

水库对嘉陵江流域鱼类繁殖的影响评估

刘洋¹, 刘攀^{1*}, 张杨², 廖劲松³, 吴四飞³, 林东升², 冯安龙², 王欢⁴

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²重庆嘉陵江利泽航电开发有限公司, 重庆

³重庆航运建设发展(集团)有限公司, 重庆

⁴中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2024年4月9日; 录用日期: 2024年4月19日; 发布日期: 2024年4月28日

摘要

水库的生态影响评估可为水资源综合管理提供依据。传统统计学方法确定的生态流量难以反映整个河流的满足情况, 对目标保护鱼类的分析也缺乏系统性。本文以嘉陵江为例, 首先, 构建保护物种优先级评价体系, 依照珍稀性、受人类影响程度和经济价值进行打分, 按照分数排序选出12种代表性鱼类; 其次, 分析目标鱼类最佳产卵温度, 鱼卵漂浮阈值, 并按照产粘沉性卵鱼类和产漂流性卵鱼类进行分类; 再次, 基于水力学模型将流速阈值转化为若干断面的流量阈值; 最后, 分析嘉陵江水温、流量特征变化, 以刺激产卵涨水时间和鱼卵漂浮流量阈值作为指标, 评价水库对保护鱼类的影响。结果表明, 水库使得鱼类产卵期的平均温度降低, 年均最佳涨水天数频次减少。该论文可为嘉陵江流域生态调度提供技术支撑。

关键词

效果评价, 生态调度, 目标鱼类, 嘉陵江, 一维水动力

Evaluation of the Impact of Reservoirs on Fish Reproduction in the Jialing River Basin

Yang Liu¹, Pan Liu^{1*}, Yang Zhang², Jinsong Liao³, Sifei Wu³, Dongsheng Lin², Anlong Feng², Huan Wang⁴

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Chongqing Jialing River Lize Navigation Electrical Development Co., Ltd., Chongqing

³Chongqing Shipping Construction Development Group Co., Ltd., Chongqing

⁴China Water Resources Pearl River Planning, Survey & Design Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Apr. 9th, 2024; accepted: Apr. 19th, 2024; published: Apr. 28th, 2024

作者简介: 刘洋(2000.01-), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 从事水文学及水资源研究, Email: 1752864830@qq.com

*通讯作者 Email: liupan@whu.edu.cn

文章引用: 刘洋, 刘攀, 张杨, 廖劲松, 吴四飞, 林东升, 冯安龙, 王欢. 水库对嘉陵江流域鱼类繁殖的影响评估[J]. 水资源研究, 2024, 13(2): 158-168. DOI: 10.12677/jwrr.2024.132018

Abstract

Ecological impact evaluation of reservoirs can provide a basis for integrated water resources management. Previous ecological evaluation methods lack systematic analysis of target protected fish species, and ecological flows determined by statistical methods are difficult to reflect the satisfaction of the entire river. Taking Jialing River as a case study, this paper establishes a prioritized evaluation system for species conservation. Firstly, an evaluation system for prioritizing protected species was constructed, with scores based on rarity, degree of human impact and economic value, and 12 representative fish species were selected in order of their scores. Subsequently, the optimal spawning temperature and egg buoyancy threshold of the target fish species were analyzed, categorizing them into species that lay adhesive or buoyant eggs. Then, the conversion of flow rate thresholds to flow rate thresholds based on hydrodynamic simulations. Finally, the changes in water temperature and flow characteristics of the Jialing River were analyzed, and the stimulation of spawning rise time and egg floating flow thresholds were used as indicators to evaluate the impacts of reservoir on the protected fish species. The results showed that the reservoir led to a decrease in the average temperature during the fish spawning period and a decrease in the frequency of the annual average optimal number of days of high water. This paper can provide technical support for ecological dispatch in the Jialing River basin.

Keywords

Effect Evaluation, Ecological Operation, Target Fish Species, Jialing River Basin, One-Dimensional Hydrodynamic Model

Copyright © 2024 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为了防洪、发电等社会经济效益目标而修建的水坝和涵闸，使原来连续的河流生态系统被分隔成不连续的环境单元，造成生境破碎。洄游通道的阻隔，也使鱼类的生长、繁殖、摄食等正常活动受到阻碍，破坏了鱼类种群的正常演替和发展，造成水生生物多样性下降，渔业资源枯竭等不利影响[1]。水库运行改变了下游河道天然的流速和水温分布，同时坦化洪水过程，使得河道的水位、流量季节性节律消失[2] [3]。鱼类的产卵、孵化与河道天然的流速、温度有关，是其在长期适应周围环境的基础上形成的[4]。研究表明，水流是刺激鱼类性腺最终发育成熟的重要条件，鱼类产卵行为是内源发育成熟和外源环境刺激共同作用的结果。鱼类产卵需要在性腺发育成熟的基础上，加以水温、水流等环境因子刺激，在适宜场所才能产卵，各个条件缺一不可。水库的防洪、发电等社会效益和鱼类繁殖的生态效益之间形成了严重冲突[5] [6]。

