

耦合水文情势及鱼类繁殖的江垭水库生态调度需求研究

徐薇^{1,2}, 魏秘¹, 曹俊^{1,2}, 蔡露¹, 高少波¹, 朱迪¹

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室,
湖北省水生态保护与修复工程技术研究中心, 湖北 武汉 430079;
2. 长江水利委员会水旱灾害防御创新团队, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为了修复河流水文情势、维持河流生态系统健康, 通过环境DNA采样、IHA水文指标变动分析和文献资料总结等方法, 开展了江垭水库坝下水文情势及鱼类繁殖需求关系研究, 提出了水库生态调度需求与建议。结果显示, 2021年9月在溇水干支流综合调查获得鱼类55种, 与20世纪90年代相比, 流水性种类在干流江段显著减少了51.35%; 按照生态调度优先等级评估原则, 确定江垭水库生态调度的主要目标物种为产漂流性卵的银鲴(*Xenocypris argentea*)、银鮡(*Squalidus argentatus*)、贝氏鲮(*Hemiculter bleekeri*)和产粘沉性卵的鲤(*Cyprinus carpio*)、鲫(*Carassius auratus*); 江垭建坝前后下游水文情势变化较大, 发生高度改变且对鱼类洄游产卵及鱼卵发育有重要作用的水文指标包括年最大1日、3日平均流量指标、年出现高流量脉冲事件的次数和持续时间以及连续日流量上涨率。研究表明, 以促进坝下不同产卵类型的鱼类繁殖为目标, 生态调度需要一定的高流量脉冲次数和历时, 还需要控制下游水位的日降幅, 通过泄放合理的生态流量来维持下游鱼类的生物多样性。

关键词: 鱼类繁殖; 环境DNA; 水文情势; 生态调度; 江垭水库

中图分类号: X835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2024)01-0103-09

溇水为澧水的最大支流, 发源于湘、鄂交界的武陵山余脉, 流域面积5 048 km²。干流从河源至湖南省桑植县淋溪河乡为上游河段, 全长约130 km; 淋溪河至江垭为中游河段, 长约74 km; 江垭以下到慈利县城永安渡汇入澧水, 为下游河段, 长约46 km。溇水干流水电开发规划有江坪河、淋溪河、江垭、关门岩、长潭河共5个梯级, 其中江垭、关门岩、长潭河梯级电站已建成运行, 江坪河和淋溪河水电站正处于建设阶段。据《中国河湖大典》统计(中国河湖大典编纂委员会, 2010), 至2005年溇水流域已建成小(二)型以上水库30座, 近年来溇水的慈利县渔获物中以银鮡、鲮、鲤、鲫、中华花鳊等小型鱼类为主, 四大家鱼等洄游性鱼类比例极低, 鱼类小型化明显(刘良国等, 2013)。水利工程的修建不仅阻隔了鱼类的洄游通道, 失去湍急水流的鱼类产卵孵化环境, 导致洄游性鱼类和产漂流性卵鱼类的种群数量骤减甚至灭绝。

水库调度运行改变了坝下自然水文节律, 影响水生生物的生存繁衍, 特别是水流节律和水温过程的改变显著影响了水生生物多样性(Richter & Thomas, 2007; 李哲等, 2018)。生态调度是以恢复水文情势和河流生态功能为目标, 重点考虑生态因素并兼顾河流生态系统需求的水库调度新模式(董哲仁等, 2007; Konrad et al, 2012)。20世纪70年代以来, 广泛开展了河流生态流量研究, 进行了针对不同恢复目标的水库生态调度实践(陈志刚等, 2020)。对于生态监测资料丰富的区域, 能够充分掌握生态-水文之间的响应关系, 并基于统计学方法定量提出合理的生态流量指标(王珂等, 2019); 对于生态监测资料缺乏的区域, 需要结合历史时期的水文情势以及敏感物种的生境偏好进行耦合分析, 从而获得目标物种在特殊时期的生态流量过程(范骢骧等, 2017)。

针对当前溇水鱼类资源衰退的现状, 亟需开展相关保护措施研究。为此, 本研究在2021年9月开展基于环境DNA(eDNA)采样的溇水鱼类资源及水生生境现状调查, 并结合水文、水生态历史数据资料, 分析江垭水库建设运行前后溇水中下游的鱼类组成与分布以及坝下水文情势等变化, 筛选江垭水库生态调度目标物种并分析其繁殖生态需求, 探讨满足鱼类繁殖的水文情势恢复目标, 指导江垭水库生态调度, 保护和恢复鱼类资源。

收稿日期: 2023-11-03

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200304); 长江水科学研究联合基金(U2040205, U2340218)。

作者简介: 徐薇, 1984年生, 女, 副研究员, 主要从事鱼类资源及生态调度研究。E-mail: betty3115@126.com

通信作者: 朱迪, 1978年生, 女, 副研究员, 主要从事水生生物完整性评价研究。E-mail: 30012521@qq.com

1 材料和方法

1.1 鱼类资源调查

由于长江流域现行的“十年禁渔”政策,鱼类资源调查主要通过采样分析 eDNA、钓获物调查和走访形式相结合,调查范围为淋溪河水电站坝址以下至溇水河口干流及溇水、淋溪河等 8 条重要支流水域;此外,基于不同时期对江垭水利枢纽工程开展的环境影响调查及评价资料,梳理不同时期鱼类的种类组成及分布,综合分析鱼类资源及其产卵场等关键生境变化。2021 年 9 月在溇水中下游干流水域设置 21 个采样点(图 1)。

