



•研究报告•

黄河兰州段鱼类多样性与保护

陈召松^{ID 1,2}, 安蓓^{ID 2,3}, 王子旺^{ID 4,5}, 吴发宁^{ID 1}, 孙章运^{ID 1}, 张立勋^{ID 1,2*}

1. 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学榆中山地生态系统野外科学观测研究站, 兰州 730000; 3. 兰州大学基础医学院, 兰州 730000; 4. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 5. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 兰州市是黄河唯一穿城而过的省会城市, 是黄河流域综合治理与高质量发展的重要区域, 了解其鱼类多样性现状及变化趋势对黄河流域水生态保护尤为重要。本文于2020年7–10月对黄河干流兰州段及其4条支流(庄浪河、大通河、湟水河和宛川河)开展了鱼类多样性、分布及影响因素调查, 以Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数、Simpson优势度指数、Cody和Routledge指数、Bray-Curtis相异性系数对黄河兰州段5条河流鱼类群落进行评估, 同时通过相对多度(relative abundance, RA)判定优势种, 利用非度量多维标度排序(non-metric multidimensional scaling, NMDS)展示物种空间分布格局。本次调查获得鱼类20种, 隶属于4目6科15属。其中, 国家II级重点保护野生动物1种, 受威胁鱼类4种, 中国特有鱼类7种, 黄河特有鱼类4种。区系组成属青藏高原区高原西北亚区, 其中鲤形目种类占绝对优势, 优势种为东方高原鳅(*Triplophysa orientalis*)、粗壮高原鳅(*T. robusta*)、鲫(*Carassius auratus*)和麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)。庄浪河和黄河干流的 α 多样性较高。 β 多样性分析结果表明, 黄河干流与庄浪河、大通河、湟水河和宛川河间的鱼类物种明显不相似; 大通河与湟水河之间以及黄河干流与宛川河之间的鱼类物种组成相似性较高。NMDS分析表明, 黄河兰州段鱼类被划分为地理空间上相近的4个地理群。水利设施建设、外来物种和水体污染可能影响了黄河兰州段鱼类多样性和分布。本研究为黄河兰州段鱼类多样性保护和科学管理以及黄河流域生态保护和高质量发展提供了基础调查数据。

关键词: 黄河兰州段; 鱼类; 多样性; 保护与管理

陈召松, 安蓓, 王子旺, 吴发宁, 孙章运, 张立勋 (2021) 黄河兰州段鱼类多样性与保护. 生物多样性, 29, 1658–1672. doi: 10.17520/biods.2021199.
Chen ZS, An B, Wang ZW, Wu FN, Sun ZY, Zhang LX (2021) Fish diversity and conservation in the Lanzhou reach of the Yellow River. Biodiversity Science, 29, 1658–1672. doi: 10.17520/biods.2021199.

Fish diversity and conservation in the Lanzhou reach of the Yellow River

Zhaosong Chen^{ID 1,2}, Bei An^{ID 2,3}, Ziwan Wang^{ID 4,5}, Faning Wu^{ID 1}, Zhangyun Sun^{ID 1}, Lixun Zhang^{ID 1,2*}

1 School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Yuzhong Mountain Ecosystems Observation and Research Station, Lanzhou University, Lanzhou 730000

3 School of Basic Medical Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

4 Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

ABSTRACT

Aim: Lanzhou is the only provincial capital city that the Yellow River passes through. It has played an important role in comprehensive management and high-quality development of the Yellow River basin. It is necessary to understand the status of and changes in fish species diversity to protect this aquatic ecosystem in the future.

Methods: To comprehensively document the pattern of fish diversity in the Lanzhou reach of the Yellow River, we probed the distribution of fish species using field surveys from July to October in 2020. The indices of Shannon-Wiener, Pielou, Simpson, Cody, Routledge, and Bray-Curtis were applied to evaluate the main streams and four tributaries in Lanzhou County. Relative abundance (RA) was calculated to determine the dominant species, and non-metric multidimensional scaling (NMDS) was used to show the spatial distribution pattern of the species.

Results: A total of 20 species, including four threatened species, one national class II protected wildlife species, seven Chinese endemic fish species, and four of the Yellow River's endemic fish species were collected. These species

收稿日期: 2021-05-19; 接受日期: 2021-07-10

基金项目: 兰州市县域生物多样性调查项目和兰州市陆生野生脊椎动物资源调查项目

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

belonged to 15 genera, 6 families, and 4 orders. *Triplophysa orientalis*, *T. robusta*, *Carassius auratus* and *Pseudorasbora parva* are the dominant fish species in this area. The fish fauna was dominated by fishes that are widespread in the Northwest Qinghai-Tibetan subregion. Omnivorous, demersal, and settlement fish were the predominant ecological types. Also, the Zhuanglang River and the Yellow River had a higher diversity of fish species than the Datong River and the Wanchuan River. The beta diversity analysis showed that the habitats of the Yellow River were different from those of the Zhuanglang River, the Datong River, the Huangshui River and the Wanchuan River, and that the fish species differentiated somewhat in these rivers. Moreover, the fish composition dissimilarity between the Zhuanglang River, the Yellow River, the Huangshui River, and the Wanchuan River was high. The NMDS method was applied to the collected data and four separate groups with small geographic distance were identified.

Conclusion: Water conservancy facilities construction, alien fish, and water pollution may affect the diversity and distribution of fish in the Lanzhou reach of the Yellow River. This study assessed available baseline information to ensure the protection and scientific management of freshwater fish diversity in the Lanzhou reach of the Yellow River. This information will be useful for the ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin.

Key words: Lanzhou reach of the Yellow River; fish; diversity; protection and management

鱼类是维持淡水生态系统功能的关键类群(Villéger et al, 2017)。近年来,在人类活动和全球气候变化的影响下,淡水鱼类多样性正面临环境退化、栖息地丧失和外来种入侵等多重威胁(Barbarossa et al, 2020; Haubrock et al, 2021; Su et al, 2021)。鱼类多样性的改变与水域生态与环境安全紧密相关,已成为评估淡水生态系统健康的最重要的指标之一(廖静秋和黄艺, 2013)。系统开展鱼类多样性调查,掌握鱼类的现状以及面临的威胁,不仅是保护淡水生态系统的前提,也是区域生物多样性评估的关键指标,而且对于当地今后的发展具有不可估量的生态意义、历史价值和经济效益(Dudgeon et al, 2006; Albert et al, 2021)。

黄河是中华民族的母亲河,保护黄河流域生态环境,事关中华民族伟大复兴的千秋大计。兰州市地处青藏高原东北部和黄河上游水土流失区,是青藏高原向黄土高原的过渡地带,属温带大陆性气候,年平均降水量约300 mm,年平均气温约10.4℃(吴巧娟等, 2021)。兰州市境内河流属于黄河水系,黄河兰州段穿城而过,全长152 km(徐发凯等, 2021),区域范围内沿途接纳了湟水河红古区段、庄浪河永登县段、大通河永登县段以及宛川河榆中县段4条支流。

近年来,随着社会经济的发展,黄河流域生态环境受到严重影响,鱼类多样性和群落结构发生了变化。黄河流域鱼类多样性研究始于20世纪30年代,已知黄河流域分布的鱼类共计12目21科78属147种(赵亚辉等, 2020)。目前黄河兰州段鱼类研究主要集中在黄河干流:王香亭等(1956)调查有18种;贾秋

红等(2015)调查有13种;王太等(2015)调查有14种,其他河流仅见一些零星调查,缺乏兰州市水域鱼类系统性调查研究,其物种组成、地理分布及影响因素尚不清楚,制约了当地鱼类资源的开发、利用及保护工作的开展。基于以上研究基础,本研究对黄河兰州段5条河流的鱼类多样性进行系统调查,以期当地鱼类多样性保护和科学管理以及黄河流域生态保护和高质量发展提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 调查区域与时间

为方便统筹保护规划、服务于地方管理,本研究调查范围位于兰州市辖区,调查区域位于35°38′–36°55′N, 102°43′–104°20′E之间,海拔1,404–2,465 m。依据境内各级河流的生境特征,共布设23个采样断面,其中,一级河流黄河布设5个(S1–S5),四级河流大通河布设4个(S6–S9),四级河流湟水河布设3个(S10–S12),五级河流庄浪河布设4个(S13–S16),五级河流宛川河布设7个(S17–S23),区域内各采样断面具体位置见表1和图1所示。采样时间为2020年7–8月(丰水期)和9–10月(平水期)。河流级别的划分依据国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)。

1.2 样品采集与处理

在水流较缓或者较深的水域,采用16孔伞笼(进鱼口宽高深为15 cm × 8 cm × 12 cm)和10节地笼(笼体长宽高为50 cm × 40 cm × 40 cm,进鱼口为20 cm)捕捞小型和底层鱼类、三层刺网(网片为150 cm × 300 cm,网目为1指、3指、5指)捕捞全水

