

王伟营, 章国勇, 薛联芳, 等. 水电站运行对库尾鱼类生境影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 77-89. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.007

WANG Weiying, ZHANG Guoyong, XUE Lianfang, et al. Research on the impact of hydropower plant operation on fish habitat at the reservoir tail[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 77-89. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.007

水电站运行对库尾鱼类生境影响研究

王伟营¹, 章国勇¹, 薛联芳¹, 何涛¹, 顾洪宾¹, 张巧玲²

(1. 水电水利规划设计总院, 北京 100011; 2. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:【目的】水电站运行不仅改变了下泄流量影响下游河段生境适宜性, 同时坝前水位波动将改变库尾变动回水区的生境特征。通过阐明不同来水情况下水电站运行对水电站库尾变动回水区鱼类产卵场适宜性的影响规律, 为调节性水电站鱼类繁殖期生态调度运行提供参考与借鉴。【方法】以黄河上游多年调节水电站龙羊峡运行实况监测数据为例, 以龙羊峡库尾野狐峡产卵场为鱼类保护生境, 选取河段内保护鱼类极边扁咽齿鱼为研究对象, 构建鱼类栖息地模型, 并引入加权可利用面积 *WUA* (Weighted Usable Area) 和分裂指数 *SPLIT* (Splitting Index), 定量评估鱼类繁殖期水电站调度运行方式的改变对库尾鱼类生境适宜性的影响。【结果】结果显示: 现行年内运行方式对库尾鱼类生境的影响表现为 *WUA* 先增大后减小, 产卵生境分裂指数 *SPLIT* 逐渐增大, 4月上旬至5月下旬 *WUA* 增加 74.43%, 5月下旬至6月下旬 *WUA* 减小 52.39%, 4月至6月 *SPLIT* 增加 221.94%。*WUA* 和 *SPLIT* 变化趋势不一致的原因在于, *WUA* 反映了产卵场面积的变化, 而 *SPLIT* 则反映了产卵场的整体性与碎片化程度。4月上旬至5月下旬, 流量增加和水位下降导致产卵场面积增加, 但因地形和水流变化使整体性变差, *WUA* 增加、*SPLIT* 增加; 而5月下旬至6月下旬, 随着流量进一步增加和水库运行水位抬升, 适宜产卵的区域减少且破碎化加剧, *WUA* 减小, 而 *SPLIT* 增加。【结论】结果表明: 龙羊峡年内运行显著影响 *SPLIT* 与 *WUA*, 后续开展电站生态调度运行, 可有效地改善库尾回水区鱼类产卵场的生态水文过程和水动力条件。

关键词: 水电站调度运行; 库尾回水区; 鱼类生境适宜性; 加权可利用面积; 分裂指数; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.007

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)06-0077-13



与作者互动
听语音 聊科研

Research on the impact of hydropower plant operation on fish habitat at the reservoir tail

WANG Weiying¹, ZHANG Guoyong¹, XUE Lianfang¹, HE Tao¹, GU Hongbin¹, ZHANG Qiaoling²

(1. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100011, China; 2. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: [Objective] The operation of hydropower plants not only alters the suitability of downstream river habitats through

收稿日期: 2024-09-27; 修回日期: 2024-12-10; 录用日期: 2024-12-11; 网络出版日期: 2025-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(5240091102)

作者简介: 王伟营(1983—), 男, 正高级工程师, 副主任, 博士, 主要从事水电站水生生态保护技术研究。E-mail: wangwy@creei.cn

通信作者: 章国勇(1989—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水电站生态调度技术研究。E-mail: zhanggy@creei.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