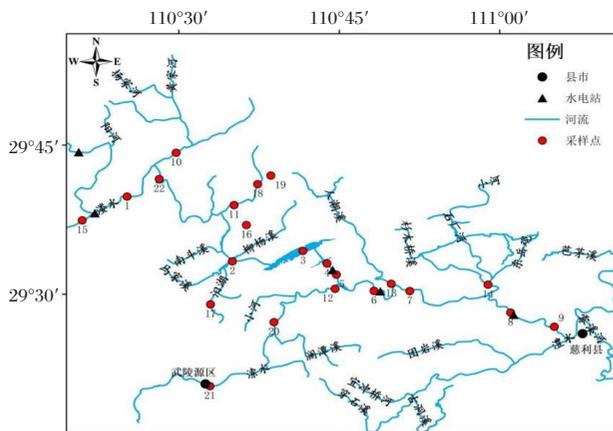


图 1 溇水中下游环境 DNA 采样点分布

Fig.1 Location of the e-DNA sampling points in the middle and lower Loushui River

利用 eDNA 技术对鱼类资源进行现状调查。使用容量 1 000 mL 采水器在各点位采集 1 L 的混合水样,保存至已消毒的 1 L 广口瓶中,每个点位采集 3 个重复样品,均在 24 h 内使用 0.45 μm 的混合纤维素滤膜(MCE, Whatman 公司)进行真空抽滤。为评估是否存在外源 DNA 污染,每个样点均同时抽取 1 L 蒸馏水作为空白对照;为避免交叉污染,对滤膜接触面进行消毒和冲洗。样品过滤后滤膜冷冻保存并尽快送回实验。使用水样 DNA 提取试剂盒(Mobio, 美国 Monio 实验室)提取滤膜 DNA,每份样品独立提取,并设置阴性对照,所提取的 eDNA 溶液置于 -20°C 保存。

利用鱼类通用引物 MiFish-U-F: GTY(C/T)GGTAAAW(A/T)CTCGTGCCAGC; MiFish-U-R: CATAGTGGGGTATCTAATCCY(C/T)AGTTTG 对 eDNA 样本进行 PCR 扩增(Miya et al, 2015),PCR 扩增体系参考舒璐等(2020)。PCR 产物文库构建完成后,使用 Illumina Miseq 平台进行高通量测序(深圳华

大基因科技服务有限公司),测序得到 raw reads 之后,组装过滤后得到 effective tags,保证利用最有效的数据聚类成操作分类单元 OTU(operational taxonomic unit);将 OTU 代表序列在 Genbank 的核酸序列数据库中进行物种注释,同时利用序列相似性在线检索工具 BLAST 进行人工校核,除去两端引物序列,核心目标片段 100% 匹配则被认定为该物种 DNA。对注释 OTU 进行筛选,统计不同分类水平的物种数量。

1.2 生态水文情势

选取江垭水电站下游的长潭水文站 1960–2020 年(1960–1999 年为建坝前、2000–2020 年为建坝后)逐日流量数据,采用生态水文指标变动范围法(IHA-RVA)和水文改变度法综合评价江垭大坝下游江段的生态水文情势变化。

水文变化指标(IHA)法是采用流量大小、发生时间、频率、持续时间和变化率具有生态意义的 5 个方面、共 32 个水文特征值来评估整个河流系统(Richter et al, 1996);选取与河流生态紧密相关的水文参数,每个参数的变化都可能对生态系统产生影响。变动范围(RVA)法是建立在 IHA 法之上,对与生态有关的水文特征的变化进行分析,RVA 描述的流量过程可变范围是指天然生态系统可以承受的变化范围,用来反映人类活动对径流的影响程度。

IHA 首先统计分析水文变化指标在受水库蓄水或人类活动干扰前后两个阶段的分布特性,再通过分析水文参数中心趋势(如中值、均值等)和离散程度(如标准差和离散系数等),描述河流水文情势年际变化。为了量化水文指标受干扰后的变化程度,Richter 等(1998)采用水文改变度来评估,并分为 3 个等级:0~33% 为无改变或低度改变(L);34%~66% 为中度变化(M);67%~100% 为高度变化(H)。

1.3 生态调度目标

首先对江垭水库建成前后的鱼类组成变化进行分析,将建库前后均存在的鱼类初步作为生态调度目标物种的筛选对象,目标物种的筛选需要考虑鱼类繁殖的生态需求、资源分布现状、历史产卵场情况等关联信息,以此综合评估确定物种的生态调度优先次序。基于鱼类生态学经验,其评估原则如下:(1)珍稀保护及重要经济鱼类的优先级高于一般鱼类;(2)河流性或洄游性鱼类的优先级高于定居性鱼类;(3)产漂流性卵鱼类优先级高于产粘沉性卵鱼类;(4)历史上有产卵场分布的鱼类优先级高于无产卵场的鱼类。