表1 黄河兰州段鱼类采样断面位置信息

Table 1 The coordinates of sections in the Lanzhou reach of the Yellow River

河流 River	河流级别 Order	代号 Code	断面名称 Section name	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	海拔 Altitude (m)
黄河 Yellow River	一级 First	S1	榆中县园子岔乡 Yuanzicha Town, Yuzhong County	36°22′	104°20′	1,404
		S2	皋兰县什川镇1 Shichuan Town 1, Gaolan County	36°17′	104°09′	1,501
		S3	皋兰县什川镇2 Shichuan Town 2, Gaolan County	36°12′	104°03′	1,513
		S4	安宁区刘家堡街道 Liujiabao Street, Anning District	36°06′	103°40′	1,529
		S5	西固区河口镇 Hekou Town, Xigu District	36°10′	103°26′	1,508
大通河 Datong River	四级 Fourth	S6	永登县连城镇1 Liancheng Town 1, Yongdeng County	36°45′	102°43′	1,966
		S7	永登县连城镇2 Liancheng Town 2, Yongdeng County	36°39′	102°46′	1,904
		S8	永登县连城镇3 Liancheng Town 3, Yongdeng County	36°32′	102°52′	1,867
		S9	永登县河桥镇 Heqiao Town, Yongdeng County	36°27′	102°51′	1,822
湟水河 Huangshui River	四级 Fourth	S10	红古区海石湾镇 Haishiwan Town, Honggu District	36°20′	102°50′	1,680
		S11	红古区红古镇 Honggu Town, Honggu District	36°13′	103°01′	1,624
		S12	红古区达川乡 Dachuan Town, Honggu District	36°07′	103°21′	1,547
庄浪河 Zhuanglang River	五级 Fifth	S13	永登县武胜驿镇 Wushengyi Town, Yongdeng County	36°55′	103°08′	2,280
		S14	永登县柳树镇 Liushu Town, Yongdeng County	36°44′	103°14′	2,025
		S15	永登县龙泉寺镇 Longquansi Town, Yongdeng County	36°36′	103°21′	1,894
		S16	永登县苦水镇 Kushi Town, Yongdeng County	36°22′	103°23′	1,695
宛川河 Wanchuan River	五级 Fifth	S17	榆中县马坡乡 Mapo Town, Yuzhong County	35°46′	104°01′	2,465
		S18	榆中县小康营乡 Xiaokangying Town, Yuzhong County	35°44′	104°08′	2,186
		S19	榆中县龙泉乡 Longquan Town, Yuzhong County	35°38′	104°14′	2,092
		S20	榆中县甘草店镇 Gancaodian Town, Yuzhong County	35°46′	104°18′	1,853
		S21	榆中县夏官营镇 Xiaguanying Town, Yuzhong County	35°57′	104°11′	1,723
		S22	榆中县金崖镇 Jinya Town, Yuzhong County	36°00′	104°06′	1,627
		S23	榆中县来紫堡乡 Laizibao Town, Yuzhong County	36°03′	104°00′	1,461

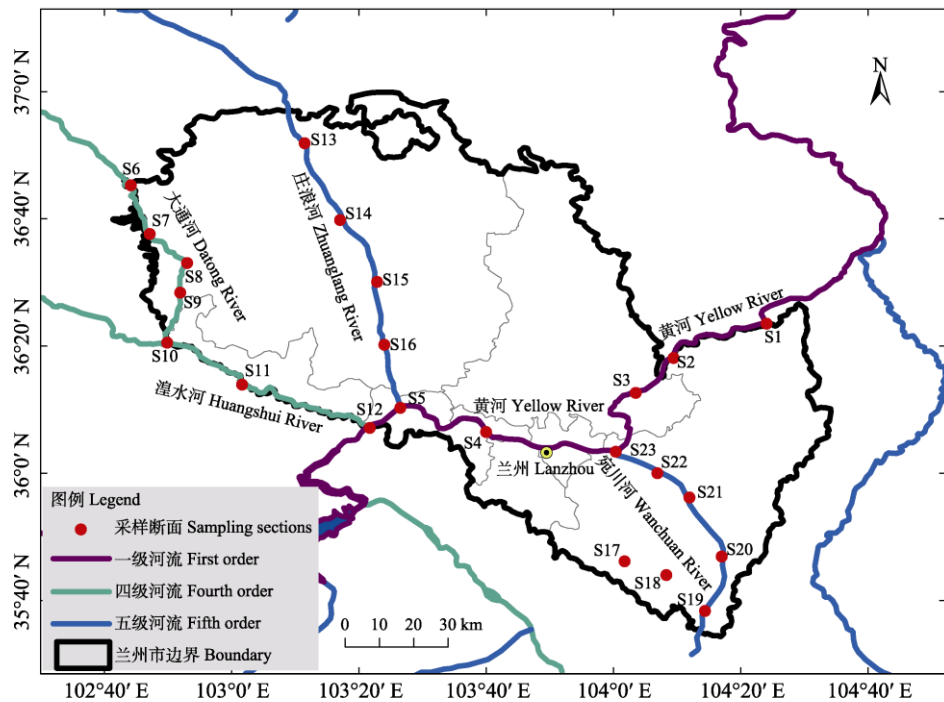


图1 黄河兰州段鱼类采样断面分布图。符号代表含义见表1。

Fig. 1 The map of fish sampling sections in the Lanzhou reach of the Yellow River. Sampling sections code in accordance with Table 1.

层鱼类,在水流较湍急或较浅的水域采取手抄网和手撒网(网目为2 cm)等方法收集鱼类样本。水库的作业方式为前一天下午布设好渔具,第二天上午收取渔获物。河流中的作业方式为当天作业当天收网,作业时间为2–4 h。

所有渔获物现场清洗分类后统计尾数,测量体重(g)和体长(cm),单反相机拍照。选择新鲜且体形完整的15–20尾鱼类用99%无水乙醇固定,带回实验室鉴定和保存,其余个体放归原生境。记录采集地经度、纬度、海拔、采集时间和渔具等信息。

1.3 鉴定方法

采用形态学和DNA条形码相结合的方法对鱼类标本进行鉴定。鱼类物种有效学名和分类地位参考《中国内陆鱼类物种与分布》(张春光和赵亚辉, 2016)。

形态学鉴定主要参考《中国动物志 硬骨鱼纲 鲤形目(中卷)》(陈宜瑜, 1998)、《中国动物志 硬骨鱼纲 鲤形目(下卷)》(乐佩琦, 2000)、《甘肃脊椎动物志》(王香亭, 1991)和《中国条鳅志》(朱松泉, 1989)。

对形态上难以鉴定的高原鳅属(*Triplophysa*)鱼类进行mtDNA *COI*基因序列比对(王太等, 2015)。利用天根生化科技(北京)有限公司生产的基因组DNA提取试剂盒提取DNA, 扩增和测序引物序列均为Fish F1 (5'-TCAACCAACCACAAAGACATTGGCA C-3')和Fish R1 (5'-TAGACTTCTGGGTGGCCAAA GAATCA-3') (Ward et al, 2005)。PCR反应体系如下: 1.0 μL TransStart FastPfu DNA 聚合酶, 4.0 μL 2.5 mM dNTPs, 10.0 μL 5 × TransStart FastPfu Buffer (含Mg²⁺), 上下游引物(10 μM)各1.0 μL, 13.0 μL模板DNA, 重蒸馏水补足至50 μL。PCR产物依托苏州金唯智生物科技有限公司测序及拼接, 采用Sanger双脱氧链终止法进行双向测序。

1.4 数据分析

1.4.1 DNA序列数据分析

用Lasergene软件包中的Seqman pro软件对测序结果中的峰图文件进行序列拼接, 再通过NCBI网站 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) 进行BLAST分析, 确认扩增片段是否为目的基因, 并下载高原鳅属的*COI*序列(附录1), 利用MEGA 7.0软件对实验所获得的*COI*序列与数据库中下载得到的序列分别进行Clustal W多重比对分析, 剪切后获得一致序列, 基

于Kimura 2-parameter模型选择邻接法(neighbor-joining method, NJ)进行分子系统发育树的构建, 系统树中节点支持率采用1,000次的自展重复估计, 其他参数为默认设置。将系统发育树中聚为一支的序列初分为一组(附录2), 结合形态特征进一步确定高原鳅的物种名称。

1.4.2 区系界定、生态类型、保护等级和濒危状况评估

鱼类区系依据He等(2020)的划分标准; 生态类型依据叶富良和张健东(2002)及茹辉军等(2008)的划分标准; 保护等级依据国家重点保护野生动物名录(<https://www.forestry.gov.cn/>)进行评估; 濒危状况依据《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016)和IUCN濒危物种红色名录(IUCN, 2021)进行评估。

1.4.3 α多样性指数

群落α多样性采用Shannon-Wiener多样性指数(H') (Shannon & Weaver, 1949)、Pielou均匀度指数(J) (Pielou, 1975)和Simpson优势度指数(D) (Simpson, 1949)衡量。其中:

$$H' = -\sum P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (2)$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (3)$$

