

DOI: 10.12264/JFSC2024-0134

龙羊峡水库鱼类群落结构变化

刘旭^{1,2}, 沈丽¹, 胡烨^{1,3}, 马宝珊¹, 李鹏程¹, 杜浩¹, 吴金明¹

1. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223;

2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

3. 华中农业大学水产学院, 湖北 武汉 430070

摘要: 为了解龙羊峡水库鱼类群落结构现状及历史变化, 于 2023 年 5 月、9 月和 12 月对龙羊峡水库及附近水域鱼类群落进行调查, 并结合历史数据进行分析。结合采样需求与环境特征共设有 5 个鱼类群落采样点, 分别为龙羊峡水库的那黑鲁、吾雷村和龙羊峡镇 3 个点位, 黄河干流的曲什安镇和吾托 2 个点位。结果显示, 2023 年的调查共采集到 19 种鱼类, 隶属于 4 目 6 科 15 属, 鲤科(Cyprinidae)鱼类种类数最多, 占比 52.63%; 龙羊峡水库的优势种鱼类为鲫(*Carassius auratus*)、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、硬刺高原鳅(*Triplophysa scleroptera*)、麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)、池沼公鱼(*Hypomesus olidus*)和花斑裸鲤(*Gymnocypris eckloni*); 黄河干流的优势种鱼类为花斑裸鲤(*Gymnocypris eckloni*)、黄河裸裂尻鱼(*Schizopygopsis pylzovi*)和厚唇裸重唇鱼(*Gymnoditychus pachycheilus*)。物种多样性指数 5 月较高, 9 月和 12 月较低。ABC 曲线分析显示, W 值大于 0, 生物量优势度曲线在丰度优势度曲线的上方, 表明龙羊峡水库的群落结构相对稳定。与 1981 年和 2005—2007 年的数据比较分析显示, 龙羊峡水库蓄水以来, 土著鱼类减少 2 种, 外来鱼类增加 10 种, 目前龙羊峡水库以喜静缓水、杂食性、中下层、定居性、产黏性卵、下位口的鱼类为主。鱼类个体生态学矩阵显示龙羊峡水库土著鱼类主要以中下层($R=0.556$)、下位口($R=0.889$)等为主, 为广适性的外来鱼类提供了生态位空缺。2023 年龙羊峡水库鱼类组成与 1981 年的相似性指数为 0.33 (中等不相似), 与 2005—2007 年的相似性指数为 0.50 (中等相似), 说明龙羊峡水库蓄水(1987 年)后鱼类群落结构发生了明显变化。分析确认水库蓄水、外来鱼类引进是导致龙羊峡水库鱼类群落结构发生变化的主要原因。

关键词: 鱼类群落; 历史变化; 外来鱼类; 生态类型; 龙羊峡水库

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)09-1001-14

黄河上游因自然落差大, 水能资源丰富, 其河流段成为水电开发的重要河段, 是我国十三大水电基地之一^[1]。龙羊峡水电站是黄河上游第一座大型梯级电站, 始建于 1978 年, 至 1986 年开始蓄水, 是黄河上游第一座大型梯级电站, 控制流域面积 13.14 万 km², 占黄河流域总面积的 18%, 坝高 178 m, 总库容 274 亿 m³, 总装机容量 128 万 kW, 正常蓄水位高程 2600 m, 主要是以发电为主^[2]。

水利工程建设会改变当地水文情势^[3], 大坝

蓄水使得原有的自然流水生境转变为缓流或静水的湖泊水库型生境^[4], 鱼类原有的生境被淹没, 大坝建设阻隔鱼类通往“三场”(产卵场、索饵场、越冬场)的通道^[5], 直接影响鱼类正常的生长、繁殖、摄食过程。黄河上游土著鱼类组成简单, 多是鲤科(Cyprinidae)裂腹鱼亚科(Schizothoracinae)和条鳅亚科(Nemacheilinae)鱼类, 其生长缓慢、性成熟晚、繁殖力较低^[6-7], 极易受到水利工程的影响。例如, 厚唇裸重唇鱼(*Gymnoditychus pachycheilus*)、极边扁咽齿鱼(*Platypharodon extremus*)和骨唇黄

收稿日期: 2024-06-08; 修订日期: 2024-08-09.

基金项目: 农业农村部财政专项“黄河渔业资源与环境调查”(HHDC-2022-0103); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2023TD08).

作者简介: 刘旭(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源. E-mail: liuxu07x@163.com

通信作者: 吴金明, 研究员, 研究方向为濒危鱼类保护. E-mail: jinming@yfi.ac.cn

河鱼(*Chuanchia labiosa*)的分布区域由龙羊峡至刘家峡河段缩小到龙羊峡库尾上游河段^[8],北方铜鱼(*Coreius septentrionalis*)由于蓄水淹没产卵场,无法满足繁殖需求,目前种群数量骤减^[9-10]。

龙羊峡水库蓄水后,鱼类群落结构发生了显著的变化。1981 年王基琳^[11]在龙羊峡水库蓄水前对其进行调查,共调查到 10 种鱼类,其中以喜流水性生境的花斑裸鲤(*Gymnocypris eckloni*)、厚唇裸重唇鱼、刺鲃(*Acanthogobio guentheri*)等土著鱼类为主。蓄水后,张建军等^[8]于 2005—2007 年对龙羊峡水库段进行调查发现,花斑裸鲤,黄河裸裂尻鱼(*Schizopygopsis pylzovi*)等土著鱼类资源量骤减,外来引入鱼类资源量呈增长趋势,其中麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)和池沼公鱼(*Hypomesus olidus*)已形成稳定种群,池沼公鱼作为养殖经济鱼类,种群迅速扩增,最高捕捞产量曾达到 1700 t^[12],外来引入鱼类的增多可能会威胁到土著鱼类的生存,生态位重叠的外来鱼类会与本地土著鱼类产生竞争关系,导致土著鱼类减少。卓玉等^[13]在 2022 年对龙羊峡水库鱼类多样性空间分布进行调查时发现,龙羊峡水库物种丰富度呈现从库首至库尾逐渐减少的特征,鱼类丰度与生物量呈现从库首至库尾增加的特征。这些研究侧重描述龙羊峡蓄水前或蓄水后鱼类群落调查结果,对于蓄水前后的对比分析较少,特别是对近年来外来种增加的趋势关注不高。

为掌握龙羊峡水库蓄水后鱼类群落变化,本研究对龙羊峡水库鱼类开展资源调查,与历史资料进行对比分析,并通过对鱼类优势种分析、ABC 曲线、群落多样性和群落相似性分析等方法研究不同时期鱼类群落结构、物种多样性时空变化、外来种生态位的特征,以探究龙羊峡水库建设后环境因子的变化对鱼类的种类组成、鱼类群落分布及生态类型等方面的影响,为黄河渔业绿色高质量发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究区域为龙羊峡水库及邻近水域,结合采样需求与环境特征共设有 5 个鱼类群落采样点,

黄河干流水流速快,水体悬浮物浓度高,透明度较低,设有采样点曲什安镇和吾托,曲什安镇为河道回水段,水流湍急,吾托为河道回水段,水流较为平缓;龙羊峡水库透明度高,水温较为恒定,设有那黑鲁、吾雷村和龙羊峡镇 3 个点位,那黑鲁为库尾点位,为自然河道至库区的交汇处,水流由流水过度为静水,吾雷村为库中点位,静缓流水体,龙羊峡镇为库首点位,水面开阔且深,静缓流水体,接近生活区和虹鳟网箱养殖区,受人为因素干扰大(图 1)。于 2023 年 5 月(春季)、9 月(秋季)和 12 月(冬季)进行鱼类群落调查。