为缓解水利工程对鱼类繁衍的负面影响，国内外学者提出通过在特定的时期下泄生态流量以重构河道的天然水文特征，恢复部分产卵场，刺激鱼类繁殖和鱼卵孵化[7] [8]。朱挺兵[9]等通过对珍稀性、物种价值、人为干扰等指标打分，分析了澜沧江西藏段鱼类的优先保护等级和其生态需求；宋一清[10]等采用濒危系数、遗传价值系数和物种价值系数对各指标评分赋权以计算目标保护物种的综合评价价值。对优先保护鱼类的敏感性水文特性进行分析可确定满足鱼类繁殖的水文特征阈值。徐薇[11]等研究生态调度需求时依据珍稀性、经济性、洄游性等对鱼类保护优先级进行排序，通过分析重点保护鱼类的分布、产卵需求等确定了生态调度流量；熊斌梅[12]等通过分析乌都河珍稀性和经济性鱼类的产卵水文特征，运用统计学方法确定了鱼类产卵繁殖所需生态流量；杨泽凡[13]等以河道断面平均流速作为鱼类的生态表征指标，分析了全国各地 47 种代表性产漂浮性卵鱼类的

生态流速阈值。结合目标鱼类繁殖需求与环境水文特征可有效评价水库对鱼类的影响。陈进[14]等通过分析三峡生态调度与四大家鱼之间的产卵关系，评价了三峡工程试运行期的调度效果；张迪[15]等以四大家鱼的产卵所需的水温、持续涨水时间等指标评价了三峡生态调度的效果并提出优化建议。

综上，筛选优先保护鱼类并分析繁殖需求是水库生态评价和调度的前提。然而，以往研究通过统计学方法确定的生态流量仅考虑了历史经验，对目标保护鱼类的分析也缺乏系统性。本文基于目标保护鱼类筛选和水力学模型，评估水库对嘉陵江流域鱼类繁殖的影响。首先开展鱼类调查，研究受威胁鱼类的优先保护等级选择目标鱼类，分析其生态需求和环境之间的匹配关系，同时构建一维水动力学模型确定生态流量阈值，以刺激产卵的最佳涨水时间和鱼卵漂浮流量阈值作为指标，评价水库对保护鱼类的影响。

2. 研究区域和数据

2.1. 区域概况

嘉陵江地处长江上游，是长江最大的一级支流，流域面积达 16 万 km²，干流流经陕西省、甘肃省、四川省，在重庆市朝天门汇入长江，嘉陵江流域概况如图 1。流域属亚热带季风气候，雨热同期，径流主要集中在汛期 5 月~10 月，水量约占年径流量的 75%~83%，多年平均气温 15℃左右[16]，历年极端最高气温 36℃。嘉陵江水生生物资源丰富，嘉陵江滩、峡、碛、沱相间成串，其复杂的水域环境为鱼类提供了良好的产卵、索饵、觅食及越冬场所，形成了丰富的鱼类资源，是长江上游鱼类重要的种质资源库，也是重要的渔业资源区。嘉陵江合川段南方大口鲶国家级水产种质资源保护区位于重庆市合川区，全长 63.3 km。保护区上边界为利泽航电枢纽，下边界至草街航电枢纽，主要保护对象为南方大口鲶及其生境，其他保护物种包括中华倒刺鲃、黄颡鱼、华鲮等。

嘉陵江水力资源较丰富，已建、在建及规划建设的梯级电站共有 24 座，在“全江渠化，梯级开发”的规划下，亭子口水库、草街航电枢纽、利泽航电枢纽等水利工程开工建设，获得了较大的综合效益，但也使得河流连续性被阻隔和破坏，水文情势发生了巨大的变化，致使鱼类无法依赖特定的水文条件进行产卵。亭子口下游水域生态环境受到显著影响，鱼类群落组成发生明显变化。



图 1. 嘉陵江流域示意图

2.2. 数据

本文参考《嘉陵江亭子口水利枢纽工程影响水生生物名录》《嘉陵江亭子口水利枢纽工程对水生生物影响评价》《四川鱼类志》《嘉陵江亭子口水利枢纽竣工环境保护验收调查报告》等材料[17], 广泛调查嘉陵江鱼类及水生生物种群。研究区域共分布有 130 种鱼类。国家二级保护鱼种有 2 类, 珍稀鱼种有 8 类, 省级保护鱼种有 6 类, 长江上游特有鱼种有 37 类。

研究中采用北碚水文站 1992~2020 年的逐日水位、流量数据, 用以分析水文情势变化。在技术调研过程中收集了 2003~2019 年近年的逐日水温数据, 用以探究鱼类产卵期间阶段性水温适宜性。研究区域河道断面数据根据实测地形文件提取。数据经过了整编和质量控制, 可信度较高。

