1998), 通过球型模型和加权最小二乘法拟合出最佳半变异函数曲线, 从而获得每个样方中的各个土壤因子的预测值, 使用R软件的gstat程序包实现(Pebesma, 2004)。

地形因子包括海拔、凹凸度、坡度和坡向。每个样方的海拔是该样方4个顶点处海拔的平均值; 凹凸度是由目标样方的海拔减去与该样方相邻的8个样方的平均海拔, 而处于样地边缘或四角的样方, 其凹凸度为该样方的平均海拔减去与其相邻的若干样方的平均海拔; 坡度为目标样方任意三个角构成的平面与水平面夹角的平均值(Harms et al, 2001; Valencia et al, 2004)。坡向采取如下公式进行计算: $Aspect = 180 - \arctan(f_y/f_x) \times (180/\pi) + 90 \times f_y/|f_x|$ (1) 式中, f_y 和 f_x 分别是该样方从北到南和从东到西的海拔差。坡向是取值范围为 $[0, 2\pi]$ 的环形变量, 将其进行正弦和余弦转化后再纳入后续分析。

1.4 林冠结构参数的测定和关键林冠结构参数的筛选

本研究中, 林冠结构参数的获取方法为: 首先, 基于无人机获取版纳大样地的高密度激光雷达点云数据, 采用IPTD (improved progressive TIN densification; Zhao et al, 2016)方法提取地面点, 基于该点云数据采用Kriging方法进行地统计插值, 生成数字高程模型(digital elevation model, DEM), 并利用DEM实现对整体点云数据的地形归一化, 以消除地形的影响。其次, 确定版纳大样地坐标系的起始点、X轴和Y轴方向, 使用ArcMap的“创建鱼网”工具创建一个初始网络, 使用版纳大样地坐标系作为参考, 将行和列分别设置为400和500, 通过空间转化形成符合样地系统的1 m × 1 m网格, 按网格

统计匹配到相应网格中的归一化点云, 统计其高度变量的95%分位值并将其赋值给对应网格。最后, 使用低通滤波器和八邻近均值算法实现异常值的削弱和空洞填补, 最终得到分辨率为1 m × 1 m且匹配版纳大样地坐标系统的林冠高度栅格数据集。在此基础上进一步计算各取样尺度样方的林冠结构参数(附录1)。由于相关林冠结构参数较多且基本可以分为两类, 即反映森林群落的发展阶段和反映光环境的异质性, 本研究对10个林冠结构参数进行模型比较(附录1), 并筛选出表现最佳的两个林冠结构参数(附录2)进入后续模型分析, 分别是反映群落发展阶段的林冠高度和反映光环境异质性的林冠高度标准差。

1.5 功能性状beta多样性及其标准效应值的度量

本文采用多度加权的平均最近邻体性状距离(abundance-weighted mean nearest neighbor trait distance, D_{mn})指数来度量样方间的功能性状beta多样性(Swenson et al, 2012), 计算公式如下:

$$D_{mn} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{k_1}} f_i \min \delta_{ik_2} + \sum_{j=1}^{n_{k_2}} f_j \min \delta_{jk_1}}{2} \quad (2)$$

其中, n_{k_1} 表示群落 k_1 中的物种数; n_{k_2} 表示群落 k_2 中的物种数; $\min \delta_{jk_1}$ 表示群落 k_2 中的物种 j 和群落 k_1 中所有物种的最近性状距离; $\min \delta_{ik_2}$ 表示群落 k_1 中的物种 i 和群落 k_2 中所有物种的最近性状距离; f_i 表示物种 i 在群落 k_1 中的相对多度; f_j 表示 j 在群落 k_2 中的相对多度。

为了度量功能性状beta多样性偏离随机零模型的程度, 采用独立交换算法(Gotelli & Entsminger, 2001)随机置换性状距离矩阵上的物种999次构建零模型, 计算标准效应值(standardized effect size, SES)(Swenson, 2014), 公式如下:

$$SES = \frac{X_{obs} - \text{mean}(X_{null})}{sd(X_{null})} \quad (3)$$

式中, X_{obs} 表示观察值, $\text{mean}(X_{null})$ 表示零模型的平均值, $sd(X_{null})$ 表示零模型的标准差。

1.6 物种beta多样性的度量

本文采用Jaccard相异性指数(Jaccard, 1912)来度量不同取样尺度群落间的物种beta多样性, 计算公式如下:

$$Jaccard \text{相异性指数} = (A + B - 2 \times C) / (A + B - C) \quad (4)$$

其中, A 指样方 a 中的物种数, B 指样方 b 中的物种数, C 指样方 a 和样方 b 中共同拥有的物种数。使用R软件中vegan程序包实现(Oksanen et al, 2019)

1.7 解析环境距离、空间距离和林冠结构差异对beta多样性的解释率

为了消除各变量间共变异对模型分析的影响, 分别对上述变量进行主成分分析(principle component analysis, PCA), 根据Kaiser-Guttman准则计算所有轴的特征根平均值, 选择保留特征根超过平均值的主成分进入后续分析(Jackson, 1993)。本研究选择前3个主成分(附录3)作为功能性状的综合因子, 选取前4个主成分(附录4)作为环境因子的综合因子, 基于上述综合因子采用欧式距离计算并生成各取样尺度样方间的功能距离矩阵和环境距离矩阵。对最大林冠高度和林冠高度的标准差进行自然对数转化并标准化, 再采用欧氏距离计算并生成各取样尺度样方间林冠结构差异的距离矩阵。基于样方中心点的坐标采用欧式距离计算并生成各取样尺度样方间的空间距离矩阵。上述计算均采用R软件(R Core Team, 2018)中的dist函数完成。

本研究采用基于距离矩阵的多元回归(Lichstein, 2007)来评估不同取样尺度林冠结构差异、环境距离和空间距离对功能性状beta多样性和物种beta多样性的解释率(Swenson, 2014)。基于距离矩阵的多元回归分析采用R软件中的ecodist程序包实现(Goslee & Urban, 2007)。

对3个不同取样尺度(20 m × 20 m、50 m × 50 m 和100 m × 100 m)分别进行基于距离矩阵的多元回归模型建模, 根据赤池信息准则(Akaike's informa-

tion criteria, AIC)筛选出最优模型(其AIC值最小)。AIC考虑了模型的统计拟合度以及用来拟合的参数个数, 其判断标准结合了模型的准确性和简洁性, AIC值越小, 代表模型越优(Burnham & Anderson 2002; 宋喜芳等, 2009; 饶米德等, 2013), 计算公式如下(Webster & Mcbratney, 1989):

$$AIC = n \ln(R) + 2k \quad (5)$$

式中, n 为检验模型的样本数, R 为残差平方和, k 为模型中参数个数。

采用多重比较的最小显著差数法(least significant difference, LSD法)比较不同取样尺度之间单纯林冠结构差异、单纯的环境距离和单纯的空间距离对11个功能性状beta多样性解释率的差异, 使用R软件中的agricolae程序包实现(Mendiburu, 2020)。

2 结果

2.1 功能性状beta多样性的标准效应值

总体而言, 对于所有木本植物个体(DBH ≥ 1 cm)来说, 在3个取样尺度上, 样方间的平均最近邻体性状距离的标准效应值大于零和小于零的比例相差无几, 换句话说, 群落间功能性状beta多样性的观察值大于随机零模型期望值的情况和小于随机零模型的情况基本相当(图1)。

2.2 不同取样尺度林冠结构、环境和空间对所有木本植物个体11个功能性状beta多样性的解释率

对所有木本植物个体(DBH ≥ 1 cm)而言, 同时包含环境、空间和林冠结构作为功能性状beta多样性预测变量的基于距离矩阵的多元回归模型, 在3个不同取样尺度上均为最优模型(表1)。单纯的环境

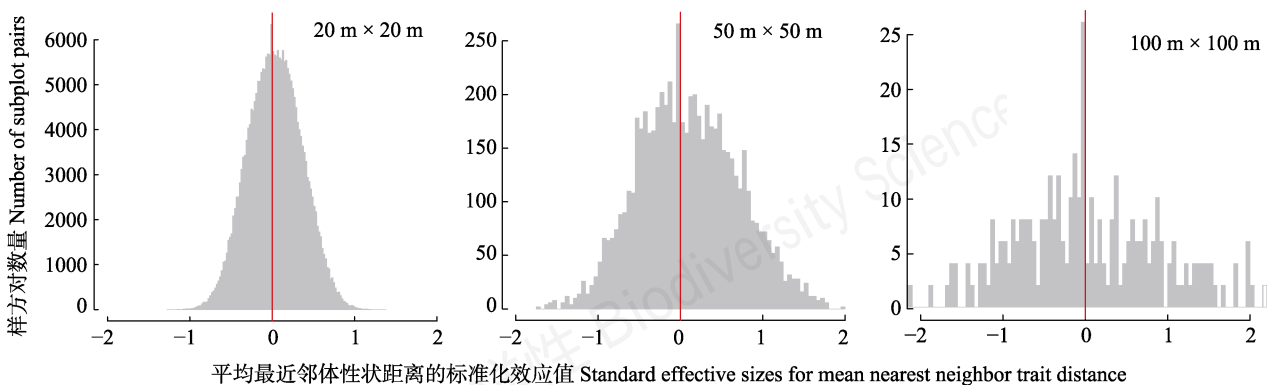


图1 西双版纳热带季节雨林20 ha动态监测样地不同取样尺度群落间的平均最近邻体性状距离的标准效应值的频率分布
Fig. 1 The frequency distribution of standard effective sizes for mean nearest neighbor trait distance across different sampling scales in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

距离在较大取样尺度(50 m × 50 m和100 m × 100 m)上的解释率显著大于较小取样尺度(20 m × 20 m)。单纯的林冠结构差异解释率随着取样尺度的增加而增加,大取样尺度(100 m × 100 m)与中小取样尺度(20 m × 20 m和50 m × 50 m)之间具有显著的差异,而在中小取样尺度之间的解释率无显著差异。无论在哪个取样尺度上,单纯的空间距离解释率均无显著差异(图2)。随着取样尺度的增加,单纯的林冠结构差异、单纯的环境距离和单纯的空间距离对功能性状beta多样性的解释率均不断上升。在较小的取样尺度(20 m × 20 m)上,单纯的林冠结构差异的解释率小于单纯的环境距离,而在较大的取样尺度(50 m × 50 m和100 m × 100 m)上,单纯的林冠结构差异对功能性状beta多样性的解释率均大于单纯的环境距离(附录5),且无论哪个取样尺度,空间距离对功能性状beta多样性的解释率均最小,基本可以忽略不计(附录5,附录6)。对较小个体(1 cm ≤ DBH

表1 西双版纳热带季节雨林20 ha动态监测样地所有DBH ≥ 1cm的个体在不同取样尺度上7个基于距离矩阵的多元回归模型(MRM)的赤池信息准则(AIC)值

Table 1 Akaike information criterion (AIC) values of seven models for multiple regressions on distance matrices (MRM) at each of the three sampling sizes for all individuals with DBH ≥ 1cm in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

模型编号 Model number	20 m × 20 m	50 m × 50 m	100 m × 100 m
F1	425,305.6	975.589	-561.571
F2	445,234.4	1,814.149	-483.077
F3	432,546.1	1,106.623	-538.012
F4	424,768.4	952.598	-563.919
F5	416,299.5	453.418	-614.899
F6	429,732.5	913.658	-576.829
F7	415,512.5	398.450	-624.922

F1: 仅以环境距离为解释变量的MRM模型; F2: 仅以空间距离为解释变量的MRM模型; F3: 仅以林冠结构差异为解释变量的MRM模型; F4: 以环境距离和空间距离为解释变量的MRM模型; F5: 以环境距离和林冠结构差异为解释变量的MRM模型; F6: 由空间距离和林冠结构差异为解释变量的MRM模型; F7: 由林冠结构差异、环境距离和空间距离为解释变量的MRM模型。粗体表示AIC值最小。F1, The MRM models only include environmental distance as the explained variable; F2, The MRM models only include spatial distance as the explained variable; F3, The MRM models only include canopy structure difference as the explained variable; F4, The MRM models include environmental distance and spatial distance as the explained variables; F5, The MRM models include environmental distance and canopy structure difference as the explained variables; F6, The MRM models include spatial distance and canopy structure difference as the explained variables; F7, The MRM models include canopy structure difference, environmental distance and spatial distance as the explained variables. Bold AIC values is the smallest ones.

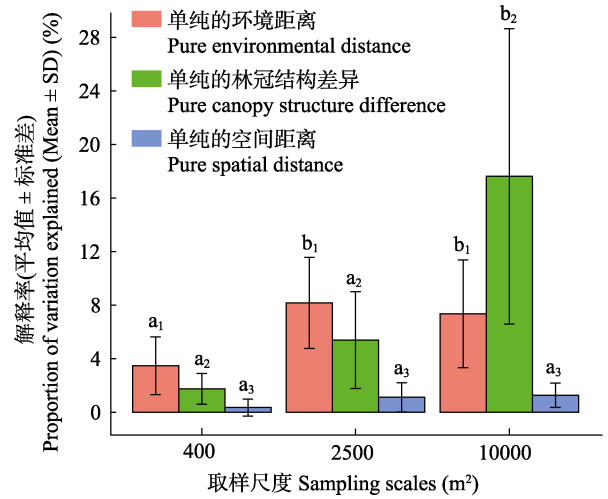


图2 西双版纳热带季节雨林20 ha动态监测样地不同取样尺度单纯的林冠结构差异、单纯的环境距离和单纯的空间距离对所有木本植物(DBH ≥ 1 cm) 11个功能性状beta多样性的解释率(平均值 ± 标准差)。不同字母表示差异显著(P < 0.05)。

Fig. 2 The proportion of variation explained (mean ± SD) by pure canopy structure difference, pure environmental distance, and pure spatial distance at each of three sampling scales for all woody plant individuals (DBH ≥ 1 cm) on beta diversity based on each of 11 functional traits in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest. Different letters indicate significantly difference at P < 0.05.

< 5 cm)而言,其基本格局本质上和所有个体的一致,即林冠结构差异和环境距离均具有较大的解释率,且不相上下,而空间距离的效应则相对微弱(附录7)。从物种维度来看,在较大取样尺度(50 m × 50 m和100 m × 100 m)上,单纯的林冠结构差异对物种beta多样性的解释率要远大于环境距离(附录9)。

3 讨论

已有很多研究表明,环境异质性和空间距离是森林木本植物功能性状beta多样性格局形成的主要驱动力(Siefert et al, 2013; Arnan et al, 2015; Wang et al, 2015; 王均伟等, 2016)。然而,森林总是由处于不同生长循环阶段的斑块镶嵌组成的(曹敏等, 2000)。驱动森林生长循环的林窗干扰通常是独立于环境异质性发生的,即在不同环境条件下都会发生林窗干扰,并触发森林生长循环。而处于不同生长循环阶段的森林斑块通常具有不同的林冠结构,林冠结构一方面可以指示群落的发展阶段,一方面可以指示群落光环境的异质性,这两个方面都可以导致群落斑块间物种组成的差异,因此,林冠结构成

为潜在的**beta**多样性格局的重要变量,而以往的研究基本上忽视了这一潜在的**beta**多样性解释变量。

本研究发现,包含林冠结构的基于距离矩阵的多元回归模型在不同取样尺度上都是解释功能性状**beta**多样性的最优模型,即比仅包含环境和/或空间距离的模型都更好(表1)。说明林冠结构是解释功能性状**beta**多样性不可或缺的重要解释变量。单纯的林冠结构差异与单纯的环境距离一样,对功能性状**beta**多样性都具有较高的解释率,且均远大于空间距离的解释率(附录5),很显然,林冠结构差异是木本植物功能性状**beta**多样性形成的重要驱动力。热带雨林中林窗的产生相对于其他森林类型可能更为频繁,群落从林窗期、建群期到成熟期可能表现出更为明显的物种周转,导致其物种组成在空间上发生更显著的改变(Cao, 1998; 曹敏等, 2000)。本研究中作为关键林冠结构参数的最大林冠高度,可作为森林群落不同发展阶段的指示,其在空间上的差异对功能性状**beta**多样性格局形成具有较大的解释率也就不难理解。

本研究发现林冠结构差异、环境异质性和空间距离对较小木本植物个体($1\text{ cm} \leq \text{DBH} \leq 5\text{ cm}$)的功能性状**beta**多样性的相对重要性和所有个体的并没有本质上的区别(附录7)。在版纳大样地, $1\text{ cm} \leq \text{DBH} \leq 5\text{ cm}$ 的木本植物个体占有所有个体的69.2%,可见,对所有个体的分析结果在很大程度上是较小个体贡献的。由于更新生态位的存在(Grubb, 1977),林冠结构差异导致的光环境异质性对冠层高度以下的较小个体具有较强的过滤作用,将来应该深入研究不同林冠结构参数与林下光的可利用性的关系,以及上述关系对林下较小个体光生态位分化的促进作用,并最终揭示林冠结构差异驱动**beta**多样性格局形成的机制。对于冠层个体而言,由于已经到达冠层高度,并不受林冠结构差异导致的林下光环境差异的影响,林冠结构差异对冠层个体**beta**多样性的影响更多地是由其指示的群落发展阶段导致的。本研究中作为关键林冠结构参数的林冠高度标准差可以指示群落光环境的异质性,而最大林冠高度指示的群落发展阶段实际上同样反映了不同发展阶段林下光环境的变化,即处于林窗期和更新期的群落斑块具有比成熟期更大的林下光的可利用性(曹敏等, 2000)。本研究同时将林冠结构差异作为**beta**多样性的解释变量,弥补了传统环境异质性

度量中通常只考虑地形和土壤环境的不足。大量研究表明,不同生活史阶段的树种群落具有不同的构建机制(Swenson et al, 2007; Spasojevic et al, 2014),在不同生活史阶段,驱动功能性状**beta**多样性的生态学过程也不同(Yang et al, 2015; Asefa et al, 2019)。因此,将来的研究应该对不同生活史阶段**beta**多样性各驱动过程相对重要性进行更深入的剖析。

林下光环境、土壤和地形的空间异质性均可在较小的空间尺度上发生显著变化。林冠结构差异和环境异质性对功能性状**beta**多样性的解释率均随着取样尺度的增大而上升,这说明取样尺度越大,环境距离中包含的土壤和地形因子以及林冠结构所反映的光环境异质性对参与群落构建的物种的过滤作用也越大。本研究证实了取样尺度对功能性状**beta**多样性研究的重要性,尺度效应是群落生态学研究方法中不可忽视的重要因素。

群落功能性状组成的周转可能更多是由于群落组成物种间功能权衡的变化,而不是单纯的每个性状的变化,因此本研究同时考虑了多个经常被使用的代表木本植物间功能权衡关系的性状,考虑到性状间潜在的共变异性,选取其贡献率较大的前3个主成分来分析功能性状**beta**多样性。本研究同样对单个功能性状的**beta**多样性进行了分析(附录8),发现林冠结构差异和环境距离对种子重量、比叶面积、叶片碳、氮、磷、钾含量等性状的**beta**多样性解释率仅在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 尺度上较大,而在较小尺度($20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 和 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$)上的解释率均较小,而最大高度、木质密度、叶片厚度、叶面积、叶片干物质含量这5个功能性状的**beta**多样性的解释率在各个取样尺度上均较小。单纯的林冠结构差异和单纯的环境距离对11个功能性状**beta**多样性的解释率在不同取样尺度上均有显著差异,而空间距离的解释率均无显著性差异(图2)。然而,无论是多个性状还是单个性状的**beta**多样性,都有很大一部分变异未被本研究所用的林冠结构参数、环境变量和空间距离所解释(附录5-8),这可能是除了林冠结构、环境、空间距离外,仍有其他未被本研究考虑的因素同样在驱动功能性状**beta**多样性格局的形成中发挥作用,例如土壤生物、昆虫等对木本植物的跨营养级作用;也有可能是本研究所采用的功能性状并不能完全反映木本植物间的功能权衡差异,即在生态策略形成中具有重要作用的功能性状并没

有被考虑进来。将来的研究应该考虑更多其他类别的功能性状, 例如树种的耐荫性和耐旱性、次生代谢产物等(Valladares & Niinemets, 2008; Bartlett et al, 2016; Swenson et al, 2017; Vleminckx et al, 2018), 并进一步结合转录组学, 考虑树种的功能基因差异(Swenson et al, 2017; Zambrano et al, 2017; Yang et al, 2018)。

林冠结构差异和空间距离基本上没有重复解释的部分, 因此传统上对空间距离作用力的认识很可能存在较大的偏颇, 即原本以为是空间距离解释的部分很可能是林冠结构应该解释的部分, 这也是为什么无论在哪个取样尺度, 空间距离的解释率都小到基本上可以忽略(附录6-8)的原因。可以说, 传统上认为对beta多样性形成起重要作用的空间距离, 在本研究中对功能性状beta多样性的相对贡献始终较小, 基本上可以忽略不计, 进一步说明传统上忽视林冠结构的作用会导致对beta多样性驱动力认识不足。总体而言, 在局域尺度上, 林冠结构差异和环境异质性一样是木本植物功能性状beta多样性格局形成的重要驱动力, 而空间距离可能并没有传统上认为的那么重要。

致谢: 感谢张文富工程师负责种子重量的测定工作; 感谢杨洁研究员和李月颖女士负责木质密度的测定; 感谢沙丽清研究员负责土壤理化性质的测定; 感谢所有参与云南西双版纳热带季节雨林20 ha动态监测样地建设的工作人员; 感谢云南西双版纳森林生态系统国家野外科学观测研究站提供的平台支撑服务。

参考文献

- Abramoff MD, Magelhaes PJ, Ram SJ (2004) Image processing with ImageJ. *Biophotonics International*, 11, 36–43.
- Arnan X, Cerdá X, Retana J (2015) Partitioning the impact of environment and spatial structure on alpha and beta components of taxonomic, functional, and phylogenetic diversity in European ants. *PeerJ*, 3, e1241.
- Asefa M, Brown C, Cao M, Zhang GC, Ci XQ, Sha LQ, Li J, Lin LX, Yang J (2019) Contrasting effects of space and environment on functional and phylogenetic dissimilarity in a tropical forest. *Journal of Plant Ecology*, 12, 314–326.
- Bartlett MK, Zhang Y, Yang J, Kreidler N, Sun SW, Lin L, Hu YH, Cao KF, Sack L (2016) Drought tolerance as a driver of tropical forest assembly: Resolving spatial signatures for multiple processes. *Ecology*, 97, 503–514.
- Bin Y, Wang ZG, Wang ZM, Ye WH, Cao HL, Lian JY (2010) The effects of dispersal limitation and topographic heterogeneity on beta diversity and phylobetadiversity in a subtropical forest. *Plant Ecology*, 209, 237–256.
- Burnham KP, Anderson DR (2002) *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-theoretic Approach*, 2nd edn. Springer, New York.
- Cao M (1998) Canopy gap, soil seed bank and tropical forest dynamics. In: *Biodiversity Conservation and Sustainable Development in the Biosphere Reserves* (eds Jiang HQ, Ou XK), pp. 220–229. Yunnan University Press, Kunming.
- Cao M, Fu XH, Yang YG, Tang Y, He YT (2000) Patch dynamics in tropical forests and the maintenance of tree species diversity. *Chinese Biodiversity*, 8, 172–179. (in Chinese with English abstract) [曹敏, 付先惠, 杨一光, 唐勇, 何永涛 (2000) 热带森林中的斑块动态与物种多样性维持. *生物多样性*, 8, 172–179.]
- Cao M, Zou XM, Warren M, Zhu H (2006) Tropical forests of Xishuangbanna, China. *Biotropica*, 38, 306–309.
- Chave J, Muller-Landau HC, Baker TR, Easdale TA, Steege H, Webb CO (2006) Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species. *Ecological Applications*, 16, 2356–2367.
- Chen SB, Ouyang ZY, Xu WH, Xiao Y (2010) A review of beta diversity studies. *Biodiversity Science*, 18, 323–335. (in Chinese with English abstract) [陈圣宾, 欧阳志云, 徐卫华, 肖焱 (2010) Beta多样性研究进展. *生物多样性*, 18, 323–335.]
- Chu CJ, Lutz JA, Král K, Vrška T, Yin X, Myers JA, Abiem I, Alonso A, Bourg N, Burslem DFRP, Cao M, Chapman H, Condit R, Fang SQ, Fischer GA, Gao LM, Hao ZQ, Hau BCH, He Q, Hector A, Hubbell SP, Jiang MX, Jin GZ, Kenfack D, Lai JS, Li BH, Li XK, Li YD, Lian JY, Lin LX, Liu YK, Luo YH, Ma KP, McShea W, Memiaghe H, Mi XC, Ni M, O'Brien MJ, de Oliveira AA, Orwig DA, Parker GG, Qiao XJ, Ren HB, Reynolds G, Sang WG, Shen GC, Su ZY, Sui XH, Sun IF, Tian SY, Wang B, Wang XH, Wang XG, Wang YS, Weiblen GD, Wen SJ, Xi NX, Xiang WS, Xu H, Xu K, Ye WH, Zhang BW, Zhang JX, Zhang XT, Zhang YM, Zhu K, Zimmerman J, Storch D, Baltzer JL, Anderson-Teixeira KJ, Mittelbach GG, He FL (2019) Direct and indirect effects of climate on richness drive the latitudinal diversity gradient in forest trees. *Ecology Letters*, 22, 245–255.
- Condit R, Pitman N, Leigh EG, Chave J, Terborgh J, Foster RB, Nunez P, Aguilar S, Valencia R, Villa G, Muller-Landau HC, Losos E, Hubbell SP (2002) Beta-diversity in tropical forest trees. *Science*, 295, 666–669.
- Cornelissen JHC, Lavorel S, Garnier E, Díaz S, Buchmann N, Gurvich DE, Reich PB, Steege H, Morgan HD, van der Heijden MGA, Pausas JG, Poorter H (2003) A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant

- functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51, 335–380.
- Cressie N (1990) The origins of Kriging. *Mathematical Geology*, 22, 239–252.
- Delecti Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae (1959–2004) Flora Reipublicae Popularis Sinicae. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院中国植物志编辑委员会 (1959–2004) 中国植物志. 科学出版社, 北京.]
- Diggle PJ, Tawn JA, Moyeed RA (1998) Model-based geostatistics. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 47, 299–350.
- Fernandez-Going BM, Harrison SP, Anacker BL, Safford HD (2013) Climate interacts with soil to produce beta diversity in Californian plant communities. *Ecology*, 94, 2007–2018.
- Gómez-Aparicio L, Valladares F, Zamora R (2006) Differential light responses of Mediterranean tree saplings: Linking eco-physiology with regeneration niche in four co-occurring species. *Tree Physiology*, 26, 947–958.
- Goslee SC, Urban DL (2007) The ecodist package for dissimilarity-based analysis of ecological data. *Journal of Statistical Software*, 22, 1–19.
- Gotelli NJ, Entsminger GL (2001) Swap and fill algorithms in null model analysis: Rethinking the knight's tour. *Oecologia*, 129, 281–291.
- Grubb PJ (1977) The maintenance of species-richness in plant communities: The importance of the regeneration niche. *Biological Reviews*, 52, 107–145.
- Hakkenberg CR, Song CH, Peet RK, White PS (2016) Forest structure as a predictor of tree species diversity in the North Carolina Piedmont. *Journal of Vegetation Science*, 27, 1151–1163.
- Harms KE, Condit R, Hubbell SP, Foster RB (2001) Habitat associations of trees and shrubs in a 50-ha Neotropical forest plot. *Journal of Ecology*, 89, 947–959.
- Hu YH (2010) A Study on the Habitat Variation and Distribution Patterns of Tree Species in a 20-ha Forest Dynamics Plot at Bubeng, Xishuangbanna, SW China. PhD dissertation, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla. (in Chinese with English abstract) [胡跃华 (2010) 补蚌20公顷森林动态样地的生境分异与树种分布格局研究. 博士学位论文, 中国科学院西双版纳热带植物园, 勐腊.]
- Hubbell SP (2001) *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. Princeton University Press, Princeton.
- Hubbell SP (2006) Neutral theory and the evolution of ecological equivalence. *Ecology*, 87, 1387–1398.
- Jaccard P (1912) The distribution of the flora in the alpine zone. *New Phytologist*, 11, 37–50.
- Jackson DA (1993) Stopping rules in principal components analysis: A comparison of heuristical and statistical approaches. *Ecology*, 74, 2204–2214.
- John R, Dalling JW, Harms KE, Yavitt JB, Stallard RF, Mirabello M, Hubbell SP, Valencia R, Navarrete H, Vallejo M (2007) Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 864–869.
- Kraft NJB, Adler PB, Godoy O, James EC, Fuller S, Levine JM (2015) Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor. *Functional Ecology*, 29, 592–599.
- Lande R (1996) Statistics and partitioning of species diversity, and similarity among multiple communities. *Oikos*, 76, 5–13.
- Lan GY, Hu YH, Cao M, Zhu H, Wang H, Zhou SH, Deng XB, Cui JY, Huang JG, Liu LY, Xu HL, Song JP, He YC (2008) Establishment of Xishuangbanna tropical forest dynamics plot: Species compositions and spatial distribution patterns. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 287–298. (in Chinese with English abstract) [兰国玉, 胡跃华, 曹敏, 朱华, 王洪, 周仕顺, 邓晓保, 崔景云, 黄建国, 刘林云, 许海龙, 宋军平, 何有才 (2008) 西双版纳热带森林动态监测样地——树种组成与空间分布格局. *植物生态学报*, 32, 287–298.]
- Legendre P, Mi XC, Ren HB, Ma KP, Yu MJ, Sun IF, He FL (2009) Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China. *Ecology*, 90, 663–674.
- Li XH, Liu YH, Liu Y, Xu Y, Yang Y, Shen ZH (2016) Impacts of geographical distances and environmental differences on the beta diversity of plant communities in the dry-hot valley of the Yuanjiang River. *Biodiversity Science*, 24, 399–406. (in Chinese with English abstract) [李新辉, 刘延虹, 刘晔, 许玥, 杨阳, 沈泽昊 (2016) 地理距离及环境差异对云南元江干热河谷植物群落beta多样性的影响. *生物多样性*, 24, 399–406.]
- Lichstein JW (2007) Multiple regression on distance matrices: A multivariate spatial analysis tool. *Plant Ecology*, 188, 117–131.
- Liu YN, Tang ZY, Fang JY (2015) Contribution of environmental filtering and dispersal limitation to species turnover of temperate deciduous broad-leaved forests in China. *Applied Vegetation Science*, 18, 34–42.
- Mendiburu FD (2020) *agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*. R package version 1.3-2. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>. (accessed on 2019-12-15).
- Myers JA, Chase JM, Jiménez I, Jørgensen PM, Araujo-Murakami A, Paniagua-Zambrana N, Seidel R (2013) Beta-diversity in temperate and tropical forests reflects dissimilar mechanisms of community assembly. *Ecology Letters*, 16, 151–157.
- Niu KC, Liu YN, Shen ZH, He FL, Fang JY (2009) Community assembly: The relative importance of neutral theory and niche theory. *Biodiversity Science*, 17, 579–593. (in Chinese with English abstract) [牛克昌, 刘怿宁, 沈泽昊, 何芳良, 方精云 (2009) 群落构建的中性理论和生态位理论. *生*

- 物多样性, 17, 579–593.]
- Oksanen J, Blanchet FG, Friendly M, Kindt R, Legendre P, McGlenn D, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MHH, Szoecs E, Wagner H (2019) *vegan*: Community Ecology Package. R package version 2.5-4. <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/>. (accessed on 2019-12-15)
- Page NV, Shanker K, Ward D (2018) Environment and dispersal influence changes in species composition at different scales in woody plants of the Western Ghats, India. *Journal of Vegetation Science*, 29, 74–83.
- Pebesma EJ (2004) Multivariable geostatistics in S: The *gstat* package. *Computers & Geosciences*, 30, 683–691.
- Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Garnier E, Lavorel S, Poorter H, Jaureguiberry P, Bret-Harte MS, Cornwell WK, Craine JM, Gurvich DE, Urcelay C, Veneklaas EJ, Reich PB, Poorter L, Wright IJ, Ray P, Enrico L, Pausas JG, de Vos AC, Buchmann N, Funes G, Quétier F, Hodgson JG, Thompson K, Morgan HD, ter Steege H, Sack L, Blonder B, Poschlod P, Vaieretti MV, Conti G, Staver AC, Aquino S, Cornelissen JHC (2013) New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61, 167–234.
- Philipson CD, Saner P, Marthews TR, Nilus R, Reynolds G, Turnbull LA, Hector A (2012) Light-based regeneration niches: Evidence from 21 Dipterocarp species using size-specific RGRs. *Biotropica*, 44, 627–636.
- Qiao XJ, Li QX, Jiang QH, Lu JM, Franklin S, Tang ZY, Wang QG, Zhang JX, Lu ZJ, Bao DC, Guo YL, Liu HB, Xu YZ, Jiang MX (2015) Beta diversity determinants in Badagongshan, a subtropical forest in Central China. *Scientific Reports*, 5, 17043.
- Qian H, Ricklefs RE (2000) Large-scale processes and the Asian bias in species diversity of temperate plants. *Nature*, 407, 180–182.
- R Core Team (2018) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. (accessed on 2019-12-15)
- Rao MD, Feng G, Zhang JL, Mi XC, Chen JH (2013) Effects of environmental filtering and dispersal limitation on species and phylogenetic β diversity in Gutianshan National Nature Reserve. *Chinese Science Bulletin*, 58, 44–52. (in Chinese with English abstract) [饶米德, 冯刚, 张金龙, 米湘成, 陈建华 (2013) 生境过滤和扩散限制作用对古田山森林物种和系统发育 β 多样性的影响. *科学通报*, 58, 44–52.]
- Siefert A, Ravenscroft C, Weiser MD, Swenson NG (2013) Functional β -diversity patterns reveal deterministic community assembly processes in eastern North American trees. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 682–691.
- Song XF, Li JP, Hu XY (2009) Model selection criterion AIC and its application in ANOVA. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 37, 88–92. (in Chinese with English abstract) [宋喜芳, 李建平, 胡希远 (2009) 模型选择信息量准则AIC及其在方差分析中的应用. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 37, 88–92.]
- Spasojevic MJ, Yablon EA, Oberle B, Myers JA (2014) Ontogenetic trait variation influences tree community assembly across environmental gradients. *Ecosphere*, 5, 1–20.
- State-owned Forest Farm and Tree Seedling Work Station of State Forestry Administration (2001) *Seeds of Woody Plants in China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [国家林业局国有林场和林木种苗工作总站 (2001) *中国木本植物种子*. 中国林业出版社, 北京.]
- Swenson NG, Enquist BJ, Thompson J, Zimmerman JK (2007) The influence of spatial and size scale on phylogenetic relatedness in tropical forest communities. *Ecology*, 88, 1770–1780.
- Swenson NG, Anglada-Cordero P, Barone JA (2011) Deterministic tropical tree community turnover: Evidence from patterns of functional β diversity along an elevational gradient. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278, 877–884.
- Swenson NG, Erickson DL, Mi XC, Bourg NA, Forero-Montaña J, Ge XJ, Howe R, Lake JK, Liu XJ, Ma KP, Pei NC, Thompson J, Uriarte M, Wolf A, Wright SJ, Ye WH, Zhang JL, Zimmerman JK, Kress WJ (2012) Phylogenetic and functional α and β diversity in temperate and tropical tree communities. *Ecology*, 93, S112–S125.
- Swenson NG (2013) The assembly of tropical tree communities—The advances and shortcomings of phylogenetic and functional trait analyses. *Ecography*, 36, 264–276.
- Swenson NG (2014) *Functional and Phylogenetic Ecology in R*. Springer, New York.
- Swenson NG, Iida Y, Howe R, Wolf A, Umaña MN, Petprakob K, Turner BL, Ma KP (2017) Tree co-occurrence and transcriptomic response to drought. *Nature Communications*, 8, 1996.
- Valencia R, Foster RB, Villa G, Condit R, Svenning JC, Hernández C, Romoleroux K, Losos E, Magård E, Balslev H (2004) Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: Large forest plot in Eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, 92, 214–229.
- Valladares F, Niinemets Ü (2008) Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39, 237–257.
- Vleminckx J, Salazar D, Fortunel C, Mesones I, Dávila N, Lokvam J, Beckley K, Baraloto C, Fine PV (2018) Divergent secondary metabolites and habitat filtering both contribute to tree species coexistence in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Plant Science*, 9, 836.
- Wang JM, Chen C, Li JW, Feng YM, Lu Q (2019) Different ecological processes determined the α and β components of taxonomic, functional, and phylogenetic diversity for plant communities in dryland regions of Northwest Chi-

- na. PeerJ, 6, e6220.
- Wang JW, Hou MM, Huang LY, Zhang J, Zhou HC, Cheng YX (2016) Phylogenetic and functional beta diversity in a broadleaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains, Northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 38(10), 21–27. (in Chinese with English abstract) [王均伟, 侯嫋嫋, 黄利亚, 张君, 周海城, 程艳霞 (2016) 长白山阔叶红松林系统发育和功能性状beta多样性. *北京林业大学学报*, 38(10), 21–27.]
- Wang XG, Wiegand T, Swenson NG, Wolf AT, Howe RW, Hao ZQ, Lin F, Ye J, Yuan ZQ (2015) Mechanisms underlying local functional and phylogenetic beta diversity in two temperate forests. *Ecology*, 96, 1062–1073.
- Webster R, McBratney AB (1989) On the Akaike information criterion for choosing models for variograms of soil properties. *Journal of Soil Science*, 40, 493–496.
- Whittaker RH (1960) Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, 30, 279–338.
- Wu JJ (2016) Phylogenetic and Functional Neighbourhood Effect on the Survival and Growth of Woody Species in a Chinese Tropical Rain Forest. PhD dissertation, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla. (in Chinese with English abstract) [乌俊杰 (2016) 系统发育和功能维度的热带雨林树种个体生长和存活的邻体效应. 博士学位论文, 中国科学院西双版纳热带植物园, 勐腊.]
- Xing DL, He FL (2018) Environmental filtering explains a U-shape latitudinal pattern in regional β -deviation for eastern North American trees. *Ecology Letters*, 22, 284–291.
- Yang JY, Liu XJ, Yang XJ (2015) Forest canopy structure, light environment and their effects on the vegetation pattern and growth of understory in forests. *Journal of Science of Teachers' College and University*, 35(7), 57–62. (in Chinese with English abstract) [杨建宇, 刘晓娟, 杨晓杰 (2015) 森林冠层结构与光环境及其对林下植被生长和格局的影响. *高师理科学刊*, 35(7), 57–62.]
- Yang J, Swenson NG, Zhang GC, Ci XQ, Cao M, Sha LQ, Li J, Ferry Slik JW, Lin LX (2015) Local-scale partitioning of functional and phylogenetic beta diversity in a tropical tree assemblage. *Scientific Reports*, 5, 12731.
- Yang J, Cao M, Swenson NG (2018) Why functional traits do not predict tree demographic rates. *Trends in Ecology & Evolution*, 33, 326–336.
- Zambrano J, Iida Y, Howe R, Lin LX, Umana MN, Wolf A, Worthy SJ, Swenson NG (2017) Neighborhood defence gene similarity effects on tree performance: A community transcriptomic approach. *Journal of Ecology*, 105, 616–626.
- Zhang J, Hu JB, Lian JY, Fan ZJ, Ouyang XJ, Ye WH (2016) Seeing the forest from drones: Testing the potential of light-weight drones as a tool for long-term forest monitoring. *Biological Conservation*, 198, 60–69.
- Zhao XQ, Guo QH, Su YJ, Xue BL (2016) Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 79–91.
- Zhu H, Cao M, Hu HB (2006) Geological history, flora, and vegetation of Xishuangbanna, Southern Yunnan, China. *Biotropica*, 38, 310–317.

(责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度关键林冠结构参数的筛选: 基于单个林冠结构参数与平均最近邻体性状距离的模型比较

Appendix 1 Selection of key canopy structure parameter at each of the three sampling scales in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest: Model comparison based on single canopy structure parameter and mean nearest neighbor trait distance

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020092-1.pdf>

附录2 不同取样尺度样方的两个关键林冠结构参数的频度分布

Appendix 2 The frequency distribution of two key canopy structure parameters at each of the three sampling scales

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020092-2.pdf>

附录3 西双版纳20 ha热带季节雨林动态样地11个木本植物功能性状在前3个主成分的载荷

Appendix 3 The loading of 11 functional traits of woody plants on the first three principal components in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020092-3.pdf>

附录4 西双版纳20 ha热带季节雨林动态样地不同取样尺度环境变量在前4个主成分中的载荷

Appendix 4 The loading of environmental variables on the first four principal components at each of the three sampling scales in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020092-4.pdf>

附录5 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度上单纯的林冠结构差异、单纯的环境距离和单纯的空间距离对所有木本植物(DBH \geq 1 cm)的功能性状 β 多样性的解释率

Appendix 5 The proportion of variation explained by pure canopy structure difference, pure environmental distance and pure spatial distance at each of three sampling scales for all woody plant individuals (DBH \geq 1 cm) for functional β diversity in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020092-5.pdf>

附录6 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度林冠结构差异、环境距离和空间距离对所有木本植物个体(DBH \geq 1 cm)功能性状 β 多样性的解释率

Appendix 6 The variation explained by canopy structure difference, environmental distance and spatial distance at each of three sampling scales for all woody plant individuals (DBH \geq 1 cm) on functional β diversity in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020092-6.pdf>

附录7 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度林冠结构差异、环境距离和空间距离和对较小木本植物个体(1 cm \leq DBH \leq 5 cm)功能性状 β 多样性的解释率

Appendix 7 The variation explained by canopy structure difference, environmental distance and spatial distance at each of the three sampling sizes for woody plant individuals with 1 cm \leq DBH \leq 5 cm on functional β diversity in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020092-7.pdf>

附录8 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度林冠结构差异、环境距离和空间距离对所有木本植物个体(DBH \geq 1 cm)单个功能性状的 β 多样性的解释率

Appendix 8 The variation explained by canopy structure difference, environmental distance and spatial distance at each of three sampling sizes for all woody plant individuals with DBH \geq 1 cm on functional β diversity based on each of 11 functional trait in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020092-8.pdf>

附录9 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度单纯的林冠结构差异、单纯的环境距离和空间距离对所有木本植物个体物种 β 多样性的解释率

Appendix 9 The variation explained by pure canopy structure difference, pure environmental distance and spatial distance at each of the three sampling scales for all woody plant individuals (DBH \geq 1 cm) on species β diversity in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020092-9.pdf>

周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>

附录1 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度关键林冠结构参数的筛选: 基于单个林冠结构参数与平均最近邻体性状距离的模型比较

Appendix 1 Selection of key canopy structure parameter at each of the three sampling scales in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest: Model comparison based on single canopy structure parameter and mean nearest neighbor trait distance

模型 Model	AIC		
	20 m × 20 m	50 m × 50 m	100 m × 100 m
$D_{mm} \sim SA$	438,401.3	1,844.294	-465.1344
$D_{mm} \sim BA$	447,489.3	1,974.073	-453.3296
$D_{mm} \sim TSV$	445,808.3	1,954.000	-452.5474
$D_{mm} \sim cvHT$	444,466.6	1,697.213	-497.2618
$D_{mm} \sim VDR$	446,196.7	1,860.165	-469.1504
$D_{mm} \sim CRR$	446,162.9	1,944.851	-458.0247
$D_{mm} \sim sdHT$	436,912.6	1,216.353	-524.7166
$D_{mm} \sim 95\%HT$	440,049.7	1,455.181	-479.3074
$D_{mm} \sim maxHT$	435,637.7	1,302.144	-523.3561
$D_{mm} \sim meanHT$	447,003.0	1,938.013	-455.9664

AIC: 赤池信息准则; D_{mm} : 多度加权的平均最近邻体性状距离; SA: 茎干多度; BA: 胸高断面积; TSV: 树木大小变异; cvHT: 林冠高度的变异系数; VDR: 垂直分配率; CRR: 冠层起伏率; sdHT: 林冠高度标准差; 95%HT: 林冠高度 95%分位值; maxHT: 最大林冠高度; meanHT: 平均林冠高度。粗体表示各取样尺度最小的两个 AIC 值。

茎干多度、胸高断面积和树木大小变异来源于 2012 年版纳大样地的所有木本植物清查数据, 茎干多度是样方中所有个体主干和分枝数量的总和; 胸高断面积指的是样方中所有个体主干和分枝胸高断面积的总和; 树木大小变异是样方内所有个体主干和分枝胸径的标准差与平均胸径的比值。

胸高断面积计算公式如下:

$$BA = \sum_{i=1}^N \frac{\pi \times DBH_i^2}{4} \quad (1)$$

式中, N 表示目标样方中所有个体主干和分枝的数量, DBH_i 表示样方中个体 i 的胸径。

而林冠高度的标准差、林冠高度的 95%分位值、林冠高度的变异系数、最大林冠高度、平均林冠高度、林冠垂直分配率和冠层起伏率来源于无人机获取的版纳大样地高密度激光雷达点云数据。

林冠高度垂直分配率的计算公式如下(Goetz et al, 2007):

$$VDR = (HT_{max} - HT_{med}) / HT_{max} \quad (2)$$

式中, HT_{med} 和 HT_{max} 分别代表每个样方中林冠高度的最大值和中位数。

冠层起伏率的计算公式如下(Parker & Russ, 2004; Chirici et al, 2016):

$$CRR = \frac{HT_{mean} - HT_{min}}{HT_{max} - HT_{min}} \quad (3)$$

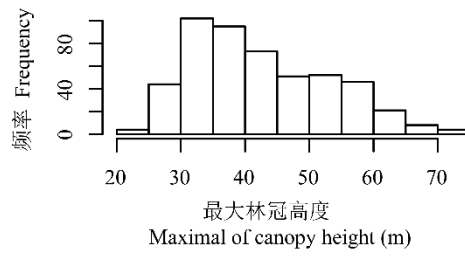
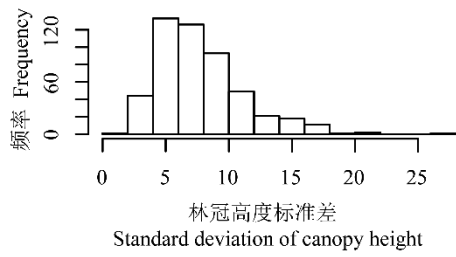
式中, HT_{mean} 、 HT_{max} 和 HT_{min} 分别代表每个样方中林冠高度的平均值、最大值和最小值。

参考文献

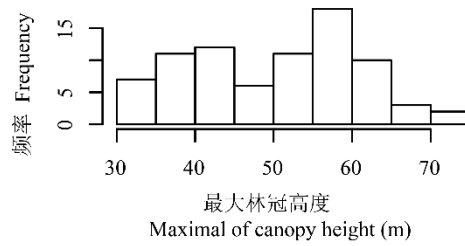
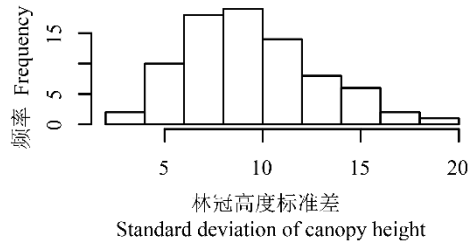
- Chirici G, McRoberts RE, Fattorini L, Mura M, Marchetti M (2016) Comparing echo-based and canopy height model-based metrics for enhancing estimation of forest aboveground biomass in a model-assisted framework. Remote Sensing of Environment, 174, 1–9.
- Goetz S, Steinberg D, Dubayah R, Blair B (2007) Laser remote sensing of canopy habitat heterogeneity as a predictor of bird species richness in an eastern temperate forest, USA. Remote Sensing of Environment, 108, 254–263.
- Parker GG, Russ ME (2004) The canopy surface and stand development: Assessing forest canopy structure and complexity with near-surface altimetry. Forest Ecology and Management, 189, 307–315.

