•研究报告•

跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状

赵阳^{1,2,3}, 牛诚祎², 李雪健^{2,4}, 刘海波², 孙光³, 罗遵兰^{3*}, 赵亚辉^{ID 2*}

1. 河北大学生命科学学院, 河北保定 071002; 2. 中国科学院动物研究所动物进化与系统学重点实验室, 北京 100101; 3. 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; 4. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306

摘要: 汉江是南水北调中线工程和引汉济渭等跨流域调水工程重要的水源区, 了解其鱼类多样性的现状及变化对于水生态保护尤为重要。作者于2016–2017年间对汉江洋县段干流与6条主要支流的鱼类多样性组成进行了两次调查, 以Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数和Jaccard相似性系数对洋县境内7条河流进行评估, 同时通过相对重要性指数(index of relative importance, *IRI*)判定优势种, 利用鱼类丰度生物量(abundance biomass comparison, *ABC*)曲线分析鱼类受干扰情况。结合历史记录, 调查区域内共分布有土著鱼类76种, 隶属于6目14科57属, 以鲤形目鲤科和鲇形目鲇科鱼类为主, 分别占土著鱼类总数的57.89%和11.84%; 珍稀濒危鱼类共计5种, 包括3种国家级保护水生野生动物。鱼类多样性分析结果显示汉江干流的丰富度指数和多样性指数显著高于6条支流。7条河流的*IRI*指数显示优势种为宽鳍鱮(*Zacco platypus*)。ABC曲线显示目前调查区域内鱼类小型化现象明显、鱼类受到较严重干扰。水利水电工程建设对于调查区域鱼类多样性影响最大, 干流大型水库(大坝)通过改变原有流水生境、阻断河流纵向连通性、淹没重要鱼类产卵场等对鱼类多样性和群落组成产生不利影响; 支流引水式的中小型电站造成下游河段减、脱水而使河道发生断流以及生境破碎化, 从而威胁土著鱼类的生存。在跨流域调水过程中, 应重视不同水系鱼类引入的潜在生态风险。对引汉济渭工程的水源区鱼类多样性现状的调查, 有助于未来跨流域调水过程中鱼类变化的动态监测和外来物种的预警。

关键词: 淡水鱼类; 大坝; 引汉济渭; 保护; 长江

赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29, 361–372. doi: 10.17520/biods.2020158.

Zhao Y, Niu CY, Li XJ, Liu HB, Sun G, Luo ZL, Zhao YH (2021) Fish diversity and resource status in the Yangxian Section of the Hanjiang River under the context of inter-basin water transfer. Biodiversity Science, 29, 361–372. doi: 10.17520/biods.2020158.

Fish diversity and resource status in the Yangxian Section of the Hanjiang River under the context of inter-basin water transfer

Yang Zhao^{1,2,3}, Chengyi Niu², Xuejian Li^{2,4}, Haibo Liu², Guang Sun³, Zunlan Luo^{3*}, Yahui Zhao^{ID 2*}

1 College of Life Sciences, Hebei University, Baoding, Hebei 071002

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

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

4 College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306

ABSTRACT

Aims: The Hanjiang River is an important water source of the Middle Route Scheme of South-North Water Diversion Project and Hanjiang to Weihe River Inter-basin Water Transfer Project. It is necessary to understand the current status and changes of fish species diversity for future conservation of aquatic ecosystem.

Methods: In order to investigate the fish diversity and resource status in Yangxian section of the Hanjiang River, we

收稿日期: 2020-04-20; 接受日期: 2020-07-04

基金项目: 生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)、中国生物多样性监测与研究网络-内陆水体鱼类多样性监测专项网(Sino BON - Inland Water Fish Diversity Observation Network)和国家科技基础资源调查专项(2019FY101800)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: zhaoyh@ioz.ac.cn; luozunlan@163.com

surveyed the fish diversity of main stream and six tributaries twice from 2016 to 2017. The indices of Margalef, Shannon-Wiener, Pielou's, and Jaccard were used to evaluate the main streams and branches in Yangxian County. The index of relative importance (*IRI*) was calculated to determine the dominant species, and the abundance biomass comparison (ABC) was used to analyze the interference to fish.

Results: With historical data, our survey showed that this section of the river has 76 native species belonging to 57 genera, 14 families, and 6 orders. Fishes from Cyprinidae and Bagridae are dominant, accounting for 57.89% and 11.84% of the total number of native species, respectively. There are five endangered species, and three of them are classified as National Protected Wild Animals in China. The results of fish diversity analysis showed that the richness index and diversity index of the main stream of the Hanjiang River were significantly higher than those of the six tributaries. *IRI* index showed that the dominant species was *Zacco platypus*. An analysis of the ABC curve indicated that the fish community has been seriously disturbed.

Conclusion: Water conservancy and hydropower projects are the main influences that were correlated with a decrease of fish diversity and populations. The construction of large dams on the main stream will change the habitat from flowing water to still water, and disrupt the connection between upper and lower streams, and cause the disappearance of spawning grounds. Small-sized hydropower stations on the river branches will reduce the water of downstream affecting the fish populations. The inter-basin water transfer project has the potential possibility to introduce fish species from different river systems. Our study provides basic data for the dynamic monitoring of fish diversity and an early warning of invasive species during the construction of the Hanjiang to Weihe River Water Diversion Project.

Key words: freshwater fishes; dams; Hanjiang to Weihe River Water Diversion Project; conservation; Yangtze River

汉江属于长江水系,是长江最大的一级支流。汉江源自陕西省宁强县,途经勉县、汉台、南镇、城固、洋县等地,最终从湖北省武汉市汇入长江,全长共1,577 km,总流域面积 $15.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ (景朝霞等, 2019)。汉江流域是中国南北气候过渡带和中西部的生态走廊,也是长江经济带的重要组成部分,区位优势十分明显(王学雷和宋辛辛, 2019)。汉江水资源非常丰富,其支流多达340条,是国家南水北调中线调水工程和引汉济渭重要的水源地,水生态的保护和开发受到极大重视,其生态环境问题对于我国社会经济发展具有举足轻重的战略地位(张海斌等, 2006; 王学雷和宋辛辛, 2019)。

汉江洋县段位于丹江口水库以上,属汉江上游,地处陕西省,北靠秦岭,南邻巴山。洋县境内河流众多,汉江干流自西向东穿越其境,境内长度约87 km,天然落差84.5 m,年径流量 $7.159 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。干流沿途分出许多支流(如渭水河、溢水河、饶水河、酉水河、金水河、子午河等),支流多呈平行状,南北走向,汇入汉江(陈章存等, 1991)。洋县境内有两个自然保护区:陕西汉中朱鹮自然保护区和长青国家级自然保护区,酉水河和渭水河两河部分流域分布在两个保护区内。汉江洋县段鱼类多样性十分丰富,具有典型代表性,且对丹江口水库以上汉江上游水域的生态安全有重要的指示意义(卢金友和林

莉, 2020)。然而关于汉江洋县段鱼类多样性组成的研究或报道十分零星,有些调查时间比较久远,如1959–1979年间陕西省动物研究所和中国科学院水生生物研究所对秦岭部分地区做了鱼类调查,随后于1987年出版的《秦岭鱼类志》中对汉江洋县段的鱼类略有涉及(陕西省动物研究所等, 1987)。其他一些研究工作也只涉及酉水河和渭水河(王开锋等, 2003; 王启军等, 2012),缺乏鱼类多样性和鱼类资源数据。