3. 研究方法

本研究针对嘉陵江梯级建成后, 需要筛选生态调度目标鱼类, 分析水文需求, 确定鱼卵漂浮的流速阈值。方法主要包含四个步骤:

1) 评价指标体系构建。通过资料收集和调研, 参考有关鱼类优先保护等级评价指标体系的构建, 确定各指标评分情况。

2) 目标鱼类水文需求分析。通过文献调研, 分析目标鱼类繁殖、产卵习性, 对其产卵所需水温、流速范围等水文特征进行归并。

3) 目标鱼类流量阈值确定。构建一维水动力学模型, 通过多工况模拟确定鱼卵漂浮对应的河道流量阈值。

4) 嘉陵江水文特征分析和鱼卵产卵生境评价。根据长系列降水数据集和水文站实测资料, 重点分析与鱼类最为相关的流量、水温等指标的多年变化情况, 计算满足鱼类产卵的最佳涨水频次, 以评价水库对嘉陵江鱼类繁殖的影响。

3.1. 评价指标体系构建

嘉陵江生活的鱼类有数百种, 需要根据研究区域和研究目的合理地评价鱼类的珍稀度。常见的评价指标可分为鱼类自身珍稀性、外界环境、人为影响等[8]。

3.1.1. 鱼类自身珍稀度指标

种群数量: 评价鱼类珍稀度的一个重要指标是种群数量, 如果某个鱼类种群数量过少, 则应在评价指标中赋予高分, 否则赋低分。鱼类种群数量反映了生态系统的健康状况, 需要考虑鱼类种群数量的现状和趋势, 对于数量下降或濒临灭绝的物种应给予更高的优先级。赋分时, 依据上述调查结果及相关文献资料分析鱼类的种群数量, 按照稀有、稀少、中等、充足、丰富程度分别赋予 5、4、3、2、1 分。

种群分布: 评价鱼类珍稀度的一个重要指标是种群分布情况, 如果某个鱼类种群分布范围狭窄, 则说明其珍稀度很高, 应在评价指标中赋予高分, 否则赋低分。赋分时, 依据调查结果和相关资料, 获得鱼类的分布地区和范围, 按照狭窄、较窄、较广、广泛的顺序分别赋予 5、4、2、1 分。

繁殖年龄: 指鱼类具有繁殖能力的年龄, 根据鱼类性成熟的年龄进行赋分优先考虑雌鱼的繁殖年龄, 繁殖年龄高强者则赋高分, 否则赋低分。按照 4 龄以上、3~4 龄、2~3 龄、1~2 龄、1 龄以下的顺序分别赋予 5、4、3、2、1 分。

繁殖方式: 根据鱼类产卵的方式划分, 一类是产漂流性卵, 另一类是产黏性卵。由于产漂流性卵的鱼类所产受精卵需要在河流中漂流一段时间后才可孵化出幼鱼, 对于栖息生境面积要求相对较大, 因此赋予高分; 另一类产黏性卵的鱼类, 对栖息生境面积要求相对较小, 因此赋予低分。按照产漂流性卵的鱼类赋 4 分、产黏性卵的鱼类赋 1 分的方案进行赋分。

稀有程度：稀有程度即该鱼类是否已经进入稀有状态，是否面临灭绝的风险。稀有鱼类应为重点保护对象，赋予高分。按照国家级保护种、珍稀种、四川省级保护种、长江上游特有种、无分类的顺序分别赋予 5、4、3、2、1 分。

3.1.2. 外界环境

外界环境方面共调查 4 个指标，结合嘉陵江的自然情况和水文变化调查信息，选取以下指标作为复选指标，并附赋分方案。

产卵场破坏：鱼类产卵场破坏可能会导致鱼类产卵场的丧失或缩小，从而影响鱼类的生存和繁殖。按照产卵场全部消失、产卵场部分消失、产卵场受损、未影响的顺序分别赋予 5、4、3、1 分。

洄游是否阻碍：梯级水库、航电工程的建设会导致鱼类的洄游受到阻碍，洄游性鱼类应在评价中赋高分，否则赋低分。对于无洄游性的鱼类，本子指标赋 1 分；生殖期有短距离洄游的鱼类，本子指标赋 3 分；对于有洄游性的鱼类，若兴建水利工程后洄游受阻，则赋 5 分。

