



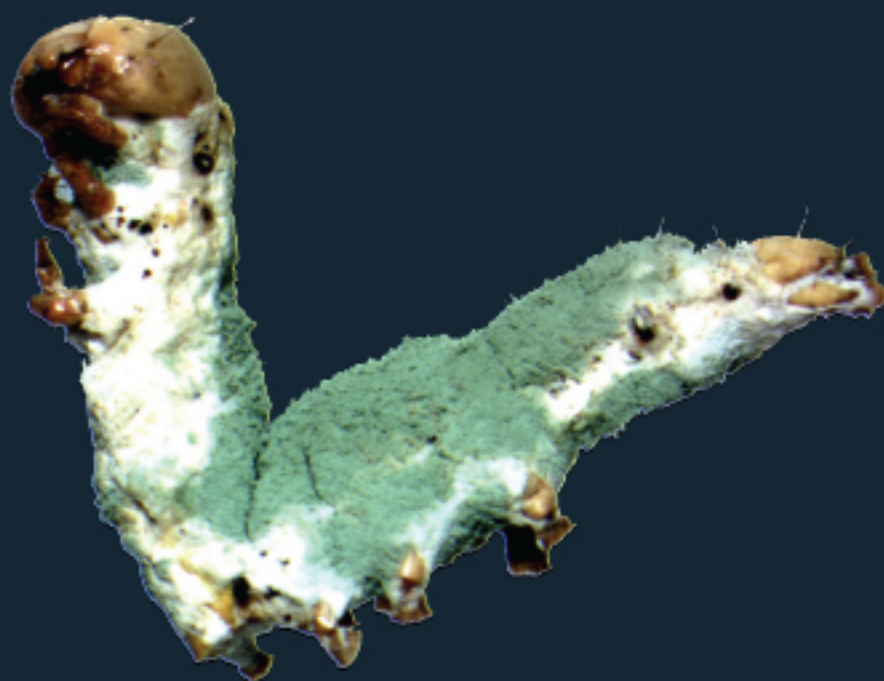
ISSN 1005-0094
CODEN SHDUEM

BIODIVERSITY SCIENCE

生物多样性

第26卷 第12期
2018年12月

Vol.26 No.12
December 2018



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26卷 第12期 2018年12月

目次

- 1255 中国森林生物多样性监测网络(CForBio)的研究态势与热点: 基于文献计量分析
付瑞玉 苏宏新 张忠华 胡刚

研究报告

植物多样性

- 1268 基于 SOM 的野生秤锤树群落的空间分布和环境解释
杨国栋 季芯悦 陈林 钟育谦 翟飞飞 伊贤贵 王贤荣
- 1277 岩溶洞穴苔藓群落特征及其对重金属污染的指示意义: 以贵州织金洞为例
刘润 张朝晖 申家琛 王智慧

动物多样性

- 1289 西江中下游鳊的遗传多样性与种群动态历史
杨计平 李策 陈蔚涛 李跃飞 李新辉
- 1296 施氮水平影响蚯蚓介导的番茄生长及抗虫性
张宇 肖正高 蒋林惠 钱蕾 陈小云 陈法军 胡锋 刘满强

微生物多样性

- 1308 中国西南高黎贡山绿僵菌物种多样性及其垂直分布特征
陈自宏 杨晓娜 孙宁静 徐玲 郑元 杨宇明
- 1318 用传统分离培养法和高通量测序技术分析印度块菌子囊果内细菌的群落结构
邓晓娟 刘建利 闫兴富 刘培贵

生物编目

红外相机观测专栏

- 1325 四姑娘山国家级自然保护区鸟兽多样性初步调查
胡茜茜 郑维超 李佳琦 李晟 杨晗 陈星 官天培
- 1332 福建省戴云山野生哺乳动物和鸟类红外相机监测
林开淼 徐建国 李文周 黄雅琼 陈斌 郭进辉
- 1338 利用红外相机技术对安徽省鹞落坪国家级自然保护区大中型兽类及林下鸟类的调查
周磊 万雅琼 洪欣 张恒 钱立富 王陈成 孔政 赵凯 李佳琦 张保卫
- 1343 运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性
李斌强 李鹏映 杨家伟 字红军 李兴权 段锡焕 罗旭
- 1348 蔷薇科 *Docynia* 之中文名宜为“多依属”
刘华杰 马金双 刘凤 刘冰

保护论坛

- 1350 中国生物多样性相关传统知识调查与评估指标体系构建
刘冬梅 薛达元 蔡蕾 李俊生 肖能文
- 1358 “2020年后全球生物多样性框架”的谈判进展以及对我国的建议
刘文静 徐靖 耿宜佳 田瑜 银森录

封面: 绿僵菌属(*Metarhizium*)真菌是重要的农林害虫生防资源, 中国西南高黎贡山绿僵菌资源丰富。陈自宏与课题组成员在高黎贡山 7 种典型植被类型土壤中分离绿僵菌菌株, 并通过多基因(*nrSSU*、*nrLSU*、*EF-1 α* 、*RPB1* 和 *RPB2*)系统发育分析进行物种鉴定, 分析了该地区绿僵菌属真菌的物种多样性及其垂直分布特征。图示 *Metarhizium rileyi* 感染鳞翅目幼虫。(摄影者: 陈自宏)

BIODIVERSITY SCIENCE

Vol. 26 No. 12 December 2018

CONTENTS

- 1255 **Research trends and hotspots of Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network (CForBio): A bibliometric analysis**
Ruiyu Fu, Hongxin Su, Zhonghua Zhang and Gang Hu

Original Papers

Plant Diversity

- 1268 **Spatial distribution and environmental interpretation of wild *Sinojackia xylocarpa* communities based on self-organizing map (SOM)**
Guodong Yang, Xinyue Ji, Lin Chen, Yuqian Zhong, Feifei Zhai, Xiangui Yi and Xianrong Wang
- 1277 **Community characteristics of bryophyte in Karst caves and its effect on heavy metal pollution: A case study of Zhijin Cave, Guizhou Province**
Run Liu, Zhaohui Zhang, Jiachen Shen and Zhihui Wang

Animal Diversity

- 1289 **Genetic diversity and population demographic history of *Ochetobius elongatus* in the middle and lower reaches of the Xijiang River**
Jiping Yang, Ce Li, Weitao Chen, Yuefei Li and Xinhui Li
- 1296 **Nitrogen levels modify earthworm-mediated tomato growth and resistance to pests**
Yu Zhang, Zhenggao Xiao, Linhui Jiang, Lei Qian, Xiaoyun Chen, Fajun Chen, Feng Hu and Manqiang Liu

Microbial Diversity

- 1308 **Species diversity and vertical distribution characteristics of *Metarhizium* in Gaoligong Mountains, southwestern China**
Zihong Chen, Xiaona Yang, Ningjing Sun, Ling Xu, Yuan Zheng, Yuming Yang
- 1318 **Community composition of bacteria associated with ascocarps of *Tuber indicum* using traditional culture method and Roche 454 high-throughput sequencing**
Xiaojuan Deng, Jianli Liu, Xingfu Yan and Peigui Liu

Bioinventory

Special Feature: Camera-trapping Survey

- 1325 **Preliminary survey on mammal and bird diversity at Siguniang Mountains National Nature Reserve, Sichuan, China**
Xixi Hu, Weichao Zheng, Jiaqi Li, Sheng Li, Han Yang, Xing Chen and Tianpei Guan
- 1332 **Camera-trapping survey of wild mammals and birds in Daiyunshan, Fujian Province**
Kaimiao Lin, Jianguo Xu, Wenzhou Li, Yaqiong Huang, Bin Chen and Jinhui Guo
- 1338 **Camera-trapping surveys of the large and medium-sized mammal and understory bird diversity in Yaoluoping National Nature Reserve, Anhui Province**
Lei Zhou, Yaqiong Wan, Xin Hong, Heng Zhang, Lifu Qian, Chencheng Wang, Zheng Kong, Kai Zhao, Jiaqi Li and Baowei Zhang
- 1343 **Wildlife monitoring in Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve using infrared cameras, Yunnan Province**
Binqiang Li, Pengying Li, Jiawei Yang, Hongjun Zi, Xingquan Li, Xihuan Duan and Xu Luo
- 1348 **On the Chinese name for genus *Docynia* (Rosaceae)**
Huajie Liu, Jinshuang Ma, Su Liu and Bing Liu

Forum

- 1350 **Establishing a national indicator system in China for the assessment of traditional knowledge associated with biodiversity**
Dongmei Liu, Dayuan Xue, Lei Cai, Junsheng Li and Nengwen Xiao
- 1358 **Progress in negotiations on the Post-2020 Global Biodiversity Framework and suggestions for Chinese government**
Wenjing Liu, Jing Xu, Yijia Geng, Yu Tian and Senlu Yin

Cover Illustration: *Metarhizium* fungi are important fungi resources in biocontrol of the insect in agriculture and forestry and they are abundant in Gaoligong Mountains, southwestern China. To explore the species diversity and vertical distribution characteristics of *Metarhizium* in Gaoligong Mountains, Chen et al isolated *Metarhizium* strains from the soil samples from seven typical vegetation types and identified them based on multi-gene (*nrSSU*, *nrLSU*, *EF-1 α* , *RPB1*, and *RPB2*) phylogenetic analysis. The picture shows that *Metarhizium rileyi* infects a larva of Lepidoptera. (Photographed by Zihong Chen)



中国森林生物多样性监测网络(CForBio)的研究态势与热点: 基于文献计量分析

付瑞玉^{1,2,3} 苏宏新¹ 张忠华^{1,2} 胡刚^{1,2*}

1 (南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001)

2 (南宁师范大学广西西江流域生态环境与一体化发展协同创新中心, 南宁 530001)

3 (南宁师范大学地理科学与规划学院, 南宁 530001)

摘要: 中国森林生物多样性监测网络(CForBio)作为我国生物多样性科学综合研究平台, 其发展过程和研究成果对促进我国生物多样性研究具有重要意义, 掌握其研究态势与热点变化可为CForBio的长远发展以及其他生态监测研究提供参考。本文对2007–2017年间CNKI数据库和Web of Science核心合集数据库中CForBio发表的论文进行了较为全面的文献计量分析。结果表明: 2007年以来, CForBio发表论文的数量整体上呈快速上升趋势, 从2007年的3篇增长到2017年的55篇, 其中SCI收录论文的增长较为明显(从2007年的1篇增长到2017年的34篇)。金光泽(70篇)、马克平(68篇)、郝占庆(68篇)等学者发表论文数量较多, 中国科学院的植物研究所(104篇)、沈阳应用生态研究所(67篇)、华南植物园(59篇)等是CForBio中相对活跃的研究机构, 但各样地负责机构和学者间的合作仍较少, 跨机构间的协同研究还有待提高。CForBio的研究热点主要体现在树木空间分布格局、植物功能性状、树木密度制约、群落系统发育等方面, 为揭示我国不同气候带森林群落构建机制提供了大量的理论依据。未来CForBio的研究应加强国内外机构间的合作创新并建立数据共享途径, 注重近地面遥感、多源数据融合等新技术的应用, 在生物多样性格局的多尺度与多维度解析、植物–土壤反馈机制、树木冠层和根系的结构与功能等方向持续开展深入研究。

关键词: 中国森林生物多样性监测网络; 研究态势; 文献计量分析; Web of Science; 中国知网

Research trends and hotspots of Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network (CForBio): A bibliometric analysis

Ruiyu Fu^{1,2,3}, Hongxin Su¹, Zhonghua Zhang^{1,2}, Gang Hu^{1,2*}

1 Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization of Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 530001

2 The Collaborative Innovation Center of the Ecological Environment and Integration Development in the Xijiang River Basin, Nanning Normal University, Nanning 530001

3 School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530001

Abstract: The research achievements of the Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network (CForBio), a comprehensive research platform for biodiversity science, are highly influential for promoting biodiversity-related research in China. A detailed assessment of CForBio's publication growth, core research areas, and ability to foster cooperation will provide important information for the long-term development of CForBio and related ecological monitoring research. In order to understand CForBio's impact on science, this study made a comprehensive bibliometric analysis of research papers produced by CForBio-associated scientists, published between 2007 and 2017, using the China National Knowledge Infrastructure and Web of Science databases. Since 2007, the number of papers published by CForBio has grown rapidly, from 3 in 2007 to 55 in 2017, as has the number of papers published in journals included in the Science Citation Index (from 1 in 2007 to 34 in 2017). The top three most prolific authors are Guangze Jin (70 papers), Keping Ma

收稿日期: 2018-10-05; 接受日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(31560132, 31760128)、广西科技重大专项(桂科AA17204087-9)和广西自然科学基金(2015GXNSFAA139086, 2017GXNSFDA198003)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: ahhugang@126.com

(68 papers), and Zhanqing Hao (68 papers). The most active research institutions are the Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (CAS) (104 papers), the Institute of Applied Ecology of CAS (67 papers), and the South China Botanical Garden of CAS (59 papers). CForBio-associated institutions and scholars cooperate infrequently, and cross-unit collaborative research needs improvement. The core research topics of CForBio focus on patterns of tree spatial distribution, plant functional traits, tree density dependence, and community phylogeny; these topics provide a theoretical basis for elucidating the mechanisms of forest community assembly among the different climatic zones in China. In the future, CForBio should strengthen cooperation among institutions—both domestic and abroad, establish data sharing pathways, further emphasize new technologies and techniques such as near-surface remote sensing and multi-source data fusion, and continue to fund research on the multi-scale and multi-dimensional analysis of biodiversity patterns, plant-soil feedback mechanisms, and tree canopy and root structure function.

Key words: Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network (CForBio); research trends; bibliometric analysis; Web of Science; China National Knowledge Infrastructure (CNKI)

生物多样性及其保护一直是学者、政府和公众高度关注的热点话题。全球生物多样性监测网络的建设为生物多样性研究提供了一个重要的平台,其中最具有代表性的监测网络平台为全球森林观测网络(Forest Global Earth Observatory, ForestGEO),该网络拥有分布于美洲、非洲、亚洲、欧洲和大洋洲等地区的60多个森林样地,监测近13,000种约600万株个体的生长与存活,在物种空间分布格局及其影响因素、功能性状、密度制约等方面已取得大量研究成果(Valencia et al, 2004; Santiago & Wright, 2007; Chen et al, 2010; Yang et al, 2018)。

中国既是生物多样性极为丰富的少数国家之一,也是唯一一个具有完整气候带谱(从北部的寒温带到南部的热带)的国家,在其主要气候带内建立森林动态监测样地并进行生物多样性研究是十分必要的,这也是对全球森林生物多样性监测网络的补充和完善(马克平, 2008)。2004年,中国科学院生物多样性委员会启动建设中国森林生物多样性监测网络(Chinese Forest Biodiversity Monitoring Network, CForBio)。截至2017年年底, CForBio已建成18个大型森林动态监测样地, 50多个1 ha以上的辅助样地,样地建设基本涵盖我国多个纬度梯度的森林类型,包括北方林、针阔混交林、落叶阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林以及热带雨林等(马克平, 2017)。CForBio自建立以来,基于大型固定样地在物种组成与群落结构(郝占庆等, 2008; Wang et al, 2010, 2016; Guo et al, 2017)、系统发育和功能性状(Wang et al, 2013; 房帅等, 2014; Du et al, 2015; Liu et al, 2016)、空间分布格局和密度制约(李立等,

2010; Wang et al, 2011; Luo et al, 2012; Wu et al, 2017)等方面均取得了重大进展。此外, CForBio在土壤微生物多样性(Shi et al, 2014; Gao et al, 2015; Song et al, 2015; 赵爱花等, 2015)、动物监测(姚晓琳等, 2008; 唐华兴等, 2011; 施泽攀等, 2014; 谢文华等, 2014)等方面也开展了研究。这些研究极大地促进了我国生物多样性研究和保护工作,获得了良好的国际学术影响力以及国内外同行的肯定。Feng等(2016)、米湘成等(2016)、马克平(2017)等学者从不同研究视角对CForBio的发展过程和研究现状进行了客观的评价和总结。然而,尚未见有报道基于文献计量分析方法解析CForBio的研究态势与热点变化。如能对其历年来发表论文的文献信息进行综合梳理和统计分析,可为CForBio的长远发展以及其他生态监测研究提供参考。

文献计量是一种基于数理统计的定量分析方法,以科学文献的外部特征为对象,分析文献的分布结构、数量关系和变化规律,从而客观定量地反映学科或某领域的整体布局、研究热点、前沿动态和发展趋势,广泛应用于学术水平评价、文献规律研究以及研究趋势分析等方面。例如,陈静等(2009)采用文献计量的方法,定量统计分析了文献的题录信息,揭示了中国保护生物学研究现状并提出相关的建设性意见。Liu等(2011)利用文献计量学分析手段,从发文量、作者、机构、国家、关键词等文献计量视角,分析了1900–2009年间全球生物多样性研究的发展历程和进展。Kumaresan等(2017)回顾了2000–2014年间水生微生物生态学的研究进展,借助文献计量学的相关分析方法,对水生微生物生

态学研究领域已发表论文的各项指标进行统计分析, 清晰地展现了相关研究的发展脉络, 对未来研究具有潜在指导意义。此外, 文献计量分析在全球环境评价(Li & Zhao, 2015)、工业生态学(Meerow & Newell, 2015)、生态恢复(Guan et al, 2018)等领域的发展现状和研究趋势分析中均得到了广泛应用并取得客观的分析结果。

本文以中国知网(CNKI)和Web of Science (WoS)核心合集数据库作为数据源, 检索2007–2017年间CForBio发表的研究论文并对其进行较为全面的文献计量分析, 以期揭示CForBio在生物多样性研究领域的发展态势和研究热点, 旨在推动CForBio以及其他生物多样性相关研究平台的深入发展, 为相关学者在研究思路和学科方向选择上提供参考。

1 研究方法

1.1 数据来源

以2007–2017年间CNKI数据库和WoS核心合集集中的Science Citation Index Expanded (SCI-E)数据库作为CForBio文献数据来源, 以CForBio所建立的18个森林动态样地的名称作为关键词或主题词, 以及各个样地的负责人和骨干成员的姓名进行检索, 查阅检索所得论文的摘要和正文内容, 判断其是否属于CForBio网络所发表的论文。同时, 参考已公布的CForBio论文目录信息(马克平, 2017)和CForBio网站(<http://www.cfbiodiv.org>)相关在线

信息。经细致筛查后, 在CNKI和WoS数据库中抽取所有论文的标题、作者、关键词、出版时间、被引次数(截至2018年3月11日)、出版期刊、研究机构和国家等信息。

1.2 数据分析

利用CNKI和WoS数据库所提供的检索结果分析功能初步统计出CForBio已发表论文的文献信息。利用文献计量分析软件VOSviewer绘制作者合作关系网络图、关键词共现网络可视图, 以达到数据可视化表达的目的。VOSviewer为莱顿大学的Van Eck和Waltman所研发, 该软件在绘制图谱、聚类分析方面具有独特优势(张璇等, 2012)。利用BibExcel及Pajek软件绘制主要研究机构间的合作关系图, 以便更直观地了解各主要研究机构间的合作关系。BibExcel为Olle Persson研发的文献计量分析软件, 可进行多种计量分析并能够与其他软件进行数据交换(曹永强等, 2018)。中文期刊的影响因子在CNKI中查询获取, 英文期刊的影响因子在科睿唯安(Clarivate Analytics)发布的*Journal Citation Reports*中获取。

2 结果

2.1 年度发文量分析

截至2017年, CForBio共发表论文412篇, 其中SCI收录论文224篇, 中文论文188篇(图1)。2007年CForBio发表3篇论文, 经过缓慢发展阶段后论文数

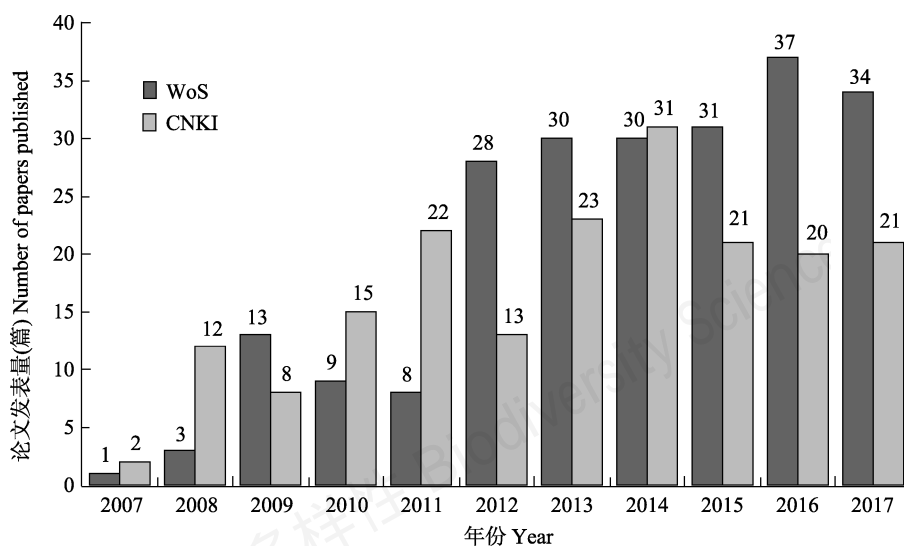


图1 2007–2017年CForBio中、英文论文发表量变化趋势图。WoS: Web of Science数据库; CNKI: 中国知网。

Fig. 1 Trends in the volume of CForBio's Chinese and English papers published in 2007–2017. WoS, Web of Science Database; CNKI, China National Knowledge Infrastructure.

量开始大幅度增加;其中,英文论文数量上升趋势最为明显;中文论文数量年际间波动较大(2009、2012和2015年分别出现了减少的情况),但整体上呈上升趋势。

从被引频次方面看,224篇英文论文总被引频次为2,644次,篇均被引频次为11.8;188篇中文论文

总被引频次为3,954次,篇均被引频次为21.03。其中,中、英文论文中被引频次最高的分别为张健等2007年发表于《应用生态学报》和Legendre等2009年发表于*Ecology*的2篇论文,其被引频次分别为197次和253次(表1)。此外,中、英文论文被引频次Top 10的论文中仅1篇发表于2015年,其余均发表于

表1 2007–2017年CForBio中、英文论文中被引频次Top 10的论文

Table 1 Top 10 cited papers of CForBio's Chinese and English papers published in 2007–2017

序号 No.	题目 Title	第一作者 First author	期刊 Journal	发表时间(年) Publication time (Year)	被引频次 Citation frequency
1	长白山阔叶红松林中红松与紫椴的空间分布格局及其关联性 Spatial distribution patterns and associations of <i>Pinus koraiensis</i> and <i>Tilia amurensis</i> in broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains	张健 Zhang J	应用生态学报 <i>Chinese Journal of Applied Ecology</i>	2007	197
2	鼎湖山亚热带常绿阔叶林20公顷样地群落特征研究 Community structure of a 20 hm ² lower subtropical evergreen broad-leaved forest plot in Dinghushan, China	叶万辉 Ye WH	植物生态学报 <i>Journal of Plant Ecology (Chinese Version)</i>	2008	185
3	古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地——群落组成与结构 Community composition and structure of Gutianshan forest dynamic plot in a mid-subtropical evergreen broad-leaved forest, east China	祝燕 Zhu Y	植物生态学报 <i>Journal of Plant Ecology (Chinese Version)</i>	2008	176
4	长白山阔叶红松林样地(CBS): 群落组成与结构 Broad-leaved Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) mixed forest plot in Changbaishan (CBS) of China: Community composition and structure	郝占庆 Hao ZQ	植物生态学报 <i>Journal of Plant Ecology (Chinese Version)</i>	2008	143
5	古田山常绿阔叶林优势树种甜槠和木荷的空间格局分析 Spatial patterns of <i>Castanopsis eyrei</i> and <i>Schima superba</i> in mid-subtropical broad-leaved evergreen forest in Gutianshan National Reserve, China	李立 Li L	植物生态学报 <i>Chinese Journal of Plant Ecology</i>	2010	116
6	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 Establishment of Xishuangbanna tropical forest dynamics plot: Species compositions and spatial distribution patterns	兰国玉 Lan GY	植物生态学报 <i>Journal of Plant Ecology (Chinese Version)</i>	2010	113
7	古田山国家级自然保护区甜槠林优势种群生态位 The niche of dominant species populations in <i>Castanopsis eyrei</i> forest in Gutian Mountain National Nature Reserve	胡正华 Hu ZH	生态学报 <i>Acta Ecologica Sinica</i>	2009	105
8	浙江天童20 ha常绿阔叶林动态监测样地的群落特征 Community structure and species composition of an evergreen broadleaved forest in Tiantong's 20 ha dynamic plot, Zhejiang Province, eastern China	杨庆松 Yang QS	生物多样性 <i>Biodiversity Science</i>	2011	89
9	长白山阔叶红松林凋落物组成及其季节动态 Composition and seasonal dynamics of litter falls in a broad-leaved Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) mixed forest in Changbai Mountains, Northeast China	原作强 Yuan ZQ	应用生态学报 <i>Chinese Journal of Applied Ecology</i>	2010	75
10	长白山阔叶红松林草本植物多样性季节动态及空间分布格局 Seasonal dynamics and spatial distribution patterns of herbs diversity in broadleaved Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>) mixed forest in Changbai Mountains	李步杭 Li BH	应用生态学报 <i>Chinese Journal of Applied Ecology</i>	2008	69
1	Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China	Legendre P	<i>Ecology</i>	2009	253

表1 (续) Table 1 (continued)

序号 Number	题目 Title	第一作者 First author	期刊 Journal	发表时间(年) Publication time (Year)	被引频次 Citation frequency
2	CTFS-ForestGEO: A worldwide network monitoring forests in an era of global change	Anderson-Teixeira KJ	<i>Global Change Biology</i>	2015	91
3	Local-scale drivers of tree survival in a temperate forest	Wang XG	<i>PLoS ONE</i>	2012	82
4	Spatial distributions of tree species in a subtropical forest of China	Li L	<i>Oikos</i>	2009	66
5	Species-area relationships explained by the joint effects of dispersal limitation and habitat heterogeneity	Shen GC	<i>Ecology</i>	2009	65
6	Vertical structure and spatial associations of dominant tree species in an old-growth temperate forest	Hao ZQ	<i>Forest Ecology and Management</i>	2007	61
7	Species associations in an old-growth temperate forest in north-eastern China	Wang XG	<i>Journal of Ecology</i>	2010	54
8	Community-level consequences of density dependence and habitat association in a subtropical broad-leaved forest	Chen L	<i>Ecology Letters</i>	2010	53
9	The variation of tree beta diversity across a global network of forest plots	Cáceres MD	<i>Global Ecology and Biogeography</i>	2012	50
10	Factors affecting detection probability in plant distribution studies	Chen GK	<i>Journal of Ecology</i>	2009	48

2007–2012年间。

从发文期刊影响因子看, 224篇英文论文中有186篇发表在影响因子为1–5的期刊中, 占英文论文发表量的83.04%; 有27篇发表在影响因子为5以上的期刊中, 占英文论文发表量的12.05%; 4篇论文发表在影响因子为10以上的期刊中, 占英文论文发表量的1.79% (图2a)。188篇中文论文中有99篇发表在影响因子为1–2的期刊中, 占中文论文发表量的52.66%; 有60篇发表在影响因子为2–3的期刊中, 占中文论文发表量的31.92% (图2b)。

2.2 主要作者及其合作关系

224篇英文论文共检索到572位作者, 篇均作者

人数为2.55位, 其中发表论文最多的作者为中国科学院植物研究所的马克平, 共发文49篇(表2)。188篇中文论文共涵盖374位作者, 篇均作者人数为1.99位, 发表论文最多的作者为东北林业大学的金光泽, 共发文44篇(表2)。所有中英文论文发表量最多的前3位作者分别为金光泽(70篇)、马克平(68篇)和郝占庆(68篇), 其论文发表量分别占总论文发表量的16.99%、16.51%和16.51%。

由中、英文论文作者间的合作关系网络图可知(图3), 作者间的合作主要以研究团队的形式展开, 不同团队成员间的合作交流较少, 离散程度较高。其中, 马克平和郝占庆位于英文论文作者合作网络

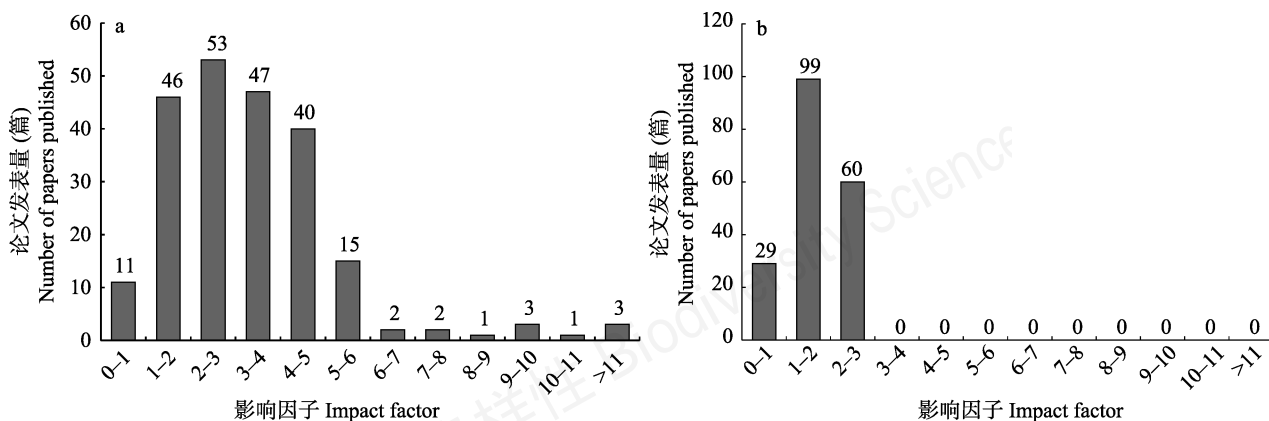


图 2 2007–2017 年 CForBio 中、英文论文发表量与影响因子分布区间关系图。a: 英文期刊; b: 中文期刊。

Fig. 2 Distribution relationships between the volumes and impact factors of CForBio's Chinese and English papers published in 2007–2017. a, English journals; b, Chinese journals.

表2 2007–2017年CForBio中、英文论文发表量Top 10作者

Table 2 Top 10 authors of CForBio's Chinese and English papers published in 2007–2017

序号 No.	作者 Author	中文论文数量(篇) Number of Chinese papers	占中文论文百分比 Percentage of Chinese papers (%)	序号 No.	作者 Author	英文论文数量(篇) Number of English papers	占英文论文百分比 Percentage of English papers (%)
1	金光泽 Jin GZ	44	23.40	1	Ma KP	49	21.88
2	米湘成 Mi XC	24	12.77	2	Hao ZQ	46	20.54
3	郝占庆 Hao ZQ	22	11.70	3	Mi XC	38	16.96
4	马克平 Ma KP	19	10.11	3	Ye WH	38	16.96
5	王绪高 Wang XG	18	9.57	3	Wang XG	38	16.96
6	王斌 Wang B	16	8.51	6	Cao M	32	14.29
7	向悟生 Xiang WS	15	7.98	7	Cao HL	26	11.61
8	原作强 Yuan ZQ	12	6.38	7	Jin GZ	26	11.61
8	叶吉 Ye J	12	6.38	9	Ye J	25	11.16
8	李先琨 Li XK	12	6.38	10	Lian JY	22	9.82

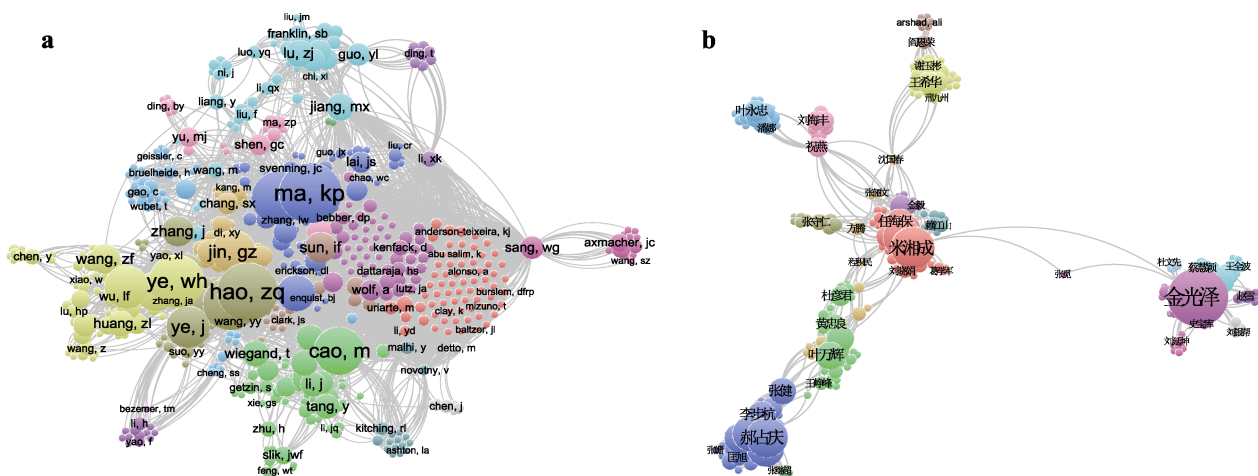


图3 2007–2017年CForBio中、英文论文作者合作关系网络图。a: 英文论文; b: 中文论文。节点大小表示论文发表数量的多少; 节点间连线的多少表示作者间合作关系的强弱; 不同节点颜色表示不同的聚类结果。

Fig. 3 Charts of cooperative relationships among the authors of CForBio's Chinese and English papers published in 2007–2017. a, English papers; b, Chinese papers. The node size indicates the number of published papers; the number of connections between nodes indicates the strength of the cooperation between authors; different node colors indicate different clustering results.

最为密集区域(图3a), 金光泽和米湘成位于中文论文作者合作关系最为密集区域(图3b)。

2.3 主要研究机构及其合作关系

224篇英文论文来自国内外251个机构, 188篇中文论文来自76个机构。由表3可知, 英文论文发表数量最多的机构为Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (CAS) (中国科学院植物研究所), 共发表论文59篇, 占发文总量的26.34%; 其次为Institute of Applied Ecology, CAS (中国科学院沈阳应用生态研究所)和South China Botanical Garden, CAS (中国科学院华南植物园), 分别发表论文45篇和44篇, 占发文总量的20.09%和19.64%。中文论文

发表数量最多的研究机构为东北林业大学, 共发表论文47篇, 占发文总量的25%; 其次为中国科学院植物研究所和中国科学院广西植物研究所, 分别发表论文45篇和25篇, 占发文总量的23.94%和13.3%。

为了解主要研究机构间的合作关系, 统计出中、英文论文发表量为5篇以上的研究机构并绘制主要机构间的合作关系图(图4)。由图4a可知, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (中国科学院植物研究所)为该合作网络中最为活跃的研究机构, 与其他机构间开展了大量的合作, 为CForBio生物多样性研究的主力军; 与国内研究机构开展合作最多的国外研究机构为University of

表3 2007–2017年CForBio中、英文论文发表量Top 10研究机构

Table 3 Top 10 research institutions of CForBio's Chinese and English papers published in 2007–2017

序号 No.	中文论文研究机构 Research institution for Chinese papers	论文数量(篇) Number of papers	占中文论文百分比 Percentage of Chinese papers (%)	序号 No.	英文论文研究机构 Research institution for English papers	论文数量(篇) Number of papers	占英文论文百分比 Percentage of English papers (%)
1	东北林业大学 Northeast Forestry University	47	25.00	1	Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences	59	26.34
2	中国科学院植物研究所 Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences	45	23.94	2	Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences	45	20.09
3	广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所 Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences	25	13.30	3	South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences	44	19.64
4	中国科学院沈阳应用生态研究所 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences	22	11.70	4	Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences	41	18.30
5	浙江师范大学 Zhejiang Normal University	16	8.51	5	Northeast Forestry University	26	11.61
6	中国科学院华南植物园 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences	15	7.98	6	University of Alberta	23	10.27
7	广西友谊关森林生态系统定位观测研究站 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station	13	6.92	7	Smithsonian Tropical Research Institute	19	8.48
8	浙江古田山国家级自然保护区管理局 Gutianshan National Nature Reserve Administrative Bureau	10	5.32	8	East China Normal University	15	6.70
9	华东师范大学 East China Normal University	9	4.79	9	Sun Yat-Sen University	14	6.25
9	广西弄岗国家级自然保护区管理局 Administration Bureau of Guangxi Nonggang National Nature Reserve	9	4.79	10	Helmholtz Association	13	5.80

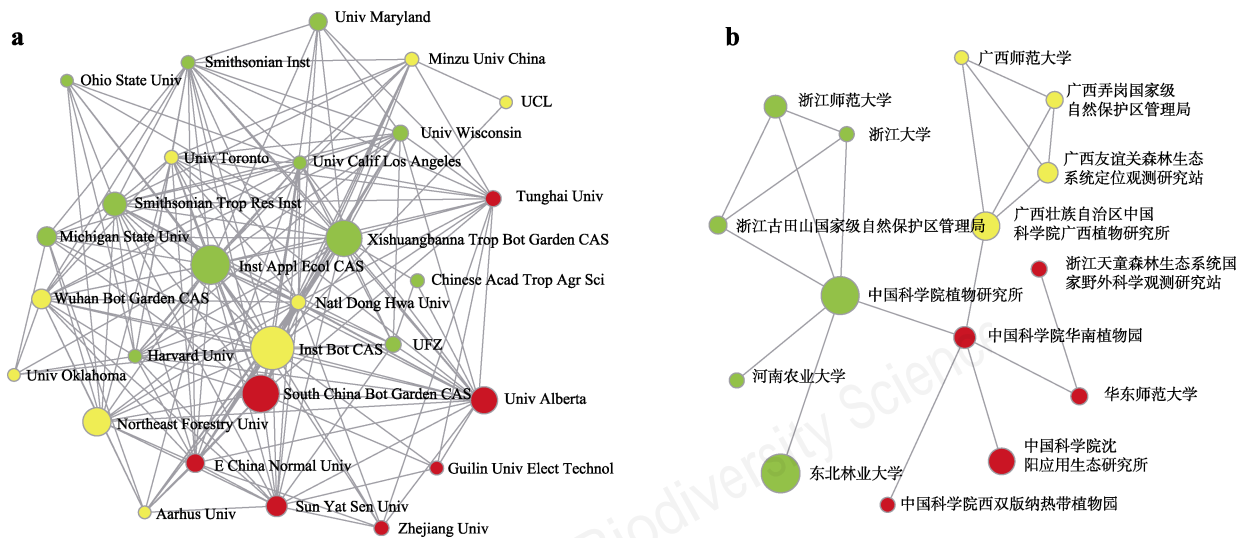


图4 2007–2017年CForBio中、英文论文主要研究机构间合作关系图。a: 英文论文; b: 中文论文。节点大小、颜色以及节点间连线的意思同图3。

Fig. 4 Cooperative relationships among the major research institutions of CForBio's Chinese and English papers published in 2007–2017. a, English papers; b, Chinese papers. The meanings of node size, colors and the number of connections between nodes are same as Fig. 3.

Alberta (阿尔伯塔大学)和Smithsonian Tropical Research Institute (史密森热带研究所),表明这两个研究机构在CForBio发展历程中扮演着重要的角色,推动了CForBio生物多样性研究的开展。由图4b可知,与其他机构开展合作最多的机构为中国科学院植物研究所,其次为中国科学院华南植物园和广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所;与英文论文主要研究机构间的合作关系相比,中文论文中主要研究机构间的合作交流较少,离散程度更高。

2.4 主要期刊分析

224篇英文论文分布在75种期刊中,188篇中文论文分布在32种期刊中。由表4可知,英文论文出版量前10位期刊的论文数量为111篇,占英文论文总数的51.87%;*PLoS ONE*为论文出版数量最多的期刊,出版论文26篇(11.61%),其次为*Scientific*

*Reports*和*Forest Ecology and Management*,分别出版论文15篇(6.70%)和14篇(6.25%)。中文论文出版量前10位期刊的论文数量为159篇,占中文论文总数的84.57%,出版论文数量较多的期刊为《生物多样性》、《生态学报》和《应用生态学报》,分别出版论文56篇(29.79%)、20篇(10.64%)和20篇(10.64%);其中《生物多样性》的论文出版数量明显高于其他期刊,为CForBio研究成果发表的重要期刊载体。

2.5 关键词分析

由关键词共现网络图可知,英文论文中出现频次最多的前10个关键词分别是: dispersal limitation、temperate forest、species coexistence、subtropical forest、functional traits、point pattern analysis、community assembly、tropical forest、Janzen-Connell hypothesis和population genetics (图5a)。中文论文中

表4 2007–2017年CForBio中、英文论文发表量Top 10期刊及其影响因子

Table 4 Top 10 journals and impact factors of CForBio's Chinese and English papers published in 2007–2017

序号 No.	期刊 Journal	中文论文数 量(篇) Number of Chinese papers	占中文论文百 分比 Percentage of Chinese papers (%)	影响因 子 Impact factor (2017)	序号 No.	期刊 Journal	英文论文数 量(篇) Number of English papers	占英文论文百 分比 Percentage of English papers (%)	影响因子 Impact factor (2017)
1	生物多样性 <i>Biodiversity Science</i>	56	29.79	1.565	1	<i>PLoS ONE</i>	26	11.61	2.766
2	生态学报 <i>Acta Ecologica Sinica</i>	20	10.64	2.391	2	<i>Scientific Reports</i>	15	6.70	4.122
2	应用生态学报 <i>Chinese Journal of Applied Ecology</i>	20	10.64	2.337	3	<i>Forest Ecology and Management</i>	14	6.25	3.169
4	科学通报 <i>Chinese Science Bulletin</i>	18	9.57	1.143	4	<i>Journal of Plant Ecology</i>	10	4.46	1.937
4	植物生态学报 <i>Chinese Journal of Plant Ecology</i>	18	9.57	2.576	5	<i>Ecology</i>	9	4.02	4.617
6	广西植物 <i>Guihaia</i>	8	4.26	0.607	5	<i>Oikos</i>	9	4.02	3.709
7	生态学杂志 <i>Chinese Journal of Ecology</i>	7	3.72	1.344	7	<i>Plant and Soil</i>	8	3.57	3.306
8	林业科学 <i>Scientia Silvae Sinicae</i>	5	2.66	1.259	7	<i>Journal of Ecology</i>	8	3.57	5.172
9	北京林业大学学报 <i>Journal of Beijing Forestry University</i>	4	2.13	1.074	9	<i>Science Bulletin</i>	6	2.68	4.136
10	生态环境学报 <i>Ecology and Environmental Sciences</i>	3	1.60	1.532	9	<i>Journal of Vegetation Science</i>	6	2.68	2.658

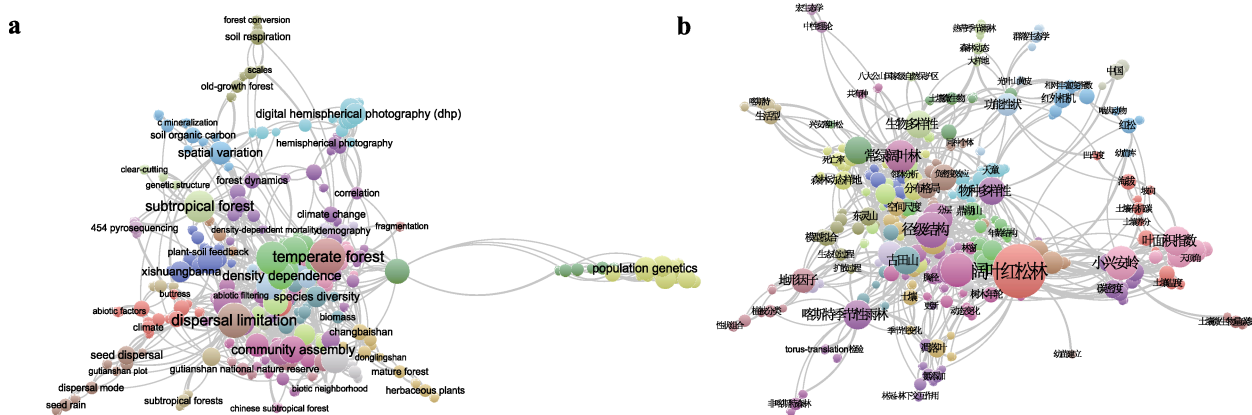


图5 2007–2017年CForBio中、英文论文关键词共现网络图。a: 英文论文; b: 中文论文。节点大小表示关键词出现频次的高低, 节点间连线的多少表示两组关键词共同出现频次的高低; 不同节点颜色表示不同的聚类结果。

Fig. 5 Co-occurrence network map of keywords from CForBio’s Chinese and English papers published in 2007–2017. a, English paper; b, Chinese paper. The node size indicates the frequency of occurrence of keywords, and the number of connections between nodes indicates the frequency of co-occurrence of two sets of keywords; different node colors indicate different clustering results.

表5 CForBio网络不同研究阶段Top 10关键词分布情况

Table 5 Top 10 keywords distribution in different research stages of CForBio network

阶段 Stage	类别 Category	高频关键词 High frequency keywords
I (2007–2011)	英文论文 English papers	tropical forest; spatial pattern; temperate forest; biodiversity; species diversity; distribution; beta diversity; microsatellite; niche; habitat association
	中文论文 Chinese papers	阔叶红松林; 长白山; 径级结构; 粗木质残体; 空间格局; 群落结构; 生物多样性; 物种共存; 空间分布; 天然次生林 mixed broadleaved-Korean pine forest; Changbai Mountains; size class structure; coarse woody debris; spatial pattern; community structures; biodiversity; species coexistence; spatial distribution; natural secondary forest
II (2012–2017)	英文论文 English papers	tropical forest; spatial pattern; biodiversity; functional trait; beta diversity; community; broad-leaved forest; temperate forest; subtropical forest; habitat association
	中文论文 Chinese papers	阔叶红松林; 小兴安岭; 喀斯特季节性雨林; 叶面积指数; 地形; 常绿阔叶林; 物种组成; 凋落物; 径级结构; 地形因子 mixed broadleaved-Korean pine forest; Xiaoxing’an Mountains; karst seasonal rainforest; leaf area index; topography; evergreen broad-leaved forest; species composition; litter collection; size class structure; topographic factors

出现频次最多的前10个关键词分别是: 阔叶红松林、径级结构、小兴安岭、长白山、常绿阔叶林、空间分布、物种组成、叶面积指数、喀斯特季节性雨林和地形(图5b)。高频关键词涉及的研究方向可以看作CForBio的热点研究领域或研究对象。

为更全面地掌握CForBio研究的热点变化情况, 将2007–2017年间所发表的论文分为两个阶段, 即阶段I (2007–2011年)和阶段II (2012–2017年)。通过统计两个阶段内所涉及的高频关键词, 分别选取出中、英文论文出现频次最高的前10个关键词。由表5可知, 阶段I中CForBio的研究主要集中在热带森林和温带森林两种类型, 空间格局、径级结构、群落结构、物种多样性和物种共存等为其热点研究内容; 阶段II与阶段I相比, CForBio的研究内容越来越

丰富, 功能性状、叶面积指数、地形因子以及凋落物等逐渐成为新的研究热点。

3 讨论

3.1 论文发表量与质的变化

由CForBio年度发文量分析可知, 早期阶段仅有少量论文发表, 主要原因为CForBio平台处于初期建设阶段, 各森林动态样地的数据收集及处理耗时较长, 研究成果出版周期相对缓慢; 经过几年的发展后, CForBio研究成果的发表数量明显增加, 2017年共有55篇论文发表, 其中34篇为SCI收录论文(图1), 并且与国外研究机构合作在*Nature*上发表了1篇论文。除此之外, 马克平团队在*Ecology Letters*、*Ecology*等生态学知名期刊发表论文, 在学术界产

生了积极的影响。上述结果表明, 近些年CForBio正处于快速发展阶段并且在我国生物多样性研究领域占据着越来越重要的地位。论文被引频次是衡量论文影响力的重要评估指标, 也可作为评价学者科研能力的指标, 被引频次越高则表明其影响力越大, 同行的认可度越高(金碧辉等, 2000)。论文被引频次与发表时间有关, 如高被引论文的发表时间大部分处于CForBio发展的早期阶段(表1), 主要原因为该时期的研究成果是大型固定样地研究的早期成果, 对各样地后期研究工作的开展具有重要的参考价值, 而较新研究成果的被引率还需要一段时间后才能真正体现。总的来看, CForBio与国外起步较早的生物多样性研究网络相比, 研究体系还不够完善, 但近些年CForBio的学术成果逐渐丰硕且得到了国内外同行的认可, 预计未来将会有更为高质量的成果产出。

3.2 研究热点变化

由关键词分析可知, CForBio主要围绕热带森林、亚热带森林以及温带森林3种类型开展研究, 生物多样性与维持机制、群落结构、空间分布格局、密度制约、系统发育与功能性状等为其热点研究方向。前期阶段(2007–2011年), CForBio的研究多集中在群落物种组成和结构(祝燕等, 2008; 胡跃华等, 2010; 李亮等, 2011)、树木空间分布格局(Li et al, 2009; Wang et al, 2011)等方面, 并开始探究扩散限制和生境异质性(Shen et al, 2009; Bin et al, 2010; Chen et al, 2010; Lai et al, 2010)等在森林生物多样性维持机制中的贡献。随着研究的深入开展, 不断有新的科学问题提出, CForBio的研究热点也发生了相应的改变。近些年CForBio开展了大量有关功能性状和树木生长(Jesse et al, 2014; Liu et al, 2016; Mengesha et al, 2017)、系统发育(Liu et al, 2013; Yang et al, 2014)以及密度制约(Luo et al, 2012; 刘晓静等, 2016)等方面的研究, 为揭示群落构建机制提供了丰富的理论依据。此外, 动物多样性(谢文华等, 2014; 李生强等, 2016)和微生物多样性(Shi et al, 2014; 赵爱花等, 2015)研究也逐渐成为CForBio新的研究热点。

3.3 研究趋势分析

在各森林动态样地研究人员的积极努力下, CForBio取得了快速的发展, 研究成果得到了国内外同行的肯定, 现已成为全球森林生物多样性研究

中最为活跃的组成部分(马克平, 2017)。随着数据共享时代的到来, CForBio应建立不同团队间的合作创新机制, 同时加快监测数据的共享步伐, 让更多生态学者投入到CForBio研究中并充分利用数据, 进一步实现科研成果的质变。自建立以来, CForBio大部分研究主要集中于样地尺度的植物群落结构研究, 很少涉及到大尺度的历史及区域因素对植物多样性的影响, 后续研究应该更多尝试分析和讨论人类活动、古气候变化、当代气候等对我国森林植物群落结构和动态的影响。在未来的研究中, CForBio除了持续关注树木空间分布格局、植物功能性状、树木密度制约、群落系统发育等以外, 还需进一步往微生物多样性、动物多样性以及植物–土壤反馈等研究方向延伸, 加强对不同营养级之间相互作用的分析并探索其内在机理。此外, CForBio应该充分利用我国植被三向(纬向、经向和垂直)地带性规律明显且生物多样性极为丰富这一优势, 在验证和解析国际上已有生态理论或假说的同时, 发展或提出新的生态理论、假说或模型来探索生物多样性及其相关研究中的热点议题。

4 结论和建议

通过分析2007–2017年间CNKI数据库和Web of Science核心合集数据库中CForBio发表论文的文献信息, 本文从发文量、作者、机构、关键词等文献计量分析视角较全面地揭示了CForBio的研究发展历程、研究态势和热点变化。CForBio从建立之初以植物群落生态学研究为主, 正逐步发展为多学科交叉的生物多样性科学综合研究平台。伴随CForBio研究体系的逐步完善和研究方案不断优化, 近些年论文发表数量迅速增长, 其建设为我国森林生物多样性监测研究做出了重要贡献。未来CForBio应进一步推动国内外研究机构和人员之间的交流与合作, 鼓励更多学者投入到我国生物多样性研究领域中, 加快监测数据的共享步伐, 在区域尺度上深度挖掘数据并进行数据和分析结果的比较研究, 从而实现科研成果量变与质变并举的目标。此外, 基于大型样地的多年调查数据, CForBio在植物群落构建机制方面开展了丰富的研究工作, 内容涉及树木空间分布格局、植物功能性状、树木密度制约、群落系统发育等, 但很少有研究就物种多样性维持机制、多样性与生产力关系、多样性响

应气候变化等开展控制实验(Huang et al, 2018), 同时在动物多样性、微生物多样性以及碳循环等方面研究工作仍然较少, 因此这些方面的研究力度还有待加强。未来CForBio应注重近地面激光雷达遥感、多源数据融合等新技术的应用, 注重进化过程与群落生态过程间以及地上与地下生态过程间的耦联关系, 在生物多样性格局的多尺度与多维度解析、植物-土壤反馈机制、树木冠层和根系的结构与功能等方面持续深入研究, 促进CForBio研究体系的进一步完善和扩展, 逐步编制一张涵盖生物多样性以及气候变化等前沿领域且符合国家生态建设需求的研究网络。

致谢: 感谢中国科学院植物研究所米湘成老师以及两位匿名审稿专家对论文修改提出的宝贵建议。

参考文献

- 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.
- Cao YQ, Yuan LT, Li WJ (2018) Bibliometric analysis of the current research situation and hotspots of crop water consumption. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 1874–1883. (in Chinese with English abstract) [曹永强, 袁立婷, 李维佳 (2018) 基于文献计量的作物耗水研究现状及热点分析. *生态学报*, 38, 1874–1883.]
- Chen J, Zhang BW, Ma KP, Jiang ZG (2009) Bibliometric analysis of status quo of conservation biology in China. *Biodiversity Science*, 17, 423–429. (in Chinese with English abstract) [陈静, 张保卫, 马克平, 蒋志刚 (2009) 中国保护生物学研究现状的文献计量学分析. *生物多样性*, 17, 423–429.]
- Chen L, Mi XC, Comita LS, Zhang LW, Ren HB, Ma KP (2010) Community-level consequences of density dependence and habitat association in a subtropical broad-leaved forest. *Ecology Letters*, 13, 695–704.
- Du YJ, Mao LF, Queenborough SA, Freckleton RP, Chen B, Ma KP (2015) Phylogenetic constraints and trait correlates of flowering phenology in the angiosperm flora of China. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 928–938.
- Fang S, Yuan ZQ, Lin F, Ye J, Hao ZQ, Wang XG (2014) Functional and phylogenetic structures of woody plants in broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains, Jilin, China. *Chinese Science Bulletin*, 59, 2342–2348. (in Chinese with English abstract) [房帅, 原作强, 藺菲, 叶吉, 郝占庆, 王绪高 (2014) 长白山阔叶红松林木本植物系统发育与功能性状结构. *科学通报*, 59, 2342–2348.]
- Feng G, Mi XC, Yan H, Li FYH, Svenning JC, Ma KP (2016) CForBio: A network monitoring Chinese forest biodiversity. *Science Bulletin*, 61, 1163–1170.
- Gao C, Zhang Y, Shi NN, Zheng Y, Chen L, Wubet T, Bruehlheide H, Both S, Buscot F, Ding Q, Erfmeier A, Kühn P, Nadrowski K, Scholten T, Guo LD (2015) Community assembly of ectomycorrhizal fungi along a subtropical secondary forest succession. *New Phytologist*, 205, 771–785.
- Guan YJ, Kang RP, Liu JG (2018) Evolution of the field of ecological restoration over the last three decades: A bibliometric analysis. *Restoration Ecology*, doi: 10.1111/rec.12899.
- Guo YL, Wang B, Li DX, Azim UM, Xiang WS, Ding T, Wen SJ, Lu SH, Huang FZ, He YL, Li XK (2017) Effects of topography and spatial processes on structuring tree species composition in a diverse heterogeneous tropical karst seasonal rainforest. *Flora*, 231, 21–28.
- Hao ZQ, Zhang J, Li BH, Ye J, Wang XG, Yao XL (2008) Natural secondary poplar-birch forest in Changbai Mountain: Species composition and community structure. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 251–261. (in Chinese with English abstract) [郝占庆, 张健, 李步杭, 叶吉, 王绪高, 姚晓琳 (2008) 长白山次生杨桦林样地: 物种组成与群落结构. *植物生态学报*, 32, 251–261.]
- Hu YH, Cao M, Lin LX (2010) Dynamics of tree species composition and community structure of a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 949–957. (in Chinese with English abstract) [胡跃华, 曹敏, 林露湘 (2010) 西双版纳热带季雨林树种组成和群落结构动态. *生态学报*, 30, 949–957.]
- Huang YY, Chen YX, Castro-Izaguirre N, Baruffol M, Brezzi M, Lang A, Li Y, Härdtle W, von Oheimb G, Yang XF, Liu XJ, Pei KQ, Both S, Yang B, Eichenberg D, Assmann T, Bauhus J, Behrens T, Buscot F, Chen XY, Chesters D, Ding BY, Durka W, Erfmeier A, Fang JY, Fischer M, Guo LD, Guo DL, Gutknecht JLM, He JS, He CL, Hector A, Hönig L, Hu RY, Klein AM, Kühn P, Liang Y, Li S, Michalski S, Scherer-Lorenzen M, Schmidt K, Scholten T, Schuldt A, Shi XZ, Tan MZ, Tang ZY, Trogisch S, Wang ZW, Welk E, Wirth C, Wubet T, Xiang WH, Yu MJ, Yu XD, Zhang JY, Zhang SR, Zhang NL, Zhou HZ, Zhu CD, Zhu L, Bruehlheide H, Ma KP, Niklaus PA, Schmid B (2018) Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment. *Science*, 362, 80–83.
- Jesse LR, Yang J, Zhang GC, Cao M, Tang Y, Timothy KH (2014) The role of functional traits and individual variation in the co-occurrence of *Ficus* species. *Ecology*, 95, 978–990.
- Jin BH, Wang SY, Ren SL, Liu YJ (2000) On the relationship between journal impact factors and academic quality of papers. *Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals*, 11, 202–205. (in Chinese) [金碧辉, 汪寿阳, 任胜利, 刘雅娟 (2000) 论期刊影响因子与论文学术质

- 量的关系. 中国科技期刊研究, 11, 202–205.]
- Kumaresan R, Vinitha K, Kannan K (2017) Bibliometric analysis of aquatic microbial ecology from 2000–2014. *International Journal of Research in Library Science*, 3, 1–14.
- Lai JS, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2010) Species–habitat associations change in a subtropical forest of China. *Journal of Vegetation Science*, 20, 415–423.
- Li L, Chen JH, Ren HB, Mi XC, Yu MJ, Yang B (2010) Spatial patterns of *Castanopsis eyrei* and *Schima superba* in mid-subtropical broad-leaved evergreen forest in Gutianshan National Reserve, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 241–252. (in Chinese with English abstract) [李立, 陈建华, 任海保, 米湘成, 于明坚, 杨波 (2010) 古田山常绿阔叶林优势树种甜槠和木荷的空间格局分析. *植物生态学报*, 34, 241–252.]
- Li L, Liu HF, Bai F, Zhu Y, Li GQ, Li WC, Sang WG (2011) Species composition and community structure of four deciduous broad-leaved secondary forest in Dongling Mountain. *Biodiversity Science*, 19, 243–251. (in Chinese with English abstract) [李亮, 刘海丰, 白帆, 祝燕, 李广起, 李文超, 桑卫国 (2011) 东灵山4种落叶阔叶次生林的物种组成与群落结构. *生物多样性*, 19, 243–251.]
- Li L, Wei SG, Huang ZL, Ye WH, Cao HL, Wang ZG, Lian JY, Sun IF, Ma KP, He FL (2009) Spatial distributions of tree species in a subtropical forest of China. *Oikos*, 118, 495–502.
- Li SQ, Wang GH, Shi ZP, Li XK, Xiao ZS, Zhou QH (2016) Infrared camera traps for monitoring mammal and bird diversity and activity pattern in limestone habitats. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 272–281. (in Chinese with English abstract) [李生强, 汪国海, 施泽攀, 李先琨, 肖治术, 周岐海 (2016) 红外相机技术监测喀斯特生境兽类和鸟类多样性及活动节律. *兽类学报*, 36, 272–281.]
- Li W, Zhao Y (2015) Bibliometric analysis of global environmental assessment research in a 20-year period. *Environmental Impact Assessment Review*, 50, 158–166.
- Liu X, Liang Z, Song H (2011) Global biodiversity research during 1900–2009: A bibliometric analysis. *Biodiversity and Conservation*, 20, 807–826.
- Liu XJ, Ren SY, Li LX, Ye YZ, Yuan ZL, Wang T (2016) Detecting density dependence on tree survival in a deciduous broadleaved forest in Baotianman National Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 24, 639–648. (in Chinese with English abstract) [刘晓静, 任思远, 李鹿鑫, 叶永忠, 袁志良, 王婷 (2016) 宝天曼国家级自然保护区落叶阔叶林密度制约效应对树木存活的影响. *生物多样性*, 24, 639–648.]
- Liu XJ, Swenson NG, Lin DM, Mi XC, Umana MN, Schmid B, Ma KP (2016) Linking individual-level functional traits to tree growth in a subtropical forest. *Ecology*, 97, 2396–2405.
- Liu XJ, Swenson NG, Zhang JL, Ma KP (2013) The environment and space, not phylogeny, determine trait dispersion in a subtropical forest. *Functional Ecology*, 27, 264–272.
- Luo ZR, Mi XC, Chen XR, Ye ZL, Ding BY (2012) Density dependence is not very prevalent in a heterogeneous subtropical forest. *Oikos*, 121, 1239–1250.
- Ma KP (2008) Large scale permanent plots: Important platform for long term research on biodiversity in forest ecosystem. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 237. (in Chinese) [马克平 (2008) 大型固定样地: 森林生物多样性定位研究的平台. *植物生态学报*, 32, 237.]
- Ma KP (2017) Forest dynamics plot is a crosscutting research platform for biodiversity science. *Biodiversity Science*, 25, 227–228. (in Chinese) [马克平 (2017) 森林动态大样地是生物多样性科学综合研究平台. *生物多样性*, 25, 227–228.]
- Meerow S, Newell JP (2015) Resilience and complexity: A bibliometric review and prospects for industrial ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 19, 236–251.
- Mengesha A, Cao M, Zhang GC, Ci XQ, Li J, Yang J (2017) Environmental filtering structures tree functional traits combination and lineages across space in tropical tree assemblages. *Scientific Reports*, 7, 132.
- Mi XC, Guo J, Hao ZQ, Xie ZQ, Guo K, Ma KP (2016) Chinese forest biodiversity monitoring: Scientific foundations and strategic planning. *Biodiversity Science*, 24, 1203–1219. (in Chinese with English abstract) [米湘成, 郭静, 郝占庆, 谢宗强, 郭柯, 马克平 (2016) 中国森林生物多样性监测: 科学基础与执行计划. *生物多样性*, 24, 1203–1219.]
- Santiago LS, Wright SJ (2007) Leaf functional traits of tropical forest plants in relation to growth form. *Functional Ecology*, 21, 19–27.
- Shen GC, Yu MJ, Hu XS, Mi XC, Ren HB, Sun IF, Ma KP (2009) Species–area relationships explained by the joint effects of dispersal limitation and habitat heterogeneity. *Ecology*, 90, 3033–3041.
- Shi LL, Mortimer PE, Slik JWF, Zou XM, Xu JC, Feng WT, Qiao L (2014) Variation in forest soil fungal diversity along a latitudinal gradient. *Fungal Diversity*, 64, 305–315.
- Shi ZP, Zhou QH, Li XK, Xiao ZS (2014) Estimation of species richness of mammals and birds using camera traps in Nonggang Forest Dynamics Plot, South China. *Biodiversity Science*, 22, 826–829. (in Chinese with English abstract) [施泽攀, 周岐海, 李先琨, 肖治术 (2014) 弄岗森林动态监测样地及周边鸟兽的红外相机初步监测. *生物多样性*, 22, 826–829.]
- Song P, Ren HB, Jia Q, Guo JX, Zhang NL, Ma KP (2015) Effects of historical logging on soil microbial communities in a subtropical forest in southern China. *Plant and Soil*, 397, 115–126.
- Tang HX, Chen TB, Liu SY, Nong DP, Meng YJ, Lu MX (2011) The population dynamics of *Francois langur Trachypithecus francoisi* in Nonggang Nature Reserve, Guangxi, China. *Sichuan Journal of Zoology*, 30, 136–140. (in Chinese with English abstract) [唐华兴, 陈天波, 刘晟

- 源, 农登攀, 蒙渊君, 陆茂新 (2011) 广西弄岗自然保护区黑叶猴的种群动态. 四川动物, 30, 136–140.]
- Valencia R, Foster RB, Villa G, Condit R, Svenning JC, Hernandez C, Romoleroux K, Losos E, Magard 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.
- Wang XG, Swenson NG, Wiegand T, Wolf A, Howe R, Lin F, Ye J, Yuan ZQ, Shi S, Bai XJ, Xing DL, Hao ZQ (2013) Phylogenetic and functional diversity area relationships in two temperate forests. *Ecography*, 36, 883–893.
- Wang XG, Wiegand T, Hao ZQ, Li BH, Ye J, Lin F (2010) Species associations in an old-growth temperate forest in north-eastern China. *Journal of Ecology*, 98, 674–686.
- Wang XG, Wiegand T, Kraft NJB, Swenson NG, Davies SJ, Hao ZQ, Howe RW, Lin YJ, Ma KP, Mi XC (2016) Stochastic dilution effects weaken deterministic effects of niche-based processes in species rich forests. *Ecology*, 97, 347–360.
- Wang XG, Wiegand T, Wolf A, Howe RW, Davies SJ, Hao ZQ (2011) Spatial patterns of tree species richness in two temperate forests. *Journal of Ecology*, 99, 1382–1393.
- Wu H, Franklin SB, Liu JM, Lu ZJ (2017) Relative importance of density dependence and topography on tree mortality in a subtropical mountain forest. *Forest Ecology and Management*, 384, 169–179.
- Xie WH, Yang XF, Yu JJ, Li JN, Tao SL, Lu ZJ, Wang XZ, Xiao ZS (2014) A survey of mammals and birds using camera traps in Badagongshan Forest Dynamics Plot, Central China. *Biodiversity Science*, 22, 816–818. (in Chinese) [谢文华, 杨锡福, 于家捷, 李俊年, 陶双伦, 卢志军, 王学志, 肖治术 (2014) 运用红外相机对八大公山森林动态样地鸟兽的初步调查. 生物多样性, 22, 816–818.]
- Yang J, Cao M, Swenson NG (2018) Why functional traits do not predict tree demographic rates. *Trends in Ecology & Evolution*, 33, 326–336.
- Yang J, Ci XQ, Lu MM, Zhang GC, Cao M, Li J, Lin LX (2014) Functional traits of tree species with phylogenetic signal co-vary with environmental niches in two large forest dynamics plots. *Journal of Plant Ecology*, 7, 115–125.
- Yao XL, Piao ZJ, Li BH, Zhang J, Wang XG, Ye J, Hao ZQ (2008) *Pinus koraiensis* seed consumption by rodents and birds. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19, 1759–1763. (in Chinese with English abstract) [姚晓琳, 朴正吉, 李步杭, 张健, 王绪高, 叶吉, 郝占庆 (2008) 啮齿动物和鸟类对红松种子的消耗. 应用生态学报, 19, 1759–1763.]
- Zhang X, Su N, Yang HG, Fang XK (2012) Knowledge mapping of research on international E-government during 2000–2011 based on Citespace and VOSviewer. *Journal of Intelligence*, 31, 51–57. (in Chinese with English abstract) [张璇, 苏楠, 杨红岗, 房小可 (2012) 2000–2011年国际电子政务的知识图谱研究——基于 Citespace 和 VOSviewer 的计量分析. 情报杂志, 31, 51–57.]
- Zhao AH, Du XJ, Zang J, Zhang SR, Jiao ZH (2015) Soil bacterial diversity in the Baotianman deciduous broad-leaved forest. *Biodiversity Science*, 23, 649–657. (in Chinese with English abstract) [赵爱花, 杜晓军, 臧婧, 张守仁, 焦志华 (2015) 宝天曼落叶阔叶林土壤细菌多样性. 生物多样性, 23, 649–657.]
- Zhu Y, Zhao GF, Zhang LW, Shen GC, Mi XC, Ren HB, Yu MJ, Chen JH, Chen SW, Fang T, Ma KP (2008) Community composition and structure of Gutianshan forest dynamic plot in a mid-subtropical evergreen broad-leaved forest, east China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 262–273. (in Chinese with English abstract) [祝燕, 赵谷风, 张翎文, 沈国春, 米湘成, 任海保, 于明坚, 陈建华, 陈声文, 方腾, 马克平 (2008) 古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地——群落组成与结构. 植物生态学报, 32, 262–273.]

(责任编辑: 马克平 责任编辑: 闫文杰)



•研究报告•

基于SOM的野生秤锤树群落的空间分布和环境解释

杨国栋^{1,2} 季芯悦^{1,2} 陈林^{1,2} 钟育谦³ 翟飞飞³ 伊贤贵^{1,2*} 王贤荣^{1,2}

1 (南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

2 (南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

3 (江苏省野生动植物保护站, 南京 210036)

摘要: 本文采用自组织特征映射网络(self-organizing map, SOM)对南京老山野生秤锤树(*Sinojackia xylocarpa*)群落进行数量分类和排序, 分析了其与环境因子之间的关系。结果表明: (1) SOM将秤锤树野生群落的100个样方划分为5个群丛类型, 分类结果在空间上反映了秤锤树野生群落的演替变化趋势, 各群丛的群落结构和物种组成存在差异且群丛界限明显, 可较好地排序与分类的环境解释。(2)通过环境因子梯度的可视化方法, 确定了海拔、坡位和土壤厚度是影响该地区秤锤树生长和分布的主要因子, 同时也揭示了以不同优势种为代表的各群丛和环境因子的关系。(3) SOM可以摆脱许多定量技术的限制性假设, 使得神经网络对于群落生态特征及探索群落和环境相互关系具有良好展潜力; SOM群落生态数据具有更高的映射能力, 进行群落分类以及较少程度的排序的潜力, 将有利于不同群落类型的分类和管理, 对于濒危植物保护具有重要意义。

关键词: 秤锤树; 环境因子; 自组织特征映射网络; 野生群落; 梯度分析

Spatial distribution and environmental interpretation of wild *Sinojackia xylocarpa* communities based on self-organizing map (SOM)

Guodong Yang^{1,2}, Xinyue Ji^{1,2}, Lin Chen^{1,2}, Yuqian Zhong³, Feifei Zhai³, Xiangui Yi^{1,2*}, Xianrong Wang^{1,2}

1 Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037

2 College of Biology and the Environment and the Nanjing Forestry University, Nanjing 210037

3 Protection Station of Wild Animals and Plants in Jiangsu Province, Nanjing 210036

Abstract: A self-organizing map (SOM) based on field investigations was adopted to analyze the numerical classification and ordination of wild *Sinojackia xylocarpa* communities in the Nanjing Laoshan Forest Park in hopes of illuminating the relationship between the wild communities and environmental conditions. The results show that the 100 quadrats were divided into five associations, spatially reflecting the successional trend of wild *S. xylocarpa* communities. The association boundary, community structure and species composition differed significantly among communities. Through visualizing environmental gradients, the altitude, slope position and soil thickness were found to be the main factors affecting the growth and distribution of *S. xylocarpa* in this area, though the relationships differed among dominant species. The SOM removes the restrictive assumptions of many quantitative techniques so that the neural network is attractive to the community ecological characteristics and the interrelationship between community and environment can be explored. Based on the potential of SOM for vegetation data classification and, to a lesser extent, ordination, the SOM can aid in the conservation of endangered plants across different community types.