式中, P_i 为群落中第*i*种的个体数占总个体数的比例, S 为群落中的总物种数。用单因素方差分析(one-way ANOVA)解析黄河兰州段不同河流间鱼类物种多样性的差异。

1.4.4 β多样性指数

采用Cody指数(β_c)衡量不同区域间的生境差异和变化(Cody & Diamond, 1975)。

$$\beta_c = (g + 1) / 2 \quad (4)$$

式中, g 表示区域A有, 区域B没有; 1表示区域B有, 区域A没有。

Routledge指数(β_r)表示不同区域间的鱼类分化和隔离程度(Routledge, 1977)。

$$\beta_r = [N^2 / (2r + N)] - 1 \quad (5)$$

式中, N 为A和B两个区域总的鱼类物种数, r 表示A和B两个区域共有的鱼类物种数。

1.4.5 群落结构分析

基于5条河流的鱼类种类和丰度数据, 以Bray-Curtis相异性系数为基础构建河流间的相异性矩阵, 绘制相异矩阵热图分析5条河流间鱼类物种组成的

差异。

以23个采样断面的鱼类种类和丰度数据作为原始数据矩阵,基于相异性矩阵采用非度量多维标度排序(non-metric multidimensional scaling, NMDS)方法对鱼类群落空间分布特征进行聚类与排序。采用应力函数值(stress)来度量NMDS分析结果的拟合优度: $\text{stress} < 0.05$ 拟合极好; $0.05 \leq \text{stress} < 0.1$ 拟合较好; $0.1 \leq \text{stress} < 0.2$ 拟合一般; $0.2 \leq \text{stress} < 0.3$ 拟合较差(王卓等, 2019)。采用单因子相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)对聚类结果进行差异检验。所有统计分析过程通过R软件完成。

选用相对多度(relative abundance, RA)划定群落优势种(喻国庆, 2007)。计算公式:

$$RA = n_i / N \times 100\% \quad (6)$$

式中, n_i 为类群中第*i*种鱼类的个体数, N 为类群中鱼类个体总数。 $RA > 10\%$ 的为优势种; $10\% > RA > 1\%$

的为常见种; $RA < 1\%$ 的为偶见种。

2 结果

2.1 鱼类物种组成

2.1.1 鱼类物种组成

每条河流2次采集所获鱼类物种丰富度变动范围为0–3种, 丰度变动范围为2–31尾。本次调查共采集鱼类标本2,369尾, 经形态和分子鉴定, 隶属于4目6科15属20种(表2)。

从目的种类组成来看, 鲤形目最多, 有3科12属17种, 占总种数的85%, 其次为鲇形目、胡瓜鱼目和鲈形目, 均只有1科1属1种, 各占总种数的5%。从科的组成来看, 鲤科种类最多, 包含9种, 占总种数的45%; 条鳅科次之, 包含6种, 占30%; 花鳅科排名第三, 包含2种, 占10%; 鲇科、胡瓜鱼科和沙塘鳢科均只有1种。从属的组成来看, 高原鳅属物种数

表2 黄河兰州段鱼类名录、分布、生态类型和濒危状况

Table 2 Species composition, distribution, ecological types and endangered status of fish in the Lanzhou reach of the Yellow River

物种 Species	黄河 Yellow River	大通河 Datong River	湟水河 Huang-shui River	庄浪河 Zhuang-lang River	宛川河 Wan-chuan River	土著物种的特有性 Endemic species		生态类型 Ecological types			濒危状况 Endangered status	
						中国特有种 Endemic species to China	黄河特有种 Endemic species to the Yellow River	食性 Feeding habits	栖息水层 Habit characteristics	生活习性 Life habits	Jiang et al IUCN (2016)	(2021)

一 鲤形目 Cypriniformes

(一) 花鳅科 Cobitidae

1. 泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	+		+		+			O	DE	SE	LC	LC
2. 大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus*</i>	+		+		+			O	DE	SE	LC	

(二) 条鳅科 Nemacheilidae

3. 东方高原鳅 <i>Triplophysa orientalis</i>		+	+	+		+		C	DE	MS	LC	LC
4. 黄河高原鳅 <i>Triplophysa pappenheimi</i>	+	+		+		+	+	C	DE	MS	EN	
5. 硬刺高原鳅 <i>Triplophysa scleroptera</i>		+	+	+		+		C	DE	MS	LC	
6. 似鲇高原鳅 <i>Triplophysa siluroides</i>	+					+	+	C	DE	MS	VU	
7. 斯氏高原鳅 <i>Triplophysa stoliczkae</i>				+	+			O	DE	MS	LC	
8. 粗壮高原鳅 <i>Triplophysa robusta</i>				+	+	+		O	DE	MS	LC	

表2 (续) Table 2 (continued)

物种 Species	黄河	大通河	湟水河	庄浪河	宛川河	土著物种的特有性		生态类型	Ecological types		濒危状况	
	Yellow River	Datong River	Huang- shui River	Zhuang- lang River	Wan- chuan River	Endemic species		食性 Feeding habits	栖息水层 Habit characteristics	生活习性 Life habits	Endangered status	
						中国特有种 Endemic species to China	黄河特有种 Endemic species to the Yellow River				Jiang et al (2016)	IUCN (2021)
(三)鲤科 Cyprinidae												
9. 鲮 <i>Hemiculter leucisculus*</i>	+							O	U	DE	LC	LC
10. 鲮 <i>Hypophthalmichthy s nobilis*</i>	+							C	U	M	LC	DD
11. 高体鲫 <i>Rhodeus ocellatus*</i>	+							O	L	SE	LC	DD
12. 棒花鱼 <i>Abbottina rivularis*</i>	+							O	DE	SE	LC	
13. 黄河鲂 <i>Gobio huanghensis</i>	+					+	+	C	DE	M	EN	
14. 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva*</i>	+	+	+	+	+			O	L	MS	LC	LC
15. 鲫 <i>Carassius auratus*</i>	+		+	+	+			O	DE	SE	LC	LC
16. 鲤 <i>Cyprinus rubrofascius</i>	+				+			O	DE	SE	LC	LC
17. 黄河裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis pylzovi</i>	+	+	+	+	+	+	+	O	L	MS	VU	
二 鲇形目 Siluriformes												
(四)鲇科 Siluridae												
18. 鲇 <i>Silurus asotus</i>	+							C	L	SE	LC	LC
三 胡瓜鱼目 Osmeriformes												
(五)胡瓜鱼科 Osmeridae												
19. 池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus*</i>	+							C	U	M	LC	LC
四 鲈形目 Perciformes												
(六)沙塘鳢科 Odontobutidae												
20. 小黄鲈 <i>Micropercops swinhonis*</i>	+				+			C	DE	SE	LC	LC

*外来种; 食性: C: 肉食性; O: 杂食性; 栖息水层: DE: 底层性; L: 中下层性; U: 中上层性; 生活习性: SE: 定居性; M: 洄游性; MS: 山溪性; 濒危状况: EN: 濒危; VU: 易危; LC: 无危; DD: 数据缺乏。
* Exotic species; Feeding habits: C, Carnivorous; O, Omnivorous; Habitat characteristics: DE, Demersal fish; L, Lower layer fish; U, Upper layer fish; Life habits: SE, Settlement fish; M, Migration fish; MS, Mountain streams fish; Endangered categories: EN, Endangered; VU, Vulnerable; LC, Least Concern; DD, Data Deficient.

最多, 共有6种, 占总种数的30%, 其余14属均只包含1种。
从物种分布频度看, 黄河裸裂尻鱼(*Schizopygopsis pylzovi*)和麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)频次最多, 在5条河流中均出现。最少的是似鲃高原鳅

(*Triplophysa siluroides*)、高体鳊 (*Rhodeus ocellatus*)、棒花鱼(*Abbottina rivularis*)、黄河鲂 (*Gobio huanghensis*)、鲮(*Hemiculter leucisculus*)、鲮 (*Hypophthalmichthys nobilis*)、池沼公鱼(*Hypomesus olidus*)和鲇(*Silurus asotus*) 8种鱼类, 仅出现在黄河

干流中。从物种数分布看, 区域内黄河段的鱼类物种数最多, 有16种; 其次为宛川河(9种)、庄浪河(8种)、湟水河(7种); 大通河最少, 仅5种。

2.1.2 区系特征

黄河兰州段的鱼类区系属于青藏高原区高原西北亚区(Northwest Qinghai-Tibetan subregion) (He et al, 2020)。结合历史记录, 黄河兰州段共有21种土著鱼类, 从起源来看(陈宜瑜, 1998), 属于青藏高原类群的鱼类有东方高原鳅(*Triplophysa orientalis*)、黄河高原鳅(*T. pappenheimi*)、硬刺高原鳅(*T. scleroptera*)、似鲃高原鳅、斯氏高原鳅(*T. stoliczkae*)、粗壮高原鳅(*T. robusta*)、厚唇裸重唇鱼(*Gymnodiptychus pachycheilus*)和黄河裸裂尻鱼8种, 占总种数的38.10%; 东亚类群有北方铜鱼(*Coreius septentrionalis*)、似铜鲫(*Gobio coriparoides*)、大鼻吻鲫(*Rhinogobio nasutus*)、圆筒吻鲫(*R. cylindricus*)、平鳍鳅鲇(*Gobiobotia homalopteroidea*)、刺鲫(*Acanthogobio guentheri*)和赤眼鲮(*Squaliobarbus curriculus*) 7种, 占总种数的33.33%; 老第三纪原始类群有泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)、鲤(*Cyprinus rubrofuscus*)、兰州鲃(*Silurus lanzhouensis*)和鲃4种; 北方冷水性类群有东北雅罗鱼(*Leuciscus waleckii*)和黄河鲂2种。