3.1.3. 人类影响

人类影响方面共调查 5 个指标，结合嘉陵江的自然情况和实际保护政策，选取以下指标作为复选指标，并附赋分方案。

经济价值：对于经济价值显著的鱼类，应当适当保护，以提高其生存环境状况。按照经济价值高、中、低的顺序分别赋 5、3、1 分。

科研价值：根据不同目鱼类的种群丰富度评价，根据鱼类分类地位的高低进行评分，分类地位越低，分值越高。按照科研价值高、中、低的顺序分别赋 5、3、1 分。

3.1.4. 评价体系构建

根据以上指标，构建鱼类珍稀度评价方案(如表 1 所示)。

表 1. 鱼类珍稀度评价指标体系

评价指标(权重)	子指标	评分标准(分)				
		5	4	3	2	1
鱼类自身珍稀性(0.5)	种群数量	稀有	稀少	中等	充足	丰富
	种群分布	狭窄	较窄		较广	广泛
	繁殖年龄	4 龄以上	3~4 龄	2~3 龄	1~2 龄	1 龄以下
	繁殖方式	产漂流性卵			产黏性卵	
	稀有程度	国家级保护种	珍稀种	省级保护种	长江上游特有种	无
外界环境(0.2)	产卵场破坏	全部消失	部分消失	受损	受影响	未影响
	洄游受阻	是			否	
人类影响(0.3)	经济价值	重要经济鱼类		一般经济鱼类		经济价值低
	科研价值	有人工增殖		有人工驯养		无人工驯养

依靠它评价筛选出目标鱼类，确定鱼类所需的流量流速。

3.2. 一维水动力模拟

MIKE 是由 DHI 公司开发的一套软件产品，该软件包含一系列数值模型，其中包含 MIKE11。MIKE11 主要用于河口、河流、灌溉系统和其他内陆水域的水文学、水力学、水质和泥沙传输模拟。本文利用其中 HD 模块

模拟明渠河网中非恒定流。其水动力计算模型是基于垂向积分的连续性方程和动量守恒方程，即一维非恒定流圣维南方程组来模拟河流的水流状态。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0 \tag{2}$$

式中， x 、 t 分别为计算点空间和时间的坐标， A 为过水断面面积， Q 为过流流量， h 为水位， q 为旁侧入流流量， C 为谢才系数， R 为水力半径， α 为动量校正系数， g 为重力加速度。

3.3. 生态水文情势分析

采用 Mann-Kendall 非参数检验方法和 t 滑动检验法，对嘉陵江流域干流北碚站的实测流量、水温数据进行趋势和突变分析。采用水文改变指标法及建立在 IHA 基础上的变化范围法(RVA)来分析其变化过程，根据 0%~33%属于低度改变，33%~67%属于中度改变，67%~100%属于高度改变来进行评价。

4. 研究结果

4.1. 目标鱼类筛选

根据是否具有经济价值、是否具有科研价值、是否国家级保护种、是否省级保护种、是否长江上游特有种等依据，初步筛选出目标物种，缩小筛选范围(如表 2 所示)。

表 2. 候选鱼类目录

目	鱼名	入选原因
鲤形目	胭脂鱼	国家二级保护物种
	宽体沙鳅	珍稀种
	青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼	经济鱼类
	中华倒刺鲃	产卵场受损
	华鲮	产卵场受损
	细鳞裂腹鱼	国家二级保护物种
	岩原鲤	产卵场受损、四川省级保护种
鳊鲃目	鳊鲃	鳊鲃目代表物种
鲇形目	黄石爬鮡	鲇形目代表物种
鲈形目	鳊鱼	鲈形目代表物种
颌针鱼目	青鳉	颌针鱼目代表物种

依据 3.1 节构建的评价指标体系对候选鱼类进行打分，同时参考其他文献中专家权重计算综合价值，对候选鱼类进行排序，具体排序情况见如表 3。

结果表明，胭脂鱼属于一级优先保护物种，华鲮、中华倒刺鲃、岩原鲤、草鱼、鲢鱼属于二级优先保护动物，鳙鱼、细鳞裂腹鱼、鳊鱼、宽体沙鳅、青鱼、黄石爬鮡、鳊鲃、青鳉属于三级优先保护动物。

对于一级优先保护物种应首先考虑其生态需求，合理制定泄水方案等，尽可能地保护胭脂鱼的生存环境和

表 3. 复选评分结果

鱼种	鱼类自身珍稀性					得分	外界环境		得分	人类影响		得分	总分
	种群数量	种群分布	繁殖年龄	繁殖方式	稀有程度		产卵场是否破坏	洄游是否阻碍		经济价值	学术价值		
胭脂鱼	5	2	3	1	5	0.64	5	5	1	3	5	0.8	0.76
中华倒刺鲃	1	1	3	4	1	0.4	4	5	0.9	5	5	1	0.68
岩原鲤	4	1	3	1	3	0.48	4	5	0.9	3	5	0.8	0.66
草鱼	1	1	4	4	1	0.44	2	5	0.7	5	5	1	0.66
华鲮	5	1	4	1	2	0.52	4	3	0.7	3	5	0.8	0.64
鲢鱼	1	1	3	4	1	0.4	2	5	0.7	5	5	1	0.64
鳙鱼	1	1	3	4	1	0.4	2	5	0.7	5	5	1	0.64
细鳞裂腹鱼	5	2	2	4	5	0.72	4	3	0.7	1	3	0.4	0.62
鳊鱼	1	1	5	4	1	0.48	1	1	0.2	5	5	1	0.58
宽体沙鳅	4	2	3	1	4	0.56	4	1	0.5	3	1	0.4	0.5
青鱼	1	1	2	4	1	0.36	2	5	0.7	5	1	0.6	0.5
黄石爬鮡	3	2	3	1	2	0.44	4	1	0.5	3	1	0.4	0.44
鳗鲡	1	1	4	1	1	0.32	2	5	0.7	3	1	0.4	0.42
青鳉	1	1	1	1	1	0.2	1	1	0.2	1	1	0.2	0.2