其次,在确定生态调度目标物种之后,通过总结目标物种的繁殖生态习性,提炼重要的水文、底质等生境要素需求信息。鉴于涑水鱼类生态学基础资料偏少,在此主要采用文献调研方法,筛选出对鱼类繁殖等关键生活史有重要作用的水文指标,并结合江垭蓄水前后的水文情势分析结果,将改变度较大的水文指标作为生态调度的修复目标。

2 结果与分析

2.1 涑水干支流鱼类组成及分布

2021年9月在涑水干支流共调查到鱼类55种,

包括土著种51种、外来种4种;其中39种为环境DNA检出,另外16种为调查走访获得(表1)。鱼类种类组成中,鲤形目36种,鲇形目和鲈形目次之(均为7种),合鳃目1种;各科鱼类中,以鲤科鱼类24属31种居首,占调查到的土著种类数的60.8%。

在涑水干流不同江段发现的50种土著鱼类(大鳍鱃仅为支流走访调查,不计入)中,江垭库尾以上江段有30种,江垭库区有23种,关门岩库区有37种,长潭河库区有18种,长潭河坝下至河口段有42种。其中,在各个库尾的回水变动带以偏好流水生境的鱼类为主,包括细鳞鲷、圆吻鲷、草鱼、黄颡鱼、马口鱼、

表1 不同时期江垭水库影响区鱼类组成变化

Tab.1 Changes of fish community composition in the affected area of Jiangya reservoir at different times

序号	鱼名	建库前	建库后	现状	建库后未调查到	建库后新增	序号	鱼名	建库前	建库后	现状	建库后未调查到	建库后新增
		1995年	2013年	2021年					1995年	2013年	2021年		
1	平舟原缨口鳅* <i>V. pingchowensis</i>	√		▲			19	斜颌鲴 <i>X. microlepis</i>	√		▲		
2	中华纹胸鮡 <i>G. sinense</i>	√			√		20	圆吻鲴 <i>D. tumirostris</i>	√	√	▲		
3	赤眼鲮 <i>S. curriculus</i>	√	√				21	马口鱼 <i>O. bidens</i>	√	√	▲		
4	鳊 <i>P. pekinensis</i>	√	√	▲			22	高体鳊 <i>R. ocellatus</i>	√	√	▲		
5	飘鱼 <i>P. sinensis</i>	√	√	▲			23	麦穗鱼 <i>P. parva</i>	√	√	▲		
6	鲮 <i>H. leucisculus</i>	√	√	▲			24	唇鲮 <i>H. labeo</i>	√	√	△		
7	贝氏鲮 <i>H. bleekeri</i>	√	√	▲			25	花鲮 <i>H. maculatus</i>	√	√	▲		
8	青鱼 <i>M. piceus</i>	√	√	▲			26	黑鳍鲈 <i>S. nigripinnis</i>	√	√	▲		
9	草鱼 <i>C. idellus</i>	√	√	▲			27	棒花鱼 <i>A. rivularis</i>	√	√	▲		
10	蒙古鲌 <i>E. mongolicus</i>	√	√	▲			28	蛇鲈 <i>S. dabryi</i>	√	√			
11	翘嘴鲌 <i>C. alburnus</i>	√	√	▲			29	吻鲈 <i>R. typus</i>	√	√			
12	鲫 <i>C. auratus</i>	√	√	▲			30	中华倒刺鲃 <i>S. sinensis</i>	√	√			
13	鲤 <i>C. carpio</i>	√	√	▲			31	泥鳅 <i>M. anguillicaudatus</i>	√	√	▲		
14	鲢 <i>H. molitrix</i>	√	√	▲			32	鳊 <i>S. chuatsi</i>	√	√	▲		
15	鲮 <i>A. nobilis</i>	√	√	▲			33	斑鲮 <i>S. scherzeri</i>	√	√	△		
16	宽鳍鱮 <i>Z. platypus</i>	√	√	△			34	乌鳢 <i>C. argus</i>	√	√	△		
17	黄尾鲴 <i>X. davidi</i>	√	√	▲			35	沙塘鳢 <i>O. obscurus</i>	√	√	△		
18	银鲴 <i>X. argentea</i>	√	√	△			36	刺鲃 <i>M. aculeatus</i>	√	√	△		