此外,汉江洋县段的黄金峡水利枢纽不但是汉江干流梯级电站的第一级,同时也是引汉济渭的枢纽工程,其建设可能产生的生态影响亟需引起关注。因此作者于2016–2017年间,针对汉江洋县段及其附属支流的鱼类多样性和资源现状进行了完整系统地专项调查,并对鱼类多样性现状和分布进行了分析,以期对鱼类资源保护,以及有效开展河流管理提供参考指导作用;汉江洋县段作为引汉济渭水源地之一,鱼类群落结构和多样性的调查结果将从侧面反映河流健康状况,为水环境监测提供参考;同时为监测跨流域调水工程和水利工程建设对水生生态的影响提供基础数据,对评估跨流域调水的生态风险和对鱼类多样性潜在影响具有一定参考作用。

1 材料与方法

1.1 样本采集

2016年11月和2017年4月, 根据从洋县水利局获取的县域水系图和河流基本状况等调查材料, 在洋县境内的汉江干流和6条支流(金水河、西水河、饶水河、溢水河、坪堵河、湑水河)共设置样点25个(图1), 每次调查持续约1个月。采用地笼和挂网实地捕捞, 挂网的网长为30 m, 网高为1.2 m, 网目规格为1 cm, 每个样点放置1张挂网, 采样时间为12 h; 地笼长3.8 m, 宽0.25 m, 高0.2 m, 每个样点放置3个地笼, 采样时间为12 h。捕捞的鱼类部分放归河流, 其余采用无水乙醇或10%福尔马林固定。同时访问渔民、市场、餐馆等有鱼类交易和消费的地方, 收集鱼类样本。鱼类标本在实验室进行鉴定, 主要依据《中国动物志》鱼类已出版各卷册(陈宜瑜, 1998; 褚新洛等, 1999; 乐佩琦, 2000; 伍汉霖和钟俊生, 2008)、《中国鲤科鱼类志》(上、下卷)(伍献文, 1981, 1982)和《秦岭鱼类志》(陕西省动物研究所等, 1987); 鱼类分类系统及物种最新有效名称依据《中国内陆鱼类物种与分布》(张春光和赵亚辉, 2016)。标本编号后全部保藏于中国科学院动物研究所国家动物博物馆鱼类标本馆内。同时, 作者对中国科学院动物研究所鱼类标本馆中分布于该区域的鱼类历史采集记录进行了收集整理。

图1 汉江洋县段鱼类采集点分布图

Fig. 1 Sampling sites in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

1.2 数据分析

1.2.1 群落多样性分析

采用Margalef丰富度指数(D)(Margalef, 1958)、Shannon-Wiener多样性指数(H')(Parry et al, 1984)、Pielou均匀度指数(E)(Blanchard et al, 2004)、Jaccard相似性系数(q)(陈小华等, 2008)对鱼类群落多样性进行分析, 各指数计算公式如下:

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

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$E = H' / \ln S \quad (3)$$

$$q = c / (a + b - c) \quad (4)$$

式中, S 为野外采集鱼类总种数, N 为野外采集鱼类总个体数, P_i 为第 i 种鱼类的个体数占鱼类总数的比例, a 是A群落的物种数, b 是B群落的物种数, c 是A、B两个群落共有的物种数, 当 q 值处于0–0.25之间时, 表明群落极不相似; 处于0.25–0.5时为中等不相似; 0.5–0.75时为中等相似; 0.75–1.00时为极相似。

在计算鱼类丰富度、多样性和均匀度指数时, 以土著鱼类为基础, 外来物种不计。

1.2.2 优势种

通过种类相对重要性指数(index of relative importance, IRI)(Pinkas et al, 1970)判定群落优势种, 公式如下:

$$IRI = (C\% + W\%) \times F\% \times 10^4 \quad (5)$$

式中, $C\%$ 为某种鱼类数量占采集鱼类总数的百分比, $W\%$ 为某种鱼生物量占总采集鱼类生物量的百分比, $F\%$ 为某种鱼出现的频率。以 $IRI > 1,000$ 的作为优势种; IRI 在100–1,000的为重要种; IRI 在10–100的为常见种; IRI 在1–10的为一般种; $IRI < 1$ 的为少见种(林小植等, 2016)。

1.2.3 丰度生物量曲线(ABC曲线)

ABC曲线(abundance biomass comparison curve)可以对鱼类群落受外界干扰的情况进行评价^①。该曲线由数量优势度和生物量优势度2条曲线组成, 2条曲线与坐标轴所围面积的差值称为 W 值。 W 为正值时, 鱼类群落未受干扰; W 趋于0时, 鱼类群落处于中度干扰; W 为负值时, 鱼类群落处于严重干扰

① 孙莎莎 (2013) 最近10年长江靖江沿岸鱼类群聚特征的时间格局研究. 硕士学位论文, 上海海洋大学, 上海.

状态^①。计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^S \frac{X_i - Y_i}{50 - (S - 1)} \quad (6)$$

式中, X_i 和 Y_i 是ABC曲线中种类序号对应的生物量和数量累积百分比, S 是出现物种数。

通过SPSS 20.0软件进行文中相关数据的统计检验, 采用单因素方差分析检验鱼类多样性指数和优势种在季节间的差异。

1.2.4 生态类型与食性划分

将调查区域内鱼类的生态类型按栖息空间划分为中上层、近底层和底层^①, 按食性分为肉食性、植食性和杂食性(附录1)。

2 结果

2.1 鱼类物种组成

调查共采集鱼类标本53种2,589尾, 隶属4目11科43属, 结合馆藏历史标本及相关文献, 研究区域计有鱼类78种, 隶属于6目14科58属(附录1)。野外调查在酉水河捕获丁鲷(*Tinca tinca*), 其在中国的自然分布区为新疆额尔齐斯河流域, 当地村民解释是2011年发大水冲毁鱼池后外逃入酉水河的; 此外, 捕获的鱼类中钝吻棒花鱼(*Abbottina obtusirostris*)分布于长江上游(张春光和赵亚辉, 2016), 在这一地区应无自然分布。因此去除以上两种鱼类之后, 土著鱼类有76种, 隶属于6目14科57属。

从目级水平分析, 鲤形目鱼类有3科37属52种, 占总种数的68.42%; 其次是鲇形目, 为4科7属13种, 占总种数的17.11%; 鲈形目为4科4属7种, 占总种数的9.21%; 鲑形目为1科2属2种, 占总种数的2.63%; 合鳃鱼目和鳗鲡目均为1科1属1种, 各占总种数的1.32%。科级水平上表现出了较高的多样性, 共有14科, 其中鲤科占主体部分, 共44个种, 占土著鱼类总种数的57.89%; 其次是鳊科, 共9个种, 占总种数的11.84%; 花鳉科共6个种, 占总种数的7.89%; 虾虎鱼科共3个种, 占总种数的3.95%; 条鳅科、鲃科、鲢科和脂鲤科均有2个种, 各占总种数的2.63%; 钝头鲂科、鮡科、合鳃鱼科、沙塘鳢科、鳢科和鳗鲡科均有1个种, 各占总种数的1.32%。

在我国鲤科鱼类12个亚科中, 调查区域分布有

10个亚科, 其中鮡亚科包含物种数最多, 有12属16种, 占鲤科总数的36.36%; 其次是鲃亚科, 有9属11种, 占总数的25%; 鳊亚科2属4种, 占总数的9.09%; 雅罗鱼亚科3属3种, 占总数的6.82%; 鲴亚科、鲮亚科、鲢亚科和鲤亚科均为2属2种, 各占总数的4.55%; 鲃亚科和鳅鲃亚科均有1属1种, 各占2.27%。缺少主要分布于青藏高原的裂腹鱼亚科和主要分布于东洋区的野鲮亚科的种类。

2.2 鱼类群落多样性

2.2.1 鱼类群落多样性指数的空间变化

汉江洋县段干流的Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数最高, 分别是6.91、3.03和0.79, 金水河和酉水河次之。溢水河、浣水河、涪水河和坪堵河4条支流的丰富度和多样性指数都处于较低的水平, 相差不明显。所有河流的均匀度指数都处于相近的水平, 差别较小(图2a)。