2.1.3 生态类型

从食性类型来看(表2), 黄河兰州段杂食性鱼类最多, 有11种, 占总种数的55%; 肉食性鱼类有9种, 占45%; 未发现植食性鱼类。栖息水层上, 底层鱼类最多, 有13种, 占总种数的65%; 中下层鱼类次之(4种), 占20%; 中上层鱼类最少(3种), 占15%。生活习性上, 定居性鱼类最多(9种), 占总种数的45%; 山溪性鱼类次之(8种), 占40%; 洄游性鱼类最少(3种), 占15%。

2.1.4 特有种和优势种分析

本次调查共采集到11种土著鱼类(表2), 7种为中国特有种(东方高原鳅、黄河高原鳅、硬刺高原鳅、似鲃高原鳅、粗壮高原鳅、黄河鲂、黄河裸裂尻鱼), 占土著鱼类的63.64%, 其中黄河高原鳅、似鲃高原鳅、黄河鲂和黄河裸裂尻鱼4种属于黄河特有种, 占黄河兰州段中国特有种鱼类的57.14%。

区域内黄河干流优势种为高体鲂、鲫(*Carassius auratus*)、麦穗鱼和鳊4种; 大通河优势种为东方高原鳅、硬刺高原鳅、黄河裸裂尻鱼和麦穗

鱼4种; 湟水河优势种为鲫和麦穗鱼2种; 庄浪河优势种为东方高原鳅、硬刺高原鳅、斯氏高原鳅和粗壮高原鳅4种; 宛川河优势种为鲫和麦穗鱼2种。黄河兰州段优势种为东方高原鳅、粗壮高原鳅、鲫和麦穗鱼4种。

2.1.5 保护等级和濒危状况

黄河兰州段有国家Ⅱ级重点保护野生动物1种, 即似鲃高原鳅。在《中国脊椎动物红色名录》中(表2), 被列为受威胁的鱼类有4种, 占总种数的20%, 其中濒危(EN)鱼类有2种, 为黄河高原鳅和黄河鲂; 易危(VU)鱼类有2种, 为似鲃高原鳅和黄河裸裂尻鱼; 无危(LC)鱼类有16种, 占总种数的80%。IUCN濒危物种红色名录评估分析显示(表2), 黄河兰州段无危鱼类有9种, 占总种数的45%; 数据缺乏(DD)鱼类有2种, 占10%; 未评估的鱼类有9种, 占45%。

2.2 多样性分析

2.2.1 α多样性

多样性调查结果显示: Shannon-Wiener多样性指数变化范围为0–2.343, 平均值为0.675, 以黄河采样断面S4最高, 黄河采样断面S3、大通河采样断面S9和宛川河采样断面S19、S20、S21、S22、S23最低; Pielou均匀度指数变化范围为0–1.000, 平均值为0.599, 以湟水河采样断面S11最高, 宛川河采样断面S20、S21、S22最低; Simpson优势度指数变化范围为0–1.000, 平均值为0.482, 以宛川河采样断面S20、S21、S22最高, 黄河采样断面S3、大通河采样断面S9和宛川河采样断面S19、S23最低(表3)。河流变化上, 5条河流间Shannon-Wiener指数、Pielou指数和Simpson指数差异不显著($P > 0.05$), Shannon-Wiener指数最高的是黄河(1.058 ± 0.879), 其次为庄浪河(1.015 ± 0.416)和湟水河(0.743 ± 0.403), 最低的是宛川河(0.245 ± 0.430); Pielou指数最高的是庄浪河(0.772 ± 0.107), 最低的是宛川河(0.298 ± 0.444), 大通河(0.740 ± 0.226)和湟水河(0.678 ± 0.289)较高; Simpson指数最高的是宛川河(0.576 ± 0.449), 庄浪河(0.566 ± 0.199)较高, 其次是黄河(0.448 ± 0.347)和湟水河(0.416 ± 0.251), 最低的是大通河(0.327 ± 0.282) (表3)。整体表明: 黄河是区域内鱼类多样性水平最高的河流, 庄浪河次之, 湟水河排名第三, 大通河排名第四, 宛川河的多样性最低。

表3 黄河兰州段鱼类多样性指数空间分布。断面编号同表1。

Table 3 Spatial distribution of diversity indices in the Lanzhou reach of the Yellow River. Sampling sections code in accordance with Table 1.

河流 River	采样断面 Sampling sections	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	Pielou指数 Pielou index	Simpson指数 Simpson index
黄河 Yellow River	S1	1.101	0.459	0.430
	S2	1.300	0.808	0.679
	S3	0	—	0
	S4	2.343	0.888	0.882
	S5	0.548	0.395	0.248
	河流 River (mean ±SD)	1.058 ±0.879	0.637 ±0.246	0.448 ±0.347
大通河 Datong River	S6	1.048	0.954	0.631
	S7	0.837	0.761	0.478
	S8	0.349	0.503	0.198
	S9	0	—	0
	河流 River (mean ±SD)	0.559 ±0.474	0.740 ±0.226	0.327 ±0.282
湟水河 Huangshui River	S10	0.826	0.596	0.415
	S11	1.099	1.000	0.667
	S12	0.305	0.439	0.165
	河流 River (mean ±SD)	0.743 ±0.403	0.678 ±0.289	0.416 ±0.251
庄浪河 Zhuanglang River	S13	1.431	0.798	0.729
	S14	0.994	0.905	0.605
	S15	1.183	0.735	0.652
	S16	0.451	0.650	0.278
	河流 River (mean ±SD)	1.015 ±0.416	0.772 ±0.107	0.566 ±0.199
宛川河 Wanchuan River	S17	0.689	0.994	0.496
	S18	1.027	0.494	0.536
	S19	0	—	0
	S20	0	0	1.000
	S21	0	0	1.000
	S22	0	0	1.000
	S23	0	—	0
	河流 River (mean ±SD)	0.245 ±0.430	0.298 ±0.444	0.576 ±0.449

2.2.2 β多样性

β_c指数分析结果显示, 黄河与庄浪河、大通河、湟水河和宛川河间的β_c指数较高, 表明黄河与其他4条河流间鱼类的生境差异较大。大通河与庄浪河和湟水河间的β_c指数较低, 说明这些河流间鱼类的生境差异较小。β_r指数分析结果显示, 黄河与庄浪河、大通河、湟水河和宛川河间的β_r指数较高, 黄河与其他4条河流间鱼类物种出现一定的分化现象。大通河与庄浪河和湟水河间的β_r指数较低, 说明这些河流间鱼类物种分化不明显(表4)。

2.3 不同河流鱼类群落的Bray-Curtis相异性

鱼类物种组成的差异性分析(图2)显示, 大通

河与湟水河之间以及黄河与宛川河之间的Bray-Curtis距离较小, 说明大通河与湟水河之间以及黄河与宛川河之间的鱼类物种组成相似性较高, 庄浪河与黄河、湟水河和宛川河间的Bray-Curtis距离较大, 说明庄浪河与黄河、湟水河和宛川河间的鱼类物种组成相似性较低。5条河流间Bray-Curtis距离均大于0.5, 平均值为0.85, 表明各河流间的物种组成差异性较大。

2.4 物种空间分布格局

采用非度量多维标度排序(NMDS)方法对鱼类群落空间分布特征进行了聚类与排序, 应力函数值 stress = 0.14 < 0.2, 拟合程度一般。结果表明(图3),

表4 黄河兰州段鱼类群落β多样性分析。对角线下为Cody指数(β_c), 对角线上为Routledge指数(β_r)
Table 4 β_c (below diagonal) and β_r (above diagonal) diversity in the Lanzhou reach of the Yellow River

	黄河 Yellow River	大通河 Datong River	湟水河 Huangshui River	庄浪河 Zhuanglang River	宛川河 Wanchuan River
黄河 Yellow River		12.5	10.6	13.3	9.1
大通河 Datong River	7.5		3.0	2.6	8.0
湟水河 Huangshui River	6.5	2.0		4.0	4.8
庄浪河 Zhuanglang River	8.0	0.2	2.5		5.5
宛川河 Wanchuan River	5.5	5.0	3.0	3.5	