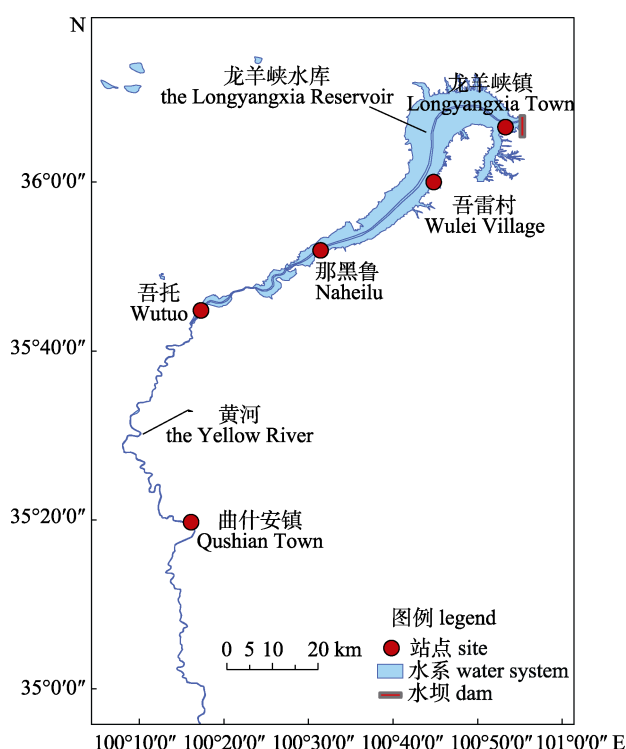


图 1 龙羊峡水库鱼类调查采样点分布图

Fig. 1 Locations of sampling sites of the fish resource survey in the Longyangxia Reservoir

1.2 研究方法

鱼类采集捕捞网具采用刺网(50 m×1.5 m, 网目为 8 cm)和地笼(0.25 m×0.3 m×12 m, 网目为 1.8 cm),每个采样点各放置一个刺网和一个地笼,采样时间为 24 h。将采集到的渔获物现场进行物种鉴定,并测量每尾鱼的体长和体重,体长精确到 1 mm,体重精确到 0.1 g。难以现场鉴定的鱼类,放入 10%的福尔马林溶液浸泡保存,带回实验

室进行分析。鱼类物种鉴定主要参考《中国淡水鱼类检索》^[14]《黄河鱼类志》^[15]和《中国条鳅志》^[16]。鱼类的食性、产卵类型、栖息习性等生态类型参考文献[17-19]和 FishBase 数据库等进行判定。

1.3 数据分析

1.3.1 鱼类优势种分析 本研究采用 Pinkas^[20]的相对重要性指数(index of relative importance, IRI)来判定鱼类群落中的优势种, 计算公式如下:

$$IRI = (N\% + W\%) \times F\%$$

式中, $N\%$ 为某一种类的尾数占总尾数的百分比; $W\%$ 为某一种类的重量占总重量的百分比; $F\%$ 为某一种类出现的样点数占调查总样点数的百分比。

用 IRI 来表明鱼类在群落中的重要性, $IRI > 1000$ 的种类为优势种, $100 \leq IRI < 1000$ 的种类为重要种, 优势种和重要种统称为主要种^[21]。

1.3.2 鱼类群落多样性分析 采用 Shannon-Wiener 多样性指数计算鱼类多样性指数(H'), 采用 Pielou 均匀度指数计算鱼类的均匀度(J'), 采用 Margalef 种类丰富度指数计算鱼类丰富度(D'), 采用 Simpson 指数(λ')描述鱼类群落多样性特征^[22-24], 计算公式分别为:

$$H' = -\sum P_i \ln P_i$$

$$J' = H' / \ln S$$

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

$$\lambda' = 1 - \sum P_i^2$$

式中, S 为鱼类物种数, N 为群落总个体数, P_i 为第 i 种鱼占群落总个体数的比例。

1.3.3 群落相似性分析 采用 Jaccard's 相似性指数(JSI)^[25]对鱼类群落进行相似性分析, 计算公式如下:

$$JSI = c / (a + b - c)$$

式中, a 为 A 时期调查采集鱼类的种数; b 为 B 时期调查采集鱼类的种数; c 为 A, B 两次采集到的共有鱼类种数。当 $0 < JSI < 0.25$ 时, 表明两次调查的种类为极不相似; $0.25 \leq JSI < 0.5$ 时, 表明两次调查的种类为中等不相似; $0.5 \leq JSI < 0.75$ 时, 表明两次调查的种类为中等相似; $0.75 \leq JSI < 1.00$ 时, 表明两次调查的种类为极相似^[26]。

1.3.4 鱼类个体生态矩阵分析 采用鱼类个体生态需求矩阵(R)计算公式^[27]如下:

$$R = (S \times A) / n_s$$

式中, S 为鱼类群落物种名录矩阵, A 为鱼类个体生态特征矩阵, n_s 为鱼类群落种类数。鱼类环境需求指数 $R[R_1, R_2, R_3, \dots, R_i]$, R_i 表示某一样点鱼类对环境因子的需求度, 以 0~1 为量度, 某个环境因子对应的 R_i 值越高, 表明鱼类受此环境因子的变化影响越大^[28]。

1.3.5 ABC 曲线分析 采用丰度生物量曲线(ABC 曲线)进行分析比较, 如果丰度曲线在生物量曲线上方, 说明群落处于受干扰状态, 如果生物量曲线在丰度曲线上方, 说明群落未受到干扰。用 W 表示:

$$W = \sum_{i=1}^S \frac{B_i - A_i}{50(S - 1)}$$

式中, B_i 和 A_i 为 ABC 曲线中种类序号对应的生物量和数量的累积百分比, S 为出现的物种数。

2 结果与分析

2.1 龙羊峡水库鱼类群落现状

2.1.1 种类组成 3次调查期间, 共采集鱼类 19 种, 分别隶属于 4 目 6 科 15 属。鲤形目(Cypriniformes) 2 科 11 属 15 种, 鲑形目(Salmoniformes) 2 科 2 属 2 种, 鲇形目(Siluriformes)与鲈形目(Perciformes)均为 1 科 1 属 1 种(表 1)。鲤科(Cyprinidae)鱼类比例最高, 种类占比 52.63%, 其次为鳅科(Cobitidae), 种类占比 26.31%, 鲑科(Salmonidae)、胡瓜鱼科(Osmeridae)、鲇科(Siluridae)、虾虎鱼科(Gobiidae)种类占比各 5.26%。土著鱼类 9 种, 种类占比 47.37%, 外来鱼类 10 种, 种类占比 52.63%。

2.1.2 优势种鱼类 龙羊峡水库的优势种有 6 种, 分别为鲫(*Carassius auratus*)、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、硬刺高原鳅(*Triplophysa scleroptera*)、麦穗鱼、池沼公鱼和花斑裸鲤, 其相对重要性指数(IRI)分别为 3082、2722、2717、2354、1152 和 1014, 占渔获物总数量的百分比分别为 18.28%、1.64%、17.91%、33.67%、16.27%和 5.17%, 占渔获物总重量的百分比分别为 27.94%、39.19%、9.26%、1.64%、1.01%和 10.03%(表 2)。

表 1 龙羊峡水库鱼类种类组成、生态类型的历史变化

Tab. 1 Historical variation of species composition and ecological types of fishes in the Longyangxia Reservoir