2.2.2 鱼类群落多样性指数的季节变化

鱼类群落多样性指数在春季和秋季间表现出了一定的差异(图2), 涪水河与坪堵河春季未进行鱼类采集, 无法进行季节比较。汉江干流秋季的丰富度指数和多样性指数都要高于春季; 金水河与溢水河春季高于秋季, 其他支流秋季高于春季。所有河流春秋两季的均匀度指数间没有显著差异($P = 0.077, > 0.05$)。

综合干流和支流分析, 所有河流春秋两季的种数丰富度间都无显著差异($P = 0.784, > 0.05$), 多样性指数在两季节间也无显著差异($P = 0.838, > 0.05$), 说明鱼类多样性的季节分布无明显区别(图2)。

2.3 不同河流鱼类群落的Jaccard相似性系数

在计算鱼类相似性系数时, 以野外采集获得的土著鱼类为基础, 外来物种不计入内。洋县汉江干流以及其他支流的相似性系数见表1, 浣水河和溢水河的鱼类相似性系数最高, 为0.71, 浣水河与酉水河、涪水河与坪堵河的鱼类相似性系数在0.5–0.75, 为中等相似, 溢水河、涪水河和坪堵河3条支流与汉江干流的鱼类相似性系数均 < 0.25 , 为极不相似, 其余所有河流之间的相似性系数在0.25–0.5范围内, 即中等不相似。

2.4 鱼类优势种分析

野外调查采集的土著鱼类中只有宽鳍鱲(*Zacco platypus*)是优势种(IRI 为1,031.97)(表2), 短须颌须

① 肖文磊 (2016) 仙女湖鱼类群落特征及鱼产潜力分析. 硕士学位论文, 南昌大学, 南昌。

图2 汉江洋县段各河流鱼类群落多样性(a)及鱼类群落多样性的季节变化(b)

Fig. 2 Fish diversity of different rivers (a) and seasonal variation of fish diversity of different rivers (b) in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

表1 汉江洋县段各河流鱼类的Jaccard相似性系数

Table 1 The Jaccard similarity coefficient in different rivers in the Yangxian section of the Hanjiang River

	酉水河 Youshui River	溢水河 Yishui River	倪水河 Tangshui River	涪水河 Xushui River	坪堵河 Pingdu River	汉江 Hanjiang River
金水河 Jinshui River	0.48	0.26	0.33	0.33	0.25	0.41
酉水河 Youshui River		0.39	0.50	0.32	0.35	0.32
溢水河 Yishui River			0.71	0.33	0.29	0.19
倪水河 Tangshui River				0.47	0.43	0.26
涪水河 Xushui River					0.60	0.15
坪堵河 Pingdu River						0.10

鮡 (*Gnathopogon imberbis*)、马口鱼 (*Opsariichthys bidens*)、似鮡 (*Pseudogobio vaillanti vaillant*)、拉氏鱮 (*Phoxinus lagowskii*)、大斑花鳅 (*Cobitis macrostigma*)、乐山小鰾鮡 (*Microphysogobio kiatingensis*)和银鮡 (*Squalidus argentatus*)为重要种。

调查区域洋县鱼类优势种和重要种的季节变

化差异不显著 ($P = 0.169, > 0.05$) (表2), 秋季优势种是宽鳍鱮和短须颌须鮡, 春季优势种是马口鱼。

汉江干流以及6条主要支流的鱼类优势种见表3。干流没有优势种, IRI值最高的是银鮡, 是汉江干流重要种。金水河优势种有3种, 分别是似鮡、宽鳍鱮和马口鱼; 溢水河优势种有4种, 分别是大斑花

表2 汉江洋县段鱼类优势种和重要种的季节变化

Table 2 Seasonal variation of fish dominant species and important species in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

物种 Species	相对重要性指数 Index of relative importance (IRI)		
	总计 Total	秋季 Autumn	春季 Spring
宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	1,031.97	1,952.15	–
短须颌须鲃 <i>Gnathopogon imberbis</i>	918.31	1,279.67	383.99
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	761.68	632.14	1,151.37
似鲃 <i>Pseudogobio vaillanti vaillant</i>	588.57	968.44	–
拉氏鲃 <i>Phoxinus lagowskii</i>	263.62	459.69	–
乐山小鲃 <i>Microphysogobio kiatingensis</i>	234.78	389.86	–
银鲃 <i>Squalidus argentatus</i>	148.60	340.77	–
大斑花鲃 <i>Cobitis macrostigma</i>	239.22	236.36	270.79
花鲢 <i>Hemibarbus maculatus</i>	–	144.64	–
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	–	122.10	–
圆吻鲃 <i>Distoechodon tumirostris</i>	–	117.47	–
鲫 <i>Carassius auratus</i>	–	113.58	–
尖头鲃 <i>Culter oxycephalus</i>	–	–	172.79
多鳞白甲鱼 <i>Onychostoma macrolepis</i>	–	–	169.57
神农吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius shennongensis</i>	–	–	163.97
鲢 <i>Silurus asotus</i>	–	–	103.77

鳅、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)、稀有花鳅(*Cobitis rarus*)和短须颌须鲃; 浠水河优势种有5种, 分别是短须颌须鲃、宽鳍鱮、拉氏鲃、似鲃和马口鱼; 酉水河优势种有4种, 分别是马口鱼、似鲃、宽

鳍鱮和短须颌须鲃; 涪水河优势种共3种, 分别是宽鳍鱮、短须颌须鲃和红尾荷马条鳅(*Homatula variegata*)。坪塘河优势种有4种, 分别是宽鳍鱮、拉氏鲃、似鲃和短须颌须鲃。

2.5 鱼类体重分布及生态习性

图3显示渔获物中体重< 10 g的物种在数量上具有极大的优势, 占总数量的84.28%, 其次是体重为10–100 g的物种。体重为10–100 g的物种在生物量方面具有主要优势, 占总体重的44.49%。表明调查区域的鱼类主要以中小型鱼类为主, 例如宽鳍鱮、拉氏鲃、短须颌须鲃等。

从图4a可以看出, 7条河流中主要以栖息于中下层和底层的鱼类为主。其中共5种鱼类属于中上层栖息鱼类, 占总体的9.80%; 26种鱼类属于近底层栖息鱼类, 占总体的50.98%; 20种鱼类属于底层栖息鱼类, 占总体的39.22% (附录1)。从图4b可以看出, 7条河流中植食性鱼类普遍较少, 其余河流中仅汉江干流和酉水河中肉食性鱼类多于杂食性鱼类。共24种鱼类属于肉食性为主的鱼类, 占总体的47.06%; 7种属于植食性为主的鱼类, 占总体的13.73%; 20种属于杂食性鱼类, 占总体的39.22% (附录1)。

2.6 ABC曲线

从图5可以看出, 总体、秋季、春季鱼类群落ABC曲线中, 物种丰度曲线均在生物量曲线之上, 并且W值都小于0, 表明调查区域整体鱼类群落受到严重干扰, 秋季和春季鱼类也受到不同程度的干扰。

表3 汉江洋县段鱼类优势种的空间变化

Table 3 Spatial variation of dominant fish species in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