续表 1

序号	鱼名	建库前	建库后	现状	建库后 未调 查到	建库 后 新增	序号	鱼名	建库前	建库后	现状	建库后 未调 查到	建库 后 新增
		1995年	2013年	2021年					1995年	2013年	2021年		
37	光泽黄颡鱼 <i>P. nitidus</i>	√	√	△			60	泸溪直口鮰 <i>R. luxiensis</i>	√			√	
38	黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i>	√	√	▲			61	银色颌须鮡 <i>G. imberbis</i>	√			√	
39	瓦氏黄颡鱼 <i>P. vachelli</i>	√	√	▲			62	铜鱼 <i>C. heterodon</i>	√			√	
40	大鳍鱩 <i>M. macropterus</i>	√	√	△			63	光唇蛇鮡 <i>S. gymnocheilus</i>	√			√	
41	鲇 <i>S. asotus</i>	√	√	▲			64	南方长须鳅鮡 <i>G. longibarba meridionalis</i>	√			√	
42	胡子鲇 <i>C. fuscus</i>		√	△			66	点面付沙鳅 <i>P. maculosa</i>	√			√	
43	黄鳍 <i>M. albus</i>	√	√	△			67	叉尾黄颡鱼 <i>P. eupogon</i>	√			√	
44	武昌副沙鳅 <i>P. banarescui</i>	√	√	▲			68	长吻鮠 <i>L. longirostris</i>	√			√	
45	中华花鳅 <i>C. sinensis</i>	√	√	▲			69	白绿鲈* <i>L. marginatus</i>	√		▲		
46	鳊 <i>E. bambusa</i>	√			√		70	波氏吻鰕虎鱼 <i>R. cliffordpopei</i>	√			√	
47	鳊 <i>O. elongatus</i>	√			√		71	银鮡 <i>S. argentatus</i>		√	△		√
48	鲃 <i>C. alburnus</i>	√			√		72	大眼鳊 <i>S. kneri</i>	√		▲		√
49	三角鲂 <i>M. terminalis</i>	√			√		73	太湖新银鱼# <i>N. taihuensis</i>		√	▲		√
50	彩石鲂鮈 <i>R. lighti</i>	√		△			74	太湖短吻银鱼# <i>T. taihuensis</i>			▲		√
51	刺鲃 <i>B. cdlldwelli</i>	√			√		75	伍氏华鳊 <i>S. wui</i>		√	△		√
52	半刺光唇鱼 <i>A. hemispinus</i>	√			√		76	团头鲂 <i>M. amblycephala</i>		√	▲		√
53	多鳞铲颌鱼* <i>V. macrolepis</i>	√		▲			77	达氏鲃 <i>C. dabryi</i>		√	▲		√
54	白甲鱼* <i>O. simus</i>	√		▲			78	江西鳊 <i>S. kiangsiensis</i>		√	△		√
55	小口白甲鱼 <i>O. lini</i>	√			√		79	大口鲇# <i>S. meridionalis</i>	√	√	▲		
56	稀有白甲鱼 <i>O. rarus</i>	√			√		80	斑点叉尾鲷# <i>I. punctatus</i>		√	△		√
57	瓣结鱼 <i>T. brevifilis</i>	√			√		81	子陵吻鰕虎鱼 <i>R. giurinus</i>		√	▲		√
58	异华鲮 <i>P. assimilis</i>	√			√		注:▲代表环境DNA检出;△代表走访调查;*代表仅在支流检出;#代表外来物种。 Note: ▲ denotes species identified by e-DNA; △ denotes species undetected but mentioned in the survey; * denotes species only detected in the tributaries; # denoted invasive species.						
59	湘华鲮 <i>S. tungting</i>	√	√										

黑鳍鳊等;在库区敞水区则以偏好静缓流水生境的鱼类为主,包括鲢、鳙、翘嘴鲃、蒙古鲃、鲤、鲫等;在梯级坝下至河口段,喜流水生境的种类明显比梯级库区多,特别是分布有中小型的产漂流性卵鱼类如银鲌、银鮡、贝氏鲮、武昌副沙鳅等。与 20 世纪 90 年

代相比,流水性种类在干流江段显著减少 51.35%。

2.2 江垭坝下生态水文指标变化

基于长潭河水文站 1960–2020 年日均流量数据,计算并统计 IHA 指标法中各个水文参数的变化情况以及变化度等级(表 2)。32 个水文参数中,

11个为高度变化,11个为中度变化,10个为低度变化。第1组指标为月平均流量,改变较大的为1月平均流量,中度改变的是2月和9-12月的平均流量;第2组指标为年极端水文状况,改变较大的为年最小1日平均流量、年最小连续3日平均流量、年最小连续90日平均流量、年最大1日平均流量、年最大连续3日平均流量共5个指标;第3组指标为年极端水文状况出现时间,2个指标均为低度变化;第4组指标为高流量和低流量的频率和历时,改变较大的是年低流量脉冲事件的平均历时、年出现高流量脉冲事件的次数、年高流量脉冲事件的平均历时共3个指标;第5组指标为水文条件改变的变化率和频率,改变较大的是连续日流量上涨率、流量逆转的次数2个指标。

2.3 江垭水库生态调度目标筛选

本研究调查到溇水中下游现有鱼类55种,除仅溇水支流分布的鱼类4种(平舟原缨口鳅、白缘鳅、白甲鱼、多鳞白甲鱼)、外来种4种(太湖新银鱼、太湖短吻银鱼、大口鲶、斑点叉尾鲴),生态调度目标分析对象包括当前在溇水干流分布的47种鱼类。

2.3.1 繁殖习性 47种鱼类中,产粘性卵鱼类有19种,包括宽鳍鱮、马口鱼、黄尾鲴、圆吻鲴、瓢鱼、伍氏华鳊、鳡、达氏鲃、团头鲂、唇鲮、花鲮、黑鳍鳊、江西鳊、鲤、鲫、大鳍鱮、沙塘鳢、子陵吻鰕虎鱼和刺鳅,是溇水主要的繁殖产卵类型;其次是产漂流性或微粘性卵鱼类有12种,包括武昌副沙鳅、四大家鱼、银鲴、细鳞鲴、贝氏鳃、翘嘴鲃、蒙古鲃、鳊、银鲶;产沉性卵鱼类有泥鳅、鲃等6种,产浮性卵鱼类有鳊等3种;此外,还有一些特殊产卵习性的鱼类,如筑巢产卵的黄颡鱼属、黄鲢、乌鲢,喜贝类产卵的鳊鳊。