Key words: *Sinojackia xylocarpa*; environmental factor; self-organizing map; wild community; gradient analysis

收稿日期: 2018-01-19; 接受日期: 2018-09-12

基金项目: 绿色江苏专项资金(2130205)和第二次全国重点保护野生植物资源调查专项资金(031010251)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yimutou@sohu.com

秤锤树(*Sinojackia xylocarpa*)是我国Ⅱ级重点保护野生植物,为我国特有的安息香科落叶灌木或小乔木,具有较高的观赏价值,零星分布于江苏南京及周边地区海拔500–800 m的林缘或疏林中,对于安息香科的系统发育研究具有重要意义。由于分布区狭窄、种群数量小,自20世纪70年代以来,在多次调查中均未发现其野生种群,全国第一次重点保护野生植物资源调查过程中也未发现其野生植株,推测它在江苏可能已经野生灭绝,部分学者推测其已经野外灭绝(郝日明等, 2000; 陈瑞冰等, 2015)。但在2016年全国第二次重点保护野生植物资源调查中,笔者在南京老山国家森林公园内发现了秤锤树天然种群的分布(图1)。为了保护这一天然种群,分析其所在群落的空间结构及与环境因子之间的关系,了解其在群落中的地位是第一步。

目前主要以聚类分析,双向指示种分析和多元回归树3种数量分析方法探讨植物群落与环境因子之间的关系。但由于植物物种及群落与生态环境因子之间主要为非线性关系(Olawoyin et al, 2013),再加上秤锤树分布地域狭窄并长期受到外界因素干扰,其群落与环境因子之间的关系复杂多样,上述3种以相关分析为基础的多因素、多条件的线性排序方法不能很好地分析其群落生态因子之间的相互作用关系(张钦弟等, 2011)。神经网络理论

(neural network theory)中对非线性、复杂问题处理能力较强(李林峰等, 2014)的自组织特征映射网络(self-organizing map, SOM)被逐渐引入到植物生态学研究,它能将高维空间复杂的环境因子经过多次压缩和特征抽取而清晰地表达在低维空间,从而更客观准确地实现植物群落的排序和聚类。目前,SOM被广泛应用于生物群落的分类、动态预测等领域(Olawoyin et al, 2013),可有效避免传统聚类算法在确定聚类数目上的盲目性和不确定性(Zhang et al, 2007),成为研究生物群落结构特征的有效手段之一。

基于此,本文以该秤锤树种群的样地调查数据为基础,应用自组织特征映射网络(SOM)对秤锤树群落进行数量分类和排序,以明确其野生群落的空间结构与环境因子之间的关系,为该物种的保护利用提供基础数据。

1 研究方法

1.1 样地设置与数据采集

参照CTFS (Center for Tropical Forest Science)标准(Condit, 1998),于2017年5月在秤锤树天然种群建立1 ha样地,并用全站仪分成100个10 m × 10 m的样方(图2),对地形参数(平均海拔、坡度和坡向)进行精确计算,对每个样方进一步用插值法细分为

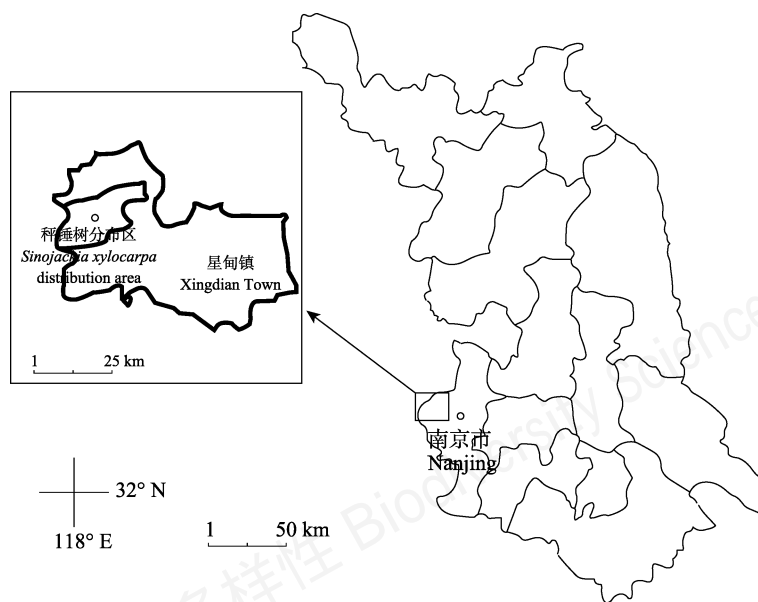


图1 南京老山国家森林公园天然秤锤树种群分布位置

Fig. 1 The location of the natural population of *Sinojackia xylocarpa* in Nanjing Laoshan Forest Park

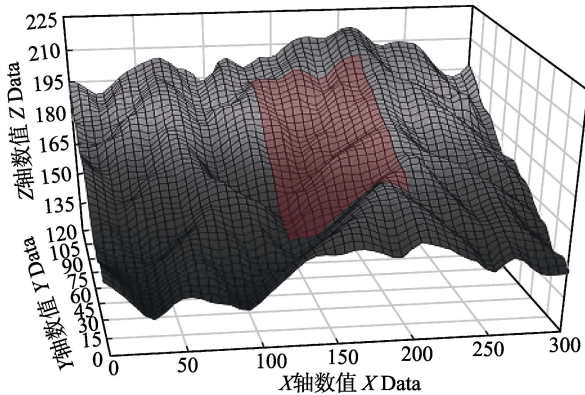


图2 基于MATLAB建模下的秤锤树 1 ha样地示意图(红色区域为样地)

Fig. 2 The sketch map 1-ha sample plot of *Sinojackia xylocarpa* based on MATLAB modeling (The red area is plot)

4个5 m × 5 m的小样方(Harms et al, 2001)。参照孟宪宇(2006)对100个样方内的所有胸径(DBH) ≥ 1 cm的乔木进行每木调查,记录种名、DBH、地理坐标、基径、树高、冠幅、枝下高等基本数据;参照丁晖等(2016)对于灌木和DBH < 1 cm的小乔木统计种类、株数和生长情况,草本统计种类、盖度和生长情况,建立数据库。

秤锤树 1 ha样地内共记录维管束植物113种,隶属于45科75属。为提高SOM训练速度和学习率(Park et al, 2001),剔除频度较低的偶见种,对余下的84种植物进行分类和排序。植物物种重要值(IV)构成84 × 100维的物种数据矩阵,环境数据组成6 × 100维环境数据矩阵(张金屯等, 2008)。

以重要值表现群落中各物种的优势度指标,指示其在群落中的功能地位。

(1) 树木重要值 $IV_{tree} = (\text{相对覆盖度} + \text{相对显著度} + \text{相对高度})/300$

(2) 灌木重要值 $IV_{shrub} = (\text{相对覆盖度} + \text{相对高度})/200$

(3) 草本重要值 $IV_{herb} = \text{相对覆盖度}/100$

通过挖取剖面测量土壤厚度,采用电位法测定土壤pH值;每个样方(10 m × 10 m)的海拔取其4顶点的海拔平均值;随机取4顶点中的3个构成平面,组成4个不同的平面,其与样方投影水平面夹角的平均值为样方坡度,与正北方向偏差角度的平均值为样方坡向值;坡位采用凹凸度(convexity)的算法,由CTFS package进行计算(Valencia et al, 2004; 赖江山等, 2010)。

1.2 自组织映射和数据匹配

自组织特征映射网络是一种通过与神经网络相似的权值调整方法,将高维数据点降维有序地映射到二维网格上实现低维可视化的方法(杨黎刚, 2007)。该算法通过降低数据排序的维数来将高度非线性关系转化为简单的几何关系。已有研究表明基于SOM的数据排序和聚类适用于高度复杂和非线性的数据(Kim et al, 2012)。

SOM的网络结构由输入和输出两层组成,它们之间的连接由权重向量确定,权重向量与层的每个节点完全关联。当训练数据被输送到网络时,计算所有加权向量的欧几里德距离。与权重最接近的神经元被称为最佳匹配单位(BMU)。BMU的相应加权向量根据邻近的神经元进行更新和调整,其更新强度由于学习速率的降低而衰减。

在模型DBH训练中,最终选择符合最小量化和地形误差的SOM进行数据集中生态特征的聚类和模式化。根据基于色度对比度表示数据单元之间的欧几里德距离的U矩阵,通过K均值法进行聚类分析。随后,簇的数量由聚类分类集合之间的欧几里德距离确定。特别是在评估聚类的有效性时,聚类性能度量指标中的外部指标将聚类结果与参考模型结合进行比较。根据Davies-Bouldin指数(DBI)来确定,指数越小,聚类效果越好(Lu et al, 2014):

$$DBI = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{j \neq i} \left(\frac{\text{avg}(C_i) + \text{avg}(C_j)}{d_{cen}(\mu_i, \mu_j)} \right) \quad (1)$$

SOM的分类和排序在MATLAB 6.1平台上使用SOM工具箱(SOM Toolbox)通过编程完成。不同树种对其生存的环境条件的适应性不尽相同,在排序图上则表现为每个树种都有各自的分布中心和分布区域,根据环境聚类图把适宜分布区域对应到环境,就可以知道不同的环境因子对群落格局影响的大小(Li et al, 2018)。

1.3 多元回归树修正

多元回归树(MRT)以自变量为分类节点,将环境因子梯度作为分类节点,利用二歧式分割法,将样方划分为尽可能同质的类别(De'Ath, 2002)。采用多元回归树交叉验证来确定秤锤树野生群落SOM分类结果,将分类结果展示在100个样方分布图上,并对分类结果进行必要的修正。运用多元回归树法使得两个节点内部样方的差异尽量小,节点间样方

的差异尽量大, 然后对划分出来的两组样方采用同样的划分方法重复这一过程, 直到得到的分割结果满足条件或不能再分割为止。利用交叉验证对SOM分类结果进行剪枝, 以获得大小适合的回归树。MRT采用R语言中的mvpart程序包进行函数运算(谢益辉等, 2007)。

2 结果

2.1 群落分类

数据集的矢量分量被聚类在包含100个输出神经元的SOM平面上, 最终确定为5个聚类群(图3), 其中, 野生秤锤树群落和周围环境因子除了顶部优势外, 其余分布较为均匀。

依据K均值聚类规则和DBI指数划分的5块区

域对应了5个不同的群落类型(图4a), 通过微调获得野生秤锤树群落的5个植被群丛(图4b), 并依据群落生境特征的指示种和优势种命名群丛类型。

考虑到秤锤树在1 ha样地内空间分布的连续性, 图5B是图5A修正后的样方分布图。

具体群落分类结果如下:

(1)群落I: 群落主体由朴树(*Celtis sinensis*) + 刺槐(*Robinia pseudoacacia*)(乔木层) - 老鸦柿(*Diospyros rhombifolia*) + 野蔷薇(*Rosa multiflora*)(灌木层) - 苦竹(*Pleioblastus amarus*) + 贯众(*Dryopteris crassirhizoma*)(草本层)构成, 含有27个样方。朴树是群落的建群种, 该群落地势陡峭, 海拔在200-210 m, 群落土壤厚度达51-53 cm, 养分肥沃, 以大树居多。

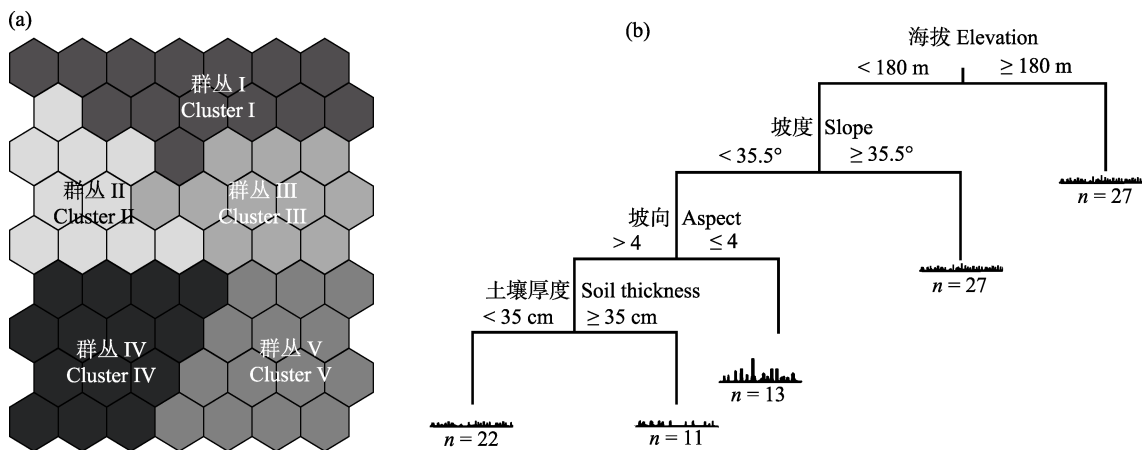


图3 自组织特征映射网络中的聚类模式(a)和按不同因子分类的层次聚类结构(b)

Fig. 3 The clustering pattern in the self-organizing maps (a) and the hierarchical clustering structure according to different factors (b)

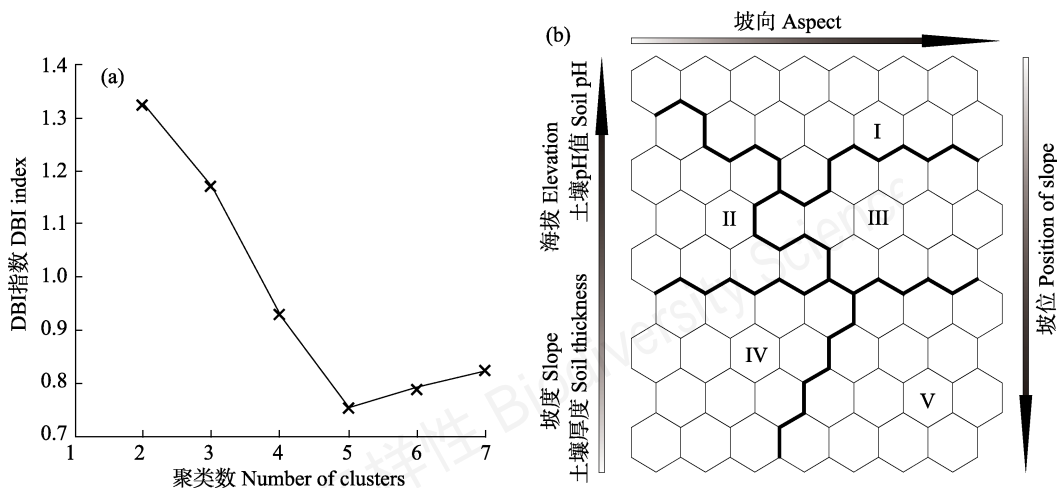


图4 聚类算法评价指标Davies-Bouldin指数(DBI) (a)和秤锤树群落类型与其环境的关系(b)

Fig. 4 Clustering algorithm evaluation index Davies-Bouldin index (DBI) (a) and comparison of relationships among clusters and environmental variables (b)

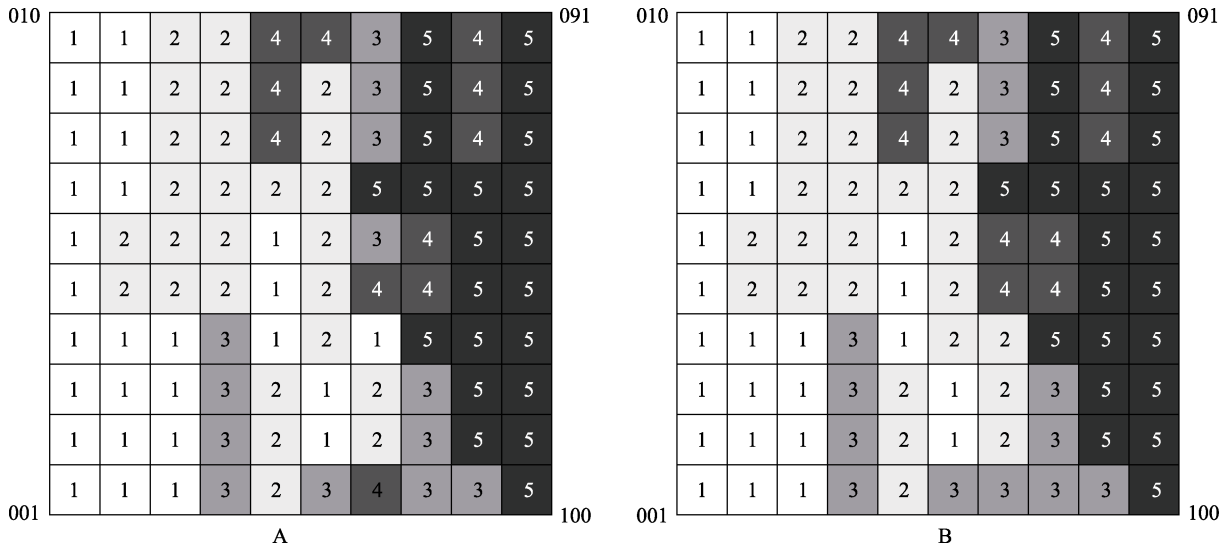


图5 秤锤树1 ha样地5类群丛的100个10 m × 10 m的样方分布图。A: 修正前; B: 修正后。

Fig. 5 Map of the five associations at the scale of 10 m × 10 m in the 1 ha *Sinojackia xylocarpa* plot. A: Original; B: Revised.

(2)群落II: 群落主体由马尾松(*Pinus massoniana*) + 榆树(*Ulmus pumila*)(乔木层) - 山胡椒(*Lindera glauca*) + 秤锤树(灌木层) - 小果蔷薇(*Rosa cymosa*) + 木防己(*Cocculus orbiculatus*)(草本层)构成, 含有27个样方。马尾松是群落的建群种, 该群落西北坡向, 地形斜坡, 乔灌木三层分明, 盖度为30–40%。

(3)群落III: 群落主体由黄檀(*Dalbergia hupeana*) + 黄连木(*Pistacia chinensis*)(乔木层) - 白檀(*Symplocos paniculata*) + 茶条槭(*Acer ginnala*)(灌木层) - 井栏边草(*Pteris multifida*) + 小果菝葜(*Smilax davidiana*)(草本层)构成, 含有13个样方。黄檀是群落的建群种, 该群落地处半阳坡, 林间郁闭度不高, 灌木盖度40–50%。

(4)群落IV: 群落主体由秤锤树 + 白栎(*Quercus fabri*)(乔木层) - 柘树(*Cudrania tricuspidata*) + 狭叶山胡椒(*Lindera angustifolia*)(灌木层) - 卵叶糙苏(*Phlomis umbrosa*) + 海金沙(*Salvia japonica*)(草本层)构成, 含有11个样方。秤锤树是建群树种, 该群落土壤厚度适中, 地处阳坡。

(5)群落V: 群落主体由化香(*Platycarya strobilacea*) + 短柄枹(*Quercus glandulifera*)(乔木层) - 八角枫(*Alangium chinense*) + 垂珠花(*Styrax dasyanthus*)(灌木层) - 求米草(*Oplismenus undulatifolius*) + 明党参(*Changium smyrnioides*)(草本层)构成, 含有22个样方。建群种是化香, 群落郁闭度高, 灌木的盖度达到70–80%, 海拔115–120 m。

2.2 群落类型和环境因子的关系

SOM排序空间的环境变化梯度以SOM单元对应的各环境因子平均值来表现, 颜色越深则环境因子的平均值越大。在排序图(图6)中可见环境因子的变化, 海拔从下到上逐渐增高; 坡度从左到右逐渐减小, 坡度变缓; 坡位从下坡位变为上坡位; 坡向从左到右逐渐变阴, 但其梯度显著度不如前三个环境因子; 土壤厚度与pH值的最大值分别列于排序图的左上角与右上角, 两者的变化梯度均不显著。由此可见, 海拔、坡度和坡度是影响秤锤树野生群落空间分布的主要环境因子。

群落类型分布和环境因子的梯度变化结果表明, 排序图纵轴由下至上主要表达了生境条件由暖干向冷湿方向变化的综合梯度, 揭示了海拔的垂直变化以及凋落物层厚度、土壤pH值和坡位的变化; 横轴由左至右反映了坡度逐渐变缓、坡向向阳的趋势, 两个梯度综合表达了野生秤锤树群落空间分布的环境变化。

2.3 物种排序

对秤锤树野生群落主要优势种的分布排序结果表明(图7), 群落中优势种的分布格局与相对应的群落类型的分布格局相似性较高, 5个群丛的分布中心与以其为优势种的群落位置一致。

在5个群落中, 除群丛I外, 秤锤树在所有群落随海拔高度增加而逐渐稀疏直至消失, 其所在群

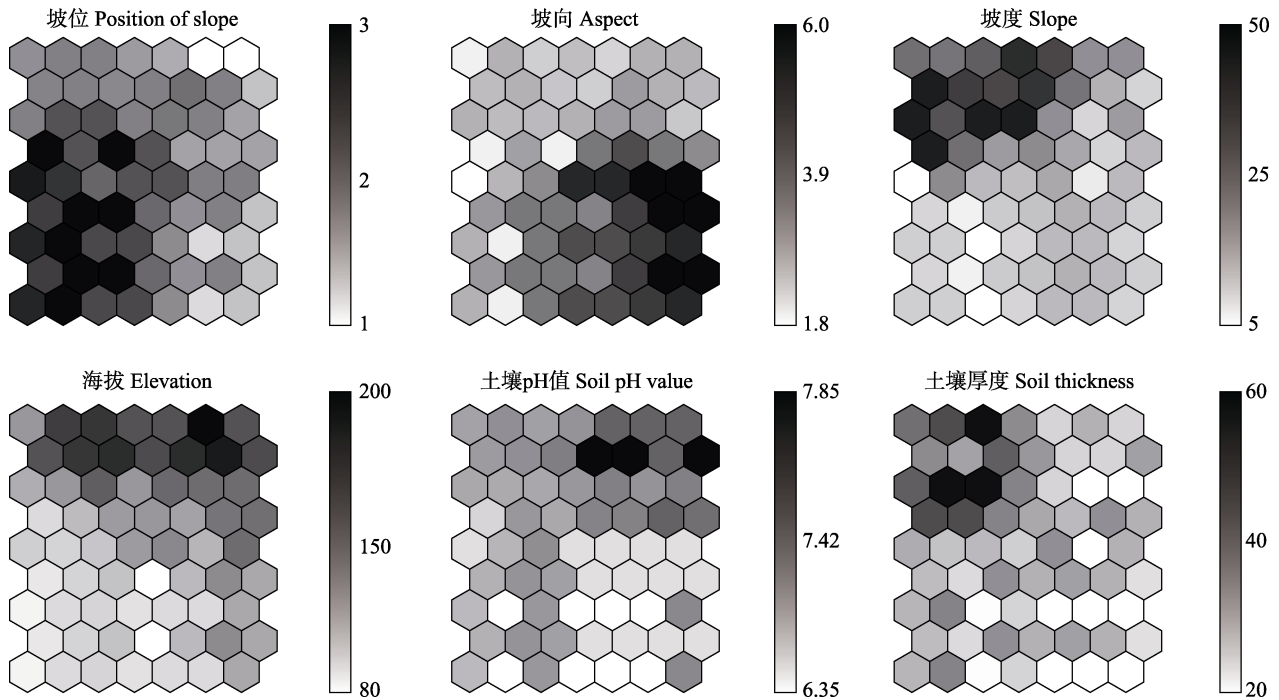


图6 环境因子在自组织特征映射网络的排序空间

Fig. 6 Visualization of environmental variables on the trained self-organizing map (SOM) ordination diagram in gray scales

落优势种的分布在不同海拔上出现分化, 即: 高海拔群落以朴树、黄连木和马尾松为优势种, 伴生老鸦柿和苦竹; 低海拔区域则主要以秤锤树、化香和黄檀为优势种, 伴生贯众、野蔷薇和海金沙。同时, 榆树、刺槐和井栏边草几乎出现在所有5种群丛中, 说明这三种植物分布均匀, 适应性很强。

3 讨论

秤锤树为喜阳树种, 且较一般落叶树种耐寒性更强, 主要分布在地阳坡下位, 其群落结构除了受物种自身特性影响以外, 还受多种非生物环境因素如温度、水分、土壤养分、海拔等的影响, 其中海拔是各种非生物因子的综合体现(Sieben et al, 2017)。由于秤锤树种子外表皮木栓层坚硬, 不易萌发, 林下幼苗的分布与土壤含水量和土层厚度密切相关, 且夏季汛期的地表径流对正在果期的秤锤树有种子传播作用, 种群演替对坡位、土壤排水能力和土壤厚度要求较高, 因而通常只在下坡位以及很少的中等坡位有分布。为研究南京老山野生秤锤树的群落结构和环境因子之间的关系, 本研究采用自组织特征映射网络对复杂的影响因素进行分类排序, 并采用群落的优势树种命名植被类型。研究结果表明, 100个样方被分为5种群丛, 各类型在拓扑

排序图上界限明确, 并且有不同的分布范围和优势种, 各个群丛的分布也有很明显的界限, 说明排序结果可以较好地反映不同群落之间的生态关系, 该分类结果是合理的。

为了进一步探究该分类结果中各群落分布与复杂的环境因子之间的关系, 将环境因子在拓扑图上进行排序, 发现海拔、土壤厚度、坡度、坡位是影响秤锤树群落空间分布的主要环境因子, 其中海拔和土壤厚度可能是影响秤锤树分布的关键因素。究其原因, 可能与海拔高度直接影响水热等气候因子有关。海拔较高的地区由于坡度大、土层薄, 水分流失快, 土壤受到冲刷而较为瘠薄, 因而对植物的适应性要求较高, 不利于秤锤树种子萌发, 导致种群更新困难。同时, 坡位、坡向等因素也会影响水热资源的分配, 从而使不同海拔高度下种群的优势种差异明显, 如朴树、黄连木、老鸦柿等比较适合海拔较高的环境, 是群丛I和II的主要优势种; 而秤锤树、柘树、贯众等要求较为湿润温暖、土层较厚的环境, 因而在较低海拔地区形成优势种。特别的, 马尾松和化香树等喜阳植物受坡向影响较大, 其分布中心的坡向为西南坡向, 能够接受到最多的日光照射; 而以苦竹和黄檀为优势种的群落则受坡位影响明显, 主要分布在中坡位的半阳面, 同时还

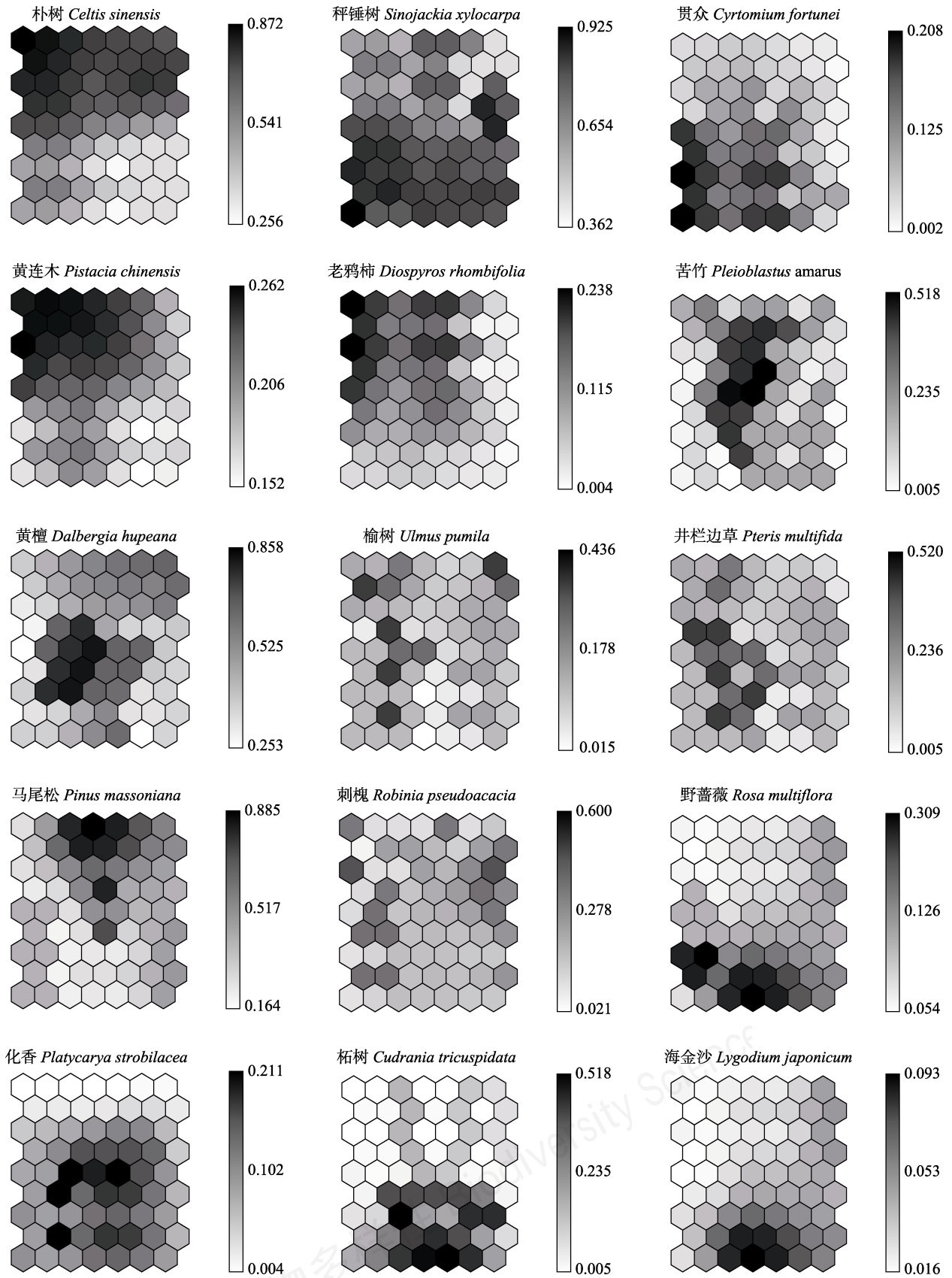


图7 优势种在自组织特征映射网络(SOM)排序图上的梯度分布

Fig. 7 Gradient distributions of dominant species in the trained self-organizing map (SOM) ordination diagram in gray scales

受土壤因子影响,与野生秤锤树群落的生存空间有竞争趋势。另外,贯众、海金沙和井栏边草等在群落中生境相同和重叠,是群落主要的阴生蕨类植物,对水分和土壤要求较高,上坡位难以满足它们温暖潮湿、腐殖质较多的生境条件。

秤锤树野生种群分布区狭窄,受人为干扰程度大,在自然条件下其木质化种皮导致种子萌芽率极低,只有通过流水冲刷的机械性破损才能发芽(王世彤等, 2018),较高的环境压力和自身的种子生理特性是其种群日益缩减、面临濒危的主要原因。由于秤锤树在模式标本产地(南京幕府山)和原有标本记录产地均无野生种群分布,因此,南京老山国家森林公园内发现的野生种群对该物种的种质遗传资源保存具有重要意义。通过对老山的秤锤树群落空间结构和环境因子的研究,明确了秤锤树生存的独特环境结构,对维持其野生种群的幼苗更新和居群规模增长具有重要作用,为进一步研究秤锤树种群的濒危机制、制定保护策略和种质资源开发利用提供参考依据。

参考文献

- Chen RB, Zhang GF, Liu J, Li S (2015) Endangerment grade and protection priority of rare plant species in Baohuashan National Forest Park, Jiangsu Province. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 31, 174–179. (in Chinese with English abstract) [陈瑞冰, 张光富, 刘娟, 李硕 (2015) 江苏宝华山国家森林公园珍稀植物的濒危等级及优先保护. *生态与农村环境学报*, 31, 174–179.]
- Condit R (1998) *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and Comparison with Other Plots*. Springer, Berlin.
- De'Ath G (2002) Multivariate regression trees: A new technique for modeling species–environment relationships. *Ecology*, 83, 1105–1117.
- Ding H, Fang YM, Yang XH, Yuan FY, He LH, Yao JF (2016) Community characteristics of a subtropical evergreen broad-leaved forest in Huangshan, Anhui Province, East China. *Biodiversity Science*, 24, 875–887. (in Chinese with English abstract) [丁晖, 方炎明, 杨新虎, 袁发银, 何立恒, 姚剑飞 (2016) 黄山亚热带常绿阔叶林的群落特征. *生物多样性*, 24, 875–887.]
- Hao RM, Huang ZY, Liu XJ, Wang ZL, Xu HQ, Yao ZG (2000) The natural distribution and characteristics of the rare and endangered plants in Jiangsu, China. *Chinese Biodiversity*, 8, 153–162. (in Chinese with English abstract) [郝日明, 黄致远, 刘兴剑, 王中磊, 徐惠强, 姚志刚 (2000) 中国珍稀濒危保护植物在江苏省的自然分布及其特点. *生物多样性*, 8, 153–162.]
- 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.
- Kim DK, Jeong KS, Chang KH, La GH, Joo GJ, Kim HW (2012) Patterning zooplankton communities in accordance with annual climatic conditions in a regulated river system (Nakdong River, South Korea). *International Review of Hydrobiology*, 97, 55–72.
- Lai JS, Mi XC, Ren HB, Ma KP (2010) Numerical classification of associations in subtropical evergreen broad-leaved forest based on multivariate regression trees—A case study of 24 hm² Gutianshan forest plot in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 761–769. (in Chinese with English abstract) [赖江山, 米湘成, 任海保, 马克平 (2010) 基于多元回归树的常绿阔叶林群丛数量分类——以古田山24公顷森林样地为例. *植物生态学报*, 34, 761–769.]
- Li D, Monahan W B, Baiser B (2018) Species richness and phylogenetic diversity of native and non-native species respond differently to area and environmental factors. *Diversity & Distributions*, 24, 853–864.
- Li LF, Zhang JT, Zhou L, Shao D (2014) Application of self-organizing feature map to classification and ordination of *Picea wilsonii* forest in Luya Mountain Nature Reserve. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(5), 1–7. (in Chinese with English abstract) [李林峰, 张金屯, 周兰, 邵丹 (2014) 自组织特征映射网络在芦芽山自然保护区青杆林分类和排序中的应用. *林业科学*, 50(5), 1–7.]
- Lu K, Wang Q, Xue J, Pan WG (2014) 3D model retrieval and classification by semi-supervised learning with content-based similarity. *Information Sciences*, 281, 703–713.
- Meng XY (2006) *Forest Mensuration*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese with English abstract) [孟宪宇 (2006) 测树学. 中国林业出版社, 北京.]
- Olawayin R, Nieto A, Grayson RL, Hardisty F, Oyewole S (2013) Application of artificial neural network (ANN)–self-organizing map (SOM) for the categorization of water, soil and sediment quality in petrochemical regions. *Expert Systems with Applications*, 40, 3634–3648.
- Park YS, Kwak IS, Chon TS, Kim JK, Jorgensen SE (2001) Implementation of artificial neural networks in patterning and prediction of exergy in response to temporal dynamics of benthic macroinvertebrate communities in streams. *Ecological Modelling*, 146, 143–157.
- Sieben EJJ, Kotze DC, Job NM, Muasya AM (2017) The sclerophyllous wetlands on quartzite substrates in South Africa: Floristic description, classification and explanatory environmental factors. *South African Journal of Botany*, 113, 54–61.
- Valencia R, Foster RB, Villa G, Condit R, Svenning JC (2004) Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: Large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, 92, 214–229.

- Wang ST, Wu H, Liu MT, Zhang JX, Liu JM, Meng HJ, Xu YZ, Qiao XJ, Wei XZ, Lu ZJ, Jiang MX (2018) Community structure and dynamics of a remnant forest dominated by a plant species with extremely small population (*Sinojackia huangmeiensis*) in central China. *Biodiversity Science*, 26, 749–759. (in Chinese with English abstract) [王世彤, 吴浩, 刘梦婷, 张佳鑫, 刘检明, 孟红杰, 徐耀粘, 乔秀娟, 魏新增, 卢志军, 江明喜 (2018) 极小种群野生植物黄梅秤锤树群落结构与动态. *生物多样性*, 26, 749–759.]
- Xie YH (2007) The application of the classification and re-gression tree based on the package rpart in R-languague. *Statistics & Information Forum*, 22(5), 67–70. (in Chinese with English abstract) [谢益辉 (2007) 基于R软件rpart包的分类与回归树应用. *统计与信息论坛*, 22(5), 67–70.]
- Yang LG, Su HY, Zhang Y, Chu J (2007) A method of date mining based on SOM clustering and its application. *Computer Engineering & Science*, 29(8), 133–136. (in Chinese with English abstract) [杨黎刚, 苏宏业, 张英, 褚健 (2007) 基于SOM聚类的数据挖掘方法及其应用研究. *计算机工程与科学*, 29(8), 133–136.]
- Zhang CP, He P, Ji CH, Zhang ZY, Hu SJ, Gao S, Li JH (2007) A study on the numerical classification and ordination of medicinal conservation plant *Fagopyrum cymosum* communities in eastern Chongqing. *Journal of Southwest University*, 29, 107–113.
- Zhang JT, Meng DP, Xi YX (2008) Ordination of self-organizing feature map neural network and its application in the study of plant communities. *Journal of Beijing Forestry University*, 30(1), 1–5. (in Chinese with English abstract) [张金屯, 孟东平, 席跃翔 (2008) 自组织映射神经网络排序及其在植物群落分析中的应用. *北京林业大学学报*, 30(1), 1–5.]
- Zhang QD, Zhang JT, Suri GG, Zhang B, Cheng JJ, Tian SG (2011) Self-organizing feature map classification and ordination of *Larix principis-rupprechtii* forest in Pangquangou Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 2990–2998. (in Chinese with English abstract) [张钦弟, 张金屯, 苏日古嘎, 张斌, 程佳佳, 田世广 (2011) 庞泉沟自然保护区华北落叶松林的自组织特征映射网络分类与排序. *生态学报*, 31, 2990–2998.]

(责任编辑: 米湘成 责任编辑: 黄祥忠、周玉荣)

附录 Supplementary Material

附录1 自组织特征映射网络的基本架构

Appendix 1 Basic architecture and learning process of self-organizing map
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018019-1.pdf>

附录2 群落分类群组的变量和类型

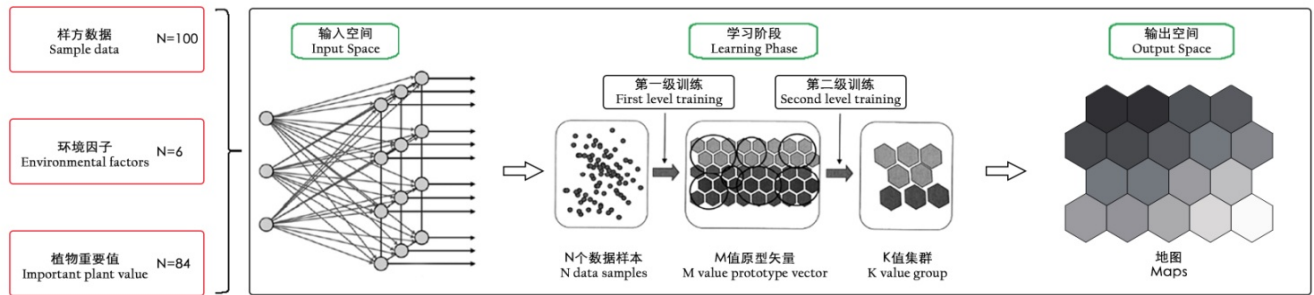
Appendix 2 Type variables and classification of community groups
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018019-2.pdf>

附录3 秤锤树生境概况

Appendix 3 Overview of *Sinojackia xylocarpa* habitat
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018019-3.pdf>

附录1 自组织特征映射网络的基本架构

Appendix 1 Basic architecture and learning process of self-organizing map



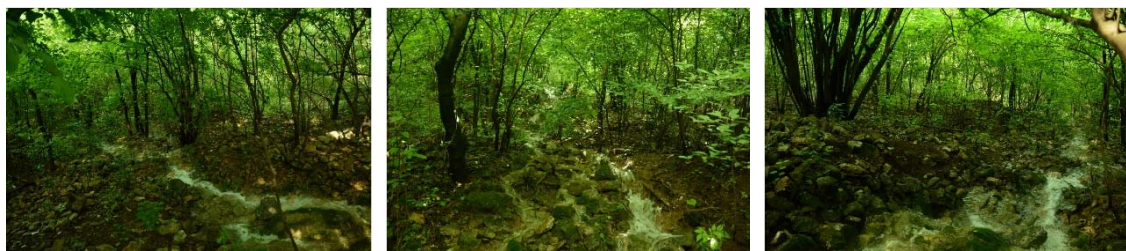
附录2 群落分类群组的变量和类型

Appendix 2 Type variables and classification of community groups

类型 Type	所在样方优势树种 Dominant tree species	坡位 Position of slope	坡向 Aspect	坡度 Slope	土壤pH值 Soil pH value	土壤厚度 Soil thickness (cm)	海拔 Elevation (m)
I	朴树 <i>Celtis sinensis</i>	上坡	东北	陡坡	7.27	52.33	205
II	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	下坡	西北	斜坡	6.85	48.11	156
III	黄檀 <i>Dalbergia hupeana</i>	中坡	西南	微斜坡	7.57	40.28	158
IV	秤锤树 <i>Sinojackia xylocarpa</i>	上坡	南坡	缓斜坡	7.32	37.44	174
V	化香 <i>Platycarya strobilacea</i>	中坡	南坡	缓斜坡	7.17	28.51	117

附录3 秤锤树生境概况

Appendix 3 Overview of *Sinojackia xylocarpa* habitat



a. 秤锤树野生群落生境
Habitat of wild *Sinojackia xylocarpa*

b. 秤锤树野生群落夏季的地表径流
Surface runoff of wild *Sinojackia xylocarpa* in summer

c. 丛生灌木状的秤锤树
Bushy shrub *Sinojackia xylocarpa*



•研究报告•

岩溶洞穴苔藓群落特征及其对重金属污染的指示意义：以贵州织金洞为例

刘润^{1,2} 张朝晖^{1,2*} 申家琛^{1,2} 王智慧³

1 (贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001)

2 (贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001)

3 (贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550001)

摘要: 岩溶洞穴的开发与利用导致的重金属污染严重威胁洞穴环境及地下水, 因此对洞穴环境的监测具有重要的现实意义。本文通过对典型的暗河型溶洞贵州织金洞内的苔藓群落特征及其重金属污染状况进行研究, 拟揭示苔藓群落对洞穴重金属污染的指示意义。共发现苔藓群落类型34个, 苔藓植物种类20科33属49种, 含苔类8科8属12种, 藓类12科25属37种。优势科为丛藓科、凤尾藓科和提灯藓科, 物种占比率分别为16%、14%、14%。Hg污染超标倍数最高达59.45倍, 在距洞口不同深度均远高于Cr和Zn, 说明洞内Hg污染较为严重。苔藓群落指标随着重金属污染含量的上升总体呈下降趋势。所测定的重金属中基质Hg含量与苔藓群落指标的拟合程度最好, 与其对应的苔藓群落指标均呈显著负相关关系($P < 0.05$), 说明苔藓群落特征能够很好地反映洞内Hg污染的变化趋势。RDA排序结果分析表明: 洞穴苔藓群落为适应低光度环境会表现出向光性运动、喜钙生基质、耐重金属等生理特征。蛇苔(*Conocephalum conicum*)植物体内的Hg含量与其基质Hg含量具有显著相关性($P < 0.05$), 说明蛇苔受基质Hg污染影响较大。在今后的治理过程中, 可以考虑将蛇苔作为洞内环境的生物监测材料之一。

关键词: 织金洞; 苔藓群落; 重金属; 监测

Community characteristics of bryophyte in Karst caves and its effect on heavy metal pollution: A case study of Zhijin Cave, Guizhou Province

Run Liu^{1,2}, Zhaohui Zhang^{1,2,*}, Jiachen Shen^{1,2}, Zhihui Wang³

1 Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001

2 State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001

3 School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001

Abstract: Heavy metal pollution caused by the development and utilization of Karst caves seriously threatens the cave environment and groundwater. Understanding the pollution dynamics has important practical significance for monitoring the cave environment. Here, the characteristics and heavy metals of the bryophytes in a typical Dark River Cave, Zhijin Cave, in Guizhou province were studied to explore the effect of the bryophyte community on cave pollution. A total of 34 types of bryophyte communities were observed, representing 49 taxa of bryophytes (12 of liverworts, 37 of mosses) in 33 genera (8 of liverworts, 25 of mosses) and 20 families (8 of liverworts, 12 of mosses). The dominant families were Pottiaceae, Fissidentaceae and Mniaceae, comprising 16%, 14%, and 14% of all taxa, respectively. Mercury (Hg) levels were up to 59.45, much higher than Cr and Zn, which indicates that Hg is the most serious pollutant in caves. The bryophyte community index showed a decreasing trend with an increase in heavy metal pollution. The Hg content of the measured heavy metals was significantly negatively correlated with its corresponding bryophyte community indices ($P < 0.05$), which indicates that the bryophyte community characteristics can accurately reflect the level of Hg pollution within a cave. The RDA sequencing results showed that bryophyte

收稿日期: 2018-04-12; 接受日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(31360043; 31760043; 31760050)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: academiclife@126.com

communities in Karst caves adapt to low photometric environment and thus exhibit photopic movement, grow well in Ca substrate and are resistant to heavy metals. The Hg content in the *Conocephalum conicum* was significantly correlated with its substrate Hg content ($P < 0.05$). This shows that *C. conicum* is affected by the substrate Hg pollution. In the future, *C. conicum* can be used as one of the biomonitoring materials for cave environments.

Key words: Zhijin Cave; bryophyte community; heavy metals; monitoring

岩溶洞穴是一类特殊的自然景观, 极具观赏和游览价值。近年来, 岩溶洞穴资源被不断开发, 人类活动的频繁加剧了洞穴环境的恶化。由于岩溶洞穴的脆弱性和低自净能力, 一旦遭受污染就很难恢复(魏兴萍等, 2014)。其中, 重金属污染是洞穴环境恶化的主要原因之一, 它不仅会危害环境, 而且会积累在人体中, 阻碍大脑和神经系统发育(Toth et al, 2016)。通常, 岩溶洞穴与地下水是相通的, 污染物会通过渗透、淋溶等方式危及到地下水。同时, 洞穴重金属污染也会对洞穴生物群落构成威胁, 如: (1)洞穴物种多样性减少; (2)物种繁殖受阻; (3)群落稳定性降低等。因此, 对洞穴重金属进行监测对保护洞穴生物群落具有重要意义。

目前, 已有一些关于用动物群落监测洞穴重金属污染的研究(杨卫诚和黎道洪, 2010; 徐承香等, 2013), 而用植物群落监测洞穴环境的研究在国内还鲜有报道。相比于动物群落, 植物群落具有更加稳定的优势, 可以对环境变化实行定点监测, 采样和监测工作也更加简单、便捷。一些植物类群如苔藓, 对环境变化具有较高的敏感性, 常常被作为环境监测的生物指标(Giordano et al, 2013; Foan et al, 2015)。不仅如此, 苔藓植物还对恶劣环境有很强的适应性, 在一些植物覆盖率低、污染严重的区域如矿区(龙朝波和张朝晖, 2016)、石漠化地区(申家琛等, 2017)、道路(Mazur et al, 2013)等环境中也常用苔藓植物作为生态监测材料。

本文以贵州织金洞入口处为研究地点, 同时结合前人对岩溶洞穴环境的研究, 选取洞内可能存在的重金属污染元素Zn、Cr和Hg为监测对象。通过野外调查和室内研究相结合, 一方面可弥补织金洞世界地质公园苔藓植物类群数据的空白; 另一方面, 通过研究苔藓群落结构对重金属污染的响应特征, 探索苔藓群落对洞穴重金属污染的指示作用及其在重金属监测和评价方面的价值, 为环保监测部门积累基础资料。

1 材料与方法

1.1 区域概况

织金洞位于贵州省织金县官寨苗族乡内, 地处 $26^{\circ}38'31''-26^{\circ}52'35''$ N, $105^{\circ}44'42''-106^{\circ}11'38''$ E, 是典型的暗河型溶洞。洞内岩溶地下水丰富, 主要发育有织金洞古暗河系统和现代打铁洞暗河系统(李景阳等, 1991)。全洞长12.1 km, 总面积70多万 m^2 。洞内地质构造复杂, 平均气温 $15^{\circ}C$, 相对湿度93%, 植被覆盖率低, 仅入口分布有大量的苔藓植物、蕨类植物和少量的草本、灌木植物。在织金洞旅游局的管理下, 洞内植物很少受到人为破坏。洞内苔藓植物主要分布于从入口至洞内82 m范围内, 出口门坎带也有少量分布。本研究主要在苔藓分布较为集中的入口处开展。

1.2 样品采集

于2017年9月, 在织金洞距入口不同深度(80 m、60 m、40 m、20 m、0 m)设置5个 $5 m \times 5 m$ 样点, 每个样点按照洞内环境特征随机设定 $10 cm \times 10 cm$ 重复样方数个, 样点信息见表1。此外, 按照实际情况在出口分布有苔藓植物的地方设置2个样点共10个样方, 以补充织金洞苔藓物种数据。采集样方内全部苔藓和部分基质, 将每个样方内的全部苔藓记为一个群落, 利用优势种原则为群落命名(张朝晖和Pentecost, 2002)。采集时, 每个样点均用数字照度计(PM6612L, 华谊联表)测定光照强度; 手持式空气温湿度计(HT-635, 广州宏诚科技)测定洞内空气温湿度; 手持式激光测距仪(SW-1500A, 深达威)测量距洞口距离。样方内每项指标测定3次, 取平均值。详细记录每个样地的海拔、坡度、坡向、盖度等详细生境信息, 共采集苔藓及基质样品各50份。

1.3 样品处理

将采回的标本分类整理, 并根据经典形态学分类方法进行鉴定。使用HWG-1型双筒解剖镜以及SMARTe-320型光学显微镜结合《中国苔藓志》第2

表1 织金洞内5个样点的生境信息及苔藓群落特征

Table 1 Habitat and bryophyte community diversity of five plots in Zhijin Cave

距入口深度 Distance to entrance	样点描述 Plot description	样方数 No. of plots	Ca含量 Ca content (mg/kg)	光照 Light (lux)	坡度 Slope	pH	湿度 Humidity (%)	温度 Temperature (°C)
80 m	洞壁钙华基质; 阴湿 Cave wall travertine matrix; wet and damp	9	760,805	7.21	20°	7.7	87.1	14.1
60 m	石上薄土; 阴湿 Thin soil on the stone; wet and damp	8	668,208	19.25	30°	7.8	96.4	13.2
40 m	湿石灰土; 入口大厅最平缓处 Wet lime soil; the most gentle place in the entrance hall	7	284,183	36.95	6°	8.0	97.0	13.7
20 m	入口缓坡 Entrance slope	8	454,343	120.5	35°	8.1	96.4	14.8
0 m	入口内外10 m范围内陡坡 Steep slope within 10 m inside and outside the entrance	8	294,232	627	50°	7.9	83.1	16.9

卷、第4卷、第6–8卷(高谦, 1996; 吴鹏程, 2002; 吴鹏程和贾渝, 2004; 胡人亮和王幼芳, 2005; 黎兴江, 2006)及《中国苔纲和角苔纲植物属志》(高谦和吴玉环, 2010)等对苔藓植物进行鉴定。苔藓及其基质以样点内所采集样方按四分法混合均匀后自然烘干、磨细、过筛待测。对于采集的苔藓植物样品, 除去多余杂物后用去离子水洗净后烘干、研磨, 每个样品准确称取0.3 g用于消解。

基质pH值用2.5:1水土悬液磁力搅拌, 采用玻璃电极法测定(上海虹益仪器仪表有限公司)。苔藓基质含量Cr、Zn和Ca采用HNO₃-HClO₄-HF混酸法消解, 电感耦合等离子体发射光谱(美国Perkin Elmer公司)测定。基质Hg含量用王水(50%)水浴消解法浸提, 苔藓Hg含量用高压密闭罐消解, AFS-230E双道原子荧光光度计(北京海光仪器公司)测定。实验所用硝酸、盐酸、氢氟酸、高氯酸均为优级纯, 30%过氧化氢和硫脲为分析纯, 分析用水均为超纯水。苔藓植物及基质含量在测定过程中分别采用柑橘叶标准物质(GSB-11)和国家标准物质(GSS-5、GSS-8、GSS-25、GSS-11)进行质量控制。同时设定全程序样品空白和20%平行双样, 检测误差要求在10%以内。所有测试工作在贵州师范大学分析测试中心完成。

1.4 数据分析

以盖度代替个体数分别计算研究区域各样点苔藓群落多样性指标(Mario & Bitetti, 2000; Amaral et al, 2013):

$$\text{Patrick丰富度指数: } D = Q \quad (1)$$

Shannon-Wiener多样性指数:

$$H' = -\sum_{i=1}^m (p_i \times \ln p_i) \quad (2)$$

式中, Q 表示样地中的物种/群落数目, $p_i = N_i/N$, N_i 为第*i*个物种的个体数, N 为全部种的个体总数。

以相对盖度和相对频度计算苔藓群落的重要值、生态优势度以及生态位宽度(刘荣相等, 2009)。重要值用于反映群落的地位和作用; 生态优势度是综合群落中各群落重要性, 用以反映群落结构特征的度量值(彭少麟, 1987); 生态位宽度是评价群落对资源获取和利用状况的尺度, 生态位宽度越大, 表明对环境的适应能力越强(徐晟翀等, 2006)。

$$\text{重要值: } IV = (\text{相对盖度} + \text{相对频度})/200 \quad (3)$$

$$\text{生态优势度: } C = \sum_{i=1}^s \left(\frac{IV_i}{IV} \right)^2 \quad (4)$$

$$\text{生态位宽度(Levens): } B_i = 1 / \sum_{j=1}^n p_{ij}^2 \quad (5)$$

式中, 相对盖度或频度指某一种的盖度或频度占全部种盖度或频度的百分比, s 为样地内群落个数, IV_i 为群落*i*的重要值, IV 为群落中所有群落的重要值之和, P_{ij} 为群落*i*在*j*个资源状态下的盖度占该群落所有盖度的比例, B_i 的范围为1– n 。

以实测基质重金属含量计算距洞口不同深度的各重金属元素污染超标倍数, 计算公式为:

$$P_i = (C_i - S_i) / S_i \quad (6)$$

式中, C_i 为苔藓基质重金属含量实测值, S_i 为该重金属的背景标准值。本研究背景标准值采用贵州省土壤背景值(国家环境保护局, 1990)。

数据的差异性检验在SPSS 21.0里完成; 多样性数据的统计分析用R语言的Vegan包进行(郭水良等, 2015); 图表的绘制采用Excel 2016和Origin 9.0;

RDA分析过程在CANOCO 5.0软件中进行。

2 结果

2.1 苔藓植物群落特征

对织金洞内苔藓群落进行统计分析,共发现苔藓群落类型34种。为进一步解释洞内苔藓群落分布特征,我们分别计算了各群落类型的重要值、生态优势度和生态位宽度(表2)。其中尖叶美喙藓群落在这3项指标中均占据最大值(分别为1.62、0.0975、3.56),说明尖叶美喙藓群落在织金洞内占有重要的生态地位,对洞穴环境具有较大的生态适应范围。这3项指标较高的还有鳞叶凤尾藓群落(*Fissidens taxifolius* Com.) (分别为1.06、0.0635、2.56)、小凤尾藓群落(*F. bryoides* Com.) (分别为0.86、0.0515、2.42)、蛇苔群落(*Conocephalum conicum* Com.) (分别为0.71、0.0425、2.57)和粗肋凤尾藓群落(*F. laxus* Com.) (分别为1.03、0.0620、2.49)。

对洞内苔藓物种进行统计,共发现苔藓植物种类20科33属49种,其中苔类8科8属12种,藓类12科25属37种。优势科为丛藓科、凤尾藓科和提灯藓科,物种所占比例分别为16%、14%、14%。此外,实地考察发现,凤尾藓科群落对生长环境的要求具有很大的相似性,该科物种在洞内石壁上具有较为广泛的分布,并且相比生长于洞穴外部的凤尾藓科群落,生长于洞穴内部的群落具有十分明显的向光性。这与洞穴内部长期受单侧光源照射有关(Christie et al, 1999),洞穴内部环境阴暗、潮湿,一些低矮的丛集型苔藓植物群落如凤尾藓在洞穴底部无法接触到光照从而退居到养分少但是相对干燥的洞穴石壁上,以光为环境信号来调整自身的代谢、器官发生和形态建成。

2.2 苔藓群落基质重金属含量特征

重金属污染超标倍数能够直接反映基质的污染程度(徐友宁等, 2007)。本研究以同一样点的平均值表示织金洞距入口不同深度处基质重金属含量,结果见表3。从表中可以看出,3种重金属含量在距入口不同距离均表现出显著性差异($P < 0.05$)。其中,距洞口深度40 m处重金属Cr、Hg和Zn的污染超标倍数都达到了最大值,分别为1.80、59.45和0.86,说明该段重金属污染较为严重。距洞口深度40 m处位于织金洞入口大厅中段,坡度最小(表1),上述元素受风化、淋溶的影响逐渐向坡度平缓地段聚集的可能

性较大。从表3中可以看出Hg污染超标倍数在距洞口不同深度均远高于其他重金属,说明洞内Hg污染较为严重,与徐承香等(2013)的研究结果一致。Hg是毒性最强的重金属之一,对水体和植物生长有着十分不利的影响(Shah & Ali, 2010)。而食物链的转移和富集,会大大增加Hg对人体健康的危害(崔瑞平等, 1983)。因此,应重视Hg的污染状况。

2.3 苔藓群落特征对重金属污染的生态监测

对表3中基质重金属含量与相应的苔藓群落特征进行线性拟合。为消除数量级上的差异,将拟合数据进行以10为底的对数转换处理,其拟合结果见图1。从图1可以看出,苔藓群落指标随着重金属元素含量的上升总体呈下降趋势,这种趋势随着基质污染程度的加重愈加明显。所测定的重金属元素中基质Hg含量与苔藓群落指标的拟合程度最好,与其对应的苔藓群落指标均呈显著负相关关系($P < 0.05$),说明苔藓群落特征能够很好地反映洞内Hg污染的变化趋势。其中Hg含量与苔藓群落丰富度指标的拟合方程为 $y = -0.3237x + 0.9367$, $r^2 = 0.81$, $P < 0.01$,与物种丰富度指标的拟合方程为 $y = -0.2561x + 1.2605$, $r^2 = 0.63$, $P < 0.05$,与物种多样性指标的拟合方程为 $y = -0.1707x + 0.7136$, $r^2 = 0.64$, $P < 0.05$ 。基质Cr含量与苔藓物种丰富度指标和物种多样性指标呈显著负相关关系,与群落丰富度指标无显著相关性。其中,Cr含量与物种丰富度指标的拟合方程为 $y = -0.1021x + 3.2202$, $r^2 = 0.83$, $P < 0.01$,与物种多样性指标的拟合方程为 $y = -0.6308x + 1.9201$, $r^2 = 0.73$, $P < 0.01$ 。Cr是自然界中广泛存在的重金属污染物之一,对植物的胁迫主要表现为抑制植物的新陈代谢,干扰其生物量的累积(龚林, 2014)。织金洞内Cr污染尚轻,苔藓群落指标对Cr含量变化的响应说明其对环境变化的敏感程度较高。基质Zn含量与苔藓群落指标拟合度较差,与其对应的群落指标均无显著相关性。

2.4 苔藓植物群落与基质重金属污染指数和洞穴环境因子的相互关系

通过环境变量筛选出具有显著解释量的环境因子与苔藓优势群落进行冗余分析(RDA),环境因子的显著性通过999次置换检验来确定(Tarkowska-Kukuryk & Mieczan, 2014)。第一排序轴的特征值为0.78,解释了78%的苔藓群落对基质重金属污染和环境适应特征,反映了环境-基质重金属-群落的大

表2 织金洞苔藓群落类型概况。*表示优势群落; D: 优势种; A: 伴生种。
Table 2 A survey of the community types of bryophytes in Zhijin Cave. * Dominant communities; D, Dominant species; A, Associated species.

群落 Community	缩写 Abbreviation	种类组成 Species composition	分布点 Distribution	重要值 Importance value	生态优势度 Ecological dominance	生态位宽度 Niche breadth
1 小凤尾蕨群落 <i>Fissidens bryoides</i> Com.*	<i>Fis. bry</i>	D: <i>Fissidens bryoides</i> A: 具丝毛灯藓 <i>Rhizomnium tuomikoskii</i> 全缘匍灯藓 <i>Plagiomnium integrum</i> 淡色同叶藓 <i>Isopterygium albescent</i> 黑对齿藓 <i>Didymodon nigrescens</i>	入口(80 m, 60 m) 80 m, 60 m to entrance	0.86	0.0515	2.42
2 美丽拟同叶藓群落 <i>Isopterygiopsis pulchella</i> Com.*	<i>Iso. pul</i>	<i>Isopterygiopsis pulchella</i>	入口80 m 80 m to entrance	0.54	0.0322	1
3 鞭枝新丝藓-毛地钱群落 <i>Neodiciadiella flagellifera-Dumortiera hirsuta</i> Com.*	<i>Neo. Fla-Dum. hir</i>	D: <i>Neodiciadiella flagellifera</i> , <i>Dumortiera hirsuta</i> A: 鳞叶藓 <i>Taxiphyllum taxirameum</i>	入口80 m 80 m to entrance	0.34	0.0202	1
4 淡色同叶藓-双齿裂萼苔群落 <i>Isopterygium albescens-Chiloscyphus latifolius</i> Com.	<i>Iso. alb-Chi. lat</i>	<i>Isopterygium albescens</i> , <i>Chiloscyphus latifolius</i>	入口80 m 80 m to entrance	0.24	0.0142	1
5 蛇苔-鳞叶凤尾蕨群落 <i>Conocephalum conicum-Fissidens taxifolius</i> Com.	<i>Con. con-Fis. tax</i>	<i>Conocephalum conicum</i> , <i>Fissidens taxifolius</i>	入口(80 m, 20 m) 80 m, 20 m to entrance	0.24	0.0142	1
6 卷叶毛口藓群落 <i>Trichostomum involutum</i> Com.	<i>Tri. inv</i>	D: <i>Trichostomum involutum</i> A: 刺叶护萌苔 <i>Calyptogea arguta</i> 反扭藓 <i>Timmiella anomala</i> 粗肋凤尾蕨 <i>Fissidens laxus</i>	入口(80 m, 40 m)、 出口门坎带 80 m, 40 m to entrance and exit door ridge	0.25	0.0148	1.32
7 鞭枝新丝藓群落 <i>Neodiciadiella flagellifera</i> Com.*	<i>Neo. fla</i>	D: <i>Neodiciadiella flagellifera</i> A: 尖叶美喙藓 <i>Eurhynchium eustegium</i>	入口80 m 80 m to entrance	0.44	0.0262	1
8 粗肋凤尾蕨群落 <i>Fissidens laxus</i> Com.*	<i>Fis. lax</i>	D: <i>Fissidens laxus</i> A: 卷叶毛口藓 <i>Trichostomum involutum</i> 鞭枝新丝藓 <i>Neodiciadiella flagellifera</i> 毛边光萼苔 <i>Porella perrottetiana</i> 地钱 <i>Marchantia polymorpha</i>	入口(80 m, 40 m)、 出口门坎带 80 m, 40 m to entrance and exit door ridge	1.03	0.0620	2.49
9 鳞叶凤尾蕨群落 <i>Fissidens taxifolius</i> Com.*	<i>Fis. tax</i>	D: <i>Fissidens taxifolius</i> A: 毛地钱 <i>Dumortiera hirsuta</i> 尖叶美喙藓 <i>Eurhynchium eustegium</i> 鞭枝新丝藓 <i>Neodiciadiella flagellifera</i> 毛边光萼苔 <i>Porella perrottetiana</i> 全缘匍灯藓 <i>Plagiomnium integrum</i> 小蛇苔 <i>Conocephalum japonicum</i>	入口(80 m, 40 m, 20 m) 80 m, 40 m, 20 m to entrance	1.06	0.0635	2.56
10 毛地钱群落 <i>Dumortiera hirsuta</i> Com.*	<i>Dum. hir</i>	<i>Dumortiera hirsuta</i>	入口60 m 60 m to entrance	0.54	0.0322	1

表2 (续) Table 2 (continued)

群落 Community	缩写 Abbreviation	种类组成 Species composition	分布点 Distribution	重要值 Importance value	生态优势度 Ecological dominance	生态位宽度 Niche breadth
11 卷叶毛口藓-粗肋凤尾藓群落 <i>Trichostomum involutum</i> - <i>Fissidens laxus</i> Com.	<i>Tri. inv.-Fis. lax</i>	D: <i>Trichostomum involutum</i> , <i>Fissidens laxus</i> A: 小反组藓 <i>Timmia diminuta</i> 淡色同叶藓 <i>Isopterygium albescens</i> 蛇苔 <i>Conocephalum conicum</i>	入口(60 m, 0 m) 60 m, 0 m to entrance	0.32	0.0193	1.92
12 大叶匍灯藓群落 <i>Plagiommium succulentum</i> Com.*	<i>Pla. suc</i>	D: <i>Plagiommium succulentum</i> A: 纤细毛灯藓 <i>Rhizomnium gracile</i> 尖叶美喙藓 <i>Eurhynchium eustegium</i> 淡色同叶藓 <i>Isopterygium albescens</i> 粗肋凤尾藓 <i>Fissidens laxus</i> 毛边光萼苔 <i>Porella perrottetiana</i>	入口60 m 60 m to entrance	0.54	0.0322	1
13 鳞叶藓群落 <i>Taxiphyllum taxiramum</i> Com.* <i>Tax. tax</i>		D: <i>Taxiphyllum taxiramum</i> A: 大叶匍灯藓 <i>Plagiommium succulentum</i> 双齿裂萼苔 <i>Chiloscyphus latifolius</i> 褶叶木藓 <i>Thamnobryum plicatulum</i> 石地钱 <i>Reboulia hemisphaerica</i>	入口(60 m, 0 m)、 出口门坎带 60 m, 0 m to entrance and exit door ridge	0.77	0.0464	1.69
14 尖叶美喙藓-小反组藓群落 <i>Eurhynchium eur. eus-Tim. dim eustegium-Timmia diminuta</i> Com.*	<i>Eur. eus-Tim. dim</i>	D: <i>Eurhynchium eustegium</i> , <i>Timmia diminuta</i> A: 圆叶毛灯藓 <i>Rhizomnium nudum</i> 双齿裂萼苔 <i>Chiloscyphus latifolius</i> 毛边光萼苔 <i>Porella perrottetiana</i>	入口60 m、出口门坎 带 60 m to entrance and exit door ridge	0.54	0.0322	1
15 尖叶美喙藓群落 <i>Eurhynchium eustegium Eur. eus</i> Com.*	<i>Eur. eus</i>	D: <i>Eurhynchium eustegium</i> A: 褶叶木藓 <i>Thamnobryum plicatulum</i>	入口(60 m, 40 m) 出口门坎带 60 m, 40 m to entrance and exit door ridge	1.62	0.0975	3.56
16 锡兰凤尾藓-紫背苔群落 <i>Fissidens ceylonensis-Plagiochasma rupestre</i> Com.	<i>Fis. cey-Pla. rup</i>	D: <i>Fissidens ceylonensis</i> , <i>Plagiochasma rupestre</i>	入口60 m 60 m to entrance	0.14	0.0082	1
17 小凤尾藓-狭叶拟合睫藓群落 <i>Fissidens bryoides-Pseudosymblepharis angustata</i> Com.	<i>Fis. bry-Pse. ang</i>	<i>Fissidens bryoides</i> , <i>Pseudosymblepharis angustata</i>	入口20 m 20 m to entrance	0.29	0.0172	1
18 拟小凤尾藓-尖叶美喙藓群落 <i>Fissidens tosaensis-Eurhynchium eustegium</i> Com.	<i>Fis. tos-Eur. eus</i>	<i>Fissidens tosaensis</i> , <i>Eurhynchium eustegium</i>	入口20m 20 m to entrance	0.29	0.0172	1
19 蛇苔群落 <i>Conocephalum conicum</i> Com.*	<i>Con. con</i>	D: <i>Conocephalum conicum</i> A: 尖叶美喙藓 <i>Eurhynchium eustegium</i> 反组藓 <i>Timmia anomala</i> 垂叶凤尾藓 <i>Fissidens obscurus</i>	入口(40 m, 20 m)、 出口32 m 40 m, 20 m to entrance and 32 m to exit	0.71	0.0425	2.57
20 地钱群落 <i>Marchantia polymorpha</i> Com.*	<i>Mar. pol</i>	D: <i>Marchantia polymorpha</i> A: 尖叶美喙藓 <i>Eurhynchium eustegium</i> 反组藓 <i>Timmia anomala</i>	入口40 m 40 m to entrance	0.54	0.0322	1
21 反组藓群落 <i>Timmia anomala</i> Com.*	<i>Tim. ano</i>	D: <i>Timmia anomala</i> A: 蛇苔 <i>Conocephalum conicum</i> 粗肋凤尾藓 <i>Fissidens laxus</i>	入口(40 m, 20 m) 40 m, 20 m to entrance	0.54	0.0322	1

22	鞭枝新丝藓-粗肋凤尾藓群落 <i>Neodictyella flagellifera</i> - <i>Fissidens laxus</i> Com.*	<i>Neo. fla.-Fis. lax</i>	筒萼岩 <i>Atobliellopsis parvifolia</i> 鳞叶藓 <i>Taxiphyllum taxirameum</i> 倒齿泽藓 <i>Philonotis runcinata</i>	D: <i>Neodictyella flagellifera</i> , <i>Fissidens laxus</i> A: 黄边孔雀藓 <i>Hypopterygium flavolimbatum</i>	入口 20 m 20 m to entrance	0.54	0.0322	1
23	缩叶长喙藓群落 <i>Rhynchostegium contractum</i> Com.*	<i>Rhy. con</i>	D: <i>Rhynchostegium contractum</i> A: 毛地钱 <i>Dumortiera hirsuta</i> 反纽藓 <i>Timmia anomala</i> 裸萼凤尾藓 <i>Fissidens gymnogynus</i> 拟多枝藓 <i>Haplodymenium pseudoiriste</i> 长尖对齿藓 <i>Didymodon ditrichoides</i> 全缘匍灯藓 <i>Plagiomnium integrum</i>	D: <i>Rhynchostegium contractum</i> A: 毛地钱 <i>Dumortiera hirsuta</i> 反纽藓 <i>Timmia anomala</i> 裸萼凤尾藓 <i>Fissidens gymnogynus</i> 拟多枝藓 <i>Haplodymenium pseudoiriste</i> 长尖对齿藓 <i>Didymodon ditrichoides</i> 全缘匍灯藓 <i>Plagiomnium integrum</i>	入口 20 m 20 m to entrance	0.54	0.0322	1
24	鳞叶藓-东亚小金发藓群落 <i>Fissidens taxifolius</i> - <i>Pogonatum inflexum</i> Com.*	<i>Tax. tax.-Pog. inf</i>	D: <i>Taxiphyllum taxirameum</i> , <i>Pogonatum inflexum</i> A: 全缘地钱 <i>Marchantia aquatica</i> 粗肋凤尾藓 <i>Fissidens laxus</i>	D: <i>Taxiphyllum taxirameum</i> , <i>Pogonatum inflexum</i> A: 全缘地钱 <i>Marchantia aquatica</i> 粗肋凤尾藓 <i>Fissidens laxus</i>	入口 10 m 0 m to entrance	0.54	0.0322	1
25	小凤尾藓-黑对齿藓群落 <i>Fissidens bryoides</i> - <i>Didymodon nigrescens</i> Com.	<i>Fis. bry.-Did. nig</i>	<i>Fissidens bryoides</i> - <i>Didymodon nigrescens</i>	<i>Fissidens bryoides</i> - <i>Didymodon nigrescens</i>	入口 10 m 0 m to entrance	0.19	0.0112	1
26	尖叶美喙藓-鳞叶藓群落 <i>Eurhynchium eustegium</i> - <i>Taxiphyllum taxirameum</i> Com.	<i>Eur. eus.-Tax. tax</i>	D: <i>Eurhynchium eustegium</i> - <i>Taxiphyllum taxirameum</i> A: 反纽藓 <i>Timmia anomala</i>	D: <i>Eurhynchium eustegium</i> - <i>Taxiphyllum taxirameum</i> A: 反纽藓 <i>Timmia anomala</i>	入口 10 m 0 m to entrance	0.54	0.0322	1
27	丛藓-尖叶美喙藓群落 <i>Pottia truncata</i> - <i>Eurhynchium eustegium</i> Com.	<i>Pot. tru.-Eur. eus</i>	D: <i>Pottia truncata</i> , <i>Eurhynchium eustegium</i> A: 全缘匍灯藓 <i>Plagiomnium integrum</i> 鳞叶藓 <i>Taxiphyllum taxirameum</i>	D: <i>Pottia truncata</i> , <i>Eurhynchium eustegium</i> A: 全缘匍灯藓 <i>Plagiomnium integrum</i> 鳞叶藓 <i>Taxiphyllum taxirameum</i>	入口 10 m 0 m to entrance	0.54	0.0322	1
28	匍灯藓群落 <i>Plagiomnium cuspidatum</i> Com.*	<i>Pla. cus</i>	D: <i>Plagiomnium cuspidatum</i> A: 鳞叶藓 <i>Taxiphyllum taxirameum</i>	D: <i>Plagiomnium cuspidatum</i> A: 鳞叶藓 <i>Taxiphyllum taxirameum</i>	入口 10 m 0 m to entrance	0.54	0.0322	1
29	绿羽藓-尖叶美喙藓群落 <i>Thuidium assimile</i> - <i>Fissidens taxifolius</i> Com.*	<i>Thu. ass.-Eur. eus</i>	D: <i>Thuidium assimile</i> , <i>Eurhynchium eustegium</i> A: 美灰藓 <i>Eurohypnum leptothallum</i>	D: <i>Thuidium assimile</i> , <i>Eurhynchium eustegium</i> A: 美灰藓 <i>Eurohypnum leptothallum</i>	入口 10 m 0 m to entrance	0.54	0.0322	1
30	小蛇苔群落 <i>Conocephalum japonicum</i> Com.	<i>Con. jap</i>	D: <i>Conocephalum japonicum</i> A: 双齿裂萼苔 <i>Chiloscyphus latifolius</i> 圆叶毛灯藓 <i>Rhizomnium nudum</i> 尖叶美喙藓 <i>Eurhynchium eustegium</i>	D: <i>Conocephalum japonicum</i> A: 双齿裂萼苔 <i>Chiloscyphus latifolius</i> 圆叶毛灯藓 <i>Rhizomnium nudum</i> 尖叶美喙藓 <i>Eurhynchium eustegium</i>	入口 10 m 0 m to entrance	0.19	0.0112	1
31	灰藓凹叶变种-粗肋凤尾藓-反纽藓群落 <i>Hypnum cupressiforme</i> - <i>Fissidens laxus</i> - <i>Timmia anomala</i> Com.	<i>Hyp. cup.-Fis. lax-Tim. ano</i>	<i>Hypnum cupressiforme</i> , <i>Fissidens laxus</i> , <i>Timmia anomala</i>	<i>Hypnum cupressiforme</i> , <i>Fissidens laxus</i> , <i>Timmia anomala</i>	出口门坎带 Exit door ridge	0.19	0.0112	1
32	反纽藓-粗肋凤尾藓群落 <i>Timmia anomala</i> - <i>Fissidens laxus</i> Com.	<i>Tim. ano.-Fis. lax</i>	<i>Timmia anomala</i> , <i>Fissidens laxus</i>	<i>Timmia anomala</i> , <i>Fissidens laxus</i>	出口门坎带 Exit door ridge	0.19	0.0112	1
33	灰藓凹叶变种-粗肋凤尾藓 <i>Hypnum cupressiforme</i> - <i>Fissidens laxus</i> Com.	<i>Hyp. cup.-Fis. lax</i>	D: <i>Hypnum cupressiforme</i> , <i>Fissidens laxus</i> A: 反纽藓 <i>Timmia anomala</i>	D: <i>Hypnum cupressiforme</i> , <i>Fissidens laxus</i> A: 反纽藓 <i>Timmia anomala</i>	出口门坎带 Exit door ridge	0.19	0.0112	1
34	美灰藓-长尖对齿藓 <i>Eurohypnum leptothallum</i> - <i>Didymodon ditrichoides</i> Com.	<i>Eur. lep.-Did. dit</i>	D: <i>Eurohypnum leptothallum</i> , <i>Didymodon ditrichoides</i> A: 湿地藓 <i>Hypophila javanica</i>	D: <i>Eurohypnum leptothallum</i> , <i>Didymodon ditrichoides</i> A: 湿地藓 <i>Hypophila javanica</i>	出口门坎带 Exit door ridge	0.19	0.0112	1

表3 距洞口不同深度苔藓基质重金属含量(平均值 ± 标准误)/(mg/kg)及其群落指标

Table 3 The content of heavy metal (mean ± SE) (mg/kg) in the substrate of bryophytes at different distance to entrance and its community indicators

距洞口深度 Distance to entrance	基质铬 Substrate Cr		基质汞 Substrate Hg		基质锌 Substrate Zn		群落丰富度 Community richness	物种丰富度 Species richness	多样性指数 Diversity index
	含量 Content	超标倍数 Times of ultra standard	含量 Content	超标倍数 Times of ultra standard	含量 Content	超标倍数 Times of ultra standard			
80 m	72.68 ± 0.83 ^d	-0.26	0.55 ± 0.01 ^d	4.00	73.7 ± 0.95 ^d	-0.24	12	26	7
60 m	100.41 ± 2.65 ^b	-0.07	0.70 ± 0.01 ^d	5.36	92.3 ± 0.95 ^{cd}	0.05	8	15	5
40 m	178.54 ± 0.75 ^a	1.80	6.65 ± 0.06 ^a	59.45	278.4 ± 1.45 ^a	0.86	5	9	3
20 m	97.31 ± 0.82 ^c	0.24	5.83 ± 0.09 ^b	52.00	123.5 ± 1.1 ^c	0.01	4	13	4
0 m	83.88 ± 1.29 ^d	1.17	3.47 ± 0.06 ^c	30.55	216.3 ± 3.35 ^b	-0.13	7	16	5

同列不同小写字母代表差异显著(P < 0.05) Different lowercase letters in the same column represent significant differences (P < 0.05).