物种 Species	相对重要性指数 Index of relative importance (IRI)						
	汉江 Hanjiang River	金水河 Jinshui River	涪水河 Yishui River	浠水河 Tangshui River	酉水河 Youshui River	涪水河 Xushui River	坪塘河 Pingdu River
宽鳍鱮 <i>Zacco platypus</i>	–	1,775.83	–	1,904.29	1,312.76	7,872.73	4,161.01
马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	–	1,013.00	–	1,237.04	5,750.20	–	–
拉氏鲃 <i>Phoxinus lagowskii</i>	–	–	–	1,806.22	–	–	6,876.49
银鲃 <i>Squalidus argentatus</i>	859.67	–	–	–	–	–	–
似鲃 <i>Pseudogobio vaillanti vaillant</i>	–	2,039.71	–	1,478.20	1,895.42	–	5,129.72
短须颌须鲃 <i>Gnathopogon imberbis</i>	–	–	1,172.40	3,290.10	1,303.19	6,877.97	1,148.46
红尾荷马条鳅 <i>Homatula variegata</i>	–	–	–	–	–	1,995.12	–
大斑花鳅 <i>Cobitis macrostigma</i>	–	–	6,300.01	–	–	–	–
稀有花鳅 <i>Cobitis rarus</i>	–	–	1,488.03	–	–	–	–
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	–	–	1,571.80	–	–	–	–

图3 汉江洋县段不同体重范围鱼类的数量和重量占总数量和总体重的比例

Fig. 3 The proportion of fish quantity and weight to total quantity and weight in different weight ranges in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

3 讨论

3.1 鱼类物种组成与多样性

3.1.1 区系组成

汉江洋县段共有土著鱼类76种, 占汉江上、中游鱼类总数的72.38%; 其中鲤科鱼类占土著鱼类总数的57.89%, 与汉江上、中游鲤科鱼类占比60%的结果非常接近(陕西省动物研究所等, 1987), 这充分反映出汉江洋县段具有很高的流域代表性。整个汉

江水系分布有鲤科鱼类12个亚科中的11个(陕西省动物研究所等, 1987), 而在调查区域中, 除裂腹鱼亚科在调查中没有发现外, 其余10亚科的鱼类均有记录(附录1)。此外, 汉江洋县段还是整个秦岭地区鱼类区系的一个缩影, 除鲮形目外(秦岭只分布有青鲮(*Oryzias latipes*) 1种), 研究区域包含了秦岭地区鱼类的其他所有目(陕西省动物研究所等, 1987)。秦岭地区分布的一些重要鱼类在调查区域都有分布, 如川陕哲罗鲑(*Hucho bleekeri*)、秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis*)等。

从区系组成上看, 汉江洋县段的鱼类属于长江中游鱼类区系, 但与邻近水系相比还存在一定的差异性。例如相较嘉陵江水系, 此处缺乏裂腹鱼亚科和野鲮亚科的种类, 但分布于大渡河、岷江上游的川陕哲罗鲑在此处分布而不见于嘉陵江水系; 像神农吻虾虎鱼(*Rhinogobius shennongensis*)等种类, 则只见于本水系(张春光和赵亚辉, 2016)。而同汉江中游的鱼类组成相比, 调查区域缺乏平鳍鳅科、钝头鮠科、银鱼科、刺鳅科、斗鱼科等鱼类(李修峰等, 2005), 但如前文提到的川陕哲罗鲑、秦岭细鳞鲑等, 则主要分布于此处的支流中。

图4 汉江洋县段各河流鱼类按栖息空间以及食性划分的生态习性

Fig. 4 Ecological habits of fish in the Yangxian section of the Hanjiang River basin by habitation space and food preference

图5 汉江洋县段鱼类丰度生物量曲线。a: 鱼类总体; b: 秋季鱼类; c: 春季鱼类。

Fig. 5 Plot abundance biomass comparison of fish in the Yangxian section of the Hanjiang River basin. A, Fish population; B, Fish in autumn; C, Fish in spring.

3.1.2 珍稀濒危鱼类组成

调查区域内分布有国家Ⅰ级重点保护水生野生动物川陕哲罗鲑以及国家Ⅱ级重点保护水生野生动物秦岭细鳞鲑和多鳞白甲鱼 (*Onychostoma macrolepis*), 土著鱼类名录中, 在《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016)中被评定为极危(CR)的有1种, 即川陕哲罗鲑; 被评定为濒危(EN)的有3种, 分别是秦岭细鳞鲑、日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)和神农吻虾虎鱼; 被评定为易危(VU)的1种, 为多鳞白甲鱼。合计属于受胁物种范畴的鱼类5种, 占土著鱼类总数的6.58%。评定为无危的共有57种, 占总数的75%; 数据缺乏的共12种, 占总数的15.79%; 还有2种在红色名录中未被提及(附录1)。

总体上看, 濒危鱼类所占比例较低, 只占土著鱼类总数的6.58%, 这一数字远低于中国整体受胁淡水鱼类的比例(20.44%) (曹亮等, 2016)。但从区域上看, 整个长江中下游共有受胁物种28种, 汉江洋县段就占了其中的17.86%, 而汉江洋县段的流域面积则只占到长江中下游流域面积的0.4%左右。另外, 尽管调查区域的珍稀濒危鱼类只有5种, 但其中的川陕哲罗鲑、秦岭细鳞鲑和多鳞白甲鱼均被列入了《国家重点保护野生动物名录》中。同时也要看到, 数据缺乏或未被评估的物种也占到了当地土著鱼类总数的18.42%, 说明相当比例的物种其种群现状和受胁状态是我们所不了解的, 在后续的研究中应作为调查重点。

3.1.3 鱼类多样性现状

总体上看, 目前洋县鱼类区系组成相对完整, 且覆盖了绝大多数目、科和亚科, 同中国很多河流相比, 鱼类多样性现状比较良好。

从调查鱼类的优势种组成可以看出, *IRI*指数最

高的是宽鳍鱮(表2)。虽然不同季节不同河流的优势种不同, 但是多数物种都属于小型鱼类。从ABC曲线中(图5)可以看出, 总体上生物量曲线始终位于数量曲线之下, *W*为负数, 说明河流稳定性低, 受干扰严重, 且鱼类个体普遍较小。春秋两季的ABC曲线走势相同, 春季*W*值小于秋季, 说明春季的鱼类更偏小型化。渔获物体重分布也显示出同样趋势(图3), 说明汉江洋县段的鱼类小型化严重, 其中杂食性鱼类数量较多, 这些都是水体质量下降的表现。鱼类的小型化也与人为过度捕捞有关, 野生鱼类面临严重的捕捞压力, 而水生态恢复时期较短, 导致鱼类小型化问题越来越严重。不容忽视的是鱼类小型化的结果与调查过程中使用的渔具也存在一定关系, 地笼和挂网不易捕捞到体型较大的鱼类, 会对结果产生一定的影响。

根据《水生生物监测手册》(国家环保总局, 1992)中Shannon-Wiener多样性指数(*H'*)的分级评价标准, 汉江的*H'* > 3, 表示个体分布均匀, 水体清洁; 金水河和西水河的*H'*介于2和3之间, 说明两个支流的个体分布比较均匀, 水体轻度污染; 其余4条支流的多样性指数介于1和2之间, 表明个体分布比较均匀, 水体中度污染。

王卓等(2019) 2016年春季在汉江上游平川段调查到鱼类29种, 数量上占优势的鱼类是鲤科和花鳅科, 分别占总数的72.41%和17.24%。我们在汉江洋县段干流共采集鱼类46种, 其中春季采集22种, 秋季41种, 与王卓等(2019)在汉江上游的调查结果相近, 春季鱼类种类较少, 说明汉江干流在不同季节鱼类组成有很大的不同, 通常春季物种丰富度低于秋季。