物种 species	调查时期 survey period			生态类型 ecological type
	1981 ^[11]	2005—2007 ^[8]	2023	
鲤形目 Cypriniformes				
鳅科 Cobitidae				
花鳅亚科 Cobitinae				
1. 泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>			+	D;O;S;LE;A;HY
条鳅亚科 Nemacheilinae				
2. 拟鲃高原鳅 <i>Triplophysa siluroides</i>	+	+	+	D;C;S;LE;A;HY
3. 黄河高原鳅 <i>Triplophysa pappenheimi</i>			+	D;C;M;LO;A;HY
4. 拟硬刺高原鳅 <i>Triplophysa pseudoscleroptera</i>	+		+	D;O;S;LO;A;HY
5. 硬刺高原鳅 <i>Triplophysa scleroptera</i>	+	+	+	D;O;S;LE;A;HY
6. 斯氏高原鳅 <i>Triplophysa stoliczkae</i>	+			D;C;S;LO;A;HY
7. 东方高原鳅 <i>Triplophysa orientails</i>	+			D;O;S;LO;A;HY
鲤科 Cyprinidae				
裂腹鱼亚科 Schizothoracinae				
8. 花斑裸鲤 <i>Gymnocypris eckloni</i>	+	+	+	L;O;M;LO;DE;WT
9. 黄河裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis pylzovi</i>	+	+	+	L;O;M;LE;DE;HY
10. 厚唇裸重唇鱼 <i>Gymnoditychus pachycheilus</i>	+	+	+	L;O;M;LO;DE;HY
11. 极边扁咽齿鱼 <i>Platypharodon extremus</i>		+	+	L;H;M;LE;DE;HY
12. 骨唇黄河鱼 <i>Chuanchia labiosa</i>		+		L;O;M;LO;A;HY
鲤亚科 Cyprininae				
13. 鲫 <i>Carassius auratus</i>		+	+	L;O;S;LE;A;WT
14. 鲤 <i>Cyprinus carpio</i>		+	+	L;O;S;LE;A;WT
15. 镜鲤 <i>Cyprinus specularis</i>			+	L;O;S;LE;A;WT
雅罗鱼亚科 Leuciscinae				
16. 草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>		+		L;H;M;LE;DR;WT
鲢亚科 Hypophthalmichthinae				
17. 鳙 <i>Aristichys nobilis</i>		+		U;O;M;LE;DR;WT
18. 鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>		+		U;O;M;LE;DR;WT
鲃亚科 Gobioninae				
19. 刺鲃 <i>Acanthogobio guentheri</i>	+	+	+	L;C;M;LO;DR;HY
20. 棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>			+	D;O;S;LE;A;HY
21. 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>		+	+	L;O;S;LE;A;WT
鲑形目 Salmoniformes				
鲑科 Salmonidae				
鲑亚科 Salmoninae				
22. 虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>		+	+	L;C;M;LE;DE;WT
胡瓜鱼科 Osmeridae				
23. 池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>		+	+	U;O;M;LE;A;WT
银鱼科 Salangidae				
24. 大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>		+		U;C;S;LE;DE;WU
鲇形目 Siluriformes				
鲇科 Siluridae				
鲇亚科 Silurinae				

(待续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

物种 species	调查时期 survey period			生态类型 ecological type
	1981 ^[11]	2005—2007 ^[8]	2023	
25. 鲇 <i>Silurus asotus</i>			+	D;C;S;LE;A;WU
鲈形目 Perciformes				
虾虎鱼科 Gobiidae				
虾虎鱼亚科 Gobiinae				
26. 子陵吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>			+	D;C;M;LO;A;WT

注：“+”表示本研究采集到的种；U，中上层；L，中下层；D，底栖；C，肉食性；H，植食性；O，杂食性；M，洄游性；S，定居性；LO，喜流水；LE，喜静缓水；P，浮性卵；A，黏性卵；DR，漂流性卵；DE，沉性卵；WT，口端位；WU，口上位；HY，口下位。
Note: “+”indicates the species was collected in the survey; U, upper; L, lower; D, demersal; C, carnivorous; H, herbivorous; O, omnivorous; M, migratory; S, sedentary; LO, lotic; LE, lentic; P, pelagic eggs; A, adhesive eggs; DR, drifting eggs; DE, demersal eggs; WT, with terminal mouth; WU, with upper mouth; HY, hypostomatous.

表 2 龙羊峡水库优势种鱼类和常见种鱼类体长和体重分布
Tab. 2 Length and weight distribution of dominant and common fishes in the Longyangxia Reservoir

物种 species	相对重要性指数 IRI	数量占比/% quantity ratio	重量占比/% weight ratio	平均体长/mm mean body length	平均体重/g mean body weight
鲫 <i>Carassius auratus</i>	3082	18.28	27.94	133.09±49.44	108.80±95.31
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	2722	1.64	39.19	415.23±125.23	1702.15±1121.63
硬刺高原鳅 <i>Triplophysa scleroptera</i>	2717	17.91	9.26	133.23±23.86	36.83±17.45
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	2354	33.67	1.64	55.56±10.56	3.48±2.51
池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>	1152	16.27	1.01	72.24±15.39	4.41±3.71
花斑裸鲤 <i>Gymnocypris eckloni</i>	1014	5.17	10.03	195±44.44	138.20±88.18

注：仅列出全年相对重要性指数(IRI)大于 1000 的鱼类。
Note: Only fishes with index of relative importance (IRI) greater than 1000 are listed.

黄河干流的优势种有 3 种，分别为花斑裸鲤、黄河裸裂尻鱼、厚唇裸重唇鱼，其相对重要性指数(IRI)分别为 11916、4400 和 1729，占渔获物总数量的百分比分别为 54.90%、23.92%和 7.45%，占渔获物总重量的百分比分别为 64.25%、20.08%和 9.83%(表 3)。

表 3 黄河干流优势种鱼类和常见种鱼类体长和体重分布
Tab. 3 Length and weight distribution of dominant and common fish in the main stream of the Yellow River

物种 species	相对重要性指数 IRI	数量占比/% quantity ratio	重量占比/% weight ratio	平均体长/mm mean body length	平均体重/g mean body weight
花斑裸鲤 <i>Gymnocypris eckloni</i>	11916	54.90	64.25	178.97±43.98	102.73±78.06
黄河裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis pylzovi</i>	4400	23.92	20.08	160.73±54.7	73.68±51.68
厚唇裸重唇鱼 <i>Gymnoditychus pachycheilus</i>	1729	7.45	9.83	197.32±34.56	115.86±55.91

注：仅列出全年相对重要性指数(IRI)大于 1000 的鱼类。
Note: Only fishes with index of relative importance (IRI) greater than 1000 are listed.

2.1.3 物种多样性 龙羊峡水库鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数(H')范围为 1.37~2.01，平均值为 1.59，Pielou 均匀度指数(J')范围为 0.57~0.70，平均值为 0.62，Margalef 丰富度指数(D')为 1.81~2.69，平均值为 2.11，Simpson 优势度指数(λ')范围为 0.61~0.83，平均值为 0.69。物种多样

性指数在季节上表现为春季较高，秋冬较低(图 2)。

2.1.4 龙羊峡水库土著鱼类与外来鱼类生态特征比较 经资料查询后，依据营养类型、产卵类型、口位、生活水层、水流偏好、洄游特性建立 6 类 17 个环境因子、323 个生态矩阵因子的鱼类个体

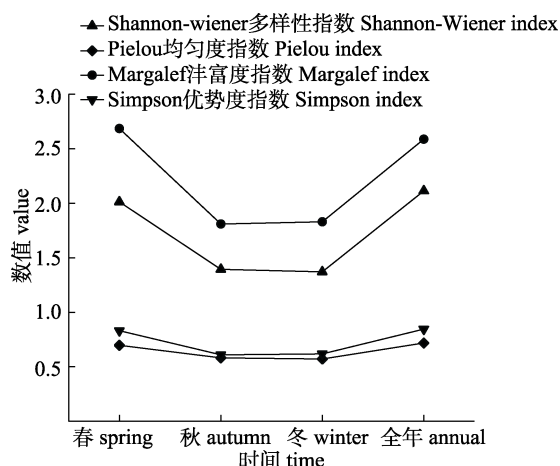


图 2 龙羊峡水库鱼类多样性指数的季节变化
Fig. 2 Seasonal variation of fish diversity indices in the Longyangxia Reservoir