周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>

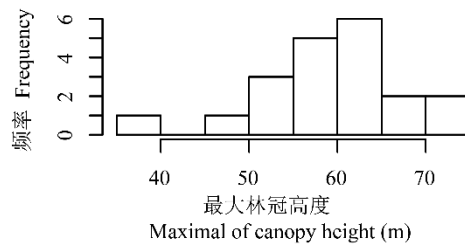
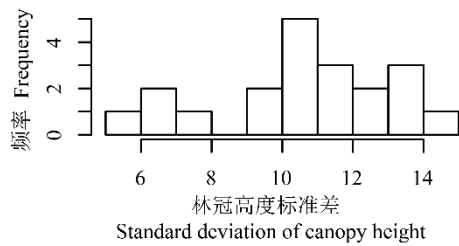
20 m × 20 m



50 m × 50 m



100 m × 100 m



附录2 不同取样尺度样方的两个关键林冠结构参数的频度分布

Appendix 2 The frequency distribution of two key canopy structure parameters at each of the three sampling scales

周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>

附录3 西双版纳20 ha热带季节雨林动态样地11个木本植物功能性状在前3个主成分的载荷

Appendix 3 The loading of 11 functional traits of woody plants on the first three principal components in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

功能性状 Functional traits	第一主成分 PCA1	第二主成分 PCA2	第三主成分 PCA3
叶面积 Leaf area	-0.008	-0.553	0.181
种子重量 Seed mass	0.273	0.174	0.267
叶片厚度 Leaf thickness	0.228	-0.488	-0.175
木质密度 Wood density	0.237	0.442	-0.159
最大高度 Maximum height	0.305	-0.156	0.509
比叶面积 Specific leaf area	-0.411	0.297	0.034
叶片碳含量 Leaf carbon content	0.210	0.119	0.524
叶片氮含量 Leaf nitrogen content	-0.360	0.164	0.354
叶片磷含量 Leaf phosphorus content	-0.349	-0.089	0.386
叶片钾含量 Leaf potassium content	-0.334	-0.105	0.110
叶干物质含量 Leaf dry matter content	0.385	0.240	0.139
方差解释率 Explained variance proportion	0.374	0.176	0.105
累积解释率 Cumulative proportion	0.374	0.551	0.656

周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>

附录4 西双版纳20 ha热带季节雨林动态样地不同取样尺度环境变量在前4个主成分中的载荷

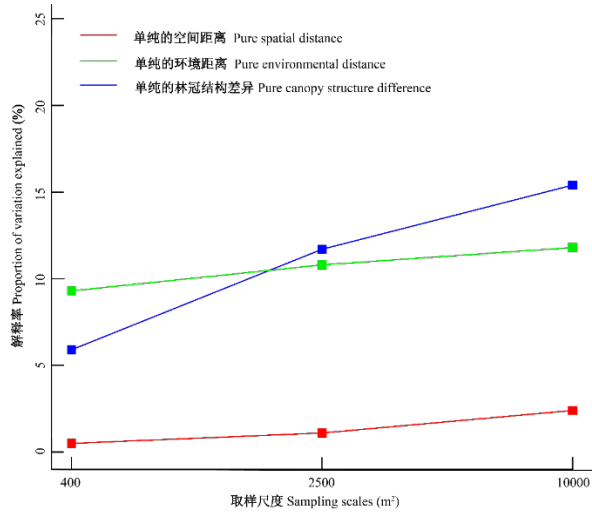
Appendix 4 The loading of environmental variables on the first four principal components at each of the three sampling scales in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

环境变量 Environmental variables	20 m × 20 m				50 m × 50 m				100 m × 100 m			
	PCA 1	PCA 2	PCA 3	PCA 4	PCA 1	PCA 2	PCA 3	PCA 4	PCA 1	PCA 2	PCA 3	PCA 4
全碳含量 Total carbon content	-0.204	0.473	0.109	-0.010	-0.133	0.517	0.034	-0.043	-0.082	0.502	0.142	0.084
全氮含量 Total nitrogen content	-0.313	0.374	0.067	0.104	-0.281	0.392	0.057	0.095	-0.318	0.335	0.082	0.084
全磷含量 Total phosphorus content	-0.425	-0.111	-0.025	0.097	-0.402	-0.041	0.055	0.126	-0.412	-0.035	0.074	-0.013
全钾含量 Total potassium content	-0.163	0.035	-0.577	0.403	-0.180	0.033	-0.546	0.181	-0.229	0.127	-0.327	-0.242
有效氮含量 Available nitrogen content	-0.301	0.375	0.149	0.075	-0.269	0.402	0.128	0.100	-0.290	0.338	0.189	0.040
有效磷含量 Available phosphorus content	-0.381	-0.115	0.282	-0.089	-0.361	-0.045	0.366	-0.078	-0.355	-0.076	0.244	0.157
有效钾含量 Available potassium content	-0.347	-0.124	-0.050	0.048	-0.369	-0.075	-0.019	0.060	-0.380	-0.093	-0.071	0.049
土壤容重 Bulk density	0.054	-0.486	0.104	0.098	0.000	-0.466	0.276	0.272	-0.055	-0.414	0.315	0.027
pH 值	-0.375	-0.258	0.092	-0.056	-0.376	-0.185	0.176	-0.028	-0.368	-0.168	0.171	-0.148
海拔 Elevation	0.283	0.228	0.383	0.060	0.291	0.221	0.393	0.144	0.248	0.215	0.389	0.292
凹凸度 Convexity	0.252	0.287	-0.239	0.126	0.280	0.278	-0.179	0.013	0.200	0.370	-0.288	0.006
坡度 Slope	0.090	-0.089	0.518	0.443	0.224	0.118	0.366	0.582	0.150	0.156	0.499	0.109
坡向余弦值 Con(aspect)	0.035	-0.067	0.009	0.755	-0.043	-0.093	-0.332	0.640	0.021	-0.251	-0.182	0.768
坡向正弦值 Sin(aspect)	-0.031	-0.055	-0.234	-0.048	0.121	-0.078	0.074	-0.277	-0.231	0.140	-0.341	0.435
方差解释率 Explained variance proportion	0.331	0.220	0.096	0.073	0.378	0.210	0.102	0.075	0.403	0.221	0.159	0.073
累积解释率 Cumulative proportion	0.331	0.551	0.647	0.721	0.378	0.588	0.690	0.766	0.403	0.624	0.783	0.856

根据 Kaiser-Guttman 准则, 选取前 4 个主成分作为综合的环境变量。

According to the Kaiser-Guttman criterion, the first four principal components are selected as the comprehensive environment variable.

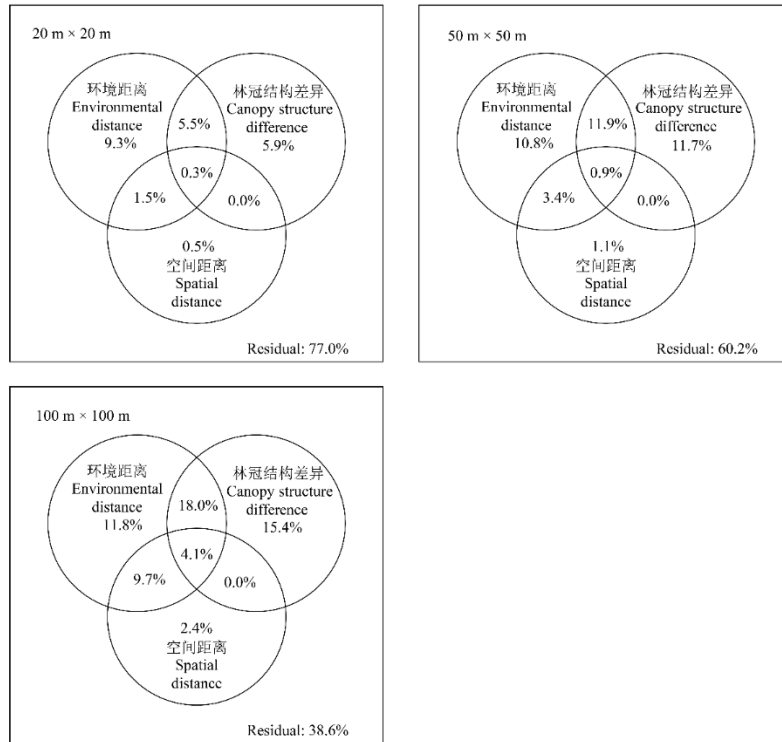
周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>



附录5 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度上单纯的林冠结构差异、单纯的环境距离和单纯的空间距离对所有木本植物(DBH ≥ 1 cm)的功能性状beta多样性的解释率

Appendix 5 The proportion of variation explained by pure canopy structure difference, pure environmental distance and pure spatial distance at each of three sampling scales for all woody plant individuals (DBH ≥ 1 cm) for functional beta diversity in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

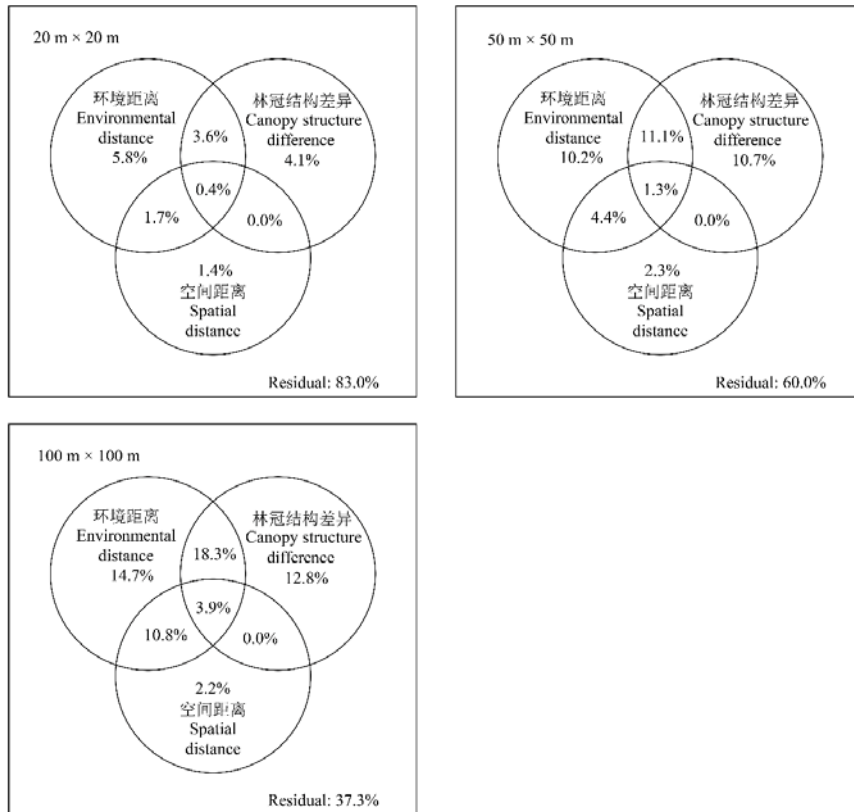
周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>



附录6 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度林冠结构差异、环境距离和空间距离对所有木本植物个体(DBH ≥ 1 cm)功能性状beta多样性的解释率

Appendix 6 The variation explained by canopy structure difference, environmental distance and spatial distance at each of three sampling scales for all woody plant individuals (DBH ≥ 1 cm) on functional beta diversity in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>

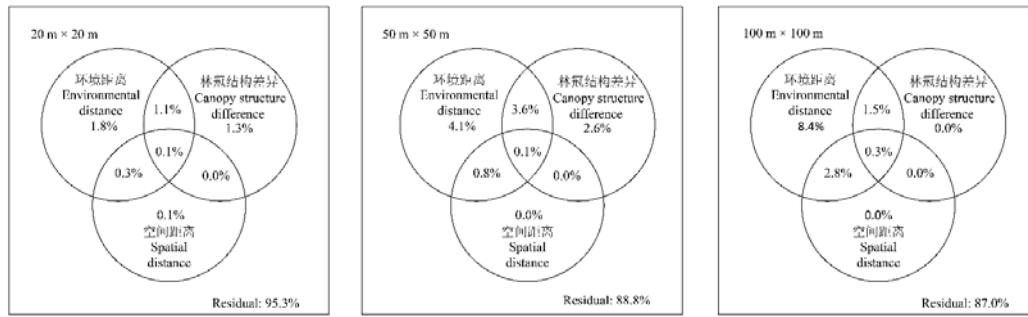


附录7 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度林冠结构差异、环境距离和空间距离和对较小木本植物个体(1 cm ≤ DBH ≤ 5 cm)功能性状beta多样性的解释率

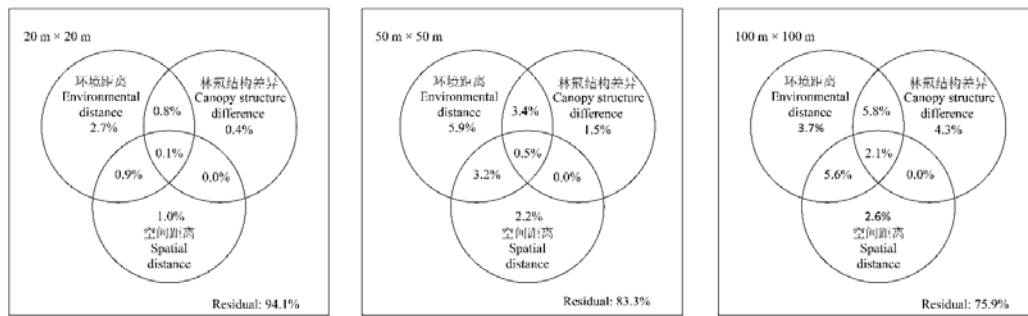
Appendix 7 The variation explained by canopy structure difference, environmental distance and spatial distance at each of the three sampling sizes for woody plant individuals with 1 cm ≤ DBH ≤ 5 cm on functional beta diversity in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>

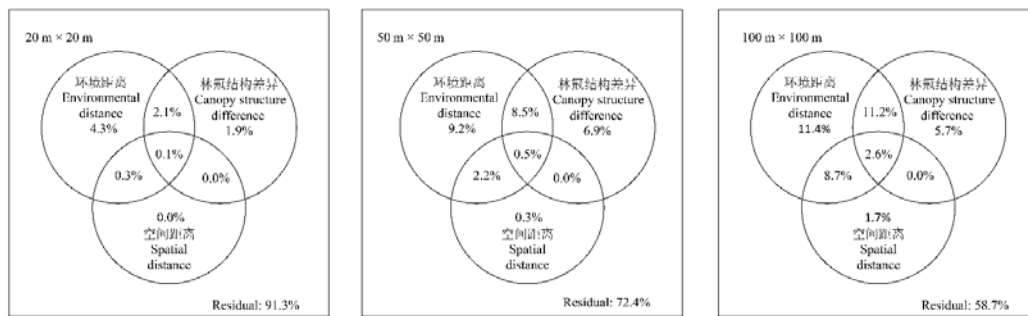
最大高度 Maximum height



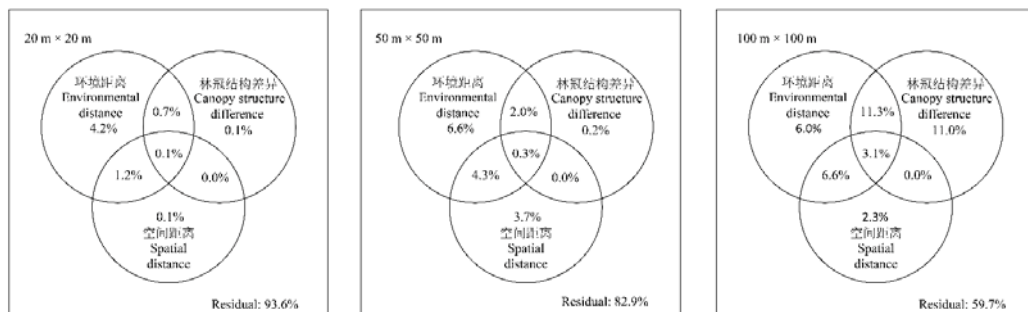
木质密度 Wood density



叶面积 Leaf area

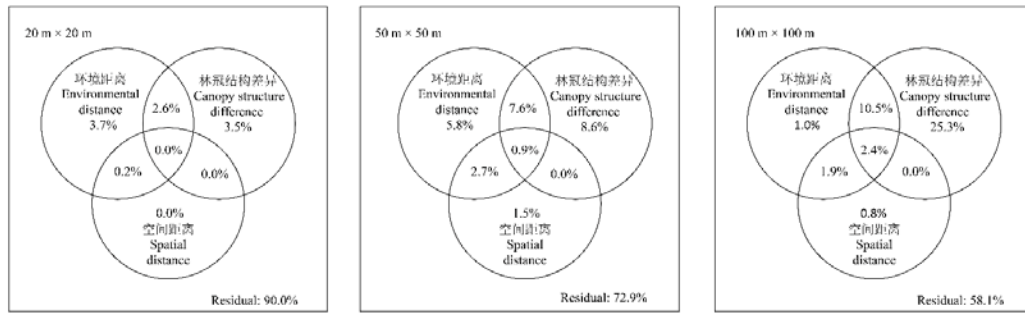


叶干物质含量 Leaf dry matter content

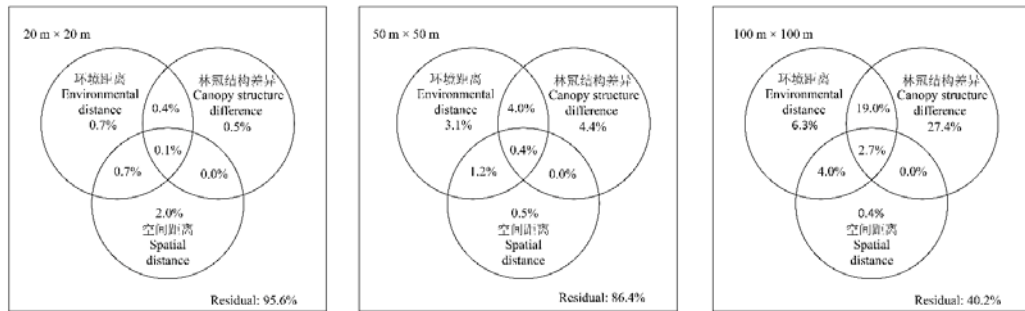


周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>

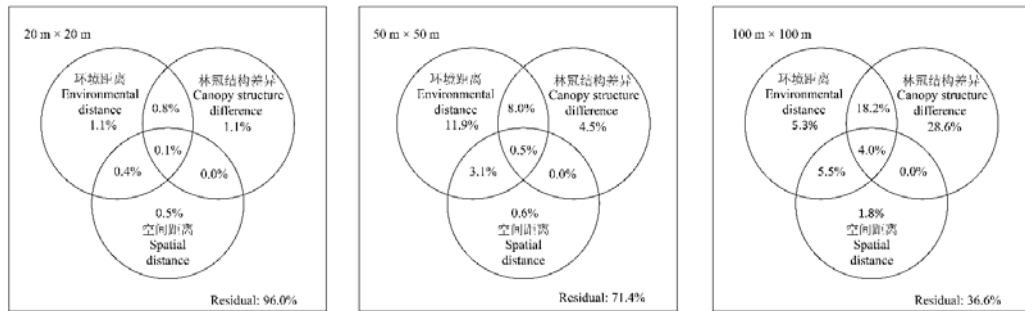
叶片厚度 Leaf thickness



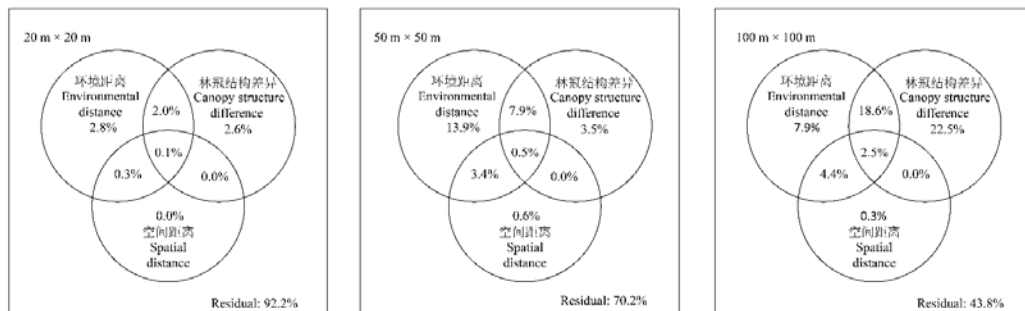
种子重量 Seed mass



比叶面积 Specific leaf area

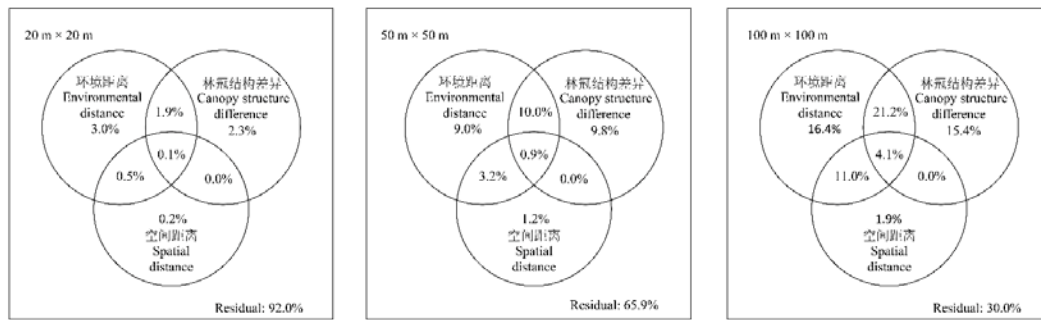


叶片碳含量 Leaf carbon content

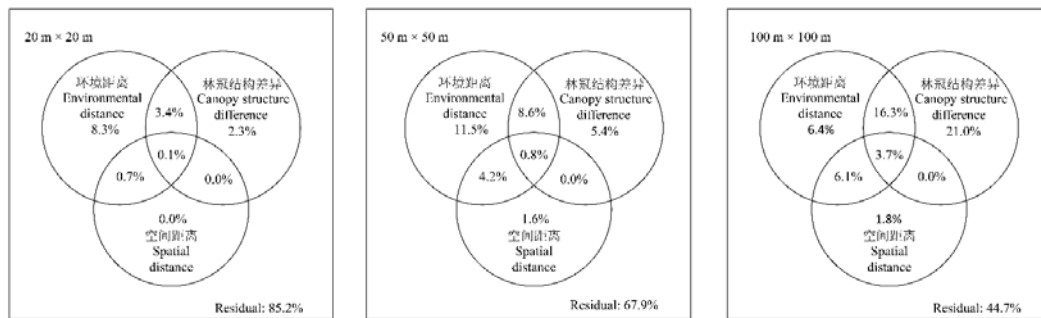


周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>

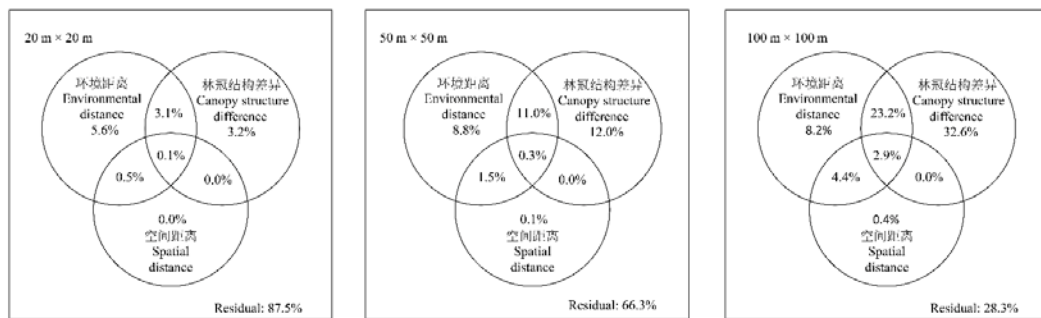
叶片氮含量 Leaf nitrogen content



叶片磷含量 Leaf phosphorus content



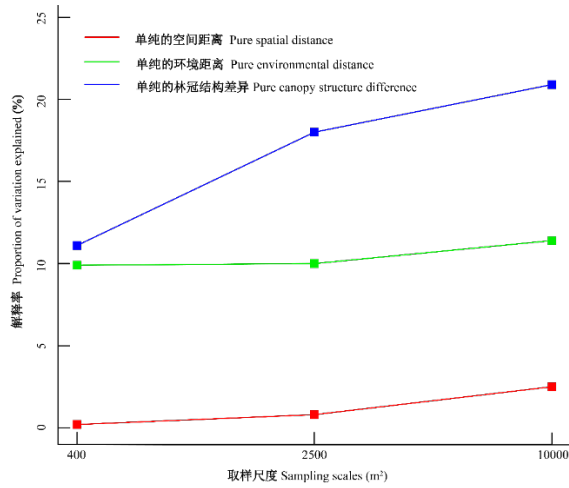
叶片钾含量 Leaf potassium content



附录8 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度林冠结构差异、环境距离和空间距离对所有木本植物个体(DBH ≥ 1 cm)单个功能性状的beta多样性的解释率