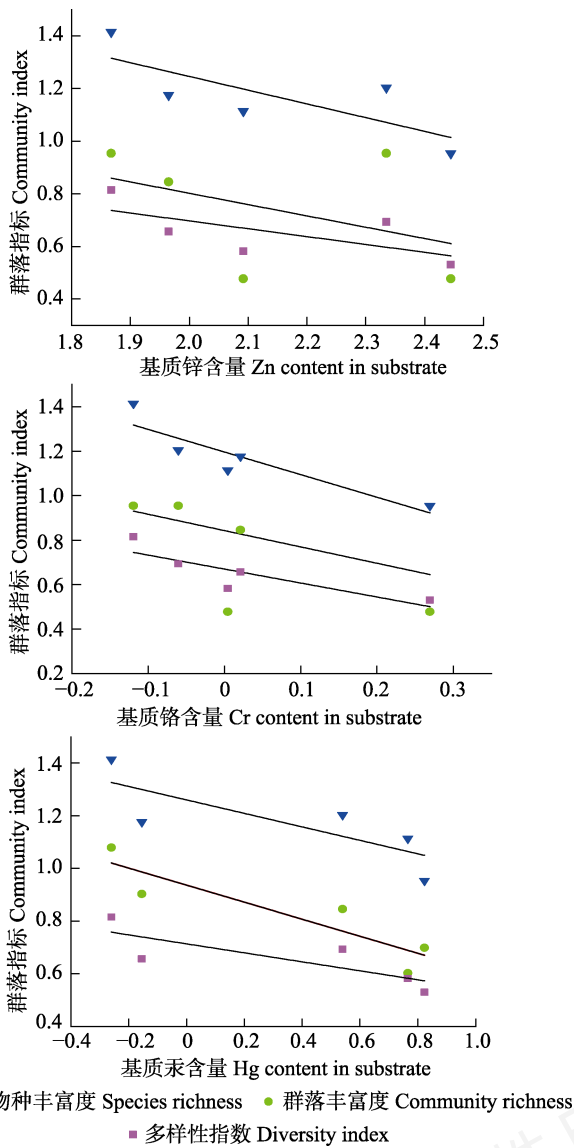


图1 织金洞基质重金属含量与苔藓群落指标的关系(数据进行以10为底的对数转换处理)

Fig. 1 Relationship between heavy metal content in substrate and community indexes of bryophytes in Zhijin Cave. Logarithmic conversion processing based on 10 is carried out on the data.

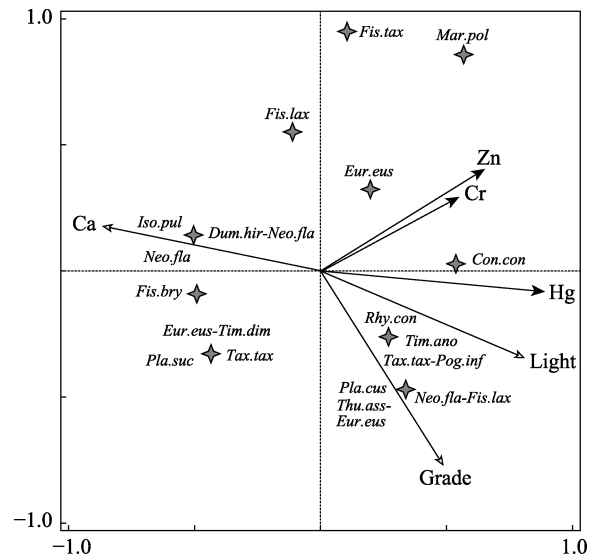


图2 苔藓优势群落与环境因子的冗余分析排序图。优势群落缩写见表2。图中, 实心箭头代表重金属, 空心箭头代表其他环境因子, 星号代表苔藓优势群落; 箭头长短代表该变量对环境因子影响的大小, 各箭头之间的夹角代表变量之间的相关性, 夹角余弦值代表两变量之间的相关性系数; 苔藓群落与线段之间的连线长短代表群落与环境变量之间的对应关系。

Figs.2 RDA ordination diagram between dominant community of bryophytes and environmental factors. Abbreviations of dominant communities are shown in Table 2. In the figure, solid arrows represent heavy metals, hollow arrows represent other environmental factors, and asterisks represent dominant bryophyte communities. The length of the arrow represents the magnitude of the influence of the variable on the environmental factors, the included angle between the arrows represents the correlation between the variables, and the cosine value of the included angle represents the correlation coefficient between the two variables; The length of the connection line between bryophyte communities and line segments represents the corresponding relationship between communities and environmental variables.

部分信息。RDA结果显示, 光照、矿质元素Ca、坡度和重金属Hg是影响织金洞内苔藓群落分布的主

要变量。耐重金属污染的群落位于第一排序轴正半轴, 适钙苔藓群落位于负半轴。光照因子对苔藓群落的影响主要表现为适钙苔藓群落对低光度的适应性, 以及耐重金属污染群落对光照的需求。在低光照的条件下可能会激发某些植物对重金属元素的需求(张莹莹, 2015)。在排序图中, 大部分苔藓群落位于重金属Hg连线的相反方向, 说明苔藓群落分布总体上与其基质Hg含量呈负相关关系, 与线性拟合结果一致。但是, 与其他苔藓群落不同的是蛇苔群落(缩写*Con.con*), 它与污染较为严重的Hg元素表现出了极大的相关性, 且其主要分布在污染严重超标的距入口40–20 m处。同时, 我们对织金洞出口分布有苔藓群落的基质重金属进行测定后发现, 在Hg含量高出背景标准值22倍的地段(距出口32 m)仅分布有由单一物种组成的蛇苔群落。这在一定程度上说明了蛇苔群落对Hg污染有良好的耐受性。另外, 对洞内环境具有较强生态适应范围的尖叶美喙藓群落(缩写*Eur.eus*)与元素Zn的连线最短, 相关性最大, 说明基质Zn含量与尖叶美喙藓群落在洞内的广泛分布可能存在一定相关性。Zn是植物生长发育所必需的微量营养元素之一, 适度的锌对植物生长有促进作用(张炳奎等, 1983)。

2.5 苔藓Hg含量及其与基质Hg含量的相关性比较

上述结果表明, 织金洞内Hg污染较为严重, 并且对洞内苔藓群落有明显的胁迫作用。为了进一步说明织金洞内苔藓群落与Hg污染之间的关系, 我们从洞内优势群落中筛选出4种生物量较大的苔藓植物, 对其体内的Hg含量进行测定, 结果见表4。从表4中可以看出不同苔藓植物体中的平均Hg含量差异较大。其中, 粗肋凤尾藓(*Fissidens laxus*)的平均Hg含量明显低于其他3种, 这可能主要是因为它属于丛集型植物, 受洞内生长基质条件的限制, 植物体表面积较小, 对重金属的吸收能力较弱。植物体中平均Hg含量最高的是蛇苔(*Conocephalum conicum*), 蛇苔属于平铺型植物, 体表面积较大, 能够更大程度上接触空气、水分并滞留大量的污染物颗粒, 从而增强了对重金属的吸附能力。

对4种苔藓植物及相应基质Hg含量进行相关性分析(表5), 结果发现仅蛇苔植物体内的Hg含量与其基质Hg含量具有显著相关性($P < 0.05$), 说明蛇苔受基质Hg污染影响较大。在今后的治理过程中, 可以考虑将蛇苔作为洞内环境的生物监测材料之一。

表4 距洞口不同深度苔藓植物体Hg含量(mg/kg)

Table 4 Hg content of bryophytes at different distance to entrance (mg/kg)

距洞口深度 Distance entrance	粗肋凤尾藓 <i>Fissidens laxus</i>	磷叶藓 <i>Taxiphyllum taxiramum</i>	尖叶美喙藓 <i>Eurhynchium eustegium</i>	蛇苔 <i>Conocephalum conicum</i>
80 m	0.32	–	–	–
60 m	0.14	0.47	0.43	–
40 m	–	–	–	0.67
20 m	0.18	–	–	0.61
0 m	0.27	0.58	0.59	–
均值 Average	0.23	0.53	0.51	0.64

表5 重金属Hg在不同苔藓植物体和其基质含量中的相关性

Table 5 Correlation of Hg between different bryophytes and their substrate contents

	粗肋凤尾藓 <i>Fissidens laxus</i>	磷叶藓 <i>Taxiphyllum taxiramum</i>	尖叶美喙藓 <i>Eurhynchium eustegium</i>	蛇苔 <i>Conocephalum conicum</i>
相关性系数 Correlation coefficient	–0.658	–0.388	–0.361	0.91
<i>P</i>	0.227	0.519	0.551	0.032*

* $P < 0.05$

3 讨论

苔藓群落具有很好的生物监测价值(Denayer et al, 1999)。群落物种多样性特征可以反应环境污染状况(杨再超等, 2010)。环境条件变化会改变动植物群落的结构与功能特征, 污染胁迫使群落的稳定性降低, 物种多样性下降(陈舒泛等, 1989; 许木启和曹宏, 2004)。刘荣相等(2011)发现苔藓群落结构组成的复杂程度可作为研究区Hg污染监测的指标之一; Wang等(2015)通过分析苔藓群落和具芽孢苔藓群落的分布规律实现了对岩溶型铝土矿区重金属污染的监测。本文通过对织金洞入口不同距离苔藓群落及其基质重金属含量的研究发现, 苔藓群落特征与其基质Hg含量之间存在良好的线性关系, 通过对苔藓群落丰富度、物种丰富度和物种多样性的数量统计分析可以大致了解对应基质的Hg污染情况。

目前, 利用苔藓植物进行区域监测的研究多集中于测定苔藓植物体内的重金属含量, 从而确定相应环境的污染状况。由于不同苔藓物种对污染的富集能力差异较大, 所以这种监测方法的理想条件是找到同种(郭云等, 2017; 刘润等, 2018)或者同属(安丽等, 2006)苔藓进行定点监测。而对于矿山、洞穴、

石漠化地区这类生存环境较差的小尺度区域而言,这种监测方式难以推广。首先,这些地区的苔藓植物生物量较少,特别是在阴暗潮湿的洞穴环境中,苔藓植物大多为丛集型,体型较小且附生于洞穴石壁上,标本难以采集。其次,洞穴内部小生境复杂,多数种类仅在一处或者几处有分布,使用同一种苔藓监测的可能性较小。第三,岩溶洞穴具有较高的景观价值,不易于大范围的开采。因此,使用苔藓群落学特征对环境污染或变化的反应对环境质量进行监测和评价具有更大的可行性(王春香等, 2010)。

蛇苔是岩溶洞穴中一类常见的苔类植物,多生于潮湿碎石或土上,阴湿的洞穴环境是其主要栖息地,在很多相关研究中均有报道(张朝晖等, 1996; 张朝晖和Pentecost, 2002; 黎道洪, 2006)。蛇苔与其基质Hg污染具有一定相关性,一方面与它对汞的耐受性有关,另一方面,其自身生长可能对基质汞含量有特殊的要求。Brown和Buck (2013)的研究表明,一种管口苔属苔类*Solenostoma crenulatum*在基质富含铜的情况下能够受到更好的被刺激从而提高光合作用效率(Brown & Buck, 2013)。在光照很弱的洞穴环境中,植物通常无法进行正常的光合作用,为了生存,某些苔藓群落可能会进化出与环境相匹配的独特生理特征如向光性运动、喜钙生基质、耐重金属生理等。然而,并不是所有的苔藓群落都能很好地适应像Hg这类高毒性系数的重金属。当基质重金属含量富集到一定量时,一些群落就很难再从别的生境迁入,最后只剩下对基质含量有较高耐受性的群落。这也是为什么能够通过水生苔藓对Au的富集找到金矿,通过铜藓(*Meilichoferia elongata*)找到铜矿(Samecka-Cymerman & Kempers, 1998)。因此,苔藓群落在不同环境梯度下呈现出的特有甚至专一的分布规律对于环境因子有重要的指示作用(Wang et al, 2015),利用这种指示作用可以更加直观、长期、有效地对区域环境进行监测。

致谢:织金洞管理局旅游服务中心人员在样品收集方面提供了大力帮助和支持,吴启美老师对此文稿提出宝贵意见,李芳同学参与野外采集标本工作。在此致以衷心感谢!

参考文献

Amaral LDP, Ferreira RA, Lisboa GDS, Longhi SJ, Watzla-

wick LF (2013) Variabilidade espacial do Índice de Diversidade de Shannon-Wiener em Floresta Ombrófila Mista. *Emilio Montero Cartelle*, 41, 1961–1972.

An L, Cao T, Yu YH (2006) Heavy metals contents in *Haplocladium* and their relationships with Shanghai City environment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 1490–1494. (in Chinese with English abstract) [安丽, 曹同, 俞鹰浩 (2006) 上海市小羽藓属植物重金属含量及其与环境的关系. *应用生态学报*, 17, 1490–1494.]

Brown DH, Buck GW (2013) Cation contents of acrocarpous and pleurocarpous mosses growing on a strontium-rich substratum. *Transactions of the British Bryological Society*, 10, 199–209.

Chen SF, Wu DF, Wu JN (1989) Using lichen communities as SO₂ pollution monitors. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 12(4), 77–82. (in Chinese with English abstract) [陈舒泛, 吴鼎福, 吴继农 (1989) 利用地衣群落监测SO₂的污染. *南京师大学报(自然科学版)*, 12(4), 77–82.]

Christie JM, Alomon MS, Nozue K, Wada M, Briggs WR (1999) LOV (light, oxygen, or voltage) domains of the blue-light photoreceptor phototropin (nph1): Binding sites for the chromophore flavin mononucleotide. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 96, 8779–8783.

Cui RP, Ma XL, Man HS, Yao BJ, Gu WX, Xia QF (1983) Hazard of mercury-stained food chains. *Environmental Science*, 4(2), 16–19. (in Chinese) [崔瑞平, 马秀兰, 满洪升, 姚本基, 顾文兴, 夏其芳 (1983) 汞染食物链的危害. *环境科学*, 4(2), 16–19.]

Denayer FO, Haluwyn CV, Foucault BD, Schumacker R, Colein P (1999) Use of bryological communities as a diagnostic tool of heavy metal soil contamination (Cd, Pb, Zn) in northern France. *Plant Ecology*, 140, 191–201.

Foan L, Domercq M, Bermejo R, Santamaría JM, Simon V (2015) Mosses as an integrating tool for monitoring PAH atmospheric deposition: Comparison with total deposition and evaluation of bioconcentration factors. A year-long case-study. *Chemosphere*, 119, 452–458.

Gao Q (1996) *Flora Bryophytorum Sinicorum*, Vol. 2. Science Press, Beijing. (in Chinese) [高谦 (1996) 中国苔藓志第二卷. 科学出版社, 北京.]

Gao Q, Wu YH (2010) *Genera Hepaticopsida et Anthocerotopsida Sinicorum*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [高谦, 吴玉环 (2010) 中国苔纲和角苔纲植物属志. 科学出版社, 北京.]

Giordano S, Adamo P, Spagnuolo V, Tretiach M, Bargagli R (2013) Accumulation of airborne trace elements in mosses, lichens and synthetic materials exposed at urban monitoring stations: Towards a harmonisation of the moss-bag technique. *Chemosphere*, 90, 292–299.

Guo SL, Yu J, Chen GQ (2015) *Ecological Data Analyses*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郭水良, 于晶, 陈国奇 (2015) 生态学数据分析. 科学出版社, 北京.]

- Guo Y, Wang ZH, Zhang ZH (2017) Ability of brachymerium exile to monitor metal elements at an electrolytic aluminium factory in karst mountainous area. *Environmental Science & Technology*, 40(3), 148–152. (in Chinese with English abstract) [郭云, 王智慧, 张朝晖 (2017) 岩溶山区电解铝厂纤枝短月藓对金属元素的监测能力. *环境科学与技术*, 40(3), 148–152.]
- Hu RL, Wang YF (2005) *Flora Bryophytorum Sinicorum*, Vol. 7. Science Press, Beijing. (in Chinese) [胡人亮, 王幼芳 (2005) 中国苔藓志第七卷. 科学出版社, 北京.]
- Li DH (2006) Study on correlation between fauna structure and some environmental factors in Shuiba Cave, Guizhou Province. *Carsologica Sinica*, 25, 256–262. (in Chinese with English abstract) [黎道洪 (2006) 贵州水拔洞内动物群落结构与部分环境因子的相关性研究. *中国岩溶*, 25, 256–262.]
- Li JY, An YG, Rong KF (1991) Forming and developing process of underground stream caves—Zhijin Cave, etc. as examples. *Journal of Guizhou Institute of Technology*, 20(3), 1–9. (in Chinese with English abstract) [李景阳, 安裕国, 戎昆方 (1991) 暗河型溶洞的形成和演化过程——以贵州织金洞等为例. *贵州工学院学报*, 20(3), 1–9.]
- Li XJ (2006) *Flora Bryophytorum Sinicorum*, Vol. 4. Science Press, Beijing. (in Chinese) [黎兴江 (2006) 中国苔藓志第四卷. 科学出版社, 北京.]
- Liu R, Zhang ZH, Shen JC, Wang ZH (2018) Monitoring of heavy metal concentrations and source apportionment in “24-Curve” Highway region using epiphytic mosses. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 1723–1729. (in Chinese with English abstract) [刘润, 张朝晖, 申家琛, 王智慧 (2018) 应用树附生藓类监测晴隆二十四道拐地区重金属污染及来源. *生态学杂志*, 37, 1723–1729.]
- Liu RX, Wang ZH, Zhang ZH (2009) Ecological characteristics of bryophyte communities from karst rock desertification peak cluster in Zhenfeng of Guizhou Province. *Bulletin of Botanical Research*, 29, 734–741. (in Chinese with English abstract) [刘荣相, 王智慧, 张朝晖 (2009) 贵州贞丰喀斯特石漠峰丛苔藓植物群落生态特征. *植物研究*, 29, 734–741.]
- Liu RX, Wang ZH, Zhang ZH (2011) Ecological monitoring of bryophytes for mercury pollution in Danzhai mercury mine area, Guizhou Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 1558–1566. (in Chinese with English abstract) [刘荣相, 王智慧, 张朝晖 (2011) 苔藓植物对贵州丹寨汞矿区汞污染的生态监测. *生态学报*, 31, 1558–1566.]
- Long CB, Zhang ZH (2016) Diversity of the bryophytes and their function in monitoring metal contamination in the karst bauxite area in Guangxi. *Journal of Safety & Environment*, 16, 358–363. (in Chinese with English abstract) [龙朝波, 张朝晖 (2016) 平果岩溶型铝土矿区苔藓多样性及对金属污染的监测指示. *安全与环境学报*, 16, 358–363.]
- Mario S, Bitetti D (2000) The distribution of grooming among female primates: Testing hypotheses with the Shannon-Wiener diversity index. *Behaviour*, 137, 1517–1540.
- Mazur Z, Radziemska M, Maczuga O, Makuch A (2013) Heavy metal concentrations in soil and moss (*Pleurozium schreberi*) near railroad lines in Olsztyn (Poland). *Fresenius Environmental Bulletin*, 22, 955–961.
- Peng SL (1987) Ecological dominance of the subtropical forest communities in Guangdong. *Acta Ecologica Sinica*, 7, 38–44. (in Chinese with English abstract) [彭少麟 (1987) 广东亚热带森林群落的生态优势度. *生态学报*, 7, 38–44.]
- Samecka-Cymerman A, Kempers AJ (1998) Bioindication of gold by aquatic bryophytes. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 26, 90–94.
- Shah TA, Ali A (2010) Development of mercury resistant transgenic *Nicotiana* plants and their environmental impacts. *International Journal of Plant Sciences*, 5, 448–451.
- Shen JC, Zhang ZH, Wang HH, Huang H, Wang ZH (2017) Water retention capacity of autumn mosses in south stone forest of Guiyang Karst park. *Journal of Ecology & Rural Environment*, 33, 907–912. (in Chinese with English abstract) [申家琛, 张朝晖, 王慧慧, 黄欢, 王智慧 (2017) 贵阳喀斯特公园南石林秋季藓类植物的持水特性. *生态与农村环境学报*, 33, 907–912.]
- State Environmental Protection Bureau (1990) Background Value of Soil Environment in China. China Environmental Science Press, Beijing (in Chinese) [国家环境保护局 (1990) 中国土壤环境背景值. 中国环境科学出版社, 北京.]
- Tarkowska-Kukuryk M, Mieczan T (2014) Distribution and environmental determinants of Chironomids (Diptera, Chironomidae) in *Sphagnum* microhabitats. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23, 483–490.
- Toth T, Kopernicka M, Sabo R, Kopernicka T (2016) The evaluation of mercury in honey bees and their products from Eastern Slovakia. *Scientific Papers Animal Science & Biotechnologies*, 49, 257–260.
- Wang AY, Huang SS, Zhong GF, Xu GB, L ZX, Shen XB (2012) Effect of cr (VI) stress on growth of three herbaceous plants and their cr uptake. *Environmental Science*, 33, 2028–2037. (in Chinese with English abstract) [王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2012) 铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响. *环境科学*, 33, 2028–2037.]
- Wang CX, Li YY, Xu SQ (2010) Biological monitoring and its application in environmental monitoring. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 5, 628–638. (in Chinese with English abstract) [王春香, 李媛媛, 徐顺清 (2010) 生物监测及其在环境监测中的应用. *生态毒理学报*, 5, 628–638.]
- Wang SQ, Zhang ZH, Wang ZH (2015) Bryophyte communities as biomonitors of environmental factors in the Goujiang karst bauxite, southwestern China. *Science of the Total Environment*, 538, 270–278.
- Wei XP, Pu JB, Zhao CY (2014) Assessment of karst groundwater vulnerability in Chongqing based on revised

- RISKE model. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 589–596. (in Chinese with English abstract) [魏兴萍, 蒲俊兵, 赵纯勇 (2014) 基于修正RISKE模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价. *生态学报*, 34, 589–596.]
- Wu PC (2002) *Flora Bryophytorum Sinicorum*, Vol. 6. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴鹏程 (2002) 中国苔藓志第六卷. 科学出版社, 北京.]
- Wu PC, Jia Y (2004) *Flora Bryophytorum Sinicorum*, Vol. 8. Science Press, Beijing. (in Chinese) [吴鹏程, 贾渝 (2004) 中国苔藓志第八卷. 科学出版社, 北京.]
- Xu CX, Li ZZ, Li DH (2013) Relationships between the diversity of animal communities and the lighting environment and content of heavy metals in soils in Guizhou Zhijin Cave. *Biodiversity Science*, 21, 62–70. (in Chinese with English abstract) [徐承香, 李子忠, 黎道洪 (2013) 贵州织金洞穴动物群落多样性与光照强度及土壤重金属含量的关系. *生物多样性*, 21, 62–70.]
- Xu MQ, Cao H (2004) Ecological basis and application of PFU protozoan community in bio-monitoring with relation to water quality. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1540–1547. (in Chinese with English abstract) [许木启, 曹宏 (2004) PFU 原生动物群落生物监测的生态学原理与应用. *生态学报*, 24, 1540–1547.]
- Xu SC, Cao T, Yu J, Chen Y, Song GY (2006) Niche of epiphytic bryophytes on trees in Shanghai City. *Chinese Journal of Ecology*, 25, 1338–1343. (in Chinese with English abstract) [徐晟翀, 曹同, 于晶, 陈怡, 宋国元 (2006) 上海市树附生苔藓植物生态位. *生态学杂志*, 25, 1338–1343.]
- Xu YN, Ke HL, Zhao AN, Liu RP, Zhang JH (2007) Assessment of heavy metals contamination of farmland soils in some gold mining area of Xiaoqinling. *Chinese Journal of Soil Science*, 38, 732–736. (in Chinese with English abstract) [徐友宁, 柯海玲, 赵阿宁, 刘瑞平, 张江华 (2007) 小秦岭某金矿区农田土壤重金属污染评价. *土壤通报*, 38, 732–736.]
- Yang WC, Li DH (2010) Correlations of heavy metal contents in cave animals and in environment in Dayan Cave of Guangxi. *Chinese Journal of Ecology*, 29, 1554–1558. (in Chinese with English abstract) [杨卫诚, 黎道洪 (2010) 广西大岩洞洞穴动物与环境重金属含量关系. *生态学杂志*, 29, 1554–1558.]
- Zhang BK, Fu Z, Wang QS, Yin CL, Zhu QQ (1983) Soil zinc supply and zinc fertilizer yield increase in Nantong City. *Soils*, 15, 94–101. (in Chinese) [张炳奎, 傅棻, 王岐山, 尹楚良, 朱其清 (1983) 南通市土壤锌的供给情况及锌肥的增产作用. *土壤*, 15, 94–101.]
- Zhang YY (2015) Experimental Study on the Effects of Different Light and Iron Concentrations on the Growth of Phytoplankton in Xiaoxingkai Lake. PhD dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. (in Chinese with English abstract) [张莹莹 (2015) 不同光照和铁浓度对小兴凯湖浮游植物生长影响的实验研究. 博士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨.]
- Zhang ZH, Pentecost A (2002) The floristic characteristics of the bryophytes and karst deposition in karst caves, England. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 22, 359–367. (in Chinese with English abstract) [张朝晖, Pentecost A (2002) 英格兰洞穴苔藓植物区系特征及其岩溶沉积研究. *西北植物学报*, 22, 359–367.]
- Zhang ZH, Wang ZH, Zhu A (1996) A preliminary study on bryokarst of caves in Huangguoshu area. *Carsologica Sinica*, 15, 224–232. (in Chinese with English abstract) [张朝晖, 王智慧, 祝安 (1996) 黄果树喀斯特洞穴群苔藓植物岩溶的初步研究. *中国岩溶*, 15, 224–232.]

(责任编辑: 朱瑞良 责任编辑: 时意专)



•研究报告•

西江中下游鳊的遗传多样性与种群动态历史

杨计平^{1#} 李 策^{1,2#} 陈蔚涛¹ 李跃飞¹ 李新辉^{1*}

1 (中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广州 510380)

2 (上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 鳊(*Ochetobius elongatus*)曾经是我国许多河流的重要经济鱼类, 然而由于环境污染和人为干扰等原因, 鳊的资源量萎缩严重, 种群处于极度濒危的境地。目前, 常规采样方法获得鳊样本的难度较大, 致使相关研究难以开展。本研究通过仔鱼采集和成鱼采集的手段, 测定两个线粒体基因和两个核基因, 对西江中下游鳊的遗传多样性和种群动态历史进行研究。结果显示, 西江中下游鳊的遗传多样性处于较低水平并且出现了衰退的迹象, 可能经历了遗传瓶颈效应。此外, 种群动态历史分析发现, 西江中下游鳊在后更新世期间(0.06和0.13百万年前)经历了种群扩张, 刚好处于中更新世(0.78–0.126百万年前)冰期褪去之后, 表明更新世气候的波动影响了西江中下游鳊的种群动态。作为鳊可能的重要产卵场, 西江中下游部分江段可以考虑建立鳊的自然保护区, 用于保育和修复鳊的种质资源。

关键词: 鳊; 仔鱼采集; 线粒体基因和核基因; 种群扩张; 保护

Genetic diversity and population demographic history of *Ochetobius elongatus* in the middle and lower reaches of the Xijiang River

Jiping Yang^{1#}, Ce Li^{1,2#}, Weitao Chen¹, Yuefei Li¹, Xinhui Li^{1*}

1 Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Guangzhou 510380

2 College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306

Abstract: *Ochetobius elongatus* used to be an economically important fish species in many rivers of China. However, due to environmental destruction and human disturbance the resources of this fish species have reduced rapidly, and its populations are in a critically endangered condition. At present, it is very difficult to obtain specimens of *O. elongatus*, which limits research on this species. We obtained specimens of *O. elongatus* via larva and adult fish collection. Two mitochondrial genes and two nuclear genes were used to explore the genetic diversity and population demography of *O. elongatus* in middle and lower Xijiang River. Results showed that the genetic diversity of *O. elongatus* was low and is in recession, suggesting that *O. elongatus* might have undergone a genetic bottleneck event. Additionally, population demographic analyses revealed that *O. elongatus* population expanded during the Late Pleistocene (0.06 and 0.13 Million years ago), following the glacial retreat of the Middle Pleistocene glaciations (0.78–0.126 Million years ago). The results also revealed that Pleistocene climatic fluctuations have influenced the population demography of *O. elongatus*. Due to its potential as an important spawning ground for *O. elongatus*, sections of middle and lower Xijiang River should be considered as candidates for creating nature reserves to conserve and restore its genetic resources.

Key words: *Ochetobius elongatus*; larva fish collection; mitochondrial and nuclear genes; population expansion; conservation

鳊(*Ochetobius elongatus*)隶属于鲤形目鲤科鳊属(*Ochetobius*), 分布于我国长江以南的众多河流江段, 是当地重要的经济鱼类(乐佩琦, 2000)。鳊历史上曾广泛分布于珠江水系的西江、东江、北江和

珠江三角洲地区(郑慈英, 1989)。然而, 由于水利开发和江河环境污染等的影响, 鳊的资源量萎缩极其严重, 种群近乎濒危, 在珠江中下游甚至整个珠江流域已有多年未被监测到(李捷等, 2010)。因此, 了

收稿日期: 2018-04-16 接受日期: 2018-06-01

基金项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费(2016HY-ZC0503)

同等贡献作者 Contributed equally to this work

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lxhui01@aliyun.com

解这种濒危物种的遗传多样性现状对以后的管理和保护策略的制定具有一定的指导意义。

由于难以获得样本,目前关于鳢的研究寥寥无几,零星研究仅集中在大阶元的系统发育进化关系(Wang et al, 2007; Tao et al, 2010)。本研究通过仔鱼采集和室内培养的方法获得一定数量的样本,加上野外普查过程中采集的少量成鱼标本,利用两个线粒体基因和两个核基因对西江中下游鳢的遗传多样性进行研究。此外,还探讨了西江中下游鳢的种群动态历史与更新世气候波动的关系,以期对对鳢的管理和保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

鳢样本主要来自仔鱼采集。仔鱼采样参照李跃飞等(2012)的方法,采样站位于广东省肇庆市渔政码头上游约 50 m 处(23°05′06.24″ N, 112°23′40.13″ E)(表1),采样时间分别为2011年5月和2013年5月。利用定置网进行多日多次采集,每天于早上、中午和晚上共采样3次,每次采样2 h。网口为1.5 m × 1.0 m的矩形,网体呈四棱锥形,锥体部分长6 m,后部与一个规格为0.8 m × 0.4 m × 0.4 m的集苗箱相连,网目为0.5 mm,网口逆水流方

向固定于离岸约10 m的水中。采集到的仔稚鱼充氧后带回实验室,根据鳢幼苗的早期形态特征进行初步鉴定(梁秩燊等,1985)。为了保证鉴定准确,经初步筛选的鳢幼苗在实验条件下投喂浮游动物培育。培育时间均为2个月,一共获得鳢50尾,其中2011年28尾,2013年22尾。平均体长 5.64 ± 0.80 cm,平均体重为 1.62 ± 0.57 g,易于进行形态鉴定。此外,本课题组于2017年10月的野外调查中分别在广西壮族自治区的桂平市和梧州市各采集鳢标本1尾(表1),距离上次在珠江中下游渔业捕捞中监测到鳢已有近10年之久。

1.2 基因组DNA提取、扩增与测序

采用高盐法提取基因组DNA,并利用1.2%琼脂糖凝胶电泳检测DNA质量。本研究分别选取了两个线粒体基因和核基因。线粒体基因包括细胞色素*b* (*Cytb*)和酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADH)脱氢酶亚单位2 (*ND2*),核基因包括肌球蛋白重链6 (*myh6*)和重组激活基因2 (*RAG2*)。4个基因扩增与测序的引物信息见表2。PCR反应体系为25 μ L: 2 × PCR mix (0.1 U/ μ L) 12.5 μ L, 正反向引物(10 mM) 1 μ L, DNA模板1 μ L,最后用无菌水补齐至25 μ L。*Cytb*和*ND2*的PCR反应条件为:95℃预变性3 min,95℃变性1 min,58–64℃退火1 min,72℃延伸1 min;运行30个

表1 本研究的采样信息

Table 1 Sample information of the present study

采样点 Sample site	采样日期 Sampling time	样本量 Sample size	经度 Longitude	纬度 Latitude
广西桂平 Guiping	2017.09	1	110°05′54.78″ E	23°24′08.25″ N
广西梧州 Wuzhou	2017.09	1	111°17′15.32″ E	23°28′07.94″ N
广东肇庆 Zhaoqing	2011.05	22	112°23′40.13″ E	23°05′06.24″ N
广东肇庆 Zhaoqing	2013.05	28	112°23′40.13″ E	23°05′06.24″ N

表2 本研究使用的引物信息

Table 2 Primer information used in the present study

引物名 Primer	引物序列 Primer sequence (5′–3′)	退火温度 Annealed temperature (°C)	参考文献 Reference
<i>Cytb</i>	L14724	58–64	Xiao et al, 2001
	H15915		
<i>ND2</i>	AFND2L	58	黎瑞宝, 2013 ^①
	AFND2R		
<i>myh6</i>	myh6_F459	53	Chen et al, 2008
	myh6_R1325		
<i>RAG2</i>	RAG2-f2a	55	Lovejoy & Collette, 2001
	RAG2-R6a		

① 黎瑞宝 (2013) 中国海南鮠遗传多样性的比较研究. 硕士学位论文, 暨南大学, 广州.

循环后, 72°C延伸5 min。*myh6*和*RAG2*的PCR反应条件为: 95°C预变性5 min, 95°C变性1 min, 53°C–55°C退火45 s, 72°C延伸45 s; 运行35个循环后, 72°C延伸10 min。PCR产物经1.2%的琼脂糖凝胶电泳检测, 对于扩增效果良好的产物交由测序公司双向测序。

1.3 数据处理与分析

测序所得序列使用DNASTAR软件包(DNASTAR Inc., Madison, WI)来检测测序质量, 运行编辑并生成一致序列。所得的一致序列使用MUSCLE (Edgar, 2004)进行比对, 然后剪掉首尾两端噪音序列至同样长度。为了获得更多的变异信息, 分别合并了两个线粒体基因和两个核基因用于后续分析。线粒体DNA单倍型和核基因等位基因均使用DnaSP 5.10 (Librado & Rozas, 2009)划分。利用DnaSP 5.10统计每个基因的单倍型数, 并计算单倍型多样性(H_d)、近期核苷酸多样性(θ_n)和历史核苷酸多样性(θ_w)。使用NETWORK 4.6 (Bandelt et al, 1999)构建了*Cytb*、*ND2*和*Cytb + ND2*的单倍型中介网状图和*myh6 + RAG2*的等位基因中介网状图。*myh6*和*RAG2*由于变异位点不大于3个, 因此并未对这两个基因单独进行等位基因中介网状图的构建。

本研究使用3种方法来研究鳊有效种群大小的历史动态变化。(1)使用Arlequin 3.5 (Excoffier & Lischer, 2010)计算Tajima's D (Tajima, 1989)和Fu's F_s (Fu, 1997)值来检验群体是否经历扩张。所有分析均通过1,000次随机抽样交换检验参数显著性。(2)利用错配分布(mismatch distribution) (Rogers & Harpending, 1992)来检验群体是否经历扩张。错配分布分析用软件DnaSP5.10进行。(3)基于4个基因, 使用了一种非参数估计方法拓展贝叶斯天际线点图(Extended Bayesian Skyline Plots, EBSP)来分析鳊过去的群体数目的变化(Drummond et al, 2005)。

基于Mrmodeltest 2.3 (Nylander, 2004)计算每个基因的最优核苷酸替代模型, 使用BEAST v1.8.1 (Drummond & Rambaut, 2007)软件中的贝叶斯马尔可夫链的蒙特卡洛方法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)来进行EBSP分析。以*Cytb*进化速率作为指定, 其他3个基因的进化速率由*Cytb*进化速率估算获得。鉴于鲤科鱼类每百万年1.0%–2.0%的进化速率(Meyer, 1993; Durand et al, 2002; Ketmaier et al, 2004), 因此本研究分别使用1.0%和2.0%每百万年的进化速率来进行时间尺度的估算。EBSP采用严格

分子钟模型, 运行 10^9 代, 每1,000代进行抽样, 舍弃初始 10^8 代。最后利用Tracer 1.5 (Rambaut & Drummond, 2007)检验每个参数的稳定性状况。

2 结果

2.1 序列信息

本研究成功获得了52尾鳊的全部4个基因片段。在序列两端截齐后, 共获得: (1) 895 bp的*Cytb*序列, 其中包含了19个变异位点, 界定了13个单倍型; (2) 977 bp的*ND2*序列, 其中包含了12个变异位点, 界定了17个单倍型; (3) 763 bp的*myh6*序列, 其中包含了1个变异位点, 界定了2个等位基因; (4) 857 bp的*RAG2*序列, 其中包含了3个变异位点, 界定了3个等位基因(图1)。在4个基因片段中均未发现缺失和插入。合并后的线粒体基因和核基因分别界定了26个单倍型和5个等位基因(图1)。

2.2 遗传多样性

基于4个基因和联合基因估算的单倍型数目、单倍型多态性和核苷酸多态性见表3。基于线粒体基因估算的单倍型多态性介于0.784–0.940之间, 近期核苷酸多态性介于0.197%–0.239%之间, 历史核苷酸多态性介于0.272%–0.470%。基于核基因计算的单倍型多态性、近期核苷酸多态性和历史核苷酸多态性明显低于线粒体基因, 分别介于0.147–0.546, 0.022%–0.060%和0.029%–0.077%, 这主要是由于核基因进化速率较慢。此外, 除了*myh6*基因历史核苷酸多态性小于近期核苷酸多态性外, 其他基因或者基因组合的历史核苷酸多态性均大于近期核苷酸多态性。

基于不同基因和基因组合构建的单倍型和等位基因中介网状图表明, 西江中下游鳊并没有形成显著的支系结构(图1)。从图1可以看出, 2011年和2012年采集群体都检测到了私有单倍型: *Cytb*分别检测到8个和1个私有单倍型, *ND2*分别检测到4个和7个私有单倍型, *Cytb + ND2*分别检测到11个和9个私有单倍型, *myh6 + RAG2*分别检测到2个和1个私有等位基因。

2.3 种群动态历史

由于核基因变异位点少, 因此只对线粒体基因进行了中性检验和错配分布分析。结果发现, Fu's F_s 在*Cytb*, *ND2*和*Cytb + ND2*都检测到显著的负值,

Tajima's D 仅在*Cytb*基因上得到了显著的负值(表3),表明鳊发生了近期扩张。错配分布分析结果显示,鳊在*Cytb*和*ND2*上得到了单峰分布曲线,在*Cytb* + *ND2*上获得了多峰分布曲线(图2)。单峰分布曲线表

明群体经历了扩散。基于全部4个基因的EBSP分析发现,西江中下游鳊在0.13百万年前(Ma) (基于*Cytb*每百万年1.0%的进化速率)和0.06 Ma (基于*Cytb*每百万年2.0%的进化速率)发生了种群扩张(图3)。

表3 鳊遗传多样性指数、中性检验和最优核苷酸替代模型

Table 3 Genetic diversity indices, neutrality tests and optimal nucleotide substitution model of *Ochetobius elongatus*

	单倍型数/个体数 Number of haplotype/ sample size	单倍型多态性 Haplotype diversity	近期核苷酸多态性 Current nucleotide diversity (θ_n , %)	历史核苷酸多态性 Historical nucleotide diversity (θ_w , %)	Tajima's D 检验 Tajima's D test	Fu's F_s 检验 Fu's F_s test	最优模型 Optimal model
<i>Cytb</i>	13/52	0.784	0.197	0.470	-1.83**	-5.43**	HKY+I
<i>ND2</i>	17/52	0.869	0.239	0.272	-0.35	-8.16***	F81+I+G
<i>Cytb</i> + <i>ND2</i>	26/52	0.940	0.219	0.366	-1.33	-14.54***	-
<i>myh6</i>	2/52	0.462	0.060	0.029	-	-	HKY
<i>RAG2</i>	3/52	0.147	0.022	0.077	-	-	F81
<i>myh6</i> + <i>RAG2</i>	5/52	0.546	0.040	0.055	-	-	-

** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

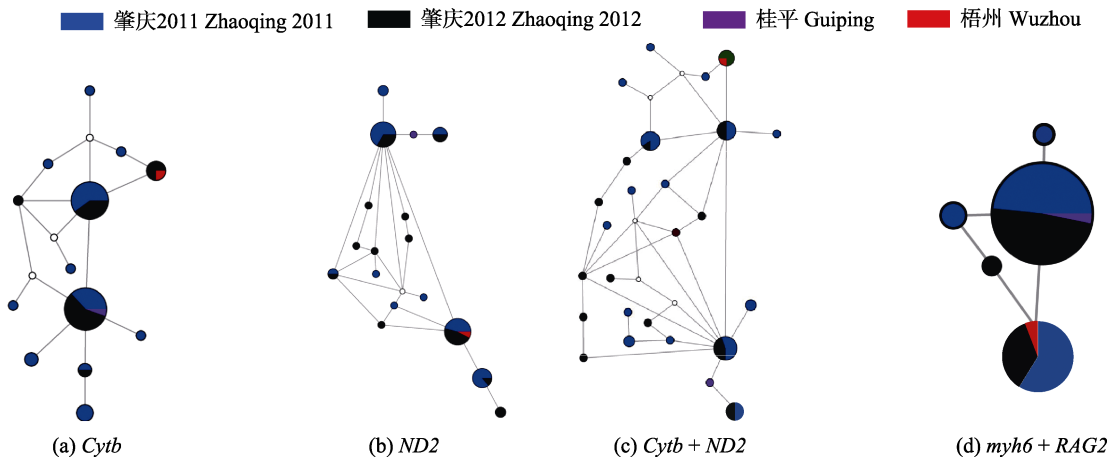


图1 基于不同基因和基因组合的单倍型/等位基因中介网状图。白色圆圈表示缺失单倍型。

Fig. 1 Median-joining networks of haplotype and allele based on different genes and gene groups. White circles indicate missing haplotype.

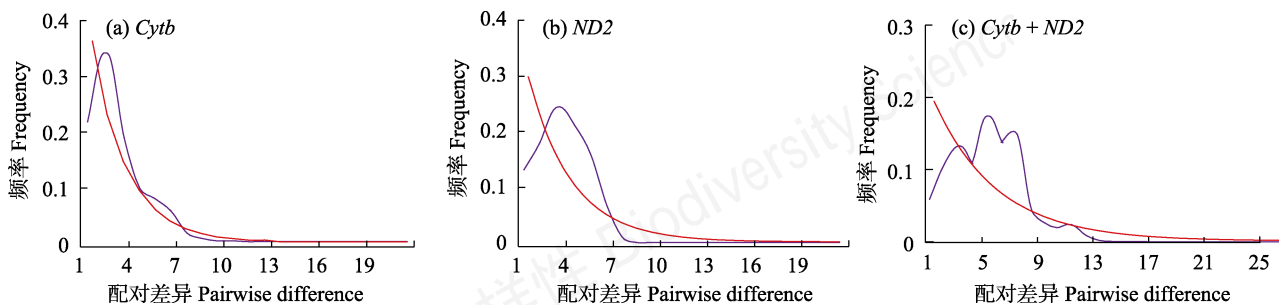


图2 基于不同基因和基因组合的错配分布分析。红色和紫色线条分别表示观测值和期望值。

Fig. 2 Mismatch distribution analysis based on different genes and gene groups. Red and purple lines represent observed value and expected values, respectively.

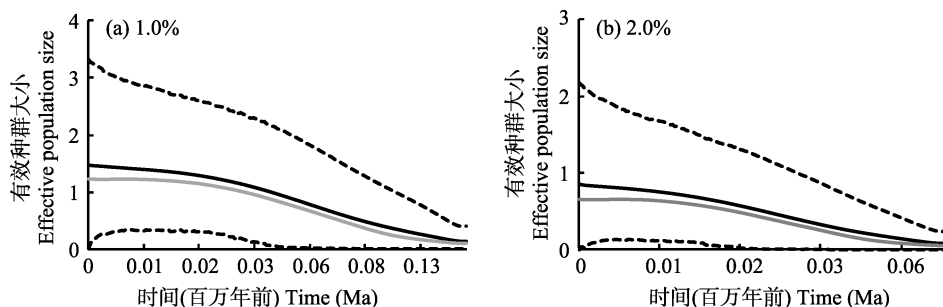


图3 拓展贝叶斯天际线图(EBSP)。黑色实线表示有效种群大小的平均值, 灰色实线表示有效种群大小的中位数值, 虚线表示95%置信区间的有效种群大小。

Fig. 3 Extended Bayesian Skyline plots. Black lines represent mean values of effective population size, gray lines represent median values of effective population size, and dashed lines represent 95% confidence interval of effective population size.

3 讨论

3.1 遗传多样性

通过野外捕获鳊幼苗和实验室环境培育的方法, 本研究在广东省西江肇庆江段一共获得了50尾鳊样本。鳊产漂流性卵, 易随水流迁移扩散。研究表明, 漂流性鱼卵发育至幼苗阶段的累计漂流距离可达几十至几百公里, 甚至上千公里(Nesler et al, 1988; Tyus & Haines, 1991; Araujo-Lima & Oliveira, 1998; Zitek et al, 2004)。单倍型/等位基因中介网状图也显示2011年和2012年的幼苗中均具有一定比例的私有单倍型/等位基因, 表明鳊样本具有多个亲本。因此, 2011年5月和2012年5月在肇庆江段多次采集的幼苗在一定程度上能够代表西江中下游鳊的种质资源。

研究表明, 西江中下游鳊的遗传多样性呈现较低的水平。作为曾经的重要经济鱼类, 鳊的核苷酸多样性显著低于西江红水河江段鲢的核苷酸多样性($\theta_{\pi} = 0.36\% - 3.09\%$) (吴伟军等, 2015)和长江流域鳊的平均核苷酸多样性($\theta_{\pi} = 0.80\%$) (李思发等, 1998), 但却显著高于珠江($\theta_{\pi} = 0.104\%$)、长江($\theta_{\pi} = 0.092\%$)和黑龙江($\theta_{\pi} = 0.037\%$)草鱼的核苷酸多样性(朱叶, 2012^①)以及珠江和长江青鱼的总核苷酸多样性($\theta_{\pi} = 0.159\%$) (付晓艳, 2011^②)。较高水平的单倍型多态性(> 0.5)和较低水平的核苷酸多态性(< 0.5%)表明鳊可能在种群快速扩张和累积突变之后, 经历了种群的瓶颈效应(Grant & Bowen, 1998)。自

第四纪以来, 我国华南地区在历史上经历了河流袭夺、海水侵蚀、气候变化等系列地质事件(Gascoyne et al, 1979; 陈宜瑜等, 1986), 一定程度上改变了气候和水域营养情况, 显著影响了鱼类的种群动态历史。鳊作为肉食性鱼类, 易受到水体营养状况的影响。本研究的中性检验、错配分布分析和EBSP分析均证实西江中下游鳊经历了近期的种群扩张。此外, 由于水利开发、过度捕捞、江河水质污染等诸多原因, 导致鳊资源量急剧下降, 近十年极少觅其踪迹, 这也可能使鳊经历遗传瓶颈效应。基于多个基因和基因组合估算的历史核苷酸多态性均大于近期核苷酸多态性也证实了西江中下游鳊群体的遗传多样性发生了显著的衰退。

3.2 种群动态历史

大量研究表明, 更新世气候的波动对许多动植物的遗传多样性和分布格局产生了重要的影响(Hewitt, 2004)。中性检验、错配分布分析和EBSP分析均检测到西江中下游鳊经历近期种群扩张的信号。基于1.0%和2.0%的进化速率估算出鳊发生种群扩张分别发生在距今0.13 Ma和0.06 Ma, 刚好介于后更新世期间(0.126–0.018 Ma)。我国华南地区在中更新世期间(0.786–0.126 Ma)经历了多次冰期(Gascoyne et al, 1979), 气候变冷、海平面下降、食物紧缺, 不利于生物的生存繁衍。冰期褪去后的间冰期, 即后更新世期间(0.126–0.018 Ma), 气候回暖, 海平面上升, 营养物质丰富, 大大促进了鳊的种群扩张。因此, 更新世冰期与间冰期循环导致的气候波动影响了西江中下游鳊的种群动态历史。

3.3 保护建议

目前, 鳊的资源量衰退极其严重, 在很多河流

① 朱叶 (2012) 基于线粒体细胞色素 *b* 的三江水系草鱼群体遗传多样性分析. 硕士学位论文, 暨南大学, 广州.

② 付晓艳 (2011) 长江和珠江水系青鱼线粒体细胞色素 *b* 基因遗传多样性分析. 硕士学位论文, 暨南大学, 广州.

江段已多年未被监测到。在最新修订的《中国脊椎动物红色名录》中, 鳊的保护等级已上升为极度濒危(蒋志刚等, 2016)。本研究也表明西江中下游鳊的遗传多样性发生了显著的衰退。稀缺的资源 and 较低的遗传多样性使鳊极易受到环境变化等因素的影响, 时刻面临灭绝的风险。种群动态历史分析发现鳊易受到气候变化的影响, 因此鳊在全球气候变化的大环境下更应该得到足够的重视。由于水利工程建设一定程度上阻断了鳊的洄游路线, 过度捕捞则直接导致鳊资源的减少, 因此过鱼通道的增设和禁捕的相关规定很有必要。另外, 本研究组每年的仔稚鱼普查中都在西江中下游发现一定数量的鳊幼苗, 这表明西江中下游是鳊在珠江水系比较重要的产卵场。建议在西江中下游江段建立鳊的自然保护区, 用于保护和恢复鳊的种质资源。

参考文献

- Araujo-Lima CARM, Oliveira EC (1998) Transport of larval fish in the Amazon. *Journal of Fish Biology*, 53, 297–306.
- Bandelt HJ, Forster P, Rohlf A (1999) Median-joining networks for inferring intraspecific phylogenies. *Molecular Biology and Evolution*, 16, 37–48.
- Chen WJ, Miya M, Saitoh K, Mayden RL (2008) Phylogenetic utility of two existing and four novel nuclear gene loci in reconstructing Tree of Life of ray-finned fishes: The order Cypriniformes (Ostariophysi) as a case study. *Gene*, 423, 125–134.
- Chen YY, Cao WX, Zheng CY (1986) Ichthyofauna of the Zhujiang River with a discussion on zoogeographical divisions for freshwater fishes. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 10, 228–234. (in Chinese with English abstract) [陈宜瑜, 曹文宣, 郑慈英 (1986) 珠江的鱼类区系及其动物地理区划的讨论. *水生生物学报*, 10, 228–234.]
- Drummond AJ, Rambaut A (2007) BEAST: Bayesian evolutionary analysis by sampling trees. *BMC Evolutionary Biology*, 7, 214.
- Drummond AJ, Rambaut A, Shapiro B, Pybus OG (2005) Bayesian coalescent inference of past population dynamics from molecular sequences. *Molecular Biology and Evolution*, 22, 1185–1192.
- Durand JD, Tsigenopoulos CS, Unlu E, Berrebi P (2002) Phylogeny and biogeography of the family Cyprinidae in the Middle East inferred from cytochrome *b* DNA—Evolutionary significance of this region. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 25, 91–100.
- Edgar RC (2004) MUSCLE: Multiple sequence alignment with high accuracy and high throughput. *Nucleic Acids Research*, 32, 1792–1797.
- Excoffier L, Lischer HEL (2010) Arlequin suite ver 3.5: A new series of programs to perform population genetics analyses under Linux and Windows. *Molecular Ecology Resources*, 10, 564–567.
- Fu YX (1997) Statistical tests of neutrality of mutations against population growth, hitchhiking and background selection. *Genetics*, 147, 915–925.
- Gascoyne M, Benjamin GJ, Schwarcz HP, Ford DC (1979) Sea-level lowering during the Illinoian glaciation: Evidence from a Bahama “blue hole”. *Science*, 205, 806–808.
- Grant WS, Bowen BW (1998) Shallow population histories in deep evolutionary lineages of marine fishes: Insights from sardines and anchovies and lessons for conservation. *Journal of Heredity*, 89, 415–426.
- Hewitt GM (2004) Genetic consequences of climatic oscillations in the Quaternary. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 359, 183–195.
- 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. [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹖, 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.]
- Ketmaier V, Bianco PG, Cobolli M, Krivokapic M, Caniglia R, De Mattheis E (2004) Molecular phylogeny of two lineages of Leuciscinae cyprinids (*Telestes* and *Scardinius*) from the peri-Mediterranean area based on cytochrome *b* data. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 32, 1061–1071.
- Li J, Li XH, Jia XP, Li YF, He MF, Tan XC, Wang C, Jiang WX (2010) Evolution and diversity of fish community in Xijiang River. *Journal of Fishery Sciences of China*, 17, 298–311. (in Chinese with English abstract) [李捷, 李新辉, 贾晓平, 李跃飞, 何美峰, 谭细畅, 王超, 蒋万祥 (2010) 西江鱼类群落多样性及其演变. *中国水产科学*, 17, 298–311.]
- Li SF, Lü GQ, Bernatchez L (1998) Diversity of mitochondrial DNA in the populations of silver carp, bighead carp, grass carp and black carp in the middle- and lower reaches of the Yangtze River. *Acta Zoologica Sinica*, 44, 82–93. (in Chinese with English abstract) [李思发, 吕国庆, Bernatchez L (1998) 长江中下游鲢鳙草青四大家鱼线粒体DNA多样性分析. *动物学报*, 44, 82–93.]
- Li YF, Li XH, Tan XC, Li J, Wang C (2012) Occurrence of larval *Elopichthys bambusa* and its relationship with hydrological conditions in the middle and lower reaches of Pearl

- River. *Journal of Fisheries of China*, 36(4), 15–22. (in Chinese with English abstract) [李跃飞, 李新辉, 谭细畅, 李捷, 王超 (2012) 珠江中下游鳊鱼苗的发生及其与水文环境的关系. *水产学报*, 36, 15–22.]
- Liang ZS, Mo RL, Chen FC (1985) Species identification and spawning type of common fish species in Xijiang River during early phase. In: *The Report of Fishery Research in Pearl River Basin*. Compilation Committee of Fishery Resources Survey of Pearl River Basin, Guangzhou. (in Chinese) [梁秩燊, 莫瑞林, 陈福才 (1985) 西江常见鱼类早期发育的分类鉴定及其产卵类型. 见: 珠江水系渔业资源调查研究报告. 珠江水系渔业资源调查编委会, 广州.]
- Librado P, Rozas J (2009) DnaSP v5: A software for comprehensive analysis of DNA polymorphism data. *Bioinformatics*, 25, 1451–1452.
- Lovejoy NR, Collette BB (2001) Phylogenetic relationships of new world needlefishes (Teleostei: Belontiidae) and the biogeography of transitions between marine and freshwater habitats. *Copeia*, 2001, 324–338.
- Meyer A (1993) *Evolution of Mitochondrial DNA in Fishes*. Elsevier, The Hague.
- Nesler TP, Muth RT, Wasowicz AF (1988) Evidence for baseline flow spikes as spawning cues for Colorado squawfish in the Yampa River, Colorado. In: *American Fisheries Society Symposium*, pp. 68–79. Bethesda, Maryland.
- Nylander JAA (2004) MrModeltest v2. Evolutionary Biology Centre, Uppsala University, Uppsala.
- Rambaut A, Drummond A (2007) Tracer v1.4. <http://beast.bio.ed.ac.uk/Tracer>. (accessed on 2018-3-2).
- Rogers AR, Harpending H (1992) Population growth makes waves in the distribution of pairwise genetic differences. *Molecular Biology and Evolution*, 9, 552–569.
- Tajima F (1989) The effect of change in population size on DNA polymorphism. *Genetics*, 123, 597–601.
- Tao W, Zou M, Wang X, Gan X, Maiden RL, He S (2010) Phylogenomic analysis resolves the formerly intractable adaptive diversification of the endemic clade of east Asian Cyprinidae (Cypriniformes). *PLoS ONE*, 5, e13508.
- Tyus HM, Haines GB (1991) Distribution, habitat use, and growth of age-0 Colorado squawfish in the Green River basin, Colorado and Utah. *Transactions of the American Fisheries Society*, 120, 79–89.
- Wang X, Li J, He S (2007) Molecular evidence for the monophyly of East Asian groups of Cyprinidae (Teleostei: Cypriniformes) derived from the nuclear recombination activating gene 2 sequences. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 42, 157–170.
- Wu WJ, Peng M, Wang DP, Shi J, Li YS, Han YQ, Lei JJ, He AY (2015) Comparison of mitochondrial D-Loop and Cyt b sequences of *Hypophthalmichthys molitrix*. *Open Journal of Fisheries Research*, 2(4), 67–73. (in Chinese with English abstract) [吴伟军, 彭敏, 王大鹏, 施军, 李育森, 韩耀全, 雷建军, 何安尤 (2015) 红水河鲢线粒体D-Loop和Cyt b 基因序列分析. *水产研究*, 2(4), 67–73.]
- Xiao W, Zhang Y, Liu H (2001) Molecular systematics of Xenocyprinae (Teleostei: Cyprinidae): Taxonomy, biogeography, and coevolution of a special group restricted in East Asia. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 18, 163–173.
- Yue PQ (2000) *Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes II* Science Press, Beijing. (in Chinese) [乐佩琦 (2000) 中国动物志. 硬骨鱼纲, 鲤形目, 中卷. 科学出版社, 北京.]
- Zheng CY (1989) *The Ichthyography of the Pearl River*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑慈英 (1989) 珠江鱼类志. 科学出版社. 北京.]
- Zitek A, Schmutz S, Unfer G, Ploner A (2004) Fish drift in a Danube sidearm-system: I. Site-, inter- and intraspecific patterns. *Journal of Fish Biology*, 65, 1319–1338.

(责任编辑: 何舜平 责任编辑: 时意专)



•研究报告•

施氮水平影响蚯蚓介导的番茄生长及抗虫性

张 宇¹ 肖正高¹ 蒋林惠¹ 钱 蕾² 陈小云¹
陈法军² 胡 锋¹ 刘满强^{1*}

1 (南京农业大学资源与环境科学学院土壤生态实验室, 南京 210095)

2 (南京农业大学植物保护学院, 南京 210095)

摘要: 过量施用氮肥不仅导致严重的生态环境问题, 还会限制土壤生物驱动的生态系统服务功能。蚯蚓的取食和掘穴等活动可以促进土壤肥力和植物生长, 进而影响植物与病虫害的关系。了解氮肥与害虫作用下蚯蚓对植物抗虫性的影响, 有助于揭示土壤动物的生态功能调控机制。采用蚯蚓(威廉腔环蚓*Metaphire guillelmi*)、西花蓟马(*Frankliniella occidentalis*)和氮肥用量的三因子完全交互设计, 利用番茄(*Lycopersicon esculentum*)盆栽实验探索了不同氮水平下蚯蚓对番茄生长及对植食者抗性的影响。结果表明, 在低氮条件下蚯蚓显著降低了番茄茎叶干生物量、根系干生物量及茎叶可溶性糖含量, 而茎叶的茉莉酸和水杨酸含量分别是无蚯蚓对照的 6 倍和 3 倍, 且伴随着西花蓟马数量下降了 58%。在高氮水平时, 蚯蚓未影响番茄茎叶茉莉酸、茎叶水杨酸含量及西花蓟马数量。蚯蚓介导的番茄营养物质(茎叶可溶性糖和茎叶全氮)和防御信号物质(茎叶茉莉酸和茎叶水杨酸)含量分别与西花蓟马数量呈显著的正相关和负相关。总之, 氮肥施用改变的土壤氮有效性通过改变植物资源和防御物质含量转变了蚯蚓介导的植物抗虫性响应; 全面了解土壤生物对植物生长的影响需要综合考虑土壤管理–土壤动物–植物病原物三者之间的关系。

关键词: 土壤动物; 植物化学组成; 害虫; 地上和地下部; 生态系统服务

Nitrogen levels modify earthworm-mediated tomato growth and resistance to pests

Yu Zhang¹, Zhenggao Xiao¹, Linhui Jiang¹, Lei Qian², Xiaoyun Chen¹, Fajun Chen², Feng Hu¹, Manqiang Liu^{1*}

1 Soil Ecology Laboratory, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

2 College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

Abstract: Excessive chemical nitrogen (N) fertilizer application causes serious environmental problems and affects the ecosystem services that depend on soil biota. Earthworms improve soil fertility and plant productivity via activities such as feeding, burrowing and casting, and alter the relationships between crop plants and pests by modifying plant primary and secondary productivity. In order to mechanistically understand the functional roles of soil fauna in ecosystem services, a pot experiment using tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) was conducted in a greenhouse. The study used a complete factorial design that manipulated earthworm (*Metaphire guillelmi*) abundance, western flower thrips (*Frankliniella occidentalis*) and N input. Results showed that under low N-input conditions, earthworms significantly reduced shoot and root biomass and shoot soluble sugar content, and increased shoot jasmonic acid content (by 6 times) and shoot salicylic acid content (by 3 times), compared to treatments without earthworms. This was accompanied by the decrease of thrips abundance by 58%, indicating a remarkable suppression of aboveground pests by earthworms. However, under high N-input conditions, earthworm presence did not affect the contents of shoot jasmonic acid or shoot salicylic acid or thrips abundance by the end of the experimental period (45 days). The earthworm-mediated responses of plant nutrition (shoot soluble sugar and shoot total nitrogen)

收稿日期: 2018-09-12; 接受日期: 2018-11-19

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0200305)、国家自然科学基金(41771287)、公益性行业(农业)科研专项(201503121)和江苏高校优势学科(PAPD)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liumq@njau.edu.cn

was significantly positively correlated with thrips abundance, whereas defense (shoot jasmonic and salicylic acid) was significantly negatively correlated. Changes to soil N availability due to N fertilizer input can shift the direction of earthworm-mediated plant resistance against herbivores by altering plant resource acquisition and secondary defense. Effects of earthworms on plant growth and resistance depend on soil management practices such as N fertilizer application. A comprehensive understanding of the roles of soil biota in mediating plant growth requires knowledge of the multifaceted relationships among soil management, soil fauna, and plant pathogens.

Key words: soil fauna; plant chemistry; pests; aboveground–belowground; ecosystem service

随着人口增长引起的农产品需求增加, 高强度集约化管理正成为促进农业生产的重要手段(Bommarco et al, 2013; 徐炜等, 2016)。然而, 高强度土地利用方式会导致土壤生物多样性丧失和生态系统服务功能受损(Tsiafouli et al, 2015; 潘开文等, 2016)。此外, 过量施用化肥也是降低作物抗病虫能力及导致病虫害暴发的主要因素(Larbat et al, 2012); 化学肥料施用引发的农药依赖性增强的反馈作用会进一步破坏生态平衡, 使人类的生产活动及人类健康与生态环境走向恶性循环(Aurélien et al, 2013; Bender et al, 2016)。在保护生态环境和农业可持续发展的要求下, 挖掘土壤生物的有益功能, 加强对植物–土壤生物之间互作关系的认识, 以减少对化肥农药的依赖, 指导病虫害综合管理和促进生态农业发展。因此, 系统了解关键土壤生物的生态功能及其对植物生长和抗虫性的影响机制, 显得尤为迫切且重要。

自然界的植物在生长过程中往往遭受植食者的取食压力, 在与植食者协同进化的过程中, 植物会进化出各种策略以提高自身的防御能力(Kempel et al, 2011)。土壤施肥措施特别是氮肥施用引起的土壤养分变化又调控着植物对植食者的抵抗能力(Bogaert et al, 2017)。氮素直接参与植物体内的生理生化过程并改变植物体内的组织液成分, 影响植物的营养组成(氨基酸和糖类等), 最终影响植食者的取食和植物的防御响应, 如土壤的高氮水平会使得植物体含氮量高、提高植物对害虫的适口性(Staley et al, 2010); 而氮素匮乏会导致植物因缺乏营养而不能正常生长甚至降低自身抗性引发害虫取食(Shokoofa & Emam, 2008)。越来越多的研究表明, 土壤生物对地上部系统从个体到群落及功能水平上均起着调控作用(傅声雷, 2007; 王邵军和阮宏华, 2008; Korres et al, 2016)。土壤生物能够直接或间接调控根系这一枢纽进而对植物地上部性状产生影

响(吴纪华等, 2007; Bardgett & van der Putten, 2014; Schädler & Ballhorn, 2017)。例如, 研究发现菌根真菌、根际促生菌等能促进植物的生长并调控植物抵御病虫害的能力(Aurélien et al, 2013; Tao et al, 2016)。已有的蚯蚓方面的研究表明, 蚯蚓可以促进植物对养分的吸收(Zhang et al, 2010), 其对植物促生效应的大小与方向还取决于土壤氮素水平(van Groenigen et al, 2014)。虽然蚯蚓对植物抗虫性的影响也取决于氮素水平, 但是却缺乏足够的实验证据。

一般认为提高土壤氮素有效性是蚯蚓促进植物生长或生产力的最主要机制(Bertrand et al, 2015)。荟萃分析归纳出蚯蚓影响植物生长的效果在土壤氮素贫瘠时更明显(van Groenigen et al, 2014)。值得注意的是, 蚯蚓提高植物氮含量的同时也导致以其为宿主的病虫害的发展(Wurst et al, 2010a)。氮素水平还能够改变植物用于防御的次生代谢物质的合成(Wurst et al, 2004), 间接影响植食者的取食及行为(Poveda et al, 2005; Loranger-Merciris et al, 2012)。植物次生代谢物质总酚、信号分子茉莉酸和水杨酸可以诱导一系列抗逆信号传导和防御反应, 可以抵御虫害(Caarl's et al, 2015)。研究者发现, 蚯蚓可提高植物生物量及养分含量, 增加植物耐受植食者的取食胁迫(Blouin et al, 2005)。最近的荟萃分析也表明了蚯蚓介导的植物抗性的资源分配模式受到植食者类型及土壤养分等因素的影响(Xiao et al, 2018)。迄今, 有关蚯蚓对植食者影响的研究多集中在刺吸者蚜虫上, 蚯蚓可以刺激抗性防御物质的产生, 从而降低蚜虫的数量(Lohmann et al, 2009)。有关蚯蚓对其他类型害虫影响的研究仍缺乏, 限制了对蚯蚓–植物关系调控作用的全面认识。蚯蚓影响植物生长和防御抗性的效应大小和方向会因各种生物和环境条件而变(Wurst, 2013)。依据生长–抗性权衡假说, 我们推测蚯蚓介导的植物生长与抗性之

间的关系会依赖于土壤氮素水平, 氮素水平高低导致的植物能量储备差异使植物生长和抗性关系发生变化(Züst & Agrawal, 2017)。例如, 当土壤氮素匮乏时, 蚯蚓可促进矿化过程来缓解植物养分限制, 相应地, 植物储备能量的增加也提高了合成抗性物质的能力; 当氮素充足时, 植物生长速率较快, 相应合成的抗性物质含量较低, 在此条件下高植食压力发挥主导作用, 而高氮施用带来的蚯蚓摄取食物的元素不均衡及土壤结构和性质的改变, 可能会造成蚯蚓生理胁迫, 使蚯蚓对植物生长和抗性的影响均较弱(Brown et al, 2004; Mundim et al, 2017; Zheng et al, 2018)。

西花蓟马(*Frankliniella occidentalis*)是全球最重要的检疫性害虫之一, 严重危害蔬菜作物, 它以锉吸式口器取食植物的茎叶及花果, 严重时导致植物枯萎死亡(吕要斌等, 2011), 其对植物的破坏作用并不亚于在蚯蚓研究中普遍关注的蚜虫。特别是考虑到植食者与植物的相互关系在不同取食类型的植食者间存在明显差异(Xiao et al, 2018), 因此有必要了解更多植食者种类下蚯蚓的作用机制和影响因素。基于比较施氮量对蚯蚓介导的番茄生长及其对西花蓟马抗性的影响, 探究蚯蚓介导的植物生长及防御作用的影响, 旨在系统地了解蚯蚓的生态服务功能及植物抗虫性调控机制, 指导农业的绿色发展。

1 材料与方法

1.1 土壤的采集

土壤采自江苏省如东县农业生态功能调控研究基地的多年蔬菜地(120°42' E, 32°12' N), 属亚热带季风气候, 年平均气温15°C, 年均降水量1,042 mm。供试土壤为粘壤土, 取样深度为0–20 cm。鲜土采集后过5 mm 筛, 剔除大型土壤动物及根茬等残体。土壤质地为6.48%黏粒, 63.55%粉粒, 29.97%砂粒, 土壤 pH 值(水土比2.5: 1)为7.75, 土壤硝态氮含量为22.32 mg/kg, 铵态氮含量为0.96 mg/kg, 总有机碳和全氮含量分别为10.73 g/kg 和0.52 g/kg。

1.2 实验设计和布置

采用3因子, 即蚯蚓、西花蓟马(western flower thrips, WFT)和氮肥用量的交互实验设计, 设置不施氮(0 kg N/ha) vs. 施高氮(240 kg N/ha), 获得土壤低氮(Low N)和高氮(High N)两个水平, 施高氮处理的施肥量为240 kg N/ha 的尿素, 地上部植食者

(-WFT = 无西花蓟马, +WFT = 接种西花蓟马)、蚯蚓(E0 = 无蚯蚓, E1 = 接入威廉腔环蚓(*Metaphire guillelmi*)) 3个因子, 重复6次, 总共 $2 \times 2 \times 2 \times 6 = 48$ 盆。

供试植物为番茄(*Lycopersicon esculentum*), 品种为“世纪红冠”, 具有抗病性及耐热性好、高抗番茄花叶病毒叶霉病、枯萎病和灰霉病等特性。挑选饱满番茄种子, 用10%的H₂O₂浸泡30 min进行表面灭菌并清洗, 在无菌水中浸泡12 h, 然后将番茄种子置于湿纱布中25°C下培养3 d发芽, 长至幼苗待用。供试西花蓟马由山东省农业科学院植物保护研究所提供。

盆栽实验在人工气候室中进行(温度 25 ± 1 °C, 光照时间16 h, 光照强度15,000 lux)。每盆装1.5 kg 干重当量的土壤, 调节含水量为饱和持水量的60%, 并在25°C黑暗条件下培养1周。供试蚯蚓为从深层种向内层种的过渡类群, 现习惯称为内层种, 蚯蚓采集与盆栽土壤的采集地点相同。选择大小及生物量相近的蚯蚓清洗表面, 48 h 排空肠道后洗净并称量(Dalby et al, 1996)。基于蚯蚓采集地田间密度(105 条/m²), 蚯蚓的接种量为每盆3条总共 10 ± 0.43 g, 各处理具体接种量见表1。当番茄幼苗有3片完全叶时移栽入盆, 所有盆钵每周随机换位3次以最小化位置效应, 每2 d 浇50 mL 蒸馏水。待番茄生长30 d 时接入西花蓟马, 用软毛刷刷取成虫20头至2 mL 离心管内待用, 雌雄比为1:1。每株番茄选择两片靠近顶端的叶片进行接种, 即每盆接种40头蓟马, 用250目纱网罩封住已接虫叶片, 防止西花蓟马逃逸。

1.3 采样和保存

西花蓟马接种15 d 后进行破坏性采样。整个盆栽实验周期持续45 d, 采样时先将西花蓟马从接虫叶片上用吸虫管收集并计数。番茄植株地上部茎叶和地下部的根系及土壤等分别采集。采样时番茄根系几乎分布于整个土体。主要测定指标包括西花蓟马的数量、番茄营养物质、番茄防御物质及信号物质等。

1.4 分析方法

植株全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂法消解, 凯氏定氮法测定(鲁如坤, 2000)。植株激素用高效液相色谱-串联质谱法(Hettenhausen et al, 2013)测定: 称取样品液氮研磨, 加入交联聚乙烯吡咯烷酮(PVPP)和乙酸乙酯冰浴超声后离心, 转移上清液到新离心管, 氮

表 1 不同处理下威廉腔环蚓的数量及生物量变化

Table 1 Changes in biomass and number of *Metaphire guillelmi* under different treatments

处理 Treatments	接种时 Inoculation time		采样时 Sampling time		蚯蚓失重率 Weight loss of the earthworm (%)	
	数量 Number	生物量 Biomass (g)	数量 Number	生物量 Biomass (g)		
无西花蓟马 -WFT	低氮 Low N	3	10.49 ± 0.27	3	9.19 ± 0.34	12.39
	高氮 High N	3	10.35 ± 0.24	3	8.63 ± 0.47	16.62
接种西花蓟马 +WFT	低氮 Low N	3	10.19 ± 0.19	3	8.52 ± 0.22	16.39
	高氮 High N	3	10.27 ± 0.26	3	7.85 ± 0.66	23.56

Low N, 0 kg N/ha urea; High N, 240 kg N/ha urea.