生态学矩阵(表 4, 表 5)。分析表明, 龙羊峡水库土著鱼类是以生活在中下层($R=0.556$)、下位口($R=0.889$)、杂食性($R=0.556$)、产黏性卵($R=0.444$)和沉性卵($R=0.444$)、喜流水性($R=0.556$)、洄游性($R=0.667$)鱼类为主(表 4)。与土著鱼类相比, 外来鱼类则主要是以端位口($R=0.7$)、产黏性卵($R=0.9$)、杂食性($R=0.7$)、生活在中下水层($R=0.4$)或底栖($R=0.4$)鱼类为主, 绝大部分外来鱼类是定居性生活($R=0.7$), 适应静缓水($R=0.9$)的环境(表 5)。

2.1.5 ABC 曲线 龙羊峡水库鱼类群落的 ABC 曲线和 W 值如图所示(图 3), 生物量优势度曲线在丰度优势度曲线的上方, W 值为 0.075, 表明龙羊峡水库的鱼类群落总体处于相对稳定的水平, 受干扰程度较低。

2.2 历史变化

2.2.1 鱼类组成变化 龙羊峡水库蓄水前, 1981 年共调查到 9 种鱼类(未包括一种条鳅亚科高原鳅属未定种), 隶属于 1 目 2 科 5 属。鲤科鱼类 4 种, 占种类数 44.4%; 鳅科鱼类 5 种, 占种类数 55.6%。调查种类均是土著鱼类, 没有外来鱼类, 其中东方高原鳅(*Triplophysa orientalis*)、斯氏高原鳅(*Triplophysa stoliczkae*)是本次调查没有发现的种类^[11]。

龙羊峡水库蓄水后, 2005—2007 年间共调查到 17 种鱼类, 隶属于 2 目 5 科 16 属。其中, 鲤科鱼类 12 种, 占种类数 70.59%; 鳅科鱼类 2 种, 占

种类数 11.76%; 鲢科、胡瓜鱼科和银鱼科各 1 种, 分别占种类数 5.88%。骨唇黄河鱼、刺鲃、厚唇裸重唇鱼等 8 种是土著鱼类, 占种类数 47.06%, 草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、鲫、麦穗鱼等 9 种是外来鱼类, 占种类数 52.94%^[8]。

本研究 2023 年调查结果与 1981 年龙羊峡水库蓄水前调查相比, 鱼类种类数增加了 10 种, 其中鲤科增加 6 种, 鲢科增加 2 种, 鳅科、鲇科和虾虎鱼科各增加 1 种, 未发现东方高原鳅和斯氏高原鳅; 与 2005—2007 年的调查结果对比, 鱼类种类数增加了 2 种, 鲇科和虾虎鱼科各增加 1 种, 未发现骨唇黄河鱼、草鱼、鲮(*Aristichthys nobilis*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、大银鱼(*Protosalanx hyalocranius*)。

本研究 2023 年与龙羊峡水库蓄水前调查对比, 共有鱼类 7 种, 物种相似性指数为 0.33, 为中等不相似; 与 2005—2007 年调查对比, 共有鱼类 12 种, 物种相似性指数为 0.5, 为中等相似; 龙羊峡水库蓄水前与 2005—2007 年调查对比, 共有鱼类 6 种, 物种相似性指数为 0.3, 为中等不相似(表 6)。表明龙羊峡水库蓄水前后鱼类群落结构差异明显。

2.2.2 鱼类生态类型变化 龙羊峡水库鱼类生态类型历史变化如图 4 所示。按生活水层划分, 龙羊峡水库蓄水前(1981 年)底栖鱼类(5 种, 55.6%)>中下层鱼类(4 种, 44.4%); 龙羊峡水库蓄水后(2005—2007 年)中下层鱼类(11 种, 64.7%)>中上层鱼类(4 种, 23.5%)>底栖鱼类(2 种, 11.8%); 本研究(2023 年)中下层鱼类(10 种, 52.6%)>底栖鱼类 8 种(42.1%)>中上层鱼类(1 种, 5.3%)。龙羊峡水库蓄水前至今, 3 个水层种类数都呈上升趋势, 主要以中下层和底栖鱼类为主。

按营养类型划分, 龙羊峡水库蓄水前(1981 年)杂食性鱼类(6 种, 66.7%)>肉食性鱼类(3 种, 33.3%); 龙羊峡水库蓄水后(2005—2007 年)杂食性鱼类(11 种, 64.7%)>肉食性鱼类(4 种, 23.5%)>植食性鱼类(2 种, 11.8%); 本研究(2023 年)杂食性(12 种, 63.2%)>肉食性(6 种, 31.6%)>植食性(1 种, 5.3%)。3 个时期都以杂食性鱼类为主, 并且呈增长趋势。

表 4 龙羊峡水库土著种个体生态学矩阵
Tab. 4 Fish autecology matrix of native fishes in the Longyangxia Reservoir

物种名称 species	营养类型			产卵类型			口位			生活水层			水流偏好		洄游特性		
	nutrition type			spawning type			mouth position			stratum			current preference		migratory characteristic		
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
1. 拟鲢高原鳅 <i>Triplophysa siluroides</i>	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
2. 黄河高原鳅 <i>T. pappenheimi</i>	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
3. 拟硬刺高原鳅 <i>T. pseudoscleroptera</i>	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
4. 硬刺高原鳅 <i>T. scleroptera</i>	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
5. 花斑裸鲤 <i>Gymnocypris eckloni</i>	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
6. 黄河裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis pylzovi</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
7. 厚唇裸重唇鱼 <i>Gymnodiptychus pachycheilus</i>	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
8. 极边扁咽齿鱼 <i>Platypharodon extremus</i>	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
9. 刺鲃 <i>Acanthogobio guentheri</i>	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
环境需求指数 R_i	0.556	0.111	0.333	0	0.444	0.111	0.444	0.111	0	0.889	0	0.556	0.444	0.556	0.444	0.333	0.667

注: E1, 杂食性; E2, 植食性; E3, 肉食性; E4, 浮性卵; E5, 黏性卵; E6, 漂流性卵; E7, 沉性卵; E8, 口端位; E9, 口上位; E10, 口下位; E11, 中上层; E12, 中下层; E13, 底层; E14, 喜流水; E15, 喜静缓水; E16, 定居性; E17, 洄游性。
Note: E1, omnivorous; E2, herbivorous; E3, carnivorous; E4, pelagic eggs; E5, adhesive eggs; E6, drifting eggs; E7, demersal eggs; E8, with terminal mouth; E9, with upper mouth; E10, hypostomatous; E11, upper; E12, lower; E13, demersal; E14, lotic; E15, lentic; E16, sedentary; E17, migratory.

表 5 龙羊峡水库外来物种个体生态学矩阵
Tab. 5 Autecology matrix of non-native fish species in the Longyangxia Reservoir

物种名称 Species	营养类型 nutrition types			产卵类型 spawning types			口位 mouth position			生活水层 stratum			水流偏好 current preference			洄游特性 migratory characteristic	
	E1 E2 E3			E4 E5 E6			E7 E8 E9			E10 E11 E12			E13 E14 E15			E16 E17	
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17
1. 泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
2. 鲫 <i>Carassius auratus</i>	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
3. 鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
4. 镜鲤 <i>Cyprinus specularis</i>	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
5. 棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
6. 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0
7. 虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1
8. 池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
9. 鲇 <i>Silurus asotus</i>	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
10. 子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
环境需求指数 R_i	0.7	0	0.3	0	0.9	0	0.1	0.7	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4	0.1	0.9	0.7	0.3

注: E1, 杂食性; E2, 植食性; E3, 肉食性; E4, 浮性卵; E5, 黏性卵; E6, 漂流性卵; E7, 沉性卵; E8, 口端位; E9, 口上位; E10, 口下位; E11, 中上层; E12, 中下层; E13, 底层; E14, 喜流水; E15, 喜静水; E16, 定居性; E17, 洄游性。
Note: E1, omnivorous; E2, herbivorous; E3, carnivorous; E4, pelagic eggs; E5, adhesive eggs; E6, drifting eggs; E7, demersal eggs; E8, with terminal mouth; E9, with upper mouth; E10, hypostomatous; E11, upper; E12, lower; E13, demersal; E14, lotic; E15, lentic; E16, sedentary; E17, migratory.