Appendix 8 The variation explained by canopy structure difference, environmental distance and spatial distance at each of three sampling sizes for all woody plant individuals with DBH ≥ 1 cm on functional beta diversity based on each of 11 functional trait in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest

周昌艳, 王彬, 邓云, 乌俊杰, 曹敏, 林露湘 (2020) 林冠结构是局域尺度木本植物功能性状 beta 多样性形成的重要驱动力. 生物多样性, 28, 1546–1557. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020092>



附录9 西双版纳热带季节雨林20 ha动态样地不同取样尺度单纯的林冠结构差异、单纯的环境距离和空间距离对所有木本植物个体物种beta多样性的解释率

Appendix 9 The variation explained by pure canopy structure difference, pure environmental distance and spatial distance at each of the three sampling scales for all woody plant individuals (DBH \geq 1 cm) on species beta diversity in the 20 ha forest dynamics plot in the Xishuangbanna tropical seasonal rainforest



•研究报告•

扬州宝应湖底栖大型无脊椎动物的生物多样性及其变化

胡 芮^{1#} 王儒晓^{1#} 杜诗雨¹ 李 萌¹ 邢雨辉¹ 潘 达¹ 徐海根^{2*} 孙红英^{1*}

1 (南京师范大学生命科学学院, 南京 210023)

2 (生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 底栖大型无脊椎动物作为水环境监测的重要指示生物, 其群落结构和多样性能够有效地反映水环境的健康状况。为了更好地了解扬州宝应湖大型底栖动物的群落多样性, 本文于2015–2019年对扬州宝应湖底栖大型无脊椎动物进行野外调查和采样, 联合经典形态学和高通量测定DNA条形码方法进行物种鉴定, 进一步分析了这些大型无脊椎动物群落结构和多样性的年度变化, 并应用Shannon-Wiener指数(H')和污染生物指数(biotic index, BI)对水质状况进行生物评价。结果显示: 共记录大型底栖动物3门5纲57种, 其中软体动物门23种, 隶属2纲9科(腹足纲7科15种, 双壳纲2科8种); 环节动物门寡毛纲12种, 隶属2科; 节肢动物门22种, 隶属2纲6科(软甲纲4科5种, 昆虫纲2科17种)。腹足纲是优势类群, 5年间的密度占比均在65%以上。优势种是赤豆螺(*Bithynia fuchsiana*)、槲豆螺(*B. misella*)和长角涵螺(*Alocinma longicornis*)。Margalef丰富度指数(2.27 ± 0.28)、Simpson优势度指数(0.82 ± 0.02)和Pielou均匀度指数(0.78 ± 0.08)在5年间呈现明显的波动变化。对水质状况的生物评价结果表明, 湖区水体环境在5年间均呈现不同程度的污染状态, 这与过度围湖水产养殖等经济活动引起水体富营养化有一定关系。

关键词: 扬州; 宝应湖; 底栖大型无脊椎动物; DNA条形码; 生物多样性; 群落结构; 水质生物学评价

Biodiversity and spatiotemporal variations of benthic macroinvertebrates in the Baoying Lake, Yangzhou, Jiangsu

Rui Hu^{1#}, Ruxiao Wang^{1#}, Shiyu Du¹, Meng Li¹, Yuhui Xing¹, Da Pan¹, Haigen Xu^{2*}, Hongying Sun^{1*}

1 College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023

2 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042

Abstract: Benthic macroinvertebrates serve as important indicator organisms for water environment monitoring, and the study of their community structure and biodiversity can effectively reflect the health of the water body. From 2015 to 2019, we investigated the community structure and biodiversity of benthic macroinvertebrates in the Baoying Lake, Yangzhou, Jiangsu Province. Using both morphological traits and DNA barcoding, we identified a total of 57 species. Assigned to three phyla and five classes, these species included: 23 molluscs (15 gastropods and 8 bivalves); 12 oligochaetes; and 22 arthropods (5 malacostracans and 17 insects). Gastropods constituted the most dominant group, accounting for more than 65% of density ratio during five years. The three most abundant gastropods were *Bithynia fuchsiana*, *B. misella*, and *Alocinma longicornis*. Surveys on the annual variation of species diversity and community structure showed mean values of the Margalef abundance index, Simpson dominance index and Pielou evenness index at 2.27 ± 0.28 , 0.82 ± 0.02 , and 0.78 ± 0.08 , respectively. Biotic assessments of water quality based on both the Shannon-Wiener index (H') and the biotic index (BI) suggested varying intensities of pollutants in the Baoying Lake between 2016 and 2019. This variation is likely related to anthropogenic eutrophication, notably overstocking during barrier net aquaculture.

收稿日期: 2020-01-17; 接受日期: 2020-04-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0507206)和生态环境部生物多样性保护专项

共同第一作者 Co-first authors

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: sunhongying@nynu.edu.cn; xhg@nies.org

Key words: Yangzhou; Baoying Lake; benthic macroinvertebrates; DNA barcode; biodiversity; community structure; bioassessment of water quality

宝应湖位于江苏省扬州市,京杭大运河以西,是江苏省纳入国家《水质较好湖泊生态环境保护总体规划》的三个湖泊之一。宝应湖属草型浅水、封闭型湖泊,与其周边纵横交错的水网构成了以湖泊湿地为主的湿地生态系统,对维护生物多样性、调节河川径流和调控局部气候,发展和提高农业、渔业,促进旅游产业发展和改善居民生活等都起着重要作用(钮兆花等,2008,吴兆年,2013)。宝应湖水环境在其湿地生态系统中起着举足轻重的作用,不仅决定着宝应湖湿地的生态服务功能和生态经济价值,同时对湿地景观的经济效益也起到主导作用。然而近年来,随着宝应湖湿地开发力度的逐步加大,湖滩地大部分被围垦种植,滩地植被破坏严重(鲍春晖等,2018);且湖区大力发展围网养殖(戴建华等,2016),使天然水域受到严重干扰,湖区水生生态环境状况亟待调查和评估。

淡水底栖大型无脊椎动物(以下简称底栖动物)是生活史的全部或至少一个时期栖息于内陆淡水(包括流水和静水)水体的底部基质中,或在水底表面营游泳、爬行等活动的动物类群,主要包括水栖寡毛纲、软体动物、十足类甲壳动物和水生昆虫等(Covich et al, 1999; 孙红英等, 2013)。这些动物类群处于水生食物链的中间环节,既可促进有机质分解,净化水体,又可以作为鱼类等动物的天然优质饵料,在维持淡水生态系统的能量流动和物质循环中起到关键作用。它们的出现或消失可准确表征自然环境变化或人为干扰对水域生态系统造成的持久性和间断性影响,因此常被作为水环境监测的重要指示生物(梁彦龄和王洪铸, 1999; 段学花等, 2010),对其群落结构、生物多样性的研究能够有效地反映水环境的健康状况(Balderas et al, 2016; 邢圆等, 2019)。宝应湖底栖动物资料匮乏,仅见2012年秋季和翌年春季的调查报道(马德高等, 2017)。在以往的底栖动物调查研究中,仅采用传统形态学方法进行物种鉴定,对于个体微小、柔软易损或仅幼虫营底栖生活的动物类群的鉴定而言,存在费时费力、专业性要求高等条件的限制。近年来, DNA条形码技术被广泛应用于底栖动物调查和分类鉴定中

(Brodin et al, 2013; Silva & Wiedenbrug, 2014; 张翔等, 2016)。线粒体细胞色素氧化酶亚基I基因(cytochrome *c* oxidase I, *COI*)因其遵循母系遗传、重组率极低、拷贝数高、蕴含丰富的系统发育信号等优点成为首选的DNA条形码分子标记(Hebert et al, 2003; 李超伦等, 2011)。

本文以2015年4月至2019年10月连续5年在扬州宝应湖进行底栖动物多样性调查的数据为基础,联合使用以*COI*为分子标记的DNA条形码高通量测序技术和传统的形态分类鉴定方法,对该湖区分布的底栖动物进行鉴别,并对底栖动物多样性和群落结构的变化及其对水质变化的响应进行分析,以期对扬州宝应湖水生生态系统多样性保护和生态文明建设决策提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域和样点布设

宝应湖位于江苏省中部的高邮湖与白马湖之间,与下游的高邮湖直接相连,原为淮河入江行洪必经之地,分属宝应、金湖两县管辖。宝应湖湖面狭长,长20.7 km,平均宽1.2 km,面积38.69 km²。宝应湖水依赖地表径流和湖面降水补给,白马湖有部分来水经阮桥闸汇入宝应湖,出水主要由大汕子闸下泄入高邮湖。多年平均水位6.06 m,历年最高水位7.16 m,最低水位5.09 m。湖水黄绿色,透明度0.6–1.3 m,年均水温17.5℃,属重碳酸盐类钙组I型淡水湖。参照《生物多样性观测技术导则—淡水底栖大型无脊椎动物》(HJ710.8-2014),并根据湖区的地理环境和水体环境特点,在入口区、汇水区、湖心区(深水区)、出口区等区域共设置5个断面(A–E,图1),在每个断面设置2个采样点(湖中样点和湖边样点)。分别于2015年4月和12月、2016年4月和11月、2017年4月和11月、2018年4月和2019年10月进行底栖动物野外调查,共进行了8次采样。

1.2 样品采集与鉴定方法

参照《生物多样性观测技术导则—淡水底栖大型无脊椎动物》(HJ710.8-2014)中的方法,对各样点进行定量采集和定性采集。定量采集:使用1/16 m²

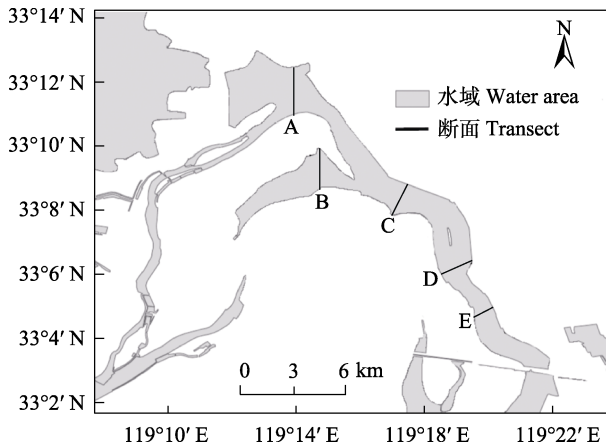


图1 宝应湖研究区域示意图

Fig. 1 Map of the study area in the Baoying Lake

的彼得生采泥器定量采集样品, 每个样点采泥3次, 合并作为1个样品。采泥深度为20–30 cm。由于湖面被养殖围网阻挡, 航道变窄, 2017年和2018年的所有断面仅能采到1个样点(湖边样点被围网阻拦未能采集样品)。所采泥样用0.5 mm孔径的筛网进行分选, 使用体积分数为95%的乙醇固定标本后带回实验室。样品保存时按断面进行编号, 分别保存在样品瓶中。定性采集: 使用长柄D型抄网在岸边和浅水等区域定性采集样品, 并挑拣作业渔民使用地笼捕获的底栖动物样品。参考相关资料(刘月英等, 1979; Morse et al, 1994; 韩茂森和束蕴芳, 1995; 戴爱云, 1999), 采用传统形态学方法对样品进行分类与鉴定。软体动物和甲壳动物等常见、易于分类的类群鉴定到种, 寡毛纲和昆虫纲幼虫(如摇蚊幼虫)等通过形态分类初步鉴定到科或属, 统计每种(科、属)底栖动物的个体数并称湿重。

使用COI为分子标记, 对寡毛纲和昆虫纲幼虫(如摇蚊幼虫)进行DNA条形码辅助分类和鉴定。鉴于高通量测序数据量大、可混样测序的特点, 将每年每个断面的寡毛纲和昆虫纲样品混合, 除去未采到寡毛纲和昆虫纲的样点(2016年A、B断面的湖中样点、C断面的湖边样点), 共得到17个混合样品。使用动物基因组DNA提取试剂盒(通用型, 擎科生物科技有限公司)分别提取各样品的总基因组DNA, 并用NanoDrop 2000 (Thermo Scientific)测定DNA样品的浓度。DNA样品浓度达到13 ng/μL以上方可用于后续的高通量测序(共有12个DNA样品合格, 包括2015年断面A、E样品, 2016年断面D样品, 2017年断面B–E的样品, 2018年断面A–E的样品)。使用

DNA条形码引物: COintF: 5'-GGWACWGGWTGA ACWGTWTAYCCYCC-3' (Leray et al, 2013); HCO2198: 5'-TAIACYTCIGGRTGICCRARAAYC A-3' (Geller et al, 2013)扩增线粒体COI基因313 bp的目的片段。取上述各断面的部分DNA样品用于高通量测序(上海派森诺生物公司), 其余DNA样品备份保存在实验室-40℃冰箱。将获得的测序数据进行后续数据处理和生物多样性分析。需要说明的是, 2019年调查期间, 在所有断面采获的寡毛纲和昆虫纲个体数均极少, 因此未采用DNA条形码分类。物种鉴定依据形态鉴别, 并借助此前各年度DNA条形码辅助鉴定的种类、通过形态特征比对进行确认。分别统计各种底栖动物的个体数并称取湿重。

1.3 数据处理与分析方法

1.3.1 原始数据质控及OTU划分

采用Illumina MiSeq平台对群落DNA片段进行双端(paired-end)测序, 测序原始数据以FASTQ格式保存。采用滑动窗口法对FASTQ格式的双端序列逐一作质量筛查。利用FLASH软件(Magoc & Salzberg, 2011), 对通过质量初筛的双端序列根据重叠碱基进行配对连接。用QIIME软件(Quantitative Insights Into Microbial Ecology, v 1.8.0, <http://qiime.org/>) (Caporaso et al, 2010)识别疑问序列, 检查并剔除嵌合体序列和不确定序列, 建立各年度不同断面的有效序列数据集。

使用QIIME软件, 调用UCLUST序列比对工具(Edgar, 2010), 对前述获得的序列按97%的序列相似度进行归并和OTU划分, 并选取每个OTU中丰度最高的序列作为该OTU的代表序列。对于每个OTU的代表序列, 在QIIME软件中使用默认参数, 通过将OTU代表序列与BOLD数据库和NCBI数据库相比对, 获取每个OTU所对应的分类学信息。去除丰度值低于全体样本测序总量0.001%的OTU (Bokulich et al, 2013)。为了进一步比较不同年份之间底栖动物多样性组成的变化, 将各年度的DNA有效序列进行整合, 再次剔除不确定序列数据后, 将每条OTU代表序列与数据库比对, 检测和记录各断面样品的底栖动物种类。

1.3.2 群落结构及多样性分析方法

本研究采用优势度指数(Y)确定优势种, 采用Margalef丰富度指数(dM)、Simpson优势度指数(d)、Pielou均匀度指数(J)计算各样点的多样性指数, 并

基于Shannon-Wiener多样性指数(H')和biotic index (BI)污染生物指数进行水质生物学评价(Shannon, 1949; 王备新, 2003)。Shannon-Wiener多样性指数水质分级标准参考蔡永久等(2014), 将水质级别分为4个等级: $H' > 3$ 时为清洁, $2 < H' < 3$ 时为轻度污染, $1 < H' < 2$ 时为中度污染, $0 < H' < 1$ 时为重度污染。参考秦春燕(2013)^①, 计算 BI 指数, BI 水质分级标准参考王备新(2003), 水质级别共有5个等级: $BI < 1.93$ 时为极清洁, $1.94 < BI < 3.51$ 时为清洁, $3.52 < BI < 5.09$ 时为轻度污染, $5.10 < BI < 6.67$ 时为中度污染, $BI > 6.67$ 时为重度污染。定性采集的样品(如软甲类)不计算在内。计算公式如下:

$$(1) \text{ 优势度指数}(Y): Y = (N_i / N) \times f_i$$

$$(2) \text{ Margalef丰富度指数}(dM): dM = (S - 1) / \ln N$$

$$(3) \text{ Simpson优势度指数}(d): d = 1 - \sum P_i^2$$

$$(4) \text{ Pielou均匀度指数}(J):$$

$$J = -\sum P_i \ln P_i / \ln S$$

$$(5) \text{ Shannon-Wiener多样性指数}(H'):$$

$$H' = -\sum P_i \ln P_i$$

$$(6) \text{ Biotic index污染生物指数}(BI):$$

$$BI = \sum T_i N_i / N$$

式中, P_i 为第*i*种的相对丰度, 即 N_i/N , N_i 为第*i*种的个体数, N 为总个体数, S 为底栖动物物种总数, f_i 为第*i*种在各个位点出现的频率, T_i 为第*i*个分类单元的耐污值(王备新, 2003; 秦春燕, 2013^①), 定义 $Y > 0.02$ 的种为优势种(陈亚瞿等, 1995)。

2 结果

2.1 物种多样性及其年度变化

本文借助传统形态学方法, 共鉴定底栖动物35种, 隶属于2门5纲6目15科(附录1)。其中, 腹足纲2目7科15种, 双壳纲1目2科8种, 软甲纲1目4科5种, 寡毛纲1目1科3种, 昆虫纲1目1科4种。比较前三类底栖动物多样性组成的年间变化发现, 其物种数在2015年最多, 有11科22种; 在2018年最少, 仅有8科

14种; 在2019年略有回升, 有9科19种(图2a)。

将高通量测序获得的2015–2018年寡毛纲和昆虫纲样品的DNA条形码原始数据进行初步分析, 共检测出寡毛纲1目2科12种, 昆虫纲1目2科17种。各年不同分类水平的OTU比例见图3a, 通过比较这两类底栖动物多样性组成在5年间的变化发现(图3a), 寡毛纲在2018年的物种检出率最高(比例为100%), 水生昆虫在2015年的物种检出率最高(88.2%)。根据OTU分类所做的这两类底栖动物COI基因条形码venn图显示, 各年度特有寡毛纲和昆虫纲物种数最多的是2015年, 共检出8种; 各年度之间共有的寡毛纲和昆虫纲种类共计3种(图3b)。

综合以上分析, 宝应湖底栖动物有57种, 隶属3门5纲(附录1)。其中, 昆虫纲种类最多, 有17种(占比为29.82%, 下同); 腹足纲次之, 有15种(26.32%); 其他依次为寡毛纲12种(21.05%), 双壳纲8种(14.04%), 软甲纲5种(8.77%)。比较物种组成和密度占比的年间变化(图2), 结果显示, 软体动物(腹足纲、双壳纲)整体表现出较高的物种数量和密度占比, 但两者在2018年均出现明显下降, 尤其是密度占比下降明显。寡毛纲的物种数量和密度占比在5年间发生波动, 2018年增量最大; 水生昆虫以摇蚊科物种数量居多, 且2015年的物种数量最多(图2a), 其余年份与寡毛纲在物种数量和密度占比上的变化趋势基本一致。

2.2 底栖动物群落结构

5年调查期间, 底栖动物各年份的优势类群均为腹足纲, 优势度(Y 值)在0.0234–1.4705之间(表1), 各年共有的优势种为: 赤豆螺(*Bithynia fuchsiana*)、槲豆螺(*B. misella*)和长角涵螺(*Alocinma longicornis*)。

底栖动物生物量与生物密度的时空分布分析显示(图4a, b), 5年间的年均生物量在129.89–541.38 g/m²之间(平均为397.594 g/m²), 年均生物密度在834.13–2,316.27 ind./m²之间(平均为1,443.63 ind./m²)。年均生物量在2015–2017年间较为接近, 2018年最低, 2019年出现明显回升。比较5年间各断面的生物量变化发现, 2019年A断面的生物量最高(1,347.17 g/m²), 其中, 背瘤丽蚌(*Lamprotula leai*)的生物量(711.20 g/m²)占该断面生物量的52.8%, 2018年C断面的生物量最低(26.56 g/m²) (图4a)。年

^① 秦春燕 (2013) 长江三角洲淡水底栖动物耐污值修订和 BI 指数水质评价分级研究. 硕士学位论文, 南京农业大学, 南京.

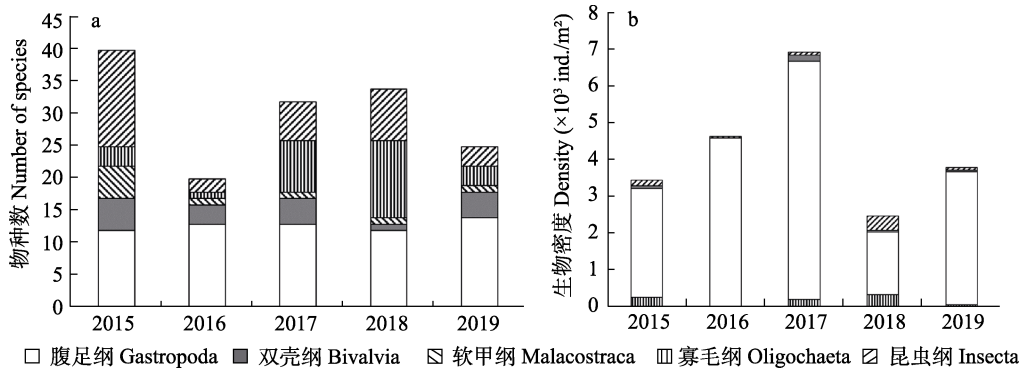


图2 宝应湖2015–2019年的底栖大型无脊椎动物物种数(a)及主要类群的相对生物密度(b)
Fig. 2 Number of species (a) and density of main groups (b) of benthic macroinvertebrates in the Baoying Lake

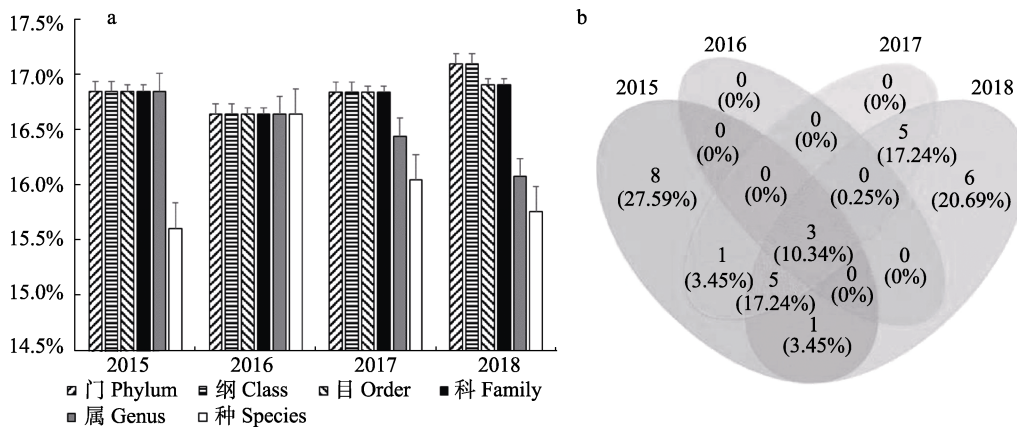


图3 宝应湖2015–2018年的寡毛纲和昆虫纲动物的DNA条形码鉴定结果。a: 不同分类水平的OTU比例及其年度变化; b: 各年份的寡毛纲和昆虫纲特有种或共有种的比例。
Fig. 3 Results of DNA barcoding identification of Oligochaeta and Insecta in the Baoying Lake. a, Proportion of OTUs at different classification levels and their annual change; b, Percentage of endemic or common species of Oligochaeta and Insecta.