3.1.4 多样性的空间差异

洋县境内水系以东西走向的汉江干流为主, 还有多条以南北走向为主的支流, 造成鱼类多样性在空间上的分布不均。从鱼类物种组成和多样性分析结果(图2)可以看出, 汉江干流和支流的区别较大。支流鱼类物种数是干流的67.39%; 而干支流共有物种25种, 只占到调查鱼类总数的49.01%。干流与各支流的相似性系数在0–0.50范围内(表1), 相似性较低, 这一特点与干、支流不同的生态环境有关。干流河道宽阔, 地势相对平缓, 流速较低, 水资源丰富, 给鱼类提供了多样的栖息环境, 而众多支流多属山涧溪流, 河道普遍较浅且狭窄, 蜿蜒曲折, 落差较大, 更适合小型鱼类生存。此外, 尽管支流的物种数量不高, 但却分布有很多珍稀濒危物种, 例如列入保护名录的川陕哲罗鲑和秦岭细鳞鲑, 只局限分布于干流北侧支流的上游。干、支流在鱼类多样性组成上的差异对于未来流域鱼类多样性保护将有重要意义。

渭水河中下游区段在洋县境内分布, 坪堵河是渭水河的支流, 河流总长较短。由于渭水河上游建有多级小型水电站, 造成中下游水资源匮乏, 洋县段水资源主要用作农业灌溉, 农业利用会造成水生态恶化, 导致对鱼类资源的严重破坏, 所以两条河流鱼类物种数在所有支流中最少的, 且数量相近, 物种相似性属于中等相似范畴(表1)。其余4条支流, 鱼类物种数从西至东逐渐增加, 物种越来越多样化, 其中溢水河与傥水河的相似性系数最高(0.71), 属于中等相似范围, 剩余支流间相似性系数较低, 均属于中等不相似范围。

3.1.5 鱼类群落结构的空间差异

鱼类群落结构在空间上呈现明显横向分布特征, 从坪堵河至金水河, 鱼类群落结构逐渐变化(图4)。汉江干流以肉食性近底层鱼类为主, 渭水河和溢水河主要以杂食性底层鱼类为主, 坪堵河和金水河以杂食性近底层鱼类为主, 傥水河和酉水河近底层鱼类和底层鱼类占比相同, 傥水河以杂食性鱼类为主, 酉水河以肉食性鱼类为主, 可以看出, 大多数支流都是以杂食性鱼类为主, 人为活动造成水域质量下降, 进而影响杂食性鱼类比例, 汉江干流和酉水河是肉食性鱼类为主, 说明受人类活动影响较小, 水域质量相对良好。

3.2 鱼类多样性面临水利水电工程的影响

调查区域多为山地, 河流密集, 且水量多、落差大, 特别是支流水利水电工程密集。据当地水利局提供的资料, 县域内共有各种类型水库89个。

汉江上游干流已修建了一系列梯级电站, 目前洋县境内的汉江干流尚未建设有大型的水电站, 但规划建设的黄金峡水利枢纽是整个汉江干流的第一梯级电站, 向下衔接石泉电站(水库)。同时黄金峡水利枢纽也是引汉济渭工程的两个水源之一, 工程以供水为主, 兼顾发电及航运等综合效益(毛拥政, 2014)。黄金峡水利枢纽坝址位于石泉水库库尾下游2 km处, 未来水利枢纽建成后, 将和黄金峡下游的一系列梯级水库构成首尾相连的水库群, 从整体上改变整个汉江干流上游原有的水域生态环境, 原先的流水生境转变为以静水生境为主的水库水体。栖息环境的剧烈变化将直接影响原有河流的鱼类群落组成, 使得一些适应流水生境的鱼类种群数量降低, 甚至有些鱼类会逐渐退出原先栖居的河段; 取而代之的将是以静水为适宜生境的种类。同时形成的水库环境, 若配合不适当的养殖引种, 将为外来物种的泛滥形成条件。黄金峡河段是汉江上游传统的渔业产区, 还是鱼类重要的产卵场所, 分布有相连的家鱼产卵场。历史调查得知, 峡内的大瓦滩、长新滩、黄龙滩等都是鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)等重要家鱼的产卵场(范维端, 1986)。这些产漂流性卵的鱼类, 需要较长的流水河段供受精卵在漂流过程中逐渐发育孵化, 目前下游的一系列水库已经对这些产漂流性卵鱼类的生存产生严重威胁。未来一旦黄金峡水库形成, 流水河段进一步消失, 将使得这些重要经济鱼类的野生种群彻底从区域内消失。此外建成的大坝还会阻碍上下游鱼类之间的交流, 并深刻改变固有的一些水文条件, 变化的水温、流速和流量等都会影响鱼类的产卵繁殖。因此设计规划过鱼设施(张鹏利等, 2017)、进行流域尺度的梯级水库生态流量调节(汪登强等, 2019; 马雅丽和彭昆, 2020), 以及珍稀濒危鱼类的增殖放流都将是未来工程建设中重要的补偿机制。

在支流上, 目前已建设有众多的中小型电站(如傥河水电站、酉河水电站等), 这些小水电站是造成支流鱼类多样性和鱼类资源下降的主要原因。例

如金水河上游的3个水电站都是引水式水电站,这类水电站除了破坏河流纵向连通性,使得生境片段化之外,还会在下游形成减水或脱水河段,有时很长一段河道呈现干涸状态。支流本身流程较短,生活的多是一些定居性鱼类,水体生境的彻底消失将直接威胁支流生活的众多小型鱼类。因此科学合理地泄放生态流量,特别是在鱼类繁殖季节保证河道不断流,对于支流土著鱼类的保护至关重要。此外洋县的若干支流是川陕哲罗鲑和秦岭细鳞鲑等保护物种的重要栖息地,这些鱼类对环境的需求高,除了需要富氧的流水生境外,水质还要保持清洁,目前调查区域内的很多支流现况已经很难满足这样的环境条件,应加以高度重视。

前已述及,干流和支流在鱼类物种组成上存在较大差异,且支流水环境由于众多小水电站的存在而高度破碎化,因此支流很难作为干流鱼类的替代生境;干流环境破坏后,一些原先在干流分布的物种,亦很难退却到相应支流繁衍并完成生活史。因此未来在栖息地保护设计中,应充分考虑到干、支流鱼类物种组成上的差异性,尽量在干流和支流都进行栖息地保护规划,以期更好地保护地方的土著鱼类。

3.3 跨流域调水的生态风险及其对鱼类多样性的潜在影响

汉江水资源充沛、水质整体状况良好,加之特殊的地理位置,使其链接到不同的跨流域调水工程。例如南水北调中线工程的水源区,即是汉江流域丹江口库区及上游地区(刘伯涛和李崇贵, 2019),汉江之水跨越淮河、黄河,最终进入到以京津冀为主的海河流域。除此之外,调查区域所涉及汉江洋县段,更是引汉济渭工程的重要水源地之一。引汉济渭工程的主要任务就是从陕西汉江上游干流跨流域调水进入渭河流域关中地区,向渭河沿岸的西安、咸阳、渭南、杨陵等21个直接受水对象供水(党辉等, 2019)。在跨流域调水过程中,以水生生物为核心探讨调水工程生态影响的研究尚不多(罗昊和周雪欣, 2017),积累的数据和经验亦不足。

从鱼类多样性的角度考虑,跨流域调水最大的生态风险之一就是外来物种的引入。秦岭是中国重要的生物地理分界线,位于秦岭以北的黄河水系与秦岭以南的长江水系在鱼类多样性组成上有很大差异。例如秦岭北坡的鱼类种类较少,只有99种;

而南坡种类较多,计有142种(陕西省动物研究所等, 1987)。调查区域汉江洋县段在淡水鱼类生物地理区上属华东区江淮亚区,而引汉济渭工程的受水区则属华东区的河海亚区(李思忠, 1981),这一区别导致了引汉济渭工程引水区和受水区之间较大的鱼类组成差异。通过引水,可能导致自然分布于长江流域而不至于黄河流域的种类人为扩散到黄河流域。例如受水区渭河水系缺乏鲢形目的鲢科、钝头鮠科,鲤形目鲤科中的圆吻鲴属(*Distoechodon*)、华鳊属(*Sinibrama*)等种类,而这些恰恰都分布于汉江洋县段。尽管未来在调水过程中会有一些预防措施,且成鱼也很难通过多级泵站进入到新的水体,但仍然存在鱼卵、鱼苗等通过调水工程进入到黄河流域的生态风险。故而非常有必要对引水区和受水区的鱼类多样性进行详细调查,积累本底信息,通过种类组成对比和适生性分析等手段,对潜在的外来物种建立预警机制。本项工作记录了引汉济渭工程引水区鱼类多样性的现状,为未来对跨流域调水可能的生态风险分析和动态跟踪监测提供了重要的前期材料。