changes in discharge but also affects the habitat characteristics of the fluctuating backwater area at the reservoir tail due to water level fluctuations in front of the dam. By clarifying the effects of hydropower plant operation on the suitability of fish spawning habitats in the backwater area under different water inflow conditions, this research aims to provide a reference and guidance for ecological scheduling during fish spawning periods in regulating hydropower plants. [Methods] Using the operational data from the Longyangxia hydropower plant in the upper Yellow River as a case study, this research focused on the Yehuxia spawning ground at the reservoir tail as a fish protection habitat. *Platyharodon extremus* was selected as the target species. A fish habitat model was constructed, and the Weighted Usable Area (*WUA*) and the Splitting Index (*SPLIT*) were introduced to quantitatively assess how changes in hydropower plant scheduling affect habitat suitability during fish spawning periods. [Results] The result indicated that the current annual operational mode affected the fish habitat at the reservoir tail, with the *WUA* first increasing and then decreasing, while the *SPLIT* of the spawning habitat gradually increased. From early April to late May, the *WUA* increased by 74.43%. From late May to late June, the *WUA* decreased by 52.39%. From April to June, the *SPLIT* increased by 221.94%. The inconsistent trends of *WUA* and *SPLIT* were due to the fact that *WUA* reflected changes in the spawning habitat area, while *SPLIT* represented the integrity and fragmentation of the spawning area. From early April to late May, increases in flow and decreases in water level expanded the spawning area. However, changes in topography and flow patterns worsened the overall integrity, causing both *WUA* and *SPLIT* to increase. From late May to late June, as flow levels continued to rise and the reservoir water level increased, the suitable spawning areas shrank and became more fragmented, leading to a decrease in *WUA* and an increase in *SPLIT*. [Conclusion] The result indicate that the annual operational mode at Longyangxia significantly affects both *SPLIT* and *WUA*. Further ecological scheduling of the hydropower plant can effectively improve the ecological hydrological processes and hydrodynamic conditions of fish spawning habitats in the reservoir tail backwater area.

Keywords: hydropower plant scheduling; reservoir tail backwater area; fish habitat suitability; weighted usable area; splitting index; influencing factors

0 引言

水利枢纽工程在带来显著的经济效益和社会价值的同时,也在一定程度上重塑了河流的水文情势和流动模式,使得河流地形、水动力等环境要素发生了变化,进而破坏了河流生态系统的生物多样性和生态完整性^[1-4]。例如,银盘水电站蓄水后,乌江下游产漂流性卵鱼类产卵规模大幅下降^[5];葛洲坝水电站的调度运行使长江中、上游鱼类产卵减少^[6]。同时,由于水库的调度运行,原本连续的河流可能被分割成多个相对独立的水域,导致生境面积缩减,鱼类等水生生物的生存空间受到限制^[7-9]。党中央站在人与自然和谐共生的高度来看待经济发展与环境保护问题,强调“生态环境保护和经济发展是辩证统一、相辅相成的”^[10-11]。为了更好的维护流域的生态功能,减小水电开发的影响,我国开始在传统调度的基础上增加对生态因子的研究,尤其关注鱼类生境适宜性研究^[12-16]。

目前通过水库调度改善鱼类生境的研究多聚焦于水库下游河道,选取合适的生态流量,满足下游河道的生态及人类需水,侯俊等^[17]通过数值模拟与统计建立拉萨裸裂尻鱼产卵期栖息地适宜度模型,计算了

研究区域河段的环境流量;韩仕清等^[18]根据研究对象产卵场逐日流量资料,构建了水深、流速适宜性曲线,并采用河道内流量增加法(The Instream Flow Incremental Methodology, *IFIM*)得到水电站下泄生态流量;党莉等^[19]针对典型鱼类整个生命周期,耦合栖息地适宜性指数及水动力模型,分析了水库调节对目标物种不同生命阶段栖息地适宜性的影响。上述研究大多通过建立水动力学及栖息地模型计算生态流量。

随着生态环境保护理念不断发展完善,水电环境影响评价及批复在鱼类栖息地保护方面提出了具体要求。重点保护鱼类生境河段或营造替代生境,已成为保护珍稀鱼类资源相对可靠、有效的途径^[20-21]。随着流域梯级开发的推进,进一步压缩河道内流水河段,水库库尾河段鱼类生境的生态功能逐渐提升,但对于具有多年调节的控制性水电站,其库尾河段的水位及水文情势受电站调度运行影响较大,适宜的生境参数特征难以保证,造成河段鱼类繁殖适宜性下降,影响珍稀鱼类资源量及物种的多样性。

当前,水电站库尾河段的生境保护常常被忽视,生态调度方案的制定较少对其生境适宜性开展系统研究。部分学者对变动回水区鱼类产卵栖息地的研究主

要集中在鱼类产卵场方面, ZHANG 等^[22]分析乌东德水库蓄水后上游产卵场加权可利用面积 WUA (Weighted Usable Area); XIAO 等^[23]耦合二维水动力-泥沙运输模型和鱼类栖息地适宜性模型, 发现建坝后鱼类产卵期 WUA 仅为建坝前的 18%; 王中敏等^[24]采用一维水动力模型模拟了孤山水电站建库前后库区河段水文情势, 分析了白河、将军河河口产漂流性卵鱼类产卵场水文情势变化情况。上述研究大多未考虑调节性水电站年内调度运行下不同运行水位对于库尾变动回水区鱼类生境的影响。