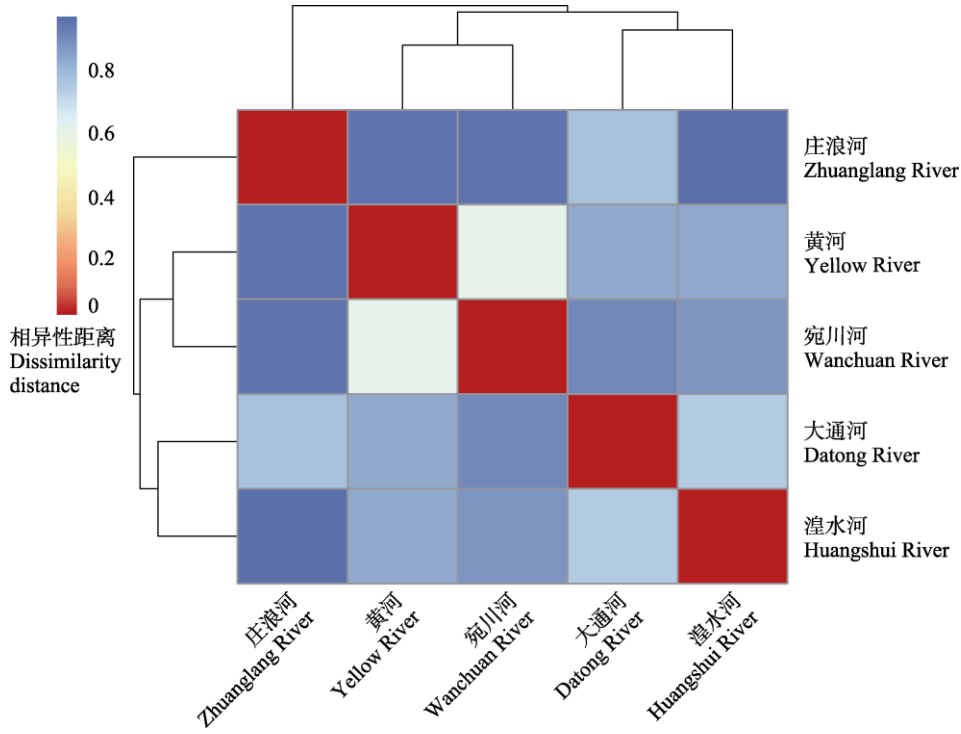


图2 基于Bray-Curtis距离的黄河兰州段鱼类相异矩阵热图
Fig. 2 A heat map of fish dissimilarity matrix based on Bray-Curtis distance in the Lanzhou reach of the Yellow River

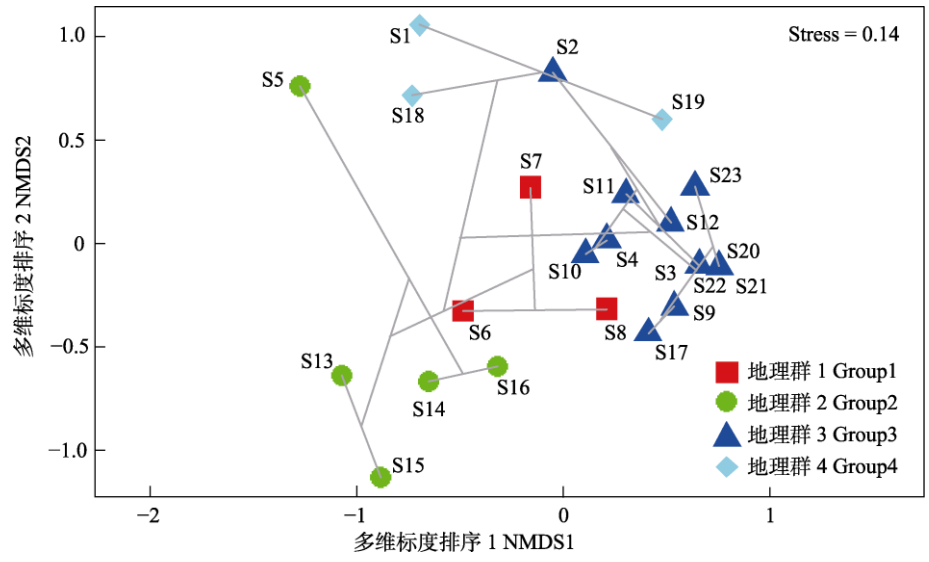


图3 黄河兰州段鱼类群落结构聚类 and 排序分析。断面编号同表1。
Fig. 3 Ordination of sampling sites in a two-dimensional NMDS in the Lanzhou reach of the Yellow River. Sampling sections code in accordance with Table 1.

黄河兰州段鱼类被划分为4个地理群,即以黄河高原鳅和黄河裸裂尻鱼为优势种的地理群1(S6、S7、S8)、以东方高原鳅、硬刺高原鳅、斯氏高原鳅、粗壮高原鳅和黄河裸裂尻鱼为优势种的地理群2(S5、S13、S14、S15、S16)以及均以鲫和麦穗鱼为优势种的地理群3(S2、S3、S4、S9、S10、S11、S12、S17、S20、S21、S22和S23)和地理群4(S1、S18、S19)。ANOSIM分析结果表明,地理群间差异大于地理群内差异,但差异不显著($R = 0.106$, $P = 0.198$)。鱼类群落结构呈现显著空间自相关,除S1和S9这2个采样断面外,其他采样断面都表现为在地理空间上相近的聚为一类。

3 讨论

3.1 物种组成及变化成因

青藏高原东北部地区是高原鳅属鱼类分布的热点地区之一(He et al, 2020)。由于高原鳅属鱼类形态变异程度大,用于物种鉴定的形态和解剖特征信息匮乏,大量新种描述后缺乏系统比较和分类整理(丁瑞华, 1994; Prokovfiev, 2007; 何春林等, 2011)。鉴于DNA条形码能准确、高效地识别出青藏高原及其邻近地区形态特征相似的大多数高原鳅属鱼类(Li et al, 2017; Wang et al, 2020),本研究采用线粒体COI基因系统发育树构建结果,结合形态学数据,发现黄河兰州段共有高原鳅属鱼类6种,生态类型以肉食、底栖和山溪性为主,区系成分上均属于青藏高原区。

本研究调查到鱼类4目6科15属20种,鱼种数目占王香亭(1991)记载的甘肃省土著鱼类总数的20.83%,占杨友桃和唐迎秋(1995)整理的甘肃省鱼类总数的19.05%,占王太等(2015)调查的甘肃省鱼类总数的31.25%。黄河段本次调查到鱼类16种,略高于前期调查物种数(13种,贾秋红等, 2015; 14种,王太等, 2015)。与贾秋红等(2015)调查结果相比,增加了泥鳅、大鳞副泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus*)、黄河高原鳅、似鲃高原鳅和黄河裸裂尻鱼5种,减少了甘肃高原鳅(即粗壮高原鳅)和拉氏大吻鲃(*Rhynchocypris lagowskii*) 2种,泥鳅、黄河高原鳅、似鲃高原鳅、粗壮高原鳅、黄河裸裂尻鱼和拉氏大吻鲃的变化可能是高原鳅鉴定或者采样方法和周期不同导致的。大鳞副泥鳅、棒花鱼、麦穗鱼、池沼公鱼、小黄黝鱼(*Micropercops swinhonis*)

都属于外来物种。我们访问调查到黄河上游刘家峡水库及其附近存在池沼公鱼等经济鱼类养殖场,推测可能是水产养殖过程中个体逃逸到兰州段且形成了自然繁殖群体。同时,在经济鱼类引进的同时,其他一些经济价值不高的小型鱼类也不可避免地引进到黄河兰州段。据《甘肃脊椎动物志》(王香亭, 1991)等文献资料记载,黄河兰州段历史上还分布有北方铜鱼、厚唇裸重唇鱼、似铜鲃、大鼻吻鲃、圆筒吻鲃、平鳍鳅鲶等鱼类,但这次采集均未捕获到。鉴于本次调查周期和持续时间较长及断面布设较系统,可以推断这些鱼类的数量稀少或已经绝迹。鱼类数量占优势的主要是一些小型鱼类如高体鳊和麦穗鱼等,与袁永锋等(2009)和沈红保等(2007)调查的黄河上游鱼类资源调查结果较一致。境内庄浪河虽然采集到8种鱼类,高于王太等(2015)记录的4种,但是在上游(S13和S14)仅采集到黄河裸裂尻鱼和高原鳅属鱼类,鱼类物种较单一,推测与周边频繁的人类活动有关(冯晨光等, 2017)。境内大通河调查到鱼类5种、湟水河调查到7种,低于青海省境内大通河干流(10种)、湟水干流(27种)的鱼类数量(唐文家等, 2013)。本研究调查到宛川河有鱼类9种,仅次于黄河(16种),远高于20世纪末的调查结果(2种)(王香亭, 1996)。除在甘肃兴隆山国家级自然保护区(采样断面S17)采集到已记载的麦穗鱼和斯氏高原鳅外,本次调查还发现了7种,包括泥鳅、大鳞副泥鳅、粗壮高原鳅、鲫、鲤、黄河裸裂尻鱼和小黄黝鱼,历史上均分布于甘肃省(王香亭, 1991)。较高的物种丰富度与采样断面布设在高崖水库和龛谷水库(采样断面S18)有关,且访问调查了解到,高崖水库附近存在鱼类宗教放生活动,导致大量的鲫和小黄黝鱼等外来物种被采集到。