ORCID

赵亚辉 <https://orcid.org/0000-0002-4615-596X>

参考文献

- Blanchard F, Leloc'H F, Hily C, Boucher J (2004) Fishing effects on diversity, size and community structure of the benthic invertebrate and fish megafauna on the Bay of Biscay coast of France. *Marine Ecology Progress Series*, 280, 249–260.
- 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.]
- Chen XH, Li XP, Cheng X (2008) Spatial-temporal distribution of fish assemblages in the upstreams of Huangpu River and Suzhou Creek. *Biodiversity Science*, 16, 191–196. (in Chinese with English abstract) [陈小华, 李小平, 程曦 (2008) 黄浦江和苏州河上游鱼类多样性组成的时空特征. *生物多样性*, 16, 191–196.]
- Chen YY (1998) Fauna of China · 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 ZC, Yuan SL, Gao JZ (1991) Yangxian County

- Overview. Shaanxi Administration, (16), 49. (in Chinese) [陈章存, 袁社龄, 高敬智 (1991) 洋县概况. 陕西政报, (16), 49.]
- Chu XL, Zheng BS, Dai DY (1999) Fauna of China · Osteichthyes · Siluriformes. Science Press, Beijing. (in Chinese) [褚新洛, 郑葆珊, 戴定远 (1999) 中国动物志 硬骨鱼纲 鲇形目. 科学出版社, 北京.]
- Dang H, Ma QR, Song XF, Li HW (2019) Analysis and countermeasures of the impact of the Han-to-Weihe River Transfer Project on the water environment of the water-receiving area. Shaanxi Water Resources, (7), 73–75. (in Chinese) [党辉, 马清瑞, 宋晓峰, 李宏伟 (2019) 引汉济渭工程对受水区水环境的影响分析及对策. 陕西水利, (7), 73–75.]
- Fan WD (1986) The current situation of fishery resources and opinions on development and utilization in the upper reaches of the Hanjiang River. Reservoir Fisheries, (4), 33–38. (in Chinese) [范维端 (1986) 汉江上游渔业资源的现状和开发利用意见. 水利渔业, (4), 33–38.]
- 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.]
- Jing ZX, Xia J, Zhang X, Wang Q, Shi W, Ma XY (2019) Spatial and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River. Research of Environmental Sciences, 32, 104–115. (in Chinese with English abstract) [景朝霞, 夏军, 张翔, 王强, 石卫, 马协一 (2019) 汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律. 环境科学研究, 32, 104–115.]
- Li SZ (1981) Distribution and Division of Freshwater Fishes in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李思忠 (1981) 中国淡水鱼类的分布区划. 科学出版社, 北京.]
- Li XF, Huang DM, Xie WX, Chang XL, Yang HY, Zhang YQ, He JQ (2005) Status of fisher resources in the middle reaches of the Hanjiang River. Journal of Lake Sciences, 17, 366–372. (in Chinese with English abstract) [李修峰, 黄道明, 谢文星, 常秀岭, 杨汉运, 张友谦, 何家庆 (2005) 汉江中游鱼类资源现状. 湖泊科学, 17, 366–372.]
- Lin XZ, Li DM, Liu HZ, Lin HS, Yang SR, Fan HJ, Wen RS (2016) Fish species diversity and its seasonal variations in the Chaozhou section of Hanjiang River, Guangdong Province. Biodiversity Science, 24, 185–194. (in Chinese with English abstract) [林小植, 李冬梅, 刘焕章, 林鸿生, 杨少荣, 范汉金, 温茹淑 (2016) 广东韩江潮州江段鱼类多样性及季节变化. 生物多样性, 24, 185–194.]
- Liu BT, Li CG (2019) Comprehensive evaluation of ecological environment in water supply area of the middle-route of the South-to-North Water Diversion Project. Bulletin of Science and Technology, 35, 191–196. (in Chinese with English abstract) [刘伯涛, 李崇贵 (2019) 南水北调中线工程水源区生态环境综合评价. 科技通报, 35, 191–196.]
- Lu JY, Lin L (2020) Problems and countermeasures on water eco-environment in Hanjiang River Ecological Economic belt. Research of Environmental Sciences, 33, 1179–1186. (in Chinese with English abstract) [卢金友, 林莉 (2020) 汉江生态经济带水生态环境问题及对策. 环境科学研究, 33, 1179–1186.]
- Luo H, Zhou XX (2017) Analysis on ecological impact identification and evaluation index system of Inter Basin Water Diversion Project. Environmental Science and Management, 42, 190–194. (in Chinese with English abstract) [罗昊, 周雪欣 (2017) 跨流域调水工程的生态影响识别及评价指标体系研究. 环境科学与管理, 42, 190–194.]
- Ma YL, Peng K (2020) Research on optimal operation of cascade reservoirs in Hanjiang River Basin. Water Resources Planning and Design, (2), 63–66, 101. (in Chinese) [马雅丽, 彭昆 (2020) 汉江流域梯级水库群优化调度研究. 水利规划与设计, (2), 63–66, 101.]
- Mao YZ (2014) Research on general arrangement of Huangjinxia hydro-junction. Shaanxi Water Resources, (2), 53–55. (in Chinese) [毛拥政 (2014) 黄金峡水利枢纽总布置研究. 陕西水利, (2), 53–55.]
- Margalef R (1958) Information theory in ecology. General System Yearbook, 3, 36–71.
- State Environmental Protection Administration (1992) Aquatic Monitoring Manual. Southeast University Press, Nanjing. (in Chinese) [国家环保总局 (1992) 水生生物监测手册. 东南大学出版社, 南京.]
- Parry GDR, Johnson MS, Bell RM, Edwards RW, Wathern P (1984) Ecological methodology. In: Planning and Ecology (eds Roberts RD, Roberts TM), pp. 37–98. Springer, Dordrecht.
- Pinkas L, Oliphant MS, Iverson ILK (1970) Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. Fish Bulletin, 152, 1–105
- Shaanxi Institute of Zoology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Department of Biology, Lanzhou University (1987) Fishes in Qinling Mountains Area. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陕西省动物研究所, 中国科学院水生生物研究所, 兰州大学生物系 (1987) 秦岭鱼类志. 科学出版社, 北京.]
- Wang DQ, Gao L, Duan XB, Chen DQ, Meng Q, Liu SP (2019) Preliminary analysis of the early resources of fish in