表1 宝应湖2015–2019年底栖大型无脊椎动物优势种及其优势度(Y)
Table 1 The dominant species and their dominant values (Y) of 2015–2019 in the Baoying Lake

物种 Species	2015		2016		2017		2018		2019	
	个体数 No. of individuals	优势度 Dominant values	个体数 No. of individuals	优势度 Dominant values	个体数 No. of individuals	优势度 Dominant values	个体数 No. of individuals	优势度 Dominant values	个体数 No. of individuals	优势度 Dominant values
长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	472	0.0702	1,488	0.6889	694	0.1474	125	0.1045	330	0.2123
赤豆螺 <i>Bithynia fuchsiana</i>	2,062	1.1788	1,101	0.3818	1,262	0.4509	108	0.0824	1,018	1.4705
槲豆螺 <i>Bithynia misella</i>	708	0.1350	886	0.2314	710	0.1447	93	0.0659	110	0.0247
纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>	335	0.0287	408	0.0473	110	0.0030	44	0.0122	129	0.0281
梨形环棱螺 <i>Bellamyia purificata</i>	820	0.1752	301	0.0252	102	0.0032	12	0.0020	113	0.0327
凸旋螺 <i>Gyraulus convexiusculi</i>	137	0.0033	297	0.0235	0	0	0	0	103	0.0153
尖口圆扁螺 <i>Hippeutis cantor</i>	0	0	37	0.0008	360	0.0358	0	0	0	0
铜锈环棱螺 <i>Bellamyia aeruginosa</i>	5	0.0001	202	0.0124	162	0.0077	47	0.0234	231	0.1236
方形环棱螺 <i>Bellamyia quadrata</i>	88	0.0021	215	0.0142	113	0.0040	24	0.0054	123	0.0318

粗体代表该年度优势种 Bold-faced numbers represent dominant species

均生物密度在 2015 年和 2016 年较为接近, 2017–2019 年出现明显波动变化。5 年中, 2017 年 B 断面生物密度为最高(3,730.67 ind./m²), 2018 年 C 断面为最低(181.33 ind./m²) (图 4b)。

依据 Margalef 丰富度指数(dM)、Simpson 优势度指数(d)和 Pielou 均匀度指数(J), 对腹足纲、双壳纲、寡毛纲和昆虫纲等 4 类主要底栖动物类群的物种多样性时空分布分析显示(图 5a–c), Margalef 丰富度指数的平均值为 2.27 ± 0.28 , 在 2017 年和 2018 年呈下降趋势, 2019 年又回升到 2016 年前的平均水平(图 5a); Simpson 优势度指数平均值为 0.82 ± 0.02 , 整体变化较为平稳, 但 2019 年 E 断面的值较低(图 5b); Pielou 均匀度指数平均值为 0.78 ± 0.08 , 2018 年均匀度最高, 2019 年(除 E 断面外)与 2015 年较为接近(图 5c)。三类生物多样性指数在 5 年间呈现波动性变化态势。

2.3 水质生物评价分析

基于 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 BI 生物指数分别对水质健康状况进行生物学评价, 结果显

示, H' 值在 1.89–2.56 之间, 水体的水质状况处于轻度至中度污染(表 2)。 BI 指数值在 5.77–6.94 之间(表 2), 提示水体的水质为中度至重度污染。各调查断面的 BI 指数评价结果显示(图 6b), 除了 2015 年 E 断面为轻度污染外($BI = 4.73$), 2015 和 2016 年其余断面水质为极清洁(2016 年 D 断面: $BI = 1.87$)至清洁状态(2016 年 E 断面: $BI = 3.22$); 2017–2019 年, 除了 2019 年 A 断面显示为清洁($BI = 3.33$)外, 其余断面水质状况处于轻度污染(2019 年 E 断面: $BI = 3.53$)至重度污染(2018 年 C 断面: $BI = 7.68$)。各调查断面的 H' 指数评价结果显示(图 6a), 2015–2019 年所有断面水质状况处于轻度(2018 年 D 断面: $H' = 2.33$)至中度污染(2018 年 A 断面: $H' = 1.74$)。

3 讨论

3.1 DNA 条形码技术在底栖大型无脊椎动物多样性研究中的应用

除了传统的形态学方法, DNA 条形码技术也被广泛应用于底栖动物的分类鉴定(Brodin et al, 2013;

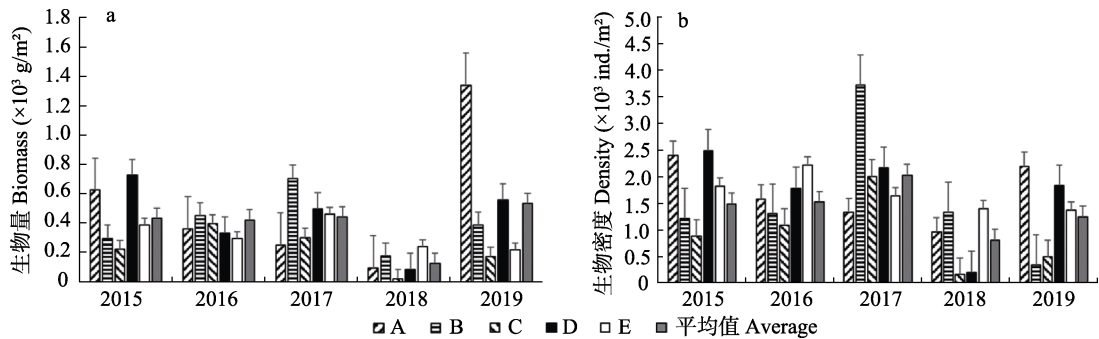


图 4 宝应湖 A–E 断面的底栖大型无脊椎动物年均生物量(a)和年均生物密度(b)的变化
Fig. 4 The changes of the annual average biomass (a) and annual average density (b) of the benthic macroinvertebrate groups at A–E transect in the Baoying Lake

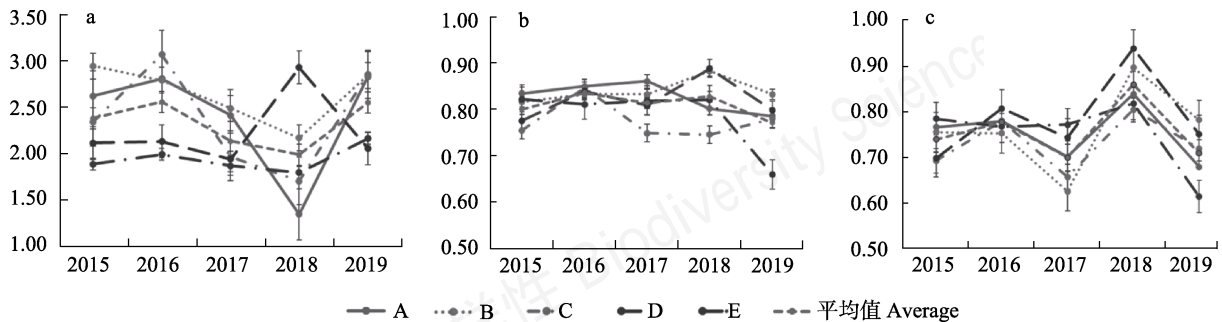


图 5 宝应湖底栖大型无脊椎动物群落的 Margalef 丰富度指数(a)、Simpson 优势度指数(b)和 Pielou 均匀度指数(c)
Fig. 5 Margalef abundance index (a), Simpson dominance index (b), and Pielou evenness index (c) of the benthic macroinvertebrate groups in the Baoying Lake

表2 宝应湖各年度底栖大型无脊椎动物的Shannon-Wiener指数及BI指数

Table 2 Annual Shannon-Wiener diversity index (H') and biotic index (BI) values of benthic macroinvertebrates in the Baoying Lake

调查年份 Investigating year	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index (H')	BI指数 Biotic index (BI)
2015	2.15	5.98
2016	2.14	5.78
2017	2.56	6.77
2018	2.32	6.94
2019	1.89	5.77

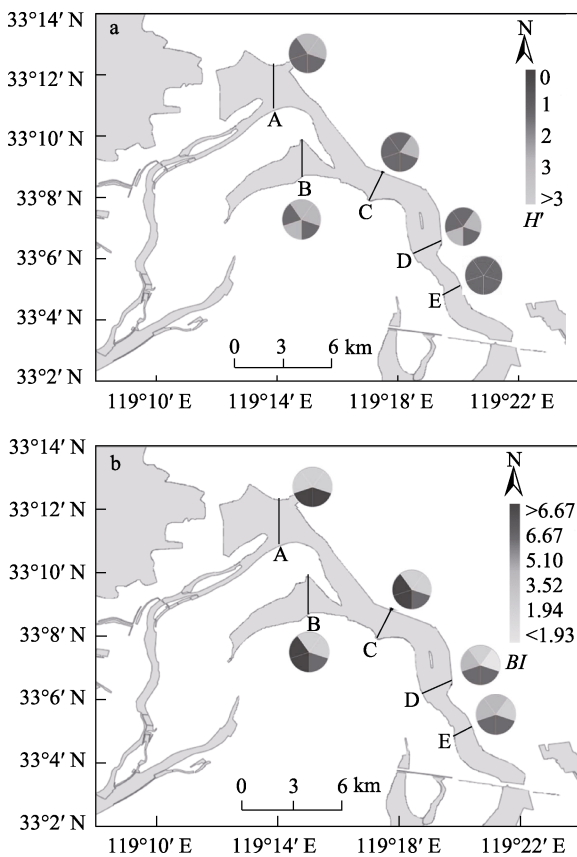


图6 采用Shannon-Wiener多样性指数(a)和biotic index污染生物指数(b)对宝应湖5年调查期间的水质生物学评价与比较。轮盘上的5个扇形代表年份,12点方向的第1个扇形代表2015年,然后按顺时针的方向依次为2016–2019年。

Fig. 6 The bioassessments of water quality based on Shannon-Wiener diversity index (a) and BI index (b). The first fan-shaped section in the 12 o'clock direction represents 2015, followed by 2016 to 2019 in a clockwise direction.

Silva & Wiedenbrug, 2014; 张翔等, 2016; 杨梅等, 2018)。基于高通量测序的DNA条形码技术解决了形态学鉴定方法存在的学习成本高、费时费力、准确度受操作人员专业水准限制的影响较大等问题,

并具有测序数据量大、周期短、成本低、易学易用等优点。在生物多样性研究方面,DNA条形码(曹云等, 2016; 金倩等, 2016)、DNA复合条形码(宋颺和黄原, 2016; 李杰等, 2016)以及环境DNA技术(李萌等, 2019)被广泛推广或应用。本文利用DNA条形码技术,从三年采集获得的样品(除2016和2019年样品外)中均鉴别出10种以上寡毛纲和昆虫纲物种,相较于同区域单纯使用传统方法的分析(马德高等, 2017),提高了多样性调查的效率,解决了部分类群多样性被低估的问题,使结果更真实地反映宝应湖底栖动物的生物多样性水平。

尽管基于高通量测序的DNA条形码技术具有省时省力等许多优点,但该技术到底栖动物生物多样性调查、监测等领域的推广和应用仍存在一些制约因素。首先,现有的数据库信息不全,BOLD数据库中有超过45,000条底栖动物的序列,包括2,800多个物种,但还远不能覆盖目前已知的上万种底栖动物。其次,缺乏可靠的基于凭证标本的条形码数据库,大量的条形码序列缺少凭证标本信息。其三,缺少中国本土物种的条形码信息,现有大多数物种的条形码信息来自北美洲、太平洋东岸、大西洋东岸沿海的西欧各国,以及非洲北部各国的底栖动物类群,无法有效应用于更多地区。2019年11月,在中国南京召开的“中国大型底栖动物条形码数据库构建研讨会”上,国内从事底栖动物分类系统学研究的一线专家到会共同探讨了联合建立以中国本土物种为对象、以分类凭证标本为基础的底栖动物条形码数据库构建思路和框架,期望在未来数年内建成涵盖本土全类群的中国底栖大型无脊椎动物DNA条形码数据库。相信随着DNA条形码数据库的不断积累完善,以及测序成本进一步降低,该技术的准确度和效率还会逐步提升,并有望在生物多样性保护研究领域发挥关键利器作用。

尽管DNA序列数与物种个体数之间存在一定的关联,但两者未达到统计学上的对应关系(李杰等, 2016)。本文获得的DNA条形码数据仅用于底栖动物的定性和类群组成的相对丰度分析(图3)。现有的DNA条形码技术在群落结构及多样性定量分析等方面,尤其是对大型无脊椎动物这类复杂多样的底栖生物类群来说存在很大的局限性。如何在群落定量分析上取得突破是未来DNA条形码技术以及环境DNA技术面临的挑战。

3.2 底栖动物群落结构和多样性及对水质变化的响应

本研究共采集到底栖动物57种, 相较宝应湖此前的底栖动物调查(获得27种底栖动物)本次调查持续时间长, 各年度采样断面一致性高, 并且联合采用DNA条形码技术对物种进行分类鉴定, 能够更加准确地反映出宝应湖底栖动物的物种组成和群落结构特征。调查结果显示, 宝应湖底栖动物的物种组成及密度占比在2015–2019年之间发生了波动性变化。软体动物整体表现出较高的物种多样性和生物密度, 5年间优势种为9种腹足纲动物(3科), 共有优势种有3种(赤豆螺、槲豆螺和长角涵螺; 表1)。相比2012–2013年调查(马德高等, 2017), 底栖动物优势类群一致, 均为腹足纲动物。其中, 赤豆螺为共有的优势种。此外, 本次调查监测到的寡毛纲(12种2科)和摇蚊科(17种)种类远多于此前调查获得的种类(寡毛纲2种; 马德高等, 2017)。其中, 克拉伯水丝蚓(*Limnodrilus claparedianus*)为共有的寡毛纲种类。在本次调查获得的寡毛纲动物中, 以克拉伯水丝蚓、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)和苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)的出现率为最高; 在摇蚊科中, 则以分离底栖摇蚊(*Benthalia dissidens*)、中国长足摇蚊(*Tanytus chinensis*), 以及大红德永摇蚊(*Tokunagayusurika akamusi*)和裸须摇蚊属一种(*Prosilocerus* sp.)的出现率为最高。寡毛纲的克拉伯水丝蚓、霍甫水丝蚓和苏氏尾鳃蚓等耐污种通常在富营养化水体中大量存在(James et al, 2005; Cai et al, 2012), 摇蚊科的中国长足摇蚊和大红德永摇蚊也常作为富营养化湖泊的指示物种(龚志军等, 2001)。本文监测结果显示, 这些耐污性强、适宜富营养化环境的寡毛纲和摇蚊在宝应湖成为常见的底栖动物类群, 反映出宝应湖水体已发生一定程度的富营养化。

尽管水体理化参数可以提供关于水质污染的准确信息, 但其实施成本相对较高(Resh, 2007; Balderas et al, 2016)。使用生物评价和监测的手段具有化学评价无法比拟的突出优势(段学花等, 2010), 可以起到“吹哨”或提前预警的效果。由于大多数淡水底栖动物具有生命周期短(生活史一至两年)、在水生生态系统中占据多个营养级等特点, 它们可以有机地整合水环境的短期变化效应, 从而对环境胁迫产生迅速响应(孙红英等, 2013)。基于底栖动物开

展水质生物评价监测具有样品易于采集、花费的人力和物力更为经济等优势, 被广泛应用于水环境的健康评价(Barbour, 1999; Markert et al, 1999; Balderas et al, 2016)。寡毛纲和摇蚊幼虫通常在富营养化水体中大量存在, 且水体营养程度越高其密度越大(熊金林等, 2003), 而软体动物种类的数量会随着水体富营养化水平的提升有下降趋势(James et al, 2005; Cai et al, 2012)。本文调查结果显示, 寡毛纲和昆虫纲(主要为摇蚊科)的物种数量和密度在5年间均有一定波动, 二者在2018年均出现明显增加(图2); 而软体动物种类的数量和密度占比在2018年均发生下降, 尤其是密度占比下降明显(图2)。这间接反映出宝应湖水体健康状况在5年间发生了明显波动, 水体受污染的程度在2018年最为严重。有机污染物富集对底栖动物群落的影响通常表现为群落物种丰富度的下降(Kutti et al, 2007)。本文调查显示, 物种丰富度指数在2017–2018年连续下降(图5a), 提示水体中有机污染物在此期间的富集情况有所加剧。该结果印证了2017年对宝应湖水质的理化因子监测(总氮1.34 mg/L, 总磷0.06 mg/L)得出水体处于中营养化状态(综合营养状态指数值为37.427; 鲍春晖等, 2018)的结果。此外, 2018年底栖动物的物种总数高达34种(图2a), 但生物量和密度却明显低于其他年份(图4)。由此来看, 随着寡毛纲和摇蚊幼虫等小型化物种数量的增加, 总生物量出现了明显下降, 提示水体营养化程度加剧不利于底栖动物群落结构和多样性格局的维持。

3.3 水产养殖对湖区水质健康状况的影响

近年来, 宝应湖大力发展渔业围网养殖, 主要养殖品种包括鱼类(如青鱼 *Mylopharyngodon piceus*、草鱼 *Ctenopharyngodon idella*、鲢鱼 *Hypophthalmichthys molitrix* 和鳙鱼 *Aristichthys nobilis*)和中华绒螯蟹(*Eriocheir japonica sinensis*, 又称绒螯蟹、河蟹或大闸蟹)(Tang et al, 2003; 戴建华等, 2016)。实地调查显示, 2012–2013年间, 湖区围网渔业多以青、草、鲢、鳙等鱼类养殖为主, 仅有零星的绒螯蟹围网养殖。随着绒螯蟹产业化开发和大规模苗种的规模化供应, 无公害养殖绒螯蟹逐渐成为渔业养殖业的支柱。2015年以来, 宝应湖区的渔业养殖逐渐转产, 大力推广养殖绒螯蟹, 其围网养殖的面积和密度逐年提升, 至2018年整个湖面几乎被养殖围网隔为狭窄的水道。为补充天然优质

饵料,当地渔民和养殖户每年不断捕捞湖区开敞水(道)区的底栖贝类(以螺类为主),对螺类等贝类资源造成严重影响。螺类等底栖动物不仅自身可以对水体有机物质进行降解,还能够通过牧食(刮食)沉水植物表面的附生藻类(Reavell, 1980),增大沉水植物对光的利用效率(欧阳志云, 2010),进而促进沉水植物的生长和对水体中营养成分的吸收,对净化水体、稳定湖泊底质起到重要作用。过度捕捞螺类,不但对底栖动物物种资源造成破坏,也严重影响了水生生态系统对水体的净化功能。此外,已有的研究表明,蟹类养殖中大量投放的玉米,以及小杂鱼、螺蛳等饵料的残留物对水体氮、磷污染负荷的贡献最大,养殖蟹大量的排泄物也是水体富营养化的来源之一(Ackefors & Enell, 1994; Sahu et al, 2013; 穆玉林等, 2018)。

底栖动物水质生物评价指标包括群落丰富度和多样性指数(如Shannon-Wiener指数, H')以及与物种耐污值有关的指数(如Biotic index污染生物指数, BI),前者单纯以物种多样性指标评价水质的优劣,后者兼顾了物种多样性指标和不同种类对污染环境的耐受程度,即耐污值的差异(吴东浩等, 2011)。综合 2012 年和 2013 年调查获得的数据,Shannon-Wiener指数(两年分别为2.61和2.42)指示宝应湖水体的水质属于清洁(马德高等, 2017)。然而,从2015年渔业养殖逐渐转产至单一的绒螯蟹养殖,这期间的水质生物评价均显示宝应湖水体有轻重不一的污染状况(表2, 图6)。需要注意的是,从2018年水质生物评价来看,以物种多样性统计得出的Shannon-Wiener指数(2.32)显示水体属轻度污染(表2, 图6a),而兼顾底栖动物耐污值统计得出的 BI 值(6.94)则显示水体为重度污染(表2, 图6b)。该结果提示, BI 指数同时考虑了物种多样性和不同种类的耐污值差异,对水质健康状况的评价更为合理、科学。

上述研究表明,宝应湖底栖动物群落稳定性和水体健康状况受到过度围网养殖的影响。2019年,随着养殖围网的大范围撤除(湖区水面已基本恢复如2015年前后的状况),底栖动物群落多样性指标较2018年明显回升(图2, 图4, 图5a),水质污染的现象也得到一定程度缓解(图6b)。可以认为,底栖动物群落健康与否,直接关系到水生生态系统和水质状况的健康程度。本文对宝应湖底栖动物多样性和群落结构时空变化的研究,对进一步探索草型浅水湖

泊的环境承载力与渔业养殖容量之间的关系具有一定参考价值。一般认为,浅水型湖泊生态系统的退化主要表现为沉水植物的消退和食物网结构的退化(欧阳志云, 2010)。为保护宝应湖水生生态系统健康,应适当限制捕捞螺类等底栖动物,合理利用底栖动物的下行控制效应,提高沉水植被的存活率及对水体的净化效率。同时,保持底栖动物食物网结构的完整性,实现氮、磷等营养元素在食物链中的循环(全为民等, 2003)。继续坚持开展底栖动物多样性监测,可以为完善宝应湖水生生态系统的保护管理、建立生物预警系统等提供数据支撑和科学依据。

致谢: 野外考察得到了生态环境部南京环境科学研究所丁晖副研究员和江苏省扬州市环境监测研究站童桂凤高级工程师的大力支持; 样品采集得到南京师范大学张光富教授、李建宏教授、赵强高级工程师和戴建华副教授的鼎力协助,项目组研究生成佳佳、楚克林、贺婉、侯月、刘笑蕊、吕阳奇、宋丹红、姚凤欣、周丽君、王鹏飞、王玉娟、张泽伟、张展等参与野外调查、样品分拣和分类工作,南京师范大学生命科学学院本科生骆红、刘楠、秦越、秦超、裴剑驰、魏欲青、张晨、张慧伦、周心妍等参与部分野外调查工作。在此谨致谢忱!