吹浓缩, 加入70%甲醇涡旋后离心, 将上清液过0.22 μm滤膜, 保存待测。植株酚类的测定采用福林酚比色方法(Ainsworth & Gillespie, 2007): 取20 mg植株研磨成粉, 加95%甲醇后黑暗浸提。离心后取上清液到新离心管, 添加斐林试剂和Na₂CO₃后室温黑暗反应2 h, 读取其在波长765 nm处的吸光值。

土壤全氮以半微量凯氏法测定。土壤微生物生物量碳(MBC)和土壤微生物生物量氮(MBN), 采用氯仿熏蒸法测定。土壤可溶性有机碳(DOC), 称取新鲜土壤于浸提瓶中加入超纯水振荡, 离心过滤膜稀释后用 TOC 仪(Elementar, Germany)测定。利用连续流动分析仪(SKALAR San++, Holland)测定土壤铵态氮和硝态氮含量。

1.5 数据分析

运用R 3.3.2软件进行数据分析与作图, 利用Kolmogorov-Smirnov和Levene方法检验数据的正态分布及方差异质性。采用多因素方差分析估计蚯蚓、氮素以及植食者因素对番茄生长和植物化学组成等指标的影响。通过Pearson's相关性计算防御物质茎叶茉莉酸、茎叶水杨酸与西花蓟马数量之间的关系。

2 结果

2.1 土壤性质变化

蚯蚓对土壤矿质氮、微生物生物量的影响取决于氮素水平和西花蓟马(表2)。低氮时蚯蚓对土壤硝态氮含量无影响, 高氮时降低了硝态氮含量(图1)。在没有西花蓟马时, 蚯蚓增加了铵态氮含量, 接种西花蓟马后, 蚯蚓反而降低了铵态氮含量。接种蚯蚓增加了土壤微生物生物量氮, 但降低了微生物生物量碳含量(图1)。

2.2 番茄生长及营养物质变化

蚯蚓对番茄生物量及营养物质的影响与氮素水平和西花蓟马有关($P < 0.05$, 表3)。蚯蚓和氮素的交互作用显著影响根系生物量和茎叶可溶性糖含量, 低氮时蚯蚓降低根系生物量和茎叶可溶性糖, 而高氮下无影响(表3, 图2)。蚯蚓作用增加了番茄茎叶全氮含量, 但降低了根系全氮含量(图2)。

2.3 番茄防御物质含量和西花蓟马数量的变化

蚯蚓对番茄茎叶茉莉酸、茎叶水杨酸及总酚的影响与氮素水平及西花蓟马有关($P < 0.05$, 表3)。有西花蓟马时, 低氮下番茄的茎叶茉莉酸和水杨酸含

表 2 蚯蚓、氮素及植食者因素对土壤硝态氮、铵态氮、微生物生物量碳含量和微生物生物量氮含量影响的方差分析结果

Table 2 ANOVA results showing the effects of earthworm, nitrogen and herbivore on the contents of NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in soils

变量 Variables	蚯蚓 Earthworm (E) (df = 1)	氮素 Nitrogen (N) (df = 1)	西花蓟马 Thrips (WFT) (df = 1)	E × N (df = 1)	E × WFT (df = 1)	N × WFT (df = 1)	E × N × WFT (df = 1)
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	18.49***	87.43***	8.21**	18.02***	3.51	6.67*	3.68
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	4.07	2.06	10.82**	1.91	27.26***	0.00	0.28
微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	10.35**	1.00	60.26***	2.66	0.99	15.51***	2.00
微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen	11.94**	0.38	2.69	0.84	3.90	2.44	23.70***

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

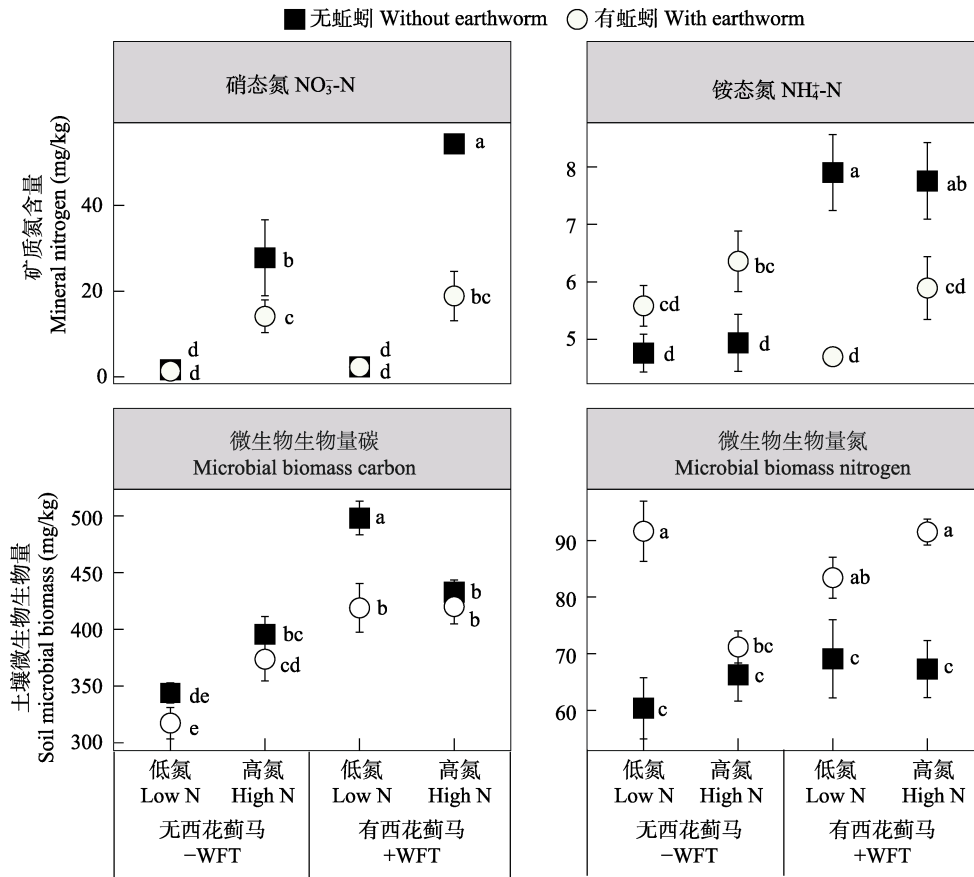


图 1 不同氮素条件下, 蚯蚓在西花蓟马(WFT)有无时对土壤硝态氮、铵态氮、微生物生物量碳和微生物生物量氮含量(平均值 ± 标准差, $n = 6$)的影响。-WFT和+WFT分别表示无西花蓟马和有西花蓟马。不同小写字母表示各处理间差异显著 (Fisher's LSD检验, $P < 0.05$)。

Fig. 1 Effects of earthworm *Metaphire guillelmi* on the contents of soil NO_3^- -N, NH_4^+ -N, microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in the absence or presence of western flower thrips (WFT) under low and high N inputs (mean \pm SD, $n = 6$). In the figure, -WFT and +WFT indicate without and with western flower thrips, respectively. Means with different letters indicate significant difference among treatments (Fisher's LSD test, $P < 0.05$). Error bars are standard errors.

表 3 蚯蚓、氮素、植食者因素及其交互作用对番茄茎叶及根系营养和化学防御性状的影响

Table 3 Effects of earthworm, nitrogen, herbivore and their interactions on the nutrients and chemical traits of tomato shoots and roots

变量 Variables	蚯蚓 Earthworm (E) ($df = 1$)	氮素 Nitrogen (N) ($df = 1$)	西花蓟马 Thrips (WFT) ($df = 1$)	E × N ($df = 1$)	E × WFT ($df = 1$)	N × WFT ($df = 1$)	E × N × WFT ($df = 1$)
茎叶干生物量 Shoot dry biomass	22.49***	117.88***	10.36**	2.39	1.64	5.86*	0.05
根系干生物量 Root dry biomass	13.77***	2.08	0.20	11.47**	0.00	0.22	1.68
茎叶可溶性糖 Shoot soluble sugar	25.21***	2.09	15.47***	17.79***	2.01	0.03	0.03
根系可溶性糖 Root soluble sugar	0.01	0.71	2.68	2.17	3.69	1.39	13.09***
茎叶全氮 Shoot total nitrogen	12.21**	182.83***	1.19	3.10	0.00	0.07	1.70
根系全氮 Root total nitrogen	20.37***	246.77***	15.21***	0.06	11.12**	2.79	2.11
茎叶游离氨基酸 Shoot amino acid	0.97	20.43***	7.57**	0.73	0.28	26.10***	8.31**
根系游离氨基酸 Root amino acid	46.10***	43.08***	7.38**	21.88***	14.80***	32.87***	0.96
茎叶酚 Shoot phenolics	2.36	36.23***	4.75*	1.50	2.26	0.31	29.01***
根系酚 Root phenolics	3.61	0.01	51.47***	9.75**	0.00	0.01	33.56***
茎叶水杨酸 Shoot salicylic acid	49.52***	0.08	0.11	72.61***	80.09***	18.73***	95.11***
茎叶茉莉酸 Shoot jasmonic acid	156.85***	3.54	26.94***	38.62***	83.52***	64.95***	116.73***

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

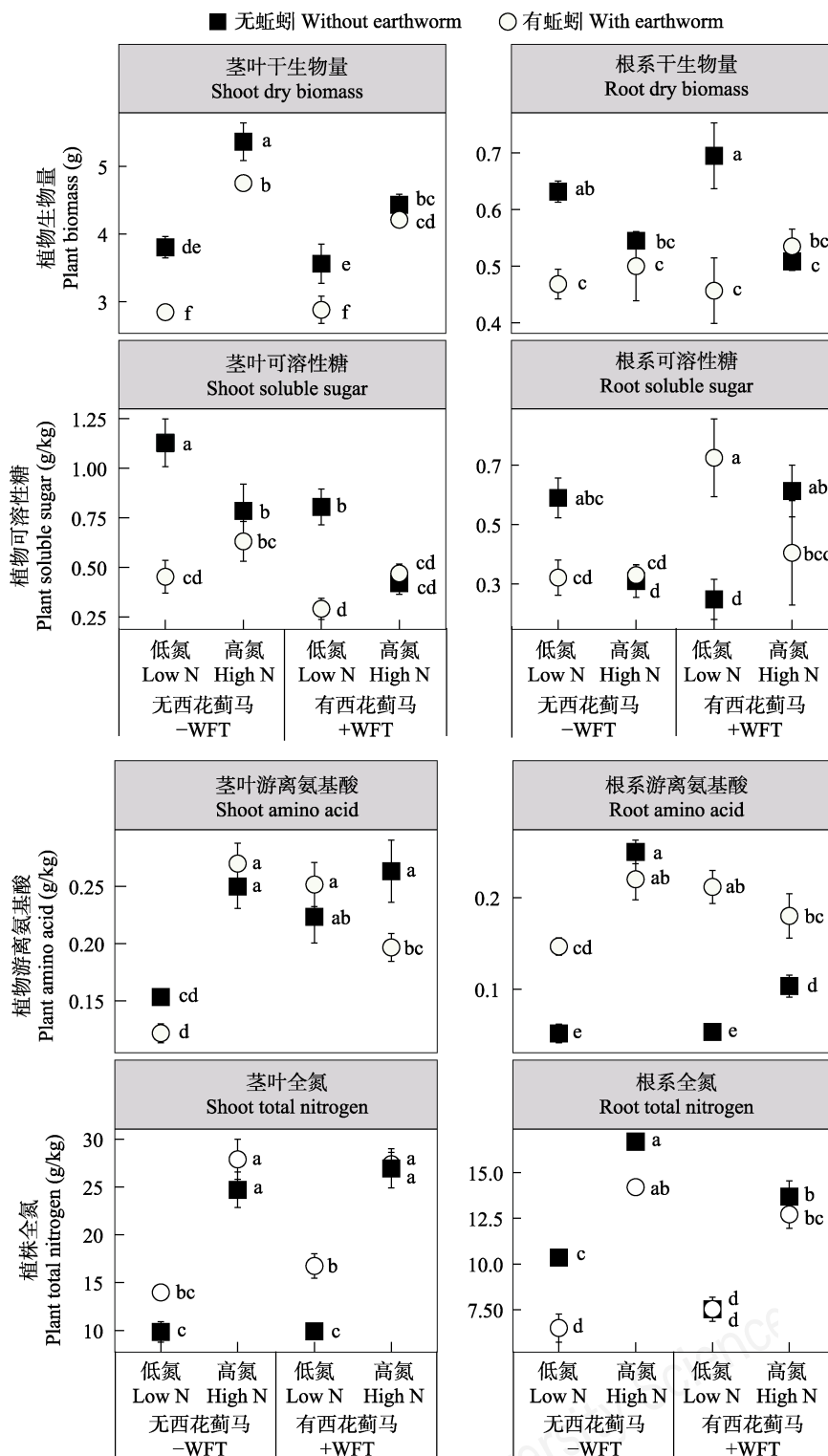


图 2 不同氮素条件下, 蚯蚓在西花蓟马(WFT)有无时对番茄茎叶干生物量、根系干生物量、茎叶可溶性糖、根系可溶性糖、茎叶游离氨基酸、根系游离氨基酸、茎叶全氮和根系全氮(平均值 ± 标准差, $n = 6$)的影响。-WFT 和+WFT 分别表示无西花蓟马和接种西花蓟马。不同小写字母表示各处理间差异显著(Fisher's LSD 检验, $P < 0.05$)。

Fig. 2 Effects of earthworm *Metaphire guillelmi* on the contents of tomato shoot dry biomass, root dry biomass, shoot soluble sugar, root soluble sugar, shoot amino acid, root amino acid, shoot total nitrogen and root total nitrogen in the absence or presence of western flower thrips under low and high N inputs (mean ± SD, $n = 6$). In the figure, -WFT and +WFT indicate without and with western flower thrips, respectively. Means with different letters indicate significant difference among treatments (Fisher's LSD test, $P < 0.05$). Error bars are standard errors.

量在蚯蚓作用下是未接种蚯蚓处理的6倍和3倍;而高氮下蚯蚓降低总酚含量,对茎叶茉莉酸和水杨酸含量无影响(图3)。西花蓟马数量的变化与氮素水平和蚯蚓关系密切,在低氮时蚯蚓使西花蓟马的数量降低了58%,而高氮下无影响(图4)。在蚯蚓存在时,茎叶可溶性糖和茎叶全氮与西花蓟马数量显著正相关,茎叶茉莉酸和茎叶水杨酸含量与西花蓟马数量呈显著负相关,而无蚯蚓时上述关系不显著(图5)。

3 讨论

3.1 蚯蚓对番茄生长的影响

蚯蚓在低氮时降低了番茄茎叶干生物量、根系

干生物量和茎叶可溶性糖含量,而高氮时对番茄营养物质(可溶性糖、游离氨基酸和全氮)及生物量无影响;证实先前荟萃分析的结论,即蚯蚓介导的植物生长和养分分配受到土壤养分有效性的影响(van Groenigen et al, 2014)。蚯蚓活动影响着微生物活性、群落结构及多样性(伍玉鹏等, 2013; Bertrand et al, 2015; Gong et al, 2018),从而促进土壤有机氮矿化,扩大土壤活性氮库(张卫信等, 2007; Andriuzzi et al, 2016)。本研究中,蚯蚓活动增加了土壤微生物生物量氮,说明蚯蚓能够加速氮素周转,这与番茄茎叶全氮含量的增加相对应(Wurst, 2013; van Groenigen et al, 2014)。蚯蚓降低了番茄的生物量和茎叶可溶性糖,其原因可能与威廉腔环蚓属于内层

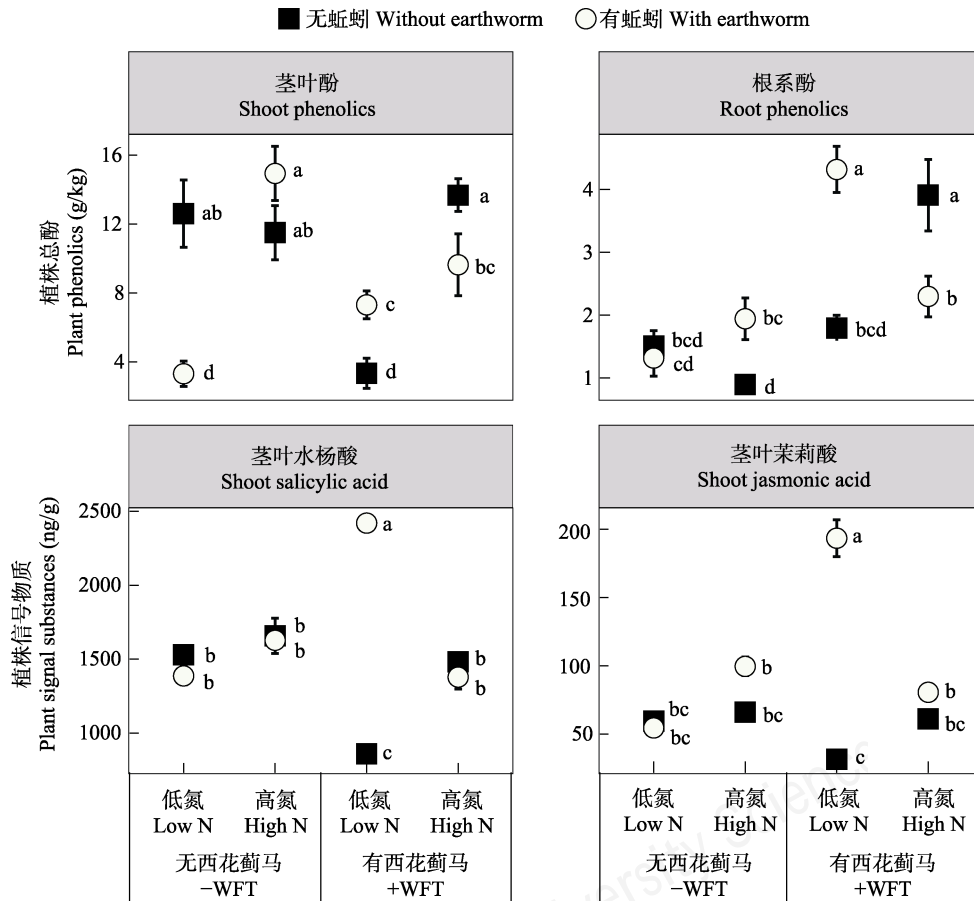


图3 不同氮素条件下, 蚯蚓在西花蓟马(WFT)有无时对番茄茎叶酚、根系酚、茎叶水杨酸和茎叶茉莉酸(平均值 \pm 标准差, $n = 6$)的影响。-WFT 和+WFT 分别表示无西花蓟马和接种西花蓟马。不同小写字母表示各处理间差异显著(Fisher's LSD 检验, $P < 0.05$)。

Fig. 3 Effects of earthworm *Metaphire guillelmi* on the contents of tomato shoot phenolics, root phenolics, shoot jasmonic acid and shoot salicylic acid in the absence or presence of western flower thrips (WFT) under low and high N inputs (mean \pm SD, $n = 6$). In the figure, -WFT and +WFT indicate without and with western flower thrips, respectively. Means with different letters indicate significant difference among treatments (Fisher's LSD test, $P < 0.05$). Error bars are standard errors.

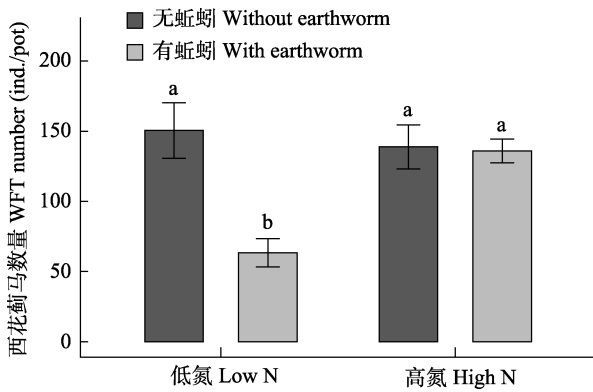


图4 蚯蚓和氮素水平对植食者西花蓟马(WFT)种群数量(平均值 ± 标准差, $n = 6$)的影响。不同小写字母表示各处理间差异显著(Fisher's LSD 检验, $P < 0.05$)。

Fig. 4 Effects of earthworm and nitrogen level on the abundance of western flower thrips (WFT) (mean ± SD, $n = 6$). Means with different letters indicate significant difference among treatments (Fisher's LSD test, $P < 0.05$). Error bars are standard errors.

种, 不仅对农田耕作和化肥施用等农事活动的抵抗力强, 其本身对土壤结构和根系的生物扰动能力也很强。尤其是在盆栽条件下, 根系生长范围和蚯蚓活动空间有限, 蚯蚓对根系的破坏作用与地下部植食者类似, 从而对番茄的生长产生负面影响(Kaplan et al, 2018)。西花蓟马侵袭番茄后, 可溶性糖从地上部茎叶向地下部根系转移, 茎叶游离氨基酸也因此增加, 表明番茄在应对生物胁迫条件下, 其养分资源发生转移与再分配(Kempel et al, 2011)。有文献也证明蚯蚓活动能够造成根系破损, 特别是未形成保护皮层的幼小细弱根及根尖, 更容易受到物理扰动的损害, 同时蚯蚓扰动也会破坏菌根菌丝网络和有益真菌对植物的促进作用(Brown et al, 2004)。相比低氮水平, 高氮引起蚯蚓生物量降低的程度更大, 尽管蚯蚓具有保持身体元素稳态的能力,

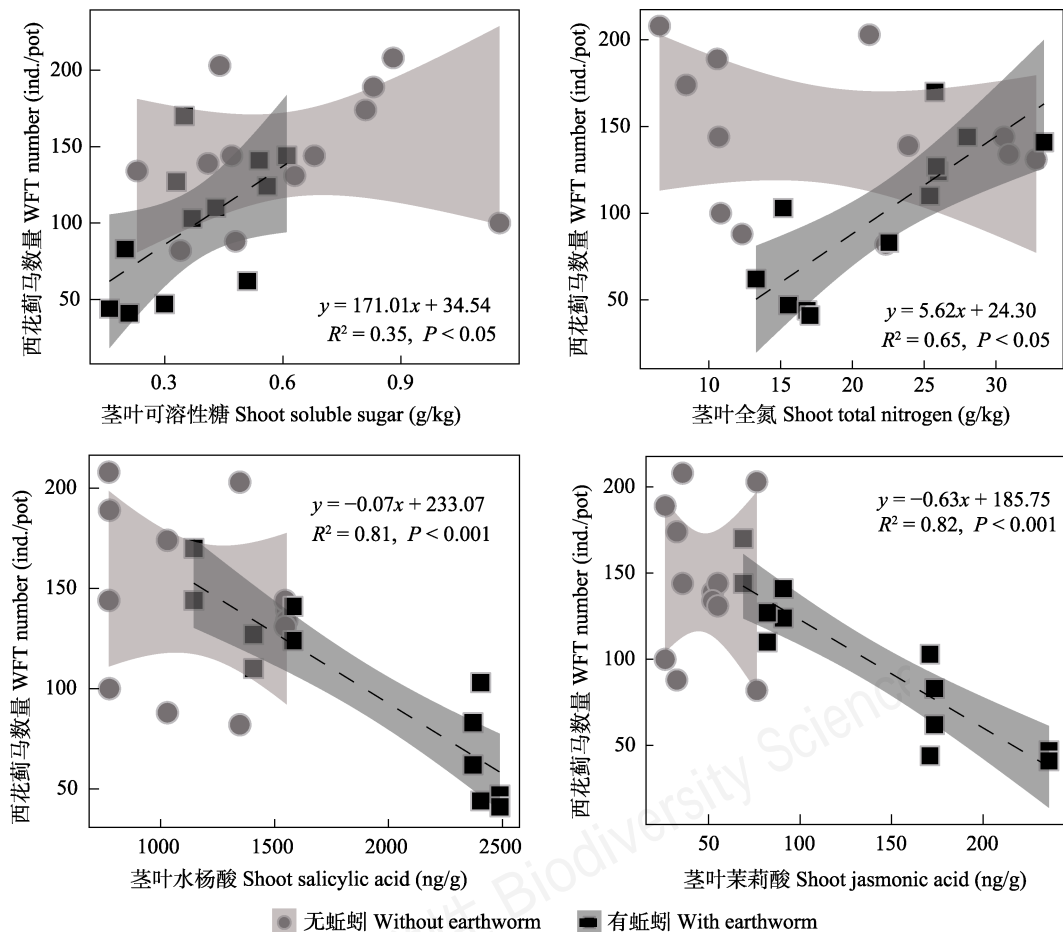


图5 蚯蚓介导的番茄营养物质(茎叶可溶性糖和茎叶全氮)及信号物质(茎叶茉莉酸和茎叶水杨酸)与西花蓟马数量(WFT)的关系

Fig. 5 Regressions between western flower thrips (WFT) abundance and contents of tomato shoot soluble sugar, shoot total nitrogen, shoot salicylic acid and shoot jasmonic acid.

但高氮条件下蚯蚓摄取食物的元素不均衡会抑制其生长(Zheng et al, 2018)。此外,除了高氮水平使得植物对蚯蚓介导的氮素矿化过程依赖性降低外,氮肥的施用伴随着 pH 的下降,也会影响栖居于土壤内的蚯蚓,因此蚯蚓在高氮条件下对植物生长的影响较弱甚至被掩盖(Brown et al, 2004)。先前的综述也发现,在67项研究中有9%的结果显示出蚯蚓降低了植物生物量(Scheu, 2003),除了蚯蚓取食和生物扰动破坏了植物根系外,有关蚯蚓影响根际微生物群落的间接作用现在还缺乏研究。蚯蚓对植物生长的影响可能取决于植物种类、土壤与植食者类型的综合作用(Kaplan et al, 2018),今后应该加强有关蚯蚓影响植物生长的机制研究。

3.2 蚯蚓对番茄抗虫性的影响

植物对植食者的抗性受植物营养物质及化学防御物质变化的影响(Kempel et al, 2009)。值得注意的是,本研究发现蚯蚓介导的生长和抗性之间并非此消彼长的关系,蚯蚓可以同时促进植物营养积累以及防御抗性。氮含量的增加会提高茎叶适口性,增加西花蓟马的种群数量。而茉莉酸和水杨酸通过细胞膜信号级联反应,调控着抗性相关酶的活性及抗性基因的表达,进而刺激植物防御植食者(Jana et al, 2010; Puga-Freitas & Blouin, 2015)。有研究证明蚯蚓会影响植物的信号途径(Lohmann et al, 2009)、刺激植物叶片和皮下组织的防御化合物产生(Wurst et al, 2010);如 Lohmann 等(2009)发现蚯蚓会促进叶片中次级防御化合物(如硫代葡萄糖苷)的形成来降低蚜虫数量。植物生长和抗性所依赖的初级和次级代谢途径是相互交织的,大多数理论都强调资源的最优分配及生长和防御之间存在此消彼长的权衡(Wurst et al, 2010; Kempel et al, 2011)。蚯蚓改善土壤环境和调节土壤生物群落,理论上可以影响植食作用下资源在植物生长和防御之间的分配(张宁等, 2012; Wurst, 2013)。与我们的推测相符,蚯蚓影响的方向和程度因土壤氮素水平而变化。在高氮条件下,蚯蚓对植物生长及抗性作用并不明显;低氮条件下,蚯蚓促进植物对氮素的吸收,同时也刺激了番茄抗性化合物(茎叶酚)和抗性信号分子(茎叶茉莉酸、茎叶水杨酸)的合成,可能由于在抵抗西花蓟马上植物消耗了大量的能量,反而使其生长因蚯蚓的存在而显示出被抑制的表象(Burghardt, 2016; Mundim et al, 2017)。碳氮平衡假说表明,土壤资源

有效性可以调节植物碳水化合物的储存,改变植物组织中碳基化感化合物的含量(Jarzomski et al, 2000)。已有的证据表明低氮条件下植物会产生更多代谢化合物,如蚯蚓在氮充足条件下降低了车前草(*Plantago lanceolata*)中环烯醚萜类化合物的浓度,抑制植食者(Wurst et al, 2004)。

随着蚯蚓-植物-植食者相互作用研究的不断深入,越来越多的研究结果表明,蚯蚓介导的化学防御物质的产生还受到植物基因型、土壤养分有效性、植食者类型等生境因子的影响(Morris et al, 2006; Puga-Freitas & Blouin, 2015)。因此,深入揭示蚯蚓对植物防御病原物的影响机制需要同时考虑来自土壤管理和病虫害暴发等多方面的因素。本研究仅涉及防御信号和总酚指标,未测定抗性相关酶活性及抗性基因等;茉莉酸和水杨酸发挥其功能作用并非简单的线性途径,不同途径构成复杂的信号转导网络,共同调控植物的防御抗性(Derksen et al, 2013)。蚯蚓对植物生长及抗性的影响机制极其复杂,其影响程度和方向仍难以得到一致的结论。蚯蚓介导的植物抵抗植食者的能力还可能取决于根际微生物组(Wurst & Forstreuter, 2010; Paudel et al, 2016),如土壤中的一些有益微生物能促进植物防御物质的合成(Eisenhauer et al, 2010; 李欢等, 2011; Pineda et al, 2015)。今后应更重视蚯蚓介导的上行效应(Bottom-up effects),有关研究将有助于发展土壤生态管理措施,促进土壤动物资源的调控和利用,发挥土壤生物在植物防御病虫害方面的作用。

4 结论

植物的抗虫性高低与植物体营养物质及防御物质含量有关。本研究发现蚯蚓介导的植物防御化合物以及抗逆信号可以加强其对地上部虫害的抗性。植物生长和抗性之间的关系受土壤养分水平的影响,蚯蚓仅在低氮时提高了植物的抗虫性。可见,养分富集条件下植物与土壤动物的互利关系受到破坏。今后应基于野外自然条件或较长时空尺度、结合土壤生物群落的系统分析及植物防御代谢组学研究,剖析蚯蚓介导的植物生长及抗性的关系及调控机制。

致谢:感谢南京农业大学资源与环境科学学院王帅、罗琤、周星、王震威和靳楠同学的帮助。

参考文献

- Ainsworth EA, Gillespie KM (2007) Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent. *Nature Protocols*, 2, 875–877.
- Andriuzzi WS, Schmidt O, Brussaard L, Faber JH, Bolger T (2016) Earthworm functional traits and interspecific interactions affect plant nitrogen acquisition and primary production. *Applied Soil Ecology*, 104, 148–156.
- Aurélien R, Michael G, Sergio R, Sanders IR (2013) Identity and combinations of arbuscular mycorrhizal fungal isolates influence plant resistance and insect preference. *Ecological Entomology*, 38, 330–338.
- Bardgett RD, van der Putten WH (2014) Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515, 505–511.
- Bender SF, Wagg C, van der Heijden MGA (2016) An underground revolution: Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology and Evolution*, 31, 440–452.
- Bertrand M, Barot S, Blouin M, Whalen J, de Oliveira T, Roger-Estrade J (2015) Earthworm services for cropping systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 553–567.
- Blouin M, Zuily-Fodil Y, Pham-Thi AT, Laffray D, Reversat G, Pando A, Tondoh JE, Lavelle P (2005) Belowground organism activities affect plant aboveground phenotype, inducing plant tolerance to parasites. *Ecology Letters*, 8, 202–208.
- Bogaert F, Chesnais Q, Catterou M, Rambaud C, Geraldine D, Ameline A (2017) How the use of nitrogen fertiliser may switch plant suitability for aphids: The case of *Miscanthus*, a promising biomass crop and the aphid pest *Rhopalosiphum maidis*. *Pest Management Science*, 73, 1648–1654.
- Bommarco R, Kleijn D, Potts SG (2013) Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology and Evolution*, 28, 230–238.
- Brown GG, Edwards CA, Brussaard L (2004) How earthworms affect plant growth: Burrowing into the mechanisms. *Earthworm Ecology*, 2, 13–49.
- Burghardt KT (2016) Nutrient supply alters goldenrod's induced response to herbivory. *Functional Ecology*, 30, 1769–1778.
- Caarls L, Pieterse CM, van Wees S (2015) How salicylic acid takes transcriptional control over jasmonic acid signaling. *Frontiers in Plant Science*, 6, 170.
- Dalby P, Baker G, Smith S (1996) "Filter paper method" to remove soil from earthworm intestines and to standardise the water content of earthworm tissue. *Soil Biology and Biochemistry*, 28, 685–687.
- Derksen H, Rampitsch C, Daayf F (2013) Signaling cross-talk in plant disease resistance. *Plant Science*, 207, 79–87.
- Eisenhauer N, Hoersch V, Moeser J, Scheu S (2010) Synergistic effects of microbial and animal decomposers on plant and herbivore performance. *Basic and Applied Ecology*, 11, 23–34.
- Fu SL (2007) A review and perspective on soil biodiversity research. *Biodiversity Science*, 15, 109–115. (in Chinese with English abstract) [傅声雷 (2007) 土壤生物多样性的研究概况与发展趋势. *生物多样性*, 15, 109–115.]
- Gong X, Jiang YY, Zheng Y, Chen XY, Li HX, Hu F, Liu MQ, Scheu S (2018) Earthworms differentially modify the microbiome of arable soils varying in residue management. *Soil Biology and Biochemistry*, 121, 120–129.
- Hettenhausen C, Baldwin IT, Wu J (2013) *Nicotiana attenuata* MPK4 suppresses a novel jasmonic acid (JA) signaling-independent defense pathway against the specialist insect *Manduca sexta*, but is not required for the resistance to the generalist *Spodoptera littoralis*. *New Phytologist*, 199, 787–799.
- Jana U, Barot S, Blouin M, Lavelle P, Laffray D, Repellin A (2010) Earthworms influence the production of above- and belowground biomass and the expression of genes involved in cell proliferation and stress responses in *Arabidopsis thaliana*. *Soil Biology and Biochemistry*, 42, 244–252.
- Jarzomski CM, Stamp NE, Bowers MD (2000) Effects of plant phenology, nutrients and herbivory on growth and defensive chemistry of plantain, *Plantago lanceolata*. *Oikos*, 88, 371–379.
- Kaplan I, Pineda A, Bezemer M (2018) Application and theory of plant–soil feedbacks on aboveground herbivores. In: *Aboveground–Belowground Community Ecology* (eds Ohgushi T, Wurst S, Johnson SN), pp. 319–343. Springer International Publishing, West Lafayette.
- Kempel A, Brandl R, Schädler M (2009) Symbiotic soil microorganisms as players in aboveground plant–herbivore interactions—the role of rhizobia. *Oikos*, 118, 634–640.
- Kempel A, Schädler M, Chrobock T, Fischer M, van Kleunen M (2011) Tradeoffs associated with constitutive and induced plant resistance against herbivory. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 108, 5685–5689.
- Korres NE, Norsworthy JK, Tehranchian P, Gitsopoulos TK, Loka DA, Oosterhuis DM, Gealy DR, Moss SR, Burgos NR, Miller MR, Palhano M (2016) Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 1–22.
- Larbat R, Olsen KM, Slimestad R, Lovdal T, Benard C, Verheul M, Bourgaud F, Robin C, Lillo C (2012) Influence of repeated short-term nitrogen limitations on leaf phenolics metabolism in tomato. *Phytochemistry*, 77, 119–128.
- Li H, Li XL, Zhang JL, Gai JP, Wang C, Xiang D (2011) Interaction between earthworm and AM fungi and their effects on plant performance. *Acta Pedologica Sinica*, 48, 847–855. (in Chinese with English abstract) [李欢, 李晓林, 张俊伶, 盖京苹, 王冲, 向丹 (2011) 蚯蚓与丛枝菌根真菌的相互作用及其对植物的影响. *土壤学报*, 48, 847–855.]

- Lohmann M, Scheu S, Muller C (2009) Decomposers and root feeders interactively affect plant defence in *Sinapis alba*. *Oecologia*, 160, 289–298.
- Loranger-Merciris G, Cabidoche YM, Delone B, Queneherve P, Ozier-Lafontaine H (2012) How earthworm activities affect banana plant response to nematodes parasitism. *Applied Soil Ecology*, 52, 1–8.
- Lu RK (2000) Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese) [鲁如坤 (2000) 土壤农业化学分析方法. 中国农业科技出版社, 北京.]
- Lü YB, Zhang ZJ, Wu QJ, Du YZ, Zhang HR, Yu Y, Wang ED, Wang MH, Wang MQ, Tong XL, Lü LH, Tan XQ, Fu WD (2011) Research progress of the monitoring, forecast and sustainable management of invasive alien pest *Frankliniella occidentalis* in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48, 488–496. (in Chinese with English abstract) [吕要斌, 张治军, 吴青君, 杜予州, 张宏瑞, 于毅, 王恩东, 王鸣华, 王满园, 童晓立, 吕利华, 谭新球, 付卫东 (2011) 外来入侵害虫西花蓟马防控技术研究 with 示范. *应用昆虫学报*, 48, 488–496.]
- Morris WF, Traw MB, Bergelson J (2006) On testing for a tradeoff between constitutive and induced resistance. *Oikos*, 112, 102–110.
- Mundim FM, Alborn HT, Vieira-Neto EHM, Bruna EM (2017) A whole-plant perspective reveals unexpected impacts of above- and belowground herbivores on plant growth and defense. *Ecology*, 98, 70–78.
- Pan KW, Zhang L, Shao YH, Fu SL (2016) Thematic monitoring network of soil fauna diversity in China: Exploring the mystery of soil. *Biodiversity Science*, 24, 1234–1239. (in Chinese with English abstract) [潘开文, 张林, 邵元虎, 傅声雷 (2016) 中国土壤动物多样性监测: 探知土壤中的奥秘. *生物多样性*, 24, 1234–1239.]
- Paudel S, Longcore T, MacDonald B, McCormick MK, Szlavetz K, Wilson GWT, Loss SR (2016) Belowground interactions with aboveground consequences: Invasive earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi. *Ecology*, 97, 605–614.
- Pineda A, Soler R, Pozo MJ, Rasmann S, Turlings TCJ (2015) Above–belowground interactions involving plants, microbes and insects. *Frontiers in Plant Science*, 6, 318.
- Poveda K, Steffan-Dewenter I, Scheu S, Tscharrntke T (2005) Effects of decomposers and herbivores on plant performance and aboveground plant–insect interactions. *Oikos*, 108, 503–510.
- Puga-Freitas R, Blouin M (2015) A review of the effects of soil organisms on plant hormone signalling pathways. *Environmental and Experimental Botany*, 114, 104–116.
- Schädler M, Ballhorn DJ (2017) Beneficial soil microbiota as mediators of the plant defensive phenotype and aboveground plant–herbivore interactions. In: *Progress in Botany* (eds Cánovas FM, Lüttge U, Matyssek R), pp. 305–343. Springer International Publishing, Berlin.
- Scheu S (2003) Effects of earthworms on plant growth: Patterns and perspectives. *Pedobiologia*, 47, 846–856.
- Shekoofa A, Emam Y (2008) Effects of nitrogen fertilization and plant growth regulators (PGRs) on yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. Shiraz. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 10, 101–108.
- Staley JT, Stewartjones A, Pope TW, Wright DJ, Leather SR, Hadley P, Rossiter JT, van Emden HF, Poppy GM (2010) Varying responses of insect herbivores to altered plant chemistry under organic and conventional treatments. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277, 779–786.
- Tao L, Ahmad A, Roode JC, Hunter MD (2016) Arbuscular mycorrhizal fungi affect plant tolerance and chemical defences to herbivory through different mechanisms. *Journal of Ecology*, 104, 561–571.
- Tsiafouli MA, Thebault E, Sgardelis SP, Deruiter PC, van der Putten WH, Birkhofer RD, Hemerik L, de Vries FT, Bargett RD, Brady MV, Bjornlund L, Jorgensen HB, Christensen S, Hertefeldt TD, Hotes S, Hol WHG, Frouz J, Liiri M, Mortimer SR, Setälä H, Tzanopoulos J, Uteseny K, Pizl V, Stary J, Wolters V, Hedlund K (2015) Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biology*, 21, 973–985.
- van Groenigen JW, Lubbers IM, Vos HM, Brown GG, Deyn GB, van Groenigen KJ (2014) Earthworms increase plant production: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 4, 6365.
- Wang SJ, Ruan HH (2008) Feedback mechanisms of soil biota to aboveground biology in terrestrial ecosystems. *Biodiversity Science*, 16, 407–416. (in Chinese with English abstract) [王邵军, 阮宏华 (2008) 土壤生物对地上生物的反馈作用及其机制. *生物多样性*, 16, 407–416.]
- Wu JH, Song CY, Chen JK (2007) Effect of microbivorous nematodes on plant growth and soil nutrient cycling: A review. *Biodiversity Science*, 15, 124–133. (in Chinese with English abstract) [吴纪华, 宋慈玉, 陈家宽 (2007) 食微线虫对植物生长及土壤养分循环的影响. *生物多样性*, 15, 124–133.]
- Wu YP, Lü LY, Bi YM, Zhang Y, Sun ZJ (2013) Effects of earthworm inoculation on saline-alkali soil nutrient, soil organisms and plant cultivation. *Journal of China Agricultural University*, 18, 45–51. (in Chinese with English abstract) [伍玉鹏, 吕丽媛, 毕艳孟, 张一, 孙振钧 (2013) 接种蚯蚓对盐碱土养分、土壤生物及植被的影响. *中国农业大学学报*, 18, 45–51.]
- Wurst S (2013) Plant-mediated links between detritivores and aboveground herbivores. *Frontiers in Plant Science*, 4, 380.
- Wurst S, Dugassa-Gobena D, Langel R, Bonkowski M, Scheu S (2004) Combined effects of earthworms and vesicular-arbuscular mycorrhizas on plant and aphid performance. *New Phytologist*, 163, 169–176.
- Wurst S, Wagenaar R, Biere A, van der Putten WH (2010)

- Microorganisms and nematodes increase levels of secondary metabolites in roots and root exudates of *Plantago lanceolata*. *Plant and Soil*, 329, 117–126.
- Wurst S, Forstreuter M (2010) Colonization of *Tanacetum vulgare* by aphids is reduced by earthworms. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 137, 86–92.
- Xiao ZG, Wang X, Koricheva J, Kergunteuil A, Le Bayon R, Liu MQ, Hu F, Rasmann S (2018) Earthworms affect plant growth and resistance against herbivores: A meta-analysis. *Functional Ecology*, 32, 150–160.
- Xu W, Ma ZY, Jing X, He JS (2016) Biodiversity and ecosystem multifunctionality: Advances and perspectives. *Biodiversity Science*, 24, 55–71. (in Chinese with English abstract) [徐炜, 马志远, 井新, 贺金生 (2016) 生物多样性与生态系统多功能性: 进展与展望. *生物多样性*, 24, 55–71.]
- Zhang N, Liao Y, Sun FL, Wang C, Sun ZJ (2012) Earthworm population characteristics in soils different in land use and their relationships with biological fertility of the soils. *Acta Pedologica Sinica*, 49, 364–372. (in Chinese with English abstract) [张宁, 廖燕, 孙福来, 王冲, 孙振钧 (2012) 不同土地利用方式下的蚯蚓种群特征及其与土壤生物肥力的关系. *土壤学报*, 49, 364–372.]
- Zhang SJ, Chao Y, Zhang CL, Cheng J, Li J, Ma N (2010) Earthworms enhanced winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) growth and nitrogen uptake. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 139, 463–468.
- Zhang WX, Chen DM, Zhao CC (2007) Functions of earthworm in ecosystem. *Biodiversity Science*, 15, 142–153. (in Chinese with English abstract) [张卫信, 陈迪马, 赵灿灿 (2007) 蚯蚓在生态系统中的作用. *生物多样性*, 15, 142–153.]
- Zheng Y, Wang S, Bonkowski M, Chen XY, Griffiths B, Hu F, Liu MQ (2018) Litter chemistry influences earthworm effects on soil carbon loss and microbial carbon acquisition. *Soil Biology and Biochemistry*, 123, 105–114.
- Züst T, Agrawal AA (2017) Trade-offs between plant growth and defense against insect herbivory: An emerging mechanistic synthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 68, 513–534.

(责任编辑: 丁建清 责任编辑: 闫文杰)



•研究报告•

中国西南高黎贡山绿僵菌物种多样性及其垂直分布特征

陈自宏¹ 杨晓娜¹ 孙宁静¹ 徐玲^{1*} 郑元² 杨宇明³¹ (保山学院高黎贡山生物资源研究所, 云南保山 678000)² (西南林业大学林学院, 昆明 650224)³ (云南省林业科学院云南省森林植物培育与开发利用重点实验室, 昆明 650201)

摘要: 云南高黎贡山具有多样化的生态系统和生物资源。为探清该地区绿僵菌属(*Metarhizium*)真菌的物种多样性及其不同海拔的垂直分布特征, 沿海拔梯度(600–3,800 m)在7种典型植被类型(I: 干热河谷; II: 季风常绿阔叶林; III: 暖性针叶林; IV: 中山暖性常绿阔叶林; V: 山地苔藓矮林; VI: 寒温性灌丛或草甸; VII: 流石滩稀疏植被)中调查绿僵菌资源。从生境土壤中分离菌株, 通过多基因(*nrSSU*、*nrLSU*、*EF-1 α* 、*RPB1*和*RPB2*)系统发育分析进行物种鉴定。结果表明, 高黎贡山绿僵菌物种资源丰富, 获得的161株菌株分属于12个物种(*Metarhizium rileyi*, *M. viridulum*, *M. lepidiotae*, *M. brunneum*, *M. pingshaense*, *M. anisopliae*, *M. robertsii*, *M. guizhouense*, *M. indigoticum*, *M. pemphigi*, *M. campsosterni*和*Metacordyceps neogunnii*), 其中*M. indigoticum*为中国新记录种, *M. anisopliae* complex中的物种(8种)较集中; 同时还采集到了绿僵菌的近缘属*Nigelia*属物种*N. martiale*。高黎贡山绿僵菌广泛分布于除类型VII(海拔3,600–3,800 m)外的6种植被类型(海拔600–3,400 m)中。中低海拔植被类型(I–IV)中菌株数量较多(≥ 23 株)、物种多样性较高(4–9种), 而高海拔植被类型(V–VI)中菌株数量较少(2–8株)、物种较单一(1–2种)。中海拔的常绿阔叶林中绿僵菌资源最丰富, 其中季风常绿阔叶林(植被类型II)中的菌株数量(52株, 占总数的32.3%)和物种数(9种)最多; 中山湿性常绿阔叶林(植被类型IV)为其次(47株, 占总数的29.2%; 7种)。高黎贡山绿僵菌优势种现象明显, *M. brunneum*为最优势物种, 其菌株数占总数的46.6%, 在生境条件差异很大的6种植被类型(I–VI)中都存在, 说明该物种生态适应能力最强。

关键词: 高黎贡山; 绿僵菌; 系统发育分析; 物种多样性; 垂直分布

Species diversity and vertical distribution characteristics of *Metarhizium* in Gaoligong Mountains, southwestern China

Zihong Chen¹, Xiaona Yang¹, Ningjing Sun¹, Ling Xu^{1*}, Yuan Zheng², Yuming Yang³¹ Institute of Biological Resources of Gaoligong Mountains, Baoshan University, Baoshan, Yunnan 678000² College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224³ Key Laboratory of Forest Plant Cultivation and Utilization, Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650201

Abstract: Gaoligong Mountains in Yunnan Province, China have diverse ecological systems and biological resources. To understand the diversity and the vertical distribution of *Metarhizium* species at different elevations in this area, *Metarhizium* resources were investigated in seven typical vegetation types (i.e., I, dry-hot valley; II, monsoon evergreen broad-leaved forest; III, warm coniferous forest; IV, mod-montane humid evergreen broad-leaved forest; V, mountain moss dwarf forest; VI, cold shrubs of meadow; and VII, rocky beach sparsely vegetation) along an elevation gradient (600–3,800 m). Strains of *Metarhizium* were isolated from soils of the vegetations at different elevations and identified using multi-gene (*nrSSU*, *nrLSU*, *EF-1 α* , *RPB1*, and *RPB2*) phylogenetic analysis. Our result indicated that the species of *Metarhizium* in Gaoligong Mountains were abundant and the obtained 161 strains represented 12 *Metarhizium* species,

收稿日期: 2018-05-03; 接受日期: 2018-07-04

基金项目: 国家自然科学基金地区基金(31460153)、云南省科技厅地方本科高校基础研究联合专项资金面上项目(2017FH001-029)、云南省科技厅地方本科高校基础研究联合专项资金重点项目(2017FH001-126)和保山市第六批中青年学术和技术带头人项目(bszqnxshjsdtr201701)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xuling09083@163.com

namely, *M. rileyi*, *M. viridulum*, *M. lepidiotae*, *M. brunneum*, *M. pingshaense*, *M. anisopliae*, *M. robertsii*, *M. guizhouense*, *M. indigoticum*, *M. pemphigi*, *M. campsosterni*, and *Metacordyceps neogunnii*, and most of them (8 species) belonged to *M. anisopliae* complex. Additionally, *Nigelia martiale*, a taxon close to *Metarhizium* was also found in this area. *M. indigoticum* is new to China. Fungi of *Metarhizium* in Gaoligong Mountains were widely distributed in six vegetation types at elevation between 600 m and 3,400 m, but not in type VII at the elevation of 3,600–3,800 m. The vegetations at the low and middle elevations (I–IV) harbored larger number of strains (≥ 23) and higher species diversity (4–9 species), whereas those at high elevations (V–VI) possessed fewer strains (2–8) and relatively limited species (1–2 species). *Metarhizium* resources were the most abundant in evergreen broad-leaved forests at the middle elevation. The monsoon evergreen broad-leaved forest (vegetation type II) possessed the largest number of *Metarhizium* strains (52 strains, 32.3% of the total) and species (9 species), while mid-montane humid evergreen broad-leaved forest (vegetation type IV) (47 strains, 29.2% of the total) was the next. The superior species phenomenon of *Metarhizium* was remarkable in Gaoligong Mountains, *M. brunneum* being the most dominant, at 46.6% of the total strain numbers. It widely exists in six vegetation types (I–VI) with very different habitat conditions, suggesting that this species has the highest ecologic adaptability.

Key words: Gaoligong Mountains; *Metarhizium*; phylogenetic analysis; species diversity; vertical distribution

在自然界中, 绿僵菌属(*Metarhizium*)真菌资源丰富、分布广泛。随着人们对绿色生态和绿色产品需求的增加, 绿僵菌在昆虫的自然生态控制和农林害虫生物防治中发挥着越来越重要的作用。在传统系统分类中, 人们主要依据菌落颜色、分生孢子、产孢结构等形态特征对绿僵菌进行分类。早期的研究认为, 绿僵菌属主要包括3个物种: 金龟子绿僵菌(*M. anisopliae*)、黄绿绿僵菌(*M. flavoviride*)和白色绿僵菌(*M. album*) (Tulloch, 1976; Driver et al, 2000)。之后, 根据形态特征陆续报道了一些新种和变种。随着现代分子生物学技术的进步, 绿僵菌属的分类鉴定取得了长足发展。近年来, 在绿僵菌物种的划分上, 多基因系统进化分析被认为较单基因分析更为准确(王萌等, 2014)。通过多基因分析, Bischoff等(2009)对金龟子绿僵菌复合种(*M. anisopliae* complex)进行了分类研究, 认为该复合种包含9个物种。Kepler等(2012)报道了绿僵菌有性型泛虫草属(*Metacordyceps*)包括15个物种和1个变种。至此, 绿僵菌的无性型主要归入*Metarhizium*, 有性型主要归入*Metacordyceps*。根据“一个物种一个名称”的原则, Kepler等(2014)通过多基因分析重新修订了绿僵菌的分类归属, 将*Metacordyceps*的所有物种、*Nomuraea*中绿色孢子的物种、*Chamaeleomyces*和*Paecilomyces*中的一些物种都归入*Metarhizium*中。随后, 又有若干新种陆续被报道(Sharma & Gautam, 2015; Chu et al, 2016; Nishi et al, 2017; Wen et al, 2017)。Luangsa-ard等(2017)报道了6个绿僵菌新种,

并将*Metarhizium martiale*归到新属*Nigelia* (*N. martiale*), 将*Paecilomyces reniformis*归到绿僵菌属(*Metarhizium reniforme*)。综合近年来的报道, 绿僵菌属已有近50个物种(附录1), 其中中国首次报道的绿僵菌物种很多, 例如无性型物种*Metarhizium pingshaense*、*M. guizhouense*和*M. cylindrosporium* (郭好礼等, 1986)和*M. synnematis*等(Chu et al, 2016), 以及有性型物种*Metacordyceps neogunnii* (Wen et al, 2017)、*Mc. guniujiangense* (Li et al, 2010)、*Mc. campsosterni* (Zhang et al, 2005)、*Mc. brittlebanksoides* (Liu et al, 2001)、*Mc. taii* (梁宗琦等, 1991)和*Mc. shibinensis* (Wen et al, 2015)等。

高黎贡山地处云南省西部中缅边境地区, 生态环境复杂多样, 是全球生物多样性研究热点地区之一(Huang et al, 2017)。该区具有典型的高山峡谷地貌, 海拔跨度650–5,000 m (Kavanaugh et al, 2014), 地形复杂, 立体气候明显, 特殊的自然环境孕育出多种不同的生态植被类型, 各植被类型由下至上形成了明显的垂直带谱(徐成东等, 2008)。高黎贡山复杂多样的植被和土壤条件下蕴藏着丰富的昆虫资源(Kavanaugh et al, 2014)和微生物资源(周慧, 2008)。关于高黎贡山动植物资源多样性和保护的研究很多(徐成东等, 2008; Li et al, 2011; Kavanaugh et al, 2014; Huang et al, 2017), 但关于其虫生真菌资源的研究却很少。调查高黎贡山不同植被生境中绿僵菌属真菌的物种多样性及其分布规律, 可为该区域绿僵菌资源的保护和利用提供科学依据。有鉴于

此,本研究从高黎贡山不同海拔地区选取典型的植被类型,从土样中分离获得绿僵菌菌株,进而提取菌株的DNA并进行测序,利用多基因系统发育树分析了高黎贡山绿僵菌的物种多样性及其分布特征。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

在高黎贡山海拔600–3,800 m范围内选取7种典型的植被类型生境进行采样:(I)干热河谷,海拔600–1,100 m;(II)季风常绿阔叶林,海拔1,300–1,800 m;(III)暖性针叶林,海拔1,500–2,300 m;(IV)中山湿性常绿阔叶林,海拔1,900–2,600 m;(V)山地苔藓矮林,海拔2,800–3,200 m;(VI)寒温性灌丛或草甸,海拔3,200–3,500 m;(VII)流石滩稀疏植被,海拔3,600–3,800 m。

于2015–2017年间,每年7–9月进行取样。每种植被类型选取10个样地,每个样地采集3个土壤样品,共210个样品。样品采集地尽量选择不受或极少受人为活动干扰的区域,挑选阴湿的树下、石头旁、土堆旁肥沃的土壤。用小铲挖取土表10 cm以上的土壤,装入保鲜袋,用记号笔标号,记录采集地海拔、植被类型、采集地温湿度等信息。样品放置在4℃低温环境中,并在1周内处理。

1.2 绿僵菌菌株的分离

采用黄粉虫诱导分离绿僵菌菌株(图1M)。参考Keyser等(2015)的方法,每个土壤样品取约100 mL于无菌罐头瓶中,加入适量无菌水使其处于稍微潮湿状态。每瓶放入10只无菌培养的8龄黄粉虫幼虫。用无菌水洗掉死亡虫体表面土壤,在无菌湿滤纸片上保湿培养。挑取分生孢子转入蛋白胨马铃薯葡萄糖培养基(PPDA),25℃培养。纯化的菌株用试管斜面培养后于4℃保存。

1.3 绿僵菌菌株的鉴定

将保存的绿僵菌菌株转接到PPDA培养基上培养,进行形态学初步鉴定,然后通过5个基因序列(*nrSSU*、*nrLSU*、*EF-1 α* 、*RPB1*和*RPB2*)鉴定物种。

1.4 基因组DNA提取、基因序列扩增及测序

用真菌基因组DNA提取试剂盒(北京百泰克生物技术有限公司)提取各菌株菌丝及分生孢子的基因组DNA。*nrSSU*、*nrLSU*、*EF-1 α* 、*RPB1*和*RPB2*的基因序列扩增引物,反应体系和反应程序参考Chen等(2013)。用1%琼脂糖胶检测DNA,对切胶纯

化后的样品直接进行测序;对部分测序拖带、杂合和非特异等测序结果,将样品进行克隆测序。引物合成和DNA测序由北京诺赛基因组研究中心有限公司完成。

1.5 测序数据处理及分析

利用Bioedit检测初始序列峰图的优劣,选取无双峰、无杂合等序列,利用Lasergene 7.1中EditSeq批量输出,克隆测序时去除载体,正反向测序时使用SeqMan进行序列拼接,而后使用Clustal X 2.1.1进行测序序列的多序列比对。

1.6 多基因系统发育分析

根据近年来对绿僵菌属研究的最新进展(Bischoff et al, 2009; Kepler et al, 2012, 2014; Luangsa-ard et al, 2017),检索并下载GenBank数据库中的绿僵菌5个基因序列(附录1)。在高黎贡山绿僵菌属每个物种中选取1–2个代表性菌株(共选取了18株菌),将其5个基因序列上传到GenBank获得序列号。因*Nigelia martiale*(原来为*Metarhizium martiale*)为Luangsa-ard等(2017)新修订的属,本研究将从高黎贡山采集到的*N. martiale*材料也一起进行了系统发育分析。

对每个基因序列数据矩阵进行比对,用“N”表示片段的缺失,对得到的5个基因数据矩阵序列进行拼接合并,以*Cordyceps militaris*(OSC 93623)、*Beauveria bassiana*(ARSEF 7518)、*Ophiocordyceps stylophora*(OSC 110999)和*O. acicularis*(OSC 110987)作为外类群,使用RAxML软件进行多基因系统发育分析。

2 研究结果

2.1 高黎贡山绿僵菌属物种多样性

从低海拔到高海拔的7种植被类型中,共采集到210份土壤样品。根据绿僵菌属物种的基本形态特征进行初步鉴定,然后结合菌株的5个基因的系统发育分析,确定了161株菌属于绿僵菌属物种(表1)。同时得到1个属于*Nigelia*属物种的材料(图1Q),但未分离得到纯菌株,作为绿僵菌的近缘属也一起进行了多基因分析。分离到的绿僵菌菌落颜色为白色(图1K、L)或黄白色(图1G),或产生淡绿色(图1J)、暗绿色(图1I)、翠绿色(图1H)、深绿色(图1D、F)、黑色(图1B、C、E)或棕黑色(图1A)的分生孢子层。

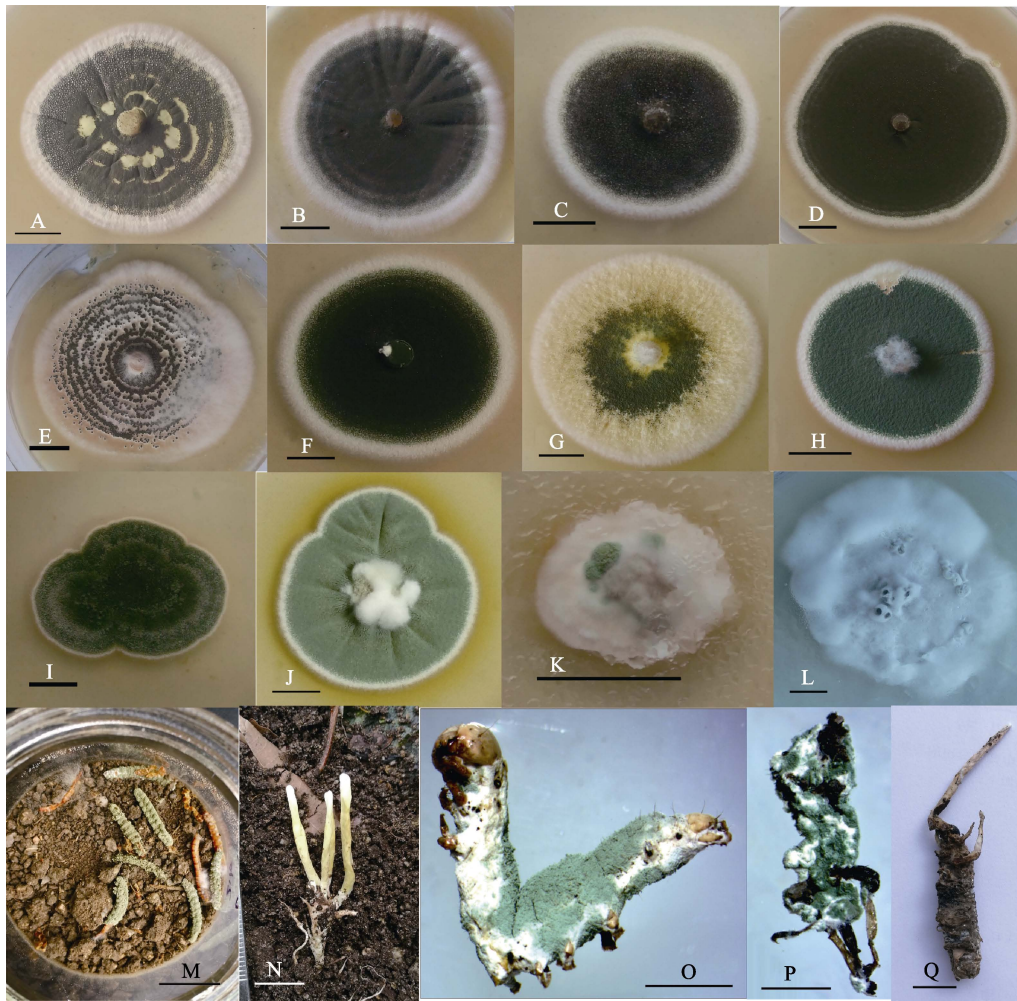


图1 高黎贡山绿僵菌不同物种的菌落及其他真菌材料。(A) *M. brunneum*的菌落; (B) *M. lepidiotae*的菌落; (C) *M. indigoticum*的菌落; (D) *M. campsosterni*的菌落; (E) *M. robertsii*的菌落; (F) *M. guizhouense*的菌落; (G) *M. anisopliae*的菌落; (H) *M. pingshaense*的菌落; (I) *M. viridulum*的菌落; (J) *M. pemphigi*的菌落; (K) *M. rileyi*的菌落; (L) *Mc. neogunnii*的菌落; (M) 绿僵菌的诱导分离; (N) *M. viridulum*的子座; (O) *M. rileyi*感染鳞翅目幼虫形成的孢子; (P) *M. pemphigi*感染叶甲形成的孢子; (Q) *N. martiale*的子实体。A-O和Q的比例尺 = 1 cm; P的比例尺= 0.5 cm。

Fig. 1 Colonies of *Metarhizium* species and other fungal materials in Gaoligong Mountains. (A) Colony of *M. brunneum*; (B) Colony of *M. lepidiotae*; (C) Colony of *M. indigoticum*; (D) Colony of *M. campsosterni*; (E) Colony of *M. robertsii*; (F) Colony of *M. guizhouense*; (G) Colony of *M. anisopliae*; (H) Colony of *M. pingshaense*; (I) Colony of *M. viridulum*; (J) Colony of *M. pemphigi*; (K) Colony of *M. rileyi*; (L) Colony of *Mc. neogunnii*; (M) The induction and isolation of *Metarhizium*; (N) Stroma of *M. viridulum*; (O) Spores of *M. rileyi* on the infected Lepidoptera larva; (P) Spores of *M. pemphigi* on the infected beetle larva; (Q) Fruit body of *N. martiale*. Bar of A-O and Q = 1 cm; Bar of P = 0.5 cm.

通过5个基因矩阵的拼接, 得到4,345个碱基对(bp)的序列, 其中包括 $nrLSU$ 852 bp, $nrSSU$ 1,024 bp, $EF-1\alpha$ 916 bp, $RPB1$ 718 bp, $RPB2$ 835 bp。对所有多基因序列(共102条)(附录1)采用RAxML软件构建系统发育树(图2), 共分成11个类群(Clades 1–11), 外类群物种序列明显形成一个独立的分支(Clade 11)。采自高黎贡山的编号BUM 713的子实体材料属于*Nigelia*属物种(*N. martiale*, 见图2 Clade 10), 该分支也与绿僵菌属序列明显区分开, 形成并列的近

缘分支。所有参与分析的绿僵菌序列分属于45个物种, 归为9个类群(Clades 1–9)。来自高黎贡山的18个代表菌株分属于12个绿僵菌属物种(*Metarhizium rileyi*, *M. viridulum*, *M. lepidiotae*, *M. brunneum*, *M. pingshaense*, *M. anisopliae*, *M. robertsii*, *M. guizhouense*, *M. indigoticum*, *M. pemphigi*, *M. campsosterni*和*Mc. neogunnii*), 被聚类到5个类群中(Clade 3、4、6、8和9)。其中物种数和菌株数最多的是Clade 4 (金龟子绿僵菌复合种, *M. anisopliae*

表1 高黎贡山绿僵菌属不同物种的菌株数量及生境条件。I: 干热河谷; II: 季风常绿阔叶林; III: 暖性针叶林; IV: 中山暖性常绿阔叶林; V: 山地苔藓矮林; VI: 寒温性灌丛或草甸; VII: 流石滩稀疏植被。

Table 1 Strain numbers and habitat conditions of *Metarhizium* species in Gaoligong Mountains. I, Dry-hot valley; II, Monsoon evergreen broad-leaved forest; III, Warm coniferous forest; IV, Mid-montane humid evergreen broad-leaved forest; V, Mountain moss dwarf forest; VI, Cold shrubs of meadow; VII, Rocky beach sparsely vegetation.