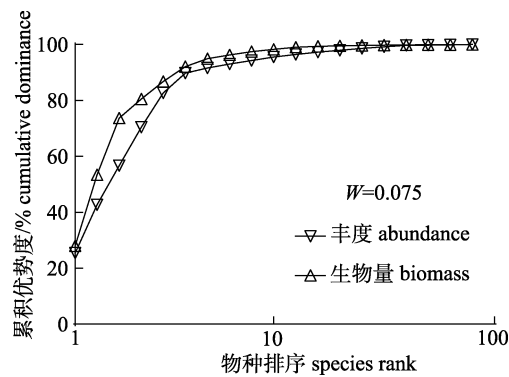


图 3 龙羊峡水库鱼类群落的 ABC 曲线
Fig. 3 Abundance biomass comparison curves of fish communities in the Longyangxia Reservoir

按洄游习性划分, 龙羊峡水库蓄水前(1981 年)定居性鱼类 6 种(66.7%)>洄游性鱼类 3 种(33.3%); 龙羊峡水库蓄水后(2005—2007 年)洄游性鱼类 11 种(64.7%)>定居性鱼类 6 种(35.3%); 本研究(2023 年)定居性鱼类 10 种(52.6%)>洄游性鱼

类 9 种(47.4%)。目前龙羊峡水库以定居性鱼类为主。

按亲水性划分, 龙羊峡水库蓄水前(1981 年)喜静缓水性鱼类 6 种(66.7%)>喜流水性鱼类 3 种(33.3%); 龙羊峡水库蓄水后(2005—2007 年)喜静缓水性鱼类 13 种(76.5%)>喜流水性鱼类 4 种(23.5%); 本研究(2023 年)喜静缓水性鱼类 13 种(68.4%)>喜流水性鱼类 6 种(31.6%)。龙羊峡水库蓄水前至今, 以喜静缓水鱼类为主。

按产卵类型划分, 龙羊峡水库蓄水前(1981 年)黏性卵鱼类 5 种(55.6%)>沉性卵 3 种(33.3%)>漂流性卵 1 种(11.1%); 龙羊峡水库蓄水后(2005—2007 年)黏性卵 7 种(41.2%)>沉性卵 6 种(35.3%)>漂流性卵 4 种(23.5%); 本研究(2023 年)黏性卵 13 种(68.4%)>沉性卵 5 种(26.3%)>漂流性卵 1 种(5.3%)。龙羊峡水库蓄水前至今, 产黏性卵和沉性卵鱼类种类逐渐增加, 以产黏性卵为主。

表 6 龙羊峡水库不同时期的鱼类组成及相似性指数对比

Tab. 6 Comparison of fish composition and similarity indices between different periods in the Longyangxia Reservoir

科 family	物种数 species number			1981 vs 2005—2007		2005—2007 vs 2023		1981 vs 2023	
	1981	2005—2007	2023	共有种数 number of mutual species	相似性指数 Jaccard similarity index	共有种数 number of mutual species	相似性指数 Jaccard similarity index	共有种数 number of mutual species	相似性指数 Jaccard similarity index
鳅科 Cobitidae	5	2	5	2	0.4	2	0.4	3	0.43
鲤科 Cyprinidae	4	12	10	4	0.33	8	0.57	4	0.4
鲑科 Salmonidae	0	1	1	0	0	1	1	0	0
胡瓜鱼科 Osmeridae	0	1	1	0	0	1	1	0	0
银鱼科 Salangidae	0	1	0	0	0	0	0	0	—
鲇科 Siluridae	0	0	1	0	—	0	0	0	0
虾虎鱼科 Gobiidae	0	0	1	0	—	0	0	0	0
合计 total	9	17	19	6	0.3	12	0.5	7	0.33

注: 1981, 2005—2007 数据来自文献[11], [8]; 2023 数据来自本实验, vs 表示两组数据进行对比。
Note: 1981, 2005—2007 data from the literature [11], [8]; 2023 data from this experiment, vs indicates that two sets of data are compared.

按口位划分, 龙羊峡水库蓄水前(1981 年)下位口鱼类 8 种(88.9%)>端位口鱼类 1 种(11.1%); 龙羊峡水库蓄水后(2005—2007 年)端位口鱼类 9 种(52.9%)>下位口鱼类 7 种(41.2%)>上位口鱼类 1 种(5.9%); 本研究(2023 年)下位口鱼类 10 种(52.6%)>端位口鱼类 8 种(42.1%)>上位口鱼类 1 种(5.3%)。龙羊峡水库蓄水前至今, 以下位口为主, 但比例逐渐降低, 端位口鱼类种类逐渐增多。

3 讨论

3.1 龙羊峡水库鱼类群落现状及历史变化

对比历史资料分析, 龙羊峡水库鱼类种群结构发生明显的变化。由 1981 年龙羊峡水库蓄水前调查到的 10 种鱼类^[11], 2005—2007 年蓄水后的 17 种^[8], 增长至本次调查到的 19 种鱼类。随着水库蓄水时间的增长, 鱼类物种丰富度也随之增加,

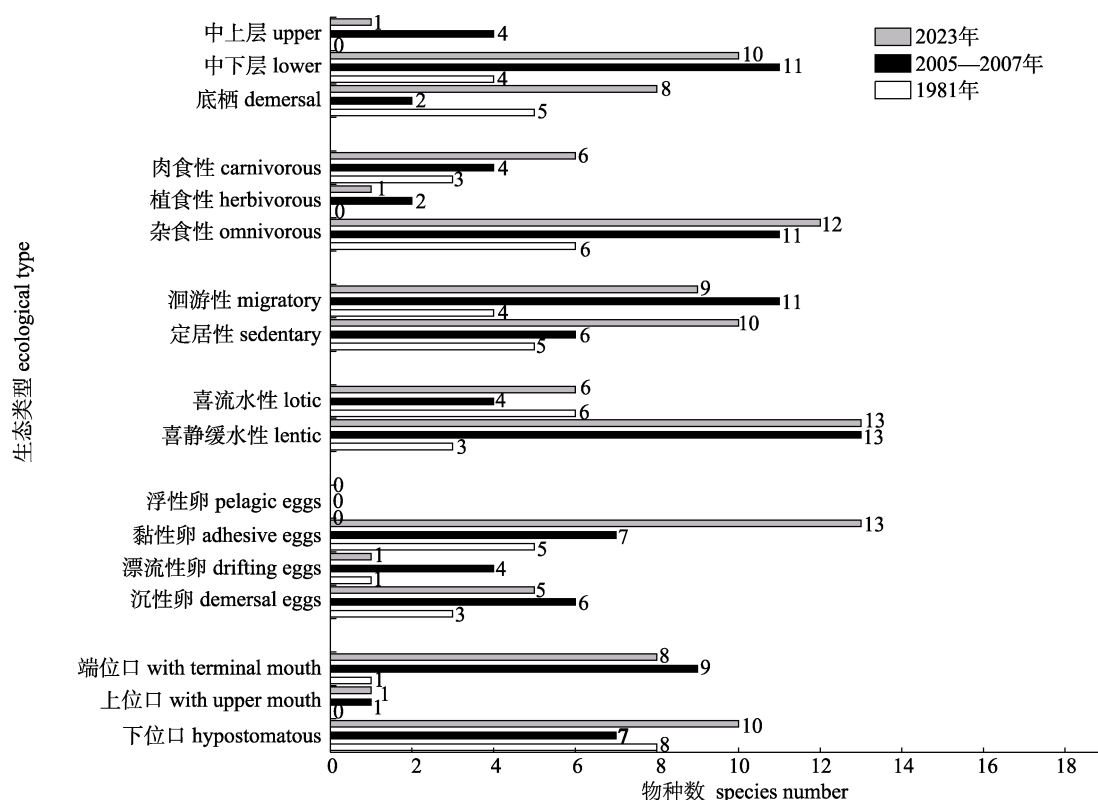


图 4 龙羊峡水库不同时期的鱼类生态类型组成

Fig. 4 Compositions of fish ecological types for different periods in the Longyangxia Reservoir