参考文献

- Ackefors H, Enell M (1994) The release of nutrients and organic matter from aquaculture systems in Nordic countries. *Journal of Applied Ichthyology*, 10, 225–241.
- Balderas ECS, Grac C, Berti-Equille L, Hernandez MAA (2016) Potential application of macroinvertebrates indices in bioassessment of Mexican streams. *Ecological Indicators*, 61, 558–567.
- Bao CH, Xin YT, Hua Y, Li K (2018) Ecological environment quality of Baoying Lake and its countermeasures. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 46(21), 85–89. (in Chinese with English abstract) [鲍春晖, 辛玉婷, 花月, 李科 (2018) 宝应湖生态环境质量状况及对策. *安徽农业科学*, 46(21), 85–89.]
- Barbour MT (1999) *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Wadeable Streams and Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*. The Office of Water, US Environmental Protection Agency. [郑丙辉, 刘录三, 李黎 (译) (2011) 溪流及浅河快速生物评价方案: 着生藻类、大型底栖动物及鱼类. 中国环境科学出版社, 北京.]
- Bokulich NA, Subramanian S, Faith JJ, Gevers D, Gordon JI,

- Knight R, Mills DA, Caporaso JG (2013) Quality-filtering vastly improves diversity estimates from Illumina amplicon sequencing. *Nature Methods*, 10, 57–59.
- Brodin Y, Ejdung G, Strandberg J, Lyrholm T (2013) Improving environmental and biodiversity monitoring in the Baltic Sea using DNA barcoding of Chironomidae (Diptera). *Molecular Ecology Resources*, 13, 996–1004.
- Cai YJ, Jiang JH, Zhang L, Chen YW, Gong ZJ (2012) Simplification of macrozoobenthic assemblages related to anthropogenic eutrophication and cyanobacterial blooms in two large shallow subtropical lakes in China. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 15, 81–91.
- Cai YJ, Liu JS, Dai XL, Xu H, Xue QJ, Gong ZJ (2014) Community structure of macrozoobenthos and bioassessment of water quality in Lake Changdang, Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 33, 1224–1232. (in Chinese with English abstract) [蔡永久, 刘劲松, 戴小琳, 许浩, 薛庆举, 龚志军 (2014) 长荡湖大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. *生态学杂志*, 33, 1224–1232.]
- Cao Y, Shen WJ, Chen L, Hu FL, Zhou L, Xu HG (2016) Application of metabarcoding technology in studies of fungal diversity. *Biodiversity Science*, 24, 932–939. (in Chinese with English abstract) [曹云, 沈文静, 陈炼, 胡飞龙, 周蕾, 徐海根 (2016) Metabarcoding技术在真菌多样性研究中的应用. *生物多样性*, 24, 932–939.]
- Caporaso JG, Kuczynski J, Stombaugh J, Bittinger K, Bushman FD, Costello EK, Fierer N, Peña AG, Goodrich JK, Gordon JI, Huttley GA, Kelley ST, Knights D, Koenig JE, Ley RE, Lozupone CA, McDonald D, Muegge BD, Pirrung M, Reeder J, Sevinsky JR, Turnbaugh PJ, Walters WA, Widmann J, Yatsunenko T, Zaneveld J, Knight R (2010) QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nature Methods*, 7, 335–336.
- Chen YQ, Xu ZL, Wang YL, Hu FX, Hu H, Gu GC (1995) An ecological study on zooplankton in plume front zone of Changjiang (Yangtze) River estuarine area. I. Biomass distribution of dominant species. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2, 49–58. (in Chinese with English abstract) [陈亚瞿, 徐兆礼, 王云龙, 胡方西, 胡辉, 谷国传 (1995) 长江河口锋区浮游动物生态研究. I. 生物量及优势种的平面分布. *中国水产科学*, 2, 49–58.]
- Covich AP, Palmer MA, Crowl TA (1999) The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems. *BioScience*, 49, 119–127.
- Dai AY (1999) *Fauna Sinica • Arthropoda • Crustacea • Malacostraca • Decapoda • Parathelphusidae • Potamidae*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [戴爱云 (1999) 中国动物志 • 节肢动物门 • 甲壳动物亚门 • 软甲纲 • 十足目 • 束腹蟹科 • 溪蟹科. 科学出版社, 北京.]
- Dai JH, Sun HY, Wu J (2016) Study on fish composition and dominant species in the Baoying Lake, Jiangsu Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 44(3), 74–76. (in Chinese with English abstract) [戴建华, 孙红英, 吴军 (2016) 江苏省宝应湖鱼类组成和优势种研究. *安徽农业科学*, 44(3), 74–76.]
- Duan XH, Wang ZY, Xu MH (2010) *Benthic Macroinvertebrates and Application in the Assessment of Stream Ecology*. Tsinghua University Press, Beijing. (in Chinese) [段学花, 王兆印, 徐梦花 (2010) 底栖动物与河流生态评价. 清华大学出版社, 北京.]
- Edgar RC (2010) Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST. *Bioinformatics*, 26, 2460–2461.
- Geller J, Meyer C, Parker M, Hawk H (2013) Redesign of PCR primers for mitochondrial cytochrome *c* oxidase subunit I for marine invertebrates and application in all-taxa biotic surveys. *Molecular Ecology Resources*, 13, 851–861.
- Gong ZJ, Xie P, Tang HJ, Wang SD (2001) The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 25, 210–216. (in Chinese with English abstract) [龚志军, 谢平, 唐汇涓, 王士达 (2001) 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响. *水生生物学报*, 25, 210–216.]
- Han MS, Shu YF (1995) *Atlas of Freshwater Species in China*. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese) [韩茂森, 束蕴芳 (1995) 中国淡水生物图谱. 海洋出版社, 北京.]
- Hebert PD, Ratnasingham S, deWaard JR (2003) Barcoding animal life: Cytochrome *c* oxidase subunit I divergences among closely related species. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270 (Suppl. 1), S96–S99.
- James RT, David DH, Donald FC, Timothy LN, Winter DM (2005) Effects of removal of a small dam on downstream macroinvertebrate and algal assemblages in a Pennsylvania stream. *The North American Benthological Society*, 24, 192–207.
- Jin Q, Chen F, Luo GJ, Cai WJ, Liu X, Wang H, Yang CQ, Hao MD, Zhang AB (2016) Estimation of species richness of moths (Insecta: Lepidoptera) based on DNA barcoding in Suqian, China. *Biodiversity Science*, 24, 1296–1305. (in Chinese with English abstract) [金倩, 陈芬, 罗桂杰, 蔡卫佳, 刘旭, 王昊, 杨采青, 郝梦迪, 张爱兵 (2016) 基于DNA条形码的物种丰富度估计: 以宿迁地区鳞翅目蛾类为例. *生物多样性*, 24, 1296–1305.]
- Kutti T, Hansen PK, Ervik A, Høisæter T, Johannessen P (2007) Effects of organic effluents from a salmon farm on a fjord system. II. Temporal and spatial patterns in infauna community composition. *Aquaculture*, 262, 355–366.
- Leray M, Yang JY, Meyer CP, Mills SC, Agudelo N, Ranwez V, Boehm JT, Machida RJ (2013) A new versatile primer set targeting a short fragment of the mitochondrial COI region for metabarcoding metazoan diversity: Application for characterizing coral reef fish gut contents. *Frontiers in Zoology*, 10, 34.
- Li CL, Wang MX, Cheng FP, Sun S (2011) DNA barcoding and its application to marine zooplankton ecology. *Biodiversity Science*, 19, 805–814. (in Chinese with English abstract) [李超伦, 王敏晓, 程方平, 孙松 (2011) DNA条

形码及其在海洋浮游动物生态学中的应用. 生物多样性, 19, 805–814.]

- Li J, Yang J, Huang Y (2016) Characterizing the aquatic biodiversity of the Qinling Mountains using DNA metabarcoding approach. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 6103–6112. (in Chinese with English abstract) [李杰, 杨婧, 黄原 (2016) 应用DNA复合条形码技术研究秦岭水生动物多样性. *生态学报*, 36, 6103–6112.]
- Li M, Wei TT, Shi BY, Hao XY, Xu HG, Sun HY (2019) Biodiversity monitoring of freshwater benthic macroinvertebrates using environmental DNA. *Biodiversity Science*, 27, 480–490. (in Chinese with English abstract) [李萌, 尉婷婷, 史博洋, 郝希阳, 徐海根, 孙红英 (2019) 环境DNA技术在淡水底栖大型无脊椎动物多样性监测中的应用. *生物多样性*, 27, 480–490.]
- Liang YL, Wang HZ (1999) Zoobenthos. In: *Advanced Hydrobiology* (ed. Liu JK), pp. 241–259. Science Press, Beijing. (in Chinese) [梁彦龄, 王洪铸 (1999) 底栖动物 (第十章). 见: *高级水生生物学*(刘建康主编), 241–259页. 科学出版社, 北京.]
- Liu YY, Zhang WZ, Wang YX, Wang EY (1979) *Economic Fauna of China: Freshwater Mollusk*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [刘月英, 张文珍, 王跃先, 王恩义 (1979) *中国经济动物: 淡水软体动物*. 科学出版社, 北京.]
- Ma DG, Wu W, Chen ZF, Yin H, Chen YJ (2017) Composition and diversity analysis of macroinvertebrate in water body of Baoying Lake. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 45(15), 14–17. (in Chinese with English abstract) [马德高, 吴蔚, 陈志芳, 殷慧, 陈宇洁 (2017) 宝应湖水体大型底栖无脊椎动物组成和多样性分析. *安徽农业科学*, 45(15), 14–17.]
- Magoc T, Salzberg SL (2011) FLASH: Fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies. *Bioinformatics*, 27, 2957–2963.
- Markert B, Wappelhorst O, Weckert V, Herpin U, Siewers U, Friese K, Breulmann G (1999) The use of bioindicators for monitoring the heavy-metal status of the environment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 240, 425–429.
- Morse JC, Yang LF, Tian LX (1994) *Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality*. Hohai University Press, Nanjing. (in Chinese) [Morse JC, 杨莲芳, 田立新 (1994) *中国水生昆虫及其水质监测应用*. 河海大学出版社, 南京.]
- Mu YL, Shi HT, Zhao BW, Sun CX, Gao YS, Zhang ZJ, Li CJ (2018) Pollution load of nitrogen and phosphorus from cage aquaculture in Yangcheng Lake. *China Water & Wastewater*, 34(21), 86–91. (in Chinese with English abstract) [穆玉林, 石鸿韬, 赵博文, 孙承兴, 高月淑, 张振家, 李春杰 (2018) 阳澄湖围网养殖氮磷污染负荷分析. *中国给水排水*, 34(21), 86–91.]
- Niu ZH, Hu TX, He GJ, Yang ZJ (2008) Function analysis and scientific utilization for the Baoying Lake wetlands. *Modern Agricultural Science and Technology*, (20), 321–322, 324. (in Chinese) [钮兆花, 胡天新, 何国俊, 杨正俊 (2008) 宝应湖湿地功能分析及其科学利用. *现代农业科技*, (20), 321–322, 324.]
- Ouyang ZY (2010) *Review of 40-year Development of Chinese Ecology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [欧阳志云 (2010) *中国生态学学科40年发展回顾*. 科学出版社, 北京.]
- Quan WM, Shen XQ, Yan LJ (2003) Advances in research of biological purification of eutrophic water body. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14, 2057–2061. (in Chinese with English abstract) [全为民, 沈新强, 严力蛟 (2003) 富营养化水体生物净化效应的研究进展. *应用生态学报*, 14, 2057–2061.]
- Reavell P (1980) A study of the diets of some British freshwater gastropods. *Journal of Conchology*, 30, 253–271.
- Resh VH (2007) Multinational, freshwater biomonitoring programs in the developing world: Lessons learned from African and Southeast Asian river surveys. *Environmental Management*, 39, 737–748.
- Sahu BC, Adhikari S, Dey L (2013) Carbon, nitrogen and phosphorus budget in shrimp (*Penaeus monodon*) culture ponds in eastern India. *Aquaculture International*, 21, 453–466.
- Shannon CE (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- Silva FL, Wiedenbrug S (2014) Integrating DNA barcodes and morphology for species delimitation in the *Corynoneura* group (Diptera: Chironomidae: Orthoclaadiinae). *Bulletin of Entomological Research*, 104, 65–78.
- Song Y, Huang Y (2016) The application of DNA metabarcoding in the study of soil animal diversity in Taibai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 4531–4539. (in Chinese with English abstract) [宋颀, 黄原 (2016) DNA复合条形码在太白山土壤动物多样性研究中的应用. *生态学报*, 36, 4531–4539.]
- Sun HY, Li P, Yin JW, Ji YK (2013) Monitoring freshwater benthic macroinvertebrates. In: *Generality to Biological Species Resource Monitoring* (ed. Xu HG), pp. 233–261. Science Press, Beijing. (in Chinese) [孙红英, 李鹏, 殷稼雯, 纪永坤 (2013) 淡水底栖大型无脊椎动物监测(第十一章). 见: *生物物种资源监测概论*(徐海根主编), 233–261页. 科学出版社, 北京.]
- Tang BP, Zhou KY, Song DX, Yang G, Dai AY (2003) Molecular systematics of the Asian mitten crabs, genus *Eriocheir* (Crustacea: Brachyura). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 29, 309–316.
- Wang BX (2003) *Water Quality Bioassessment Using Benthic Macroinvertebrates*. PhD dissertation, Nanjing Agricultural University, Nanjing. (in Chinese with English abstract) [王备新 (2003) *大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究*. 博士学位论文, 南京农业大学, 南京.]
- Wu DH, Wang BX, Zhang Y, Yang LF (2011) Advances in the

- use of biotic index for water quality bioassessment with benthic macroinvertebrate and its perspective in China. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 34, 132–137. (in Chinese with English abstract) [吴东浩, 王备新, 张咏, 杨莲芳 (2011) 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景. *南京农业大学学报*, 34, 132–137.]
- Wu ZN (2013) Analysis and scientific utilization of function in the Baoying Lake wetlands. *Modern Horticulture*, (8), 107. (in Chinese) [吴兆年 (2013) 宝应湖湿地功能的分析与利用. *现代园艺*, (8), 107.]
- Xing Y, Wu XP, Ouyang S, Zhang JQ, Xu J, Yin SL, Xie ZC (2019) Assessment of macrobenthos biodiversity and potential human-induced stressors in the Ganjiang River system. *Biodiversity Science*, 27, 648–657. (in Chinese with English abstract) [邢圆, 吴小平, 欧阳珊, 张君倩, 徐靖, 银森录, 谢志才 (2019) 赣江水系大型底栖动物多样性与受胁因子初探. *生物多样性*, 27, 648–657.]
- Xiong JL, Mei XG, Hu CL (2003) Comparison of community structure and biodiversity of zoobenthos in lakes of different pollution states. *Journal of Lake Sciences*, 15(2), 66–74. (in Chinese) [熊金林, 梅兴国, 胡传林 (2003) 不同污染程度湖泊底栖动物群落结构及多样性比较. *湖泊科学*, 15(2), 66–74.]
- Yang M, Kou Q, Li XZ (2018) Advances in DNA barcoding of macrozoobenthos in coastal waters of China. *Marine Sciences*, 42, 163–173. (in Chinese with English abstract) [杨梅, 寇琦, 李新正 (2018) 中国近海大型底栖动物 DNA 条形码的研究进展. *海洋科学*, 42, 163–173.]
- Zhang X, Zhang XW, Yang JH, Zhou GD (2016) Applying DNA barcoding for identification of some invertebrate macrozoobenthos at Taihu Lake Basin. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 8(6), 18–21, 25. (in Chinese with English abstract) [张翔, 张效伟, 杨江华, 周国栋 (2016) 应用物种 DNA 条形码识别太湖流域部分底栖无脊椎动物种类. *环境监控与预警*, 8(6), 18–21, 25.]
- Zhou KY, Gui H, Sun HY, Su CR, Zhao Q, Chang Q (2005) *Jiangsu Local Chronicles, Zoography*. Phoenix Publishing House, Nanjing. (in Chinese) [周开亚, 归鸿, 孙红英, 苏翠荣, 赵强, 常青 (2005) *江苏省志·生物志·动物篇*. 凤凰出版社, 南京.]

(责任编辑: 李新正 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 宝应湖底栖大型无脊椎动物名录

Appendix 1 Species list of benthic macroinvertebrate in the Baoying Lake

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020023-1.pdf>

胡芮, 王儒晓, 杜诗雨, 李萌, 邢雨辉, 潘达, 徐海根, 孙红英 (2020) 扬州宝应湖底栖大型无脊椎动物的生物多样性及其变化. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1558–1569. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020023>

附录1 宝应湖底栖大型无脊椎动物名录

Appendix 1 Species list of benthic macroinvertebrate in the Baoying Lake

物种 Species	调查年份 Investigating year				
	2015	2016	2017	2018	2019
环节动物门 Annelida					
寡毛纲 Oligochaeta					
(1) 寡毛纲1种 <i>Oligochaeta</i> sp.	–	–	–	+	–
I. 颤蚓目 Tubificida					
1. 仙女虫科 Naididae					
(2) 指鳃尾盘虫 <i>Dero digitate</i>	–	–	–	+	–
2. 颤蚓科 Tubificidae					
(3) 多毛管水蚓 <i>Aulodrilus pluriseta</i>	–	–	+	+	–
(4) 管水蚓1种 <i>Aulodrilus</i> sp.	–	–	+	+	–
(5) 维 窠 夫 盘 丝 蚓 <i>Bothrioneurum vej dovskyanum</i>	–	–	+	+	–
(6) 苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+	+	+	+
(7) 克拉泊水丝蚓 <i>Limnodrilus claparedianus</i>	+	–	+	+	+
(8) 霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	+	–	+	+	+
(9) 巨毛水丝蚓 <i>Limnodrilus grandisetosus</i>	–	–	–	+	–
(10) 正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>	–	–	+	+	–
(11) 颤蚓亚科1种 Tubificinae sp. 1	–	–	+	+	–
(12) 坦氏泥蚓 <i>Ilyodrilus templetoni</i>	–	–	–	+	–
软体动物门 Mollusca					
腹足纲 Gastropoda					
II. 中腹足目 Mesogastropoda					
3. 田螺科 Viviparidae					
(13) 中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cathayensis</i>	–	–	+	–	+
(14) 方形环棱螺 <i>Bellamyia quadrata</i>	+	+	+	+	++
(15) 梨形环棱螺 <i>Bellamyia purificata</i>	++	++	+	+	++
(16) 铜锈环棱螺 <i>Bellamyia aeruginosa</i>	+	+	+	++	++
4. 盖螺科 Pomatiopsidae					
(17) 钉螺指名亚种 <i>Oncomelania hupensis hupensis</i>	+	–	+	+	+
5. 豆螺科 Bithyniidae					
(18) 长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	++	++	++	++	++
(19) 赤豆螺 <i>Bithynia fuchsiana</i>	++	++	++	++	++
(20) 榭豆螺 <i>Bithynia misella</i>	++	++	++	++	++
(21) 纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>	++	++	+	+	++
6. 狭口螺科 Stenothyridae					
(22) 光滑狭口螺 <i>Stenothyra glabra</i>	–	+	–	+	–
7. 肋螺科 Planorbidae					
(23) 方格短沟蜷 <i>Semisulcospira cancellata</i>	–	+	+	+	+
III. 基眼目 Basommatophora					
8. 椎实螺科 Lymnaeidae					

胡芮, 王儒晓, 杜诗雨, 李萌, 邢雨辉, 潘达, 徐海根, 孙红英 (2020) 扬州宝应湖底栖大型无脊椎动物的生物多样性及其变化. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1558–1569. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020023>

	(24)耳萝卜螺 <i>Radix auricularia</i>	+	+	+	+	+
	(25)椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	+	+	+	+	+
9.扁卷螺科 Planorbidae						
	(26)凸旋螺 <i>Gyraulus convexiusculu</i>	+	++	–	–	+
	(27)尖口圆扁螺 <i>Hippeutis cantor</i>	+	+	++	–	+
双壳纲 Bivalvia						
IV. 真瓣鳃目 Eulamellibranchia						
10.蚌科 Unionidae						
	(28) 圆顶珠蚌 <i>Unio donglasiae</i>	+	–	–	–	–
	(29) 短褶矛蚌 <i>Lanceolaria grayana</i>	+	–	+	–	–
	(30) 剑状矛蚌 <i>Lanceolaria gladiola</i>	+	–	–	–	–
	(31) 背瘤丽蚌 <i>Lamprotula leai</i>	–	–	–	–	+
	(32) 椭圆背角无齿蚌 <i>Anodonta woodiana elliptica</i>	+	–	–	–	–
	(33) 淡水无齿蚌 <i>Anodonta fluminea</i>	–	+	+	–	+
11.蜆科 Corbiculidae						
	(34) 河蜆 <i>Corbicula fluminea</i>	+	+	+	+	+
	(35) 刻纹蜆 <i>Corbicula largillierti</i>	–	+	+	–	+
节肢动物门 Arthropoda						
软甲纲 Malacostraca						
V. 十足目 Decapoda						
12. 长臂虾科 Palaemonidae						
	(36) 秀丽白虾 <i>Palaemon modestus</i>	+	–	–	–	–
	(37) 日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	+	–	–	–	–
13.螯虾科 Cabaridae						
	(38) 克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkia</i>	+	–	–	–	–
14.溪蟹科 Potamidae						
	(39) 平原华溪蟹 <i>Sinopotamon planum</i>	+	–	–	–	–
15.弓蟹科 Varunidae						
	(40) 中华绒螯蟹 <i>Eriocheir sinensis</i>	+	+	+	+	+
昆虫纲 Insecta						
VI. 双翅目 Diptera						
16.摇蚊科 Chironomidae						
	(41) 大红德永摇蚊 <i>Tokunagayusurika akamusi</i>	+	–	+	+	+
	(42) 德永雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes tokunagai</i>	+	–	–	–	–
	(43) 多巴小摇蚊 <i>Microchironomus tabarui</i>	–	–	–	+	–
	(44) 分离底栖摇蚊 <i>Benthalia dissidens</i>	+	+	+	+	+
	(45) 花翅摇蚊 <i>Chironomus kiiensis</i>	+	–	–	–	–
	(46) 黄色羽摇 <i>Chironomus flaviplumus</i>	+	–	–	–	–
	(47) 蚊型前突摇蚊 <i>Procladius culiciformis</i>	+	–	–	+	–
	(48) 线翅摇蚊 <i>Chironomus striatipennis</i>	+	–	–	–	–
	(49) 裸须摇蚊属1种 <i>Prosilocerus sp.</i>	+	–	+	+	+
	(50) <i>Chironomus incertipennis</i>	+	–	–	–	–

胡芮, 王儒晓, 杜诗雨, 李萌, 邢雨辉, 潘达, 徐海根, 孙红英 (2020) 扬州宝应湖底栖大型无脊椎动物的生物多样性及其变化. 生物多样性, 2020, 28 (12): 1558–1569. <http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020023>

	(51) 摇蚊属1种 <i>Chironomus</i> sp.	+	–	–	–	–
	(52) 摇蚊属1种 <i>Chironomus</i> sp.	+	–	–	–	–
	(53) 摇蚊属1种 <i>Chironomus</i> sp.	+	–	–	–	–
	(54) 摇蚊属1种 <i>Chironomus</i> sp.	+	–	+	–	–
	(55) 似羽摇蚊 <i>Chironomus</i> cf. <i>plumosus</i>	+	–	+	+	–
	(56) 中国长足摇蚊 <i>Tanytus chinensis</i>	+	+	+	+	+
17. 蠓科 Ceratopogonidae						
	(57) 斜蠓属1种 <i>Clinohelea</i> sp.	–	–	–	+	–
总计	57	40	20	32	34	25

粗体表示形态鉴定得到的物种; + 表示当年采到的物种; – 表示当年未采到的物种; ++ 表示 $Y > 0.02$ 的优势种。Bold-faced: Species identified by morphology; + Species collected in that year; – Species not collected in that year; ++ Dominant species, $Y > 0.02$.



•研究报告•

西藏横断山区溪流细菌beta多样性组分对气候和水体环境的响应

李明家^{1,2} 吴凯媛^{1,3} 孟凡凡^{1,2} 沈吉^{1,2}
刘勇勤^{2,4} 肖能文^{5*} 王建军^{1,2*}

1 (中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (江南大学环境与土木工程学院, 江苏无锡 214122)

4 (中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101)

5 (中国环境科学研究院, 北京 100021)

摘要: 理解沿环境或空间梯度的群落组成变化(即beta多样性)一直是生态学和保护生物学的中心问题, 且beta多样性的形成机制及其对环境的响应已成为当前生物多样性研究的热点问题。本文以西藏横断山区怒江和澜沧江两个流域入江溪流中的细菌为研究对象, 使用Baselga的beta多样性分解方法, 基于Sørensen相异性指数将细菌的beta多样性分解为周转(turnover)和嵌套(nestedness)两个组分, 探究了细菌beta多样性及其分解组分随海拔距离的分布模式, 并且衡量了环境、气候和空间因子的相对重要性。结果表明, 两个流域中细菌的群落结构显著不同。两个流域的细菌总beta多样性和周转组分随海拔距离的增加而增加, 周转组分占总beta多样性的比例较大。气候和环境因子是两个流域中细菌总beta多样性及周转过程的重要预测因子, 并且所有的显著因子均为正相关, 其中环境因子中相关性最高的为海拔距离($R^2 = 0.408, P < 0.001$), 而气候因子中相关性最高的为年均温差($R^2 = 0.417, P < 0.001$)。方差分解结果暗示嵌套组分主要受空间扩散的影响; 总beta多样性和周转组分在环境较恶劣的澜沧江主要受环境过滤的影响, 而在环境较温和的怒江主要受空间扩散和环境过滤的共同影响。此外, 较为恶劣的环境条件会增加细菌的总beta多样性和周转率, 并且会形成更强的环境筛选作用去影响细菌群落的物种组成。我们的研究表明对西藏横断山区水体细菌多样性的保护需要从整个流域入手, 而非少量的生物多样性热点地区。

关键词: beta多样性; 周转; 嵌套; 海拔梯度; 气候; 环境筛选

Beta diversity of stream bacteria in Hengduan Mountains: The effects of climatic and environmental variables

Mingjia Li^{1,2}, Kaiyuan Wu^{1,3}, Fanfan Meng^{1,2}, Ji Shen^{1,2}, Yongqin Liu^{2,4}, Nengwen Xiao^{5*}, Jianjun Wang^{1,2*}

1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122

4 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

5 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100021

Abstract: Understanding community composition variation (beta-diversity) along environmental and spatial gradients is a central interest in ecology and conservation biology. Although bacterial elevational patterns are somewhat established, their underlying processes were understudied. To better understand the patterns behind beta diversity, we investigated aquatic bacterial community composition in individual streams in Nujiang and Lancang rivers located in the Hengduan Mountains of the Tibetan Plateau. Using Baselga's approach of beta

收稿日期: 2019-12-07; 接受日期: 2020-03-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20050101)、国家自然科学基金(41871048; 91851117; 41571058)和中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDB-SSW-DQC043)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: jjwang@niglas.ac.cn; xiaonw@163.com

diversity partitioning based on the Sørensen dissimilarity index, we explored the elevational patterns of turnover and nestedness through linear models and measured the relative importance of environmental, climatic, and spatial factors on bacterial beta diversity with multiple regression on distance matrices and variation partitioning analyses. Our results showed bacterial community composition differed between the Lancang and Nujiang rivers. Total beta diversity and turnover component increased with increasing elevational distance, and total beta diversity was driven by turnover component. Climatic and environmental factors were important predictors of total beta diversity and turnover component in the two catchments, and all the significant correlations were positive. The highest correlation factors were elevation distance ($R^2 = 0.408$, $P < 0.001$) and mean annual temperature ($R^2 = 0.417$, $P < 0.001$). The variation partitioning results suggest nestedness component was heavily affected by dispersal limitation while total beta diversity and turnover were mainly affected by environmental filtering. Moreover, harsher climate conditions will increase total beta diversity and turnover, and form stronger environmental filtering processes that impact the bacterial species composition. Our research shows that the conservation of bacterial diversity in the stream of Hengduan Mountains in Tibet needs to target the whole multiple sites, rather than a few richest sites of biodiversity.