物种 Species	菌株数 strain number	菌株百分比 %	植被类型 Vegetation type	海拔跨度 Altitude span (m)	温度 Temperature (°C)	湿度 Humidity (%)
<i>Metarhizium brunneum</i>	75	46.6	I–VI	600–3,400	13–34	32–80
<i>M. pemphigi</i>	25	15.5	I, II, IV	800–2,119	20–32	39–70
<i>M. pingshaense</i>	11	6.8	I, IV, V	1,925–3,135	15–34	58–74
<i>M. guizhouense</i>	13	8.1	II, IV	1,540–2,280	18–30	57–74
<i>M. rileyi</i>	10	6.2	II, IV	1,780–2,495	17–27	49–54
<i>M. robertsii</i>	5	3.1	I, IV	723–1,981	22–32	52–63
<i>M. indigoticum</i>	4	2.5	II, III	1,512–1,981	22–30	58–59
<i>M. anisopliae</i>	4	2.5	II, III	1,370–1,900	25–30	60–76
<i>Metacordyceps neogunnii</i>	7	4.4	II	1,438	25	65
<i>M. campsosterni</i>	5	3.1	IV	2,022	22	58
<i>M. viridulum</i>	1	0.6	II	1,540	30	57
<i>M. lepidiotae</i>	1	0.6	III	1,765	25	58
<i>Nigelia martiale</i>	–	–	II	1,568	30	60
合计 Total	161	100	6	600–3,400	13–34	32–80

complex), 包括12个菌株、8个物种(*M. brunneum*、*M. pingshaense*、*M. guizhouense*、*M. robertsii*、*M. indigoticum*、*M. anisopliae*、*M. campsosterni*和*M. lepidiotae*)。其他分支的物种和菌株数都较少, Clade 3 (黄绿绿僵菌复合种, *M. flavoviride* complex)中包含2个菌株, 属于*M. pemphigi*; Clade 6中包含1个菌株, 属于*M. viridulum*; Clade 8中包含2个菌株, 属于*M. rileyi*; Clade 9中包含1个菌株, 属于*Mc. neogunnii*。

2.2 新记录种*Metarhizium indigoticum*形态描述

在PPDA培养基上, 25℃培养14 d, 菌落直径可达32–33 mm。单菌落为圆形(图3A, B), 初期为白色, 产孢时从中心向外长出黑色孢子层, 菌落边缘有一圈白色菌丝。在显微镜下观察, 菌丝分枝具隔、无色光滑, 菌丝宽3.57–1.62 (2.49 ± 0.52) μm。分生孢子梗分枝或不分枝(图3D, E), 长24.43–8.82 (18.50 ± 7.05) μm, 基部粗2.70–2.21 (2.49 ± 0.21) μm。分生孢子单细胞, 柱状或长椭圆形, 长11.31–7.79 (9.00 ± 0.81) μm, 粗3.96–2.23 (2.75 ± 0.44) μm (图3C)。分生孢子链的连接点在同一中心轴上, 单个孢子透明, 成堆时呈黑色。

2.3 高黎贡山不同绿僵菌属物种的分布特征

从高黎贡山土壤样品中分离鉴定到12个绿僵菌属物种(表1), 其中*M. brunneum* (图1A, M)的菌株

数量最多, 占总数的46.6%; 其分布区域的海拔跨度最大, 在600–3,400 m的6种植被类型(I–VI)中都有分布; 温度(13–34℃)和湿度(32–80%)的跨度也最大。其次是*M. pemphigi* (图1J), 占总数的15.5%, 海拔从800–2,119 m的3种植被类型(I、II和IV)中有分布。*M. pingshaense* (图1H)、*M. rileyi* (图1K)等10个物种的菌株数量都较少(< 7%), 分布范围也较窄。*M. pingshaense*在3种植被类型中出现; *M. guizhouense* (图1F)、*M. rileyi*、*M. robertsii* (图1E)、*M. indigoticum* (图1C)和*M. anisopliae* (图1G)这5种绿僵菌只分布于2种植被类型; 其他4种绿僵菌(*Mc. neogunnii* (图1L), *M. campsosterni* (图1D)、*M. viridulum* (图1I)、*M. lepidiotae* (图1B))都只在1种植被类型中发现, 其中*M. viridulum*和*M. lepidiotae*这2个物种数量最少, 分别只分离到1株菌。

2.4 不同植被类型中绿僵菌属物种的分布特征

高黎贡山绿僵菌分布广泛, 除海拔最高的植被类型VII (流石滩稀疏植被)中没有分离到绿僵菌菌株, 其他6种植被类型生境中都有绿僵菌分布, 但不同植被类型中绿僵菌的菌株数量和物种种类差异很大(图4)。总体来说, 中低海拔地区植被类型中分布的绿僵菌数量和物种种类较多, 高海拔地区植被类型中绿僵菌的数量和物种种类都较少。



图2 基于5个基因(*nrSSU*、*nrLSU*、*EF-1 α* 、*RPB1*和*RPB2*)核苷酸序列分析获得的绿僵菌属系统发育树。采自高黎贡山的材料被标为黑体字。

Fig. 2 Phylogenetic tree of *Metarhizium* based on nucleotide sequences of five loci (*nrSSU*, *nrLSU*, *EF-1 α* , *RPB1* and *RPB2*) dataset. Those from Gaoligong Mountains are marked in bold.

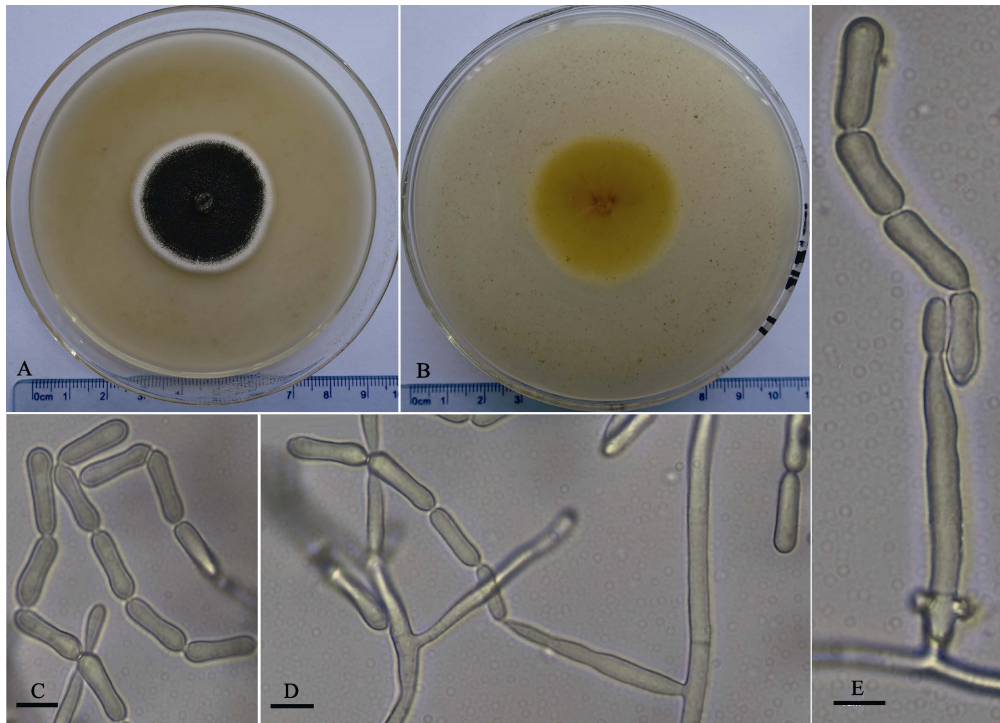


图3 中国新记录种*Metarhizium indigoticum* (菌株BUM 1512.8)的形态特征。(A)菌落正面; (B)菌落背面; (C)分生孢子链; (D, E)产孢结构。C-E的比例尺 = 5 μm。

Fig. 3 Morphology of the new record species in China, *Metarhizium indigoticum* (strain BUM 1512.8). (A) Obverse of the colony on PPDA; (B) Reverse of the colony on PPDA; (C) Conidia chains; (D, E) Conidiogenous structures. Bar of C-E = 5 μm.

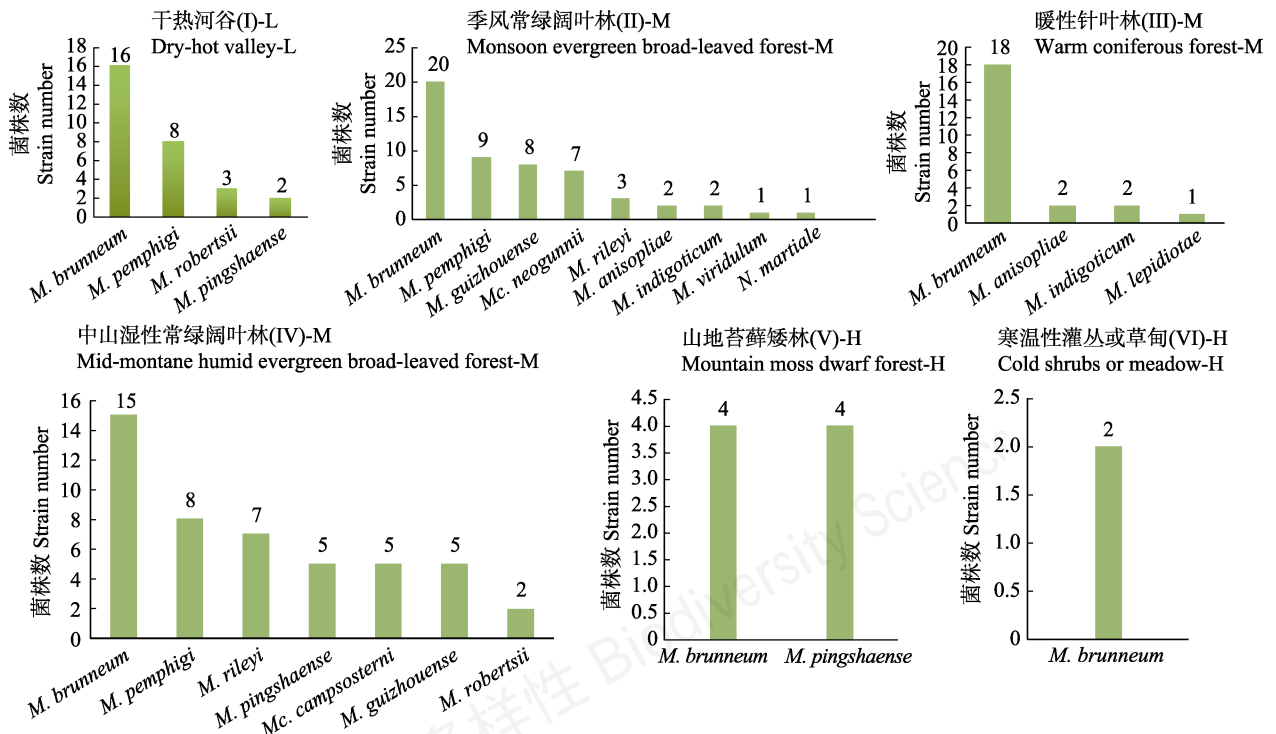


图4 高黎贡山不同植被类型中绿僵菌的物种及菌株数量。L: 低海拔; M: 中海拔; H: 高海拔。

Fig. 4 Species and strain numbers of *Metarhizium* in different vegetation types of Gaoligong Mountains. L, Low elevation; M, Middle elevation; H, High elevation.

在中海拔地区, 植被类型II (季风常绿阔叶林) 中的菌株数量最多(52株, 占总数的32.3%, *N. martiale*的1份材料未分离到菌株), 物种也最多, 包括8个绿僵菌属物种(*M. brunneum*、*M. pemphigi*、*M. guizhouense*、*M. rileyi*、*M. anisopliae*、*M. indigoticum*、*M. viridulum*和*Mc. neogunnii*)和1个*Nigelia*属物种(*N. martiale*)。植被类型IV (中山湿性常绿阔叶林)中绿僵菌的分布也较广泛, 分离到47株菌(占总数的29.2%), 属于7个物种(*M. brunneum*、*M. pemphigi*、*M. rileyi*、*M. pingshaense*、*Mc. campsosterni*、*M. guizhouense*和*M. robertsii*)。植被类型III (暖性针叶林)中分布的绿僵菌相对较少, 分离到23个菌株(占总数的14.3%), 属于4个物种(*M. brunneum*、*M. anisopliae*、*M. indigoticum*和*M. lepidiotae*)。在低海拔高温环境(植被类型I, 干热河谷)中分离到29株菌(占总数的18.0%), 属于4种绿僵菌(*M. brunneum*、*M. pemphigi*、*M. robertsii*和*M. pingshaense*)。在高海拔低温环境中, 植被类型V (山地苔藓矮林)中只分离到8株菌(占总数的5.0%), 属于2种绿僵菌(*M. brunneum*和*M. pingshaense*)。植被类型VI (寒温性灌丛或草甸)中分布的绿僵菌物种和数量最少, 只分离到2株菌(占总数的1.2%), 属于1个物种(*M. brunneum*)。

3 讨论

本研究结果表明, 高黎贡山森林生态系统中蕴涵着丰富的绿僵菌资源, 其物种多样性较高、分布较广。除最高海拔的植被类型VII (流石滩稀疏植被)外, 在不同海拔梯度的6种植被类型中都发现有绿僵菌的分布。通过多基因发育分析共鉴定到12个绿僵菌属物种和1种*Nigelia*属物种。其中, 绿僵菌物种共归入5个类群中(Clades 3、4、6、8、9), 其中多数物种(8个种)集中在*M. anisopliae* species complex中, 其他4个类群中分别只有1个物种。*M. indigoticum* (Kepler et al, 2014)为中国新记录种, 其余物种均为国内已报道过的种(黄勃等, 2004; Zhang et al, 2005; 梁宗琦, 2007; 章西, 2015^①; Luangsa-ard et al, 2017; Wen et al, 2017)。

高黎贡山绿僵菌丰富的物种多样性在很大程度上

上归因于其植被类型的多样性。陈名君(2008)研究认为, 在森林生态系统中, 虫生真菌的物种和数量因海拔高度、地理位置、植被等因素的不同而具有极大的差异。高黎贡山不同海拔植被类型中的绿僵菌属真菌的物种与分布差异也很大, 表现出明显的垂直地带性分布特点。总体来说, 中低海拔地区的植被类型中出现的绿僵菌物种种类和数量较多, 而高海拔地区植被类型的绿僵菌物种较单一、数量较少。中海拔地区的植被类型II (季风常绿阔叶林)中分布的绿僵菌物种最丰富, 囊括了大多数种类, 分离到的菌株数量也最多; 其次为植被类型IV (中山湿性常绿阔叶林), 包括了7个物种。常绿阔叶林是高黎贡山分布最广的植被类型, 包括季风常绿阔叶林(属于亚热带湿润气候)和中山湿性常绿阔叶林(属于暖性湿润型气候)(何蓉等, 2004; 苏文莘等, 2014), 海拔分布从1,100–2,800 m, 其植被覆盖率和土壤肥力较高, 植物和昆虫的物种多样性均丰富。何蓉等(2004)研究认为, 中山湿性常绿阔叶林中土壤的养分和通透性高于季风常绿阔叶林。本研究中, 季风常绿阔叶林(植被类型II)的绿僵菌物种和菌株数量都较多, 推测可能是因为其海拔相对较低, 气温(夏季温度26℃–30℃)相对较高, 更有利于绿僵菌生长与繁殖。但高黎贡山生态系统成分复杂, 取样面积和取样时间也可能造成一定影响。植被类型I (干热河谷)和植被类型III (暖性针叶林)中的菌株数量和物种种类相对较少, 可能原因是低海拔的干热河谷受焚风气候影响, 干旱少雨, 持续的高温(31℃–34℃)和较低的湿度(32–74%)对绿僵菌的生长和繁殖较为不利; 而暖性针叶林虽处在中海拔地区, 气候接近常绿阔叶林, 但土壤相对贫瘠, 植被物种组成较简单, 主要为马尾松(*Pinus massoniana*)、云南松(*P. yunnanensis*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)等, 可能对绿僵菌造成了一定不利影响。在高海拔地区, 植被类型VI (寒温性灌丛或草甸)温度低(12℃–14℃), 绿僵菌难以生长, 分布较少, 仅分离到1种(*M. brunneum*); 植被类型VII (流石滩稀疏植被)中温度极低(10℃–13℃), 植被覆盖率低, 微生物资源也较贫乏, 本次研究未分离到绿僵菌菌株。

高黎贡山优势种现象非常明显。金龟子绿僵菌复合种(Clade 4)中的*M. brunneum*为最优势物种(占总菌株数的46.6%), 而且在每种植被类型中均为最优势的物种。黄绿绿僵菌复合种(Clade 6)中的*M.*

① 章西 (2015) 中国绿僵菌分子分类的研究. 硕士学位论文, 安徽农业大学, 合肥.

*pemphigi*为第二优势物种(占总菌株数的15.5%),在3种植被类型(I、II和IV)中均有分布。其他10个绿僵菌物种的菌株数量都较少(分别占总数的0.6–6.8%),10个种的菌株数只占总数的37.9%。*M. brunneum*普遍存在于从低海拔高温低湿环境的干热河谷到高海拔低温、强紫外线辐射的寒温性灌丛或草甸等6种环境条件差异很大的植被类型中,说明该物种的生态适应能力较强,有望从中筛选出耐逆能力强的优良生防菌株。该优势种在植被类型I、II、III中的菌株数都超过了16株($\geq 10\%$),说明低海拔植被环境中较高的温湿度气候条件有利于其生存。其他物种都只出现在某几个植被类型中。*M. pemphigi*和*M. pingshaense*只在3种植被类型分离到,*M. guizhouense*、*M. rileyi*、*M. robertsii*、*M. indigoticum*和*M. anisopliae*只在2种植被类型中分离到,其他5个物种都只存在于1种植被类型。可见,除*M. brunneum*外,高黎贡山多数绿僵菌物种都具有明显的植被类型偏好性,分布范围相对较窄。

参考文献

- Bischoff JF, Rehner SA, Humber RA (2006) *Metarhizium frigidum* sp. nov.: A cryptic species of *M. anisopliae* and a member of the *M. flavoviride* complex. *Mycologia*, 98, 737–745.
- Bischoff JF, Rehner SA, Humber RA (2009) A multilocus phylogeny of the *Metarhizium anisopliae* lineage. *Mycologia*, 101, 512–530.
- Chen MJ (2008) Study on Biodiversity of Entomogenous Fungi in Different Forest Ecosystems. PhD dissertation, Anhui Agricultural University, Hefei. (in Chinese with English abstract) [陈名君 (2008) 不同森林生态系昆虫真菌生物多样性研究. 博士学位论文, 安徽农业大学, 合肥.]
- Chen ZH, Dai YD, Yu H, Yang K, Yang ZL, Yuan F, Zeng WB (2013) Systematic analyses of *Ophiocordyceps lanpingensis* sp. nov., a new species of *Ophiocordyceps* in China. *Microbiological Research*, 168, 525–532.
- Chu HL, Chen WH, Wen TC, Liang ZQ, Zheng FC, Liang JD, Han YF (2016) Delimitation of a novel member of genus *Metarhizium* (Clavicipitaceae) by phylogenetic and network analysis. *Phytotaxa*, 288, 51–60.
- Driver F, Milner RJ, Trueman WH (2000) A taxonomic revision of *Metarhizium* based on a phylogenetic analysis of rDNA sequence data. *Mycological Research*, 104, 134–150.
- Guo HL, Ye BL, Qiu YY, Chen QT, Fu CS (1986) Three new species of *Metarhizium*. *Mycosystema*, 5, 177–184. (in Chinese) [郭好礼, 叶柏龄, 邱莹玉, 陈庆涛, 付仓生 (1986) 绿僵菌属的三个新种. 菌物学报, 5, 177–184.]
- He R, Yang W, Li YY, Chai Y, Fang B (2004) Study on soil character of two forest types in southern part of Gaoligong Mountains. *Journal of West China Forestry Science*, 33(3), 46–52. (in Chinese) [何蓉, 杨卫, 李玉媛, 柴勇, 方波 (2004) 高黎贡山南段2种森林类型的土壤特性研究. 西部林业科学, 33(3), 46–52.]
- Huang B, Li SG, Li CR, Fan MZ, Li ZZ (2004) Studies on the taxonomic status of *Metarhizium cylindrospora* and *Nomuraea viridula*. *Mycosystema*, 23, 33–37. (in Chinese with English abstract) [黄勃, 李世贵, 李春如, 樊美珍, 李增智 (2004) 柱孢绿僵菌和绿色野村菌分类地位的研究. 菌物学报, 23, 33–37.]
- Huang GQ, Zhang ZS, Liu YH (2017) Review of the comb-tailed spider genus *Hahnina* C. L. Koch 1841 (Hahniidae) from Gaoligong Mountains in Yunnan, China. *Zootaxa*, 4344, 444–464.
- Kavanaugh DH, Hieke F, Liang HB, Dong DZ (2014) Inventory of the carabid beetle fauna of the Gaoligong Mountains, western Yunnan Province, China: Species of the tribe Zabryni (Coleoptera, Carabidae). *Zookeys*, 407, 55–119.
- Kepler RM, Humber RA, Bischoff JF, Rehner SA (2014) Clarification of generic and species boundaries for *Metarhizium* and related fungi through multigene phylogenetics. *Mycologia*, 106, 811–829.
- Kepler RM, Sung GH, Ban S, Nakagiri A, Chen MJ, Huang B, Li Z, Spatafora JW (2012) New teleomorph combinations in the entomopathogenic genus *Metacordyceps*. *Mycologia*, 104, 182–197.
- Keyser CA, Licht HHDF, Steinwender BM, Meyling NV (2015) Diversity within the entomopathogenic fungal species *Metarhizium flavoviride* associated with agricultural crops in Denmark. *BMC Microbiology*, 15, 249.
- Li CR, Huang B, Fan MZ, Lin YG, Li ZZ (2010) *Metacordyceps guniujiangensis* and its *Metarhizium* anamorph: A new pathogen on cicada nymphs. *Mycotaxon*, 111, 221–231.
- Li R, Dao ZL, Li H (2011) Seed plant species diversity and conservation in the northern Gaoligong Mountains in western Yunnan, China. *Mountain Research and Development*, 31, 160–165.
- Liang ZQ (2007) *Flora Fungorum Sinicorum*, Vol. 32: *Cordyceps*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [梁宗琦 (2007) 中国真菌志(第32卷): 虫草属. 科学出版社, 北京.]
- Liang ZQ, Liu AY, Liu JL (1991) A new species of the genus *Cordyceps* and its *Metarhizium* anamorph. *Mycosystema*, 10, 257–262. (in Chinese) [梁宗琦, 刘爱英, 刘杰麟 (1991) 虫草一新种及其绿僵菌无性型. 菌物学报, 10, 257–262.]
- Liu ZY, Liang ZQ, Whalley AJS, Yao YJ, Liu AY (2001) *Cordyceps brittlebankisoides*, a new pathogen of grubs and its anamorph, *Metarhizium anisopliae* var. *majus*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 78, 178–182.
- Luangsa-ard JJ, Mongkolsamrit S, Thanakitpipattana D,

- Khonsanit A, Tسانathai K, Noisripoom W, Humber RA (2017) Clavicipitaceous entomopathogens: New species in *Metarhizium* and a new genus *Nigelia*. *Mycological Progress*, 16, 369–391.
- Nishi O, Shimizu S, Sato H (2017) *Metarhizium bibionidarum* and *M. purpureogenum*: New species from Japan. *Mycological Progress*, 16, 987–998.
- Sharma SK, Gautam N (2015) *Metacordyceps dhauladharensis* sp. nov., a new entomopathogenic fungus from India. *Turkish Journal of Botany*, 39, 520–526.
- Spatafora JW, Sung G-H, Sung JM, Hywel-Jones NL, White JF Jr (2007) Phylogenetic evidence for an animal pathogen origin of ergot and the grass endophytes. *Molecular Ecology*, 16, 1701–1711.
- Su WP, Du F, Yang YM, Wang J (2014) The flora on mid-mountain humid evergreen broadleaf forest of the southern part of Mt. Gaoligongshan. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 29, 792–798. (in Chinese with English abstract) [苏文苹, 杜凡, 杨宇明, 王娟 (2014) 高黎贡山南段中山湿性常绿阔叶林植物区系研究. *云南农业大学学报*, 29, 792–798.]
- Sung GH, Hywel-Jones NL, Sung JM, Luangsa-ard JJ, Shrestha B, Spatafora JW (2007) Phylogenetic classification of *Cordyceps* and the clavicipitaceous fungi. *Studies in Mycology*, 57(1), 5–59.
- Tulloch M (1976) The genus *Metarhizium*. *Transactions of the British Mycological Society*, 66, 407–411.
- Wang M, Yin YP, Wang ZK (2014) Multilocus phylogenetic analysis of the taxonomic status of 10 strains of *Metarhizium*. *Plant Protection*, 40(5), 14–21. (in Chinese with English abstract) [王萌, 殷幼平, 王中康 (2014) 10株绿僵菌菌株分类地位的多基因系统进化分析. *植物保护*, 40(5), 14–21.]
- Wen TC, Xiao YP, Han YF, Huang SK, Zha LS, Hyde KD, Kang JC (2017) Multigene phylogeny and morphology reveal that the Chinese medicinal mushroom ‘*Cordyceps gunnii*’ is *Metacordyceps neogunnii* sp. nov. *Phytotaxa*, 302, 27–39.
- Wen TC, Zha LS, Xiao YP, Wang Q, Kang JC, Hyde KD (2015) *Metacordyceps shibinensis* sp. nov. from larvae of Lepidoptera in Guizhou Province, southwest China. *Phytotaxa*, 226, 51–62.
- Xu CD, Feng JM, Wang XP, Yang X (2008) Vertical distribution patterns of plant species diversity in northern Mt. Gaoligong, Yunnan Province. *Chinese Journal of Ecology*, 27, 323–327. (in Chinese) [徐成东, 冯建孟, 王襄平, 杨雪 (2008) 云南高黎贡山北段植物物种多样性的垂直分布格局. *生态学杂志*, 27, 323–327.]
- Zhang WM, Hu B, Zhong H, Chen YQ, Tao MH, Qu LH (2005) Study on the anamorph of *Cordyceps campsostrera*. In: *Proceedings of the First Symposium on Development of China’s Medicinal Fungi Industry* (ed. Mycological Society of China), pp. 81–82. Nantong, Jiangsu. (in Chinese) [章卫民, 胡泊, 钟韩, 陈月琴, 陶美华, 屈良鹤 (2005) 丽叩甲虫草(*Cordyceps campsostrera*)无性型的研究. 见: 首届药用真菌产业发展暨学术研讨会论文集(中国菌物学会), pp. 81–82. 江苏南通.]
- Zhou H (2008) Studies on the Diversity of Soil Microorganisms in Gaoligongshan National Nature Reserve, Yunnan. PhD dissertation, Hunan Agricultural University, Changsha. (in Chinese with English abstract) [周慧 (2008) 云南高黎贡山自然保护区土壤微生物多样性研究. 博士学位论文, 湖南农业大学, 长沙.]

(责任编辑: 杨祝良 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 近年来报道的绿僵菌属物种及用于系统发育分析的多基因序列信息

Appendix 1 *Metarhizium* species in recent reports and voucher information for the multigene phylogenetic analysis

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018131-1.pdf>

附录1 近年来报道的绿僵菌属物种及用于系统发育分析的多基因序列信息。采自高黎贡山的材料被标为黑体字。

Appendix 1 *Metarhizium* species in recent reports and voucher information for the multigene phylogenetic analysis. Those from Gaoligong Mountains are marked in bold.

编号 No.	物种 Species	菌株号 Strain code	基因库登录号 GenBank accession number					参考文献 References
			nrSSU	nrLSU	EF-1 α	RPB1	RPB2	
1	<i>Metarhizium acridum</i>	ARSEF 324	–	–	EU248844	EU248896	EU248924	Bischoff et al, 2009
	<i>M. acridum</i>	ARSEF 7486	–	–	EU248845	EU248897	EU248925	Bischoff et al, 2009
2	<i>M. album</i>	ARSEF 2082	DQ518775	DQ522560	DQ522352	DQ522398	DQ522452	Kepler et al, 2014
	<i>M. album</i>	ARSEF 2179	–	–	KJ398807	KJ398618	–	Kepler et al, 2014
3	<i>M. anisopliae</i>	ARSEF 7450	–	–	EU248852	EU248904	EU248932	Bischoff et al, 2009
	<i>M. anisopliae</i>	BUM 1900	MH143837	MH143820	MH143854	MH143869	MH143884	This study
	<i>M. anisopliae</i>	ARSEF 7487	–	–	DQ463996	DQ468355	DQ468370	Bischoff et al, 2009
4	<i>M. atrovirens</i>	TNM F10184	JF415950	JF415966	–	JN049884	–	Kepler et al, 2012
5	<i>M. bibionidarum</i>	NBRC 112661	–	–	LC126076	LC125908	LC125924	Nishi et al, 2017
	<i>M. bibionidarum</i>	CBS648.67	–	–	LC126075	LC125907	LC125923	Nishi et al, 2017
6	<i>M. blattodeae</i>	MY00896	HQ165657	HQ165719	HQ165678	HQ165739	HQ165638	Luangsa-ard et al, 2017
	<i>M. blattodeae</i>	NHJ11597	HQ165662	HQ165724	HQ165683	HQ165743	HQ165643	Luangsa-ard et al, 2017
7	<i>M. brasiliense</i>	ARSEF 2948	–	–	KJ398809	KJ398620	–	Kepler et al, 2014
8	<i>M. brittlebankisoides</i>	G97025	–	–	–	–	–	Liu et al, 2001
9	<i>M. brunneum</i>	ARSEF 2107	–	–	EU248855	EU248907	EU248935	Bischoff et al, 2009
	<i>M. brunneum</i>	ARSEF 4179	–	–	EU248854	EU248906	EU248934	Kepler et al, 2014
	<i>M. brunneum</i>	BUM 44	MH143834	MH143817	MH143851	MH143866	MH143881	This study
10	<i>M. campsosterni</i>	HMIGD 20885	–	–	–	–	–	Zhang et al, 2005
	<i>M. campsosterni</i>	BUM 828	MH143843	MH143826	–	–	–	This study
	<i>M. campsosterni</i>	BUM 10	MH143832	MH143815	MH143849	MH143864	MH143879	This study
11	<i>M. carneum</i>	CBS 239.32	EF468843	EF468988	EF468789	EF468894	EF468938	Sung et al, 2007
12	<i>M. chaityaphumense</i>	BCC19020	HQ165654	HQ165716	HQ165675	HQ165737	HQ165635	Luangsa-ard et al, 2017
	<i>M. chaityaphumense</i>	BCC19021	HQ165655	HQ165717	HQ165676	HQ165738	HQ165636	Luangsa-ard et al, 2017
13	<i>M. chlamydosporia</i>	CBS 504.66	AF339593	AF339544	EF469069	EF469098	EF469120	Sung et al, 2007
	<i>M. chlamydosporia</i>	CBS 101244	DQ522544	DQ518758	DQ522327	DQ522372	DQ522424	Spatafora et al, 2007
14	<i>M. cylindrosporum</i>	ARSEF 6926	–	–	KJ398814	KJ398625	–	Kepler et al, 2014
15	<i>M. dhauladharensis</i>	SK-2014	–	–	–	–	–	Sharma et al, 2015
16	<i>M. flavoviride</i>	ARSEF 2133	–	–	DQ463999	DQ468358	DQ468373	Bischoff et al, 2009
	<i>M. flavoviride</i>	ARSEF 2025	–	AF138269	KJ398804	KJ398614	DQ468374	Bischoff et al, 2006
17	<i>M. frigidum</i>	ARSEF 7445	–	–	KJ398818	KJ398628	–	Bischoff et al, 2006
	<i>M. frigidum</i>	ARSEF 4124	–	–	DQ464002	DQ468361	DQ468376	Bischoff et al, 2009
18	<i>M. globosum</i>	ARSEF 2596	–	–	EU248846	EU248898	EU248926	Bischoff et al, 2009
19	<i>M. granulomatis</i>	UAMH 11176	HM635078	–	KJ398782	KJ398593	–	Kepler et al, 2014
	<i>M. granulomatis</i>	UAMH 11028	HM195304	HM635076	KJ398781	–	–	Kepler et al, 2014
20	<i>M. guizhouense</i>	CBS 258.90	–	–	EU248862	EU248914	EU248942	Bischoff et al, 2009
	<i>M. guizhouense</i>	ARSEF 6238	–	–	EU248857	EU248909	EU248937	Bischoff et al, 2009
	<i>M. guizhouense</i>	BUM 119	MH143835	MH143818	MH143852	MH143867	MH143882	This study
	<i>M. guizhouense</i>	BUM 334	MH143838	MH143821	MH143855	MH143870	MH143885	This study
21	<i>M. guniujiangense</i>	GNJ02052704	–	–	–	–	–	Li et al, 2010

附录1 (续) Appendix 1 (continued)

编号 No.	物种 Species	菌株号 Strain code	基因库登录号 GenBank accession number					参考文献 References
			nrSSU	nrLSU	EF-1 α	RPB1	RPB2	
22	<i>M. indigoticum</i>	TNS-F 18553	JF415968	JF415952	JF416010	JN049886	JF415992	Kepler et al, 2012
	<i>M. indigoticum</i>	TNS-F 18554	JF415952	JF415969	JF416011	JN049887	JF415993	Kepler et al, 2012
	<i>M. indigoticum</i>	BUM 1512.8	KY264192	KY264190	KY264186	KY264194	KY264196	This study
	<i>M. indigoticum</i>	BUM 2600	KY264193	KY264191	KY264187	KY264195	KY264197	This study
23	<i>M. kalasinense</i>	BCC53581	KC011174	KC011182	KC011188	–	–	Luangsa-ard et al, 2017
	<i>M. kalasinense</i>	BCC53582	KC011175	KC011183	KC011189	–	–	Luangsa-ard et al, 2017
24	<i>M. khaoyaiense</i>	BCC 12687	JF415971	–	KJ398796	JN049889	–	Kepler et al, 2012
	<i>M. khaoyaiense</i>	BCC 14290	JF415970	–	KJ398797	JN049888	–	Kepler et al, 2012
25	<i>M. koreanum</i>	ARSEF 2039	–	–	KJ398806	KJ398616	–	Kepler et al, 2014
	<i>M. koreanum</i>	ARSEF 2038	–	–	KJ398805	KJ398615	–	Kepler et al, 2014
26	<i>M. kusanagiensis</i>	TNS-F 18494	JF415972	JF415954	JF416014	JN049890	–	Kepler et al, 2012
27	<i>M. liangshanense</i>	EFCC 1523	EF468961	EF468814	EF468755	–	EF468918	Sung et al, 2007
28	<i>M. lepidiotae</i>	ARSEF 7412	–	–	EU248864	EU248916	EU248944	Bischoff et al, 2009
	<i>M. lepidiotae</i>	BUM 66.1	MH143831	MH143814	MH143848	MH143863	MH143878	This study
29	<i>M. majus</i>	ARSEF 1946	–	–	EU248867	EU248919	EU248947	Kepler et al, 2014
	<i>M. majus</i>	ARSEF 1914	–	–	KJ398801	KJ398610	–	Bischoff et al, 2009
30	<i>M. marquandii</i>	CBS 182.27	EF468845	EF468990	EF468793	EF468899	EF468942	Sung et al, 2007
31	<i>M. minus</i>	ARSEF 1764	AF280635	AF280632	DQ464006	KJ398609	DQ468380	Kepler et al, 2014
	<i>M. minus</i>	ARSEF 2037	AF339531	AF339580	DQ464007	DQ468366	DQ468381	Sung et al, 2007
32	<i>M. novozealandicum</i>	ARSEF 4661	–	–	KJ398811	KJ398622	–	Kepler et al, 2014
	<i>M. novozealandicum</i>	ARSEF 4674	–	–	KJ398812	KJ398623	–	Kepler et al, 2014
33	<i>M. owariense</i>	NBRC 33258	HQ165730	HQ165669	HQ165689	HQ1665747	–	Kepler et al, 2012
34	<i>M. pemphigi</i>	ARSEF 7491	–	–	KJ398819	KJ398629	DQ468379	Kepler et al, 2014
	<i>M. pemphigi</i>	ARSEF 6569	–	–	KJ398813	KJ398624	DQ468378	Kepler et al, 2014
	<i>M. pemphigi</i>	BUM 1	MH143829	MH143812	MH143846	MH143862	MH143877	This study
	<i>M. pemphigi</i>	BUM 39.4	KY087813	KY087817	KY087821	KY087825	KY087827	This study
35	<i>M. pingshaense</i>	CBS 257.90	–	–	EU248850	EU248902	EU248930	Bischoff et al, 2009
	<i>M. pingshaense</i>	ARSEF 4342	–	–	EU248851	EU248903	EU248931	Kepler et al, 2014
	<i>M. pingshaense</i>	BUM 68.1	MH143833	MH143816	MH143850	MH143865	MH143880	This study
	<i>M. pingshaense</i>	BUM 70.9	MH143840	MH143823	MH143857	MH143872	MH143887	This study
36	<i>M. prachinense</i>	BCC47950	KC011172	KC011180	KC011186	KC011184	–	Luangsa-ard et al, 2017
	<i>M. prachinense</i>	BCC47979	KC011173	KC011181	KC011187	KC011185	–	Luangsa-ard et al, 2017
37	<i>M. pseudoatrovirens</i>	TNSF 16380	JF415977	–	–	JN049893	JF415997	Kepler et al, 2012
38	<i>M. purpureogenum</i>	ARSEF 12571	–	–	LC126078	LC125913	LC125920	Nishi et al, 2017
	<i>M. purpureogenum</i>	ARSEF 12570	–	–	LC126079	LC125911	LC125922	Nishi et al, 2017
39	<i>M. rileyi</i>	ARSEF 1972	–	–	KJ398803	KJ398613	–	Kepler et al, 2014
	<i>M. rileyi</i>	CBS 806.71	–	AY526491	EF468787	EF468893	EF468937	Sung et al, 2007
	<i>M. rileyi</i>	BUM 901	MH143844	MH143827	MH143860	MH143875	MH143890	This study
	<i>M. rileyi</i>	BUM 9.24	MH143839	MH143822	MH143856	MH143871	MH143886	This study
40	<i>M. reniforme</i>	ARSEF 429	HQ165671	HQ165733	HQ16569	–	HQ165650	Luangsa-ard et al, 2017
	<i>M. reniforme</i>	ARSEF 577	HQ165672	HQ165734	HQ165691	–	HQ165651	Luangsa-ard et al, 2017
41	<i>M. robertsii</i>	ARSEF 727	–	–	DQ463994	DQ468353	DQ468368	Bischoff et al, 2009
	<i>M. robertsii</i>	BUM 723	MH143836	MH143819	MH143853	MH143868	MH143883	This study

附录1 (续) Appendix 1 (continued)

编号 No.	物种 Species	菌株号 Strain code	基因库中登录号 GenBank Accession Number					参考文献References
			nrSSU	nrLSU	EF-1 α	RPB1	RPB2	
42	<i>M. samlanense</i>	BCC17091	HQ165665	HQ165727	HQ165686	–	HQ165646	Luangsa-ard et al, 2017
	<i>M. samlanense</i>	BCC17093	HQ165666	HQ165728	HQ165687	HQ165746	HQ165647	Luangsa-ard et al, 2017
43	<i>Metacordyceps synnematis</i>	GZUHXCHL12	–	–	–	–	–	Chu et al, 2016
44	<i>M. takense</i>	BCC30934	HQ165658	HQ165720	HQ165679	HQ165740	HQ165639	Luangsa-ard et al, 2017
	<i>M. takense</i>	BCC30939	HQ165659	HQ165721	–	HQ165741	HQ165640	Luangsa-ard et al, 2017
45	<i>M. viride</i>	ARSEF 2456	–	–	KJ398808	KJ398619	–	Kepler et al, 2014
	<i>M. viride</i>	CBS 659.71	HQ165735	HQ165673	HQ165692	–	HQ165652	Luangsa-ard et al, 2017
46	<i>M. viridulum</i>	ARSEF 6927	–	–	KJ398815	KJ398626	–	Kepler et al, 2014
	<i>M. viridulum</i>	BUM 721	MH143842	MH143825	MH143859	MH143874	MH143889	This study
47	<i>M. yongmunense</i>	EFCC 2135	–	EF468979	EF468834	EF468769	EF468877	Kepler et al, 2012
	<i>M. yongmunense</i>	EFCC 2131	EF468833	EF468977	EF468770	EF468876	–	Kepler et al, 2012
48	<i>Mc. shibinensis</i>	GZUHSB 13050311	KR153588	–	KR153589	KR153590	–	Wen et al, 2015
49	<i>Mc. neogunnii</i>	GZUH SB13050305	KU729724	–	KU729729	KU729734	–	Wen et al, 2017
	<i>Mc. neogunnii</i>	GZUH HS14061253	KU729725	–	KU729730	–	–	Wen et al, 2017
	<i>Mc. neogunnii</i>	BUM 415	MH143845	MH143828	MH143861	MH143876	MH143891	This study
50	<i>Nigelia aurantiaca</i>	BCC19475	GU979935	GU979944	GU979953	GU979962	GU979968	Luangsa-ard et al, 2017
	<i>N. aurantiaca</i>	BCC20179	GU979936	GU979945	GU979954	GU979963	GU979969	Luangsa-ard et al, 2017
51	<i>N. martiale</i>	EFCC 6863	–	JF415974	JF416015	–	–	Kepler et al, 2012
	<i>N. martiale</i>	BUM 713	MH143841	MH143824	MH143858	MH143873	MH143888	This study
52	<i>Cordyceps militaris</i>	OSC 93623	AY184977	AY184966	DQ522332	DQ522377	–	Sung et al, 2007
53	<i>Beauveria bassiana</i>	ARSEF 7518	HQ880975	HQ880975	HQ880975	HQ880834	HQ880834	Chen et al, 2013
54	<i>Ophiocordyceps stylophora</i>	OSC 110999	EF468982	EF468837	EF468777	EF468882	EF468931	Luangsa-ard et al, 2017
55	<i>O. acicularis</i>	OSC 110987	EF468950	EF468805	EF468744	EF468852	–	Luangsa-ard et al, 2017



•研究报告•

用传统分离培养法和高通量测序技术分析 印度块菌子囊果内细菌的群落结构

邓晓娟¹ 刘建利¹ 闫兴富¹ 刘培贵^{2*}¹ (北方民族大学生物科学与工程学院, 银川 750021)² (中国科学院昆明植物研究所生物多样性与生物地理学重点实验室, 昆明 650201)

摘要: 块菌是重要的经济真菌, 在其生长发育过程中, 细菌扮演了重要角色。本文利用传统分离培养法和高通量测序技术分析印度块菌(*Tuber indicum*)子囊果内细菌的群落结构。共分离得到细菌532株, 根据物种累积曲线, 选取其中的112株细菌进行了16S rRNA基因序列分析, 共鉴定出4属40种, 其中假单胞菌属(*Pseudomonas*)菌株占所测菌株数的80%, 不动杆菌属(*Acinetobacter*)占12.5%, 链霉菌属(*Streptomyces*)占5%, 贪噬菌属(*Variovorax*)占2.5%。通过对印度块菌子囊果16S rRNA基因的V1–V3区高通量测序分析, 共获得细菌序列9,862条, 分属于7门43属220种, 其中变形菌门、拟杆菌门和放线菌门的物种占总物种数的99.7%, 是印度块菌子囊果内的优势细菌。黄杆菌属(*Flavobacterium*)、壤霉菌属(*Agromyces*)、微杆菌属(*Microbacterium*)、剑菌属(*Ensifer*)和寡养食单胞菌属(*Stenotrophomonas*)的物种数占总物种的86.3%, 是印度块菌子囊果内细菌的优势属。研究表明, 采用胰蛋白大豆培养基仅分离得到印度块菌子囊果内少数细菌物种, 而采用高通量测序技术分析发现, 印度块菌子囊果内细菌物种种类丰富, 群落结构复杂。

关键词: 印度块菌; 子囊果; 细菌; 培养; 高通量测序

Community composition of bacteria associated with ascocarps of *Tuber indicum* using traditional culture method and Roche 454 high-throughput sequencing

Xiaojuan Deng¹, Jianli Liu¹, Xingfu Yan¹, Peigui Liu²¹ College of Biological Science and Engineering, Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021² Key Laboratory of Biodiversity and Biogeography, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201

Abstract: Truffles are important economic fungi, and bacteria play an important role in their growth and development. We investigated the bacterial community composition inside ascocarps of *Tuber indicum*. Using the traditional culture method, 532 isolates were obtained from ascocarps. Using the rarefaction curve, the 16S rRNA gene was collected and sequenced from 112 purified isolates to identify 4 genera and 40 species. Isolates of the genera *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Streptomyces* and *Variovorax* accounted for 80%, 12.5%, 5% and 2.5% of the number of these sequenced isolates, respectively. On the other hand, 9,862 sequences of the bacterial V1–V3 region of 16S rRNA gene, which represented 220 species, were analyzed via Roche 454 high-throughput sequencing. Species of the phyla Proteobacteria, Bacteroidetes, and Actinobacteria were dominant, accounting for 99.7% of all identified species. Genera *Flavobacterium*, *Agromyces*, *Microbacterium*, *Ensifer*, and *Stenotrophomonas* were dominant among the bacteria identified with this alternative method, accounting for 86.3% of the number of total species. It was found that relatively few bacterial species were isolated from ascocarps of *T. indicum* when analyzed via traditional culture method. The bacterial population associated with ascocarps of *T. indicum* was augmented when analyzed by Roche 454 high-throughput sequencing, which indicates that this latter method provides more comprehensive

收稿日期: 2018-07-03; 接受日期: 2018-12-21

基金项目: 北方民族大学重点科研项目(2017KJ27)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: pglu@mail.kib.ac.cn

results.

Key words: *Tuber indicum*; acocarps; bacteria; culture; high-throughput sequencing

块菌在商业贸易中被称为松露, 是一种地下菌根真菌, 因含有丰富的氨基酸并且具有独特的香味而享誉世界。块菌在贸易市场上最常见的种类有3种, 分别是产于欧洲的黑孢块菌(*Tuber melanosporum*)、意大利白块菌(*T. magnatum*), 以及产于亚洲的印度块菌(*T. indicum*)。印度块菌主产于中国的云南、四川和西藏, 产量大且分布广, 每年以出口为主, 是中国西南地区主要的野生经济真菌之一(Liu et al, 2016; Qiao et al, 2018)。

在块菌的生长发育过程中, 细菌始终扮演着重要角色。对块菌子囊果内细菌的种群结构进行研究, 了解细菌在块菌生活史中所占据的生态地位具有重要意义(Fu et al, 2016)。块菌子囊果为细菌的生存提供了良好的条件, 在块菌菌丝和孢子表面以及子囊果内部观察到大量的细菌类群, 如放线菌、假单胞菌和需氧芽孢菌等(Citterio et al, 1995; Wan & Liu, 2014)。细菌通过影响块菌子囊果的生态适应性从而影响菌丝的生长和分布(Streiblová et al, 2012)。细菌的群落结构也会影响块菌子囊果的成熟过程和香味的形成(Splivallo et al, 2015)。同时, 块菌菌丝在侵染植物根部形成菌根的过程中受到根际细菌类群的调节(Gryndler et al, 2013)。

虽然对于复杂环境中微生物的纯培养技术已经有了很大的发展(Dorofeev et al, 2014), 但仅能培养出环境微生物群落中的少数物种。高通量测序技术(high-throughput sequencing)极大地推动了人们对微生物生态学的认识(Mavromatis et al, 2012; Siqueira et al, 2012)。本研究将传统的分离培养技术和高通量测序技术相结合, 探讨印度块菌子囊果内细菌的群落结构, 为子囊果内细菌的功能研究提供参考。

1 材料和方法

1.1 样品的采集

云南省楚雄州是印度块菌主要的出产地。本研究选取云南省楚雄州姚安县左门乡后山的纯云南松(*Pinus yunnanensis*)林为样品采集地。采样地面积约1,000 m², 海拔2,221–2,330 m, 土壤为偏碱性的

石灰质土壤(pH介于6–8), 含碳量22.12–89.22 g/kg, 平均含钙量17.3 g/kg。在采样地发现块菌后, 取出子囊果, 编号放入自封袋中, 带回实验室处理。在16个菌塘中采集到35个印度块菌子囊果, 选取其中6个子囊果为本次实验样品。选取的子囊果完全成熟、无病虫害、无机械损伤、直径1.5–2.0 cm。

1.2 印度块菌子囊果内可培养细菌的分离纯化和鉴定

将印度块菌子囊果表面清洗干净并用酒精消毒, 移入超净工作台, 使用灭菌刀片沿子囊果切向线切开, 取正中间菌肉0.5 g, 移入10 mL三角瓶中。将样品用玻璃棒捣碎至泥状, 加入5 mL灭菌的生理盐水(NaCl 0.85%)稀释成10⁻¹菌液, 同时制备10⁻²、10⁻³、10⁻⁴、10⁻⁵和10⁻⁶稀释液, 用于细菌的分离纯化。

分别取10⁻⁴、10⁻⁵和10⁻⁶的稀释液培养细菌, 采用胰蛋白大豆培养基(TSA)对菌株进行分离, 生化培养箱28 °C条件下培养, 每个浓度的平板设置3个重复。

对分离培养的单菌落进行扩大培养并提取总DNA。利用通用引物27f/1378r扩增细菌16S rRNA基因序列(Gurtler & Stanisich, 1996)。将扩增片段送至生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。测序结果通过NCBI上的Blast功能进行比对, 当序列的相似度大于97%时被归属为同一个分类操作单元(OTU)。使用SeqMan (DNASTAR Package)对序列进行编辑, 采用Clustal 3 version 1.81进行多序列自动比对(Thompson et al, 1997), 并通过BioEdit Version 5.0.9手动调整矩阵(Hall, 1999)。系统发育分析采用Tamura等(2007)的方法。对挑取的菌落数和物种数绘制物种累积曲线, 当挑选的菌落数增加而种类不变时, 不再增加挑选样本的数量。

1.3 印度块菌子囊果内细菌基因组总DNA的提取

在超净工作台内, 将表面消毒的子囊果切向线切开, 取正中间菌肉0.5 g, 使用MP公司的Fast DNA Spin Kit for Soil (116560-200)试剂盒, 按照说明书完成微生物基因组总DNA提取。

扩增体系为: 5 μL 5 × Fast Pfu缓冲液, 2.5 μL

2.5 × 10⁻³ M dNTPs, 1.0 μL 0.5 × 10⁻⁵ M 27F引物(5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'), 1.0 μL 0.5 × 10⁻⁵ M 533R引物(5'-TTACCGCGGCTGCTGGCAC-3'), 10 ng模板以及0.5 μL Fast Pfu Polymerase, 最后加ddH₂O到25 μL。扩增程序: 95℃预变性5 min; 94℃变性1 min, 60℃退火1 min, 72℃延伸1 min, 共27个循环; 72℃后延伸10 min。1.5%琼脂糖凝胶电泳检测PCR产物, 将扩增产物送至上海美吉生物医药科技有限公司, 利用罗氏454 Titanium测序仪完成高通量测序。

1.4 数据分析

在对序列进行分析时, 去除不含样品信息的序列。过长序列末端的质量会降低, 在分析时去除序列尾部的低质量序列。修剪、去除序列中含有模糊碱基(ambiguous)、单碱基高重复区(homologous)以及长度小于100 bp的序列, 得到供精准分析的优化序列, 并提交至NCBI数据库进行OTU分析。生物信息分析中, 测序得到的每一条序列来自一个菌。要了解一个样品测序结果中的菌种、属等信息, 需要对序列进行归类操作, 将序列相似性达到97%归为一个OUT, 即一个物种。每个物种选取一条或多条高质量序列进行聚类分析。

2 结果

2.1 印度块菌子囊果内可培养细菌多样性

在10⁻⁵和10⁻⁶的稀释浓度下, 细菌在TSA培养基上能够形成清晰独立的菌落(图1), 选择菌落数在20–200的培养皿, 挑选细菌纯化培养, 总计得到可培养细菌532株。根据物种累积曲线, 其中112株细菌的16S rRNA基因被测序。对112株细菌的测序结果进行初步筛选, 其中59条高质量的序列(代表40个种)被用于本次分析。同时, 根据序列比对结果,

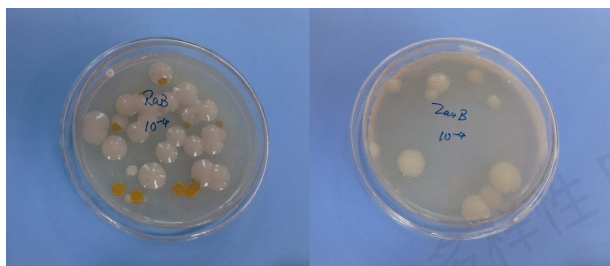


图1 印度块菌子囊果内可培养细菌
Fig. 1 Culturable bacteria from *Tuber indicum* ascocarps

在NCBI上下载32条高质量序列。自测的59条序列和下载的32条序列共同被用于系统发育树的构建。排序后得到了长度为1,326 bp的序列矩阵, 其中520个为信息位点(parsimony-informative), 459个为非信息位点(parsimony-uninformative)。启发式搜索的最大简约性分析产生了35棵同等简约树, 步长为2,122, 一致性指数(CI)为0.646, 留存指数(RI)为0.826。

基于子囊果内可培养细菌16S rRNA基因序列构建的最大简约树(图2)表明, 以2条大肠杆菌(*Escherichia coli*)的16S rRNA基因序列为外类群(Group 5), 印度块菌子囊果内分离得到的59条序列很好地聚在了4个Groups里。Group 1包含了下载的25条隶属于丙型变形菌门假单胞菌属(*Pseudomonas*)的序列, 49条本次实验获得的序列(代表了32个种)。Group 2包含了下载的5条隶属于乙型变形菌门不动杆菌属(*Acinetobacter*)的序列, 5条本次实验获得的序列(代表了5个种)。Group 3包含了下载的1条隶属于乙型变形菌门贪噬菌属(*Variovorax*)的序列, 1条本次实验获得的序列(代表了1个种)。Group 4包含了下载的4条隶属于放线菌门链霉菌属(*Streptomyces*)的序列, 2条本次实验获得的序列(代表了2个种)。

研究结果表明, 印度块菌子囊果内可培养细菌分属于4个属的40个种, 其中假单胞菌属菌株占所测菌株数的80%, 不动杆菌属占12.5%, 链霉菌属占5%, 贪噬菌属占2.5%。采用TSA培养基培养, 分离得到印度块菌子囊果内少数细菌物种, 其中假单胞菌为绝对优势类群。

2.2 子囊果内细菌高通量测序结果分析

提取印度块菌子囊果内细菌总DNA, 扩增其16S rRNA基因的V1–V3区并高通量测序, 总计得到9,862条序列220个物种。对其测序数量和物种数量之间的关系进行Rarefaction曲线分析(图3), 当测序数量在9,862条, 相似度设为97%时, 物种的数量还在增加, 但曲线趋于缓和, 测序数量可以满足分析要求。

印度块菌子囊果内细菌的220个物种分属于细菌的7门43属, 其中隶属于变形菌门的物种占总物种数的38.9%, 拟杆菌门的物种占总物种数的32.6%, 放线菌门的物种占总物种数的28.2%, 隶属于该3门的物种占总物种数的99.7% (图4a)。在属的级别上, 隶属于黄杆菌属(*Flavobacterium*)的物种占总物种

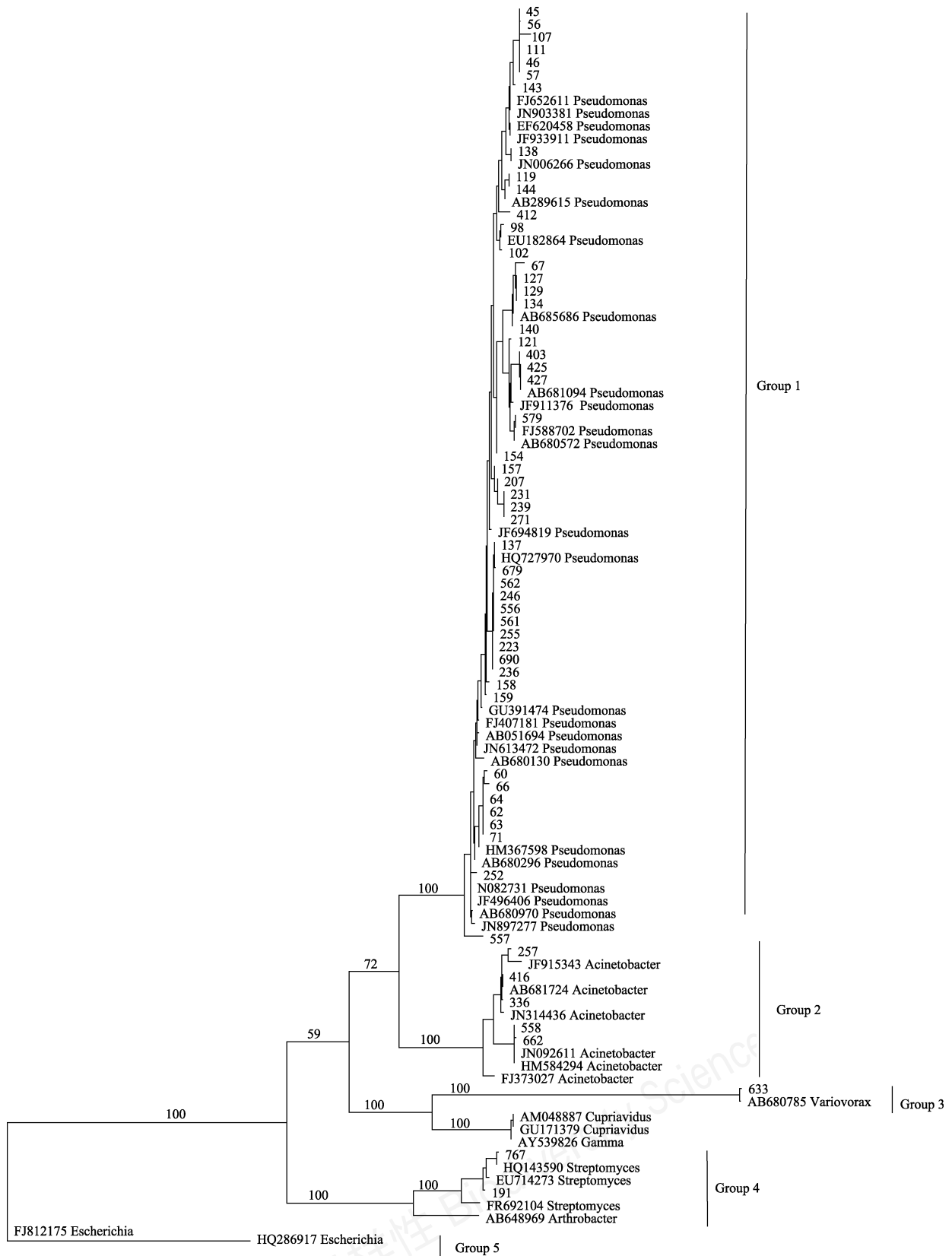


图2 基于印度块菌子囊果内可培养细菌16S rRNA基因序列构建的最大简约树。分支上的数字为≥50%的靴带值。
 Fig. 2 One of most parsimonious trees based on the analysis of 16S rRNA gene sequences of culturable bacteria from *Tuber indicum* ascocarps. Numbers above branches indicate bootstrap support above 50%.

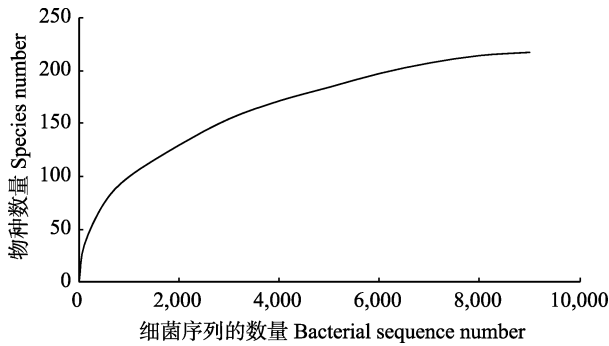


图3 印度块菌子囊果内细菌的序列数量和物种数量之间的Rarefaction曲线分析

Fig. 3 Rarefaction curve between species and sequences of bacteria from *Tuber indicum* ascocarps

数的31.4%，壤霉菌属(*Agromyces*)占14.4%，微杆菌属(*Microbacterium*)占14%，剑菌属(*Ensifer*)占13.8%，寡养食单胞菌属(*Stenotrophomonas*)占12.7%，鞘氨醇盒菌(*Sphingopyxis*)占6.2%，假单胞菌属占2.2%，贪噬菌属(*Variovorax*)占2.7%，其余35个属的物种占总物种数的2.6% (图4b)。在物种的分布上，变形菌门、拟杆菌门和放线菌门细菌是印度块菌子囊果内细菌的优势类群，黄杆菌属、壤霉菌属、微杆菌属、剑菌属和寡养食单胞菌属是其优势属。基于非培养的高通量测序研究发现，印度块菌子囊果内细菌物种种类丰富，群落结构复杂，优势菌群集中。

3 讨论

块菌的代谢产物影响其周围的土壤理化性质以及共生植物根部微生物的类群，使得块菌生长并

形成子囊果的地方大部分草本植物枯死，形成无草或少草的火烧区式的“菌塘”。菌塘微生物的种群组成和块菌之间的关系紧密而复杂。细菌通过影响块菌子囊果的生态适应性，从而影响菌丝的生长、分布及子囊果的形成(Streiblová et al, 2012)。

本次实验选取6个成熟的印度块菌子囊果，对其内部细菌群落结构进行了分析。传统平板培养方法得到的结果显示，印度块菌内部可培养细菌以假单胞菌为绝对优势类群。假单胞菌隶属于丙型变形菌门，能在植物根际土壤中大量增殖，许多菌株对植物有抑制病害、促进生长的作用，其中荧光假单胞菌(*P. fluorescens*)成为近几十年来研究最多、最具应用前景的一类生防菌(Yan et al, 2013)。假单胞菌可促进波氏块菌(*T. borchii*)孢子的萌发和菌丝的生长，并为子囊的分化起到积极作用(Sbrana et al, 2000, 2002)。假单胞菌也是沙漠块菌(*Terfezia clavaryi*)菌根际土壤可培养细菌的优势类群，且其中孟氏假单胞菌(*P. mandelii*)明显提高了菌根的感染率，被认为是一种良好的菌根促生细菌而被用于菌根合成生产中(Navarro-Ródenas et al, 2016)。假单胞菌除在块菌菌根际土壤里是优势类群，也是波氏块菌菌根根尖以及意大利白块菌和布吉纳法索沙漠块菌(*Te. boudieri*)子囊果内的优势类群(Dib-Bellahouel & Fortas, 2014; Picceri et al, 2018)。

奥斯陆莫拉菌(*Moraxella osloensis*)隶属于变形菌门，被认为是块菌子囊果的常见伴生细菌，不同的块菌子囊果内都相继分离得到该细菌(Citterio et al,

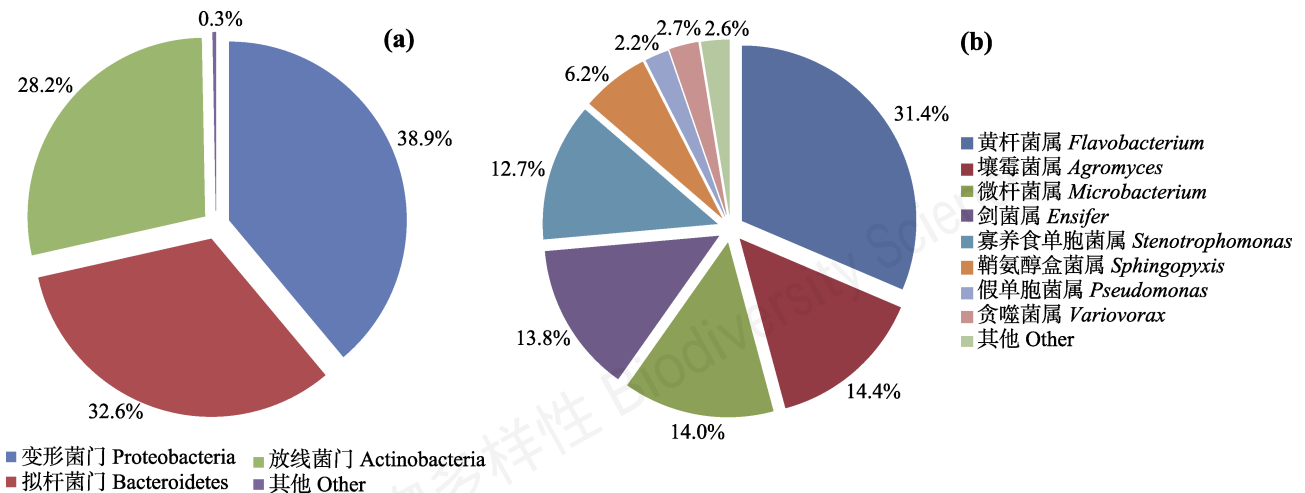


图4 印度块菌子囊果内细菌物种在不同门的分布(a)和在不同属的分布(b)

Fig. 4 Distribution of bacterial species in phylum (a) and at genus level (b)

2001; Barbieri et al, 2007)。在意大利白块菌的子囊果中, 奥斯陆莫拉菌占据优势地位, 并且影响子囊果的产量(Mello et al, 2010)。然而, 在本实验中, 印度块菌子囊果内并未分离得到奥斯陆莫拉菌, 产于中国的另一种块菌——攀枝花块菌(*T. panzhihuane*)的子囊果内也未分离得到该细菌(Wan & Liu, 2014)。

采用高通量测序技术扩增细菌16S rRNA基因V1-V3区进行测序分析, 发现印度块菌子囊果内的细菌类群具有很高的多样性, 其中变形菌门、拟杆菌门和放线菌门细菌是其优势类群。波氏块菌子囊果内微生物类群同样以隶属于变形菌门的细菌为主要优势类群(Barbieri et al, 2005)。在黑孢块菌的子囊果成熟过程中, 微生物类群虽有动态变化, 但都是以 α -变形菌门和 γ -变形菌门细菌为优势类群(Deveau et al, 2010)。虽然以上研究所选块菌种类不同, 但在子囊果内的细菌优势类群有相似性, 为细菌在块菌子实体形成中的协同效应研究提供了参考。

从研究结果来看, 相对于高通量测序技术, 传统平板培养方法获得的细菌类群相对单一, 并且在属的水平上, 两种方法的分析数据有所差异, 可能在于本实验仅采用TSA一种培养基进行培养, 不能全面揭示可培养细菌类群的多样性。但在门的级别上, 不同方法的分析数据都以变形菌门细菌为绝对优势类群。高通量测序技术在研究微生物群落结构的过程中发挥着传统分析方法无可替代的作用(Soudzilovskaia et al, 2015), 极大地推动了人们对环境微生物生态学的认识。然而, 任何一种微生物的研究手段都有局限性。对于子囊果内细菌的功能以及细菌在块菌子囊果形成过程中的影响作用研究, 都离不开传统平板培养方法。本实验不仅采用高通量测序方法, 还采用传统的平板培养方法对可培养细菌进行了分离并鉴定, 为子囊果内细菌的功能研究以及菌根促生菌的筛选提供了数据。

致谢: 感谢山东省农业科学院乔鹏博士在样品采集和处理过程中的支持和帮助。

参考文献

Barbieri E, Bertini L, Rossi I, Ceccaroli P, Saltarelli R, Guidi C, Zambonelli A, Stocchi V (2005) New evidence for bacterial diversity in the ascoma of the ectomycorrhizal

- fungus *Tuber borchii* Vittad. FEMS Microbiology Letters, 247, 23–35.
- Barbieri E, Guidi C, Bertaux J, Frey-Klett P, Garbaye J, Ceccaroli P, Saltarelli R, Zambonelli A, Stocchi V (2007) Occurrence and diversity of bacterial communities in *Tuber magnatum* during truffle maturation. Environmental Microbiology, 9, 2234–2246.
- Citterio B, Cardoni P, Potenza L, Amicucci A, Stocchi V, Gola G, Nuti M (1995) Isolation of bacteria from sporocarps of *Tuber magnatum* Pico, *Tuber borchii* Vitt. and *Tuber maculatum* Vitt. In: Biotechnology of Ectomycorrhizae (eds Stocchi V, Bonfante P, Nuti M), pp. 241–248. Plenum Press, New York.
- Citterio B, Malatesta M, Battistelli S, Marcheggiani F, Baffone W, Saltarelli R, Stocchi V, Gazzanelli G (2001) Possible involvement of *Pseudomonas fluorescens* and Bacillaceae in structural modifications of *Tuber borchii* fruit bodies. Canadian Journal of Microbiology, 47, 264–268.
- Deveau A, Antony-Babu S, Le Tacon F, Robin C, Frey-Klett P (2016) Temporal changes of bacterial communities in the *Tuber melanosporum* ectomycorrhizosphere during ascocarp development. Mycorrhiza, 26, 389–399.
- Dib-Bellahouel S, Fortas Z (2014) Activity of the desert truffle *Terfezia boudieri* Chatin, against associated soil microflora. African Journal of Microbiology Research, 8, 3008–3016.
- Dorofeev AG, Grigor'eva NV, Kozlov MN, Kevbrina MV, Aseeva VG, Nikolav YA (2014) Approaches to cultivation of “nonculturable” bacteria: Cyclic cultures. Microbiology, 83, 450–461.
- Fu Y, Li X, Li Q, Wu H, Xiong C, Geng Q, Sun H, Sun Q (2016) Soil microbial communities of three major Chinese truffles in Southwest China. Canadian Journal of Microbiology, 62, 970–979.
- Gryndler M, Soukupová L, Hršelová H, Gryndlerová H, Borovička J, Streiblová E, Jansa J (2013) A quest for indigenous truffle helper prokaryotes. Environment Microbiology Reports, 5, 346–352.
- Gurtler V, Stanisich VA (1996) New approaches to typing and identification of bacteria using the 16S–23S rDNA spacer region. Microbiology, 142, 3–16.
- Hall TA (1999) BioEdit: A user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. Nucleic Acids Symposium Series, 41, 95–98.
- Liu PG, Chen J, Deng XJ, Wang XH, Qiao P, Zhang JP, Wan SP, Geng LY, Zhao FL, Zhao WQ, Wang XJ (2016) Truffles from China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [刘培贵, 陈娟, 邓晓娟, 王向华, 乔鹏, 张介平, 万山平, 耿丽英, 赵峰岚, 赵文青, 王晓进 (2016) 中国的块菌. 科学出版社, 北京.]
- Mavromatis K, Land M L, Brettin T S, Quest D J, Copeland A, Clum A, Goodwin L, Woyke T, Lapidus A, Klenk HP, Cottingham RW, Kyrpidis NC (2012) The fast changing

- landscape of sequencing technologies and their impact on microbial genome assemblies and annotation. *PLoS ONE*, 7, e48837.
- Mello A, Miozzi L, Vizzini A, Napoli C, Kowalchuk G, Bonfante P (2010) Bacterial and fungal communities associated with *Tuber magnatum*—productive niches. *Plant Biosystems*, 144, 323–332.
- Navarro-Ródenas A, Berná L M, Lozano-Carrillo C, Andrino A, Morte A (2016) Beneficial native bacteria improve survival and mycorrhization of desert truffle mycorrhizal plants in nursery conditions. *Mycorrhiza*, 26, 769–779.
- Picceri GG, Leonardi P, Iotti M, Gallo M, Baldi F, Zambonelli A, Amicucci A, Vallorani L, Piccoli G, Ciccimarra G, Arshakyan M, Burattini S, Falcieri E, Chiarantini L (2018) Bacteria-produced ferric exopolysaccharide nanoparticles as iron delivery system for truffles (*Tuber borchii*). *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 1429–1441.
- Qiao P, Tian W, Liu PG, Yu GQ, Chen J, Deng XJ, Wan SP, Wang R, Wang Y, Guo HG (2018) Phylogeography and population genetic analyses reveal the speciation of the *Tuber indicum* complex. *Fungal Genetics and Biology*, 113, 14–23.
- Sbrana C, Bagnoli G, Bedini S, Filippi C, Giovanetti M, Nuti MP (2000) Adhesion to hyphal matrix and antifungal activity of *Pseudomonas* strains isolated from *Tuber borchii* ascocarps. *Canadian Journal of Microbiology*, 46, 259–268.
- Sbrana C, Agnolucci M, Bedini S, Lepera A, Toffanin A, Giovannetti M, Nuti MP (2002) Diversity of culturable bacterial populations associated to *Tuber borchii* ectomycorrhizas and their activity on *T. borchii* mycelial growth. *FEMS Microbiology Letters*, 211, 195–201.
- Siqueira JF Jr, Fouad AF, Rôças IN (2012) Pyrosequencing as a tool for better understanding of human microbiomes. *Journal of Oral Microbiology*, 4, 10743.
- Streiblová E, Gryndlerová H, Gryndler M (2012) Truffle brůlél: An efficient fungal life strategy. *FEMS Microbiology Ecology*, 80, 1–8.
- Soudzilovskaia NA, Douma JC, Akhmetzhanova AA, Van Bodegom PM, Cornwell WK, Moens EJ, Treseder KK, Tibbett M, Wang YP, Cornelissen JHC (2015) Global patterns of plant root colonization intensity by mycorrhizal fungi explained by climate and soil chemistry. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 371–382.
- Splivallo R, Deveau A, Valdez N, Kirchhoff N, Frey-Klett P, Karlovsky P (2015) Bacteria associated with truffle fruiting bodies contribute to truffle aroma. *Environmental Microbiology*, 17, 2647–2660.
- Tamura K, Dudley J, Nei M, Kumar S (2007) MEGA4: Molecular Evolutionary Genetics Analysis (MEGA) software version 4.0. *Molecular Biology and Evolution*, 24, 1596–1599.
- Thompson JD, Gibson TJ, Plewniak F, Jeanmougin F, Higgins DG (1997) The Clustal_X Windows interface: Flexible strategies for multiple sequence alignment aided by quality analysis tools. *Nucleic Acids Research*, 25, 4876–4882.
- Wan SP, Liu PG (2014) Diversity of culturable bacteria associated with ascocarps of a Chinese white truffle. *Plant Diversity and Resources*, 36, 29–36.
- Yan WR, Zhao TC, Xiao TB, Xiao M, Zhao ZX, Chen MC (2013) Applications of biocontrol bacterial in plant disease control. *Genomics and Applied Biology*, 32, 533–539.