2.3.2 资源分布 上述31种典型产粘性卵和产漂流性卵的鱼类中,在长潭河坝下分布且具有洄游习性的种类5种,分别为草鱼、鲢、鳊、银鲴、银鲶;另外,具有经济价值的种类6种,分别为鲤、鲫、贝氏鳃、圆吻鲴、翘嘴鲃、团头鲂。

2.3.3 产卵场现状 产粘性卵的鱼类繁殖类群为溇水中下游的主要繁殖类群。实地调查发现,长潭河坝下至河口江段水生环境类型多样,既有弯曲的砂石浅水滩,也有宽阔的敞水区,两岸植被丰富,为鲤、鲫、中华花鳊等产粘性卵鱼类提供了适宜的繁殖条件。由于梯级电站日调节引起下游水位频繁变动,其繁殖孵化可能受到一定影响。根据鱼类分布情况,在长潭河坝下可能存在银鲶、鳅类、鳡类等小型产漂流性卵鱼类的产卵场,而大型产漂流性卵鱼类,如四大家鱼为人工增殖放流个体,在溇水中下游历来不存在产卵场。

表2 长潭河站水文变化指数IHA统计
Tab.2 Indicators of hydrologic alteration (IHA) at the Changtanhe hydrologic station

变化指标	水文参数	IHA 平均值		改变度/%	等级
		干扰前	干扰后		
月均流量	1月	31.4	96.9	-82	高
	2月	49.7	107.2	-49	中
	3月	104.9	121.5	8	低
	4月	184.0	150.0	7	低
	5月	269.2	206.8	-12	低
	6月	335.6	280.1	12	低
	7月	389.7	311.4	33	低
	8月	203.9	145.5	21	低
	9月	144.5	103.6	36	中
	10月	113.9	103.3	50	中
	11月	88.2	92.2	35	中
	12月	37.2	91.9	62	中
年极端水文状况大小和历时	年最小1日平均流量	15.3	5.8	-88	高
	年最小连续3日平均流量	15.8	11.8	-77	高
	年最小连续7日平均流量	16.5	17.5	-59	中
	年最小连续30日平均流量	20.4	40.4	-64	中
	年最小连续90日平均流量	31.6	68.8	-80	高
	年最大1日平均流量	2616	1275	-69	高
	年最大连续3日平均流量	1833	933	-68	高
	年最大连续7日平均流量	1235	700	-59	中
	年最大连续30日平均流量	604	430	-56	中
	年最大连续90日平均流量	376	289	-26	低
年极端水文状况出现时间	基流指数	0.10	0.12	-47	中
	年最小1日流量出现时间	43.2	312.9	-20	低
高流量和低流量频率和历时	年最大1日流量出现时间	181.2	197.7	-17	低
	年出现低流量脉冲事件次数	5	15	-67	中
	年低流量脉冲事件平均历时	21	3	-100	高
	年出现高流量脉冲事件次数	9.8	3.4	-87	高
	年高流量脉冲事件平均历时	2.8	2.6	-83	高
水文条件变化率和频率	连续日流量上涨率	129.8	50.3	-94	高
	连续日流量下降率	-51.1	-45.2	-9	低
	流量逆转次数	89.5	182.1	-100	高

2.4 江垭水库生态调度目标需求

综合上述涪水中下游现有鱼类的产卵类型、资源分布、产卵场现状,按照生态调度优先等级评估原则,筛选出江垭水库生态调度的主要目标为银鲴、银鮡、贝氏鲮、鲤和鲫。这些鱼类尽管受到梯级水库调度运行的影响,但保持着一定的种群规模,且具有一定的经济价值,需要重点关注。

由于未查阅到涪水中下游鱼类产卵场调查的文献,在此分析目标物种繁殖生态需求时主要参考其他河流的相关研究(表3)。通过文献总结得出,银鲴、银

鮡在流水中产卵,受精卵随水漂流发育,但对涨水过程要求不严格,下雨后江水变浑、流速加快即能促进其产卵繁殖;贝氏鲮繁殖对涨水的依赖程度很小,在水温达到繁殖需求后即可产卵;鲤、鲫繁殖对涨水要求不严格,但粘性鱼卵需要一定的附着基质,产卵场一般分布在水草丰富的沿岸带,根据人工鱼巢试验,鲤、鲫的最大产卵水深为0.8 m,适宜产卵水深为0.4~0.6 m。总体而言,江垭坝下目标物种自然繁殖对持续的涨水过程要求不严格,当水温达到适宜范围,只要出现流速、流态、透明度等变化,适度的涨落水都可以繁殖。

表3 生态调度目标物种的繁殖生态需求

Tab.3 Ecological requirements for target species breeding to be met by ecological operation