以黄河上游多年调节水电站龙羊峡水库运行实况监测数据为例, 选取河段内分布的国家二级野生保护鱼类极边扁咽齿鱼为研究对象, 结合龙羊峡水库 2019—2023 年鱼类繁殖期内逐旬的流量及坝前水位变化特性统计, 构建水动力学模型及鱼类栖息地模型, 并引入加权可利用面积 WUA 和量化生态系统破碎化程度的分裂指数 $SPLIT$ (Splitting Index), 分析鱼类繁殖期水库不同运行方式对库尾鱼类生境的影响。研究成果可进一步明晰河段珍稀鱼类繁殖的需求特性

及电站调度运行生态约束, 为库尾段鱼类产卵场保护、电站生态调度方案制定提供科学支撑。

1 材料与方 法

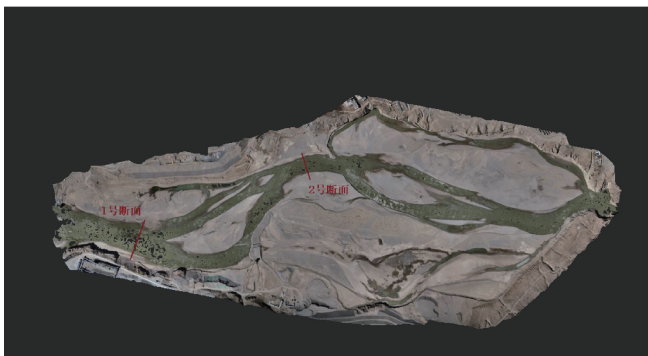
1.1 研究区域和对象

龙羊峡水库位于青海省共和县、贵南县交界处的龙羊峡峡谷。水库控制面积 13.14 万 km^2 , 占全流域面积的 16.5%, 设计多年平均流量 $650 \text{ m}^3/\text{s}$, 调节库容 193.5 亿 m^3 , 具有多年调节能力^[25]。龙羊峡水库 1978 年开工建设, 1986 年开始蓄水, 2018 年龙羊峡首次蓄水至正常蓄水位 2600 m。根据前期调查, 位于龙羊峡库尾的野狐峡上下游河段为黄河上游特有鱼类重要栖息地。

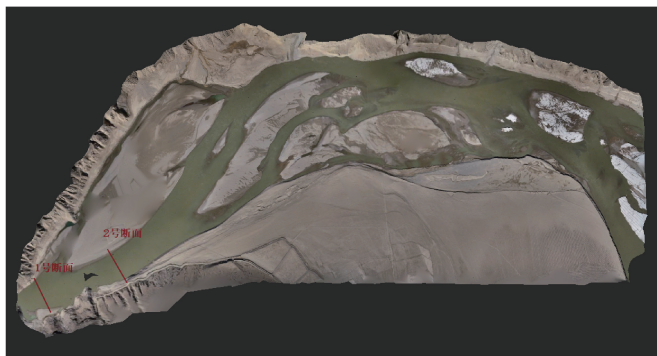
研究河段位置如图 1 所示。野狐峡上游河段地形复杂, 河段内主河槽较窄, 上游左岸及河道中心、中下游左右岸均有大面积浅滩, 下游出口处为野狐峡, 水流收窄, 在大流量时形成明显壅水。野狐峡下游区域浅滩众多, 水流复杂, 河岸局部具有突出石梁等要素, 可形成局部回水。



(a) 研究区域相对龙羊峡位置分布



(b) 野狐峡上游地形



(c) 野狐峡下游地形

图 1 研究河段位置

Fig. 1 Location of the research river section

鱼类繁殖是其生命周期中的重要环节, 繁殖期的生境条件对鱼类产卵具有较大影响。根据黄河上游土著鱼类种群分布及保护等级, 选取国家二级野生保护鱼类极边扁咽齿鱼 (*Platyharodon extremus*) 为研究对象。