黄河兰州段鱼类生态类型多样,以底栖、杂食和定居鱼类为主。这是因为兰州市境内河流的河道蜿蜒曲折,水流变化复杂急缓结合,为不同类型的鱼类提供了良好的栖息场所。

黄河兰州段水域高原鳅属鱼类最多,共计6种,裂腹鱼亚科虽只有黄河裸裂尻鱼1种,但各河均有分布。与黄河上游(李思忠, 2017)和青藏高原现生鱼类区系(陈宜瑜等, 1996)一致,即高原鳅属和裂腹鱼亚科构成本地区鱼类区系的主体。这些类群是伴随着上新世青藏高原的急剧抬升而逐渐演化形成的,适应高海拔、冷水和贫营养等极端环境,属于典型

的高原鱼类(陈宜瑜等, 1996)。

3.2 多样性现状分析

黄河兰州段不同河流间的鱼类物种组成差异性较大(图2), 且地理空间距离越近河流的鱼类物种组成越相似(图3)。黄河、庄浪河和湟水河鱼类物种多样性较高, 大通河和宛川河鱼类物种多样性较低(表3)。鱼类物种多样性程度与河流的生境有关(Babbitt & Tanner, 1998), 也与河流面积(Oberdorff et al, 2019)以及连通性(Liu et al, 2018)等因素密切相关。黄河与庄浪河、大通河、湟水河和宛川河间的生境差异较大, 鱼类物种出现一定的分化现象(表4)。黄河兰州段不同河流间的栖息地异质性高, 其中一级河流黄河作为一条自西向东的横向性河流, 河流长度最长、流量和面积最大, 生境的异质性更高, 鱼类物种更加多样化(唐志尧等, 2009)。此外, 7种中国特有种中, 4种属于黄河特有种, 且4种受威胁鱼类均捕获于黄河, 需要优先和加强保护。湟水河和庄浪河生境复杂, 河面宽阔, 两岸水草茂盛, 鱼类食源充足。庄浪河优势种为高原鳅属鱼类, 本次调查采集到大量的黄河裸裂尻鱼和高原鳅属鱼类, 导致鱼类优势度指数较高, 与王太等(2015)调查结果一致。大通河物种多样性较低, 可能与随处可见的水利设施有关, 调查过程中, 我们发现14处水电站及水坝工程(采样断面S6–S7间存在4处, S7–S8间存在5处, S8–S9间存在3处, S9–S10间存在2处)。大规模的水利设施破坏了河流的纵向连通性, 阻碍了鱼类的产卵及觅食, 加剧了河流流域的栖息地破碎化程度, 限制了鱼类的分布(Carvajal-Quintero et al, 2019; Barbarossa et al, 2020)。宛川河主河道水量急剧减少, 河道存在断流、水面缩小现象(采样断面S19、S21和S22), 河道两侧的沼泽、坑洼等适宜中小型鱼类繁衍的微生境被破坏, 对鱼类的生存繁衍产生不利影响(李雪健等, 2020)。此外, 调查发现宛川河采样断面S21和S23附近存在水泥厂和炼钢厂, 生活垃圾在河道内较为常见, 水体污染严重。人为的污染改变了水体理化环境, 同时也使得水体由原本适合贫营养型生存的高原鱼类转变为适合富营养型生存的麦穗鱼和鲫等鱼类(表2, 冯晨光等, 2017), 进而使得宛川河的鱼类多样性明显低于区域内其他河流。

3.3 保护建议

尽管中国淡水鱼类多样性较高, 但也面临着巨

大的威胁(He et al, 2020)。曹亮等(2016)对内陆鱼类受威胁现状及其成因的全国性评估显示, 近20%的物种被列为受威胁物种。黄河作为中国第二长河, 其鱼类生物多样性现状和受威胁因素备受关注(茹辉军等, 2010; Xie et al, 2018; Jiang et al, 2021)。黄河上游虽然鱼类物种丰富度较其他河段低, 但受威胁物种和黄河特有种数目居于首位(赵亚辉等, 2020)。黄河兰州段位于黄河上游, 其鱼类种数约占黄河上游总种数(44种)的32%, 黄河特有种鱼类约占上游(17种)的24%, 受威胁鱼类占黄河上游(16种)的25%(赵亚辉等, 2020)。综上, 保护黄河兰州段鱼类多样性对于维护黄河流域鱼类多样性具有重要作用, 鉴于此, 本文针对性地提出以下建议:

(1)水利设施: 修复河道连通性。黄河兰州段共有水电站23座, 中、小型水库11座, 水坝25处(兰州市水务局, <http://slj.lanzhou.gov.cn/>)。水库的静水形态使得一些适合流水生境生存的鱼类(如厚唇裸重唇鱼等)逐渐退出黄河兰州河段, 而那些适合静水生活的种类(如麦穗鱼、鲫等外来物种)却得到了更好的发展。此外, 水电站/水库建库修筑的大坝严重影响了产漂流性卵鱼类, 典型例子就是北方铜鱼(赵亚辉等, 2020)。黄河干流兰州段共有4处大坝(八盘峡水电站大坝、柴家峡水电站大坝、小峡水电站大坝、河口水电厂大坝), 大坝截流导致北方铜鱼产卵场破坏, 因流速和流程不够而不能完成生活史, 种群数量迅速下降。大通河已建水利设施最多, 尤其是在采样断面S6–S8段之间较为密集, 共规划有9座水电站和水坝, 阻隔了鱼类的迁移通道, 导致物种多样性较低。我们建议政府部门适时拆除一些小型闸坝, 特别是在大通河段, 以恢复河流的连通性; 已建大型水坝可以采取修建过鱼设施的方式, 恢复大坝上下鱼类种群间的沟通, 如位于大通河上游的连城水电站、位于黄河干流的小峡水电站等。

(2)外来鱼类: 政府应建立外来物种入侵风险评估系统并加强实时监测、渔业管理部门应开展对池沼公鱼的定向捕捞、企业应完善水产养殖管理、民间应宣传普及预防常识。本次调查到黄河兰州段外来鱼类9种(表2), 数量较多。池沼公鱼在黄河上游各水库广泛移植增殖, 目前在刘家峡水库已形成512 t的可捕获量(任锦帅等, 2018), 调查发现已逃逸、成功定居到黄河兰州段并建立了自然种群。池沼公鱼、小黄魮鱼等肉食性鱼类以及鲫、麦穗鱼等

小型鱼类耐受性强, 更容易适应多变的环境, 通过捕食土著鱼类的卵和幼体、竞争资源、占据土著种生态位等作用直接威胁到土著物种的数量。目前, 土著种似铜鮡、大鼻吻鮡、圆筒吻鮡、平鳍鳅鲶、兰州鲇在黄河兰州段的数量减少, 原因之一就是这些外来种争夺饵料、产卵场以及吞食土著鱼卵鱼苗, 破坏了原有的生态平衡(徐汝梅和叶万辉, 2004)。池沼公鱼应成为今后黄河兰州段生物入侵预防工作的重点监测对象。黄河兰州段还存在德国镜鲤(*Cyprinus carpio* var. *specularis*)和黄河土著鲤的自然杂交种(李芳等, 2008), 破坏和削弱了原有野生种群的遗传多样性和适合度。本研究建议政府部门组织建立外来物种入侵风险评估系统, 加强对池沼公鱼等外来物种的实时监测; 渔业管理部门应开展对池沼公鱼的定向捕捞, 减少其对土著鱼类的威胁性; 相关企业在水产养殖过程中需要提前做好鱼类逃逸预防工作, 且严格控制或禁止水库网箱养殖。针对宛川河鱼类放生活动, 我们建议民间应充分利用新闻媒体, 广泛宣传普及防治外来物种的紧迫性、放生与保护本地鱼类的利害关系, 引导群众合理科学放生, 降低外来鱼类入侵风险。

(3)河道环境: 加大整治力度。宛川河河道存在严重采砂现象, 特别是采样断面S20-S23段极为严重。采挖活动不仅破坏了河道原生态, 同时也改变着水体的理化条件, 直接影响水体中鱼类的组成和数量。建议增强监管和治理力度, 特别是在庄浪河上游(采样断面S13-S15)和宛川河中下游(采样断面S20-S23)等人类活动密集的区域, 减少生活垃圾对水体的污染, 加快创建生态美丽乡村。同时, 需要继续加强对黄河和湟水河的保护力度, 促使水生态持续健康发展。

致谢: 兰州大学基础医学院硕士研究生包婷瑞、生命科学学院硕士研究生张德喜、马桂英、本科生张义同学协助部分野外数据收集工作, 特此致谢!