生态需求。对于二级优先保护物种在制定生态调度方案时也要尽可能满足其生态需求，提供适宜其生长的生态环境。对于其他鱼类，如果能够照顾生态需求，则也应尽可能纳入考虑，但不应损害一级或二级优先保护物种的生态需求。

4.2. 目标鱼种生态需求

由表 3 可知，制定生态需求时应重点考虑胭脂鱼的生态需求，同时尽可能兼顾华鲮、中华倒刺鲃、岩原鲤及四大家鱼的生态需求。查阅相关资料可得胭脂鱼、华鲮、中华倒刺鲃、岩原鲤为产粘性卵的鱼类，在生殖繁衍时主要应考虑水温的影响，四大家鱼为产漂流性卵的鱼类，考虑水温影响的同时也应考虑流速对卵漂流的影响。胭脂鱼等鱼类对水温的需求如表 4 所示。

表 4. 各鱼类的水温需求

鱼类	水温需求
胭脂鱼	产卵水温 14℃~23℃，最适宜的水温 17℃~21℃ [18]、15℃~23℃ [19]、鱼卵孵化时长为 200 h [20]。
华鲮	产卵水温为 15℃~26℃，最适水温为 19℃~26℃ [21]。
中华倒刺鲃	产卵水温为 10℃~31℃，最适水温为 20℃~30℃ [22]，孵化时间一般为 40~45 h。
岩原鲤	岩原鲤产卵水温为 18℃~26℃，最佳产卵水温为 20℃~24℃ [23]。

四大家鱼的生态需求如表 5 所示。

其中，胭脂鱼、华鲮、岩原鲤、中华倒刺鲃的最适宜产卵温度可归并为 18℃~23℃，孵化时长为 200 h；四大家鱼的产卵最适宜温度归并为 20℃~24℃，孵化流速阈值为 0.25 m/s，孵化时长为 139 h。同时鱼类产卵还需要一般要求产卵期在保证 0.7 m/s~1.3 m/s 流速的基础上，将水流速度从水位起涨增加 0.1~0.3 m/s，最佳涨水持续时间为 4 d。

表 5. 四大家鱼的主要生态环境需求

环境因子	生态目标需求
水温	产卵最适水温为 18.7℃~27℃ [24]、20℃~24℃ [25]。
流速	同时为了保证漂流性鱼卵的漂流，需保证河段流速在 0.25 m/s 以上[26]，鱼卵孵化时长为 106~139 h [27]，最佳涨水持续时间 2~4 d。

4.3. 鱼卵漂浮流量阈值

研究河段为嘉陵江干流桐子壕航电枢纽到草街航电枢纽，包括 173 个河道断面数据。模拟河段全长 108.00 km，断面平均间距为 327.27 m，共计 330 个计算点，自上游到下游断面密度加大。其中有渠江和涪江两条支流的汇入，根据武胜和北碚站的历史流量数据可得，干支流的流量比约为 1:1.5。

下游水位边界设置为草街航电枢纽正常蓄水位，上游流量设置范围为 0~3000 m³/s，按照离散间隔为 100 m³/s 设置 30 个工况。计算结果表明，当维持全河段断面平均流速为 0.25 m/s 时，对应的河段上游流量为 1600 m³/s，见图 2。因此为满足鱼卵漂浮，河道上游的流量阈值可确定为 1600 m³/s，对应出口断面的流量阈值为 3600 m³/s。