对象	涨水需求	流速	透明度	水深/m	产卵场特征	参考文献
银鲴	天然涨水	流水	变小	0.5	浅滩、砾石底质	何学福和邓其祥,1979
银鮡	天然涨水	加快	变小		江心洲、小岛	李修峰等,2005
贝氏鲮	不严格				水温适宜即可	黎明政等,2019
鲤、鲫	不严格			0.4~0.6	有水草的沿岸带	内部资料

3 讨论

3.1 环境DNA技术调查涪水鱼类物种的代表性

环境DNA技术已广泛应用于水生生物多样性调查,较传统调查获得的种类更为全面(蒋佩文等,2002;李晨虹等,2023)。本研究通过环境DNA采样在涪水干流调查到35种鱼类,这与相同方法调查到乌江干流梯级库区的32种接近,2个区域均以广适性鱼类为主要构成,表明梯级水库的长期阻隔作用对鱼类多样性和种类结构组成产生了一定影响(程如丽等,2023)。此次调查与2013年相比,进一步减少的物种包括蛇鮡、吻鮡、中华倒刺鲃、唇鲮、宽鳍鱲等流水性鱼类,以及斑鲃、乌鳢、胡子鲇、黄鲮等底栖性鱼类(表1)。有研究表明,环境DNA沉积物样品较水体样品能够检测到更多的鱼类物种,且底栖性鱼类比例更高(周春花等,2021)。本次调查的环境DNA样品来自水体表层,有可能导致鉴定的种类不全、底栖性鱼类信息缺乏。因此,通过不同水层混合采样的结果可能更加准确。平舟原缨口鳅、白缘鲃、白甲鱼、多鳞白甲鱼4种喜流水、洞穴或石隙生活的鱼类,由于本底资源量较少,通过常规网具调查难以捕获样本,此次环境DNA采样能够确定其在少数具有溶洞、暗河的支流中有分布,体现了环境DNA技术在目标物种及水生生物多样性监测中的优越性。尤其在长江十年禁渔背景下,作为无损伤的鱼类资源监测手段,具有广阔的发展前景(杨威等,2023)。

3.2 江垭水库建设运行前后涪水鱼类资源演变

根据涪水下游梯级水电站建设运行时间和资料掌握情况,将鱼类资源演变分为1995年江垭建库前、2013年梯级水库运行后、2021年现状调查3个时期,对比得出了不同时期调查的鱼类种类组成(表1)。在江垭水库影响区江段,1995年调查记录有71种,到2013年减少到51种,减少的种类主要是喜急流生境的鱼类,包括平舟原缨口鳅、中华纹胸鮡、白甲鱼、光唇鱼、瓣结鱼、泸溪直口鲮、白缘鲃等,还包括鳊、鲮、铜鱼、长吻鮡等洄游性鱼类。2000~2009年,涪水下游江垭、关门岩和长潭河3座梯级水电站相继建成运行(梁浩,2013);江垭库尾至长潭河坝址间约118 km江段变为首尾相连的静水水库,对喜流水生境尤其是具有繁殖洄游习性的鱼类构成了严重威胁,可能是此期间鱼类物种明显减少的一个重要原因。类似的情况还见于长江上游及金沙江下游,梨园至向家坝共10座梯级水库的修建,将导致46种土著特有鱼类的关键生境丧失(Cheng et al, 2015)。江垭建库后,新采集到的鱼类有10种,主要为适应静缓流生境的种类,其中银鮡为产漂流性卵鱼类,仅在长潭河坝下流水河段分布;其在澧水中游慈利县曾有分布(刘良国等,2013),推测可能是由澧水上溯至涪水而偶然被采集到。

3.3 江垭坝下生态水文指标变化及修复建议

水文情势是维系河湖生态系统健康的关键因素。20世纪90年代,建立了关于水利工程对河流生态水

文情势影响的水文改变指标体系及其定量分析方法,随后被广泛应用(Gao et al,2012)。本研究通过IHA和RVA法分析得出,江垭等梯级建设运行后,坝下河段水文情势变化显著,丰水期流量变小,枯水期流量变大;径流量极大值变小,极小值变大,基流指数增大,流量趋于均一化;年高脉冲时间出现次数减少,历时变短;连续日流量上涨率减小,流量逆转次数变多(表2)。这与多数大型水库“蓄丰补枯”调节作用的变化模式基本一致(李清清等,2012;郭卫等,2018)。近60年来,涪水流域年均降水量整体呈现下降趋势,春季与秋季降水量逐年减少,夏季与冬季降水逐年略有增加(刘世军等,2020);而气候变化和水利工程的叠加

影响,会进一步加剧区域水生态系统的稳定性(班璇等,2020)。为此,开展江垭水库生态调度本底研究对于涪水流域治理和保护尤为重要。

为更好地反映水文情势变化对涪水鱼类繁殖的潜在影响,本研究参考高志强等(2018)总结的与鱼类繁殖需求密切相关的水文指标,并结合江垭坝下水文情势分析结果,筛选出水文情势改变度高且对鱼类洄游产卵及鱼卵发育有重要作用的3类水文指标,分别为年最大1日和3日平均流量指标、年出现高流量脉冲事件的次数和持续时间、连续日流量上涨率。从满足鱼类繁殖需求出发,将这3类水文指标作为江垭水库生态调度重点修复的水文参数(表4)。