(责任编辑: 杨祝良 责任编辑: 时意专)



•红外相机观测专栏•

四姑娘山国家级自然保护区鸟兽多样性初步调查

胡茜茜¹ 郑维超² 李佳琦³ 李 晟⁴ 杨 晗⁵ 陈 星¹ 官天培^{1*}

1 (绵阳师范学院生态安全与保护四川省重点实验室, 四川绵阳 621000)

2 (唐家河国家级自然保护区, 四川广元 628100) 3 (生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

4 (北京大学生命科学学院, 北京 100871) 5 (四姑娘山国家级自然保护区, 四川阿坝 624200)

摘要: 物种的分布与多度对我们理解生态过程、实施保护管理以及评估全球变化的影响都非常重要。2017年5–12月, 我们按照公里网格在四川省四姑娘山国家级自然保护区共布设60台固定定位点红外相机, 调查了保护区内主要沟系的兽类和鸟类多样性。本次调查累计11,013个相机工作日, 共拍摄到31种兽类和鸟类, 隶属7目18科, 包括5种国家一级和10种国家二级重点保护野生动物, 被IUCN红色名录评估为濒危(EN)、易危(VU)和近危(NT)的野生动物分别有2种、5种和3种。其中, 相对多度指数居于兽类前五位的是毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*)、水鹿(*Rusa unicorn*)、喜马拉雅旱獭(*Marmota himalayana*)、野猪(*Sus scrofa*)、猪獾(*Arctonyx collaris*); 相对多度指数居于鸟类前五位的则是血雉(*Ithaginis cruentus*)、白马鸡(*Crossoptilon crossoptilon*)、大噪鹛(*Garrulax maximus*)、雉鹑(*Tetraophasis obscurus*)和灰头鹀(*Turdus rubrocanus*)。由于局域性气候、植被类型和地形结构的不同, 使四姑娘山国家级自然保护区与毗邻的卧龙国家级自然保护区存在动物群落结构的差异。本调查初步掌握了四姑娘山保护区内大中型兽类和林下活动鸟类的种类组成和相对多度。

关键词: 自然保护区; 红外相机; 生物多样性编目; 野生动物监测; 横断山脉

Preliminary survey on mammal and bird diversity at Siguniang Mountains National Nature Reserve, Sichuan, China

Xiqi Hu¹, Weichao Zheng², Jiaqi Li³, Sheng Li⁴, Han Yang⁵, Xing Chen¹, Tianpei Guan^{1*}

1 Ecological Security and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang Teachers' College, Mianyang, Sichuan 621000

2 Tangjiahe National Nature Reserve, Guangyuan, Sichuan 628100

3 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Nanjing 210042

4 School of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871

5 Siguniang Mountains National Nature Reserve, Aba, Sichuan 624200

Abstract: Knowledge of the abundance and distribution of biodiversity is vitally important to understand ecological processes, manage for conservation goals, and assess the impacts of global change. In order to investigate the diversity, abundance, and distribution of mammals and birds in Siguniang Mountains National Nature Reserve, we deployed 60 camera traps from May to December 2017. With an extensive survey effort of 11,013 camera-days, we recorded 31 mammal and bird species belonging to 7 orders and 18 families. Among the recorded species, five are first class and ten are second class national protected wildlife, whereas two are listed as Endangered, five as Vulnerable, and three as Near Threatened by the IUCN Red List. In addition to providing a preliminary inventory of large mammals and birds in the reserve, we also assessed the abundance of each species using the relative abundance index. According to this index, the five most abundant mammal species were tufted deer (*Elaphodus cephalophus*), sambar (*Rusa unicorn*), Himalayan marmot (*Marmota himalayana*), wild boar (*Sus scrofa*) and northern hog badger (*Arctonyx collaris*). The five most abundant avian species were blood pheasant (*Ithaginis cruentus*), white eared pheasant (*Crossoptilon crossoptilon*), giant laughing thrush (*Garrulax maximus*), chestnut-throated partridge (*Tetraophasis obscurus*)

收稿日期: 2018-09-28; 接受日期: 2018-12-31

基金项目: 生态环境部生物多样性保护专项(2110404)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: tp-guan@hotmail.com

and chestnut thrush (*Turdus rubrocanus*). Comparison between Siguniang Mountains and the adjacent Wolong Nature Reserve revealed different community compositions, this was likely due to distinct differences in local climate, vegetation, and topography between the two regions. The data obtained in this study will provide an important basis for future wildlife research and conservation management, and also provides support for biodiversity monitoring and regional inventories of mammals and birds.

Key words: nature reserve; camera-trapping; biodiversity inventory; wildlife monitoring; Hengduan Mountains

生物多样性调查与监测是生物多样性保护的基础工作和重要手段(徐海根等, 2012)。自然保护区网络是开展生物多样性调查与监测的重要基础(施小刚等, 2017)。以往对自然保护区野生动物资源的监测主要采用大样方调查法(张常智和张明海, 2011)、样线法(Stephens et al, 2006)和样带法(Harris et al, 1992)等。与传统野生动物调查方法相比, 红外相机技术因其具有长期性、隐蔽性、准确性、非损伤性等特点, 自20世纪90年代起开始被广泛应用于野生动物研究(Karanth, 1995; O'Connell et al, 2011; Niedballa et al, 2015)。近年来, 红外相机技术在野生动物本底资源调查(宋大昭等, 2014; 肖文宏等, 2014)、种群密度评估(Feng et al, 2001; Wang et al, 2014)、动物行为学研究(赵玉泽等, 2013; 薛亚东等, 2014)、生物多样性监测与保护管理(Wang et al, 2006; Li et al, 2012)等领域发挥了重要的作用。

利用红外相机技术对自然保护区的野生动物本底资源进行监测和调查, 是促进自然保护区生物多样性保护与研究的重要基础。四姑娘山国家级自然保护区(以下简称四姑娘山保护区)位于我国西南山地, 其所处的横断山脉被认为是世界上高山植被区系最丰富的地区和生物多样性分布中心之一(王勇等, 2014)。虽然保护区建立至今已逾20年, 但除本底资源调查外从未系统开展过针对兽类和鸟类多样性的调查, 相关资料匮乏。为此, 我们利用红外相机对四姑娘山的鸟兽多样性进行了初步调查, 旨在为四姑娘山生物多样性评价、保护管理和科学研究提供基础数据。

1 研究方法

1.1 研究区域

四姑娘山保护区位于四川省阿坝州小金县, 与卧龙国家级自然保护区、米亚罗自然保护区毗连, 地处横断山脉北段向四川盆地过渡的边缘地带, 介于30°50'–31°40' N和102°00'–103°30' E之间, 属典

型的高山峡谷地貌, 其最高峰海拔6,250 m。四姑娘山地区属中亚热带季风气候向大陆性高原气候过渡地区, 年降水量为600–1,400 mm, 该地区东南坡的气象观测资料表明, 海拔1,120–4,500 m最冷月气温递减率为0.42°C/100 m, 最暖月气温递减率为0.50°C/100 m, 气候垂直分异明显。区内生态条件复杂, 生物群落类型多样, 植被垂直带谱明显, 物种丰富, 其植物区系为喜马拉雅–横断山系的植物物种(张启东等, 2013)。随海拔升高植被类型依次为: 沙棘(*Hippophae rhamnoides*)及稀疏灌丛等半干旱河谷植被以及农耕植被、落叶阔叶混交林、山地常绿针叶林(暗针叶林)、亚高山灌丛草甸带、高山灌丛草甸带、高山草甸带、高山流石滩稀疏植被带。海拔5,400 m以上为高山冻原—永冻带, 基本上无植被分布(王勇等, 2014)。根据《四姑娘山植物资源本底调查(2001)》, 四姑娘山是典型的高山草甸动物类群分布区, 动物种类丰富, 垂直分异十分明显, 已发现脊椎动物54科270多种, 已确认兽类46种, 隶属于7目20科; 鸟类74种, 隶属3目27科。

1.2 红外相机布设方案

首先利用ArcGIS 10.2将四姑娘山保护区划分为1 km × 1 km的公里网格(图1), 再结合当地地形和沟系走向、工作人员安置和维护相机的可达性, 以及野生动物出现频率等因素, 选择双桥沟、长坪沟和海子沟三条主沟两侧坡面设置调查网格。每条沟设置20个连续的公里网格, 在每个网格中心区域放置1台红外相机。相机放置位置一般选择在兽径、动物粪便或足迹遗留处、取食地以及水源附近等动物经常活动和视野开阔的地区, 两个公里网格间红外相机的距离不少于500 m(李佳琦等, 2018)。

为获取较高的相机工作效率, 放置相机主要遵循以下两个原则: (1)红外相机主要固定在离地面约50–80 cm的树上, 相机镜头避开阳光直射(例如朝向西北方向), 并清理拍摄视野范围内过高或潜在生长过高的植物(Swann et al, 2004), 以防止正午地

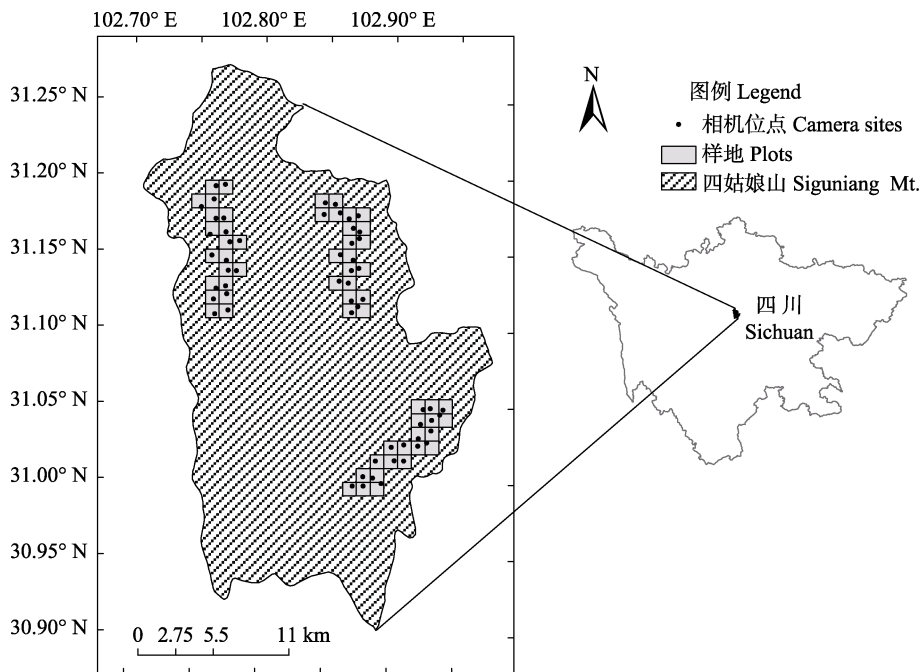


图1 四川省四姑娘山国家级自然保护区红外相机调查网格分布图

Fig. 1 Map of the camera-trapping survey blocks in Siguniang Mountains National Nature Reserve, Sichuan Province, China

面反射的光线过强或者镜头前新生植物反射光线造成误拍(刘芳等, 2012); (2)相机镜头与地面呈小于 10° 的俯角, 以扩大相机拍摄的视野范围。在相机前1–2 m视野开阔处放置嗅味剂(Carman's Magna-Glan Lure, PA, USA), 以增加路过的食肉动物在镜头前的停留时间(施小刚等, 2017), 从而降低漏拍率。安装好相机后, 对每个公里网格中的相机进行编号(如51003F25A01即为四姑娘山保护区F25公里网格中的相机), 并记录附近生境信息(相机编号、布设时间、经纬度、海拔、生境类型及布设人等信息), 地形复杂的地区沿途做标记, 以便维护相机时更易寻找。

2017年5–12月, 在四姑娘山的三条主要沟系共布设了60台相机。相机型号为易安卫士L710, 安装有8节电池以及16 G高速卡。相机参数设置为: 灵敏度“中”, 拍摄模式为“照片 + 视频”, 即连拍3张照片, 再录制一段10 s的视频。

1.3 数据处理与分析

相机数据回收后删除误拍及无法识别的照片和视频再进行物种鉴定。物种鉴定主要参考《中国兽类野外手册》(Smith和解焱, 2009)和《中国鸟类野外手册》(约翰·马敬能等, 2000), 国家重点保护等级参考《国家重点保护野生动物名录》

(<http://www.forestry.gov.cn/main/3954/content-1063883.html>), IUCN濒危等级参考IUCN红色名录(<https://www.iucnredlist.org/>)。

完成物种鉴定后, 将单台红外相机在野外持续工作24 h记为1个相机工作日(李晟等, 2016)。同一相机在30 min内连续多次拍到的同一物种的所有图像只记为1份独立有效照片(于桂清等, 2018)。每台相机有效工作日以该位点拍摄到的第1张野外工作照片(可能是工作人员或空拍照片)和最后1张野外工作照片的日期间隔为有效工作日数。

使用相对多度指数(relative abundance index, RAI)作为评估物种相对种群数量的指标(李勤等, 2013; 李晟等, 2014)。RAI以红外相机调查中同一物种的拍摄率为基础, 计算方法为:

$$RAI = (\text{有效探测数} / \text{总有效相机工作日}) \times 1,000$$

2 结果

60台红外相机累计监测11,013个相机工作日, 单个相机位点的平均有效工作日为184天。共拍摄到67,362张照片(视频也被归为照片处理), 可以明确鉴定出物种的有效照片为22,306张, 其中兽类13,546张(60.73%), 鸟类533张(2.39%), 工作人员944张, 干扰(家畜、其他人员)7,283张, 得到的独立

有效照片为4,517张(附录1, 附录2)。

本次调查共记录到31种兽类和鸟类, 隶属7目18科(附录3), 包括5种国家一级重点保护野生动物和10种国家二级重点保护野生动物。其中, 被IUCN红色名录评估为濒危(EN)、易危(VU)和近危(NT)的野生动物分别有2种、5种和3种。

2.1 兽类组成

调查期间, 红外相机共拍摄到兽类18种, 隶属5目11科(附录3), 家畜及一些无法识别的鼠形小兽并未记录在此物种名录中。18种兽类中, 偶蹄目最多, 共4科8种, 占兽类总物种数的44.44%; 其次为食肉目, 共4科7种, 占兽类总物种数的38.89%; 啮齿目、灵长目和兔形目最少, 均只有1种, 分别仅占兽类总物种数的5.56%。

本次调查共记录到国家一级重点保护野生动物3种, 即林麝(*Moschus berezovskii*)、马麝(*M. chrysogaster*)、雪豹(*Panthera uncia*); 国家二级重点保护野生动物7种: 亚洲黑熊(*Ursus thibetanus*)、中华鬣羚(*Capricornis milneedwardsii*)、水鹿(*Rusa unicornis*)、岩羊(*Pseudois nayaur*)、猕猴(*Macaca mulatta*)、中华斑羚(*Naemorhedus griseus*)、黄喉貂(*Martes flavigula*)。林麝和马麝被IUCN红色名录列为濒危物种(EN); 雪豹、亚洲黑熊、中华斑羚和水鹿等4种被列为易危物种(VU); 毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*)和中华鬣羚被列为近危物种(NT)。

此次调查发现种群较丰富的兽类为毛冠鹿(RAI = 145.92)、水鹿(RAI = 33.32)、喜马拉雅旱獭(*Marmota himalayana*, RAI = 21.43)、野猪(*Sus scrofa*, RAI = 19.61)、猪獾(*Arctonyx collaris*, RAI = 18.34), 它们的相对多度指数和拍摄率均居于兽类前五位。在60个网格中, 分布最广泛的野生兽类依次是毛冠鹿($n = 54$)、中华鬣羚($n = 36$)、野猪($n = 35$)、水鹿($n = 32$)和猪獾($n = 32$)。偶蹄目是调查区域兽类中多度最高的类群, 在相对多度指数、拍摄率和拍摄位点数中居前五位的分别有3个、3个和4个物种。而此次监测到的食肉目(7种)的物种数虽然只比偶蹄目(8种)少1种, 但除了猪獾以外相对多度指数和拍摄率都较低, 拍摄位点也较少, 其中大型的食肉动物雪豹(RAI = 0.09)和狼(*Canis lupus*, RAI = 0.09)均仅在1个相机位点上记录到1次。

2.2 鸟类组成

本次调查共记录到13种鸟类, 隶属2目7科(附

录3), 雀形目最多, 共6科8种, 占鸟类种数的61.54%。鸡形目次之, 共1科5种, 占鸟类种数的38.46%。本调查共记录到国家一级重点保护鸟类2种: 绿尾虹雉(*Lophophorus lhuysii*)和雉鹑(*Tetrao-phasis obscurus*); 国家二级重点保护野生动物3种: 藏雪鸡(*Tetraogallus tibetanus*)、血雉(*Ithaginis cruentus*)和白马鸡(*Crossoptilon crossoptilon*)。绿尾虹雉被IUCN红色名录列为易危物种(VU), 白马鸡列为近危物种(NT)。

调查结果显示, 多度最高的鸟类分别是血雉(RAI = 5.81)、白马鸡(RAI = 2.81)、大噪鹛(*Garrulax maximus*) (RAI = 1.91)、雉鹑(RAI = 1.09)和灰头鹀(*Turdus rubrocanus*) (RAI = 0.54), 它们的相对多度指数和拍摄率均位列前五。在调查区域中, 分布最广的鸟类依次是血雉(18个)、白马鸡(9个)、灰头鹀(4个)和大噪鹛(4个), 其余鸟类的拍摄位点均为2个或1个。相较于兽类, 此次调查记录到的鸟类的相对丰富度更低, 拍摄位点以及物种数也较少。

3 讨论

本次调查监测到的兽类和鸟类物种数占该区域历史记载的兽类和鸟类物种数的36.97%和17.57%。这种情况一方面可能是由于兽类中的啮齿目、兔形目、劳亚食虫目个体较小, 无法通过红外相机进行有效记录和准确识别所致。另一方面, 鸟类中的非地栖种类也无法通过红外相机获取足够的信息。加之调查位点数量和时间的局限, 以及可能存在的历史数据错误, 导致本次调查记录的物种仅占资料记载的少部分。因此, 要全面评估保护区内的动物物种多样性, 在加强调查力度的同时还需要其他调查手段的辅助。

四姑娘山位于邛崃山系的西侧, 与东面的卧龙国家级自然保护区以及北面的米亚罗自然保护区共同构成了该山系的保护区网络核心。但四姑娘山在物种组成上与卧龙自然保护区(施小刚等, 2017)相比还存在较大的差异, 此次调查并未拍摄到卧龙保护区的旗舰物种大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)及羚牛(*Budorcas taxicolor*)。我们认为这可能是由于四姑娘山保护区起始海拔偏高(大于3,000 m), 缺乏大熊猫赖以生存的竹类资源, 再加上低海拔段栖息地缺乏导致具有迁移习性的动物(例如羚牛, Guan et al, 2013)无法完成整个生活过程。因此, 本调查也

体现了栖息地的多样性水平是限制物种多样性的重要因素(铁军等, 2015)。

在本次调查中记录到了处于食物链顶端的以食肉为主的2种大型食肉动物, 即雪豹和狼。它们的相对多度都很低, 都仅在1个相机位点记录到1次, 说明四姑娘山保护区内大中型食肉动物的种群数量和密度可能处于较低水平。雪豹等大型食肉动物可控制中层捕食者与食草动物数量, 能维持高山生态系统的稳定(Gordon et al, 2015), 但其需要大范围的活动空间来提供充足的食物(Ripple et al, 2013; 蒋志刚等, 2015)。随着四姑娘山地区旅游业的开发和人类活动海拔的逐渐升高(放牧、砍伐、采药等), 雪豹栖息地面积逐渐减小并呈现破碎化, 将导致种群分布受到进一步挤压。因此, 保护好雪豹等大型食肉动物还依赖于降低栖息地干扰。另外, 雪豹主要分布在林线以上的灌丛、流石滩区域(Jackson, 1996; Gordon et al, 2015), 本次调查布设的红外相机位点仅有少数位于雪豹的分布海拔段, 也是仅一个位点拍摄到雪豹的原因。因此, 为了全面掌握雪豹的种群现状及分布, 增强高海拔段的红外监测力度是很有必要的。充足的有蹄类种群是维持食肉动物种群规模的重要基础(Buzzard et al, 2017)。偶蹄类是在四姑娘山监测到的相对多度指数和拍摄位点最多的类群, 特别是毛冠鹿、水鹿、野猪和中华鬃羚。因此, 丰富的有蹄类种类和可观的种群数量对维持一定规模的食肉动物是有利的(Ripple et al, 2014; Gordon et al, 2015; 施小刚等, 2017)。

调查还发现四姑娘山存在较强的人类干扰, 主要是家养动物(包括牛、马、家犬), 约26%的有效照片是因放牧而误拍的。值得注意的是, 我们在多个观测位置发现野生动物与家养动物存在栖息地重叠。家畜会在栖息地空间、食物和水源等资源上与野生动物产生竞争(洪起平等, 2007; 李佳等, 2018)。成群家畜的活动不仅会影响野生动物的分布和繁衍(Dublin et al, 1990; Scognamiglio et al, 2003), 其所携带的病毒、细菌等病原体也会给野生动物种群带来严重的威胁(Pelletier, 2006; 吴问国, 2008; 施小刚等, 2017)。

基于自然保护区网络的生物多样性调查与监测, 能及时掌握我国生物多样性的现状、动态变化和面临的威胁, 为区域性和全国性生物多样性保护策略的制定奠定基础。本次调查是对四姑娘山进行

的第一次基于红外相机技术的大中型兽类和鸟类的多样性水平评估, 调查结果初步反映了四姑娘山野生动物群落的结构和物种相对多度, 发现四姑娘山拥有较高的动物多样性, 是多个国家重点保护动物的分布区。然而, 由于四姑娘山存在较强的旅游带来的干扰, 保护区还应加强对干扰源的管控, 适当限制保护区内的放牧活动, 减少当地居民及家畜进入重点保护物种的核心分布区和降低人类活动对生物多样性的影响。

致谢: 本次调查获得了四姑娘山国家级自然保护区管理局的大力支持以及卧龙国家级自然保护区的协助, 卧龙沐江坪保护站的胡强、曾永兵、曾国庆等参加了红外相机的安装与维护工作, 在此一并致谢!

参考文献

- Buzzard PJ, Li XY, Bleisch W (2017) The status of snow leopards *Panthera uncia*, and high altitude use by common leopards *P. pardus*, in north-west Yunnan, China. *Oryx*, 51, 587–589.
- Dublin HT, Sinclair ARE, Boutin S, Anderson E, Jago M, Arcese P (1990) Does competition regulate ungulate populations? Further evidence from Serengeti, Tanzania. *Oecologia*, 82, 283–288.
- Feng LM, Wang TM, Mou P, Kou XJ, Ge JP (2001) First image of an Amur leopard recorded in China. *Cat News*, 55, 9.
- Gordon CE, Feit A, Gurber J, Letnic M (2015) Mesopredator suppression by an apex predator alleviates the risk of predation perceived by small prey. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282, 20142870.
- Guan TP, Ge BM, McShea WJ, Li S, Song YL (2013) Seasonal migration by a large forest ungulate: A study on takin (*Budorcas taxicolor*) in Sichuan Province, China. *European Journal of Wildlife Research*, 59, 81–91.
- Harris RB, Liu YS, Cai GQ, Bart WO (1992) Line transects for estimating density of musk deer pellet groups. *Acta Theriologica Sinica*, 12, 302–305. (in Chinese) [Harris RB, 刘永生, 蔡桂全, Bart WO (1992) 使用样线法进行马麝粪堆密度的测量. *兽类学报*, 12, 302–305.]
- Hong QP, Ding P, Ding BY (2007) Investigation and Research of Nature Resources in Fengyang Mountains. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [洪起平, 丁平, 丁炳扬 (2007) 凤阳山自然资源考察与研究. 中国林业出版社, 北京.]
- Jackson RM (1996) Home Range, Movements and Habitat Use of Snow Leopard (*Uncia uncia*) in Nepal. PhD dissertation, University of London, London.
- Jiang ZG, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Feng ZJ, Zhou KY, Liu

- SY, Luo ZH, Li CW (2015) China's mammalian diversity. *Biodiversity Science*, 23, 351–364. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 马勇, 吴毅, 王应祥, 冯祚建, 周开亚, 刘少英, 罗振华, 李春旺 (2015) 中国哺乳动物多样性. *生物多样性*, 23, 351–364.]
- Karanth KU (1995) Estimating tiger *Panthera tigris* populations from camera-trap data using capture-recapture models. *Biological Conservation*, 71, 333–338.
- Li J, Liu F, Ye LX, Liu SL, Peng H, Li DQ (2018) Camera-trapping survey of the diversity of mammals and birds in Fengyang Mountain of Zhejiang Province, China. *Acta Theriologica Sinica*, 38, 95–103. (in Chinese with English abstract) [李佳, 刘芳, 叶立新, 刘胜龙, 彭辉, 李迪强 (2018) 利用红外相机调查浙江省凤阳山兽类和鸟类多样性. *兽类学报*, 38, 95–103.]
- Li JQ, Xu HG, Wan YQ, Sun JX, Li S, Cai L (2018) Progress in construction of China Mammal Diversity Observation Network (China BON-Mammals). *Journal of Ecology and Rural Environment*, 34, 12–19. (in Chinese with English abstract) [李佳琦, 徐海根, 万雅琼, 孙佳欣, 李晟, 蔡蕾 (2018) 全国哺乳动物多样性观测网络 (China BON-Mammals) 建设进展. *生态与农村环境学报*, 34, 12–19.]
- Li Q, Wu JG, Kou XJ, Feng LM (2013) Applications of camera trap in wildlife population ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 947–955. (in Chinese with English abstract) [李勤, 鄢建国, 寇晓军, 冯利民 (2013) 相机陷阱在野生动物种群生态学中的应用. *应用生态学报*, 24, 947–955.]
- Li S, McShea WJ, Wang D, Lu Z, Gu X (2012) Gauging the impact of management expertise on the distribution of large mammals across protected areas. *Diversity and Distributions*, 18, 1166–1176.
- Li S, Wang DJ, Bu HL, Liu XG, Jin T (2016) Camera-trapping survey on the mammal diversity of the Laohegou Nature Reserve, Sichuan Province. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 282–291. (in Chinese with English abstract) [李晟, 王大军, 卜红亮, 刘小庚, 靳彤 (2016) 四川省老河沟自然保护区兽类多样性红外相机调查. *兽类学报*, 36, 282–291.]
- 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.]
- Liu F, Li DQ, Wu JG (2012) Using infra-red cameras to survey wildlife in Beijing Songshan National Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 730–739. (in Chinese with English abstract) [刘芳, 李迪强, 吴记贵 (2012) 利用红外相机调查北京松山国家级自然保护区的野生动物物种. *生态学报*, 32, 730–739.]
- Mackinnon J, Phillipps K, He FQ (2000) A Field Guide to the Birds of China. Hunan Education Press, Changsha. (in Chinese) [约翰·马敬能, 卡伦·菲利普斯, 何芬奇 (2000) 中国鸟类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Niedballa J, Sollmann R, Mohamed AB, Bender J, Wilting A (2015) Defining habitat covariates in camera-trap based occupancy studies. *Scientific Reports*, 5, 17041.
- O'Connell AF, Nichols JD, Karanth KU (2011) Camera Traps in Animal Ecology: Methods and Analyses. Springer, New York.
- Pelletier F (2006) Effects of tourist activities on ungulate behavior in a mountain protected area. *Journal of Mountain Ecology*, 8, 5–19.
- Ripple WJ, Estes JA, Beschta RL, Wilmers CC, Ritchie EG, Hebblewhite M, Berger J, Elmhagen B, Letnic M, Nelson MP, Schmitz OJ, Smith DW, Wallach AD, Wirsing AJ (2014) Status and ecological effects of the world's largest carnivores. *Science*, 343, 151.
- Ripple WJ, Wirsing AJ, Wilmers CC, Letnic M (2013) Wide spread mesopredator effects after wolf extirpation. *Biological Conservation*, 160, 70–79.
- Scognamillo D, Maxit IE, Sunquist M, Polisar J (2003) Coexistence of jaguar (*Panthera onca*) and puma (*Puma concolor*) in a mosaic landscape in the Venezuelan llanos. *Journal of Zoology*, 259, 269–279.
- Shi XG, Hu Q, Li JQ, Tang Z, Yang J, Li WJ, Shen XL, Li S (2017) Camera-trapping surveys of the mammal and bird diversity in Wolong National Nature Reserve, Sichuan Province. *Biodiversity Science*, 25, 1131–1136. (in Chinese with English abstract) [施小刚, 胡强, 李佳琦, 唐卓, 杨建, 李文静, 申小莉, 李晟 (2017) 利用红外相机调查四川卧龙国家级自然保护区鸟兽多样性. *生物多样性*, 25, 1131–1136.]
- Smith AT, Xie Y (2009) A Guide to the Mammals of China. Hunan Education Press, Changsha. (in Chinese) [Smith AT, 解焱 (2009) 中国兽类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Song DZ, Wang BP, Jiang JY, Wan SP, Cui SM, Wang TM, Feng LM (2014) Using camera trap to monitor a North Chinese leopard (*Panthera pardus japonensis*) population and their main ungulate prey. *Biodiversity Science*, 22, 733–736. (in Chinese with English abstract) [宋大昭, 王卜平, 蒋进原, 万绍平, 崔士明, 王天明, 冯利民 (2014) 山西晋中庆城林场华北豹及其主要猎物种群的红外相机监测. *生物多样性*, 22, 733–736.]
- Stephens PA, Zaumyslova OY, Miquelle DG, Myslakov AI, Hayward GD (2006) Estimating population density from indirect sign: Track counts and the Formozov-Malyshev-Pereleshin formula. *Animal Conservation*, 9, 339–348.
- Swann DE, Hass CC, Dalton DC, Wolf SA (2004) Infrared-triggered cameras for detecting wildlife: An evaluation and review. *Wildlife Society Bulletin*, 32, 357–365.
- Tie J, Li YF, Wang X, Bai FL, Cui FT, Jin S (2015) Species diversity of forest community in *Macaca mulatta* habitat in Lishan National Nature Reserve, Shanxi. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 3009–3015. (in Chinese with English abstract) [铁军, 李燕芬, 王霞, 白凤麟, 崔方天, 金山 (2015) 山西历山国家级自然保护区猕猴栖息地森林群落物种多样性. *生态学杂志*, 34, 3009–3015.]

- Wang DJ, Li S, McShea WJ, Li MF (2006) Use of remote-trip cameras for wildlife surveys and evaluating the effectiveness of conservation activities at a nature reserve in Sichuan Province, China. *Environmental Management*, 38, 942–951.
- Wang Y, Wang YD, Tao SC, Chen XP, Kong YP, Asif S, Ye CY, Pang M (2014) Using infra-red camera trapping technology to monitor mammals along Karakorum Highway in Khunjerab National Park, Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, 46, 725–731.
- Wang Y, Zhang QD, Yang H (2014) Study on water conservation capacity of three typical vegetation types in Siguniang Mountain National Natural Reserve. *Sichuan Environment*, 33(5), 111–114. (in Chinese with English abstract) [王勇, 张启东, 杨晗 (2014) 四姑娘山国家级自然保护区3种典型植被类型水源涵养功能研究. *四川环境*, 33(5), 111–114.]
- Wu WG (2008) Current situation and management countermeasure of Jiangxi Taohongling Sika Deer National Nature Reserve. *Sichuan Journal of Zoology*, 27, 457–459. (in Chinese with English abstract) [吴问国 (2008) 江西桃红岭野生梅花鹿保护现状及管理对策. *四川动物*, 27, 457–459.]
- Xiao WH, Feng LM, Zhao XD, Yang HT, Dou HL, Cheng YC, Mou P, Wang TM, Ge JP (2014) Distribution and abundance of Amur tiger, Amur leopard and their ungulate prey in Hunchun National Nature Reserve, Jilin. *Biodiversity Science*, 22, 717–724. (in Chinese with English abstract) [肖文宏, 冯利民, 赵小丹, 杨海涛, 窦海龙, 程艳超, 牟溥, 王天明, 葛剑平 (2014) 吉林珲春自然保护区东北虎和东北豹及其有蹄类猎物的多度与分布. *生物多样性*, 22, 717–724.]
- Xu HG, Ding H, Wu J, Cao MC, Chen L, Le ZF, Cui P (2012) Interpretation of the 2020 global biodiversity targets and its assessment indicators. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 28, 1–9. (in Chinese with English abstract) [徐海根, 丁晖, 吴军, 曹铭昌, 陈炼, 乐志芳, 崔鹏 (2012) 2020年全球生物多样性目标解读及其评估指标探讨. *生态与农村环境学报*, 28, 1–9.]
- Xue YD, Liu F, Guo TZ, Yuan L, Li DQ (2014) Using camera traps to survey wildlife at water sources on the northern slope of the Altun Mountains, China. *Acta Theriologica Sinica*, 34, 164–171. (in Chinese with English abstract) [薛亚东, 刘芳, 郭铁征, 袁磊, 李迪强 (2014) 基于相机陷阱技术的阿尔金山北坡水源地鸟兽物种监测. *兽类学报*, 34, 164–171.]
- Yu GQ, Kang ZJ, Liu MS, Chen ZF, Deng ZC (2018) Preliminary survey using infrared camera reveals fauna and avifauna diversity at Hupingshan National Nature Reserve, Hunan, China. *Acta Theriologica Sinica*, 38, 104–112. (in Chinese with English abstract) [于桂清, 康祖杰, 刘美斯, 陈振法, 邓忠次 (2018) 利用红外相机对湖南壶瓶山国家级自然保护区兽类和鸟类多样性的初步调查. *兽类学报*, 38, 104–112.]
- Zhang CZ, Zhang MH (2011) Population status and dynamic trends of Amur tiger's prey in Eastern Wandashan Mountain, Heilongjiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 6481–6487. (in Chinese with English abstract) [张常智, 张明海 (2011) 黑龙江省东完达山地区东北虎猎物种群现状及动态趋势. *生态学报*, 31, 6481–6487.]
- Zhang QD, Xie Q, Yang H, Wang M, Xu W (2013) Study of water conservation capacity of Minjiang fir litter and soil of Siguniang Mountains National Natural Reserve. *Sichuan Environment*, 32(2), 42–45. (in Chinese with English abstract) [张启东, 谢强, 杨晗, 王蒙, 徐玮 (2013) 四姑娘山国家级自然保护区岷江冷杉枯落物及土壤的持水能力研究. *四川环境*, 32(2), 42–45.]
- Zhao YZ, Wang ZC, Xu JL, Luo X, An LD (2013) Activity rhythm and behavioral time budgets of wild Reeves's pheasant (*Syrnaticus reevesii*) using infrared camera. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 6021–6027. (in Chinese with English abstract) [赵玉泽, 王志臣, 徐基良, 罗旭, 安丽丹 (2013) 利用红外照相技术分析野生白冠长尾雉活动节律及时间分配. *生态学报*, 33, 6021–6027.]

(责任编辑: 丁平 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 四姑娘山国家级自然保护区红外相机调查中记录到的兽类和鸟类物种统计记录总表

Appendix 1 Summary table of mammal and bird species recorded by the camera-trapping survey in the Siguniang Mountains National Nature Reserve, Sichuan Province, China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018260-1.xlsx>

附录2 四姑娘山国家级自然保护区红外相机调查中记录到的代表物种

Appendix 2 The representative species taken by camera-trapping survey in the Siguniang Mountains National Nature Reserve, Sichuan Province, China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018260-2.pdf>

附录3 四姑娘山国家级自然保护区红外相机调查中记录到的兽类和鸟类物种

Appendix 3 Mammal and bird species recorded by the camera-trapping in the Siguniang Mountains National Nature Reserve, Sichuan Province, China

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018260-3.pdf>

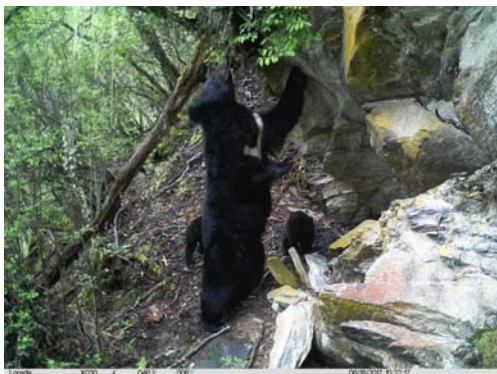
胡茜茜, 郑维超, 李佳琦, 李晟, 杨晗, 陈星, 官天培. 四姑娘山国家级自然保护区鸟兽多样性初步调查. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1325–1331.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018260>



豹猫 *Prionailurus bengalensis*



赤狐 *Vulpes vulpes*



亚洲黑熊 *Ursus thibetanus*



水鹿 *Rusa unicolor*



林麝 *Moschus berezovskii*



马麝 *Moschus chrysogaster*



雉鹑 *Tetraophasis obscures*



黄喉貂 *Martes flavigula*

附录2 四姑娘山国家级自然保护区红外相机调查中记录到的代表物种

Appendix 2 The representative species taken by camera-trapping survey in the Siguniang Mountains National Nature Reserve, Sichuan Province, China

胡茜茜, 郑维超, 李佳琦, 李晟, 杨晗, 陈星, 官天培. 四姑娘山国家级自然保护区鸟兽多样性初步调查. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1325–1331.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018260>

附录3 四姑娘山国家级自然保护区红外相机调查中记录到的兽类和鸟类物种
Appendix 3 Mammal and bird species recorded by the camera-trapping in the Siguniang Mountains National Nature Reserve, Sichuan Province, China

物种 Species	保护等级 National protected category	IUCN 红色名录 IUCN Red List	独立有效照片 数 No. of independent photographs	拍到照片的 网格数 No. of grids	相对多度指数 Relative abundance index (RAI)	海拔范围 Elevation range (m)
兽类 Mammals						
食肉目 Carnivora						
猫科 Felidae						
雪豹 <i>Panthera uncia</i>	I	VU	1	1	0.09	4,096
豹猫 <i>Prionailurus bengalensis</i>		LC	15	11	1.36	3,490–4,096
犬科 Canidae						
狼 <i>Canis lupus</i>		LC	1	1	0.09	3,797
赤狐 <i>Vulpes vulpes</i>		LC	47	12	4.28	3,511–4,096
熊科 Ursidae						
亚洲黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>	II	VU	36	20	3.27	3,539–4,039
鼬科 Mustelidae						
猪獾 <i>Arctonyx albogularis</i>		LC	202	32	18.34	3,490–4,219
黄喉貂 <i>Martes flavigula</i>	II	LC	13	9	1.18	3,511–4,011
偶蹄目 Cetartiodactyla						
鹿科 Cervidae						
水鹿 <i>Rusa unicolor</i>	II	VU	367	32	33.32	3,490–4,203
毛冠鹿 <i>Elaphodus cephalophus</i>		NT	1,607	54	145.92	3,490–4,039
牛科 Bovidae						
中华斑羚 <i>Naemorhedus griseus</i>	II	VU	84	22	7.63	3,490–4,039
岩羊 <i>Pseudois nayaur</i>	II	LC	118	6	10.71	3,781–4,203
中华鬣羚 <i>Capricornis milneedwardsii</i>	II	NT	187	36	16.98	3,490–4,039
麝科 Moschidae						
林麝 <i>Moschus berezovskii</i>	I	EN	16	6	1.45	3,539–4,039
马麝 <i>Moschus chrysogaster</i>	I	EN	37	10	3.36	3,490–3,982
猪科 Suidae						
野猪 <i>Sus scrofa</i>		LC	216	35	19.61	3,511–4,039
啮齿目 Rodentia						
松鼠科 Sciuridae						
喜马拉雅旱獭 <i>Marmota himalayana</i>		LC	236	8	21.43	3,750–4,219
兔形目 Lagomorpha						
兔科 Leporidae						
高原兔 <i>Lepus oiostolus</i>		LC	1	1	0.09	4,096
灵长目 Primates						
猴科 Ceropithecidae						
猕猴 <i>Macaca mulatta</i>	II	LC	14	8	1.21	3,490–3,816

胡茜茜, 郑维超, 李佳琦, 李晟, 杨晗, 陈星, 官天培. 四姑娘山国家级自然保护区鸟兽多样性初步调查. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1325–1331.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018260>

物种 Species	保护等级 National protected category	IUCN 红色名录 IUCN Red List	独立有效照片 数 No. of independent photographs	拍到照片的 网格数 No. of grids	相对多度指数 Relative abundance index (RAI)	海拔范围 Elevation range (m)
鸟类 Birds						
雀形目 Passeriformes						
鸫科 Turdidae						
灰头鸫 <i>Turdus rubrocanus</i>		LC	6	4	0.54	3,788–4,219
画眉科 Timaliidae						
大噪鹛 <i>Garrulax maximus</i>		LC	21	4	1.91	3,536–4,039
雀科 Paridae						
酒红朱雀 <i>Carpodacus vinaceus</i>		LC	1	1	0.09	3,861
鹟科 Muscicapidae						
蓝额红尾鹟 <i>Phoenicurus frontalis</i>		LC	2	1	0.18	4,219
长尾地鸫 <i>Zoothera dixoni</i>		LC	5	1	0.45	4,039
鸦科 Corvidae						
大嘴乌鸦 <i>Corvus macrorhynchos</i>		LC	1	1	0.09	3,843
红嘴山鸦 <i>Pyrhacorax pyrrhacorax</i>		LC	3	1	0.27	4,027
岩鹫科 Prunellidae						
栗背岩鹫 <i>Prunella immaculata</i>		LC	1	1	0.09	3,718
鸡形目 Galliformes						
雉科 Phasianidae						
白马鸡 <i>Crossoptilon crossoptilon</i>	II	NT	31	9	2.81	3,788–4,203
藏雪鸡 <i>Tetraogallus tibetanus</i>	II	LC	2	2	0.18	3,718–4,219
血雉 <i>Ithaginis cruentus</i>	II	LC	64	18	5.81	3,528–4,039
雉鹑 <i>Tetraophasis obscurus</i>	I	LC	12	2	1.09	3,948–4,027
绿尾虹雉 <i>Lophophorus lhuysii</i>	I	VU	2	2	0.18	4,027
其他 Others						
家狗 Domestic dog			6	4	0.54	3,528–4,096
家羊 Domestic goat/sheep			1	1	0.09	3,637
家牛 Domestic cow/yak			842	43	76.46	3,490–4,219
家马 Domestic horse			241	17	21.88	3,637–4,096

EN: 濒危; VU: 易危; NT: 近危; LC: 无危

EN, Endangered; VU, Vulnerable; NT, Near Threatened; LC, Least Concern.



•红外相机观测专栏•

福建省戴云山野生哺乳动物和鸟类红外相机监测

林开森^{1,2} 徐建国² 李文周² 黄雅琼² 陈斌² 郭进辉^{1*}

1 (武夷学院旅游学院, 福建武夷山 354300)

2 (福建戴云山国家级自然保护区管理局, 福建德化 362500)

摘要: 2017年2月至2018年3月,我们在福建省德化县戴云山国家级自然保护区和德化石牛山森林公园内设置红外相机监测位点60个,调查戴云山地区野生哺乳动物和鸟类生物多样性。本次调查累计19,924个相机工作日,拍摄到独立有效照片3,499张,可准确鉴定哺乳动物4目10科17属18种,鸟类5目11科21属24种,家畜3种。其中,国家I级重点保护野生动物2种,国家II级重点保护野生动物5种,且白颈长尾雉(*Syrnaticus ellioti*)为戴云山自然保护区新记录种。在野生哺乳动物中,相对多度指数最高的前5种依次为小鹿(*Muntiacus reevesi*)、野猪(*Sus scrofa*)、赤鹿(*Muntiacus vaginalis*)、赤腹松鼠(*Callosciurus erythraeus*)、猪獾(*Arctonyx collaris*);在鸟类中,相对多度指数最高的前5种依次为白鹇(*Lophura nythemera*)、紫啸鸫(*Myophonus caeruleus*)、黑领噪鹛(*Garrulax pectoralis*)、白眉山鹧鸪(*Arborophila gingica*)、灰胸竹鸡(*Bambusicola thoracica*)。此外,红外相机还拍摄到大量的家畜及人类活动照片,显示区内存在较强的人为活动干扰。本次调查结果提供了较为全面的戴云山区哺乳动物和鸟类的本底信息,填补了闽中地区大中型哺乳动物观测的空白,为后续的保护管理和长期监测工作建立了基础。

关键词: 野生动物监测; 石牛山森林公园; 戴云山国家级自然保护区; 相对多度指数

Camera-trapping survey of wild mammals and birds in Daiyunshan, Fujian Province

Kaimiao Lin^{1,2}, Jianguo Xu², Wenzhou Li², Yaqiong Huang², Bin Chen², Jinhui Guo^{1*}

1 Department of Tourism Management College, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300

2 Daiyunshan National Nature Reserve Administration, Dehua, Fujian 362500

Abstract: To investigate the biodiversity of wild mammals and birds in Daiyunshan National Nature Reserve and Shiniushan Forest Park (located in Dehua County, Fujian Province), 60 camera-traps were established and monitored from February 2017 to March 2018. A total of 3,499 independent photographs were collected with a sampling effort of 19,924 camera-days. This effort identified 18 wild mammal species belonging to 4 orders, 10 families, and 17 genera; 24 wild bird species belonging to 5 orders, 11 families and 21 genera; and 3 domestic animal species. Two of the species are listed as Class I Nationally Protected Wildlife, and 5 species are listed as Class II. One new species, *Syrnaticus ellioti*, was recorded at the Daiyunshan National Nature Reserve. Based on the relative abundance index, the five most abundant wild mammal species are *Muntiacus reevesi*, *Sus scrofa*, *Muntiacus vaginalis*, *Callosciurus erythraeus*, *Arctonyx collaris*, and the five most abundant bird species are *Lophura nythemera*, *Myophonus caeruleus*, *Garrulax pectoralis*, *Arborophila gingica*, *Bambusicola thoracica*. In addition, the detection rates of poultry, livestock and local villagers were rather high, which indicates high levels of anthropogenic disturbance across the study area. The results of this study provide a comprehensive baseline of the wild mammals and birds in the Daiyunshan and Shiniushan areas, fill the gaps in the observations of large and medium-sized mammals in central Fujian Province, and establish the basis for follow-up protection management and long-term monitoring.

Key words: wildlife monitoring; Shiniushan Forest Park; Daiyunshan National Nature Reserve; relative abundance index

收稿日期: 2018-08-07; 接受日期: 2018-12-19

基金项目: 生态环境部生物多样性保护专项(2110404)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: 32604559@qq.com

戴云山脉为福建第二大山脉,中段位于德化县境内,以戴云山为主峰,向四周倾斜,呈层状逐级下降,最高海拔1,856 m,最低海拔650 m,垂直海拔梯度大,气候与植被垂直变化明显。戴云山区主峰周边建有福建戴云山国家级自然保护区和德化石牛山森林公园两个自然保护地,拥有丰富的野生动物资源,是该区重要的生物多样性基因库。自1985年戴云山国家级自然保护区建立以来,保护区先后多次对区内野生动物资源进行调查,2003年出版的《福建戴云山自然保护区综合科学考察报告》中记录该区共有哺乳动物8目21科58种,鸟类17目45科194种(林鹏,2003),为戴云山山脉闽中地区野生动物监测奠定了基础。2016年保护区夏季鸟类样线调查共发现鸟类29科22属72种,其中14种为保护区新记录种(林开森等,2017)。然而,受到调查手段等限制,一些物种记录并不十分准确,历史记录数据不能完全反映该区域当前动物资源的现状。尤其是随着人为活动对动物栖息环境的破坏以及气候变化,一些20世纪80年代以前记录的物种如金钱豹(*Panthera pardus*)、华南虎(*P. tigris huananensis*),及2003年科考报告中记录的物种如云豹(*Neofelis nebulosa*)、穿山甲(*Manis pentadactyla*)等,在本区域内可能已局域灭绝。

红外相机调查技术具有“准确性、长期性、非损伤性”等优点,已成为野生动物本底资源调查和生物多样性监测的重要手段(李晟等,2014)。本研究于2017年2月至2018年3月,对福建戴云山国家级自然保护区和德化石牛山森林公园内的野生哺乳动物和鸟类开展了为期1年的红外相机调查,以了解该区野生动物资源现状,掌握区内大中型哺乳动物与地面活动鸟类的种类、相对多度与分布,为该区大中型哺乳动物与地栖鸟类的研究和管理提供本底资料,填补闽中地区这两个野生动物类群观测的空白。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

在戴云山山脉中段戴云山区内,选择戴云山国家级自然保护区(以下简称戴云山保护区)和德化石牛山森林公园两个区域开展野外红外相机监测。戴云山保护区总面积为134.72 km²,范围在118°05'22"–118°20'15" E, 25°38'07"–25°43'40" N之间,海拔跨

度650–1,856 m;石牛山森林公园面积86.82 km²,主峰位于水口镇,海拔跨度300–1,782 m,地理位置介于118°24'3.3"–118°28'40" E, 25°36'59"–25°40'50" N之间。戴云山区地处亚热带海洋性季风气候带,是东南沿海典型的山地森林生态系统,植被类型为亚热带常绿硬叶林、亚热带常绿阔叶林和大陆东南沿海分布最南端、面积最大、保存最完好的黄山松(*Pinus taiwanensis*)林,是福建省重要的生物多样性基因库、水源涵养区、生态安全屏障和珍稀野生动植物的生物安全岛屿,对于福建省中部生物多样性保护、生态安全保障、水源涵养、调节气候、净化空气、科研教学实习等方面具有重要意义(林鹏,2003)。

1.2 红外相机布设方案

在戴云山保护区设置2个观测样地,石牛山森林公园内设置1个样地。每个样地面积20 km²(图1),划分成20个1 km × 1 km的网格。在每个网格中心区域选择合适位置放置1台红外相机,相邻网格的两台相机间距不少于500 m。共布设60台红外相机,型号为猎科LTL 6511。戴云山保护区、石牛山森林公园布设的调查点位海拔跨度分别为765–1,630 m、649–1,355 m,基本涵盖了戴云山脉中部不同生境,包括常绿阔叶林、落叶阔叶林、竹林、针阔混交林、针叶林、草甸。

红外相机固定于粗细合适的树干上,距离地面高度约60 cm。对每台相机进行定位和编号,同时记录生境信息。相机镜头与地面平行,避免阳光直射镜头。相机设置为24 h工作模式,拍摄时间间隔为15 s,灵敏度设为“中”。每台相机配置南孚5号碱性电池12节,SCAN 32 G储存卡1张。电池、卡每3个月更换1次,下载回收数据;如果发现不工作或存储卡已经写满的相机,立即更换,同时清理相机视场内的杂草、枯枝等。监测研究时间为2017年2月至2018年3月,期间共收集照片4次。

1.3 数据整理与分析

整理红外相机所拍摄到的哺乳动物和鸟类照片并进行物种鉴定。哺乳动物的分类体系参考《中国哺乳动物多样性(第2版)》(蒋志刚等,2017),鸟类的分类体系参考《中国鸟类分类与分布名录(第三版)》(郑光美,2017)。夜晚拍到的鼠科动物由于个体较小,不易辨识,在计算相对多度指数(relative abundance index, RAI)时统一归为鼠类。定义同一只(群)动物在同一相机位点间隔30 min内连续拍摄的

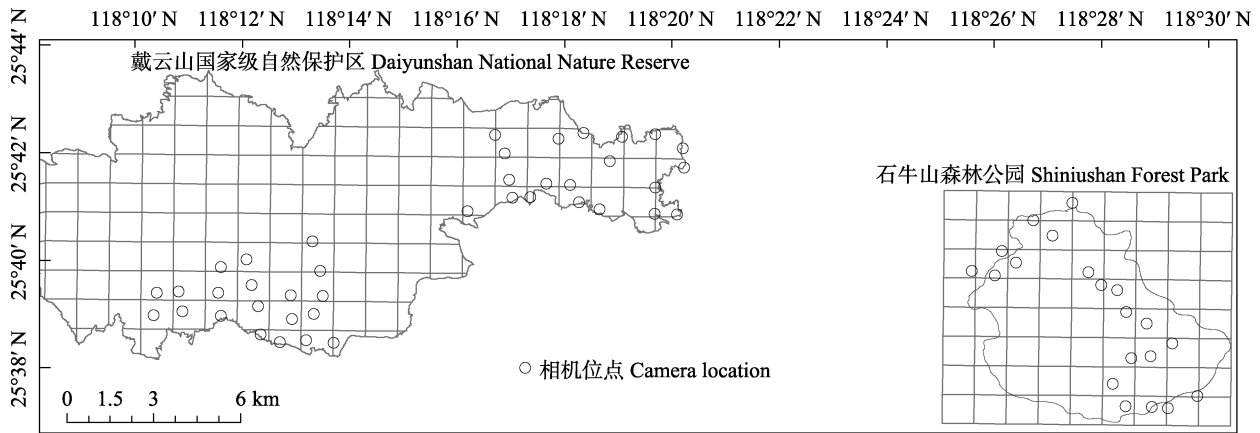


图1 福建戴云山国家级自然保护区与石牛山森林公园2017–2018年红外相机监测位点分布图

Fig. 1 Camera-trapping survey stations in Daiyunshan National Nature Reserve and Shiniushan Forest Park of Fujian Province during 2017–2018.

照片作为1张独立有效照片。根据独立有效照片计算相对多度指数(李勤等, 2013; 施小刚等, 2017):

$$RAI = A_i / N \times 1000$$

其中, A_i 代表第*i*类($i = 1, 2, \dots$)动物出现的有效照片数, N 为总有效相机工作日。

2 结果

红外相机一年内累计监测19,924个相机工作日, 共获得有效照片25,286张, 其中鸟类4,216张、哺乳动物10,245张、家畜10,825张。独立有效照片3,499张, 占总有效照片数的13.83%, 其中野生鸟类独立有效照片1,040张, 占鸟类总有效照片数的24.67%; 野生哺乳动物2,054张, 占野生哺乳动物总有效照片数的20.04%。获得可准确鉴定的野生动物42种, 隶属9目21科38属, 其中鸟类5目11科21属24种, 哺乳动物4目10科17属18种。属于国家I级重点保护的野生动物2种, 即黄腹角雉(*Tragopan caboti*)、白颈长尾雉(*Syrmaticus ellioti*); II级重点保护的野生动物5种, 即中华鬣羚(*Capricornis milneedwardsii*)、小灵猫(*Viverricula indica*)、黄喉貂(*Martes flavigula*)、白鹇(*Lophura nythemera*)、褐翅鸦鹃(*Centropus sinensis*) (附录1, 附录2)。

相对多度指数排名前5的鸟类依次为白鹇(RAI = 33.13)、紫啸鸫(*Myophonus caeruleus*, RAI = 7.28)、黑领噪鹛(*Garrulax pectoralis*, RAI = 4.97)、白眉山鹧鸪(*Arborophila gingica*, RAI = 2.71)、灰胸竹鸡(*Bambusicola thoracica*, RAI = 0.70)。国家I级重点保护野生动物黄腹角雉相对多度指数在鸟类中排名

第6位(RAI = 0.55), 白颈长尾雉最低(RAI = 0.05) (附录1)。野生哺乳动物相对多度指数排名前5的物种分别为小鹿(*Muntiacus reevesi*, RAI = 28.81)、野猪(*Sus scrofa*, RAI = 18.42)、赤麂(*Muntiacus vaginalis*, RAI = 14.71)、赤腹松鼠(*Callosciurus erythraeus*, RAI = 9.94)、猪獾(*Arctonyx collaris*, RAI = 4.12)。中华鬣羚(RAI = 0.35)、小灵猫(RAI = 0.30)相对多度指数较低(附录1, 附录2)。

3 讨论

通过一年多的红外相机监测, 拍摄到大量的野生动物照片和视频(附录3), 可鉴定哺乳动物18种、鸟类24种, 分别占戴云山保护区及周边地区已记录哺乳动物的31.03% (林鹏, 2003)和鸟类的11.53% (林开森等, 2017)。红外相机拍摄到大量小型啮齿类动物, 如鼠类, 它们主要在夜间活动, 且动作迅速, 体型较小, 外形相似, 红外相机很难捕捉到可辨认物种的清晰照片, 本次调查能鉴别的只有板齿鼠(*Bandicota indica*)和白腹巨鼠(*Leopoldmys edwardsi*)两种。红外相机监测适合于拍摄地面活动的哺乳动物和林下鸟类, 对营洞穴生活的小型哺乳动物和体型较小的林冠活动鸟类来说则不是一种有效的调查手段(李佳等, 2018)。与保护区历史记录鸟类名录相比, 本次调查拍摄到的白颈长尾雉是保护区新记录种。开展鸟类多样性专项调查, 应该采用多种调查方法如样线法来补充红外相机调查技术的不足。

对比戴云山保护区以往的记录(林鹏, 2003)和现存标本, 本次调查拍摄到的灵猫科动物中, 果子

狸(*Paguma larvata*)较为常见,小灵猫拍到6次,历史有记录的大灵猫(*Viverra zibetha*)没有拍到,大灵猫在20世纪80年代初已经十分稀少(王岐山,1990)。鼬科有猪獾、黄喉貂、鼬獾(*Melogale moschata*)、黄鼬(*Mustela sibirica*)4种,黄喉貂相对多度最低。松鼠科有赤腹松鼠和倭花鼠(*Tamiops maritimus*),历史记录泊氏长吻松鼠(*Dremomys pernyi*)(林鹏,2003)没有拍到。该地区历史上分布的一些重要珍稀物种如豹猫(*Prionailurus bengalensis*)、金猫(*Catopuma temminckii*)、云豹、金钱豹和华南虎等也未拍摄到。结合保护区内当地居民的观察和保护区近年来的样线调查记录,这些物种目前种群状况不明,可能种群密度极低,或有些物种如华南虎可能已局域绝灭,其主要原因可归结于该地区栖息地片断化、丧失以及近期历史上的过度猎杀。另外,由于本次调查主要集中在戴云山区的南部和东部,北部和西部的红外相机监测点较少,且监测时间较短,是否仍然存在云豹等大型哺乳动物还需要更多的调查验证。在本次调查中,有蹄类哺乳动物如小麂、赤麂和野猪等在较多位点被监测到,可能间接佐证该区缺乏大型食肉哺乳动物来调控食草动物种群数量(Gordon et al, 2015)。

本次在戴云山区拍摄到3种鹿科动物:小麂、赤麂和毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*),这与《福建哺乳动物种类名录》(周冬良,1997)和戴云山保护区以往的记录(林鹏,2003)相一致。同时本次调查发现3种鹿科动物相对多度指数大小差异较大,依次为小麂 > 赤麂 > 毛冠鹿,在福建省其他地区还未有三种动物多度指数大小差异的相关报道,是否别的地区也呈现类似规律还有待进一步研究。但是从全国红外相机哺乳动物调查结果来看,三者同时出现在同一地区的情况较少,仅见广东南岭国家级自然保护区的报道(蔡玉生等,2016),且毛冠鹿数量稀少。毛冠鹿在中国分布范围较为广泛,最适生存区在亚热带范围内(盛和林和陆厚基,1982),但最北可以到宁夏六盘山(高惠等,2017);而赤麂主要分布于印度、东南亚和我国热带及亚热带地区(单祥年等,2004);小麂主要分布在我国秦岭以南、云南哀牢山以北地区,属于中亚热带至北亚热带范围(鲁庆彬等,2007)。同域内鹿科动物稳定共存可能受到栖息地环境、食性、生理、活动时间和体型以及种间关系等因素的影响(杨帆等,2018)。戴云山位于中亚热

带和南亚热带的交界线,植物多样性丰富、海拔高度差较大,为3种动物同域共存提供了基础。赤麂和小麂的栖息地生境选择具有一定的重叠性,一般选择在低丘乔木密度适中、灌丛密度大和郁闭度适中的生境(白德凤等,2018)。两者在本区空间分布上的大量重叠表明它们可能在空间和时间尺度上对食性、生境利用的细微区别。尽管毛冠鹿的食性和小麂甚为相似(盛和林和陆厚基,1982),但毛冠鹿主要栖息于较高的丘陵,在空间上与赤麂和小麂重叠性较小(Chen & Hu, 2012),戴云山较大的海拔差能够为毛冠鹿提供较为广泛的活动空间和食物来源,降低与赤麂和小麂在食物和空间上的竞争。但是受食物资源、温度和环境等影响,毛冠鹿季节性的海拔梯度迁移可能造成与赤麂和小麂生态位的重叠;而且戴云山低海拔人为活动的影响造成的小麂、赤麂栖息地破坏和片断化有可能使其向更高海拔迁移,这将加剧3种动物的种间竞争,造成种群数量的波动。随着全球气候变化和人为活动等多因素的影响,需要进一步开展小麂、赤麂和毛冠鹿的种群分布、变化和动态迁移等多方面的研究(徐海根,2018)^①。

中华鬣羚是国家Ⅱ级重点保护野生动物,主要分布在树林茂密、地势险峻的地方,随着多年来栖息地的破坏和人类的滥捕滥杀,野生种已经较难发现。本次调查共有5个相机位点拍摄到中华鬣羚,其中4个位点位于石牛山森林公园样区,1个位点在戴云山国家级自然保护区样区,表明该动物在德化戴云山区分布范围较为狭窄。另外石牛山森林公园样区还拍摄到黄腹角雉、白颈长尾雉两种国家Ⅰ级保护动物,由此可见戴云山区较多的珍稀保护动物并未包含在国家级自然保护区之内。因此,石牛山森林公园中珍稀濒危物种的栖息地保护极为重要,然而近年来该区所在政府为了发展县域旅游,在其周边地区开展索道、玻璃栈道等旅游设施建设开发,导致野生动物栖息地的破碎化,而人为旅游活动极大可能会造成野生保护动物的消减或者灭绝。鉴于戴云山区区位的特殊性及对气候变化的敏感性,未来应该积极推动戴云山国家公园试点和绿色发展,探讨生态旅游和物种保护并存机制,实现野生动物在环境变化和人为影响下的永续生存。

^① 徐海根 (2018) 2017 年全国生物多样性观测报告. 见: 生物多样性绿皮书, 52-53 页. 南京环境科学研究所, 南京.

人为活动对野生哺乳动物的影响较大,从拍摄到的照片分析来看,戴云山区内周边社区存在家畜如牛、羊、狗等进入保护区内的现象,较严重破坏野生动物栖息环境并争夺食物,另外打猎、旅游、挖笋等人为活动较多,需要加强进山人员的管理和监测。因此,如何减少当地社区居民、家畜、家犬等活动对野生动物产生的直接或间接影响,值得保护区管理人员深入思索。本研究所获得的数据和信息较为全面地反映了戴云山区哺乳动物和鸟类的本底信息,为后续的保护管理和长期监测提供了数据支持和指导。目前,戴云山区森林红外相机监测仍然在进行中,更多的深入研究有待获取更多的后续监测数据。

致谢:本研究野外调查得到福建戴云山国家级自然保护区管理局陈文伟、蔡孝星、陈亚婷、林有星等同志的支持,在此一并致谢!

参考文献

- Bai DF, Chen Y, Li JS, Tao Q, Wang LF, Piao Y, Shi K (2018) Mammal diversity in Shangyong Nature Reserve, Xishuangbanna, Yunnan Province. *Biodiversity Science*, 26, 75–78. (in Chinese with English abstract) [白德凤, 陈颖, 李俊松, 陶庆, 王利繁, 飘优, 时坤 (2018) 西双版纳尚勇自然保护区哺乳动物物种多样性. *生物多样性*, 26, 75–78.]
- Cai YS, Gong YN, Lu XL, Xiao ZS, Wang XC (2016) Camera trap survey of mammal diversity in Nanling Forests. *Ecological Science*, 35(2), 57–61. (in Chinese with English abstract) [蔡玉生, 龚粤宁, 卢学理, 肖治术, 王新财 (2016) 南岭森林哺乳动物多样性的红外相机监测. *生态科学*, 35(2), 57–61.]
- Chen W, Hu JC (2012) Seasonal differences in microhabitat use by tufted deer (*Elaphodus cephalophus*) in Tangjiahe Nature Reserve. *Acta Theriologica Sinica*, 32, 188–192.
- Gao H, Ma ZQ, Teng LW, Liu ZS, Zhao C, Sun YJ, Guo ZH (2017) Tufted deer (*Elaphodus cephalophus*) was discovered in the Liupan Mountain National Nature Reserve, Ningxia Hui Autonomous Region, China. *Chinese Journal of Zoology*, 52, 1066–1068. (in Chinese with English abstract) [高惠, 马忠其, 滕丽微, 刘振生, 赵唱, 孙玉姣, 郭志宏 (2017) 宁夏回族自治区六盘山国家级自然保护区发现毛冠鹿. *动物学杂志*, 52, 1066–1068.]
- Gordon CE, Feit A, Grüber J, Letnic M (2015) Mesopredator suppression by an apex predator alleviates the risk of predation perceived by small prey. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282, 1–8.
- Jiang ZG, Liu SY, Wu Y, Jiang XL, Zhou KY (2017) China's mammal diversity (2nd edition). *Biodiversity Science*, 25, 886–895. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 刘少英, 吴毅, 蒋学龙, 周开亚 (2017) 中国哺乳动物多样性 (第2版). *生物多样性*, 25, 886–895.]
- Li J, Liu F, Ye LX, Liu SL, Peng H, Li DQ (2018) Camera-trapping survey of the diversity of mammals and birds in Fengyang Mountain of Zhejiang Province, China. *Acta Theriologica Sinica*, 38, 95–103. (in Chinese with English abstract) [李佳, 刘芳, 叶立新, 刘胜龙, 彭辉, 李迪强 (2018) 利用红外相机调查浙江省凤阳山兽类和鸟类多样性. *兽类学报*, 38, 95–103.]
- Li Q, Wu JG, Kou XJ, Feng LM (2013) Applications of camera trap in wildlife population ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 947–955. (in Chinese with English abstract) [李勤, 邬建国, 寇晓军, 冯利民 (2013) 相机陷阱在野生动物种群生态学中的应用. *应用生态学报*, 24, 947–955.]
- 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.]
- Lin KM, Huang YQ, Chen WW, Xu JG, Hong LB, Chen B (2017) Community structure and biodiversity of summer birds in Dehua County. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 40(2), 51–55. (in Chinese with English abstract) [林开淼, 黄雅琼, 陈文伟, 徐建国, 洪丽彬, 陈斌 (2017) 德化县夏季鸟类群落结构及多样性调查. *内蒙古林业调查设计*, 40(2), 51–55.]
- Lin P (2003) Comprehensive Scientific Investigation Report of Daiyunshan Nature Reserve in Fujian. Xiamen University Press, Xiamen. (in Chinese) [林鹏 (2003) 福建戴云山自然保护区综合科学考察报告. 厦门大学出版社, 厦门.]
- Lu QB, Yu JA, Gao X, Yang XY, Zhou Q, Zhang LB, Zhang SY (2007) Winter habitat selection of Reeves' muntjac and wild boars in the Qingliangfeng Mountains. *Acta Theriologica Sinica*, 27, 45–52. (in Chinese with English abstract) [鲁庆彬, 于江傲, 高欣, 杨仙玉, 周圻, 张良斌, 章叔岩 (2007) 冬季清凉峰山区小鹿和野猪的生境选择及差异. *兽类学报*, 27, 45–52.]
- Shan XN, Shi YF, Zhang HJ, Xu CH, Li J, Zheng AL (2004) mtDNA sequences variability of *Munliacus reevesi*, *M. muntjak* and *M. crinifrons* as well as the related phylogenetic relationship. *Chinese Journal of Zoology*, 39, 35–39. (in Chinese with English abstract) [单祥年, 施燕峰, 张海军, 徐春宏, 李健, 郑爱玲 (2004) 小鹿、赤鹿、黑鹿mtDNA序列变异性及反映的进化关系. *动物学杂志*, 39, 35–39.]
- Sheng HL, Lu HJ (1982) Distribution, habits and resource status of the tufted deer (*Elaphodus cephalophus*). *Acta Zoologica Sinica*, 28, 307–311. (in Chinese with English

- abstract) [盛和林, 陆厚基 (1982) 毛冠鹿的分布、资源和习性. 动物学报, 28, 307–311.]
- Shi XG, Hu Q, Li JQ, Tang Z, Yang J, Li WJ, Shen XL, Li S (2017) Camera-trapping surveys of the mammal and bird diversity in Wolong National Nature Reserve, Sichuan Province. *Biodiversity Science*, 25, 1131–1136. (in Chinese with English abstract) [施小刚, 胡强, 李佳琦, 唐卓, 杨建, 李文静, 申小莉, 李晟 (2017) 利用红外相机调查四川卧龙国家级自然保护区鸟兽多样性. 生物多样性, 25, 1131–1136.]
- Wang QS (1990) *The Mammal Fauna of Anhui*. Anhui Science and Technology Publishing House, Hefei. (in Chinese) [王岐山 (1990) 安徽兽类志. 安徽科学技术出版社, 合肥.]
- Yang F, Hu SX, Wang JJ, Guo K, Jiang GS (2018) Spatial interaction among free-ranging ungulates by season at the microhabitat scale. *Chinese Journal of Wildlife*, 39, 224–230. (in Chinese with English abstract) [杨帆, 胡素贤, 王晶晶, 郭楷, 姜广顺 (2018) 微生境尺度下有蹄类动物空间季节利用互作关系研究. 野生动物学报, 39, 224–230.]
- Zheng GM (2017) *A List of Classification and Distribution of Birds in 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.]
- Zhou DL (1997) A list of mammal species from Fujian, China. *Wuyi Science Journal*, 13, 256–261. (in Chinese with English abstract) [周冬良 (1997) 福建哺乳动物种类名录. 武夷科学, 13, 256–261.]