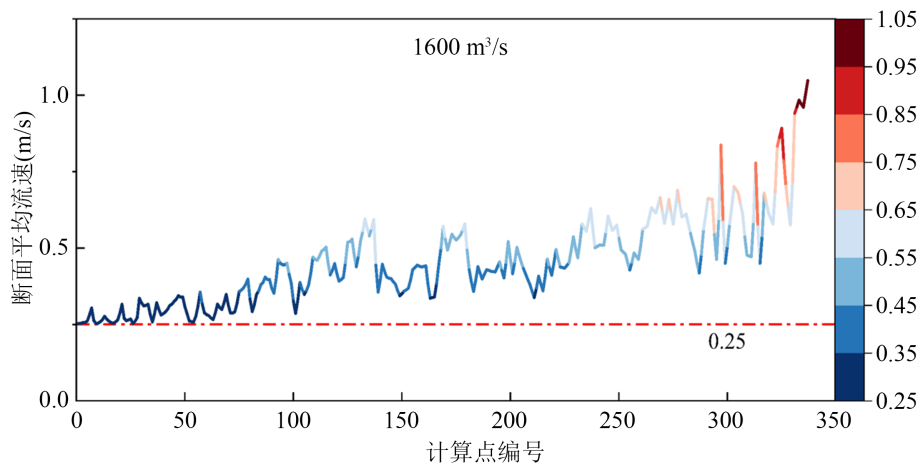


图 2. 桐子壕至草街航电枢纽各断面流速

4.4. 目标鱼类产卵生境分析

嘉陵江流域干流年均流量的 M-K 的趋势检验和突变检验结果显示，在 2000 年和 2001 年之间、2002 年和 2003 年之间、2013 和 2014 年之间、2019 年发生了突变。结合 t 滑动检验，最终认定 2013 年为年流量的突变点，通过了 90% 的显著性检验。这可能是由于长江上游流域亭子口水库在 2013 年建设完成，干流的流量更多的受到了人为调控，故发生突变。

4.4.1. 水温特征分析

嘉陵江流域干流北碚站 2003~2019 年的年内水温季节性规律如图 3，由图可知嘉陵江流域干流水温存在明显的季节分布特征，长江流域汛期 5~10 月平均水温远超多年月平均水温，且满足目标鱼类繁殖的最低水温要求，其中 5 月多年平均温度在 21℃~24℃ 之间，最适宜胭脂鱼等产粘性卵的鱼类繁殖，6 月平均水温适宜四大家鱼的繁殖，7 月多年平均气温为 26.6℃，仍然在四大家鱼的产卵范围内。由图 4 和图 5 可知，在 2013 后，月平均水温有逐年下降的趋势，且 5、6、7 月多年平均水温低于 2013 年以前。这可能是由于建坝后，水库取下层水体下泄的原因，这意味水库使得鱼类的繁殖日期向后推移，这与彭期东[28]等人的研究一致。