主要表现为以鲤科鱼类为代表的外来鱼类增多,其种类数和种群数量都已超过土著鱼类。三峡库区也出现过此现象^[29],这可能与鲤科鱼类广泛适应性有关。本研究调查到有虹鳟、池沼公鱼、麦穗鱼和棒花鱼(*Abbottina rivularis*)等外来鱼类,其中虹鳟、池沼公鱼是作为水库引进的具有经济价值的鱼类。目前已发现有网箱养殖的虹鳟个体逃逸至库区,而池沼公鱼也已形成自然种群。麦穗鱼和棒花鱼等小型鱼类是引进经济鱼类时被携带到水库^[30],还有部分外来种是被作为宗教放生对象进入到水库中。此外,蓄水前调查到的斯氏高原鳅和东方高原鳅本调查未采集到,这两种土著鱼类作为喜流水性鱼类,可能无法适应生境的剧烈变化而退出库区上溯至水库上游^[31],与蓄水后 2005—2007 年对比,未采集到产漂流性卵的草鱼、鲢和鳙,这些鱼类可能曾经作为引进种引入库区,但因库区内缺乏流水刺激等无法完成生活史进而使得种群数量减少。

龙羊峡水库蓄水后,鱼类的生态群落类型也

发生明显的变化。水库蓄水前以喜流水和底栖生活鱼类为主,蓄水后库区水位升高,生境改变,喜流水性鱼类的生存空间受到压缩,使得库区内喜流水性鱼类减少而喜静缓水鱼类增加。生态环境改变,形成新的湖泊生态系统,生态位出现空缺^[32]。鱼类个体生态学矩阵显示龙羊峡水库土著鱼类通常生活中下层或者底层水体,对中上层水体的资源利用率低,使得上层和中层水域生态位出现空缺,没有充分利用栖息区域内的资源,而龙羊峡水库外来鱼类以杂食性、喜静缓水、定居性为主,具有广泛的适应性。麦穗鱼、鲫、池沼公鱼等外来鱼类可以充分利用空缺的生态位资源,使得杂食性、喜静缓水、定居性鱼类比例增加。

3.2 龙羊峡水库物种多样性与资源量

鱼类物种多样性指数可以反映鱼类资源量丰富水平的指标^[33],本研究中,物种多样性指数呈现出季节性变化,表现为春季大于秋冬季。其季节变化与水温有关,相比于秋冬季节,春季水温高,饵料资源丰富,鱼类活力高,使得被网捕获

几率增大^[21,34], 龙羊峡水库 Shannon-wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数高于龙羊峡水库上游, 但 Pielou 均匀度指数低于上游^[35], 这可能是因为水库蓄水后, 形成的湖泊水库型生境可以为广适性的外来鱼类提供生存条件, 进而鱼类种数增多, 鱼类多样性程度高, 而均匀度指数低于上游, 可能是因为优势种鱼类生物量与数量占比较高。

ABC 曲线通过丰度优势度曲线与生物量优势度曲线的位置关系来反映鱼类群落结构的稳定性^[36], 本研究 ABC 曲线 W 值大于 0, 说明鱼类群落相对稳定, 群落受干扰程度小。物种的个体大小在一定程度会影响丰度与生物量优势度曲线的关系^[21,37-38], 本研究调查中虹鳟数量占比仅为 1.24%, 而重量占比却高达 28.06%, 受物种生物量与丰度占比差异, 进而影响 ABC 曲线特征。

3.3 龙羊峡水库鱼类群落结构的影响因素

3.3.1 龙羊峡水库建设对鱼类群落结构的影响 大坝修建导致的水文情况改变和阻隔被认为是影响鱼类最为主要的两个因素^[39]。水库蓄水后, 原有河段由河流相转变为湖泊相; 原有连续的自然生境被割裂为分散的生境段, 导致喜流水性与产漂流性卵鱼类持续减少, 20 世纪 80 年代花斑裸鲤、黄河裸裂尻鱼等经济鱼类捕捞量占总量的 80%^[40], 而本次调查中, 其捕捞量约占渔获物总量的 24%; 库尾作为自然水域和库区的交界处, 仍有一定的流速, 喜流水性鱼类被迫迁徙至此^[41], 本次调查中库尾点位那黑鲁只采集到土著鱼类花斑裸鲤、硬刺高原鳅和外来种泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*), 库首与库中点位水流渐缓, 为静缓水区域, 渔获主要以鲫、麦穗鱼、池沼公鱼等外来鱼类为主。黄河干流点位曲什安镇和吾托仍为自然河流段, 采集到渔获物主要以土著鱼类花斑裸鲤和拟鲃高原鳅(*Triplophysa siluroides*)为主。

3.3.2 外来鱼类对鱼类群落结构的影响 外来鱼类通常以水产养殖和无意引种方式进入水体。龙羊峡水库利用高海拔冷水资源, 养殖推广虹鳟、池沼公鱼等外来经济鱼类, 引种时无意携带进入小型杂鱼。其中麦穗鱼和鲫等小型外来鱼类能在龙羊峡水库成功定殖并建立种群^[30], 其主要原因与自身生物学特性相关, 麦穗鱼世代更替快、繁

殖力高, 在我国天然水域, 包括黄河上游、青藏高原、云南等都有分布, 在被欧洲认为是最具入侵性的鱼类之一^[30,42-44], 鲫耐受力强, 杂食性, 具有很强的入侵潜力, 从生态类型上来说都属于 r -对策型, 其环境适应力强和生活史可塑性, 研究表明麦穗鱼和鲫等外来鱼类在不同生境种群间具有种内差异, 可以根据环境条件调整自身生活史策略, 在高海拔寒冷地区虽然生长缓慢, 但表现出提前进入拐点年龄和年龄组成增大的现象, 其生活史的可塑性使其可以更好地适应环境, 使得种群迅速扩增^[45-46]。

外来鱼类的入侵会从多方面对土著鱼类造成影响。首先, 外来鱼类会与土著种产生竞争关系, 研究表明池沼公鱼大量摄食哲水蚤类等浮游动物, 致使同样摄食浮游动物的土著鱼类饵料资源减少^[47], 麦穗鱼、鲫、虾虎鱼类等外来鱼类还会吞食土著鱼卵, 茶巴郎湿地中曾在外来鱼类肠道中发现鱼卵与鱼鳞, 云南洱海引进四大家鱼时曾带入波氏吻虾虎鱼(*Rhinogobius cliffordpopei*), 其与土著鱼类争夺产卵场和吞食土著鱼卵, 导致土著鱼类种群资源下降^[43]。其次, 外来鱼类还会作为载体携带病原体进入水体, 感染本地种。20 世纪麦穗鱼被引入罗马尼亚并扩散至整个欧洲, 其自身携带的病原体 *Sphaerothecum destruens* 对欧洲多种原生鱼类造成影响^[48]。再次, 外来鱼类与土著鱼类杂交会导致原有种群的遗传基因被污染, 种质资源退化。云南星云湖中特有种大头鲤(*Cyprinus pellegrini*)与外来种鲤鱼杂交, 导致本地纯种大头鲤灭绝^[49-50], 黄河流域中的鲤多为黄河鲤与德国镜鲤(*Cyprinus specularis*)杂交的后代。外来鱼类在与土著鱼类竞争中胜出, 种群数量增加, 在水域中形成优势种群, 而土著鱼类种群资源减少。