表4 鱼类繁殖需求关联的水文指标及建坝前后改变度

Tab.4 Hydrological indicators related to fish reproduction and the degree of variation before and after dam construction

水文指标	与鱼类繁殖的关联性	江垭建坝前后水文改变度/%
高流量脉冲次数	许多鱼类已经适应了在高流量脉冲时节产卵,高流量脉冲作为鱼类洄游产卵的信号,决定鱼类产卵的次数与规模	-87 (高)
高流量脉冲持续时间		-83 (高)
最大1日、3日平均流量指标	一般完成一次产卵过程需要2~3 d,要求有足够长时间的高流量阈值来保证产卵的进行	-68 (高)
最大流量出现时间	表征鱼类产卵进入高峰期	-17 (低)
涨水率和落水率	鱼类产卵完成还需要一定的涨水、落水率,涨水时流速加快刺激鱼类排卵,而排卵后需要一定的落水过程才能使漂流性鱼卵顺利漂向下游;但落水太快不利于粘性鱼卵孵化。	连续日涨水率:-94 (高) 连续日落水率:-9 (低)
6-8月平均流量指标	根据建库后水温变化,目前江垭坝下鱼类繁殖时间在6-8月,产卵后鱼卵的漂浮以及发育都需要一定的流量环境	<33 (低)

针对江垭水库生态调度目标筛选结果,银鮡、银鲴、贝氏鲮的繁殖对水文要求不严格,在繁殖季节到来时,只要下雨或适度涨水就能繁殖。因此,表征涨水幅度的日流量上涨率可能是次要的。有研究表明,流速能够促发鱼类的产卵行为,但随着流速的增加,其孵化率和成活率显著下降,故静态水域更有利于鱼卵早期的生长发育(Chen et al, 2021)。鲤、鲫产粘性鱼卵,需要水草等附着基质才能发育成为鱼苗,鱼类繁殖期的坝下水位变化较大,尤其是水库快速消落时期有可能导致粘性鱼卵暴露在空气中死亡(朱其广等,2023)。关门岩、长潭河为日调节型水电站,电站日调峰会引起下游水位的频繁变动。因此,适当的水位变幅对于鲤、鲫的繁殖孵化至关重要。

综上,以促进坝下不同产卵类型的鱼类繁殖为目标,江垭水库生态调度不仅需要恢复一定的高流量脉冲次数和历时,还需要控制下游的水位日降幅,通过泄放合理的生态流量来满足不同鱼类完成关键

的生活史,维持水生生物多样性。由于目前监测数据的限制,尚难以提出生态流量的泄放时机、方式和过程;未来需要开展持续深入的生态-水文要素观测,进一步探讨江垭生态调度方案及其可行性。

参考文献

- 班璇,师崇文,郭辉,等,2020. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. 水利水电科技进展, 40(4):1-7.
- 陈志刚,程琳,陈宇顺,2020. 水库生态调度现状与展望[J]. 人民长江, 51(1):94-103.
- 程如丽,罗杨,张玉凤,等,2023. 基于环境DNA技术的乌江干流梯级水电库区的鱼类多样性[J]. 水产学报,[2023-04-13] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20230412.1705.006.html>.
- 董哲仁,孙东亚,赵进勇,2007. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 38(1):28-32.
- 范骢骧,李永,唐锡良,2017. 基于鱼类产卵期栖息地需求的水库生态调度方法研究[J]. 四川环境, 36(2):132-138.