(特邀责任编辑: 李晟 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 戴云山森林红外相机记录的野生哺乳动物和鸟类名录

Appendix 1 Wild mammals and birds recorded by camera trapping in Daiyunshan Forests
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018216-1.pdf>

附录2 戴云山森林红外相机拍摄的野生哺乳动物和鸟类物种坐标记录

Appendix 2 Coordinate record of wild mammals and birds recorded by camera trapping in Daiyunshan Forests
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018216-2.xlsx>

附录3 戴云山森林红外相机拍摄到的重要哺乳动物和鸟类照片

Appendix 3 Important mammals and birds recorded by camera trapping in Daiyunshan Forests
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018216-3.pdf>

林开森, 徐建国, 李文周, 黄雅琼, 陈斌, 郭进辉. 福建省戴云山野生哺乳动物和鸟类红外相机监测. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1332-1337.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018216>



白颈长尾雉 *Syrmaticus ellioti*



黄腹角雉 *Tragopan caboti*



猪獾 *Arctonyx collaris*



白鹇 *Lophura nythemera*



赤腹松鼠 *Callosciurus erythraeus*



黄鼬 *Mustela sibirica*



毛冠鹿 *Elaphodus cephalophus*



中华鬣羚 *Capricornis milneedwardsii*

附录3 戴云山森林红外相机拍摄到的重要哺乳动物和鸟类照片

Appendix 3 Important mammals and birds recorded by camera trapping in Daiyunshan Forests

林开森, 徐建国, 李文周, 黄雅琼, 陈斌, 郭进辉. 福建省戴云山野生哺乳动物和鸟类红外相机监测. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1332–1337.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018216>

附录1 戴云山森林红外相机记录的野生哺乳动物和鸟类名录

Appendix 1 Wild mammals and birds recorded by camera trapping in Daiyunshan Forests

物种 Species	保护等级 Protection level	相机位点数 Camera location	独立照片数 Independent photos	相对多度指数 Relative abundance index
兽类 Mammals				
兔形目 Lagomorpha				
兔科 Leporidae				
兔属 <i>Lepus</i>				
华南兔 <i>Lepus sinensis</i>		4	5	0.25
啮齿目 Rodentia				
松鼠科 Sciuridae				
丽松鼠属 <i>Callosciurus</i>				
赤腹松鼠 <i>Callosciurus erythraeus</i>		35	198	9.94
花松鼠属 <i>Tamiops</i>				
倭花鼠 <i>Tamiops maritimus</i>		3	4	0.20
鼠科 Muridae*		33	397	19.93
板齿鼠属 <i>Bandicota</i>				
板齿鼠 <i>Bandicota indica</i>		–	–	–
小泡鼠属 <i>Leopoldmys</i>				
白腹巨鼠 <i>Leopoldmys edwardsi</i>		–	–	–
豪猪科 Hystricidae				
豪猪属 <i>Hystricidae</i>				
豪猪 <i>Hystricidae hodgsoni</i>		2	7	0.35
食肉目 Carnivora				
鼬科 Mustelidae				
猪獾属 <i>Arctonyx</i>				
猪獾 <i>Arctonyx collaris</i>		23	82	4.12
貂属 <i>Martes</i>				
黄喉貂 <i>Martes flavigula</i>	二级	1	3	0.15
鼬獾属 <i>Melogale</i>				
鼬獾 <i>Melogale moschata</i>		8	25	1.25
鼬属 <i>Mustela</i>				
黄鼬 <i>Mustela sibirica</i>		4	31	1.56
獾科 Herpestidae				
獾属 <i>Herpestes</i>				
食蟹獾 <i>Herpestes urva</i>		11	28	1.41
灵猫科 Viverridae				
果子狸属 <i>Paguma</i>				
果子狸 <i>Paguma larvata</i>		36	23	1.15
小灵猫属 <i>Viverricula</i>				
小灵猫 <i>Viverricula indica</i>	二级	4	6	0.30
偶蹄目 Artiodactyla				
猪科 Suidae				

林开森, 徐建国, 李文周, 黄雅琼, 陈斌, 郭进辉. 福建省戴云山野生哺乳动物和鸟类红外相机监测. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1332–1337.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018216>

物种 Species	保护等级 Protection level	相机位点数 Camera location	独立照片数 Independent photos	相对多度指数 Relative abundance index
猪属 <i>Sus</i>				
野猪 <i>Sus scrofa</i>		40	367	18.42
鹿科 Cervidae				
鹿属 <i>Muntiacus</i>				
小麂 <i>Muntiacus reevesi</i>		46	574	28.81
赤麂 <i>Muntiacus vaginalis</i>		40	293	14.71
毛冠鹿属 <i>Elaphodus</i>				
毛冠鹿 <i>Elaphodus cephalophus</i>		1	4	0.20
牛科 Bovidae				
鬣羚属 <i>Capricornis</i>				
中华鬣羚 <i>Capricornis milneedwardsii</i>	二级	5	7	0.35
鸟类 Birds				
鸡形目 Galliformes				
雉科 Phasianidae				
山鹧鸪属 <i>Arborophila</i>				
白眉山鹧鸪 <i>Arborophila gingica</i>		10	54	2.71
鹇属 <i>Lophura</i>				
白鹇 <i>Lophura nythemera</i>	二级	38	660	33.13
角雉属 <i>Tragopan</i>				
黄腹角雉 <i>Tragopan caboti</i>	一级	4	11	0.55
雉属 <i>Phasianus</i>				
环颈雉 <i>Phasianus colchicus</i>		3	5	0.25
长尾雉属 <i>Syrnaticus</i>				
白颈长尾雉 <i>Syrnaticus ellioti</i>	一级	1	1	0.05
竹鸡属 <i>Bambusicola</i>				
灰胸竹鸡 <i>Bambusicola thoracica</i>		3	14	0.70
鸚形目 Piciformes				
啄木鸟科 Picidae				
绿啄木鸟属 <i>Picus</i>				
灰头绿啄木鸟 <i>Picus canus</i>		3	3	0.15
噪啄木鸟属 <i>Blythipicus</i>				
黄嘴栗啄木鸟 <i>Blythipicus pyrrhotis</i>		2	6	0.30
雀形目 Passeriformes				
鹎科 Muscicapidae				
啸鹎属 <i>Myophonus</i>				
紫啸鹎 <i>Myophonus caeruleus</i>		18	145	7.28
鹟属 <i>Tarsiger</i>				
红胁蓝尾鹟 <i>Tarsiger cyanurus</i>		1	1	0.05
鸫科 Turdidae				
地鸫属 <i>Zoothera</i>				
虎斑地鸫 <i>Zoothera dauma</i>		7	11	0.55

林开森, 徐建国, 李文周, 黄雅琼, 陈斌, 郭进辉. 福建省戴云山野生哺乳动物和鸟类红外相机监测. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1332–1337.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018216>

物种 Species	保护等级 Protection level	相机位点数 Camera location	独立照片数 Independent photos	相对多度指数 Relative abundance index
燕尾属 <i>Enicurus</i>				
灰背燕尾 <i>Enicurus schistaceus</i>		1	1	0.05
白额燕尾 <i>Enicurus leschenaulti</i>		1	2	0.10
画眉科 Timaliidae				
噪鹛属 <i>Garrulax</i>				
黑领噪鹛 <i>Garrulax pectoralis</i>		24	99	4.97
黑脸噪鹛 <i>Garrulax perspicillatus</i>		12	4	0.20
画眉 <i>Garrulax canorus</i>		1	1	0.05
钩嘴鹛属 <i>Pomatorhinus</i>				
斑胸钩嘴鹛 <i>Pomatorhinus gravivox</i>		1	1	0.05
树莺科 Cettiidae				
拟鹟莺属 <i>Abroscopus</i>				
棕脸鹟莺 <i>Abroscopus albogularis</i>		3	5	0.25
鸦科 Corvidae				
蓝鹊属 <i>Urocissa</i>				
红嘴蓝鹊 <i>Urocissa erythroryncha</i>		3	7	0.35
树鹊属 <i>Dendrocitta</i>				
灰树鹊 <i>Dendrocitta formosae</i>		2	4	0.20
绣眼鸟科 Zosteropidae				
绣眼鸟属 <i>Zosterops</i>				
暗绿绣眼鸟 <i>Zosterops japonicus</i>		1	1	0.05
雀科 Fringillidae				
金翅雀属 <i>Chloris</i>				
金翅雀 <i>Chloris sinica</i>		2	2	0.10
鸛形目 Cuculiformes				
鸛科 Centropodidae				
鸛属 <i>Centropus</i>				
褐翅鸛 <i>Centropus sinensis</i>	二级	1	1	0.05
鸽形目 Columbiformes				
鸠鸽科 Columbidae				
斑鸠属 <i>Streptopelia</i>				
珠颈斑鸠 <i>Streptopelia chinensis</i>		1	1	0.05
家狗 <i>Canis lupus familiaris</i>		9	19	0.95
家羊 <i>Capra aegagrus hircus</i>		5	47	2.36
家牛 <i>Bos primigenius taurus</i>		28	339	17.01

*鼠科动物难以鉴别, 计算时统归为一种 All rodents was classified as Muridae

保护等级参考《中国国家重点保护野生动物名录》The protection level refers to the *National Catalogue of China's Key Protected Wildlife*



•红外相机观测专栏•

利用红外相机技术对安徽省鹞落坪国家级自然保护区大中型兽类及林下鸟类的调查

周 磊¹ 万雅琼² 洪 欣¹ 张 恒¹ 钱立富¹ 王陈成¹
孔 政¹ 赵 凯³ 李佳琦^{2*} 张保卫^{1*}

1 (安徽大学生命科学学院, 合肥 230601)

2 (生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

3 (安庆师范大学资源与环境学院, 安徽安庆 246011)

摘要: 鹞落坪国家级自然保护区位于大别山脉南麓的核心地带。2014–2017年, 作者采用红外相机技术对鹞落坪国家级自然保护区的大中型兽类及林下鸟类进行调查。研究共布设了72个相机位点, 累计完成16,658个相机工作日, 获得独立有效照片2,142张, 共记录野生兽类9种、鸟类15种, 隶属8目15科。包括国家一级重点保护野生动物1种, 即安徽麝(*Moschus anhuiensis*), 国家二级重点保护野生动物2种, 分别是勺鸡(*Pucrasia macrolopha*)和白冠长尾雉(*Syrnaticus reevesii*)。相对多度排名前五的兽类分别为小鹿(*Muntiacus reevesi*)、野猪(*Sus scrofa*)、赤腹松鼠(*Callosciurus erythraeus*)、猪獾(*Arctonyx collaris*)和岩松鼠(*Sciurotamias davidianus*)。相对多度排名前五的鸟类为白冠长尾雉、勺鸡、松鸦(*Garrulus glandarius*)、灰背鸫(*Turdus hortulorum*)、红嘴蓝鹊(*Urocissa erythrorhyncha*)。此外红外相机还拍摄到大量人类活动照片, 表明当地人类活动较为严重, 应加强管理。本研究初步了解了保护区内大中型兽类和林下鸟类群落信息及人类活动的干扰情况, 为保护区未来的保护和管理提供了数据基础。

关键词: 鹞落坪国家级自然保护区; 红外相机技术; 兽类; 鸟类; 生物多样性

Camera-trapping surveys of the large and medium-sized mammal and understory bird diversity in Yaoluoping National Nature Reserve, Anhui Province

Lei Zhou¹, Yaqiong Wan², Xin Hong¹, Heng Zhang¹, Lifu Qian¹, Chencheng Wang¹, Zheng Kong¹, Kai Zhao³, Jiaqi Li^{2*}, Baowei Zhang^{1*}

1 School of Life Science, Anhui University, Hefei 230601

2 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Nanjing 210042

3 College of Resources and Environment Sciences, Anqing Normal University, Anqing, Anhui 246011

Abstract: Yaoluoping National Nature Reserve is located on the southern slope of the Dabie Mountains. To describe the diversity of large and medium-sized mammal and understory bird diversity in Yaoluoping National Nature Reserve, from 2014 to 2017 a baseline survey was conducted using a camera-trapping approach. Over 16,658 camera trapping days at 72 camera locations, 2,142 usable images were obtained. Nine mammal species and 15 bird species were identified, belonging to 8 orders and 15 families. One species, *Moschus anhuiensis*, is listed as national first-class protected wild animal, whereas two species, *Pucrasia macrolopha* and *Syrnaticus reevesii*, were listed as national second-class protected wild animals. The top five mammals in relative abundance were *Muntiacus reevesi*, *Sus scrofa*, *Callosciurus erythraeus*, *Arctonyx collaris* and *Sciurotamias davidianus*, and the top five birds in relative abundance were *S. reevesii*, *P. macrolopha*, *Garrulus glandarius*, *Turdus hortulorum* and *Urocissa erythrorhyncha*. We also found evidence of intensive human activities in the reserve, which may have potential impacts on wildlife. This

收稿日期: 2018-06-13; 接受日期: 2018-09-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1200700)和环境保护部南京环境科学研究所基本科研业务专项(GYZX170308)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: zhangbw@ahu.edu.cn, lijiaqihao@163.com

study provides basic information on the species composition of terrestrial mammals and understory birds in Yaoluoping National Nature Reserve; it will form the foundation of future monitoring research and will provide data information to wildlife management and protection efforts.

Key words: Yaoluoping National Nature Reserve; camera-trapping; mammal; bird; biodiversity

鹞落坪国家级自然保护区(以下简称鹞落坪保护区)位于安徽省岳西县西北部(30°57'–31°06' N, 116°02'–116°11' E), 地处大别山脉南坡。保护区总面积123.0 km², 其中核心区21.2 km², 缓冲区28.4 km², 实验区73.4 km²。属北亚热带季风气候, 空气湿润, 气温较低, 雨量充沛, 年均气温15℃左右, 年均降水量为1,400–2,000 mm(李珍等, 2008)。保护区的主要植被类型随海拔而变化, 从低到高依次生长有灌木和次生林(400–1,000 m)、落叶林(800–1,100 m)、针阔混交林(900–1,200 m)、针叶林(1,200 m以上)(王松等, 2009)。

近年来对鹞落坪保护区的研究共报道鸟类113种(刘彬等, 2009; 李莉等, 2017)。但是对该区域兽类的研究一直未见报道。由于近年来鹞落坪保护区及周边区域生态旅游等活动日益频繁, 加之当地社区居民的其他经济活动, 对野生动物带来的潜在影响不断增加。为了解该保护区动物资源现状, 我们利用红外相机在此开展了为期4年的野生动物调查与监测, 以期获得大中型兽类和林下鸟类资源现状的第一手资料, 为保护区大中型兽类的管理和保护提供重要的数据基础。

1 研究方法

基于对鹞落坪保护区的长期观察, 根据所掌握的保护区内野生动物空间分布信息, 我们选择野生动物活动比较频繁的区域, 将红外相机按3 km × 3 km公里网格布设。根据保护区实际地形地貌特征和人类活动情况等, 每个网格布设1–3台红外相机。样方内布设多台相机时, 相机间隔250 m以上。为了提

高拍摄率, 将相机布设在动物频繁活动的区域, 如山脊、兽径、水源地和动物夜宿地等小生境, 尽量回避人类经常活动的区域。红外相机一般固定在树干上, 距离地面0.5–1.0 m, 镜头与地面保持平行, 拍摄区域避免阳光直射。相机工作模式设置为连拍3张, 拍摄时间间隔为15 s, 全天监测。

2014–2017年, 先后三次在鹞落坪保护区内布设红外相机(表1)。2014–2016年的秋冬季布设红外相机(SG-007型) 20台, 其中核心区布设了16台, 缓冲区1台, 实验区3台(图1)。2016年8–10月, 在保护区内野生动物活动的高发区域另布设红外相机12台(SG-007型)。2016年12月又在整个保护区范围内增加了40台红外相机(LTL-6210型)(2016.12–2017.12)(图1, 表1)。

回收照片后, 按相机编号建立文件夹, 导入相应相机所拍摄的照片, 筛选出有物种信息的独立有效照片, 确定物种信息和干扰信息等。有效照片的鉴定采用O'Brien等(2003)提出的独立有效照片标准: 即同一相机所拍摄的同一种物种在相隔30 min以上的照片确定为独立有效照片。鸟类物种的鉴定参考《中国鸟类野外手册》(约翰·马敏能等, 2000), 兽类参考《安徽兽类志》(王岐山, 1990)和《中国兽类野外手册》(Smith和解焱, 2009), 物种名称和分类系统分别参考《中国鸟类分类与分布名录(第2版)》(郑光美, 2011)和《中国哺乳动物多样性》(蒋志刚等, 2015)。物种保护级别及其他相关信息分别参考《国家重点保护野生动物名录》(<http://www.forestry.gov.cn>)、CITES附录(<http://www.cites.gov.cn/>)和IUCN红色名录(IUCN, 2016)。

表1 安徽鹞落坪国家级自然保护区红外相机布设次数和时间

Table 1 Camera-trapping numbers and times in Yaoluoping National Nature Reserve, Anhui Province

	相机型号 Camera type	数量 Number	监测时间 Monitoring time	海拔范围 Altitude range (m)
第一次 The first time	SG-007	20	2014.11–2015.1 2015.11–2016.1 2016.12–2017.2	1,101–1,407
第二次 The second time	SG-007	12	2016.8–2016.10	621–1,358
第三次 The third time	LTL-6210	40	2016.12–2017.12	425–1,622

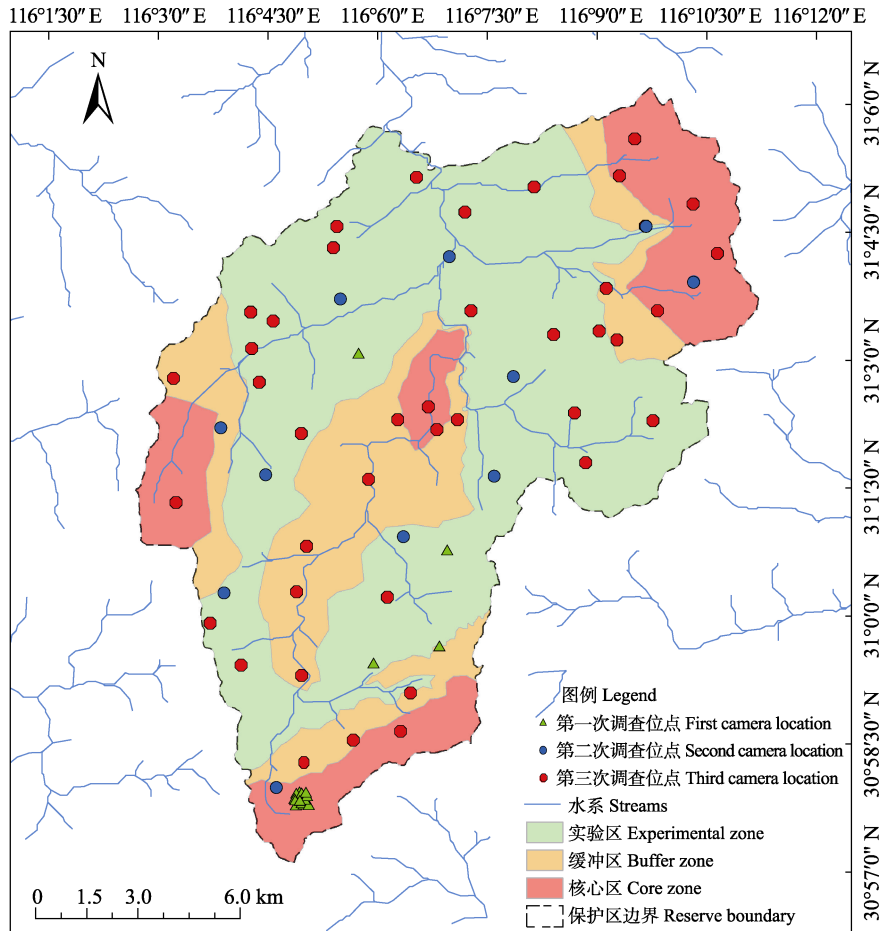


图1 安徽鹞落坪国家级自然保护区红外相机放置位点图

Fig. 1 Camera-trapping locations in Yaoluoping National Nature Reserve, Anhui Province

采用相对多度指数(relative abundance index, RAI)(O'Brien et al, 2003; 肖治术等, 2014)评估物种的相对种群数量。计算公式为: $RAI = P_j/N \times 100$, 其中, P_j 代表第 j 类($j = 1, 2, \dots, 24$)动物出现的独立有效照片数, N 为总有效相机工作日。

2 结果

2014–2017年先后布设72个相机位点, 除去人为干扰和恶劣天气等因素导致未能正常工作的相机位点6个, 共有66个相机位点正常工作, 累计监测16,658个相机工作日, 共获得独立有效照片2,142张, 其中兽类照片1,428张(占总数的66.7%), 鸟类照片206张(9.6%), 人类和家畜活动照片218张(10.2%), 未能鉴定出物种的照片290张(13.5%), 其中多为啮齿目和食虫目的小型兽类, 以及部分雀形目的鸟类。研究中共鉴定物种28种, 隶属8目18科, 其中兽类4目10科13种, 鸟类4目8科15种(附录1, 附

录2, 附录3)。

鉴定出的兽类物种中包括4种家畜。9种野生兽类中, 偶蹄目和食肉目各3种, 啮齿目2种, 兔形目1种。偶蹄目独立有效照片数最多(924张), 其次是啮齿目(284张), 兔形目最少(72张)。安徽麝(*Moschus anhuiensis*)为大别山特有种, 是国家一级重点保护野生动物, 在IUCN红色名录中被评估为“濒危(EN)”级, 猪獾(*Arctonyx collaris*)和果子狸(*Paguma larvata*)被列为“近危(NT)”, 而其余兽类均为“无危(LC)”。相对多度指数最高的5种兽类依次为小鹿(*Muntiacus reevesi*)、野猪(*Sus scrofa*)、赤腹松鼠(*Callosciurus erythraeus*)、猪獾和岩松鼠(*Sciurotamias davidianus*)。它们同时也是相机位点出现率排名前五的物种。

鉴定出的鸟类物种中, 雀形目的物种最多, 共5科10种。雀形目(100张)和鸡形目(92张)的独立有效照片数接近, 分别占鸟类独立有效照片总数的

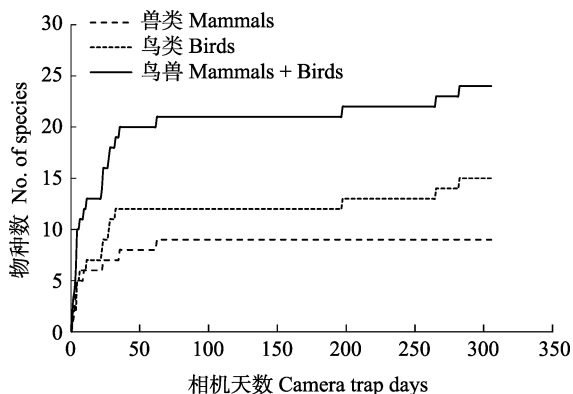


图2 红外相机所记录物种数随相机工作日的累计曲线

Fig. 2 Accumulative curve of species number with increasing camera trap days

48.5%和44.7%。白冠长尾雉(*Syrnaticus reevesii*)和勺鸡(*Pucrasia macrolopha*)为国家二级重点保护野生动物;在IUCN红色名录中,白冠长尾雉被列为“易危(VU)”,其他14种鸟类均为“无危(LC)”。相对多度指数最高的前5种鸟类依次为白冠长尾雉、勺鸡、松鸦(*Garrulus glandarius*)、灰背鸫(*Turdus hortulorum*)、红嘴蓝鹊(*Urocissa erythroryncha*),而相机位点出现率最高的鸟类依次为勺鸡、白冠长尾雉、红嘴蓝鹊、松鸦和画眉(*Garrulax canorus*)。

根据物种累计曲线中捕获物种数与有效相机日之间的关系,物种数量随着相机日的增加而快速增加,在第62个相机日后增速开始减缓,而在280个相机日后物种数不再增加(图2)。

3 讨论

据《安徽兽类志》记载,大别山区共分布有肉食动物10种,即狼(*Canis lupus*)、赤狐(*Vulpes vulpes*)、豺(*Cuon alpinus*)、貉(*Nyctereutes procyonoides*)、黄喉貂(*Martes flavigula*)、小灵猫(*Viverricula indica*)、食蟹獾(*Herpestes urva*)、豹(*Panthera pardus*)、豹猫(*Prionailurus bengalensis*)、黄鼬(*Mustela sibirica*)。而本研究仅发现了体型最小的黄鼬,未发现其他大、中型肉食动物。根据本课题组和其他研究人员对此区域的长期野外调查,以及对保护区工作人员和当地社区居民的走访,大别山地区的兽类在过去几十年间发生了巨大变化,这些大中型兽类在该地区可能已经灭绝,或种群数量处于极低水平。小鹿和野猪目前是鹞落坪保护区中兽类的优势物种,相对多度指数最高,且超过75%的相机位点

(分别为81.8%和77.3%)都拍摄到它们。安徽麝是大别山区特有的濒危兽类,本研究在两个相机位点上拍摄到3张安徽麝的独立有效照片,证实了在大别山南麓依然有安徽麝种群存在,但其独立有效照片数量尚不到小鹿的1%,说明其种群处于非常低的水平,建议保护区加大对这一物种的保护力度。

研究中拍摄到鸟类4目15种,均在近期对鹞落坪保护区鸟类报道的范围之内(刘彬等,2009;李莉等,2017)。本研究中发现的鸟类数较少,主要原因是红外相机适合拍摄林下活动的地栖性鸟类,如鸡形目、雀形目的鸫科、鸦科等类群,而对活动于林间和林冠的鸟类则难以记录(Tobler et al, 2009)。其次,本研究相机布设位置多选择兽类偏好的栖息环境(山脊、兽径、水源地、夜宿地等),而非鸟类偏好的栖息地。另外,研究中红外相机的拍摄时间侧重于秋冬季,对春夏季活动的鸟类记录不足,也是导致鸟类拍摄种类较少的一个原因。

由于保护区内的林场多归当地社区居民所有,加之近年来游客渐多,鹞落坪保护区的人为干扰相对较强,调查中拍摄到185张人类活动的照片(附录1)。另外,保护区还发现有家养动物的活动(附录1),牛、羊等圈养动物散养取食野生植物,与野生偶蹄类食草动物在生存空间及食物资源上产生直接竞争,可能会侵占有蹄类动物的营养生态位(初红军等,2008),不利于区域内濒危物种(安徽麝)的保护;同时,家犬和猫可能对保护区的啮齿类、食虫类和鸟类带来威胁。另外,家养动物进入保护区可能会传播疫病(洪起平等,2007),增加疾病传播潜在风险。因此,如何尽可能减少当地社区居民和家畜对野生动物的影响,值得研究者进一步深入研究。

致谢:本研究得到了鹞落坪国家级自然保护区管理局和安庆师范大学资源环境学院师生的无私帮助,在此一并致谢!

参考文献

- Chu HJ, Jiang ZG, Lan WX, Wang C, Tao YS, Jiang F (2008) Dietary overlap among kulan *Equus hemionus*, goitered gazelle *Gazella subgutturosa* and livestock. *Acta Zoologica Sinica*, 54, 941–954. (in Chinese with English abstract) [初红军, 蒋志刚, 兰文旭, 王臣, 陶永善, 蒋峰 (2008) 蒙古野驴、鹅喉羚和家畜的食物重叠. *动物学报*, 54, 941–954.]

- Hong QP, Ding P, Ding BY (2007) Investigation and Research of Natural Resources in Fengyang Mountain. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [洪起平, 丁平, 丁炳扬 (2007) 凤阳山自然资源考察与研究. 中国林业出版社, 北京.]
- IUCN (2016) The IUCN Red List of Threatened Species, Version 2015-4. <http://www.iucnredlist.org>. (accessed on 2016-07-25)
- Jiang ZG, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Feng ZJ, Zhou KY, Liu SY, Luo ZH, Li CW (2015) China's mammalian diversity. *Biodiversity Science*, 23, 351–364. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 马勇, 吴毅, 王应祥, 冯祚建, 周开亚, 刘少英, 罗振华, 李春旺 (2015) 中国哺乳动物多样性. *生物多样性*, 23, 351–364.]
- Li L, Cui P, Xu HG, Wan YQ, Yong F, Hou YX, Ma HH, Yu L (2017) A comparative study of bird species diversity in breeding season at Anhui Yaoluoping National Nature Reserve. *Chinese Journal of Wildlife*, 38, 52–62. (in Chinese with English abstract) [李莉, 崔鹏, 徐海根, 万雅琼, 雍凡, 侯银续, 马号号, 虞磊 (2017) 安徽鹞落坪繁殖季节鸟类物种组成比较研究. *野生动物学报*, 38, 52–62.]
- Li Z, Zhou ZZ, Wang WG, Shen SB (2008) The floristic analysis of vascular plants in Yaoluoping Nature Reserve from Anhui Province. *Journal of Biology*, 25(6), 26–30. (in Chinese with English abstract) [李珍, 周忠泽, 汪文革, 沈三宝 (2008) 安徽鹞落坪自然保护区维管植物区系分析. *生物学杂志*, 25(6), 26–30.]
- Liu B, Zhou LZ, Wang WG, Shen SB, Han DM (2009) Seasonal dynamics of the avian guild structure of mountain secondary forest in Dabieshan Mountain. *Zoological Research*, 30, 277–287. (in Chinese with English abstract) [刘彬, 周立志, 汪文革, 沈三宝, 韩德明 (2009) 大别山山地次生林鸟类群落集团结构的季节变化. *动物学研究*, 30, 277–287.]
- MacKinnon J, Phillipps K, He FQ (2000) A Field Guide to the Birds of China. Hunan Education Publishing House, Changsha. (in Chinese) [约翰·马敬能, 卡伦·菲利普斯, 何芬奇 (2000) 中国鸟类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- O'Brien TG, Kinnaird MF, Wibisono HT (2003) Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. *Animal Conservation*, 6, 131–139.
- Smith AT, Xie Y (2009) A Guide to the Mammals of China. Hunan Education Press, Changsha. (in Chinese) [Smith AT, 解焱 (2009) 中国兽类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Tobler MW, Carrillo-Percastegui SE, Powell G (2009) Habitat use, activity patterns and use of mineral licks by five species of ungulate in south-eastern Peru. *Journal of Tropical Ecology*, 25, 261–270.
- Wang QS (1990) The Mammal Fauna of Anhui. Anhui Science and Technology Publishing House, Hefei. (in Chinese) [王岐山 (1990) 安徽兽类志. 安徽科学技术出版社, 合肥.]
- Wang S, Bao FY, Mei BM, Ding SC (2009) Vertical distribution and community diversity of butterflies in Yaoluoping National Nature Reserve, Anhui, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20, 2262–2270. (in Chinese with English abstract) [王松, 鲍方印, 梅百茂, 丁仕超 (2009) 安徽鹞落坪国家级自然保护区蝶类的垂直分布及其群落多样性. *应用生态学报*, 20, 2262–2270.]
- Xiao ZS, Hu L, Wang X, Shang T, Zhu DH, Zhao ZL, Huang XQ (2014) Wildlife diversity after Wenchuan Earthquake: A case from Guangguangshan Valley of Longxi-Hongkou National Nature Reserve, Southwest China. *Biodiversity Science*, 22, 794–797. (in Chinese) [肖治术, 胡力, 王翔, 尚涛, 朱大海, 赵志龙, 黄小群 (2014) 汶川地震后鸟兽资源现状: 以都江堰光光山峡谷区为例. *生物多样性*, 22, 794–797.]
- Zheng GM (2011) A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China, 2nd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2011) 中国鸟类分类与分布名录, 第2版. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 蒋学龙 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 利用红外相机在鹞落坪国家级自然保护区拍摄到的兽类和鸟类名录

Appendix 1 List of mammals and birds recorded by camera-trapping in Yaoluoping National Nature Reserve
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018166-1.pdf>

附录2 鹞落坪国家级自然保护区红外相机拍摄的重要兽类和鸟类照片

Appendix 2 Important mammals and birds recorded by camera-trapping in the Yaoluoping National Nature Reserve
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018166-2.pdf>

附录3 鹞落坪国家级自然保护区红外相机拍摄的野生兽类和鸟类物种坐标记录

Appendix 3 Coordinate record of wild mammals and birds recorded by camera-trapping in the Yaoluoping National Nature Reserve
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018166-3.xlsx>

周磊, 万雅琼, 洪欣, 张恒, 钱立富, 王陈成, 孔政, 赵凯, 李佳琦, 张保卫. 利用红外相机技术对安徽省鹞落坪国家级自然保护区大中型兽类及林下鸟类的调查. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1338-1342.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018166>

附录1 利用红外相机在鹞落坪国家级自然保护区拍摄到的兽类和鸟类名录

Appendix 1 List of mammals and birds recorded by camera-trapping in Yaoluoping National Nature Reserve

物种 Species	独立有效照 片数 No. of independent photos	拍摄位点数量 No. of sites	相对多度指数 Relative abundance index	保护级别 Protection category
哺乳纲 MAMMALIA				
食肉目 Carnivora				
I 鼬科 Mustelidae				
1. 黄鼬 <i>Mustela sibirica</i>	8	3 (2 0 1)	0.048 (0.117 0 0.04)	LC
2. 猪獾 <i>Arctonyx collaris</i>	121	21 (7 2 12)	0.726 (0.728 1.499 0.562)	NT
II 灵猫科 Viverridae				
3. 果子狸 <i>Paguma larvata</i>	19	8 (2 1 5)	0.114 (0.056 0.136 0.129)	NT
鲸偶蹄目 Cetartiodactyla				
III 猪科 Suidae				
4. 野猪 <i>Sus scrofa</i>	403	51 (14 10 27)	2.409 (4.522 6.26 1.569)	LC
IV 鹿科 Cervidae				
5. 小麂 <i>Muntiacus reevesi</i>	518	54 (15 10 29)	3.109 (2.837 6.812 2.968)	LC
V 麝科 Moschidae				
6. 安徽麝 <i>Moschus anhuiensis</i>	3	2 (1 0 1)	0.024 (0.842 0 0.008)	I EN Appendix II
啮齿目 Rodentia				
VI 松鼠科 Sciuridae				
7. 赤腹松鼠 <i>Callosciurus erythraeus</i>	190	30 (12 0 18)	1.141 (1.854 0 1.001)	LC
8. 岩松鼠 <i>Sciurotamias davidianus</i>	94	13 (7 0 6)	0.564 (1.516 0 0.348)	LC
兔形目 Lagomorpha				

周磊, 万雅琼, 洪欣, 张恒, 钱立富, 王陈成, 孔政, 赵凯, 李佳琦, 张保卫. 利用红外相机技术对安徽省鹞落坪国家级自然保护区大中型兽类及林下鸟类的调查. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1338–1342.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018166>

物种 Species	独立有效照 片数 No. of independent photos	拍摄位点数量 No. of sites	相对多度指数 Relative abundance index				保护级别 Protection category
VII 兔科 Leporidae							
9. 蒙古兔 <i>Lepus tolai</i>	72	11	(5	0	6)	0.432 (1.126 0 0.259)	LC
鸟纲 AVES							
鸽形目 Columbiformes							
I 鸽鸠科 Columbidae							
1. 山斑鸠 <i>Streptopelia orientalis</i>	13	4	(0	0	4)	0.078 (0 0 0.105)	LC
雀形目 Passeriformes							
II 鸫科 Turdidae							
2. 虎斑地鸫 <i>Zoothera dauma</i>	10	6	(3	0	3)	0.060 (0.14 0 0.04)	LC
3. 灰背鸫 <i>Turdus hortulorum</i>	18	2	(0	0	2)	0.108 (0 0 0.146)	LC
4. 斑鸫 <i>Turdus eunomus</i>	1	1	(1	0	0)	0.006 (0.028 0 0)	LC
5. 紫啸鸫 <i>Myophonus caeruleus</i>	2	1	(0	0	1)	0.012 (0 0 0.056)	LC
III 鹟科 Muscipida							
6. 红胁蓝尾鹟 <i>Tarsiger cyanurus</i>	1	1	(1	0	0)	0.006 (0.028 0 0)	LC
IV 山雀科 Paridae							
7. 大山雀 <i>Parus major</i>	6	2	(0	0	2)	0.036 (0 0 0.049)	LC
V 鸦科 Corvidae							
8. 红嘴蓝鹊 <i>Urocissa erythroryncha</i>	14	11	(3	0	8)	0.084 (0.084 0 0.089)	LC
9. 松鸦 <i>Garrulus glandarius</i>	32	9	(7	0	2)	0.192 (0.787 0 0.032)	LC
VI 画眉科 Timaliidae							
10. 棕颈钩嘴鹛 <i>Poma torhinus ruficollis</i>	1	1	(0	0	1)	0.006 (0 0 0.008)	LC

周磊, 万雅琼, 洪欣, 张恒, 钱立富, 王陈成, 孔政, 赵凯, 李佳琦, 张保卫. 利用红外相机技术对安徽省鹞落坪国家级自然保护区大中型兽类及林下鸟类的调查. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1338-1342.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018166>

物种 Species	独立有效照片数 No. of independent photos	拍摄位点数量 No. of sites			相对多度指数 Relative abundance index			保护级别 Protection category		
11. 画眉 <i>Garrulax canorus</i>	15	7	(6	0	1)	0.090	(0.356	0	0.016)	LC
鸛形目 Piciformes										
VII 啄木鸟科 Picidae										
12. 灰头绿啄木鸟 <i>Picus canus</i>	1	1	(0	0	1)	0.006	(0	0	0.016)	LC
鸡形目 Galliformes										
VIII 雉科 Phasianidae										
13. 环颈雉 <i>Phasianus colchicus</i>	1	1	(0	0	1)	0.006	(0	0	0.016)	LC
14. 勺鸡 <i>Pucrasia macrolopha</i>	32	15	(7	0	8)	0.192	(0.337	0	0.129)	II LC
15. 白冠长尾雉 <i>Syrnaticus reevesii</i>	59	10	(0	3	7)	0.354	(0	0.817	0.429)	II VU
其他 Others										
人 Human	185									
家犬 Dog	1									
家猫 Cat	12									
家羊 Goat	18									
家牛 Cow	2									

括号内数字分别为第 1, 2, 3 次的的数据。

Numbers in brackets are data of the first, second, third time

I, II 分别代表 I、II 级重点保护野生动物; LC, EN, VU 和 NT 分别代表 IUCN 红色名录中的无危, 濒危, 易危和近危; Appendix II 代表 CITES 附录 II 物种。I and II, first Class and second Class National Key Protected Animals. LC, Least Concern; EN, Endangered; VU, Vulnerable; NT, Near Threatened. Appendix II, CITES Appendix II.

周磊, 万雅琼, 洪欣, 张恒, 钱立富, 王陈成, 孔政, 赵凯, 李佳琦, 张保卫. 利用红外相机技术对安徽省鹞落坪国家级自然保护区大中型兽类及林下鸟类的调查. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1338–1342.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018166>



安徽麝 *Moschus anhuiensis*



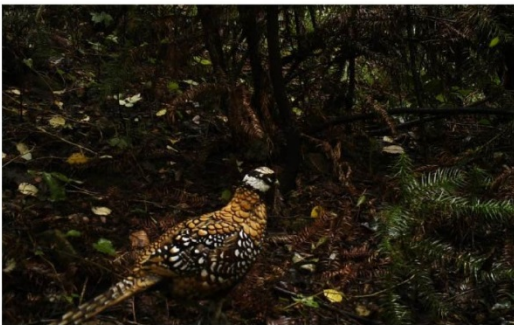
野猪 *Sus scrofa*



小鹿 *Muntiacus reevesi*



猪獾 *Arctonyx collaris*



白冠长尾雉 *Syrnaticus reevesii*



勺鸡 *Pucrasia macrolopha*

附录2 鹞落坪国家级自然保护区红外相机拍摄的重要兽类和鸟类照片

Appendix 2 Important mammals and birds recorded by camera-trapping in the Yaoluoping National Nature Reserve



•红外相机观测专栏•

运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性

李斌强¹ 李鹏映¹ 杨家伟² 字红军² 李兴权² 段锡焕² 罗旭^{1*}

1 (西南林业大学西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室, 昆明 650224)

2 (云南巍山青华绿孔雀自然保护区管护局, 云南巍山 614700)

摘要: 2016年10月至2017年9月, 作者在云南巍山青华绿孔雀自然保护区的核心区和缓冲区的28个监测位点布设红外相机, 累计监测6,377台日, 共获得独立有效照片1,692张, 其中兽类563张, 鸟类1,129张。鉴定出71种鸟类和兽类, 其中兽类13种, 分属5目11科; 鸟类58种, 分属9目23科。国家一级重点保护动物有2种, 即黑颈长尾雉(*Syrnaticus humiae*)和林麝(*Moschus berezovskii*); 国家二级重点保护动物有7种, 分别是黄喉貂(*Martes flavigula*)、松雀鹰(*Accipiter virgatus*)、普通鵟(*Buteo japonicus*)、白腹锦鸡(*Chrysolophus amherstiae*)、白鹇(*Lophuar nycthemera*)、领角鸮(*Otus lettia*)和灰林鸮(*Strix aluco*)。在《中国脊椎动物红色名录》中, 1种被评估为极危, 3种被评估为易危。CITES附录I收录的有1种, 附录II收录的有7种。物种相对丰富度最高的是黑领噪鹛(*Garrulax pectoralis*, 5.68), 其次是赤腹松鼠(*Callosciurus erythraeus*, 2.81)、赤鹿(*Muntiacus muntjak*, 1.68)。本次物种调查结果可反映本保护区大、中型兽类和地栖性鸟类本底, 为保护区管理和野生动物长期监测提供了数据。

关键词: 鸟兽多样性; 红外相机; 物种丰富度

Wildlife monitoring in Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve using infrared cameras, Yunnan Province

Binqiang Li¹, Pengying Li¹, Jiawei Yang², Hongjun Zi², Xingquan Li², Xihuan Duan², Xu Luo^{1*}

1 Key Laboratory for Forest Resources Conservation and Utilization in the Southwest Mountains of China, Ministry of Education, Southwest Forestry University, Kunming 650224

2 Management Bureau of Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve, Weishan, Yunnan 614700

Abstract: Between October 2016 and September 2017, we deployed 28 infrared cameras (6,377 camera trapping days) to detect bird and mammal species in Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve. We obtained 1,692 effective images (mammals $n = 563$; birds $n = 1,129$). From these images, we identified 13 mammal species from 5 orders and 11 families and 58 bird species from 9 orders and 23 families. Among these, *Syrnaticus humiae* and *Moschus berezovskii* are listed as national first-class protected species, and *Martes flavigula*, *Accipiter virgatus*, *Buteo japonicus*, *Chrysolophus amherstiae*, *Lophuar nycthemera*, *Otus lettia*, *Strix aluco* are listed as national second-class protected species. Of the species identified, 1 species is evaluated as Critically Endangered (CR) and 3 species as Vulnerable (VU) in the Red List of China's Vertebrate. One species is also listed in Appendix I and 7 other species are in Appendix II of CITES. We found that *Garrulax pectoralis* had the highest relative abundance (5.68 effective images per 100 trap-days), followed by *Callosciurus erythraeus* (2.81) and *Muntiacus muntjak* (1.68). Our results provided the first record of large and mid-sized mammals and terrestrial birds from this nature reserve, thereby providing primary baseline data of wildlife resources for future management of biodiversity.

Key words: wildlife biodiversity; infrared camera; species richness

收稿日期: 2018-06-12; 接受日期: 2018-10-26

基金项目: 云南省野生动植物极小种群物种保护项目(2016)和西南林业大学林学一流学科(51600625)资助

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: luoxu@swfu.edu.cn

巍山青华绿孔雀自然保护区位于云南省大理白族自治州青华乡境内, 1988年成立时为州级, 1997年晋升为省级, 是我国唯一以绿孔雀(*Pavo muticus*)为单一保护对象的自然保护区。保护区总面积1,000 ha, 地势北高南低, 最高海拔2,010 m, 最低海拔1,240 m, 年降水量偏少, 为半湿润和半干旱气候。植被类型可分为暖性针叶林、常绿阔叶林和稀树灌木草3种类型, 次生林较多(云南省林业调查规划院, 2017)^①。龙凤河和中窑河流经保护区, 出保护区后注入黑惠江, 河流汇水区属于小湾电站淹没区。由于历史原因, 保护区中尚有村庄, 周边有大面积的耕地和经济林, 保护区鸟兽资源本底资料较为缺乏。我们于2016年10月至2017年9月利用红外相机开展鸟类和兽类资源调查, 以期保护区野生动物资源管理提供基础数据, 加快保护区的建设和重点物种的保护。

1 方法

1.1 红外相机布设与数据采集

由于保护区的实验区主要是村落和农田, 人为干扰较大, 因此仅在缓冲区和核心区布设红外相机。按植被类型在针叶林布设10台、灌丛6台、阔叶林12台, 相机间距原则上大于100 m (图1)。由于保护区较为干旱, 布设时重点选择有溪流的山箐两侧, 或者是植被茂密的林下。相机捆绑在树干上, 保持镜头基本与地面平行。在固定之前要进行拍摄区域调试, 根据需要适当修剪拍摄范围内的杂草和枯枝, 避免影响相机触发。使用猎科LTL6210MC型红外相机, 模式设置为“拍照 + 录像”(触发后拍3张照片 + 录制30 s视频), 触发间隔30 s, 灵敏度“中”, 图像尺寸“1440 × 1080”。内存卡和电池每3个月更换1次。相机布设时间自2016年10月至2017年9月, 核心区布设18台, 缓冲区布设10台。

1.2 数据分析

红外相机拍摄到的鸟类和兽类主要参考《中国鸟类野外手册》(马敬能等, 2000)和《中国兽类野外手册》(Smith和解焱, 2009)进行鉴定。动物名称和分类系统参照《中国鸟类分类与分布名录(第三版)》(郑光美, 2017)和《中国哺乳动物多样性》(蒋志刚

等, 2015)。保护级别的界定参照《国家重点保护野生动物名录》(<http://www.forestry.gov.cn>)、CITES附录(<http://www.cites.gov.cn/>)、《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016)等。

独立有效照片与物种相对丰富度参照O'Brien等(2003)的标准, 在同一台相机中, 超过30 min后所拍摄的同一种照片或视频视为独立有效照片。物种相对丰富度(RAI)为每100个有效相机日内拍摄第*i*种的所有独立有效照片数, 计算公式如下:

$$RAI = A_i/N \times 100$$

式中, A_i 为红外相机所拍摄到第*i*种($i = 1, 2, 3, \dots, 71$)鸟类或兽类的独立照片数, N 为所有相机位点的总相机日。

在调查过程中, 啮齿类大多难以识别, 以“仓鼠科或鼠科”表示该类群, 合并为1个类群计算。为满足肖治术等(2014)提出的森林野生动物监测网格为1 km²或者1 ha的规范要求, 我们将同一植被类型中间距小于100 m的两台相机所拍摄到的照片合并, 视为同一台相机拍摄(仅2组, 相机编号为9-10号, 15-27号), 再进行有效照片和丰富度计算, 以避免重复取样。

2 结果

在28个监测位点上, 核心区的18台相机累计工作4,226台日, 缓冲区的10台相机累计工作2,151台日, 合计6,377台日(附录1)。调查共获得独立有效照片1,692张, 其中兽类563张, 鸟类1,129张。共鉴定出71种鸟类和兽类(不含啮齿类鼠科和仓鼠科物种), 其中鸟类58种, 分属9目23科; 兽类13种, 分属5目11科(附录2)。雀形目鸟类最多, 达42种, 占所鉴定鸟种总数(58种)的72.41%。

拍摄到的动物中(附录3), 国家一级重点保护动物有黑颈长尾雉(*Syrnaticus humiae*)和林麝(*Moschus berezovskii*) 2种, 国家二级重点保护动物有黄喉貂(*Martes flavigula*)、松雀鹰(*Accipiter virgatus*)、普通鵟(*Buteo japonicus*)、白腹锦鸡(*Chrysolophus amherstiae*)、白鹇(*Lophuar nycthemera*)、领角鸮(*Otus lettia*)和灰林鸮(*Strix aluco*) 7种。在《中国脊椎动物红色名录》中, 1种被列为“极危(CR)”, 即林麝; 3种被列为“易危(VU)”, 即豹猫(*Prionailurus bengalensis*)、小麂(*Muntiacus reevesi*)和黑颈长尾雉; 8种被列为“近危(NT)”, 即黄喉貂、果子狸(*Paguma*

① 云南省林业调查规划院 (2017) 巍山青华绿孔雀省级自然保护区总体规划(2017-2026).

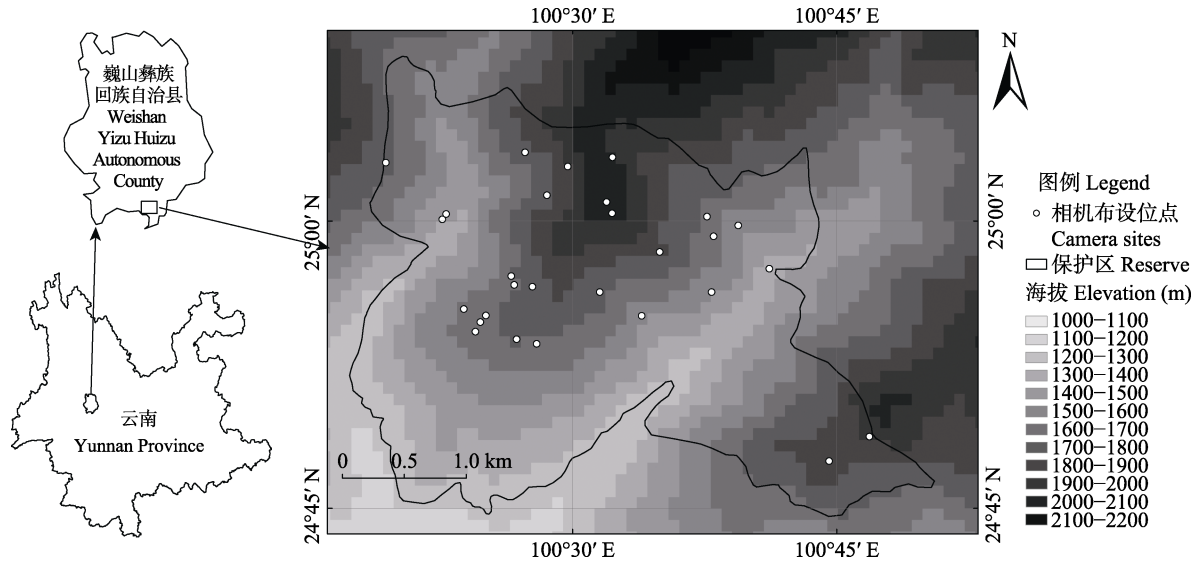


图1 巍山青华绿孔雀自然保护区红外相机监测位点图

Fig. 1 Camera-trapping sites in Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve

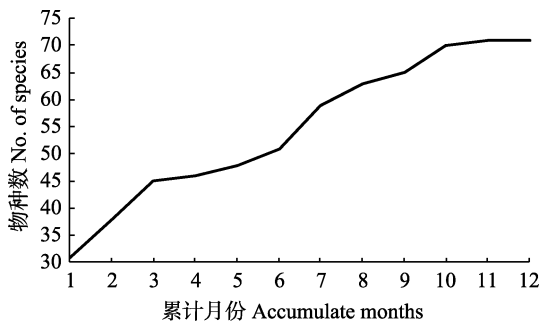


图2 物种伴随月份累计曲线图

Fig. 2 Cumulative curve of detected species with increasing months

larvata)、赤麂(*Muntiacus muntjak*)、云南兔(*Lepus comus*)、白腹锦鸡、领角鸮、灰林鸮和黑胸鸮(*Turdus dissimilis*)。CITES附录I收录的1种, 即黑颈长尾雉; CITES附录II收录的7种, 即北树鼩(*Tupaia belangeri*)、林麝、豹猫、松雀鹰、普通鳶、领角鸮和灰林鸮。

物种相对丰富度最高的是黑领噪鹛(*Garrulax pectoralis*, 5.68), 其次是赤腹松鼠(*Callosciurus erythraeus*, 2.81)、赤麂(1.68)、黑胸鸮(1.44)、白腹锦鸡(1.44)、紫啸鸫(*Myophonus caeruleus*, 1.41)、北树鼩(1.05)和山斑鸠(*Streptopelia orientalis*, 0.94)。

从物种累积曲线图可以看出, 曲线开始上升较快, 当相机摆放时间到达10个月后保护区内鸟类和兽类物种数趋于饱和(图2)。另外, 还拍到迁徙鸟类7种, 分别是红翅凤头鹛(*Clamator coromandus*)、普通鳶、黑卷尾(*Dicrurus macrocercus*)、灰卷尾(*D.*

leucophaeus)、灰背鸫(*Turdus hortulorum*)、北红尾鸫(*Phoenicurus leucopterus*)和灰鹊鸂(*Motacilla cinerea*)。

3 讨论

云南省地形地貌复杂, 已建立自然保护区160个, 以森林生态类型保护区居多, 占93.7% (www.ynlu.gov.cn)。红外相机技术针对森林中的大中型兽类和地栖性鸟类具有独特的优势, 而这些类群通过传统调查方法往往很难获取数据(李晟等, 2014; 张倩雯等, 2018), 因此在云南开展动物资源本底调查和监测工作, 红外相机技术的运用显得尤为必要。截至2017年6月, 云南省有14个地点进行过红外相机鸟兽调查(朱淑怡等, 2017), 此后又增加了西双版纳纳龙州级自然保护区(王巧燕等, 2018)、西双版纳尚勇自然保护区(白德凤等, 2018)、碧罗雪山3个(房以好等, 2018)。目前使用红外相机技术进行过动物资源调查的保护区仅占全省总数约10%, 且多集中在云南西部和南部, 滇东、滇中地区相关研究报道较少。因此, 应加强红外相机技术在云南省自然保护区动物资源调查中的普及, 尤其是在森林生态和野生动物类型的保护区。

巍山青华绿孔雀自然保护区自成立以来, 鸟兽多样性信息一直较缺乏, 本次调查反映了本保护区大中型兽类和地栖型鸟类的多样性本底水平。与巍山青华绿孔雀省级自然保护区总体规划(云南省林

业调查规划院, 2017) 相较, 此次调查为保护区新增国家一级重点保护动物2种, 即黑颈长尾雉和林麝, 新增国家二级重点保护动物4种, 即松雀鹰、普通鵟、领角鸮、灰林鸮。本次调查没有涵盖实验区, 是因为实验区多为农田生境, 农田鸟类、啮齿目和翼手目兽类可能是主要动物类群, 红外相机技术对这些类群的调查效果并不理想, 因此建议保护区下一步工作利用样线法(周放, 1986)、样点法(Zou et al, 2012)、陷阱法(谢文华等, 2014)等调查方法对鸟兽多样性本底数据进行补充。另外, 由于林冠层和地面层的鸟兽物种组成可能有较大差异(房以好等, 2018), 将来还需加强阔叶林和针叶林林冠层的鸟兽资源调查。

云南大鼯鼠(*Petaurista yunnanensis*)曾作为霜背大鼯鼠(*P. philippensis*)的亚种, 通过分子和形态学分析后, 云南大鼯鼠被提升为独立的种(Yu et al, 2006; Li et al, 2013), 根据《中国脊椎动物红色名录》, 该物种被评估为“资料缺乏(DD)”, 云南大鼯鼠主要分布于云南西南部, 目前的确切分布点位于盈江、腾冲、贡山和梁河等怒江流域(Li et al, 2012)。本次调查证实云南大鼯鼠在澜沧江流域也有分布, 为该物种的分布提供了新的信息。

绿孔雀作为青华保护区的主要保护对象, 本次调查并未发现。保护区紧邻黑惠江, 属于澜沧江水系, 20世纪90年代绿孔雀在青华的种群数量尚且可观(文贤继等, 1995)。近期一次全面的绿孔雀种群调查发现, 云南省以往有分布的县中60%的县绿孔雀均已消失, 其中就包括巍山、云县、南涧、凤庆、临沧和双江等澜沧江流域的各县(Kong et al, 2018), 虽然在景东、景谷等县还有发现, 但显然绿孔雀种群在澜沧江流域已呈小家族点状隔离分布(滑荣等, 2018), 亟待保护。

致谢: 云南工商学院洪磊制作红外相机布设图, 西南林业大学高歌、陈熙、李万德、王官胜、冯莹莹、曾卫协助鉴定红外相机照片, R. Will Stein博士帮忙修改英文摘要, 野外工作得到大理州林业局的支持和巍山县林业局的支持, 在此一并表示感谢!

参考文献

Bai DF, Chen Y, Li JS, Tao Q, Wang LF, Piao Y, Shi K (2018) Mammal diversity in Shangyong Nature Reserve, Xishu-

angbanna, Yunnan Province. *Biodiversity Science*, 26, 75–78. (in Chinese with English abstract) [白德凤, 陈颖, 李俊松, 陶庆, 王利繁, 飘优, 时坤 (2018) 西双版纳尚勇自然保护区哺乳动物物种多样性. *生物多样性*, 26, 75–78.]

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.]

Hua R, Cui DY, Liu J, Zhang J, Huang S, Guo G, Luo AD (2018) The status and distribution of green peafowl (*Pavo muticus imperator*) in China. *Chinese Journal of Wildlife*, 39, 681–684. (in Chinese with English abstract) [滑荣, 崔多英, 刘佳, 张敬, 黄松, 郭光, 罗爱东 (2018) 中国绿孔雀种群现状调查. *野生动物学报*, 39, 681–684.]

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 ZG, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Feng ZJ, Zhou KY, Liu SY, Luo ZH, Li CW (2015) China's mammalian diversity. *Biodiversity Science*, 23, 351–364. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 马勇, 吴毅, 王应祥, 冯祚建, 周开亚, 刘少英, 罗振华, 李春旺 (2015) 中国哺乳动物多样性. *生物多样性*, 23, 351–364.]

Kong DJ, Wu F, Shan PF, Gao JY, Luo WX, Yang XJ (2018) Status and distribution changes of the endangered green peafowl (*Pavo muticus*) in China over the past three decades (1990s–2017). *Avian Research*, 9, 18.

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 S, Yu FH, Lü XF (2012) Cranial morphometric study of four giant flying squirrels (*Petaurista*) (Rodentia: Sciuridae) from China. *Zoological Research*, 33, 119–126.

Li S, Yu FH, Yang QS (2013) Molecular phylogeny and

- biogeography of *Petaurista* inferred from the cytochrome *b* gene, with implications for the taxonomic status of *P. caniceps*, *P. sybilla*. *PLoS ONE*, 8, e70461.
- MacKinnon J, Phillipps K, He FQ (2000) A Field Guide to the Birds of China. Hunan Education Publishing House, Changsha. (in Chinese) [约翰·马敬能, 卡伦·菲利普斯, 何芬奇 (2000) 中国鸟类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- O'Brien TG, Kinnaird MF, Wibisono HT (2003) Crouching tigers, hidden prey: Sumatran and prey populations in a tropical forest landscape. *Animal Conservation*, 6, 131–139.
- Smith AT, Xie Y (2009) A Guide to the Mammals of China. Hunan Education Publishing House, Changsha. (in Chinese) [Smith AT, 解焱 (2009) 中国兽类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Wang QY, He YC, Zhang MX, Song JP, Tao YX, Zhang ZY, Yan ZJ, Yang HP (2018) Application of infrared cameras for wildlife surveys in the Bulong Nature Reserve, Xishuangbanna Prefecture, Yunnan Province. *Acta Theriologica Sinica*, 38, 513–518. (in Chinese with English abstract) [王巧燕, 何有才, 张明霞, 宋军平, 陶永祥, 张忠员, 岩章尖, 杨鸿培 (2018) 利用红外相机技术调查云南布龙州级自然保护区野生动物. 兽类学报, 38, 513–518.]
- Wen XJ, Yang XJ, Han LX, Yang L, Wang WM (1995) Investigations on the current status of the distribution of green peafowl in China. *Chinese Biodiversity*, 3, 46–51. (in Chinese with English abstract) [文贤继, 杨晓君, 韩联宪, 杨岚, 王为民 (1995) 绿孔雀在中国的分布现状调查. 生物多样性, 3, 46–51.]
- Xiao ZS, Li XH, Wang XZ, Zhou QH, Quan RC, Shen XL, Li S (2014) Developing camera-trapping protocols for wildlife monitoring in Chinese forests. *Biodiversity Science*, 22, 704–711. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 李欣海, 王学志, 周岐海, 权锐昌, 申小莉, 李晟 (2014) 探讨我国森林野生动物红外相机监测规范. 生物多样性, 22, 704–711.]
- Xie WH, Yang XF, Li JN, Tao SL, Xiao ZS (2014) A preliminary study of the biodiversity of ground-dwelling small mammals in Badagongshan National Nature Reserve, Hunan Province. *Biodiversity Science*, 22, 216–222. (in Chinese with English abstract) [谢文华, 杨锡福, 李俊年, 陶双伦, 肖治术 (2014) 八大公山自然保护区地栖性小兽多样性初步研究. 生物多样性, 22, 216–222.]
- Yu F, Pang J, Kilpatrick CW, Mcguire PM, Wang Y, Lu S (2006) Phylogeny and biogeography of the *Petaurista philippensis* complex (Rodentia: Sciuridae), inter- and intraspecific relationships inferred from molecular and morphometric analysis. *Molecular Phylogenetics & Evolution*, 38, 755–766.
- Zhang QW, Gong YN, Song XJ, Wang XC, Yang CT, Shu ZF, Zou FS (2018) Comparing the effectiveness of camera trapping to traditional methods for biodiversity surveys of forest birds. *Biodiversity Science*, 26, 229–237. (in Chinese with English abstract) [张倩雯, 龚粤宁, 宋相金, 王新财, 杨昌腾, 束祖飞, 邹发生 (2018) 红外相机技术与其他几种森林鸟类多样性调查方法的比较. 生物多样性, 26, 229–237.]
- 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.]
- Zhou F (1986) On the breeding bird communities of Dinghushan. *Tropical and Subtropical Forest Ecosystem*, 4, 79–91. (in Chinese with English abstract) [周放 (1986) 鼎湖山森林繁殖鸟类群落的研究. 热带亚热带森林生态系统研究, 4, 79–91.]
- 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, 1114–1122. (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.]
- Zou FS, Chen GZ, Yang QF, Li YD (2012) Bird species richness along an elevational gradient in forest at Jianfengling, Hainan Island, China. *Zoological Studies*, 51, 362–371.

(责任编辑: 蒋学龙 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 巍山青华绿孔雀自然保护区红外相机位点信息

Appendix 1 The longitude and latitude coordinates of infrared cameras in Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018164-1.pdf>

附录2 巍山青华绿孔雀自然保护区鸟兽物种名录

Appendix 2 Bird and mammal species detected in Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018164-2.pdf>

附录3 巍山青华绿孔雀自然保护区部分动物照片

Appendix 3 Some wildlife species in Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2018164-3.pdf>

李斌强, 李鹏映, 杨家伟, 字红军, 李兴权, 段锡焕, 罗旭. 运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1343–1347.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018164>

附录1 巍山青华绿孔雀自然保护区红外相机位点信息

Appendix 1 The longitude and latitude coordinates of infrared cameras in Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve

相机号 Camera codes	野外 Field codes	相机位点 Camera sites	海拔 Altitude (m)	相机所属功能分区 Core area/buffer zone	生境 Habitat	有效工作日 Efficient camera day (d)	累计工作日 Accumulated camera day (d)
		Longitude (E)	Latitude (N)				
1	西 2	100°11'	25°00'	1,668	缓冲区 Buffer zone	针叶林 Coniferous forest	25 88
2	17 号	100°11'	25°00'	1,426	核心区 Core area	针叶林 Coniferous forest	78 213
3	31 号	100°11'	25°00'	1,393	核心区 Core area	阔叶林 Broad-leaved forest	20 116
4	6 号	100°12'	24°59'	1,662	核心区 Core area	阔叶林 Broad-leaved forest	36 320
5	5 号	100°12'	24°59'	1,662	核心区 Core area	阔叶林 Broad-leaved forest	27 329
6	西 1	100°11'	24°59'	1,611	核心区 Core area	针叶林 Coniferous forest	0 155
7	4 号	100°12'	24°59'	1,627	核心区 Core area	针叶林 Coniferous forest	35 270
8	1 号	100°12'	24°59'	1,633	核心区 Core area	针叶林 Coniferous forest	71 329
9	2 号	100°12'	24°59'	1,617	核心区 Core area	针叶林 Coniferous forest	65 329
10	3 号	100°12'	24°59'	1,705	核心区 Core area	针叶林 Coniferous forest	61 301
11	12 号	100°12'	25°00'	1,760	核心区 Core area	阔叶林 Broad-leaved forest	34 226
12	13 号	100°12'	25°00'	1,746	核心区 Core area	阔叶林 Broad-leaved forest	60 268
13	14 号	100°12'	25°00'	1,746	核心区 Core area	阔叶林 Broad-leaved forest	7 268
14	7 号	100°12'	24°59'	1,708	缓冲区 Buffer zone	阔叶林 Broad-leaved forest	27 283
15	8 号	100°12'	24°59'	1,686	缓冲区 Buffer zone	针叶林 Coniferous forest	58 283
16	9 号	100°12'	24°59'	1,734	核心区 Core area	阔叶林 Broad-leaved forest	26 329
17	26 号	100°12'	24°59'	1,796	核心区 Core area	灌丛 Scrub	45 149
18	21 号	100°13'	25°00'	1,670	核心区 Core area	灌丛 Scrub	76 150
19	22 号	100°13'	24°59'	1,600	核心区 Core area	灌丛 Scrub	25 97
20	23 号	100°13'	24°59'	1,523	核心区 Core area	灌丛 Scrub	28 148
21	24 号	100°13'	24°59'	1,497	缓冲区 Buffer zone	灌丛 Scrub	52 148
22	25 号	100°13'	24°59'	1,697	缓冲区 Buffer zone	灌丛 Scrub	37 88
23	27 号	100°12'	24°59'	1,556	缓冲区 Buffer zone	阔叶林 Broad-leaved forest	69 117
24	19 号	100°12'	25°00'	2,014	缓冲区 Buffer zone	阔叶林 Broad-leaved forest	28 306
25	18 号	100°12'	25°00'	2,012	缓冲区 Buffer zone	阔叶林 Broad-leaved forest	12 239
26	20 号	100°12'	25°00'	2,003	核心区 Core area	阔叶林 Broad-leaved forest	20 229
27	10 号	100°13'	24°58'	1,856	缓冲区 Buffer zone	针叶林 Coniferous forest	81 329
28	11 号	100°13'	24°59'	1,876	缓冲区 Buffer zone	针叶林 Coniferous forest	33 270

李斌强, 李鹏映, 杨家伟, 字红军, 李兴权, 段锡焕, 罗旭. 运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1343–1347.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018164>

附录2 巍山青华绿孔雀自然保护区鸟兽物种名录

Appendix 2 Bird and mammal species detected in Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve

物种 Species	保护级别 Conservation status	CITES 附录 CITES Appendix	中国脊椎动物 红色名录* Red List of China's Vertebrates	独立有效照片 数 No. of independent images	相对丰富度指数 Relative abundance index	相机号 Camera codes
鸟纲 AVES						
I 鸡形目 GALLIFORMES						
1 雉科 Phasianidae						
(1)环颈山鹧鸪 <i>Arborophila torqueola</i>			LC	9	0.14	26、27
(2)白鹇 <i>Lophuar nycthemera</i>	II		LC	23	0.36	20、27、28
(3)黑颈长尾雉 <i>Syrnaticus humiae</i>	I	附录 I	VU	25	0.39	3、8、10、13、14、 24、25
(4)白腹锦鸡 <i>Chrysolophus amherstiae</i>	II		NT	92	1.44	2、4、8–11、14、 16–20、22、23、26、 27
II 鸽形目 COLUMBIFORMES						
2 鸠鸽科 Columbidae						
(5)山斑鸠 <i>Streptopelia orientalis</i>			LC	60	0.94	10、13、19、23、 27
(6)珠颈斑鸠 <i>Streptopelia chinensis</i>			LC	1	0.02	7、16、21
(7)绿翅金鸠 <i>Chalcophaps indica</i>			LC	16	0.25	14、15、20
III 鹃形目 CUCULIFORMES						
3 杜鹃科 Cuculidae						
(8)红翅凤头鹃 <i>Clamator coromandus</i>			LC	4	0.06	13、23
IV 鸨形目 CHARADRIIFORMES						
4 三趾鹑科 Turnicidae						
(9)棕三趾鹑 <i>Turnix suscitator</i>			LC	1	0.02	17
V 鹰形目 ACCIPITRIFORMES						
5 鹰科 Accipitridae						
(10)松雀鹰 <i>Accipiter virgatus</i>	II	附录 II	LC	1	0.02	20
(11)普通鵟 <i>Buteo japonicus</i>	II	附录 II	LC	1	0.02	27
VI 鸮形目 STRIGIFORMES						
6 鸮科 Strigidae						
(12)领角鸮 <i>Otus lettia</i>	II	附录 II	NT	6	0.09	2、3、11
(13)灰林鸮 <i>Strix aluco</i>	II	附录 II	NT	3	0.05	5、7
VII 犀鸟目 BUCEROTIFORMES						

李斌强, 李鹏映, 杨家伟, 字红军, 李兴权, 段锡焕, 罗旭. 运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1343–1347.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018164>

物种 Species	保护级别 Conservation status	CITES 附录 CITES Appendix	中国脊椎动物 红色名录* Red List of China's Vertebrates	独立有效照片 数 No. of independent images	相对丰富度指数 Relative abundance index	相机号 Camera codes
7 戴胜科 Upupidae						
(14)戴胜 <i>Upupa epops</i>			LC	3	0.05	8、10、13
VIII 啄木鸟目 PICIFORMES						
8 啄木鸟科 Picidae						
(15)大斑啄木鸟 <i>Dendrocopos major</i>			LC	1	0.02	8
(16)灰头绿啄木鸟 <i>Picus canus</i>			LC	21	0.33	2、3、8、9、11、 12、14、16、27
IX 雀形目 PASSERIFORMES						
9 扇尾鹟科 Rhipiduridae						
(17)白喉扇尾鹟 <i>Rhipidura albicollis</i>			LC	24	0.38	27
10 卷尾科 Dicruridae						
(18)黑卷尾 <i>Dicrurus macrocercus</i>			LC	2	0.03	3、4
(19)灰卷尾 <i>Dicrurus leucophaeus</i>			LC	2	0.03	2
11 鸦科 Corvidae						
(20)松鸦 <i>Garrulus glandarius</i>			LC	8	0.13	3、10
(21)红嘴蓝鹊 <i>Urocissa erythrorhyncha</i>			LC	6	0.09	3、12
(22)灰树鹊 <i>Dendrocitta formosae</i>			LC	17	0.27	1、3、23
12 山雀科 Paridae						
(23)大山雀 <i>Parus cinereus</i>			LC	6	0.09	2、23
13 鹎科 Pycnonotidae						
(24)黑冠黄鹎 <i>Pycnonotus melanicterus</i>			LC	2	0.03	17
(25)黄臀鹎 <i>Pycnonotus xanthorrhous</i>			LC	52	0.81	17、23
(26)白喉红臀鹎 <i>Pycnonotus aurigaste</i>			LC	1	0.02	14
14 长尾山雀科 Aegithalos						
(27)红头长尾山雀 <i>Aegithalos concinus</i>			LC	1	0.02	17
15 绣眼鸟科 Zosteropidae						
(28)灰腹绣眼鸟 <i>Zosterops palpebrosus</i>			LC	1	0.02	27
16 林鹎科 Timaliidae						
(29)斑胸钩嘴鹎 <i>Erythrogonys gravivox</i>			LC	10	0.16	13、22、23
(30)棕颈钩嘴鹎 <i>Pomatorhinus ruficollis</i>			LC	10	0.16	23

李斌强, 李鹏映, 杨家伟, 宇红军, 李兴权, 段锡焕, 罗旭. 运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1343–1347.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018164>

物种 Species	保护级别 Conservation status	CITES 附录 CITES Appendix	中国脊椎动物 红色名录* Red List of China's Vertebrates	独立有效照片 数 No. of independent images	相对丰富度指数 Relative abundance index	相机号 Camera codes
17 幽鹀科 Pellorneidae						
(31)短尾鹪鹩 <i>Turdinus brevicaudatus</i>			LC	1	0.02	14
18 噪鹛科 Leiothrichidae						
(32)矛纹草鹛 <i>Babax lanceolatus</i>			LC	1	0.02	17
(33)灰翅噪鹛 <i>Garrulax cineraceus</i>			LC	9	0.14	23
(34)小黑领噪鹛 <i>Garrulax monileger</i>			LC	36	0.56	14、17、24
(35)黑领噪鹛 <i>Garrulax pectoralis</i>			LC	362	5.68	1、3–5、7、9、10、 13、14、16、18、 19、21–24、27
(36)白颊噪鹛 <i>Garrulax sannio</i>			LC	26	0.41	18
(37)蓝翅希鹛 <i>Minla cyanouroptera</i>			LC	4	0.06	17、23
19 鹎科 Sittidae						
(38)栗臀鹎 <i>Sitta nagaensis</i>			LC	1	0.02	2
20 鸫科 Turdidae						
(39)橙头地鸫 <i>Geokichla citrina</i>			LC	13	0.20	19、23
(40)长尾地鸫 <i>Zoothera dixonii</i>			LC	11	0.17	20、27
(41)灰背鸫 <i>Turdus hortulorum</i>			LC	1	0.02	10
(42)黑胸鸫 <i>Turdus dissimilis</i>			NT	92	1.44	2、9、12、18、21、 22
21 鹟科 Muscicapidae						
(43)鹟 <i>Copsychus saularis</i>			LC	7	0.11	13、21
(44)北红尾鹟 <i>Phoenicurus leucopterus</i>			LC	15	0.24	17
(45)白顶溪鹟 <i>Chaimarrornis leucocephalus</i>			LC	10	0.16	13
(46)紫啸鹟 <i>Myophonus caeruleus</i>			LC	90	1.41	13、15、17、18、 21、23
(47)小燕尾 <i>Enicurus scouleri</i>			LC	1	0.02	13
(48)灰背燕尾 <i>Enicurus schistaceus</i>			LC	5	0.08	15
(49)白额燕尾 <i>Enicurus leschenaulti</i>			LC	2	0.03	13
(50)灰林鹟 <i>Saxicola ferreus</i>			LC	9	0.14	17
(51)栗腹矶鹟 <i>Monticola rufiventris</i>			LC	2	0.03	3
(52)棕胸蓝姬鹟 <i>Ficedula hyperythra</i>			LC	5	0.08	23
(53)山蓝仙鹟 <i>Cyornis banyumas</i>			LC	4	0.06	23、27

李斌强, 李鹏映, 杨家伟, 字红军, 李兴权, 段锡焕, 罗旭. 运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1343–1347.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018164>

物种 Species	保护级别 Conservation status	CITES 附录 CITES Appendix	中国脊椎动物 红色名录* Red List of China's Vertebrates	独立有效照片 数 No. of independent images	相对丰富度指数 Relative abundance index	相机号 Camera codes
(54)棕腹大仙鹑 <i>Niltava davidi</i>			LC	1	0.02	20
22 鹑科 Motacillidae						
(55)灰鹑 <i>Motacilla cinerea</i>			LC	3	0.05	14
(56)白鹑 <i>Motacilla alboidea</i>			LC	1	0.02	14
(57)树鹑 <i>Anthus hodgsoni</i>			LC	5	0.08	17
23 鹑科 Emberizidae						
(58)灰眉岩鹑 <i>Emberia godlewskii</i>			LC	3	0.05	10、11、17
哺乳纲 MAMMALIA						
X 攀鼯目 SCANDENTIA						
24 树鼯科 Tupaiidae						
(59)北树鼯 <i>Tupaia belangeri</i>		附录 II	LC	67	1.05	8、17、19
XI 食肉目 CARNIVORA						
25 鼬科 Mustelida						
(60)黄喉貂 <i>Martes flavigula</i>	II		NT	28	0.44	1、3、18、28
26 灵猫科 Viverridae						
(61)果子狸 <i>Paguma larvata</i>			NT	29	0.45	14、20、23、27
27 猫科 Felidae						
(62)豹猫 <i>Prionailurus bengalensis</i>		附录 II	VU	50	0.78	3、9、14、23、24、26、27
XII 偶蹄目 ARTIODACTYLA						
28 猪科 Suidae						
(63)野猪 <i>Sus scrofa</i>			LC	1	0.02	27
29 麝科 Moschidae						
(64)林麝 <i>Moschus berezovskii</i>	I	附录 II	CR	1	0.02	28
30 鹿科 Cervidae						
(65)小鹿 <i>Muntiacus reevesi</i>			VU	16	0.25	2、5
(66)赤鹿 <i>Muntiacus muntjak</i>			NT	107	1.68	2、5、8、14、16、18、23、24、28
XIII 啮齿目 RODENTIA						
31 松鼠科 Sciuridae						
(67)赤腹松鼠 <i>Callosciurus erythraeus</i>			LC	179	2.81	1、9、10、14、15、17、21、22、26–28

李斌强, 李鹏映, 杨家伟, 字红军, 李兴权, 段锡焕, 罗旭. 运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1343–1347.