参考文献:

- [1] Yu Q. Study on short-term optimal dispatching of Yellow River upstream cascaded hydropower stations[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010. [于茜. 黄河上游梯级水电站短期优化调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.]
- [2] Qinghai Provincial Water Resources Department. The Rough Guide to Rivers and Lakes of Qinghai[M]. Wuhan:

- Changjiang Press, 2018: 34-40. [青海省水利厅. 青海河湖概览[M]. 武汉: 长江出版社, 2018: 34-40.]
- [3] Chang J B, Chen Y B, Gao Y, et al. Impacts of Water Resources and Hydropower Projects on Fishes and Mitigating Strategies[M]. Department of Environmental Impact Assessment Management, State Environmental Protection Administration. Beijing: China Environmental Science Press. 2006: 239-253. [常剑波, 陈永柏, 高勇, 等. 水利水电工程对鱼类的影响及减缓对策[M]. 国家环境保护总局环境影响评价管理司. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 239-253.]
- [4] Niu L, Kou X M, Zhang N C, et al. Analysis on effect of hydroelectric development on native fish resources and protective measures system for fish above Liujia Gorge on the Upper Yellow River[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2020, 36(3): 73-76. [牛乐, 寇晓梅, 张乃畅, 等. 黄河上游刘家峡以上河段水电开发对土著鱼类资源影响及保护措施体系分析[J]. 水电站设计, 2020, 36(3): 73-76.]
- [5] Tong L L, Guo C B, Wang R, et al. Research status of water environment and fish resources under multiple human disturbances in the Gan-Jiang River basin: A review[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(12): 2879-2892. [仝路路, 郭传波, 王瑞, 等. 多重人类活动干扰下赣江流域水环境和鱼类资源的研究现状分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 2879-2892.]
- [6] Li S Z. Discussion on the fish fauna of the Yellow River[J]. Chinese Journal of Zoology, 1965, (5): 217-222. [李思忠. 黄河鱼类区系的探讨[J]. 动物学杂志, 1965, (5): 217-222.]
- [7] Jian S L. Impact on fish resources hydropower station construction upper reaches of the Yellow River and conservation strategies[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2012, (2): 44-46. [简生龙. 青海黄河上游水电站建设对鱼类资源影响及保护对策[J]. 青海农林科技, 2012, (2): 44-46.]
- [8] Zhan J J, Feng H, Li K S, et al. Changes of fishery resources after the construction of cascade hydropower station from Longyang Gorge to Liujia Gorge in Upper stream of Yellow River[J]. Freshwater Fisheries, 2009, 39(3): 40-45. [张建军, 冯慧, 李科社, 等. 黄河上游龙羊峡至刘家峡河段梯级水电站建设后鱼类资源变化[J]. 淡水渔业, 2009, 39(3): 40-45.]
- [9] Zhao Y H, Xing Y C, Lyu B B, et al. Species diversity and conservation of freshwater fishes in the Yellow River basin[J]. Biodiversity Science, 2020, 28(12): 1496-1510. [赵亚辉, 邢迎春, 吕彬彬, 等. 黄河流域淡水鱼类多样性和保护[J]. 生物多样性, 2020, 28(12): 1496-1510.]
- [10] Guo Y J. Influences of Xiaolangdi Reservoir on *Coreius septentrionalis* and its conservation strategy[J]. Henan Fisheries, 2008, (4): 7-8. [郭严军. 谈小浪底水库对北方铜鱼生态的影响及对策[J]. 河南水产, 2008, (4): 7-8.]
- [11] Wang J L, Cai M Y, Qin J G, et al. Investigation on the basic biology of fishery before impoundment of Longyangxia Reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 1982, (3): 2-11. [王基琳, 蔡明玉, 秦建光, 等. 龙羊峡水库蓄水前的渔业基础生物学调查[J]. 水库渔业, 1982, (3): 2-11.]
- [12] Zhao J. Aquaculture status and industrialization development ideas of *Hypomesus olidus* in Longyangxia Reservoir[J]. China Fisheries, 2007, (11): 16-17. [赵娟. 龙羊峡水库池沼公鱼增养殖现状及产业化发展思路[J]. 中国水产, 2007, (11): 16-17.]
- [13] Zhuo Y, Li J L, Li Y Q, et al. Spatial distribution pattern of fish multifaceted biodiversity in the Longyangxia Reservoir [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(3): 504-512. [卓玉, 李钧乐, 李英钦, 等. 龙羊峡水库鱼类多样性空间分布格局[J]. 水生生物学报, 2024, 48(3): 504-512.]
- [14] Zhu S Q. The Synopsis of Freshwater Fishes of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1995: 8-187. [朱松泉. 中国淡水鱼类检索[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995: 8-187.]
- [15] Li S Z. Fishes of the Yellow River & Beyond[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2017: 71-402. [李思忠. 黄河鱼类志[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2017: 71-402.]
- [16] Zhu S Q. The Loaches of the Subfamily Nemacheilinae in China (Cypriniformes: Cobitidae)[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House. 1989: 1-134. [朱松泉. 中国条鳅志[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989: 1-134.]
- [17] Wu Y F. The fishes of the Qinghai-Xizang Plateau[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology, 1992: 133-562. [武云飞. 青藏高原鱼类[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1992: 133-562.]
- [18] Chen Y Y. Fauna Sinica Osteichthyes Cypriniformes: II[M]. Beijing: Science Press, 1998. 1-531. [陈宜瑜. 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目: 中卷[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 1-531.]
- [19] Yue P Q. Fauna Sinica Osteichthyes Cypriniformes: III[M]. Beijing: Science Press, 2000. 1-661. [乐佩琦. 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目: 下卷[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1-661.]
- [20] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefish tuna, and bonito in California waters[J]. Fishery Bulletin, 1971, 152:1-105.
- [21] Liu Y S, Tang S K, Li D M, et al. Characteristics of the fish community structure in Jiangsu reach of the Huaihe River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(2): 224-235. [刘燕山, 唐晟凯, 李大命, 等. 淮河江苏段鱼类群落结构特征[J]. 中国水产科学, 2020, 27(2): 224-235.]
- [22] Pielou E C. An Introduction to Mathematical Ecology[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969: 1-108.