Key words: beta diversity; turnover; nestedness; elevation gradient; climate; environmental filtering

目前人类活动已严重改变了地球上的非生物和生物条件,并且导致了显著的气候变化(Butchart et al, 2010; Waters et al, 2016),气候变化是生物多样性丧失的最大威胁之一(Vitousek, 1994)。气候变化会以多种方式改变生物多样性维持的过程,其中许多过程是不可预测的(Woodward et al, 2010; Cardinale et al, 2012; Forster et al, 2012)。其影响可以遍及整个生态系统,并改变其功能(Frauendorf et al, 2019; Wiczyński et al, 2019),生物也可以通过呼吸产生的碳循环形成对气候变化的反馈。估算气候变化导致的生态系统功能改变需要对气候变化如何影响生物多样性有更深入的了解(Bardgett et al, 2008; Kuypers et al, 2018)。

一般用来表征物种多样性的指标有三个,即 alpha、beta 和 gamma 多样性(Whittaker, 1960)。目前 alpha (即特定地区或群落的物种丰富度)和 gamma 多样性(即一个区域的物种多样性)受到了广泛的关注,而对于 beta 多样性的研究相对比较薄弱。Beta 多样性表示不同群落间的物种组成变化,它通过计算群落之间的物种差异将 alpha 和 gamma 多样性联系起来,根据群落 beta 多样性格局的差异,人们可以推断出群落构建机制在不同群落中的作用,并且它在揭示跨尺度生物多样性模式的各种生态过程中起着重要作用(Socolar et al, 2016)。沿海拔梯度的 beta 多样性模式已得到了广泛的研究(吴永杰等, 2013; Teittinen et al, 2016; Vilmi et al, 2019),可是其研究对象主要为动物和植物(斯幸峰等, 2017)。相比于

动植物,目前对在许多生态过程中起重要作用的微生物(如细菌等)的研究相对较少。其中,对土壤微生物的海拔模式的研究数量虽然不断增加,但相比之下水体微生物的研究仍然是相对较少的。因此,目前对于水体微生物的多样性的海拔分布格局及其驱动因素仍然不很明确。其中一个焦点问题是溪流微生物的 beta 多样性是否存在一般的海拔分布模式? 如果存在,其主要驱动因素是什么?

目前,我们通过传统的 beta 多样性指数无法识别造成群落差异的原因是因为物种的替换还是得失。为了更好地了解群落差异的潜在模式,可以将总 beta 多样性分解为周转和嵌套两个组分,即 beta 多样性分解。根据群落间 beta 多样性来源的相关理论,2010 年 Andrés Baselga 首次系统地提出了 beta 多样性划分的一般框架:基于 Sørensen 相异性指数, beta 多样性可分解成物种周转(turnover, 即物种替换,其中一个物种替换另一物种而不改变其丰富度)和嵌套(nestedness, 即由于物种得失而导致的物种丰富度差异)两个组分(Baselga, 2010)。造成物种周转发生的机制源自环境过滤、空间和历史事件;而嵌套过程则源自物种稀疏或其他生态过程,例如人为干扰或物理屏障,导致物种贫乏地区的生物群落成为该地区物种丰富度最高群落的子集。在保护生物学中, beta 多样性中周转和嵌套组分相对比例的大小分别意味着不同的保护措施:当 beta 多样性以周转组分为主时需要同时保护多个位点,当以嵌套组分为主时可以优先保护物种多样性较高的位点

(Gutierrezcanovas et al, 2013)。因此,分析beta多样性的周转和嵌套过程有利于更好地理解海拔梯度上的群落构建机制(Wang et al, 2012; Mori et al, 2015),并使生物多样性保护战略更加有效。

细菌在许多生态过程中起重要作用,越来越多的研究表明细菌的时间和空间分布模式(即生物地理模式)与大型动植物具有一定的相似性,如距离衰减模式(Martiny et al, 2006; Hanson et al, 2012)。目前的研究已经确定海拔分布模式同样存在于细菌群落中,但对于其形成的潜在过程却了解很少。目前仍然不太明确驱动细菌生物地理模式的过程是什么,需要进一步研究。我们研究了西藏横断山区怒江和澜沧江流域的入江溪流中细菌群落的beta多样性及其分解组分。怒江和澜沧江流域的气候条件有着显著差异:澜沧江流域的气候整体表现为干燥和寒冷,而怒江流域的气候则为湿润和温暖。我们的采样地点有着明显的海拔和纬度梯度,相比于只有海拔梯度的研究,纬度梯度进一步加强了各个地点之间的气候变化。研究的目的是在上述有着显著差异的气候条件下,探究两个流域中细菌群落的beta多样性及其分解组分沿海拔梯度的分布格局及影响因素。为此,我们拟探究以下三个问题:(1)两个流域中的细菌beta多样性及其分解组分的海拔分布模式是否有差异?(2)细菌的beta多样性沿着海拔梯度的分布模式及其主要驱动因素是什么?(3)气候变化是否会影响细菌的beta多样性及其分解组分?通过分析细菌群落数据,可为气候变化和环境梯度影响生物多样性的形成提供重要见解。

1 材料与方法

1.1 样品采集

青藏高原横断山区是世界生物多样性研究热点区域之一(Myers et al, 2000),沿着横断山脉有三条相互平行的江(被联合国教科文组织列为世界遗产),分别为怒江、澜沧江和金沙江。2014年10月,我们对澜沧江和怒江流域的89条入江溪流进行了采样(图1a):37条流入澜沧江,52条流入怒江。尽管两条江在采样区域中是平行的,但是该区域具有显著的气候差异:比如,澜沧江的降水量为420–718 mm,年平均温度为11.2–17.6℃,气候较为干燥和寒冷;而怒江的降水量为632–1,021 mm,年平均温度为14.2–22.2℃,气候整体上表现为湿润和温暖。根据

Wang等(2011)的方法进行样品采集,每个采样点根据溪流的宽度分为5或10个横断面,从每个断面的浅滩随机收集20块石头,使用无菌海绵将石头表面的生物膜刮下后收集到采样瓶中,然后立即将样品在-18℃冷冻。

1.2 理化数据

理化数据根据Wang等(2011)的方法进行收集。使用GPS设备记录每个样点的经度、纬度和海拔。收集河流的宽度、深度、郁蔽度、当前流速和基质粒径等数据,还测量了水温、pH和电导率。从每个采样点采集原位水样,然后在-18℃中保存,在实验室中分析水体化学成分及金属离子含量。在下文中,这些理化因子作为环境因素。有关每个站点的气候因子的信息是从CHELSA Bioclim (www.chelsa-climate.org)收集的,在统计分析中,年平均温度、年温度范围、年降水量和降水季节变化被用作气候解释因素。

1.3 生物群落分析

对于细菌群落,我们根据Wang等(2017)的方法进行分析。使用苯酚氯仿方法从生物膜中提取基因组DNA(Zhou et al, 1996)。使用V4区的细菌通用引物515F和806R,一式3份扩增细菌16S rRNA。提取的样品DNA先用琼脂糖凝胶电泳检测,确定合格之后再通过PCR检测。PCR扩增在25 mL反应液中进行反应,反应液包含10 × AccuPrime PCR缓冲液(包括dNTP)(Invitrogen, Grand Island, NY)共计2.5 mL、0.4 mM正向和反向引物、10 ng模板DNA以及0.2 mL AccuPrime High-Fidelity Taq聚合酶。每个样品进行3次重复扩增,并在PCR扩增后混合,以最大程度地减少扩增过程的潜在误差。热循环条件如下:在94℃下变性1 min;随后进行在94℃下20 s,53℃下25 s和68℃下45s的30个循环;最后在68℃下延伸10 min,最终得到符合MiSeq测序要求的目标DNA。将要在同一MiSeq中测序的样品的PCR产物以相同的摩尔浓度合并。合并的混合物用QIAquick凝胶提取试剂盒(QIAGEN Sciences, Germantown, MD, USA)纯化,然后用PicoGreen (Eugene, OR, USA)定量。根据《MiSeq试剂盒制备指南》(Illumina, San Diego, CA, USA)制备用于测序的样品库。然后进行测序。所有16S rRNA焦磷酸测序数据使用QIIME V1.9.0 (Caporaso et al, 2010)进行分析。测序结果去除引物序列之后,使用FLASH进行序列拼接(Magoc &

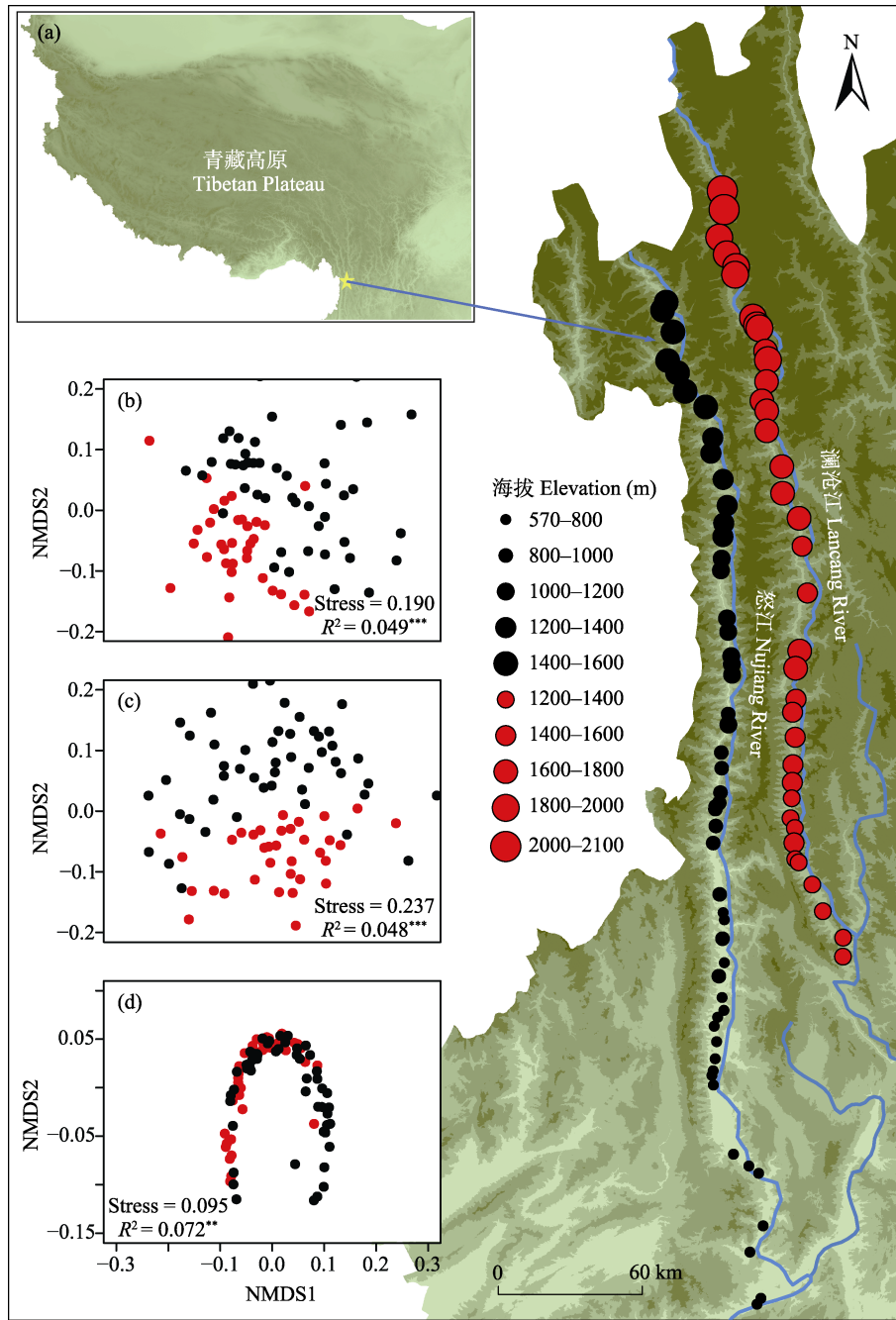


图1 本研究在澜沧江和怒江的89条入江溪流的采样点。(a)研究区位于青藏高原东南部生物多样性热点地区。总共有37条采样溪流流入澜沧江(即澜沧江流域), 52条采样溪流流入怒江(即怒江流域)。NMDS图显示了两个流域中细菌总beta多样性(b)、周转组分(c)和嵌套组分(d)的差异。红色点和黑色点分别代表澜沧江和怒江流域的采样点。* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; *** $P \leq 0.001$ 。

Fig. 1 The sample sites of this study along the 89 streams of Lancang River and the Nujiang River. (a) The study area is located in the biodiversity hotspot of south-eastern Tibetan Plateau. In total, 37 streams flow into the Lancang River, while 52 sampled streams flow into the Nujiang River. NMDS plots illustrate the differences in bacterial total beta diversity (b), turnover (c) and nestedness components (d) across the Lancang and Nujiang catchments. The red dots and black dots indicate the sample sites in Lancang and Nujiang catchment, respectively. * $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; *** $P \leq 0.001$.

Salzberg, 2011)。此外, 使用UCLUST方法进行物种操作单元(OTU)的聚类(Edgar, 2010), 并将物种操

作单元之间的相似性等于或大于97%的有效序列归为同一分类单元。使用RDP分类器(Wang et al, 2007)

去除注释为叶绿体和古细菌的OTU。为保证测序深度一致,从OTU表中随机抽取10,000条序列组成一个新的OTU表用于随后的统计分析。

1.4 数据统计分析

首先,采用Baselga (2010)的beta多样性分解方法分析细菌群落的beta多样性及其周转和嵌套两个组成部分。该方法通过物种组成矩阵计算得到3个不同的矩阵,分别为:(1)使用Sørensen相异性指数计算总beta多样性;(2)使用Simpson相异性指数计算物种周转;(3)从总beta多样性中减去物种周转,来估算物种的嵌套过程。在R语言中通过betapart软件包的beta.pair函数,使用0/1物种数据计算beta多样性指数。

其次,使用非度量多维尺度(non-metric multidimensional scaling, NMDS)分析(Minchin, 1987)和置换多元方差(PERMANOVA)分析(Anderson, 2001)来检验细菌beta多样性及其分解组分在两个流域间的差异显著性。然后,通过欧氏距离来计算海拔距离,使用线性模型和Mantel检验研究每个流域中细菌群落的beta多样性及其分解组分与海拔变化的关系。使用基于矩阵分析的多元回归(multiple regression on distance matrices, MRM)分析(Legendre et al, 1994),量化beta多样性的每个组分与环境 and 气候因素矩阵的相关性。在统计分析之前,对除pH以外的其他所有环境和气候因素进行对数转化,使其更符合正态分布。对于多种金属离子,我们使用主成分分析(principal component analysis, PCA)来降低金属离子的维度,然后使用第一和第二轴(即PC1和PC2)表示金属离子。使用Pearson相关系数评估解释因子之间的共线性,并从模型中删除具有高相关系数(Pearson $r > 0.7$)的因子。考虑了以下两组主要解释因素:环境和气候组分,计算获得每个组分的欧式距离矩阵。先进行一次MRM分析,删除不重要的因子,然后重新进行MRM分析。通过矩阵置换测试了999次偏回归的显著性。

最后,通过方差分解分析(variation partitioning analyses, VPA; Anderson & Cribble, 1998)揭示环境、气候和空间因素对细菌beta多样性及其分解组分变异的影响。对于空间因素,使用邻体矩阵主坐标(principal coordinates of neighbour matrices, PCNM)分析(Borcard & Legendre, 2002)将空间距离矩阵表示为正交特征向量集,将得到的主坐标都用作空间

因子。结合怒江和澜沧江两个流域与细菌的beta多样性及其分解组分,形成6个不同的组合:澜沧江-总beta多样性、澜沧江-周转组分、澜沧江-嵌套组分、怒江-总beta多样性、怒江-周转组分和怒江-嵌套组分,分别与对应的解释因素进行方差分解分析,结果采用 R^2_{adj} 表示。在R语言(R Core Team, 2018)中进行上述所有的统计分析,使用的软件包有vegan、ggplot 2和ecodist等。

2 结果

在这两个流域共获得了10,843个细菌OTU。首先, NMDS图显示,澜沧江和怒江流域中细菌的群落结构不同(图1b-d)。通过置换多元方差分析,发现细菌总beta多样性和周转组分在两个流域中有极显著的差异(图1b, c, $P < 0.001$),嵌套组分也有较为显著的差异(图1d, $P < 0.01$)。

对于细菌beta多样性及其分解组分,总beta多样性和周转组分均在两个流域中表现出了随海拔距离增加而增加的趋势(图2a, b)。怒江流域的细菌beta多样性大于澜沧江,总beta多样性的均值分别为0.735和0.689,而周转组分的均值分别为0.685和0.652。澜沧江流域沿海拔梯度的总beta多样性变化最快,斜率为0.14/km,而怒江流域为0.12/km;对于周转组分,澜沧江流域的斜率为0.14/km,而怒江流域为0.13/km。但嵌套组分仅在怒江流域有显著的下降趋势,斜率为-0.011/km(图2c)。

在MRM分析中,气候和环境因素是澜沧江和怒江两个流域中细菌总beta多样性及周转过程的重要预测因素(图3, $P < 0.05$)。对于两个流域的细菌总beta多样性和周转组分,所有的显著因子均为正相关,其中环境因子中相关性最高的为海拔(表1, $R^2 = 0.408$, $P < 0.001$),而气候因子中相关性最高的为年平均气温(表1, $R^2 = 0.417$, $P < 0.001$)。而且对于总beta多样性和周转组分显著的因子比较相似。但对于嵌套组分,其与气候和环境因子均表现出较低的相关性,其中澜沧江流域中无显著因子,怒江流域中虽然有显著因子,但相关性都比较小,如温度范围和降水季节变化的相关性分别为-0.150和-0.112。

最后,通过方差分解方法定量分析环境、气候以及空间因素对两个流域中细菌beta多样性变异的解释度。从图4中可以看到,这3种因子分别共同解释了澜沧江和怒江流域中细菌总beta多样性40%和

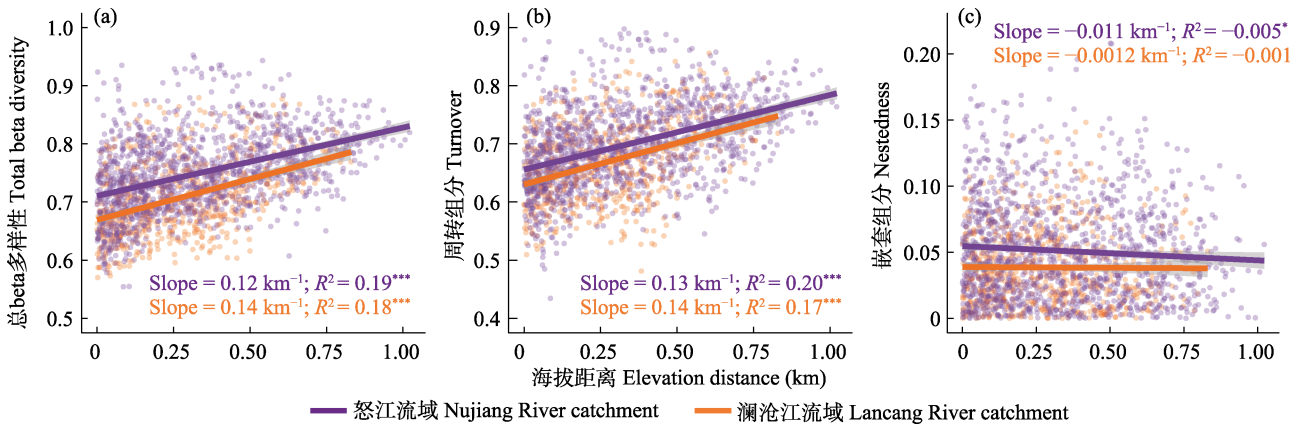


图2 澜沧江和怒江流域细菌总beta多样性(a)、周转组分(b)和嵌套组分(c)与海拔距离的关系。其显著性水平分别为: * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$ 。

Fig. 2 Plots showing the relationship between (a) bacterial total beta diversity, (b) turnover and (c) nestedness components and elevational distance in Lancang and Nujiang catchments. * $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; *** $P \leq 0.001$.

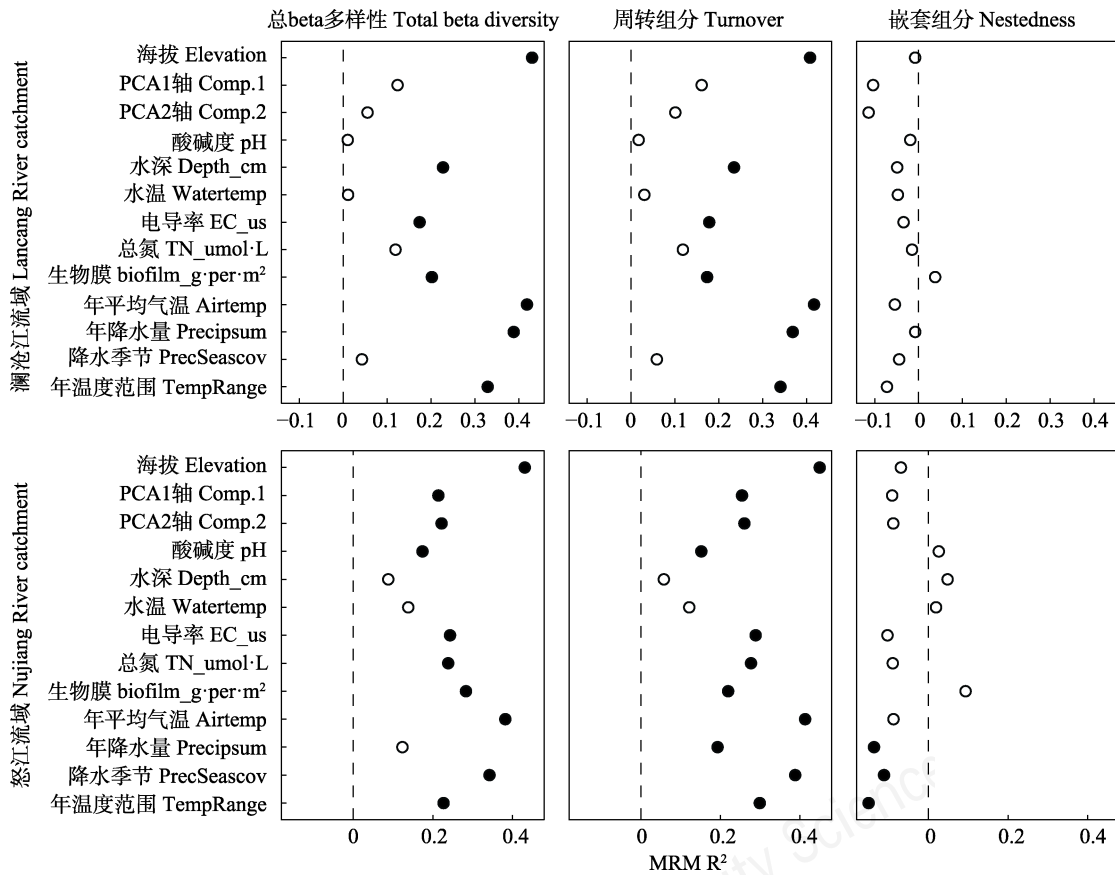


图3 环境和气候因子对澜沧江和怒江两个流域的细菌总beta多样性、周转组分和嵌套组分影响的基于矩阵分析的多元回归(MRM)分析。其中实心和空心的点分别代表显著相关($P < 0.05$)和不显著相关性($P > 0.05$)。

Fig. 3 The environmental and climate factors related to the variance in bacterial beta diversity and its components in Lancang River and Nujiang River catchments, identified by multiple regression on distance matrices (MRM). Filled shapes and empty shapes indicate significant relationship ($P < 0.05$) and non-significant relationship ($P > 0.05$), respectively. Comp.1 and Comp.2 indicate principal component analysis (PCA) was performed to reduce the dimensions of measured metal and metalloid concentrations, and the first two axes were used as proxies for these elements. Depth, Stream depth; EC_us, Electrical conductivity; TN, Total nitrogen; Airtemp, Mean annual temperature; Precipsum, Annual precipitation; PrecSeascov, Precipitation seasonality conditions; TempRange, Annual temperature range.