<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018164>

物种 Species	保护级别 Conservation status	CITES 附录 CITES Appendix	中国脊椎动物 红色名录* Red List of China's Vertebrates	独立有效照片 数 No. of independent images	相对丰富度指数 Relative abundance index	相机号 Camera codes
(68)珀氏长吻松鼠 <i>Dremomys pernyi</i>			LC	3	0.05	20–24、27
(69)侧纹岩松鼠 <i>Sciurotamias forresti</i>			LC	14	0.22	26、28
32 鼯鼠科 Pteromyidae						
(70)云南大鼯鼠 <i>Petaurista yunanensis</i>			DD	3	0.05	3
33 仓鼠科 Cricetidae spp./鼠科 Muridae				36	0.56	
spp.						
XIV 兔形目 LAGOMORPHA						
34 兔科 Leporidae						
(71)云南兔 <i>Lepus comus</i>			NT	29	0.45	5、7–11、16、18–22

*参照《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚, 2016), CR: 极危; EN: 濒危; VU: 易危; NT: 近危; LC: 无危。

李斌强, 李鹏映, 杨家伟, 字红军, 李兴权, 段锡焕, 罗旭. 运用红外相机调查云南巍山青华绿孔雀自然保护区的鸟兽多样性. 生物多样性, 2018, 26 (12): 1343-1347.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2018164>



黑颈长尾雉 *Syrmaticus humiae*



白鹇 *Lophuar nycthemera*



豹猫 *Prionailurus bengalensis*



白腹锦鸡 *Chrysolophus amherstiae*



黄喉貂 *Martes flavigula*



小鹿 *Muntiacus reevesi*

附录3 巍山青华绿孔雀自然保护区部分动物照片

Appendix 3 Some wildlife species in Weishan Qinghua Green Peafowl Nature Reserve



•生物编目•

蔷薇科*Docynia*之中文名宜为“多依属”

刘华杰^{1*} 马金双^{2,3} 刘 夙² 刘 冰⁴

1 (北京大学哲学系, 北京 100871)

2 (中国科学院上海辰山植物科学研究中心, 上海 201602)

3 (上海辰山植物园, 上海 201602)

4 (中国科学院植物研究所系统与进化植物学国家重点实验室, 北京 100093)

On the Chinese name for genus *Docynia* (Rosaceae)

Huajie Liu^{1*}, Jinshuang Ma^{2,3}, Su Liu², Bing Liu⁴

1 Department of Philosophy, Peking University, Beijing 100871

2 Shanghai Chenshan Plant Science Research Center, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201602

3 Chenshan Botanical Garden, Shanghai 201602

4 State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093

科学志书属于社会文化基础工程, 影响巨大, 为便于文化传播, 其分类名称宜采用易输入的规范汉字。分布在我国云南、四川、贵州有较好开发前景的蔷薇科*Docynia*属乔木, 结实率较高, 果实类似小苹果, 有不规则钝棱(图1)。此属全球有5种, 中国2种。其中文名用了生僻、难写的汉字“移柎”。《中国植物志》(中国科学院中国植物志编辑委员会, 1974)在脚注中标出此中文属名来源于1958年出版的《中国种子植物科属辞典》, 其他异名有多胜属、移柎属。

这两个字如何发音呢? 第一个字“移”极不常用, 它只有一个音yí。第二个字“柎”读作yī, 一般的输入法无法输入, 目前许多计算机字体(如Word的宋体)也缺少相关字模。《中国植物志》和*Flora of China* (Wu et al, 2007, 以下简称FOC)中都使用了造字, 电子版甚至用“[木+衣]”代表“柎”字。《现代汉语词典》第7版(中国社会科学院语言研究所, 2016)在解释“移”和“柎”两字时, 都唯一指向一种乔木名“移柎”, 读音是yí yī。也就是说这两个汉字是专门为这类植物设定的。

但是FOC在标出中文字的读音时却这样写着: 移柎属duo yi shu, 移柎duo yi, 云南移柎yun nan duo

yi。然而汉语中“移”字并没有duo的音, 显然编写植物志的学者不知道“移”如何发音。

《植物傣名及其释义》(许再富等, 2015)对“云南多依*Docynia delavayi*”的解释为: 麻过缅(ma-guo-mian)。其中麻是“果树”的意思, 过缅是“生长在高海拔”的意思。《云南德宏州高等植物》(刘世龙和赵见明, 2009)对“云南移柎”的处理是: 桃柎柎、小木瓜、酸移柎、酸多李皮、楂子果; ma gua (D)。之后列出了当地民族对此植物的几种发音: me guang xi (J); mu guo shi (Z)。其中D指傣族, J指景颇族, Z所指不明(可能指汉族。奇怪的是, 此工具书并无体例说明, 查遍全书找不到对所符号的说明)。

以上两者对比发现, 发音相似, 略有不同。而不同地方的傣语本来就有差异。2018年8月本文作者实地调查发现, 西双版纳勐海县多个地方的傣族人和哈尼族人都非常一致地把这类植物叫作duō yī, 其果实叫作duō yī果。我们特意询问了当地林业部门的工作人员, 他们的发音也是duō yī。在云南, 普通百姓大多认识这个属的植物, 早市上就有出售这类野果的, 当地人也把它做成果脯, 称之为“多衣”或“姚姨”(《中国植物志》记载了这个云南本地名)。勐海县内还有地名多依寨、多依村, 依有时写作衣,

收稿日期: 2018-09-19; 接受日期: 2018-09-20

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



图1 蔷薇科植物多依(左图, 刘华杰摄于云南勐海)和云南勐海人家晒制的多依果干(右图, 佐连江摄影)

Fig. 1 *Duoyi* (*Docynia indica*) in Rosaceae (left, photographed by Liu Huajie at Menghai, Yunnan Province) and *Duoyi* dried fruits at Menghai, Yunnan Province (right, photographed by Lianjiang Zu).

实地调查也确认这些地名与此植物直接相关。

这就出现了明显的矛盾。鉴于“移柀”这两个字极少用、易读错、也很难输入, 为便于学习和交流, 可考虑修订 *Docynia* 的中文名。

综合来看, 有如下几种修改方案: (1) 移衣, 读 *yí yī*; (2) 姚姨, 读 *yáo yí*; (3) 多衣, 读 *duō yī*; (4) 多依, 读 *duō yī*。

四种方案各有利弊。如果要保持原来的发音, 并使之与历史文献对应, 可考虑改写作“移衣”, 但这与实际的发音不符。如果延续现在民间的常用读法, 可写作“多衣”或“多依”。如果从民族植物学的角度考虑, 可写作“姚姨”, 但是现在当地的民族也不再如此发音。我们倾向于从俗从简, 照顾到现在普遍的读音, 索性“将错就错”, 写作“多依”, 即采用第4种方案, 与《植物傣名及其释义》用法一致。与《中国植物志》和FOC相比, 相当于改正了读音, 同时换了两个容易输入的汉字。建议下一版《中国植物志》能够采用“多依属”这一名称。

为何不彻底简化写作“多衣”呢? 因为在云南“依”字用得更多; 而“衣”字可能造成误解, 容易误以为是表意。于是我们认为 *Docynia* 宜称“多依属”, *Docynia delavayi* 称“云南多依”, 另一个种 *Docynia indica* 称“多依”。这样做虽然可能斩断了最初命名时与古代文化的渊源(其实, 目前没有可靠资料可以证明“移柀”与古代字书上读“移”的“移”字有继承关

系), 但好处是与现在民间的普遍称谓相符, 毕竟便于使用是命名的一项重要考虑。另外 *duō* 的发音与拉丁属名的起始部分读音相近, 也便于记忆。这与物理学名词 *turbulence* 中文称“湍流”(王竹溪先生的贡献), 有同样的效果。

参考文献

- Delecti Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae (1974) *Flora Reipublicae Popularis Sinicae*, Tomus 36, pp. 345–347. Science Press, Beijing. (in Chinese) [中国科学院中国植物志编辑委员会 (1974) 中国植物志, 第36卷, 345–347页. 科学出版社, 北京.]
- Liu SL, Zhao JM (2009) *Advanced Plants of Dehong in Yunnan Province*, Vol. 1, p. 384. Science Press, Beijing. (in Chinese) [刘世龙, 赵见明 (2009) 云南德宏州高等植物 (上册), 384页. 科学出版社, 北京.]
- Institute of Linguistics of Chinese Academy of Social Sciences (2016) *Modern Chinese Dictionary*, 7th edn. pp. 1543–1544. Commercial Press, Beijing. (in Chinese) [中国社会科学院语言研究所 (2016) 现代汉语词典, 第7版, 1543–1544页. 商务印书馆, 北京.]
- Wu ZY, Raven PH, Hong DY (2007) *Flora of China*, 12, pp. 412–417. Science Press, Beijing & Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Xu ZF, Yan HD, Duan QW, Zhou HF (2015) *Dai Names and Their Interpretation of Plants*, p. 98. Science Press, Beijing. (in Chinese) [许再富, 岩罕单, 段其武, 周惠芳 (2015) 植物傣名及其释义, 98页. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 周玉荣)



•保护论坛•

中国生物多样性相关传统知识调查与评估指标体系构建

刘冬梅¹ 薛达元^{2*} 蔡 蕾³ 李俊生^{1*} 肖能文¹

1 (中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012)

2 (中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081)

3 (生态环境部自然生态保护司, 北京 100035)

摘要: 基于调查获得的数据开展生物多样性相关传统知识评估, 明确面临的主要压力和保护空缺, 可为相关管理部门决策提供科学依据。指标是开展评估的主要工具, 但是目前尚未有关于生物多样性相关传统知识评估指标体系的文献报道。我们基于压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)模型, 充分考虑生物多样性相关传统知识的基本特征、主要威胁因子、保护和传承措施, 初步构建了区域和国家尺度的生物多样性相关传统知识评估指标体系。然后通过专家咨询, 确定了30项指标, 其中压力指标7项、状态指标14项、响应指标9项。这些指标不仅可以用于生物多样性相关传统知识的综合评估, 还可以对其基本状况、受威胁状况、保护与传承状况、相关遗传资源进行单独评价。此外, 基于评估参数计算的数据需求, 我们借鉴国内外民族植物学和生物多样性相关传统知识调查的主要研究成果, 建立了“全国生物多样性相关传统知识调查技术方法体系”, 并通过试点调查进行修改完善。“全国生物多样性相关传统知识调查”以关键人物访谈、问卷调查和参与观察为主, 并辅以生物学和生态学调查; 采用滚雪球抽样法对目标群体进行抽样, 确定访谈对象。

关键词: 生物多样性相关传统知识; 评估; 指标; PSR; 调查

Establishing a national indicator system in China for the assessment of traditional knowledge associated with biodiversity

Dongmei Liu¹, Dayuan Xue^{2*}, Lei Cai³, Junsheng Li^{1*}, Nengwen Xiao¹

1 State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2 College of Life and Environmental Science, Minzu University of China, Beijing 100081

3 Department of Nature and Ecology Conservation, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100035

Abstract: More data needs to be collected to assess the wide range of traditional knowledge associated with biodiversity to identify the key pressures on diversity today and also highlight protection gaps for decision makers in biodiversity conservation. An indicator system is a useful tool in scientific assessments, yet few studies have made use of them. An indicator system to assess traditional knowledge associated with biodiversity was preliminarily established at a regional and national scale based on the Pressure-State-Response (PSR) model, taking into account major players, species threats, existing measures for protection and transmission of traditional knowledge associated with biodiversity. Through expert consultation, 30 indicators were identified, including 7 pressure indicators, 14 status indicators and 9 response indicators. These indicators could be used for a comprehensive assessment of traditional knowledge associated with biodiversity, and also could also be applied to a separate assessment concerning the basic status of threats to biodiversity, current protections, the transmission of traditional knowledge associated with biodiversity and relevant genetic resources. Moreover, “The National Technology and Methodology System for Surveying Traditional Knowledge Associated with Biodiversity” was developed based on the results of “The National Survey on

收稿日期: 2018-09-21; 接受日期: 2018-12-05

基金项目: 生态环境部生物多样性保护专项(2096001006)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: xuedayuan@hotmail.com; lijsh@craes.org.cn

Traditional Knowledge Associated with Biodiversity”, which combined interviews with key figures, questionnaire responses and participatory observations and was supplemented by scientifically-derived biological and ecological knowledge. Interviewees were identified from target groups using snowball sampling. This system was developed according to parameters drawing on the results of surveys on ethnobotanical and traditional knowledge associated with biodiversity at home and abroad. The system was then piloted and modified accordingly.

Key words: traditional knowledge associated with biodiversity; assessment; indicator; PSR; survey

《生物多样性公约》第8(j)项规定:“依照国家立法,尊重、保存和维持土著与地方社区体现的与生物多样性保护和持续利用相关的知识、创新和做法,并促使其广泛应用,由其所有者认可和参与并鼓励公平地分享因利用这些知识、创新和做法而获得的惠益。”《名古屋议定书》规定对于与遗传资源相关的传统知识的获取需得到土著和地方社区的事先知情同意、认可或参与,并通过谈判订立共同商定条件,从而公平公正地分享因利用该传统知识所产生的惠益。《名古屋议定书》是《生物多样性公约》体系下一个具有法律效力的补充文件。中国于2016年9月6日成为《名古屋议定书》的缔约方,意味着生物多样性相关传统知识的保护、获取与惠益分享制度在国际和国内层面已进入履行阶段。通过调查掌握中国生物多样性相关传统知识本底状况,建设数据库,可为履行国际公约提供数据支撑,并有利于生物多样性相关传统知识的保护与惠益分享监管能力的提升。基于调查获得的数据开展生物多样性相关传统知识丧失与流失及保护状况评估,分析主要威胁因子和保护空缺,可为相关部门制定保护措施、构建监管制度提供科学依据。

自20世纪80年代以来,裴盛基等一批民族植物学者和传统知识保护学者开展了一些生物多样性相关传统知识调查研究(薛达元和郭砾,2009;龙春林,2013;Pei,2013),主要集中在传统利用工业原料植物(成功等,2013;Hong et al,2015;Zhang et al,2015;范汝艳等,2018)和传统利用农业遗传资源(张丽琴等,2014;王趁等,2015;Geng et al,2016;邵桦和薛达元,2017)的知识、做法与技术等,特别是药用遗传资源相关传统知识(龚济达等,2012;刘为鹏等,2015;Zhang et al,2015)。这些调查研究工作涵盖的地理区域相对狭窄,所采用的标准不统一,难以进行区域和国家尺度的数据整合。中国在进行第四次全国中药资源普查时,开展了中药传统知识

调查,调查内容涵盖中药、民族药和民间药的理论与应用(成功等,2014)。虽然该调查在全国范围内开展,但调查对象仅有中药传统知识一类。中国还未全面系统开展生物多样性相关传统知识评估,迄今为止,也尚未发现国际上有相关报道。

遵照李克强总理关于“抓紧实施生物多样性保护重大工程,解决生物多样性保护突出问题和薄弱环节”的指示,为实现《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011-2030年)》确定的中期目标,推动实现《生物多样性公约》确定的2020年目标,提升中国生物多样性相关传统知识保护与惠益分享的监管能力,原环境保护部于2016年启动了“全国生物多样性相关传统知识调查与评估”项目。中国环境科学研究院于2016-2017年开展了全国生物多样性相关传统知识试点调查与评估工作。本文基于压力-状态-响应(pressure-state-response,PSR)模型和中国实际情况,采用专家咨询法构建了生物多样性相关传统知识评估指标体系,同时基于评估参数计算的数据需求,借鉴国内外民族植物学和生物多样性相关传统知识调查的主要研究成果,研究建立了“全国生物多样性相关传统知识调查技术方法体系”,并通过试点进行验证,旨在促进“全国生物多样性相关传统知识调查与评估”工作的标准化、统一化和规范化。

1 生物多样性相关传统知识评估指标体系构建

1.1 指标体系构建的目的

构建指标体系,用于生物多样性相关传统知识综合评估和一般特征、受威胁状况、保护与传承状况、相关遗传资源的单独评估,使评估工作标准化、统一化和规范化,促进《中国生物多样性保护战略与行动计划》(2011-2030年)的实施和《生物多样性保护重大工程实施方案(2014-2020年)》的落实,并为履行《生物多样性公约》和《名古屋议定书》提

供技术支撑。

1.2 指标体系构建的原则

(1)科学性原则。指标的选取应建立在对生物多样性相关传统知识充分认识、深入研究的基础上。选取的指标应能科学、客观、真实地反映生物多样性相关传统知识的基本特征、面临的主要压力和响应状况。

(2)代表性原则。选择的指标应能直接反映生物多样性相关传统知识的本质特征，并具有较强的代表性。

(3)关键性原则。生物多样性相关传统知识评估结果可为管理部门决策提供科学依据，具有导向性作用，因此指标体系必须含有关键性的特征指标、受威胁指标、保护与传承指标。

(4)可操作性原则。选取的指标可操作，即在当前技术条件下，评估参数计算所需的数据容易采集、相关资料可获得。

(5)尺度原则。选取适用于区域尺度和国家尺度的指标。

1.3 指标的筛选

PSR模型由互为因果关系的压力、状态和响应三部分组成，已被广泛应用于生物多样性和环境指标体系构建(李果等, 2011; 黄备等, 2016; Brambila & Flombaum, 2017; 栗忠飞和高吉喜, 2018)。在社会经济和生态环境等因素影响下，生物多样性相关传统知识状态会发生改变，这种状态的改变反过来对人体健康、物质生产、生态系统服务和人类福祉等造成影响，而政府部门、社会团体和传统知识持有者可以通过保护管理措施的实施对不利影响作出反应，以遏制生物多样性相关传统知识丧失、流失的态势，这符合了PSR模型应用的逻辑框架。因此，我们基于PSR模型，充分考虑目前我国生物多样性相关传统知识的基本特征、主要威胁因素、保护和传承措施，初步构建了评估指标体系。然后，征询生物多样性相关传统知识和民族植物学领域权威专家的意见，对指标体系进行修改。之后在“全国生物多样性相关传统知识调查与评估”试点中应用，根据试点评估结果进行修改完善，最终形成包括30项指标的生物多样性相关传统知识评估指标体系，其中压力指标7项、状态指标14项、响应指标9项(表1)。

(1)压力指标。来自社会经济发展、现代文化、生态环境等方面的压力对生物多样性相关传统知识的状态产生重要影响。现代生物技术的广泛应用和高产品种的大范围推广，使传统的技术和品种逐渐被淘汰(薛达元和郭砾, 2009)，如云南佤族地区的传统蔬菜资源正在逐渐消失(邵桦和薛达元, 2017)。因其他民族文化影响、传统医药与文化教育缺失等原因，鄂伦春族传统知识、景颇族传统药用植物知识等正在面临难于传承和发扬的问题(成功等, 2013; 贾若男等, 2017)。此外，随着传统利用的遗传资源的丧失，相关的传统知识也逐渐消失。因此，选取经济效益影响、外来文化影响、传承有效性、生境丧失、自然灾害影响、过度开发利用影响、土地利用变化等7项指标(表1)。

(2)状态指标。生物多样性相关传统知识的状态是多因素时空耦合的综合表征。综合运用文献资料分析和专家咨询法，并充分考虑评估所需数据的可获得性，选取丰富度、历史悠久性、分布特征、经济价值、社会文化价值、特有性、开发利用现状、传承情况、民族拥有情况、社区拥有情况、濒危程度、丧失情况、流失情况、保护传承空缺等14项指标(表1)。

(3)响应指标。响应是描述各级政府、社会团体与组织、传统知识持有社区和家族等为保护与传承生物多样性相关传统知识而采用的法律法规、政策、知识产权、文化和工程等措施。综合考虑当前我国生物多样性相关传统知识保护与传承的主要措施和评估所需数据的可获得性，选取国际法保护、国家法规保护、知识产权保护、政策措施、文化保护、工程措施、社区保护、家族保护、社会组织等9项指标(表1)。

2 指标的运用

通过该指标体系不仅可以进行生物多样性相关传统知识的综合评估，明确其现状、面临的主要压力和响应状况，还可通过指标的组合运用，对生物多样性相关传统知识的基本状况、受威胁状况、保护与传承状况等进行评估。评价生物多样性相关传统知识基本状况的指标(表1)包括丰富度、历史悠久性、分布特征、经济价值、社会文化价值、特有性、开发利用现状、传承情况、民族拥有情况和社区拥有情况；评价生物多样性相关传统知识受威胁

表1 生物多样性相关传统知识评估指标体系及评估参数

Table 1 Indicator system and parameters for assessment of traditional knowledge (TK) associated with biodiversity in China

指标类别 Indicator categories	评估指标 Assessment indicators	评估参数 Assessment parameters
压力 Pressure	经济效益影响 Impact of economic benefits	因经济效益差而遭淘汰的传统知识数量 Number of the TK (traditional knowledge) entries eliminated due to poor economic benefits
	外来文化影响 Influence of foreign cultures	受外来文化严重影响的传统知识数量 Number of the TK entries influenced seriously by foreign cultures
	生境丧失 Habitat loss	因外来种入侵和环境污染等破坏相关遗传资源的生境, 导致其生境丧失的传统知识数量 Number of the TK entries lost along with deteriorated habitats, which relevant genetic resources depend on. The root causes for habitat deteriorating include alien invasive species, environmental pollution, etc.
	过度开发利用影响 Effect of overexploitation	已遭受过度开发利用影响的传统知识数量 Number of the TK entries affected by overexploitation
	土地利用变化 Land use change	受土地利用变化影响的传统知识数量 Number of the TK entries affected by land use change
	自然灾害影响 Impact of natural disasters	已遭受自然灾害影响的传统知识数量 Number of the TK entries impacted by natural disasters
	传承有效性 Validity of inheritance	尚无传承措施的传统知识数量 Number of the TK entries without inheritance measures
	状态 State	丰富度 Diversity
历史悠久性 History		具有100年以上历史的传统知识数量 Number of the TK entries which could date back to more than 100 years
分布特征 Distribution patterns		仅在1-2个乡镇分布的传统知识数量 Number of the TK entries distributed only in 1-2 townships
经济价值 Economic value		具有高、中等级经济价值的传统知识数量 Number of the TK entries with high or medium economic value
社会文化价值 Socio-cultural value		具有高、中等级社会文化价值传统知识数量 Number of the TK entries with high or medium socio-cultural value
特有性 Endemism		区域特有的传统知识数量 Number of the TK entries endemic to the region
开发利用现状 Exploitation status		已具备规模商业化开发的传统知识数量 Number of the TK entries involved in large-scale commercialized development
传承情况 Inheritance situation		已认定传承人的传统知识的数量 Number of the TK entries that have been identified as inheritors
民族拥有情况 Ownership by ethnic minorities		少数民族创造并持有的传统知识数量 Number of the TK entries created and owned by ethnic minorities
社区拥有情况 Ownership by local communities		已明确地方社区拥有的传统知识数量 Number of the TK entries with clear ownership by local communities
濒危程度 Degree of extinction risk		相关遗传资源受到严重威胁呈濒危状态的传统知识数量 Number of the TK entries which associated genetic resources are threatened and endangered
丧失情况 Extinct TK		近30年已丧失的传统知识数量 Number of the extinct TK entries in past 30 years
流失情况 Be lost abroad		已流失国外的传统知识数量 Number of the TK entries that have been lost abroad
保护传承空缺 Gaps in protection and inheritance measures		无任何保护和传承措施的传统知识数量 Number of the TK entries without any protection and inheritance measures
响应 Response	国际法保护 Protected by international laws and agreements	受CITES、《生物多样性公约》、《保护世界文化与自然遗产公约》、《波恩公约》等国际法保护的 传统知识数量 Number of the TK entries protected by the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES), the Convention on Biological Diversity, the Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage, Bonn Convention, etc.
	国家法规保护 Protected by domestic laws and regulations	受野生动物保护法、野生植物保护条例、非物质文化遗产法、自然保护区条例、畜牧法、种子法、中医药法等国家法规保护的 传统知识数量 Number of the TK entries protected by Law of Wild Animal Protection, Wild Plants Protection Regulation, Intangible Cultural Heritage Law, Nature Reserve Regulation, Animal Industry Law, Seed Law, Traditional Chinese Medicine Law, etc.

表 1 (续) Table 1 (continuous)

指标类别 Indicator categories	评估指标 Assessment indicators	评估参数 Assessment parameters
响应 Response	知识产权保护 Protected by intellectual property rights	具有知识产权(专利、地理标志、商标、著作权等)保护的传统文化数量 Number of the TK entries protected by intellectual property legislation of patents, geographical indications, trademarks, copyrights, etc.
	政策措施 Policy measures	具有国家和地方政策保护(资金投入机制、激励政策、惠益分享等)的传统文化数量 Number of the TK entries protected by national and local policies, including investment mechanism, incentive policy, benefit sharing, etc.
	文化保护 Cultural protection	受传统文化(如习惯法、节庆等)、宗教方式(如祭祀、神山、神林等)保护的传统文化数量 Number of the TK entries protected by traditional culture (customary law, rituals, etc.) and religious beliefs (sacrifice, sacred mountain, sacred forest, etc.)
	工程措施 Engineering measures	受自然保护区、国家公园、风景名胜区、自然遗产地、农业文化遗产地、森林公园、湿地公园、自然保护点等就地保护措施和动物园、植物园、种质资源圃、人工繁育基地、水族馆等迁地保护措施保护的传统文化数量 Number of the TK entries protected by <i>in situ</i> conservation (nature reserves, national parks, scenic spots, natural heritage sites, agricultural and cultural heritage sites, forest parks, wetland parks, natural protection zones, etc.) and <i>ex situ</i> conservation (zoos, botanical gardens, germplasm resource gardens, artificial breeding bases, aquariums, etc.)
	社区保护 Local community protection	受传统文化所在地方社区群体自发保护的传统文化数量 Number of the TK entries voluntarily protected by local communities
	家族保护 Protected by clanship protection	受家族保护(祖传秘方等)的传统文化数量 Number of the TK entries protected by clans, such as the ancestral secret recipe
	社会组织 Social organization	受民间非政府组织和私营企业等社会团体保护的传统文化数量 Number of the TK entries protected by social groups such as non-governmental organizations and private enterprises

状况的指标包括濒危程度、丧失情况、流失情况、自然灾害影响、过度开发利用影响、土地利用变化、生境丧失、外来文化影响、经济效益影响和传承有效性;评价生物多样性相关传统知识保护与传承状况的指标包括国际法保护、国家法规保护、知识产权保护、政策措施、文化保护、工程措施、社区保护、家族保护、社会组织和保护传承空缺。

此外,将体系内一些指标进行重新组合,可以对传统知识相关的遗传资源进行单独评价,反映其面临的压力、现状及得到的响应。评价遗传资源面临压力的指标包括表1中的自然灾害影响、过度利用影响、土地利用变化和生境丧失;评价遗传资源现状的指标为表1中的濒危程度;响应指标包括国际法保护、国家法规保护、政策措施和工程措施。评价的内容与指标间的PSR逻辑关系为:由于生境丧失、自然灾害、过度开发利用和土地利用变化等干扰因素的影响,遗传资源受到严重威胁,达到濒危状态,而保护资金的投入、自然保护地与迁地保护设施的建设和CITES公约、野生动物保护法、野生植物保护条例、自然保护区条例、畜牧法、种子法等法律法规的实施可使遗传资源受到一定程度

的保护。

3 评估数据的收集——实地调查

我国尚无生物多样性相关传统知识数据库,需要通过大量的实地调查收集评估所需数据。根据表1中评估参数计算的需要,“全国生物多样性相关传统知识调查与评估”项目主要调查生物多样性相关传统知识的类别、相关遗传资源、持有者、数量、分布、传统利用、特有性、知识产权、惠益分享、丧失或流失、威胁因子等。考虑我国履行《生物多样性公约》和《名古屋议定书》的需要,重点调查传统利用农业遗传资源的相关知识、传统利用药用遗传资源的相关知识、具有工业开发潜力的与遗传资源可持续利用相关的传统技术等。

一些实地调查方法在国内外传统知识调查研究中正逐步形成,其中随机抽样法、滚雪球抽样法和问卷调查、关键人物访谈在民族植物学和传统知识实地调查中常被使用。如Baana等(2018)在乌干达某区域进行驱虫植物民族植物学调查时使用了问卷调查与半结构式访谈法,并采用随机抽样法确定问卷调查对象。Liu等(2018)采用半结构式访谈结合

野外调查进行了中国云南楚雄地区食用菌的民族植物学调查研究: 通过半结构式访谈了解当地真菌的物种种类、食用价值、药用价值和市场贸易; 通过真菌的生物学、生态学等野外调查掌握目标物种的生长特点与生境特征等, 并采集凭证标本。Ijaz等(2016)在调查巴基斯坦传统利用药用植物知识时采用了关键人物访谈、问卷调查、生态学调查等方法。成功等(2013)调查云南省陇川县景颇族药用植物传统知识时, 采用生物学调查和半结构式访谈、问卷调查、参与观察等方法, 其中在调查景颇族传统医生时采用了滚雪球非概率抽样方法。中国中药传统知识调查采用滚雪球法确定传统知识持有方, 然后采用关键人物访谈法, 并辅以参与观察和问卷调查(成功等, 2014)。通过对这些调查方法分析发现, 关键人物访谈中的半结构式访谈使用频率较高; 参与观察是相对直接获得传统知识数据的方法, 但需要较长的调查时间; 滚雪球抽样法可以快速、准确、有效地对目标群体进行抽样, 常被用于关键访谈对象的确定; 在进行遗传资源相关传统知识调查时, 生物学和生态学调查是必要的。

借鉴上述经验, “全国生物多样性相关传统知识调查”以关键人物访谈(半结构式访谈)、问卷调查和参与观察为主, 并辅以生物学和生态学调查; 采用滚雪球抽样法对目标群体进行抽样, 确定访谈对象。

全国生物多样性相关传统知识调查以县域为单元实施。首先, 收集、分析与调查区域有关的志书、报告、专著、文献、标本、数据库、专利说明书和政府主管部门的统计资料与信息, 了解调查区域的地形地貌、生物多样性、文化多样性、人口与民族等概况, 制定调查问卷与访谈提纲, 编制调查方案, 明确调查重点。然后, 通过滚雪球抽样法对目标群体进行抽样, 确定传统知识持有方, 采用关键人物访谈法进行访谈。在条件允许时, 采用参与观察法进一步核实传统知识。在获得传统知识持有方事先知情同意后, 参与遗传资源采集、种植、加工、使用等流程, 开展必要的生物学和生态学调查。拍摄工作情景、物种(品种)及生境的图片, 采集凭证标本, 对各项信息进行记录和保存。调查覆盖县域全部乡镇, 对于少数民族相对集中居住、传统文化保存较好、周围生态环境较好且生物多样性相对丰富的行政村进行重点调查。最后, 整理调查记录、照片, 完成标本鉴定与制作, 进行数据分

析和生物多样性相关传统知识编目, 构建县域生物多样性相关传统知识数据库。

以薛达元等在2016–2017年开展的云南省澜沧拉祜族自治县(简称“澜沧县”)生物多样性相关传统知识调查为例作一介绍。首先, 对澜沧县地方史志、著作、报告、文献、数据库、网络资料等进行收集与整理, 发现县域内保存有丰富的生物多样性相关传统知识, 涵盖传统农作物遗传资源、传统医药知识、传统技术、传统文化及传统生物地理标志产品等, 但是各部分资料信息侧重点不同, 极为零散, 且与项目调查的生物多样性相关传统知识的基本描述、内涵与特征等内容存在较大差异, 特别是缺少重要性分析、获取与惠益分享状况、保护空缺分析等。然后, 采用关键人物访谈、参与观察、市场调查等方法进行实地调查, 并进行了相关遗传资源的生物学与生态学调查, 采集了凭证与实物标本, 拍摄了照片、视频等影像资料, 详细记录各项信息, 规范填写调查表。最后, 对数据进行整理分析, 编制了澜沧县生物多样性相关传统知识名录, 构建了澜沧县生物多样性相关传统知识数据库。调查发现澜沧县有145个生物多样性相关传统知识, 其中传统利用农业遗传资源相关知识9个、传统利用药用遗传资源相关知识15个、具有工业开发潜力的与遗传资源可持续利用相关的传统技术10个。

4 问题与结论

《生物多样性保护重大工程实施方案(2014–2020年)》提出, 到2020年重点完成全国32个陆地生物多样性保护区域内904个县的生物多样性综合调查, 基本摸清我国生物多样性本底状况, 建立以县域为基本单元的全国生物多样性数据库和信息平台, 其中包含了生物多样性相关传统知识。以县域为基本单元开展调查, 收集到的数据不仅可以用于县域生物多样性相关传统知识的评估, 还可以进行多县域数据的集成整合, 从而形成市域、省域乃至国家水平的数据集, 进而用于开展各级行政区域的生物多样性相关传统知识评估。但是调查区域广阔, 需要制定统一的调查与评估技术方法, 统一数据与评估标准, 使获得的数据和评估结果不仅可整合, 还具有可比性。基于本文构建的生物多样性相关传统知识评估指标体系和调查技术方法, 我们编制了《生物多样性相关传统知识调查与评估技术规定》, 并由原环

境保护部正式发布(环境保护部公告2017年第84号, http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201801/t20180108_429275.htm), 以统一、规范全国生物多样性相关传统知识调查与评估工作。该技术规定已被应用于云南省澜沧县等3个县(区)的生物多样性相关传统知识试点调查与评估, 结果表明可以达到项目预期目标。

通过开展生物多样性相关传统知识调查, 掌握生物多样性相关传统知识本底状况, 建设数据库和信息管理平台, 可为履行国际公约、维护国家利益、保障土著和地方社区权益提供重要的基础数据, 以避免造成损失。如专利审查人员因不了解德昂族酸茶这一传统知识信息, 且尚无数据信息平台可以检索相关信息, 而误将以该传统知识为核心的发明专利授予了某企业。该企业未经德昂族酸茶持有人事先知情同意, 也未与持有人进行惠益分享, 严重损害了持有人权益(傅玮琳等, 2018)。澜沧县等3个县域试点调查, 收集到了357个生物多样性相关传统知识的信息, 包括传统利用、经济价值、持有者、分布、特有性、相关遗传资源等, 构建了县域生物多样性相关传统知识数据库, 可为这些传统知识的保护与惠益分享提供数据支撑和管理平台。

利用澜沧县等3个县域调查收集的数据, 开展了县域生物多样性相关传统知识的综合评估, 明确了各县域生物多样性相关传统知识的基本状况、受威胁状况、保护和传承状况。评估结果表明调查县域生物多样性相关传统知识较丰富、历史悠久、分布较广、经济价值较高, 但大部分传统知识正面临丧失的威胁, 最主要的威胁因子是生境丧失、过度利用和外来文化的影响, 其次是自然灾害和土地利用变化; 大部分传统知识已受到法律、地方政府或社区的保护, 其中受地方社区保护的傳統知识比例最高, 其次是工程措施、文化措施、政策措施。此外, 还明确了各县域生物多样性相关传统知识的优先保护次序, 提出了保护建议。试点评估结果表明我们构建的指标体系在县级区域生物多样性相关传统知识评估具有可操作性。但是由于资金投入不足, 目前仅收集了3个县域的生物多样性相关传统知识本底数据, 无法开展市域、省域和生物多样性保护优先区等更大区域的传统知识现状、面临压力和响应状况的评估。今后应加大资金投入, 尽快完成全国生物多样性相关传统知识本底调查和评估,

并结合长江经济带、“一带一路”等重大国家战略开展生物多样性相关传统知识专项调查, 建成国家生物多样性相关传统知识数据库与信息平台。

参考文献

- Baana K, Angwech H, Malinga GM (2018) Ethnobotanical survey of plants used as repellents against housefly, *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae) in Budondo Subcounty, Jinja District, Uganda. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 14, 35.
- Brambila A, Flombaum P (2017) Comparison of environmental indicator sets using a unified indicator classification framework. *Ecological Indicators*, 83, 96–102.
- Cheng G, Gong JD, Xue DY, Liu CH, Dai R (2013) Status of Jingpo People's traditional medicinal knowledge of herbal in Longchuan County, Yunnan Province. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 28, 1–8. (in Chinese with English abstract) [成功, 龚济达, 薛达元, 刘春晖, 戴蓉 (2013) 云南省陇川县景颇族药用植物传统知识现状. *云南农业大学学报*, 28, 1–8.]
- Cheng G, Huang LQ, Xue DY, Zhang XB (2014) Essential procedure and key methods for survey of traditional knowledge related to Chinese materia medica resources. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 39, 4728–4731. (in Chinese with English abstract) [成功, 黄璐琦, 薛达元, 张小波 (2014) 中药资源传统知识调查基本程序与关键技术方法. *中国中药杂志*, 39, 4728–4731.]
- Fan RY, Gou Y, Wang C, Yang NT, Wang YH (2018) Ethnobotanical survey on the mosquito repellent plant used by Hani people in Xishuangbanna. *Guihaia*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.q.20180417.0939.005.html>. (in Chinese with English abstract) [范汝艳, 苟祎, 王趁, 杨念婷, 王雨华 (2018) 西双版纳哈尼族驱蚊植物的民族植物学调查研究. *广西植物*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.q.20180417.0939.005.html>. (accessed on 2018-08-10)]
- Fu WL, Dong M, Yang WH, Yang XY, Wang YJ, Cheng G (2018) Protection of Chinese traditional knowledge in the backdrop of the Nagoya Protocol: A case study on acid tea of the De'ang Minority. *Biodiversity Science*, 26, 645–650. (in Chinese with English abstract) [傅玮琳, 董梅, 杨文华, 杨兴媛, 王玉珏, 成功 (2018) 《名古屋议定书》背景下我国传统知识的保护: 以德昂族酸茶为例. *生物多样性*, 26, 645–650.]
- Geng YF, Zhang Y, Ranjitkar S, Huai HY, Wang YH (2016) Traditional knowledge and its transmission of wild edibles used by the Naxi in Baidi Village, northwest Yunnan Province. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 12, 10.]
- Gong JD, Cheng G, Xue DY, Guo YJ, Yang JB (2012) Status of Jingpo People's traditional medicinal knowledge of animals in Longchuan, Yunnan. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 27, 308–314. (in Chinese with English

- abstract) [龚济达, 成功, 薛达元, 郭云胶, 杨京彪 (2012) 云南省陇川县景颇族药用动物传统知识现状. 云南农业大学学报, 27, 308–314.]
- Hong LY, Zhuo JX, Lei QY, Zhou JJ, Ahmed S, Wang CY, Long YX, Li FF, Long CL (2015) Ethnobotany of wild plants used for starting fermented beverages in Shui communities of southwest China. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 11, 42.
- Huang B, Wei N, Meng WJ, Zhang MX (2016) Marine biodiversity evaluation based on the pressure-state-response (PSR) model of Changhai County, Liaoning Province. *Biodiversity Science*, 24, 48–54. (in Chinese with English abstract) [黄备, 魏娜, 孟伟杰, 张明霞 (2016) 基于压力-状态-响应模型的辽宁省长海海域海洋生物多样性评价. 生物多样性, 24, 48–54.]
- Ijaz F, Iqbal Z, Rahman IU, Alam J, Khan SM, Shah GM, Khan K, Afzal A (2016) Investigation of traditional medicinal floral knowledge of Sarban Hills, Abbottabad, KP, Pakistan. *Journal of Ethnopharmacology*, 179, 208–233.
- Jia RN, Yang JB, Xue DY (2017) Cultural landscape transformation of Oroqen and its influence on traditional knowledge associated with biodiversity. *Journal of Minzu University of China (Natural Science Edition)*, 26(4), 71–77. (in Chinese with English abstract) [贾若男, 杨京彪, 薛达元 (2017) 鄂伦春族文化景观变迁及其对生物多样性相关传统知识的影响. 中央民族大学学报(自然科学版), 26(4), 71–77.]
- Li G, Wu XP, Luo ZL, Li JS (2011) Establishing an indicator system for biodiversity assessment in China. *Biodiversity Science*, 19, 497–504. (in Chinese with English abstract) [李果, 吴晓莆, 罗遵兰, 李俊生 (2011) 构建我国生物多样性评价的指标体系. 生物多样性, 19, 497–504.]
- Li ZF, Gao JX (2018) A review on assessment methods of biodiversity. *China Development*, 18(2), 1–13. (in Chinese with English abstract) [栗忠飞, 高吉喜 (2018) 生物多样性评估方法的综述与评价. 中国发展, 18(2), 1–13.]
- Liu DY, Cheng H, Bussmann RW, Guo ZY, Liu B, Long CL (2018) An ethnobotanical survey of edible fungi in Chuxiong City, Yunnan, China. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 14, 42.
- Liu WP, Lei DP, You HY, Xie JT (2015) Investigation of traditional Chinese medicine knowledge in Foping, Shaanxi Province. *Modern Chinese Medicine*, 17(1), 24–27. (in Chinese with English abstract) [刘为鹏, 雷大鹏, 尤海钰, 解建团 (2015) 陕西省佛坪县中药传统知识调查研究. 中国现代中药, 17(1), 24–27.]
- Long CL (2013) Modern ethnobotany: An introduction. *Plant Diversity and Resources*, 35, 438–442. (in Chinese with English abstract) [龙春林 (2013) 现代民族植物学引论. 植物分类与资源学报, 35, 438–442.]
- Pei SJ (2013) Ethnobotany and the sustainable use of biodiversity. *Plant Diversity and Resources*, 35, 401–406.
- Shao H, Xue DY (2017) Influence of traditional Wa culture on vegetable germplasm diversity in Yunnan Province. *Biodiversity Science*, 25, 46–52. (in Chinese with English abstract) [邵桦, 薛达元 (2017) 云南佤族传统文化对蔬菜种质多样性的影响. 生物多样性, 25, 46–52.]
- Wang C, Zhang LL, Wang YH (2015) Ethnobotanical survey on traditional knowledge of *Hodgsonia macrocarpa*, Xishuangbanna, SW China. *Plant Diversity and Resources*, 37, 209–213. (in Chinese with English abstract) [王趁, 张玲玲, 王雨华 (2015) 油瓜的民族植物学研究. 植物分类与资源学报, 37, 209–213.]
- Xue DY, Guo L (2009) On concepts and protection of traditional knowledge. *Biodiversity Science*, 17, 135–142. (in Chinese with English abstract) [薛达元, 郭砾 (2009) 论传统知识的概念与保护. 生物多样性, 17, 135–142.]
- Zhang LL, Zhang Y, Pei SJ, Geng YF, Wang C, Wang YH (2015) Ethnobotanical survey of medicinal dietary plants used by the Naxi People in Lijiang area, Northwest Yunnan, China. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 11, 40.
- Zhang LQ, Luo H, Long WJ, Lei YT, Cai Q, Lan M, Zhong L (2014) Survey of agricultural biological resources and traditional knowledge in Hani national minority, Yunnan Province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 30(32), 138–146. (in Chinese with English abstract) [张丽琴, 罗红, 隆文杰, 雷涌涛, 蔡青, 兰梅, 钟利 (2014) 云南哈尼族农业生物资源及传统文化知识调查. 中国农学通报, 30(32), 138–146.]
- Zhang Y, Geng YF, Zhang LL, Wang L, He LJ, Wang C, Chai ZZ, Fan RY, Li S, Wang YH (2015) Finding new sources from “using different plants as the same herb”: A case study of Huang-lian in Northwest Yunnan, China. *Journal of Ethnopharmacology*, 169, 413–425.

(责任编辑: 龙春林 责任编辑: 周玉荣)



•保护论坛•

“2020年后全球生物多样性框架”的谈判进展 以及对我国的建议

刘文静 徐靖* 耿宜佳 田瑜 银森录

(中国环境科学研究院生物多样性研究中心, 北京 100012)

摘要: “2020年后全球生物多样性框架”是当前《生物多样性公约》谈判的焦点议题, 了解该议题的谈判进展将对我国顺利举办第15次缔约方大会(COP15)产生积极的作用。本文在梳理相关谈判进程的基础上, 分析了各方主要观点, 并就我国应对国际谈判并以东道国身份推进该框架的制定进程提出了建议。各方对制定框架的时间表、程序和一般性原则形成了较为一致的共识, 认为应尽快确定“2020年后全球生物多样性框架”的程序及时间表, 基于“爱知生物多样性目标”的执行经验、科学结论和广泛的信息来源, 与“可持续发展目标”及其他国际进程衔接, 重视利用情景和模型, 并支持更多利益相关方参与制定过程。同时, 各方认为框架应主要包括土地利用、保护和恢复生物多样性的措施、解决生物多样性丧失的根本原因、主流化、能力建设、资源调动、国家承诺等要素。为应对国际谈判, 建议我国在《公约》谈判会议中适时提出以下观点: 重视实现可持续利用相关的目标; 提升评估指标体系的合理性; 科学制定措施。此外, 建议我国采取以下措施积极推进框架制定进程: 充分利用国际高级别会议, 提升政治重视程度; 积极与主要国际进程协作, 推进该框架深入讨论; 重视调动利益相关方积极性。

关键词: 生物多样性战略计划; 第15次缔约方大会(COP15); 爱知生物多样性目标; 可持续发展目标

Progress in negotiations on the Post-2020 Global Biodiversity Framework and suggestions for Chinese government

Wenjing Liu, Jing Xu*, Yijia Geng, Yu Tian, Senlu Yin

Biodiversity Research Center, Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

Abstract: The Post-2020 Global Biodiversity Framework is currently the focus of negotiation at the Convention on Biological Diversity. Understanding the progress of the negotiation will have a positive impact on the success of the 15th Conference of the Parties (COP15) which will be held in China. Based on the progress of the negotiation, this paper analyzes the views of the main parties involved and makes suggestions to the government of China on how to prepare for international negotiations and promote the development of the framework as the host country. Results show that the main parties involved have reached a relatively unanimous consensus on timetable, procedures and general principles for the formulation of the framework. They believe that the procedures and the timetable for the Post-2020 Global Biodiversity Framework should be confirmed as soon as possible. Additionally, the main parties have expressed the following views on the formulation of the framework. Firstly, the framework should be based on experience gained by implementation of the Aichi Biodiversity Target, scientific conclusions and extensive sources of information. Secondly, negotiation should be linked with the Sustainable Development Goals and other international processes. Thirdly, scenarios and models should be used. Fourthly, support should be extended for more stakeholders' participation in the formulation process. Involved parties also believe that the framework should mainly include land use, measures to protect and restore biodiversity, address underlying causes of biodiversity loss, mainstreaming, capacity building, resource mobilization, and national commitments. In order to prepare for international negotiations, it is suggested that China put forward the following viewpoints at the conferences of the convention on negotiations in a timely manner: accord importance to achieving the goals on sustainable

收稿日期: 2018-07-05; 接受日期: 2018-08-14

基金项目: 生态环境部生物多样性国际合作及履约项目(2024004093)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xujing263@163.com

use; improving the rationality of the evaluation index system; making measures scientific. In addition, it is suggested that China should promote the development of the framework by making full use of the international high-level meeting to increase political attention to the framework, actively collaborate with major international processes to promote in-depth discussion of the framework, and make it a priority to mobilize the enthusiasm of stakeholders.

Key words: The Strategic Plan for Biodiversity; The Fifteenth Meeting of the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity; Aichi Biodiversity Target; Sustainable Development Goal

《生物多样性公约》(以下简称《公约》)第15次缔约方大会(COP15)将于2020年在中国举办。COP15将在评估《2011–2020生物多样性战略计划》(以下简称《战略计划》)执行情况基础上,审议通过“2020年后全球生物多样性框架”(以下简称“2020后框架”)。“2020后框架”将接替《战略计划》及其“爱知生物多样性目标”(薛达元,2017),成为指导2020年之后全球生物多样性保护的最新纲领性文件。

目前全球生物多样性保护形势依旧严峻(SCBD,2014; UNEP/CBD/SBSTTA/22/5,2018),各方对“2020后框架”寄予厚望。“2020后框架”的制定成为《公约》谈判的焦点议题,国际社会已经组织了多次会议就此展开讨论^①。这些磋商会议系统梳理了全球生物多样性保护的现状及未来需要采取的行动,初步形成了制定“2020后框架”的思路,是指导未来框架制定工作的主要理论依据。

有学者分析了包括《公约》在内的全球主要多边环境协定的发展趋势,认为《公约》应与《巴黎协定》等国际公约加强协同增效,在全球环境治理的浪潮中发挥优势(李宏涛等,2017)。还有学者分析了我国举办COP15的内在动因与收益,认为我国在2020年的特殊时间节点举办COP15,可以实现生态环境外交由被动到主动、由内向到外向的转型,与世界共谋全球生态文明建设之路(邹玥屿等,2017)。

本文在梳理分析各方主要观点基础上,提出了“2020后框架”可能包含的要素,对其制定进程进行了展望,并就我国推进该框架的制定进程提出了建议,以便为我国顺利举办COP15提供参考。

1 谈判进程梳理

1.1 COP13

2016年12月,《公约》第13次缔约方大会

(COP13)决定(UNEP/CBD/DEC/XIII/1,2016)启动制定“2020后框架”的工作。该会议请执行秘书与主席团协商,为《2011–2020年生物多样性战略计划》后续工作的筹备进程及时间表编写提案,供执行问题附属机构第二次会议(Subsidiary Body on Implementation, SBI2)审议。

1.2 《公约》科学咨询附属机构第21次会议

2017年12月,《公约》科咨附属机构第21次会议(Subsidiary Body on Scientific Technical and Technological Advice, SBSTTA21)在《公约》秘书处驻地加拿大蒙特利尔召开,这是COP13启动“2020后框架”制定工作后召开的首次国际会议,《公约》各缔约方均派出国家代表团参会。会议第3项议程项目(UNEP/CBD/SBSTTA/21/2,2017; UNEP/CBD/SBSTTA/21/2/Add.1,2017)审议了“2050年生物多样性愿景情景及“爱知生物多样性目标”与“可持续发展目标”之间的联系”。同时,《公约》秘书处编写了4份信息文件(UNEP/CBD/SBSTTA/21/INF/2/Rev.1,2017; UNEP/CBD/SBSTTA/21/INF/3/Rev.1,2017; UNEP/CBD/SBSTTA/21/INF/4/Rev.1,2017; UNEP/CBD/SBSTTA/21/INF/18/Rev.1,2017),深入分析了“2050年愿景”的情景与制定“2020后框架”的相关性,为SBSTTA21讨论“2050年愿景”与“2020后框架”的联系提供了科学证据。

文件指出,“2050年愿景”的各个要素体现了保护生物多样性长期目标的实质,2020年之后仍然具有重要意义,可以为制定“2020后框架”提供有价值的参考。同时,文件指出《2030年可持续发展议程》与生物多样性密切相关,许多“可持续发展目标”都可以与生物多样性产生联系,所有目标都必须适当考虑生物多样性,明确提出如果生物多样性未得到适当考虑,将无法实现《2030年可持续发展议程》的目标。此外,文件强调“2050年愿景”对《2030年可持续发展议程》有补充作用,且总体目标一致。

^① 《公约》缔约方大会第13次会议;《公约》科学咨询附属机构第21、22次会议;《公约》执行问题附属机构第2次会议;《公约》秘书处组织的两次国际生物多样性对话会;欧盟和联合国环境署生物多样性监测中心分别举办的生物多样性国际研讨会。

1.3 国际生物多样性对话会

《公约》秘书处分别于2017年11月和2018年3月在瑞士博吉博塞举行了两次国际生物多样性对话会,中国、墨西哥、埃及、生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)秘书处、联合国环境署、世界自然保护联盟、全球环境基金、《公约》主席团成员国代表及其他相关国际组织参会。对话会探讨了生物多样性管理转型变革的可能性,为制定“2020后框架”奠定了理论基础。会议报告作为信息文件(UNEP/CBD/SBSTTA/21/INF/19, 2017; UNEP/CBD/SBI/2/INF/35, 2018)供SBSTTA21、SBI2参考。

会议认为,《战略计划》及其“爱知生物多样性目标”的实现情况并不理想,主要原因包括:(1)目标方面,《战略计划》与“可持续发展目标”脱节;(2)技术方面,农林牧渔等生物多样性密切相关的行业缺乏可持续利用和生产的技術;(3)意识方面,各方意识仍淡薄,决策者、各部门、企业及消费者的意识仍不足,缺乏执行《公约》的政治意愿及政策制定和落实的动力。

1.4 有效利用知识信息制定“2020后框架”的研讨会

2018年4月联合国环境署生物监测中心组织举办了关于有效利用知识信息的研讨会,探讨了制定“2020后框架”可能的信息来源,会议报告作为信息文件(UNEP/CBD/SBSTTA/22/INF/31, 2018; UNEP/CBD/SBI/2/INF/33, 2018)供SBSTTA22参考。

会议认为,制定“2020后框架”所需的证据类型包括:(1)有助于引导实现或远离“2050年愿景”路径的证据;(2)有助于确定实现这些路径所需规模和可能政策组合的证据;(3)有助于确定最有效执行这些政策工具的证据;(4)有助于确定能够激励使用这些政策和干预措施的证据;(5)有助于确定相关监测、报告和核查框架的证据。

1.5 SBI2

2017年6月和12月,《公约》秘书处编制了《“2020后框架”的筹备方法》(SCBD, 2017a)和《关于编制“2020后框架”的全面和参与性进程的建议》(SCBD, 2017b)两份文件,在征求多个缔约方和相关组织意见基础上(SCBD, 2018),编制了供SBI2审议的提案(UNEP/CBD/SBI/2/17, 2018)。2018年7月,SBI2审议了关于“2020后框架”综合和参与性筹备

进程的提案,并建议于今年11月召开的COP14通过该提案。

《公约》秘书处的提案中列出了拟订“2020后框架”的拟议程序,即(1)总体原则:参与性;包容性;综合性;基于科学;透明性;迭代性;(2)活动:各方定期提交意见;全球和区域研讨会;第三方组织会议;高级别会议;其他相关会议;公众参与;(3)关键信息来源:《公约》及其议定书的國家报告;信息交换机制;国家生物多样性战略和行动计划(NBSAPs);缔约方和观察员的意见;第五版《全球生物多样性展望》;IPBES全球和区域评估报告;科学文献;为《公约》及其议定书会议和附属机构会议编写的相关文件;(4)监督和透明度:主席团监督该框架的筹备和执行进度,并在《公约》官方网站进行专题公布;《公约》附属机构将在提交COP15审议之前审查相关文件。

1.6 SBSTTA22

与SBI2同时召开的SBSTTA22审议了对特定爱知生物多样性指标进展情况的最新科学评估和加速进展的备选方案(UNEP/CBD/SBSTTA/22/5)。文件通过更新评估指标,对“爱知生物多样性目标”的执行进展进行了总结,为制定“2020后框架”提供了有益的经验。

会议认为,全球生物多样性持续减少,给人类福祉带来消极影响,急需采取有效行动降低生物多样性丧失的速度。其中,解决导致生物多样性丧失的根本原因、加大生物多样性主流化的力度、考虑政策的影响等是采取行动面临的重要挑战。总体而言,需要改变社会与生物多样性联系和互动的方式,寻找协调一致的方法推行积极的社会变革,共同应对全球生物多样性面临的挑战。

1.7 其他会议

欧盟先后组织了两次重新思考生物多样性管理的网络会议,欧盟各国及我国专家代表参加了会议,对全球生物多样性面临的挑战、《战略计划》的局限性及“2020后框架”的可选方案进行了讨论。会议认为,全球生物多样性面临的挑战包括:加强《公约》下监测和报告系统建设、政策和科学交流、推动商界参与和学习《联合国气候变化框架公约》及《巴黎协定》的经验教训。《战略计划》的局限性主要有:未聚焦《公约》三大目标、未调动其他利益相关方尤其是企业的参与、未体现与人类福祉

的联系、未形成有效的保障措施等。会议还提出了三个“2020后框架”的可选方案：一是保留现有计划，仅对其进行微调；二是制定更加宏大的目标；三是进行转型性变革。

2018年3月，IPBES第6次全体会议通过的区域评估和土地退化专题评估报告(IPBES, 2018a, b, c, d, e)指出，生产、加工、贸易和消费是导致生物多样性丧失的重要间接驱动力，为“2020后框架”可能包含的要素提供了重要的科学信息。评估报告提示《公约》保护目标应该重视解决导致生物多样性丧失的间接压力，增强“2020后框架”各项措施的针对性，克服《战略计划》及其目标实施成效差的弊端。

2 观点综述

经过近一年的讨论，各方对制定“2020后框架”的筹备进程、内容和要素等问题形成了初步观点。

2.1 制定“2020后框架”的筹备进程

“2020后框架”制定工作启动以来，各方对制定新框架的筹备方案提出了建议。英国、国际大会及会议协会(ICCA)、国际鸟类联盟建议发布制定“2020后框架”的相关程序、措施以及包括各方参与的时间表，墨西哥认为应举办专家会议，马达加斯加建议在大会前组织国家间以及利益相关方协商，世界卫生组织建议召开跨部门联络小组会议，联合国环境署则建议尽快组建技术专家组。

2.2 制定“2020后框架”的一般性原则

哥伦比亚、多哥强调新框架应与原框架保持延续性，欧盟、德国、印度等缔约方认为框架的总体目标应该明确，设计简洁，重点突出，并且基于“2050年愿景”和最新科学研究成果。同时，欧盟认为新框架需要考虑“自下而上”的制度设计并纳入可量化指标，匈牙利、奥地利、乌干达提出将《公约》及其议定书进行整合，IPBES、欧盟等认为应加强生物多样性与社会经济目标的联系，世界自然保护联盟及大多数国家支持考虑生产部门对生物多样性保护和可持续利用的影响，哥伦比亚、国际鸟类联盟建议制定新框架的信息来源要广泛，法国、新西兰等很多缔约方和国际组织提出应该支持更多的利益相关方参与“2020后框架”的制定。此外，多数缔约方认为应借鉴气候变化的情景和模型，提出可量化、可考核的目标。

2.3 与其他相关国际公约衔接

SBSTTA21会议期间，包括IPBES、欧盟、墨西哥和中国等缔约方在内的有关各方一致认为，“2050年愿景”与“可持续发展目标”有密切联系，考虑到“可持续发展目标”具有综合性和不可分割性，其生物多样性保护目标应当与其他社会经济目标一同实现。此外，巴西、玻利维亚等提出重点与《联合国气候变化框架公约》、《粮食和农业植物遗传资源国际条约》、《联合国海洋法公约》、《移徙物种公约》、《联合国防治荒漠化公约》等国际进程衔接，并与IPBES、联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)、联合国粮食与农业组织等国际组织密切联系。

2.4 “2020后框架”可能包含的要素

(1)国家承诺。大多数欧洲缔约方和其他发达国家表示支持国家承诺，但需要明确细节问题。如日本认为应该修订NBSAPs后再做出国家承诺，比利时认为国家承诺应基于COP14提出的全球目标，瑞典和欧盟则提出需要明确国家承诺的时间节点，同时欧盟认为缔约方提出的国家承诺应在NBSAPs下进行同行评议。此外，英国认为国家承诺兼具优劣双面，需权衡利弊后谨慎行事。

(2)应对措施。根据IPBES评估结论(IPBES, 2018a)，应对措施包括：加强国内土地退化防治政策与工作的协同增效；改变自然资源利用方式；改造全球供应链，抑制或改变不可持续的生产与消费；取消助长土地退化的不当激励措施，制定积极的激励措施鼓励可持续管理土地；制定包括农业、林业、能源、水资源、基础设施、财政在内的综合性土地退化治理计划；减少人类建成区生态足迹。作为联合国系统发布的科学评估报告，《土地退化与恢复专题评估报告》极有可能被《公约》缔约方作为制定“2020后框架”具体指标的重要参考。

(3)保障措施。发展中国家强调能力建设和资源调动的重要性，其中，伊朗建议加强能力建设培训，马来西亚建议制定生物安全能力建设方案，乌干达等国强调“2020后框架”应当有助于发展中国家的能力和机构建设，古巴则建议加强科学界与缔约方及缔约方之间的科技合作。欧盟则建议优化资金配置，提高资金使用效率。

2.5 小结

各方对制定“2020后框架”的筹备进程和一般性

原则形成了较为一致的共识,认为应尽快确定“2020后框架”的程序及各方参与的时间表,基于“爱知生物多样性目标”的执行经验、科学结论和广泛的信息来源,与“可持续发展目标”及其他国际进程衔接,重视利用情景和模型,并支持更多利益相关方参与制定过程。同时,各方初步表达了“2020后框架”可能包含的要素,主要包括土地利用、保护和恢复生物多样性的措施、解决生物多样性丧失的根本原因、主流化、能力建设、资源调动、国家承诺等。

3 展望与建议

“2020后框架”关系到我国未来生物多样性保护工作的开展,同时也是COP15的重要成果,该框架能否得到缔约方的一致认可并在会上顺利通过,直接关系到我国能否在保障国家利益的基础上顺利完成举办COP15的任务。本文对“2020后框架”的谈判进程进行展望并在此基础上提出对策建议。

3.1 谈判进程展望

现阶段各国对“2020后框架”的制定有了初步的想法,SBI2 (UNEP/CBD/SBI/2/L.11, 2018)要求执行秘书邀请各缔约方、其他国家政府、土著人民和地方社区、相关国际组织、民间社会组织、妇女和青年组织、私营和金融部门以及其他利益相关方于2018年8月15日前提交关于筹备进程的意见,包括加强执行工作、促进承诺和增强政治氛围的备选办法。同时,该文件要求执行秘书邀请各方于12月15日前提交对“2020后框架”范围和要素的意见,包括为实现“2050年愿景”所需行动的规模和范围的科学基础以及“2020后框架”的可能结构。

COP14之后,全球各方将就“2020后框架”的内容正式开展密集的谈判,将依托高级别会议,全球、区域、次区域、双边及专题磋商,在线论坛,同行评议等活动推进“2020后框架”的制定进程,不排除还会产生其他新观点的可能性。

其中,2018年至2020年召开的联合国可持续发展政策高级别论坛、联合国大会期间召开的领导人峰会以及随后召开的G20峰会将从高级别政治层面推动“2020后框架”的制定工作,建立良好的政治势头。与此同时,《公约》秘书处将举办多个全球和区域层面的磋商会议,并组织开展在线论坛等活动,是逐步完善“2020后框架”内容的重要途径,也是各

个利益相关方参与制定“2020后框架”的主要方式。

3.2 对“2020后框架”编制的建议

(1)重视实现可持续利用相关的目标。“2020后框架”编制过程中,应充分重视IPBES有关评估结论,注重解决导致生物多样性丧失的间接驱动力的问题,如因生产、加工、贸易和消费导致生物多样性的过度利用,这些因素与全球供应链密切相关。

(2)提升评估指标体系的合理性。“2020后框架”的目标及其评估指标体系应同时制定、完善和通过。在指标制定过程中,对于濒危物种数量、受保护区域面积、人均生态足迹、保护资金投入等能够量化评估的指标,建议综合考虑可操作性和有效性,确定评估基线和鼓励线,为将来开展实施成效评估奠定基础。对于保护政策、意识提升及公众参与等不可量化指标,建议构建指示性指标体系,明确政策方向和实现路径。

(3)科学制定措施。目前,IPBES已经发布了欧洲、美洲、非洲及亚太四大区域评估和土地退化专题评估成果,全球生物多样性评估也将于2019年予以通过。这些报告通过设置社会经济发展情景,运用模型对生物多样性变化趋势进行预测,并提出了政策建议。建议我国在国际谈判中提出充分参考以上《IPBES评估报告》、《政府间气候变化专门委员会评估报告》、《全球环境展望》等全球性报告结论,有针对性地确定“2020后框架”目标及应对措施。

(4)加强保障措施。鉴于能力、技术和资金是目前《战略计划》实施成效的主要限制因素,“2020后框架”应当增强能力建设、技术转让和资源调动的力度,为“2020后框架”的落地提供保障和支持。

3.3 关于我国推进“2020后框架”进程的建议

(1)充分利用国际高级别会议,提升政治层面对该框架的重视程度。建议充分利用联合国大会全体会议、联合国可持续发展政策高级别论坛、联合国环境大会、G20峰会等全球环境与发展治理的重大议程,引导各方达成政治共识。同时邀请欧盟、墨西哥、埃及、印度及南非等成立缔约方联盟,围绕全球自然保护区面积和质量等议题,提出国家自愿承诺,为《公约》第15次缔约方大会的成功举办营造氛围。

(2)积极与主要国际进程协作,推进该框架深入讨论。建议联合国气候变化大会、联合国荒漠化防治大会、联合国海洋大会、全球粮食和农业大会、

世界卫生大会、世界经济论坛及IPBES,继续围绕生物多样性与气候变化、土地退化、粮食安全、人类健康、社会经济的关系展开讨论,就“2020后框架”的制定提出建议。

(3)重视调动利益相关方积极性。“2020后框架”应广泛邀请企业、科研机构、非政府组织、土著人民和地方社区及公民社团等利益相关方积极参与,增强各方对“2020后框架”的归属感,调动和激发其对生物多样性保护的积极性。

参考文献

- IPBES (2018a) Summary for Policymakers of the Assessment Report on Land Degradation and Restoration of the Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat, Bonn, Germany.
- IPBES (2018b) Summary for Policymakers of the Regional Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services for Europe and Central Asia of the Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat, Bonn, Germany.
- IPBES (2018c) Summary for Policymakers of the Regional Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services for the Americas of the Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn, Germany.
- IPBES (2018d) Summary for Policymakers of the Regional Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services for Asia and the Pacific of the Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat, Bonn, Germany.
- IPBES (2018e) Summary for Policymakers of the Regional Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services for Africa of the Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat, Bonn, Germany.
- Li HT, Wen YY, Du X, Yang XH (2017) Enlightenment on the dynamic and developing trend of multilateral environmental agreements in 2016. *Environmental Protection*, 45(8), 74–78. (in Chinese with English abstract) [李宏涛, 温源远, 杜让, 杨晓华 (2017) 2016年全球主要多边环境协定动态、发展趋势及对我国履约的启示. *环境保护*, 45(8), 74–78]
- SCBD (Secretariat of Convention on Biological Diversity) (2014) Global Biodiversity Outlook 4. Montreal.
- SCBD (Secretariat of Convention on Biological Diversity) (2017a) Approaches for the Preparation of the Post-2020 Biodiversity Framework. <https://www.cbd.int/post2020/doc/Approaches-Post2020Biodiversity.pdf>. (accessed on 2018-04-11)
- SCBD (Secretariat of Convention on Biological Diversity) (2017b) Proposals for a Comprehensive and Participatory Process for the Preparation of the Post-2020 Biodiversity Framework. <https://www.cbd.int/doc/strategic-plan/Post2020/post2020-process-draft-en.pdf>. (accessed on 2018-04-11)
- SCBD (Secretariat of Convention on Biological Diversity) (2018) Submissions from Parties, Other Governments, Relevant Organizations and Indigenous Peoples and Local Communities on the Preparations for the Post-2020 Biodiversity Framework. <https://www.cbd.int/post2020/submissions.shtml>. (accessed on 2018-04-11)
- UNEP/CBD/DEC/XIII/1 (2016) Follow-up to the Strategic Plan for Biodiversity 2011–2020. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-13/cop-13-dec-01-en.pdf>. (accessed on 2017-12-18)
- UNEP/CBD/SBI/2/17 (2018) Proposals for a Comprehensive and Participatory Process for the Preparation of the Post-2020 Global Biodiversity Framework. <https://www.cbd.int/doc/c/cde0/fa18/7681b85be1ed441f18ae0c97/sbi-02-17-en.pdf>. (accessed on 2018-03-30)
- UNEP/CBD/SBI/2/INF/35 (2018) Executive Summary of the Report of the Second Bogis-Bossey Dialogue for Biodiversity. <https://www.cbd.int/doc/c/f3ea/73fd/a40b0ec9597f284-fcd9cf157/sbi-02-inf-35-en.pdf>. (accessed on 2018-06-21)
- UNEP/CBD/SBI/2/L.11 (2018) Proposals for a Comprehensive and Participatory Process for the Preparation of the Post-2020 Global Biodiversity Framework. Draft Recommendation Submitted by the Chair. <https://www.cbd.int/doc/c/c7be/a050/60bd5412bc26741309f717f1/sbi-02-l-11-en.pdf>. (accessed on 2018-07-19)
- UNEP/CBD/SBSTTA/21/2 (2017) Scenarios for the 2050 Vision for Biodiversity. <https://www.cbd.int/doc/c/4a22/3eba/a499b54091a1c1e22bb7b54e/sbstta-21-02-en.pdf>. (accessed on 2017-12-01)
- UNEP/CBD/SBSTTA/21/2/Add.1 (2017) Biodiversity and the 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://www.cbd.int/doc/meetings/sbstta/sbstta-21/official/sbstta-21-02-add1-en.pdf>. (accessed on 2018-10-10)
- UNEP/CBD/SBSTTA/21/INF/18/Rev.1 (2017) Multiscale, Cross-Sectoral Scenarios for Nature Futures: The Positive Visions for Biodiversity, Ecosystem Services, and Human Well-Being. <https://www.cbd.int/doc/c/6629/4971/9d1ca3946dc9ff171669aac1/sbstta-21-inf-18-rev1-en.pdf>. (accessed on 2017-12-10)
- UNEP/CBD/SBSTTA/21/INF/19 (2017) Executive Summary of the Report of the Bogis-Bossey Dialogue for Biodiversity. <https://www.cbd.int/doc/c/9275/a98b/ed07b3d583d07a51860c9111/sbstta-21-inf-19-en.pdf>. (accessed on 2017-12-10)
- UNEP/CBD/SBSTTA/21/INF/2/Rev.1 (2017) Review of Future Projections of Biodiversity and Ecosystem Services. <https://www.cbd.int/doc/c/8e8b/abb0/661ae0c223d3f6639766cf7c/sbstta-21-inf-02-rev1-en.pdf>. (accessed on 2017-12-10)
- UNEP/CBD/SBSTTA/21/INF/3/Rev.1 (2017) Use of Biodiversity Scenarios at Local, National and Regional Scales. <https://www.cbd.int/doc/c/dd4c/b672/ec90c3879105e1d699>

- 8ed077/sbstta-21-inf-03-rev1-en.pdf. (accessed on 2017-12-10)
- UNEP/CBD/SBSTTA/21/INF/4/Rev.1 (2017) Summary of the Shared Socioeconomic Pathways. <https://www.cbd.int/doc/c/cf9f/904d/97cd9128b5a272523f8bc5bd/sbstta-21-inf-04-rev1-en.pdf>. (accessed on 2017-12-10)
- UNEP/CBD/SBSTTA/22/5 (2018) Updated Scientific Assessment of Progress Towards Selected Aichi Biodiversity Targets and Options to Accelerate Progress. <https://www.cbd.int/doc/c/c75f/06b1/6fc465496044698feacc47ba/sbstta-22-05-en.pdf>. (accessed on 2018-05-06)
- UNEP/CBD/SBSTTA/22/INF/31, UNEP/CBD/SBI/2/INF/33 (2018) Effective use of knowledge in developing the post-2020 global biodiversity framework. <https://www.cbd.int/doc/c/a243/1d4d/667748f0fd8a2a7ff805267e/sbstta-22-inf-31-en.pdf>. (accessed on 2018-06-16)
- Xue DY (2017) The latest development for implementation of the Convention on Biological Diversity. *Biodiversity Science*, 25, 1145–1146. (in Chinese) [薛达元 (2017) 《生物多样性公约》履约新进展. 生物多样性, 25, 1145–1146.]
- Zou YY, Fu YL, Yang LR, Wan XL, Wang Y, Liu JX (2017) China and COP 15: A path for responsible environmental power. *Biodiversity Science*, 25, 1169–1175. (in Chinese with English abstract) [邹玥屿, 傅钰琳, 杨礼荣, 万夏林, 王也, 刘纪新 (2017) 中国与COP15——负责任环境大国的路径选择. 生物多样性, 25, 1169–1175.]

(责任编辑: 薛达元 责任编辑: 时意专)