ORCID

陈召松  <https://orcid.org/0000-0001-7104-202X>
 安蓓  <https://orcid.org/0000-0002-1264-9742>
 王子旺  <https://orcid.org/0000-0001-9811-9082>
 吴发宁  <https://orcid.org/0000-0002-5907-8764>
 孙章运  <https://orcid.org/0000-0003-0920-5689>
 张立勋  <https://orcid.org/0000-0003-4984-2068>

参考文献

- Albert JS, Destouni G, Duke-Sylvester SM, Magurran AE, Oberdorff T, Reis RE, Winemiller KO, Ripple WJ (2021) Scientists' warning to humanity on the freshwater biodiversity crisis. *Ambio*, 50, 85–94.
- Babbitt KJ, Tanner GW (1998) Effects of cover and predator size on survival and development of *Rana utricularia* tadpoles. *Oecologia*, 114, 258–262.
- Barbarossa V, Schmitt RJP, Huijbregts MAJ, Zarfl C, King H, Schipper AM (2020) Impacts of current and future large dams on the geographic range connectivity of freshwater fish worldwide. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 117, 3648–3655.
- Cao L, Zhang E, Zang CX, Cao WX (2016) Evaluating the status of China's continental fish and analyzing their causes of endangerment through the red list assessment. *Biodiversity Science*, 24, 598–609. (in Chinese with English abstract) [曹亮, 张鹏, 臧春鑫, 曹文宣 (2016) 通过红色名录评估研究中国内陆鱼类受威胁现状及其成因. *生物多样性*, 24, 598–609.]
- Carvajal-Quintero J, Villalobos F, Oberdorff T, Grenouillet G, Brosse S, Hugueny B, Jézéquel C, Tedesco PA (2019) Drainage network position and historical connectivity explain global patterns in freshwater fishes' range size. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 116, 13434–13439.
- Chen YY (1998) *Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes. II.* Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈宜瑜 (1998) 中国动物志 硬骨鱼纲 鲤形目(中卷). 科学出版社, 北京.]
- Chen YY, Chen YF, Liu HZ (1996) Studies on the position of the Qinghai-Xizang Plateau region in zoogeographic divisions and its eastern demarcation line. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 20, 97–103. (in Chinese with English abstract) [陈宜瑜, 陈毅峰, 刘焕章 (1996) 青藏高原动物地理区划的地位和东部界线问题. *水生生物学报*, 20, 97–103.]
- Cody ML, Diamond JM (1975) Towards a theory of continental species diversities: Bird distributions over Mediterranean habitat gradients. In: *Ecology and Evolution of Communities* (eds Cody ML, Diamond JM), pp. 214–257. Harvard University Press, Cambridge.
- Ding RH (1994) *The Fishes of Sichuan*. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. (in Chinese) [丁瑞华 (1994) 四川鱼类志. 四川科学技术出版社, 成都.]
- Dudgeon D, Arthington AH, Gessner MO, Kawabata ZI, Knowler DJ, Lévêque C, Naiman RJ, Prieur-Richard AH, Soto D, Stiassny MLJ, Sullivan CA (2006) Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, 81, 163–182.
- Feng CG, Tong C, Zhang RY, Li GG, Wang HKY, Tang YT, Zhang CF, Zhao K (2017) Biodiversity and distribution patterns of *Triplophysa* species in the northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Biodiversity Science*, 25, 53–61. (in

- Chinese with English abstract) [冯晨光, 童超, 张仁意, 李国刚, 王贺岷元, 汤永涛, 张存芳, 赵凯 (2017) 青藏高原东北部边缘高原鳅属鱼类的多样性与分布格局. 生物多样性, 25, 53–61.]
- Haubrock PJ, Pilotto F, Innocenti G, Cianfanelli S, Haase P (2021) Two centuries for an almost complete community turnover from native to non-native species in a riverine ecosystem. *Global Change Biology*, 27, 606–623.
- He CL, Song ZB, Zhang E (2011) *Triplophysa* fishes in China and the status of its taxonomic studies. *Sichuan Journal of Zoology*, 30, 150–155. (in Chinese with English abstract) [何春林, 宋昭彬, 张鹗 (2011) 中国高原鳅属鱼类及其分类研究现状. 四川动物, 30, 150–155.]
- He DK, Sui XY, Sun HY, Tao J, Ding CZ, Chen YF, Chen YY (2020) Diversity, pattern and ecological drivers of freshwater fish in China and adjacent areas. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 30, 387–404.
- IUCN (International Union for Conservation of Nature) (2021) The IUCN Red List of Threatened Species. <http://www.iucnredlist.org>. (accessed on 2021-03-30)
- Jia QH, Chen XX, Gao HW, Bai HF, Shen HB, Wang YC, Wen SE, Li WX (2015) Investigation of fish resources in autumn in Lanzhou urban section of the Yellow River. *Hebei Fisheries*, (9), 21–23. (in Chinese) [贾秋红, 陈晓霞, 高宏伟, 白海峰, 沈红保, 王益昌, 问思恩, 李文香 (2015) 黄河兰州市区段秋季鱼类资源现状调查. 河北渔业, (9), 21–23.]
- Jiang XM, Wang J, Tang WJ, Sun ZW, Pan BZ (2021) Non-native freshwater fish species in the Yellow River Basin: Origin, distribution and potential risk. *Environmental Biology of Fishes*, 104, 253–264.
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red List of China's Vertebrates. *Biodiversity Science*, 24, 500–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 500–551.]
- Li F, Zhang JJ, Yuan YF, Feng H, Zhang JY, Yang XZ (2008) Present situation and problems on fish introduction in Yellow River system. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 36, 15024–15026. (in Chinese with English abstract) [李芳, 张建军, 袁永锋, 冯慧, 张军燕, 杨兴中 (2008) 黄河流域鱼类引种现状及存在问题. 安徽农业科学, 36, 15024–15026.]
- Li JX, Wang Y, Jin HF, Li WJ, Yan CC, Yan PF, Zhang XY, He SP, Song ZB (2017) Identification of *Triplophysa* species from the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP) and its adjacent regions through DNA barcodes. *Gene*, 605, 12–19.
- Li SZ (2017) *Fishes of the Yellow River*. China Ocean University Press, Qingdao. (in Chinese) [李思忠 (2017) 黄河鱼类志. 中国海洋大学出版社, 青岛.]
- Li XJ, Jia PY, Niu CY, Xing YC, Li HL, Liu HB, Tang WQ, Zhao YH (2020) Species diversity of freshwater fish and assessment on watershed health in the Irtysh River and Ulungur River basins in Xinjiang, China. *Biodiversity Science*, 28, 422–434. (in Chinese with English abstract) [李雪健, 贾佩尧, 牛诚祎, 邢迎春, 李浩林, 刘海波, 唐文乔, 赵亚辉 (2020) 新疆阿勒泰地区额尔齐斯河和乌伦古河流域鱼类多样性演变和流域健康评价. 生物多样性, 28, 422–434.]
- Liao JQ, Huang Y (2013) Research progress on using index of biological integrity to assess aquatic ecosystem health. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 295–302. (in Chinese with English abstract) [廖静秋, 黄艺 (2013) 应用生物完整性指数评价水生态系统健康的研究进展. 应用生态学报, 24, 295–302.]
- Liu XJ, Hu XY, Ao XF, Wu XP, Ouyang S (2018) Community characteristics of aquatic organisms and management implications after construction of Shihutang Dam in the Gangjiang River, China. *Lake and Reservoir Management*, 34, 42–57.
- Oberdorff T, Dias MS, Jézéquel C, Albert JS, Arantes CC, Bigorne R, Carvajal-Valleros FM, De Wever A, Frederico RG, Hidalgo M, Hugueny B, Leprieux F, Maldonado M, Maldonado-Ocampo J, Martens K, Ortega H, Sarmiento J, Tedesco PA, Torrente-Vilara G, Winemiller KO, Zuanon J (2019) Unexpected fish diversity gradients in the Amazon basin. *Science Advances*, 5, eaav8681.
- Pielou EC (1975) *Ecological Diversity*. Wiley, New York.
- Prokofiev AM (2007) Materials towards the revision of the genus *Triplophysa* rendahl, 1933 (Cobitoidea: Balitoridae: Nemacheilinae): A revision of nominal taxa of Herzenstein (1888) described within the species “*Nemachilus*” *stoliczkae* and “*N.*” *dorsonotatus*, with the description of the new species *T. scapanognatha* sp. nova. *Journal of Ichthyology*, 47, 1–20.
- Ren JS, Zhang J, Gao XY (2018) Study on transplantation, multiplication and stable yield of *Hypomesus olidus* in canyon-type reservoir. *China Fisheries*, (1), 86–89. (in Chinese) [任锦帅, 张静, 郇晓瑜 (2018) 峡谷型水库池沼公鱼移植增殖与稳产技术研究. 中国水产, (1), 86–89.]
- Routledge RD (1977) On Whittaker's components of diversity. *Ecology*, 58, 1120–1127.
- Ru HJ, Liu XQ, Huang XR, Ning YZ, Wang HZ (2008) Diversity of fish species and its spatio-temporal variations in Lake Dongting, a large Yangtze-connected lake. *Journal of Lake Sciences*, 20, 93–99. (in Chinese with English abstract)