表1 环境和气候因子与最终模型的偏回归系数(R^2)解释的两个流域中细菌总beta多样性、周转和嵌套组分

Table 1 The variation of bacterial total beta diversity, turnover or nestedness components in Lancang and Nujiang catchments are explained by the environmental and climate factors and the partial regression coefficients (R^2) of the final model is reported.

	澜沧江流域 Lancang catchment			怒江流域 Nujiang catchment		
	总beta多样性 Total beta diversity	周转组分 Turnover	嵌套组分 Nestedness	总beta多样性 Total beta diversity	周转组分 Turnover	嵌套组分 Nestedness
环境因子 Local factors						
海拔 Elevation	0.43***	0.41***		0.43***	0.45***	
PCA1轴 Comp.1				0.21*	0.25*	
PCA2轴 Comp.2				0.22*	0.26*	
酸碱度 pH				0.17*	0.15*	
水深 Stream depth	0.23**	0.23***				
水温 Water temperature						
电导率 Electrical conductivity	0.17*	0.18*		0.24**	0.29***	
总氮 Total nitrogen				0.24**	0.28***	
生物膜 Biofilm	0.20*	0.17*		0.28**	0.22**	
气候因子 Climate factors						
年平均气温 Mean annual temperature	0.42***	0.42***		0.38***	0.41***	
年降水量 Annual precipitation	0.39***	0.37***			0.19*	-0.14*
降水季节 Precipitation seasonality conditions				0.34***	0.39***	-0.11*
年温度范围 Annual temperature range	0.33*	0.34**		0.23**	0.3**	-0.15**

* $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$ and *** $P \leq 0.001$. Comp.1和Comp.2: 对金属离子进行主成分分析之后, 提取前两个轴代表这些离子。Comp.1 and Comp.2, Principal component analysis (PCA) was performed to reduce the dimensions of measured metal and metalloid concentrations, the first two axes were used as proxies for these elements.

36%的变化, 对周转组分共解释了45%和38%, 对嵌套过程共解释了33%和33%。这一结果暗示着可能还有其他重要因素影响着横断山脉细菌beta多样性格局。对于澜沧江流域, 细菌的总beta多样性和周转组分主要被环境因子解释, 解释度分别为11%和13%。环境、气候以及空间3种因素的共同解释度也比较大, 分别为10%和12%。嵌套组分主要受到空间因子的影响, 解释度为18%。对于怒江流域, 细菌的总beta多样性和周转组分同样主要受到环境因子的影响以及3种因子的共同影响, 其中, 3种因子共同解释了其变化的16%和19%。嵌套过程同样主要受到空间因子的影响(20%)。

3 讨论

beta多样性可表征不同地理区域之间的物种组成变化, 是研究群落结构以及物种组成与环境因子间关系的重要指标(Qian et al, 2004)。周转和嵌套过程是驱动生物群落beta多样性的两个主要机制, 单独分析组成beta多样性的这两个过程, 有助于我们更好地理解海拔梯度上的群落构建机制。我们基于Baselga (2010)的多样性分解方法, 探索了细菌沿海

拔梯度的beta多样性形成的驱动机制。结果表明, 细菌的beta多样性随海拔梯度的变化模式符合经典的海拔距离衰减模式, 其中周转组分占总beta多样性的比例比较大。周转组分主要受到环境过滤和空间扩散的影响, 而嵌套组分主要受到扩散限制的影响。此外, 我们发现, 恶劣环境会增加细菌的beta多样性和周转率, 并且会导致更强的环境筛选去影响细菌群落的物种组成。

3.1 两个流域中细菌群落beta多样性分解组分的海拔分布模式

研究发现, 随着海拔距离的增加, 细菌beta多样性分解组分的差异增大(图2)。我们计算的细菌beta多样性分解组分随海拔的变化模式与典型的海拔距离衰减模式相同。出现这种模式可能是因为特定的细菌群落会出现在适宜生存的海拔高度以及栖息地中, 导致其在整个海拔梯度上分布不均匀。同时, 由于我们的采样地点为入江溪流, 水体相对比较独立, 物种的扩散具有很强的限制性, 距离衰减关系会更强(Barberan & Casamayor, 2010)。目前已经有类似的海拔梯度分布模式在一些物种中被研究(Swenson et al, 2010; Wang et al, 2012; Bishop

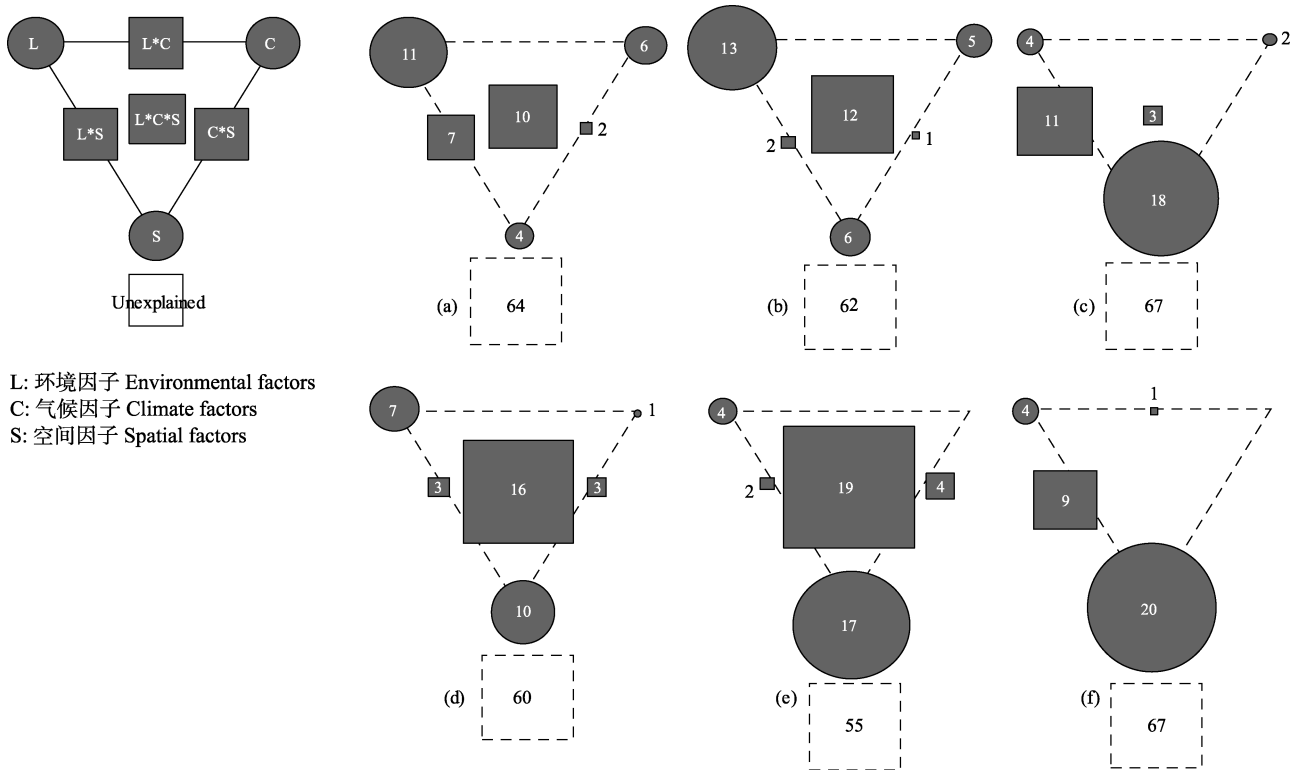


图4 当地环境因子(L)、气候因子(C)和空间因子(S)对两个流域细菌beta多样性、周转组分和嵌套组分的解释比例(小于0的值未显示)。左上方的面板是一般示意图。每类因子的单独解释由三角形的三个角表示。三角形的边和中心分别表示由两个或三个因素共同解释的变异百分比。(a)、(b)、(c)分别为澜沧江流域的细菌总beta多样性、周转组分和嵌套组分;(d)、(e)、(f)分别为怒江流域的细菌总beta多样性、周转组分和嵌套组分。

Fig. 4 The relative importance of environmental (L), climate (C) and spatial (S) factors in explaining the variance in bacterial beta diversity and its components in Nujiang River and Lancang River catchments. The top-left panel is the general outline. The pure variation explained by each factor is represented by the edges of the triangle. The sides and middle of the triangles indicate the percentages of variation explained by interactions of two or all factors, respectively. (a) Total beta diversity, (b) Turnover component and (c) Nestedness component in Lancang catchment. (d) Total beta diversity, (e) Turnover component and (f) Nestedness component in Nujiang catchment.

et al, 2015)。与Bishop等(2015)提出的结果相似, 我们发现周转组分占总beta多样性的成分比较大。在特定的海拔高度下, 细菌群落会通过演替出新的细菌来应对环境选择。细菌对于环境的适应性分布是造成细菌总beta多样性和周转过程沿海拔梯度出现显著海拔距离衰减模式的重要原因。我们发现的物种周转过程为细菌总beta多样性形成的主要驱动力, 凸显了将整个山区作为生物多样性库的重要性, 生物保护要针对整个海拔梯度内的物种。对于嵌套组分, 我们没有观察到显著的海拔距离衰减模式($P > 0.01$)。如果观察到嵌套组分占总beta多样性的成分比较大, 那么生物保护只需要针对物种丰富度最高的海拔高度即可(Socolar et al, 2016)。

我们还发现, 细菌在相对恶劣的环境中具有更高的beta多样性以及周转组分。通常认为海拔对于

细菌群落beta多样性分布的影响为间接影响, 即通过对气候和环境等因素的作用对群落产生影响。随着海拔的升高, 气温会逐渐下降。与低海拔相比, 高海拔地区的环境相对比较恶劣, 从图2可以发现, 在澜沧江和怒江流域, 细菌总beta多样性随着海拔距离的增加而增加。此外, 相对于气候温暖湿润的怒江流域, 比较干燥寒冷的澜沧江流域中细菌beta多样性更高, 其均值为0.735, 随海拔距离变化的斜率也更大, 为0.14/km ($> 0.12/\text{km}$)。对于周转组分, 也表现出同样的规律, 澜沧江流域细菌周转组分随海拔变化的斜率为0.14/km ($> 0.13/\text{km}$)。在距离衰减模型中, 更高的斜率代表着群落的物种组成是更强烈环境选择的结果(Hanson et al, 2012)。这表明, 尽管距离衰减是一个普遍现象, 但其强度可能因气候而异。

3.2 两个流域中细菌群落beta多样性分解组分与解释因子的关系

我们使用MRM探究了各种因子对beta多样性及其周转和嵌套组分的影响。结果表明,海拔与细菌总beta多样性和周转组分具有最高的相关性(表2, $R^2 = 0.408$, $P < 0.001$)。表明海拔是影响细菌群落物种组成的主要因素。此外,其他环境因子和气候因子对于细菌beta多样性和其周转过程也有较强的相关性。环境因子中,总氮、金属离子含量,水深,pH等对beta多样性有较强的作用,这一结果表明溪流生态系统受环境因子的调控(Heino et al, 2014)。我们的发现与之前的研究结果相似,例如在水体化学因子中,pH值对细菌的影响最大,而栖息地因素的重要性则较小(Lear et al, 2009);营养盐(例如总氮)会限制细菌的生物量,因此总氮与细菌多样性多呈显著的相关性(Carr et al, 2005)。气候因子中,大部分因子都与细菌beta多样性和其周转过程有较强的相关性。但是从图2我们可以看出,不同的气候条件下,细菌的beta多样性随海拔梯度的变化模式并没有发生改变。我们认为气候变化会影响到当地细菌的物种组成,但并不能影响细菌在两个流域中的空间分布格局。这也表明细菌对于气候变化的适应能力比较强,所以气候发生变化时,细菌可以很好地适应环境(Wang et al, 2012)。

通过方差分解分析,我们发现环境、气候和空间因素对细菌beta多样性及其分解组分有较强的影响。其中环境和气候因子主要影响细菌的总beta多样性以及周转组分,并且在每个流域中,影响的比例大致相同。对于澜沧江和怒江流域来说,总beta多样性可以被环境和气候因子单独解释的总和分别为17%以及8%,周转组分可以被解释18%和4%,这说明在适当的条件下,群落的物种组成会被环境因素过滤,当地环境和气候因子在决定物种多样性和群落组成方面起着重要作用。空间因子对于细菌的总beta多样性以及周转组分也有影响,例如总beta多样性在两个流域可以被空间因子解释4%和10%,这表明beta多样性的海拔梯度分布除了受环境过滤的影响,还受到扩散限制等过程的影响。之前的研究结果也发现,在全球范围内栖息地异质性导致海洋细菌的beta多样性不同(Alahuhta et al, 2017);空间和环境因素都极大地影响了底栖细菌的组成和生物多样性(Sun et al, 2011)。对于嵌套组

分,我们发现主要受到空间因子的影响,空间因子可以单独解释怒江和澜沧江流域嵌套组分的18%和20%,目前大多数研究都是用空间因子代表扩散能力,所以我们认为嵌套模式主要受到扩散限制的影响,并且当物种间空间隔离足够大的时候,嵌套组分在形成beta多样性的过程中会起主导作用。

我们还发现,在不同气候条件的两个流域中,环境与气候因素的影响有所不同(图4),对于温暖湿润的怒江流域与干燥寒冷的澜沧江流域来说,环境因子的影响从7%增加到11%;气候因子的影响从1%增加到5%,空间因子的影响从10%减少到4%。由此可见,对于更恶劣的环境,环境和气候因子对于细菌的beta多样性的影响更大。由此我们推断,相比于较好的环境,恶劣环境中细菌群落的物种组成受环境筛选的影响更强。与我们的研究结果相似,Chase (2007)发现相对恶劣的条件可能会成为更强大的环境过滤器,而在更适宜的条件下,可能有更多的随机事件发生而影响群落的物种组成。

综上所述,澜沧江和怒江流域中细菌群落结构显著不同。随着海拔的增加,细菌的总beta多样性和周转组分也随之增加,周转组分占总beta多样性的成分比较大。细菌的高周转率可能意味着生物多样性保护必须针对多个地点。细菌的总beta多样性和周转过程主要受到环境过滤的影响,但嵌套过程主要受到扩散限制的影响。总体而言,恶劣环境会增加细菌的beta多样性和周转率,并且会导致更强的环境筛选去影响细菌群落的物种组成。到目前为止,对溪流中微生物beta多样性分解的研究较少,我们的研究为气候变化下细菌群落的生物地理分布格局以及群落组成提供了新的见解,并且具体地揭示了在更广泛的环境梯度中细菌的beta多样性受何种生态过程的驱动,进一步证明了beta多样性分解的方法在研究生物多样性分布以及形成过程中的重要性。

参考文献

- Alahuhta J, Kosten S, Akasaka M, Auderset D, Azzella MM, Bolpagni R, Bove CP, Chambers PA, Chappuis E, Clayton JS (2017) Global variation in the beta diversity of lake macrophytes is driven by environmental heterogeneity rather than latitude. *Journal of Biogeography*, 44, 1758–1769.
- Anderson MJ (2001) A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26, 32–46.
- Anderson MJ, Cribble NA (1998) Partitioning the variation

- among spatial, temporal and environmental components in a multivariate data set. *Austral Ecology*, 23, 158–167.
- Barberan A, Casamayor EO (2010) Global phylogenetic community structure and β -diversity patterns in surface bacterioplankton metacommunities. *Aquatic Microbial Ecology*, 59, 1–10.
- Bardgett RD, Freeman C, Ostle NJ (2008) Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME Journal*, 2, 805–814.
- Baselga A (2010) Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 134–143.
- Bishop TR, Robertson MP, van Rensburg BJ, Parr CL (2015) Contrasting species and functional beta diversity in montane ant assemblages. *Journal of Biogeography*, 42, 1776–1786.
- Borcard D, Legendre P (2002) All-scale spatial analysis of ecological data by means of principal coordinates of neighbour matrices. *Ecological Modelling*, 153, 51–68.
- Butchart SHM, Walpole M, Collen B, Van SA, Scharlemann JPW, Almond REA, Baillie JEM, Bomhard B, Brown C, Bruno J (2010) Global biodiversity: Indicators of recent declines. *Science*, 328, 1164–1168.
- Caporaso JG, Kuczynski J, Stombaugh J, Bittinger K, Bushman FD, Costello EK, Fierer N, Pena AG, Goodrich JK, Gordon JI (2010) QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nature Methods*, 7, 335–336.
- Cardinale BJ, Duffy JE, Gonzalez A, Hooper DU, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace GM, Tilman D, Wardle DA (2012) Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486, 59–67.
- Carr GM, Morin A, Chambers PA (2005) Bacteria and algae in stream periphyton along a nutrient gradient. *Freshwater Biology*, 50, 1337–1350.
- Chase JM (2007) Drought mediates the importance of stochastic community assembly. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 17430–17434.
- Edgar RC (2010) Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST. *Bioinformatics*, 26, 2460–2461.
- Forster J, Hirst AG, Atkinson D (2012) Warming-induced reductions in body size are greater in aquatic than terrestrial species. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 109, 19310–19314.
- Fraundorf TC, Mackenzie RA, Tingley RW, Frazier AG, Riney MH, Elsabaawi RW (2019) Evaluating ecosystem effects of climate change on tropical island streams using high spatial and temporal resolution sampling regimes. *Global Change Biology*, 25, 1344–1357.
- Gutierrezcanovas C, Millan A, Velasco J, Vaughan IP, Ormerod SJ (2013) Contrasting effects of natural and anthropogenic stressors on beta diversity in river organisms. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 796–805.
- Hanson CA, Fuhrman JA, Hornerdevine MC, Martiny Jennifer BH (2012) Beyond biogeographic patterns: Processes shaping the microbial landscape. *Nature Reviews Microbiology*, 10, 497–506.
- Heino J, Tolkkinen M, Pirttila AM, Aisala H, Mykra H (2014) Microbial diversity and community–environment relationships in boreal streams. *Journal of Biogeography*, 41, 2234–2244.
- Kuypers MMM, Marchant HK, Kartal B (2018) The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, 16, 263–276.
- Lear G, Niyogi DK, Harding JS, Dong Y, Lewis G (2009) Biofilm bacterial community structure in streams affected by acid mine drainage. *Applied and Environmental Microbiology*, 75, 3455–3460.
- Legendre P, Lapointe F, Casgrain P (1994) Modeling brain evolution from behavior: A permutational regression approach. *Evolution*, 48, 1487–1499.
- Magoc T, Salzberg SL (2011) FLASH: Fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies. *Bioinformatics*, 27, 2957–2963.
- Martiny JBH, Bohannan BJM, Brown JH, Colwell RK, Fuhrman JA, Green JL, Horner-Devine MC, Kane M, Krumins JA, Kuske CR, Morin PJ, Naeem S, Ovreas L, Reysenbach AL, Smith VH, Staley JT (2006) Microbial biogeography: Putting microorganisms on the map. *Nature Reviews Microbiology*, 4, 102–112.
- Minchin PR (1987) An evaluation of the relative robustness of techniques for ecological ordination. *Plant Ecology*, 69, 89–107.
- Mori A, Shiono T, Haraguchi TF, Ota AT, Koide D, Ohgue T, Kitagawa R, Maeshiro R, Aung TT, Nakamori T (2015) Functional redundancy of multiple forest taxa along an elevational gradient: Predicting the consequences of non-random species loss. *Journal of Biogeography*, 42, 1383–1396.
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Fonseca GABD, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858.
- Qian H, Ricklefs RE, White PS (2004) Beta diversity of angiosperms in temperate floras of eastern Asia and eastern North America. *Ecology Letters*, 8, 15–22.
- R Core Team (2018) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Si XF, Zhao YH, Chen CW, Ren P, Zeng D, Wu LB, Ding P (2017) Beta-diversity partitioning: Methods, applications and perspectives. *Biodiversity Science*, 25, 464–480. (in Chinese with English abstract) [斯幸峰, 赵郁豪, 陈传武, 任鹏, 曾嶝, 吴玲兵, 丁平 (2017) Beta多样性分解: 方法, 应用与展望. *生物多样性*, 25, 464–480.]
- Socolar JB, Gilroy JJ, Kunin WE, Edwards DP (2016) How should beta-diversity inform biodiversity conservation? *Trends in Ecology & Evolution*, 31, 67–80.
- Sun FL, Wang YS, Wu ML, Wang Y, Li QP (2011) Spatial heterogeneity of bacterial community structure in the

- sediments of the Pearl River estuary. *Biologia*, 66, 574–584.
- Swenson NG, Anglada-Cordero P, Barone JA (2010) Deterministic tropical tree community turnover: Evidence from patterns of functional beta diversity along an elevational gradient. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278, 877–884.
- Teittinen A, Kallajoki L, Meier S, Stigzelius T, Soininen J (2016) The roles of elevation and local environmental factors as drivers of diatom diversity in subarctic streams. *Freshwater Biology*, 61, 1509–1521.
- Vilmi A, Zhao WQ, Picazo F, Li MJ, Heino J, Soininen J, Wang JJ (2019) Ecological processes underlying the community assembly of aquatic microscopic and macroscopic organisms under contrasting climates in the Tibetan Plateau biodiversity hotspot. *Science of the Total Environment*, 134974.
- Vitousek PM (1994) Beyond global warming: Ecology and global change. *Ecology*, 75, 1861–1876.
- Wang JJ, Meier S, Soininen J, Casamayor EO, Pan FY, Tang XM, Yang XD, Zhang YL, Wu QL, Zhou JZ (2017) Regional and global elevational patterns of microbial species richness and evenness. *Ecography*, 40, 393–402.
- Wang JJ, Soininen J, Zhang Y, Wang BX, Yang XD, Shen J (2011) Contrasting patterns in elevational diversity between microorganisms and macroorganisms. *Journal of Biogeography*, 38, 595–603.
- Wang JJ, Soininen J, Zhang Y, Wang BX, Yang XD, Shen J (2012) Patterns of elevational beta diversity in micro- and macroorganisms. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 743–750.
- Wang Q, Garrity GM, Tiedje JM, Cole JR (2007) Naïve Bayesian classifier for rapid assignment of rRNA sequences into the new bacterial taxonomy. *Applied and Environmental Microbiology*, 73, 5261–5267.
- Waters CN, Zalasiewicz J, Summerhayes C, Barnosky AD, Poirier C, Gałuszka A, Cearreta A, Edgeworth M, Ellis EC, Ellis M (2016) The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351, 137–147.
- Whittaker RH (1960) Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, 30, 279–338.
- Wieczynski DJ, Boyle B, Buzzard V, Duran SM, Henderson AN, Hulshof CM, Kerkhoff AJ, Mccarthy MC, Michaletz ST, Swenson NG (2019) Climate shapes and shifts functional biodiversity in forests worldwide. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 116, 587–592.
- Woodward G, Perkins DM, Brown LE (2010) Climate change and freshwater ecosystems: Impacts across multiple levels of organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365, 2093–2106.
- Wu YJ, Lei FM (2013) Species richness patterns and mechanisms along the elevational gradients. *Chinese Journal of Zoology*, 48, 797–807. (in Chinese with English abstract) [吴永杰, 雷富民 (2013) 物种丰富度垂直分布格局及影响机制. *动物学杂志*, 48, 797–807.]
- Zhou JZ, Bruns MA, Tiedje JM (1996) DNA recovery from soils of diverse composition. *Applied and Environmental Microbiology*, 62, 316–322.

(责任编辑: 高程 责任编辑: 时意专)