- the lower reaches of the Hanjiang River and the effect of cascade joint ecological regulation on fish reproduction. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28, 1909–1917. (in Chinese) [汪登强, 高雷, 段辛斌, 陈大庆, 孟秋, 刘绍平 (2019) 汉江下游鱼类早期资源及梯级联合生态调度对鱼类繁殖影响的初步分析. 长江流域资源与环境, 28, 1909–1917.]
- Wang KF, Zhang HX, Yang XZ, Wei WK, Zhao Y, Hu WX (2003) Fish resources and diversity in Changqing National Reserve. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 31, 5–9. (in Chinese with English abstract) [王开锋, 张红星, 杨兴中, 魏武科, 赵阳, 胡万兴 (2003) 陕西长青自然保护区鱼类资源及其多样性. 陕西师范大学学报(自然科学版), 31, 5–9.]
- Wang QJ, Zhao H, Luo L, Zhang HX, Wang ZQ, Li JW (2012) Study on the diversity of fish resources in the Xushui River Basin. *Journal of Hydroecology*, 33, 100–103. (in Chinese) [王启军, 赵虎, 罗磊, 张红星, 王中乾, 李军文 (2012) 渭水河流域鱼类资源多样性研究. 水生态学杂志, 33, 100–103.]
- Wang XL, Song XX (2019) Study on the change of hydrological regime in the middle and lower reaches of Hanjiang River under the influence of cascade water conservancy projects. *Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition)*, 53, 685–691. (in Chinese with English abstract) [王学雷, 宋辛辛 (2019) 梯级水库叠加影响下汉江中下游流域水文情势变化研究. 华中师范大学学报(自然科学版), 53, 685–691.]
- 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.]
- Wu HL, Zhong JS (2008) *Fauna of China · Osteichthyes · Perciformes (V) · Gobioidae*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [伍汉霖, 钟俊生 (2008) 中国动物志·硬骨鱼纲·鲈形目(五)·虾虎鱼亚目. 科学出版社, 北京.]
- Wu XW (1981) *Fishes of Cyprinidae in China (I)*. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai. (in Chinese) [伍献文 (1981) 中国鲤科鱼类志(上卷). 上海科学技术出版社, 上海.]
- Wu XW (1982) *Fishes of Cyprinidae in China (II)*. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai. (in Chinese) [伍献文 (1982) 中国鲤科鱼类志(下卷). 上海科学技术出版社, 上海.]
- Yue PQ (2000) *Fauna of China · Osteichthyes · Cypriniformes*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [乐佩琦 (2000) 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目. 科学出版社, 北京.]
- Zhang CG, Zhao YH (2016) *Species Diversity and Distribution of Inland Fishes in China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张春光, 赵亚辉 (2016) 中国内陆鱼类物种与分布. 科学出版社, 北京.]
- Zhang HB, Zhong L, Yang JY, Mao ZY, Yang GL, Li Y, Xu TQ (2006) On fish species diversity of Hanjiang River in Shaanxi Province. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 34, 60–66. (in Chinese with English abstract) [张海斌, 钟林, 杨军严, 毛治彦, 杨甘霖, 李云, 许涛清 (2006) 汉江陕西段河流湿地鱼类物种多样性研究. 陕西师范大学学报(自然科学版), 34, 60–66.]
- Zhang PL, Zhu SH, Wan JW, Li XF (2017) Design of high-head fish-pass structure for Huangjinxia Water Control Project. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 48(28), 44–48. (in Chinese with English abstract) [张鹏利, 朱世洪, 万继伟, 黎贤访 (2017) 黄金峡水利枢纽高水头过鱼建筑物设计. 水利水电技术, 48(28), 44–48.]

(责任编辑: 陈小勇 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 汉江洋县段淡水鱼类物种名录

Appendix 1 List of freshwater fish species in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2020158-1.pdf>

赵阳, 牛诚祯, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

附录1 汉江洋县段淡水鱼类物种名录

Appendix 1 List of freshwater fish species in the Yangxian section of the Hanjiang River basin

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
一、鳗鲡目 <i>Anguilliformes</i>					
（一）鳗鲡科 <i>Anguillidae</i>					
1. 鳗鲡属 <i>Anguilla</i>					
（1）日本鳗鲡 <i>Anguilla japonica</i>	√			EN	
二、鲤形目 <i>Cypriniformes</i>					
（二）鲤科 <i>Cyprinidae</i>					
I 鲴亚科 <i>Danioninae</i>					
2. 鲴属 <i>Zacco</i>					
（2）宽鳍鲴 <i>Zacco platypus</i>	√	√		LC	D/O
3. 马口鱼属 <i>Opsariichthys</i>					
（3）马口鱼 <i>Opsariichthys bidens</i>	√	√		LC	D/C
II 雅罗鱼亚科 <i>Leuciscinae</i>					
4. 青鱼属 <i>Mylopharyngodon</i>					
（4）青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	√			LC	
5. 丁鲷属 <i>Tinca</i>					
（5）丁鲷 <i>Tinca tinca</i>		√	√	LC	
6. 鲃属 <i>Phoxinus</i>					
（6）拉氏鲃 <i>Phoxinus lagowskii</i>	√	√		LC	D/O
7. 草鱼属 <i>Ctenopharyngodon</i>					
（7）草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>		√		LC	D/H
III 鲃亚科 <i>Culterinae</i>					
8. 鲃属 <i>Parabramis</i>					

赵阳, 牛诚祗, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
(8) 鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>		√		LC	D/H
9. 华鳊属 <i>Sinibrama</i>					
(9) 伍氏华鳊 <i>Sinibrama wui</i>		√		LC	D/O
10. 飘鱼属 <i>Pseudolaubuca</i>					
(10) 银飘鱼 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	√	√		LC	P/O
11. 鲮属 <i>Hemiculter</i>					
(11) 鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	√	√		LC	P/O
12. 原鲃属 <i>Cultrichthys</i>					
(12) 红鳍原鲃 <i>Cultrichthys erythropterus</i>	√	√		LC	P/C
13. 鲃属 <i>Culter</i>					
(13) 尖头鲃 <i>Culter oxycephalus</i>	√	√		LC	D/O
(14) 翘嘴鲃 <i>Culter ilishaeformis</i>	√			LC	
14. 红鲃属 <i>Erythroculter</i>					
(15) 蒙古红鲃 <i>Erythroculter mongolicus</i>		√			P/C
15. 鲃属 <i>Chanodichthys</i>					
(16) 戴氏鲃 <i>Chanodichthys dabryi</i>	√				
(17) 蒙古鲃 <i>Chanodichthys mongolicus</i>	√			LC	
16. 鲂属 <i>Megalobrama</i>					
(18) 团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	√			LC	
IV 鲴亚科 <i>Xenocyprininae</i>					
17. 圆吻鲴属 <i>Distoechodon</i>					
(19) 圆吻鲴 <i>Distoechodon tumirostris</i>	√	√		LC	D/O
18. 似鳊属 <i>Pseudobrama</i>					
(20) 似鳊 <i>Pseudobrama simoni</i>	√			LC	

赵阳, 牛诚祗, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
V 鲢亚科 Hypophthalmichthyinae					
19. 鲢属 <i>Hypophthalmichthys</i>					
(21) 鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	√	√		LC	P/H
20. 鳊属 <i>Aristichthys</i>					
(22) 鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	√			LC	
VI 鲮亚科 Acheilognathinae					
21. 鲮属 <i>Acheilognathus</i>					
(23) 大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i>		√		LC	D/O
22. 鳊属 <i>Rhodeus</i>					
(24) 高体鳊 <i>Rhodeus ocellatus</i>	√	√		LC	D/H
(25) 中华鳊 <i>Rhodeus sinensis</i>	√	√		LC	D/H
(26) 彩石鳊 <i>Rhodeus lighti</i>	√			LC	
VII 鮡亚科 Gobioinae					
23. 鲮属 <i>Hemibarbus</i>					
(27) 唇鲮 <i>Hemibarbus labeo</i>	√	√		LC	D/C
(28) 花鲮 <i>Hemibarbus maculatus</i>	√	√		LC	D/C
24. 鳊属 <i>Sarcocheilichthys</i>					
(29) 黑鳍鳊 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	√	√		LC	D/O
25. 麦穗鱼属 <i>Pseudorasbora</i>					
(30) 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	√	√		LC	D/C
26. 银鮡属 <i>Squalidus</i>					
(31) 银鮡 <i>Squalidus argentatus</i>		√		LC	D/O
(32) 亮银鮡 <i>Squalidus nitens</i>		√		LC	D/O
27. 似鮡属 <i>Pseudogobio</i>					