- [茹辉军, 刘学勤, 黄向荣, 宁应之, 王洪铸 (2008) 大型通江湖泊洞庭湖的鱼类物种多样性及其时空变化. 湖泊科学, 20, 93–99.]
- Ru HJ, Wang HJ, Zhao WH, Shen YQ, Wang Y, Zhang XK (2010) Fishes in the mainstream of the Yellow River: Assemblage characteristics and historical changes. Biodiversity Science, 18, 179–186. (in Chinese with English abstract) [茹辉军, 王海军, 赵伟华, 沈亚强, 王勇, 张晓可 (2010) 黄河干流鱼类群落特征及其历史变化. 生物多样性, 18, 179–186.]
- Shannon EC, Weaver W (1949) The Mathematical Theory of Communication. Urbana University of Illinois Press, Illinois.
- Shen HB, Li KS, Zhang M (2007) Investigation and analysis of fish resources in the upper reaches of the Yellow River. Hebei Fisheries, (6), 37–41. (in Chinese) [沈红保, 李科社, 张敏 (2007) 黄河上游鱼类资源现状调查与分析. 河北渔业, (6), 37–41.]
- Simpson EH (1949) Measurement of diversity. Nature, 163, 688.
- Su GH, Logez M, Xu J, Tao SL, Villéger S, Brosse S (2021) Human impacts on global freshwater fish biodiversity. Science, 371, 835–838.
- Tang WJ, Chen YF, Ding CZ (2013) The current situation and protection of fish resources in Huangshui River in Qinghai Province. Journal of Dalian Ocean University, 28, 307–313. (in Chinese with English abstract) [唐文家, 陈毅峰, 丁城志 (2013) 青海省湟水鱼类资源现状及保护对策. 大连海洋大学学报, 28, 307–313.]
- Tang ZY, Qiao XJ, Fang JY (2009) Species–area relationship in biological communities. Biodiversity Science, 17, 549–559. (in Chinese with English abstract) [唐志尧, 乔秀娟, 方精云 (2009) 生物群落的种–面积关系. 生物多样性, 17, 549–559.]
- Villéger S, Brosse S, Mouchet M, Mouillot D, Vanni MJ (2017) Functional ecology of fish: Current approaches and future challenges. Aquatic Sciences, 79, 783–801.
- Wang T, Zhang YP, Yang ZY, Liu Z, Du YY (2020) DNA barcoding reveals cryptic diversity in the underestimated genus *Triplophysa* (Cypriniformes: Cobitidae, Nemacheilinae) from the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. BMC Evolutionary Biology, 20, 151.
- Wang T, Zhang YP, Guan LH, Du YY, Lou ZY, Jiao WL (2015) Current freshwater fish resources and the application of DNA barcoding in species identification in Gansu Province. Biodiversity Science, 23, 306–313. (in Chinese with English abstract) [王太, 张艳萍, 管丽红, 杜岩岩, 娄忠玉, 焦文龙 (2015) 甘肃省鱼类资源现状及DNA条形码在鱼类物种鉴定中的应用. 生物多样性, 23, 306–313.]
- Wang XT (1991) Vertebrate Fauna of Gansu. Gansu Science and Technology Press, Lanzhou. (in Chinese) [王香亭 (1991) 甘肃脊椎动物志. 甘肃科学技术出版社, 兰州.]
- Wang XT (1996) Local Investigation on Resources of Xinglong Mountains National Nature Reserve in Gansu Province. Gansu Nationalities Press, Lanzhou. (in Chinese) [王香亭 (1996) 甘肃兴隆山国家级自然保护区资源本地调查研究. 甘肃民族出版社, 兰州.]
- Wang XT, He RL, Zhao HM (1956) Fishes in the Yellow River near Lanzhou. Bulletin of Biology, (8), 16–21. (in Chinese) [王香亭, 贺汝良, 赵宏谟 (1956) 兰州附近黄河的鱼类. 生物学通报, (8), 16–21.]
- Wang Z, Song C, Yan WL, Zhu LF (2019) Biodiversity and spatial pattern of fish in the Pingchuan segment of the upper reaches of Hanjiang River. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 28, 1675–1681. (in Chinese with English abstract) [王卓, 宋策, 闫文龙, 朱来福 (2019) 汉江上游平川段鱼类群落多样性及空间格局分析. 长江流域资源与环境, 28, 1675–1681.]
- Ward RD, Zemlak TS, Innes BH, Last PR, Hebert PDN (2005) DNA barcoding Australia's fish species. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 360, 1847–1857.
- Wu QJ, Zhao YJ, Xiao ZQ (2021) Comparative analysis of temperature and precipitation change trend between Lanzhou and Longnan. Modern Agricultural Science and Technology, (4), 173–175. (in Chinese) [吴巧娟, 赵育俊, 肖志强 (2021) 兰州市和陇南市温度降水变化趋势对比分析. 现代农业科技, (4), 173–175.]
- Xie JY, Tang WJ, Yang YH (2018) Fish assemblage changes over half a century in the Yellow River, China. Ecology and Evolution, 8, 4173–4182.
- Xu FK, He L, Wang YF, He C, Niu Y, Liu WJ, Song WH (2021) Temporal and spatial variation characteristics of water quality in Lanzhou and Baiyin section of the Yellow River main stream from 2010 to 2019. Water Resources Protection, 37, 44–50. (in Chinese with English abstract) [徐发凯, 何丽, 王一帆, 何昌, 牛毓, 刘文君, 宋伟宏 (2021) 2010–2019年黄河干流兰州和白银段水质时空变化特征. 水资源保护, 37, 44–50.]
- Xu RM, Ye WH (2004) Biological Invasion: Theory and Practice. Science Press, Beijing. (in Chinese) [徐汝梅, 叶万辉 (2004) 生物入侵: 理论与实践. 科学出版社, 北京.]
- Yang YT, Tang YQ (1995) Resources and geographical distribution of the fishes in Gansu Province, China. Journal of Gansu Sciences, (3), 72–75. (in Chinese with English abstract) [杨友桃, 唐迎秋 (1995) 甘肃鱼类资源及其地理分布. 甘肃科学学报, (3), 72–75.]
- Ye FL, Zhang JD (2002) Fish Ecology. Guangdong Higher Education Press, Guangzhou. (in Chinese) [叶富良, 张健东 (2002) 鱼类生态学. 广东高等教育出版社, 广州.]
- Yu GQ (2007) Biodiversity Inventory and Assessment. Yunnan Science and Technology Press, Kunming. (in Chinese) [喻国庆 (2007) 生物多样性调查与评价. 云南科学技术出版社, 昆明.]
- Yuan YF, Li YD, Zhang LL, Yu B, Qi XR, Han MX, Zhang JJ

- (2009) Investigation & research on hydrobios resources in the middle and upper reaches of main Yellow River. *Journal of Hydroecology*, 30, 15–19. (in Chinese with English abstract) [袁永锋, 李引娣, 张林林, 余斌, 齐喜荣, 韩明轩, 张建军 (2009) 黄河干流中上游水生生物资源调查研究. *水生态学杂志*, 30, 15–19.]
- Yue PQ (2000) *Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes. III.* Science Press, Beijing. (in Chinese) [乐佩琦 (2000) 中国动物志 硬骨鱼纲 鲤形目(下卷). 科学出版社, 北京.]
- Zhang CG, Zhao YH (2016) *Species Diversity and Distribution of Inland Fishes in China.* Science Press, Beijing. (in Chinese) [张春光, 赵亚辉 (2016) 中国内陆鱼类物种与分布. 科学出版社, 北京.]
- Zhao YH, Xing YC, Lü BB, Zhou CJ, Yang WB, Zhao K (2020) Species diversity and conservation of freshwater fishes in the Yellow River Basin. *Biodiversity Science*, 28, 1496–1510. (in Chinese with English abstract) [赵亚辉, 邢迎春, 吕彬彬, 周传江, 杨文波, 赵凯 (2020) 黄河流域淡水鱼类多样性和保护. *生物多样性*, 28, 1496–1510.]
- Zhu SQ (1989) *The Loaches of the Subfamily Nemacheilinae in China.* Jiangsu Science and Technology Publishing House, Nanjing. (in Chinese) [朱松泉 (1989) 中国条鳅志. 江苏科学技术出版社, 南京.]
- (责任编辑: 陈小勇 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 本研究中涉及的高原鳅属鱼类*COI*基因样品信息

Appendix 1 Information of *Triplophysa* specimen based on *COI* in this study
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021199-1.pdf>

附录2 基于线粒体*COI*基因的高原鳅属鱼类邻接法系统发育关系

Appendix 2 *Triplophysa* phylogenetic relationship based on mitochondrial *COI* gene by neighbor-joining method
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021199-2.pdf>