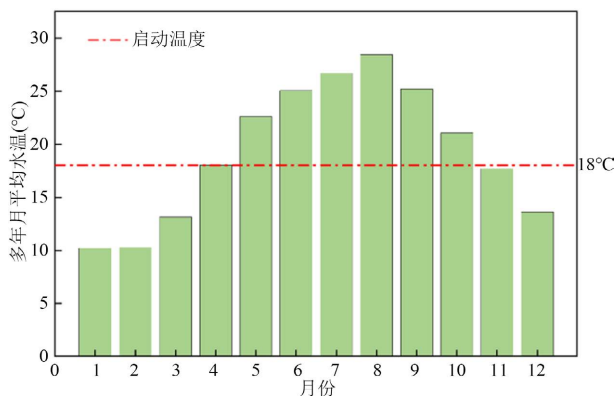


图 3. 嘉陵江干流北碚站多年月平均水温

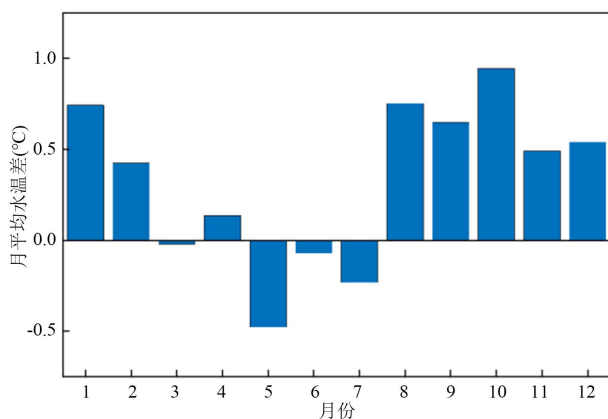


图 4. 突变后多年月平均水温变化值

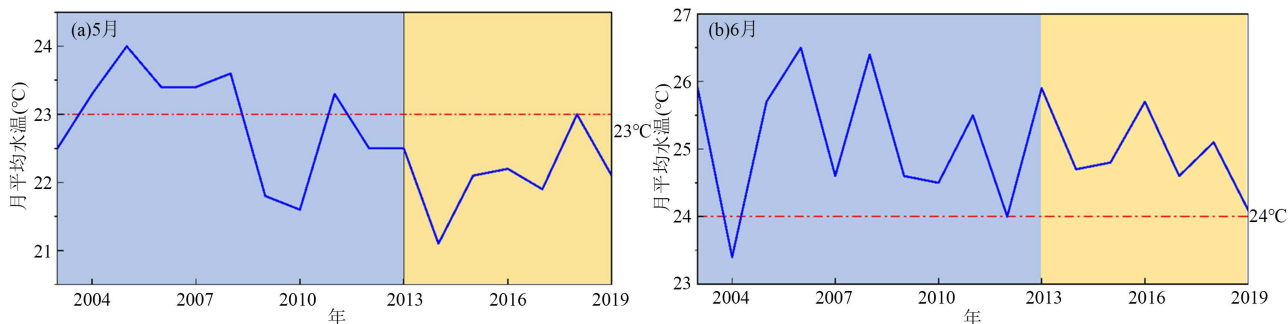


图 5. 嘉陵江干流北碚站 5、6 月平均水温多年变化情况

4.4.2. 流量特征分析

图 6 为嘉陵江水文情势改变前后，月中值流量变化，在 7~8 月的月流量中值显著低于突变前的流量，其中 7 月的水文情势改变度较高。5~6 月突变前后涨水过程差异较小。6~7 月突变后涨水过程基本消失。图 7 为突变前后每年 5~7 月持续涨水天数满足频次对比，起涨流量为 $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。突变后，涨水天数为 2 d 的频次有所增加，涨水天数为 3、4 d 的频次则显著降低，这可能是导致鱼类数量下降的主要原因之一。大坝建设增加了流域总库容，通过“蓄洪补枯”方式调节嘉陵江流量，提升了防洪效益，但同时也削弱了天然的涨水过程，不利于刺激鱼类繁殖，这将直接导致鱼类的产卵数量下降。可以结合鱼类繁殖水温需求，通过将涨水时间从 2 d 延长到 4 d，达到平均每年 0.5 次的频率，将有助于增加鱼类的产卵数量。

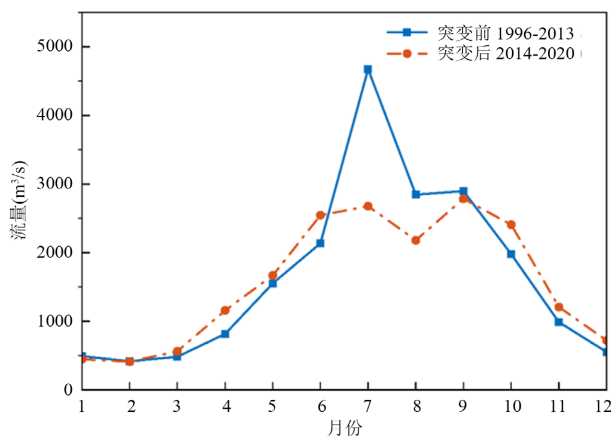


图 6. 突变前后多年月中值流量对比

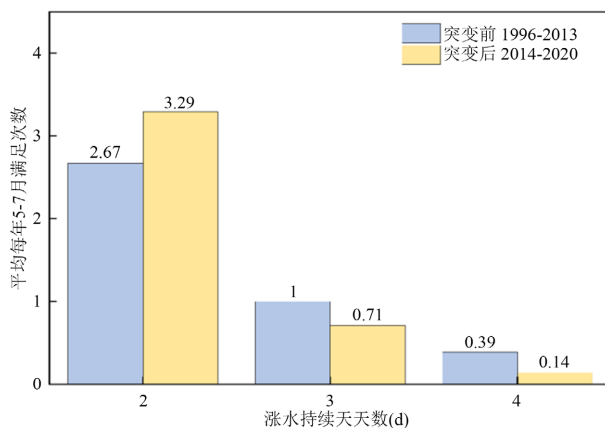


图 7. 突变前后持续涨水天数满足频次对比

5. 结论

水利工程带来巨大社会效益的同时, 不可避免地会对河流生态环境造成一定的影响。如何准确评价水库对鱼类繁殖的影响成为研究的重点。本文针对嘉陵江流域展开研究, 主要结论如下:

1) 在建立鱼类保护优先级评价体系的基础上, 将胭脂鱼、华鲮、中华倒刺鲃、岩原鲤作为产粘沉性卵鱼类的目标鱼类, 将四大家鱼作为产漂流性卵鱼类的目标鱼类。

2) 2013 年为水文情势突变年份, 建坝使得鱼类产卵期的平均温度降低, 年均最佳涨水天数频次减少, 不利于鱼类的繁殖。

3) 建议结合亭子口水库汛期调度计划, 将涨水时间从 2 d 延长至 4 d, 以更好地刺激鱼类产卵, 同时应保证鱼卵漂浮所需的下泄流量在 $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上, 使鱼卵持续漂浮 139 h。

基金项目

嘉陵江亭子口水库以下梯级联合生态调度研究(LZ-DL-2022-050)。

参考文献

- [1] 曾燊, 陈永柏, 李钟杰. 嘉陵江鱼类资源利用与保护现状[J]. 天津农业科学, 2014, 20(2): 60-62, 87.
- [2] 崔福宁, 朱迪, 卜慧, 等. 梯级水库中长期仿天然水文情势的生态流量多目标调度[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(1): 1-9.