赵阳, 牛诚祗, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
(33) 似鮡 <i>Pseudogobio vaillanti vaillant</i>	√	√		LC	B/O
28.小鰾鮡属 <i>Microphysogobio</i>					
(34) 乐山小鰾鮡 <i>Microphysogobio kiatingensis</i>		√		DD	B/O
29.颌须鮡属 <i>Gnathopogon</i>					
(35) 短须颌须鮡 <i>Gnathopogon imberbis</i>	√	√		DD	D/O
(36) 银色颌须鮡 <i>Gnathopogon argentatus</i>	√			DD	
30.吻鮡属 <i>Rhinogobio</i>					
(37) 吻鮡 <i>Rhinogobio typus</i>	√	√		LC	B/C
31.棒花鱼属 <i>Abbottina</i>					
(38) 棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	√			LC	
(39) 乐山棒花鱼 <i>Abbottina kiatingensis</i>	√			DD	
(40) 钝吻棒花鱼 <i>Abbottina obtusirostris</i>		√	√	LC	
32.铜鱼属 <i>Coreius</i>					
(41) 铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	√			LC	
33.蛇鮡属 <i>Saurogobio</i>					
(42) 蛇鮡 <i>Saurogobio dabryi</i>	√			LC	
34.片唇鮡属 <i>Platysmacheilus</i>					
(43) 片唇鮡 <i>Platysmacheilus exiguus</i>	√			LC	
VIII 鲈亚科 <i>Gobiobotinae</i>					
35.鲈属 <i>Gobiobotia</i>					
(44) 宜昌鲈 <i>Gobiobotia ichangensis</i>	√			LC	
IX 鲤亚科 <i>Cyprininae</i>					
36.鲤属 <i>Cyprinus</i>					
(45) 鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	√	√		LC	D/O

赵阳, 牛诚祯, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
37. 鲤属 <i>Carassius</i>					
(46) 鲤 <i>Carassius auratus</i>	√	√		LC	D/O
X 鲃亚科 <i>Barbinae</i>					
38. 多甲鱼属 <i>Onychostoma</i>					
(47) 多鳞白甲鱼 <i>Onychostoma macrolepis</i>	√	√		VU	D/O
(三) 条鳅科 <i>Noemacheilidae</i>					
39. 荷马条鳅属 <i>Homatula</i>					
(48) 红尾荷马条鳅 <i>Homatula variegata</i>	√	√		LC	B/O
40. 高原鳅属 <i>Triplophysa</i>					
(49) 贝氏高原鳅 <i>Triplophysa bleekeri</i>	√			DD	
(四) 花鳅科 <i>Cobitidae</i>					
XI 花鳅亚科 <i>Cobitinae</i>					
41. 花鳅属 <i>Cobitis</i>					
(50) 中华花鳅 <i>Cobitis sinensis</i>	√			LC	
(51) 稀有花鳅 <i>Cobitis rarus</i>		√		LC	B/H
(52) 大斑花鳅 <i>Cobitis macrostigma</i>		√		LC	B/H
42. 泥鳅属 <i>Misgurnus</i>					
(53) 泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	√	√		LC	B/C
43. 副泥鳅属 <i>Paramisgurnus</i>					
(54) 大鳞副泥鳅 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>		√		LC	B/O
XII 沙鳅亚科 <i>Botiinae</i>					
44. 副沙鳅属 <i>Parabotia</i>					
(55) 花斑副沙鳅 <i>Parabotia fasciata</i>	√			LC	
三、鲇形目 <i>Siluriformes</i>					

赵阳, 牛诚祗, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
(五) 钝头鮠科 Amblycipitidae					
45. 鮠属 <i>Liobagrus</i>					
(56) 拟缘鮠 <i>Liobagrus marginatoides</i>	√	√		DD	D/C
(六) 鲃科 Sisoridae					
46. 纹胸鲃属 <i>Glyptothorax</i>					
(57) 中华纹胸鲃 <i>Glyptothorax sinense</i>	√			LC	
(七) 鲇科 Siluridae					
47. 鲇属 <i>Silurus</i>					
(58) 鲇 <i>Silurus asotus</i>	√	√		LC	B/C
(59) 大口鲇 <i>Silurus meridionalis</i>	√	√		LC	B/C
(八) 鲿科 Bagridae					
48. 黄颡鱼属 <i>Pelteobagrus</i>					
(60) 黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	√	√		LC	B/C
(61) 瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	√			LC	
49. 鮠属 <i>Leiocassis</i>					
(62) 叉尾鮠 <i>Leiocassis tenuifurcatus</i>	√	√		DD	B/C
(63) 粗唇鮠 <i>Leiocassis crassilabris</i>	√	√		DD	B/C
50. 拟鲿属 <i>Pseudobagrus</i>					
(64) 盩眪拟鲿 <i>Pseudobagrus ondon</i>	√	√		DD	D/C
(65) 圆尾拟鲿 <i>Pseudobagrus tenuis</i>	√	√		DD	D/C
(66) 切尾拟鲿 <i>Pseudobagrus truncatus</i>	√			DD	
(67) 凹尾拟鲿 <i>Pseudobagrus emarginatus</i>	√			DD	
51. 鲢属 <i>Hemibagrus</i>					
(68) 大鳍鲢 <i>Hemibagrus macropterus</i>	√	√		LC	B/C

赵阳, 牛诚祯, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
四、合鳃鱼目 Synbranchiformes					
(九) 合鳃鱼科 Synbranchidae					
52. 黄鳝属 <i>Monopterus</i>					
(69) 黄鳝 <i>Monopterus albus</i>	√	√		LC	B/C
五、鲑形目 Salmoniformes					
(十) 鲑科 Salmonidae					
53. 哲罗鲑属 <i>Hucho</i>					
(70) 川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleekeri</i>	√	√		CR	
54. 细鳞鲑属 <i>Brachymystax</i>					
(71) 秦岭细鳞鲑 <i>Brachymystax tsinlingensis</i>	√	√		EN	
六、鲈形目 Perciformes					
(十一) 脂鲈科 Percichthyidae					
55. 鳊属 <i>Siniperca</i>					
(72) 斑鳊 <i>Siniperca scherzeri</i>	√	√		LC	D/C
(73) 大眼鳊 <i>Siniperca kneri</i>		√		LC	D/C
(十二) 沙塘鳢科 Odontobutidae					
56. 小黄鲈属 <i>Micropercops</i>					
(74) 小黄鲈 <i>Micropercops swinhonis</i>		√		LC	B/O
(十三) 虾虎鱼科 Gobiidae					
57. 吻虾虎鱼属 <i>Rhinogobius</i>					
(75) 波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>		√		LC	B/C
(76) 子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>		√		LC	B/C
(77) 神农吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius shennongensis</i>		√		EN	B/C
(十四) 鲢科 Channidae					

赵阳, 牛诚祎, 李雪健, 刘海波, 孙光, 罗遵兰, 赵亚辉 (2021) 跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状. 生物多样性, 29(3), 361–372.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2020158>

物种 Species	历史记录 Historic records	野外调查 Field survey	外来物种 Alien species	中国脊椎动物红色名录 Red List of China's Vertebrates	生态习性 Ecological habits
58. 鲢属 <i>Channa</i>					
(78) 乌鲢 <i>Channa argus</i>	√	√		LC	B/C

历史记录数据来自陕西省动物研究所等(1987), 《中国脊椎动物红色名录》数据来自蒋志刚等(2016)。P: 中上层; D: 近底层; B: 底层; H: 植食性; C: 肉食性; O: 杂食性。
 Historic records from Shaanxi Institute of Zoology et al (1987), Red List of China's Vertebrates from Zhigang Jiang et al (2016). P, Pelagic; D, Demersal; B, Benthic; H, Herbivorous; C, Carnivorous; O, Omnivorous.