- 高志强,丁伟,唐榕,等,2018. 耦合水文情势及鱼类需求的生态调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 16(2): 14-20.
- 郭卫,徐长江,邵骏,等,2018. 基于 RVA 法的金沙江下游水文情势研究[J]. 人民长江, 49(18):58-63.
- 何学福,邓其祥,1979. 嘉陵江主要经济鱼类越冬场、产卵场、幼鱼索饵场调查及保护利用[J]. 西南师范学院学报(自然科学版), (2):27-41.
- 蒋佩文,李敏,张帅,等,2022. 基于环境 DNA 宏条码和底拖网的珠江河口鱼类多样性[J]. 水生生物学报, 46(11):1701-1711.
- 黎明政,马琴,陈林,等,2019. 三峡水库产漂流性卵鱼类繁殖现状及水文需求研究[J]. 水生生物学报, 43(S):84-96.
- 李晨虹,凌岚馨,谭娟,等,2023. 环境 DNA 技术在水生生物监测中的挑战、突破和发展前景[J]. 上海海洋大学学报, 32(3):564-574.
- 李清清,覃晖,陈广才,等,2012. 长江中游水文情势变化及鱼类的影响分析[J]. 人民长江, 43(11):86-89.
- 李修峰,黄道明,谢文星,等,2005. 汉江中游银鮡的繁殖生物学[J]. 水利渔业, 25(2):23-24.
- 李哲,陈永柏,李翀,等,2018. 河流梯级开发生态环境效应与适应性管理进展[J]. 地球科学进展, 33(7):675-686.
- 梁浩,2013. 关门岩水电站尾水受长潭河电站顶托影响分析[J]. 科技传播, 5(7):36,40.
- 刘良国,杨品红,杨春英,等,2013. 湖南境内澧水鱼类资源现状与多样性研究[J]. 长江流域资源与环境, 22(9):1165-1171.
- 刘世军,刘祥,杨特群,等,2020. 涪水流域降水特征及上游降水对江垭水库来水量影响[J]. 水利科技与经济, 26(2):1-8.
- 舒璐,林佳艳,徐源,等,2020. 基于环境 DNA 宏条形码的洱海鱼类多样性研究[J]. 水生生物学报, 44(5):1080-1086.
- 水利部中国科学院水库渔业研究所, 1995. 江垭水利枢纽工程渔业规划[R].
- 王珂,周雪,陈大庆,等,2019. 四大家鱼自然繁殖对水文过程的响应关系研究[J]. 淡水渔业, 49(1):66-70.
- 杨威,舒政博,张先炳,等,2023. 基于环境 DNA 宏条形码的三峡水库变动回水区鱼类多样性研究[J/OL]. 水生态学杂志, <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202211210467>
- 中国河湖大典编纂委员会,2010. 中国河湖大典-长江卷(上)[M]. 北京:中国水利水电出版社.
- 周春花,钟伟翔,陈金萍,等,2021. 利用沉积物和水体的环境 DNA 检测鱼类物种多样性的差异[J]. 南昌大学学报(理科版), 45(6):565-577.
- 朱其广,张琪,杨志,等, 2023. 三峡库区支流磨刀溪产粘沉性卵鱼类早期资源现状[J]. 水生态学杂志, 44(1):101-107.
- Chen Q, Zhang J, Chen Y, et al, 2021. Inducing Flow Velocities to Manage Fish Reproduction in Regulated Rivers[J]. Engineering, 7(2):178-186.
- Cheng F, Li W, Castello L, et al, 2015. Potential effects of dam cascade on fish: lessons from the Yangtze River[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 25(3):569-585.
- Gao B, Yang D, Zhao T, et al, 2012. Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008[J]. Journal of Hydrology, 448/449:30-38.
- Konrad C P, Warner A, Higgins J V, 2012. Evaluating dam re-operation for freshwater conservation in the sustainable rivers project[J]. River Research and Applications, 28: 777-792.
- Miya M, Sato Y, Fukunaga T, et al, 2015. MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species[J]. Royal Society Open Science, 2(7): 150088.
- Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al, 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology, 10(4):1163-1174.
- Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al, 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. River Research and Applications, 14(4):329-340.
- Richter B D, Thomas G A, 2007. Restoring environmental flows by modifying dam operations[J]. Ecology and Society, 12(1): <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art12/>

(责任编辑 万月华)

Ecological Operation of Jiangya Reservoir Coupled with River Hydrology and Fish Reproduction

XU Wei^{1,2}, WEI Mi¹, CAO Jun^{1,2}, CAI Lu¹, GAO Shao-bo¹, ZHU Di¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Water Resources for Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem, Hubei Engineering Research Center of Hydroecology Protection and Restoration, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R. China;
2. Innovation Team for Flood and Drought Disaster Prevention of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R. China)

Abstract: The ecological operation of large reservoirs is an important means of restoring the hydrological regimes of rivers and the health of river ecosystems. Jiangya reservoir, located in Cili County, Zhangjiajie, on the lower Loushui River, is a large reservoir and is important for flood control in the Lishui River basin. However, fish populations in Loushui River have been declining, and restoration and the need for conservation of the resource is urgent. In September 2021, a comprehensive fishery resource investigation was carried out in the mainstem and tributaries of the middle and lower Loushui River, including environmental DNA sampling, fish collection and fisherman surveys. The fishery composition and distribution, and variations in the hydrological regime below Jiangya Dam, before and after reservoir construction, were analyzed. The analysis was based on the investigation of fishery resources and aquatic habitat, combined with long term hydrological data collected at Changtanhe Hydrologic Station (1960–2020), and target fish species were selected for the ecological operation. We then explored the relationship between the hydrology below Jiangya Dam and fish reproduction by analyzing variations in the Index of Hydrological Alteration (IHA) and a review of the literature. Finally, requirements and recommendations for the ecological operation of Jiangya Reservoir were put forward. A total of 55 fish species were recorded in the mainstream and tributaries of Loushui River in September 2021. The number of rheophilic fish species in the mainstream decreased significantly (51.35%) compared to the 1990s. According to the priority evaluation of target fish species for the ecological operation, the primary target species are *Xenocypris argentea*, *Squalidus argentatus*, *Hemiculter bleekeri* that lay drifting eggs, and *Cyprinus carpio*, *Carassius auratus* that lay sticky eggs. Before and after the construction of Jiangya Dam the hydrological regimes in the lower reaches have changed greatly. The hydrological indicators that most changed and play important roles for fish migration, spawning and fish egg development include the annual maximum 1-day and 3-day average flow, number and duration of high-flow pulse events in a year, and continuous daily flow increase rate. To promote fish spawning below the dam that includes different types of eggs, the ecological operation of Jiangya reservoir needs to maintain a sufficient number and duration of high flow pulses, and control the daily decline of downstream water level. These hydrologic characteristics are important for maintaining a diversity of downstream aquatic organisms and are achievable by ecological operation.

Key words: fish reproduction; environmental DNA; hydrologic regime; ecological operation; Jiangya reservoir