- [3] CHENG, F., LI, W., CASTELLO, L., et al. Potential effects of dam cascade on fish: Lessons from the Yangtze River. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2015, 25: 569-585. <https://doi.org/10.1007/s11160-015-9395-9>
- [4] 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. *Science of the Total Environment*, 2021, 787: 147618. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147618>
- [5] 张启凡, 胡铁松, 戴凌全, 等. 考虑生态流量的梯级水库主从博弈优化调度研究[J/OL]. *水资源保护*, 2024: 1-14. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MTbc36RhFpStFfA3wzfYRNeAfuTIAWcJro7h4L1XrsqqgtqjPdaURh5cbhxYpfCRBFssF01k9cUJf5ts2kz1qzAjXQA3reEu5EPzKwNCY4B0Lwjfb3j6I1-Tsx8U25193C8_bFRUdf4=&uniplatform=NZKPT&flag=copy, 2024-03-02.
- [6] 林凡奇, 周研来, 薛凯元. 考虑生态流量约束的梯级水库分期消落水位多目标优化调度[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(1): 10-17.
- [7] 张登成, 樊皓, 王孟, 等. 金沙江乌东德水电站生态调度目标鱼类筛选研究[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(5): 73-82.
- [8] 潘文光, 石文良, 杨志, 等. 黄河上游茨哈峡至羊曲河段生态调度目标鱼类筛选[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(1): 120-126.
- [9] 朱挺兵, 胡飞飞, 龚进玲, 等. 澜沧江西藏段鱼类优先保护等级评价[J]. *淡水渔业*, 2021, 51(2): 40-46.
- [10] 宋一清, 成必新, 胡伟. 黑水河鱼类优先保护次序的定量分析[J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(6): 65-72.
- [11] 徐薇, 魏秘, 曹俊, 等. 耦合水文情势及鱼类繁殖的江垭水库生态调度需求研究[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(1): 103-111.
- [12] 熊斌梅, 李亚俊, 刘时城, 等. 水库生态流量核定及保障措施研究[J]. *水利水电快报*, 2024(4): 111-116.
- [13] 杨泽凡, 胡鹏, 王玉莲, 等. 鱼类产卵敏感期河流生态流速的分区分类阈值研究[J]. *水利学报*, 2024, 55(2): 190-201.
- [14] 陈进, 李清清. 三峡水库试验性运行期生态调度效果评价[J]. *长江科学院院报*, 2015(4): 1-6.
- [15] 张迪, 徐薇, 吴凡, 等. 面向产漂流性卵鱼类的三峡水库生态调度效果评价[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(1): 58-66.
- [16] 孟长青, 董子娇, 刘柯莹, 等. 嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析[J/OL]. *水利水电科技进展*, 2023: 1-14. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MTbc36RhFpSX1umINWbEOyHXV110ZYV-KeRFy4OeNE-dSL8pPNf8seErElBWGoBdf48IpmblY7M561cveMTdixOvIVV9McbeQ0Aw4BgTXHF0fKew5FW_JRAaP9I-9EK7c1cDwbPYwo0=&uniplatform=NZKPT&flag=copy, 2023-12-21.
- [17] 王欢, 刘猛. 长江上游国家级保护区珍稀特有鱼类生境需求耦合分析[J]. *能源与环境*, 2020(1): 70-71.
- [18] 刘双全, 王明建, 刘齐德, 等. 胭脂鱼苗种工厂化繁育技术研究[J]. *现代农业科技*, 2012(9): 328-330.
- [19] 张春光, 赵亚辉. 胭脂鱼的早期发育[J]. *动物学报*, 2000(4): 438-447.
- [20] 李家明, 王庆. 长江胭脂鱼人工繁殖技术总结[J]. *水产养殖*, 2007, 28(3): 15-17.
- [21] 丁磊, 顾金寿. 温度对华鲮人工繁殖的影响[J]. *科学养鱼*, 2014(11): 5.
- [22] 谢鸿伟. 中华倒刺鲃池塘养殖技术[J]. *渔业致富指南*, 2022(4): 56-58.
- [23] 虞云. 岩原鲤繁殖生物学研究综述[J]. *安徽农学通报*, 2008, 14(19): 141-142.
- [24] 任杰, 彭期冬, 林俊强, 等. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区重要鱼类繁殖生态需求[J]. *淡水渔业*, 2014(6): 18-23.
- [25] 陈永柏, 廖文根, 彭期冬, 等. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J]. *水生态学杂志*, 2009, 2(2): 130-133.
- [26] 唐明英, 黄德林, 黄立章, 等. 草、青、鲢、鳙鱼卵水力学特性试验及其在三峡库区孵化条件初步预测[J]. *水利渔业*, 1989(4): 26-30.
- [27] 林俊强, 李游坤, 刘毅, 等. 刺激鱼类自然繁殖的生态调度和适应性管理研究进展[J]. *水利学报*, 2022, 53(4): 483-495.
- [28] 彭期冬, 廖文根, 李翀, 等. 三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(S2): 228-232.