- [23] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1948, 8-16.
- [24] Margalef D R. Information theory in ecology[J]. General Systems, 1958, 3(1): 36-71.
- [25] Jaccard P. The distribution of the flora in the alpine zone[J]. New Phytologist, 1912, 11(2): 37-50.
- [26] Krebs C J. Ecological Methodology[M]. New York: Harper Collins Publishers. 1989: 53-78.
- [27] Suen J P, Edwin E. Investigating the causes of fish community change in the Dahan River (Taiwan) using an autecology matrix[J]. Hydrobiologia, 2006, 568(1): 317-330.
- [28] Chen G Z, Qiu Y P, Li L P, et al. Fish invasions and changes in the fish fauna of the Tarim Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 700-714. [陈国柱, 仇玉萍, 李丽萍. 塔里木盆地鱼类入侵及区系演变趋势[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 700-714.]
- [29] Wei N, Zhang Y, Wu F, et al. Current status and changes in fish assemblages in the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(8): 1858-1869. [魏念, 张燕, 吴凡, 等. 三峡库区鱼类群落结构现状及变化[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1858-1869.]
- [30] Tang W J, He D K. Investigation on alien fishes in Qinghai Province, China (2001-2014)[J]. Journal of Lake Science, 2015, 27(3): 502-510. [唐文家, 何德奎. 青海省外来鱼类调查(2001-2014年)[J]. 湖泊科学, 2015, 27(3): 502-510.]
- [31] Zhao Y H, Xing Y C, Lyu B B, et al. Species diversity and conservation of freshwater fishes in the Yellow River basin[J]. Biodiversity Science, 2020, 28(12): 1496-1510. [赵亚辉, 邢迎春, 吕彬彬, 等. 黄河流域淡水鱼类多样性和保护[J]. 生物多样性, 2020, 28(12): 1496-1510.]
- [32] Dong C, Yang Z, Zhu Q G, et al. Preliminary study on resource status of alien fish in Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(5): 928-938. [董纯, 杨志, 朱其广, 等. 三峡水库外来鱼类资源状况初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(5): 928-938.]
- [33] Wilhm J L. Use of biomass units in Shannon's formula[J]. Ecology, 1968, 49(1): 153-156.
- [34] Li Y L, Liu Q G, Chen L P, et al. A comparison between benthic gillnet and bottom trawl for assessing fish assemblages in a shallow eutrophic lake near the Changjiang River estuary[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2018, 36(2): 572-586.
- [35] Shen Z X, Wang G J, Li K M, et al. The situation and protection measures of fish resources in Upstream of Longyang Valley of the Yellow River[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(1): 70-76. [申志新, 王国杰, 李柯懋, 等. 黄河龙羊峡上游鱼类资源现状及保护对策[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(1): 70-76.]
- [36] Yi X X. Analysis of interannual variations for the fish community structure and biodiversity in ShangHai Qingcaosha reservoir[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020. [易欣鑫. 上海青草沙水库鱼类群落结构和多样性的年际变化[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.]
- [37] Xing S, Zhang C, Chen L J, et al. Fish community structure of Qingcaosha Reservoir in the Yangtze River estuary in 2021[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(1): 114-123. [邢烁, 张成, 陈立婧, 等. 2021年度长江口江心青草沙水库鱼类群落结构[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(1): 114-123.]
- [38] Zhu H C, Tang J H, Wu L, et al. Fish community structure and biomass particle size spectrum in the southern Yellow Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(9): 1102-1111. [朱海晨, 汤建华, 吴磊, 等. 黄海南部海域鱼类群落结构及生物量粒径谱特征[J]. 中国水产科学, 2023, 30(9): 1102-1111.]
- [39] Loures R C, Pompeu P S. Temporal changes in fish diversity in lotic and lentic environments along a reservoir cascade[J]. Freshwater Biology, 2019, 64(10): 1806-1820.
- [40] He Z H. Fishery Resource of Yellow River System[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1986. [何志辉. 黄河水系渔业资源[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1986.]
- [41] Yang Z, Zhu Q, Cao J, et al. Using a hierarchical model framework to investigate the relationships between fish spawning and abiotic factors for environmental flow management[J]. Science of the Total Environment, 2021, 787: 147618.
- [42] Sun H H, Zhu R, Feng X, et al. Adaptation in life-history traits of exotic topmouth gudgeon from wetlands in Tiber autonomous region[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(12): 1780-1787. [孙欢欢, 朱仁, 冯秀, 等. 西藏湿地外来麦穗鱼生活史特征的适应性研究[J]. 水生生物学报, 2022, 46(12): 1780-1787.]
- [43] Pan Y, Cao W X, Xu L P, et al. Ecological effect of fish invasion and its management policy[J]. Freshwater Fisheries, 2005, 35(6): 57-60. [潘勇, 曹文宣, 徐立蒲, 等. 鱼类入侵的生态效应及管理策略[J]. 淡水渔业, 2005, 35(6): 57-60.]
- [44] Andreou D, Arkush K D, Guégan J F, et al. Introduced pathogens and native freshwater biodiversity: A case study of *Sphaerothecum destruens*[J]. PLoS One, 2012, 7(5): e36998.
- [45] Lin F. Study on biological characteristics of topmouth gudgeon (*Pseudorasbora parva*) of the invasion and original areas in China[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2018. [林峰. 中国入侵地和原产地麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)的生物学特性研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2018.]

- [46] Chen F. Study on life history strategy of the exotic *Carassius auratus* in the Yarlung Zangbo River in Tibet[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2009. [陈锋. 雅鲁藏布江外来鲫的生活史对策研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2009.]
- [47] Lai Y. The relationship between the disappearance of Calanoida population and the introduction of *Hypomesus olidus* in Bosten Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 30(4): 136-139. [赖英. 博斯腾湖哲水蚤种群消失与池沼公鱼的关系[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(4): 136-139.]
- [48] Gozlan R E, St-Hilaire S, Feist S W, et al. Disease threat to European fish[J]. Nature, 2005, 435: 1046.
- [49] Yang B, Chen X Y, Yang J X. Non-native carp of the genus *Cyprinus* in Lake Xingyun, China, as revealed by morphology and mitochondrial DNA analysis[J]. Biological Invasions, 2011, 13(1): 105-114.
- [50] Li F, Zhang J J, Yuan Y F, et al. Present situation and problems on fish introduction in Yellow River system[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences. 2008, 36(34): 15024-15026. [李芳, 张建军, 袁永锋, 等. 黄河流域鱼类引种现状及存在问题[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(34): 15024-15026.]

Characteristics and historical changes in the fish community structure in Longyangxia Reservoir

LIU Xu^{1,2}, SHEN Li¹, HU Ye^{1,3}, MA Baoshan¹, LI Pengcheng¹, DU Hao¹, WU Jinming¹

1. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430223, China;
2. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract: To quantify the fish assemblage and its historical change, we conducted surveys in Longyangxia Reservoir in May, September, and December 2023 and analyzes the data against historical data. Nineteen species of fish were collected, belonging to 4 orders, 6 families, and 15 genera, among which Cyprinidae was the dominant family, accounting for 52.63% of the total species captured. The dominant species of fish in Longyangxia Reservoir were *Carassius auratus*, *Oncorhynchus mykiss*, *Triplophysa scleroptera*, *Pseudorasbora parva*, *Hypomesus olidus*, and *Gymnocypris eckloni*, and the dominant species of fish in the main stream of the Yellow River were *Gymnocypris eckloni*, *Schizopygopsis pylzovi*, and *Gymnodiptychus pachycheilus*. The species diversity index was highest in May and lower in September and December. ABC curve analysis showed that the *W* value was greater than 0, the biomass dominance curve was above the abundance dominance curve, and the community structure of Longyangxia Reservoir was relatively stable. Comparative analysis with data from 1981 and 2005–2007 showed that, since the impoundment of Longyangxia Reservoir, indigenous fish decreased by two species and exotic fish increased by 10 species. Currently, Longyangxia Reservoir is dominated by fishes that prefer quiet and slow water, are omnivorous, lower-middle, sedentary, exhibit sticky egg-laying, and the lower mouth. The ecological matrix of individual fish showed that the indigenous fish in Longyangxia Reservoir were mainly in the lower middle layer ($R=0.556$) and the lower mouth ($R=0.889$), which provided ecological niche vacancies for broadly adapted exotic fishes. The fish composition of Longyangxia Reservoir in 2023 showed a similarity index of 0.33 (moderately dissimilar) with that of 1981, and a similarity index of 0.50 (moderately dissimilar) with that of 2005–2007. The fish community structure changed significantly after the impoundment of Longyangxia Reservoir in 1987. The analysis confirmed that the reservoir impoundment and the introduction of exotic fishes were the main reasons for the changes in the fish community structure of the Longyangxia Reservoir.

Key words: fish assemblage; historical change; exotic fish; ecological type; Longyangxia Reservoir

Corresponding author: WU Jinming. E-mail: jinming@yfi.ac.cn