极边扁咽齿鱼属鲤形目、鲤科、裂腹鱼亚科, 为我国特有的单型属种, 仅分布在黄河上游高原的宽谷河段, 属高寒地带生活的种类^[26-27]。极边扁咽齿鱼4月至6月集中产卵, 产卵场多位于水深1 m以内, 缓流、水质清澈、沙砾底质的水域^[28]。根据野外调查及资料收集, 野狐峡上下游是极边扁咽齿鱼的天然产卵场, 研究龙羊峡水电站运行对库尾鱼类生境的影响对于促进河流生态系统的健康和可持续发展具有重要意义。

1.2 数据和方法

1.2.1 研究方法

1.2.1.1 水动力学模型

水动力学模型采用丹麦水力研究所开发的MIKE21模型^[29], 控制方程组包括连续性方程和 x 、 y 方向动量方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu^2}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial y} = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \\ \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv^2}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} = -fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \\ \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中, t 为时间 (s); x 、 y 为笛卡尔坐标系坐标; η 为水位 (m); d 为静止水深 (m); h 为总水深 (m), $h = \eta + d$ (m); u 、 v 为 x 、 y 方向上的速度分量 (m/s); f 为 Coriolis 系数 (s^{-1}), $f = 2\omega \sin \varphi$, ω 为地球自转角速度, φ 为所在地纬度; g 为重力加速度 (m/s^2); ρ 为水的密度 (kg/m^3); s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yy} 为辐射应力分量; S 为源汇项 ($kg \cdot m^3 \cdot s^{-1}$); P_a 为大气压强 (kPa); T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 为水平黏滞应力 (Pa); u_s 、 v_s 为源汇项不同方向的水流速度 (m/s)。

为验证模型的准确性, 分别在野狐峡上游和野狐峡下游布置了4条验证断面, 断面位置如图1所示。

采用多普勒测量仪 (ADCP) 测量断面流速 V 、水深 H 。模拟值与实测值对比如图2所示, 流速的均方误差及平均绝对误差分别为 0.54%、6.18%, 水深的均方误差及平均绝对误差分别为 0.45%、5.6%, 表明模型可以较好的模拟研究区域的水流状态。

1.2.1.2 栖息地模型

采用栖息地适宜性指数 HSI (Habitat Suitability Indices) 量化环境因子对鱼类栖息地适宜性的影响^[30], 通过范围 $[0, 1]$ 的数值描述对象对栖息地的适宜程度, 0 表示完全不适宜, 1 表示完全适宜。栖息地适宜性指数计算公式为

$$HSI_i = V_i \times D_i \times C_i \quad (4)$$

式中, HSI_i 为每个单元栖息地适宜性指数; i 为划分的单元数; V_i 为流速适宜性指数; D_i 为水深适宜性指数; C_i 为基质和覆盖物适宜性指数。

选择流速、水深作为环境因子, 产卵繁殖期适宜性曲线如图3所示, 极边扁咽齿鱼产卵适宜水深范围为 0.5~2.4 m, 其中最适宜水深为 0.8~1.7 m; 产卵适宜流速为 0.15~0.8 m/s, 其中最适宜流速为 0.2~0.4 m/s^[31]。

1.2.1.3 生境评价指标

采用加权可利用面积 WUA (Weighted Usable Area) 反映河段中研究对象的生境面积^[32], 计算公式为

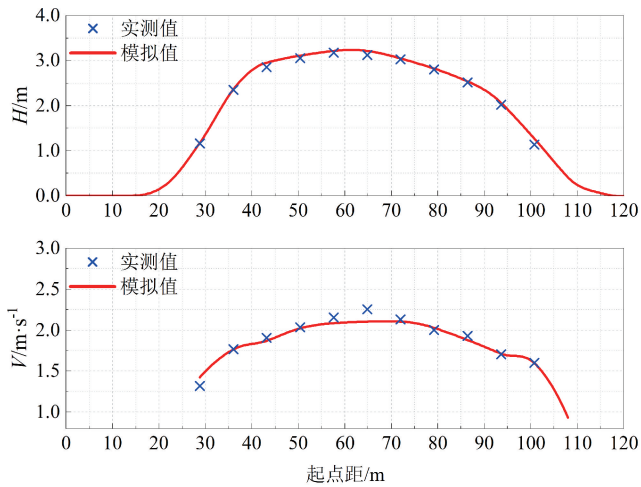
$$WUA = \sum_{i=1}^n HSI_i \times A_i \quad (5)$$

式中, A_i 为每个单元的水平面积 (m^2); HSI_i 为每个单元栖息地适宜性指数。

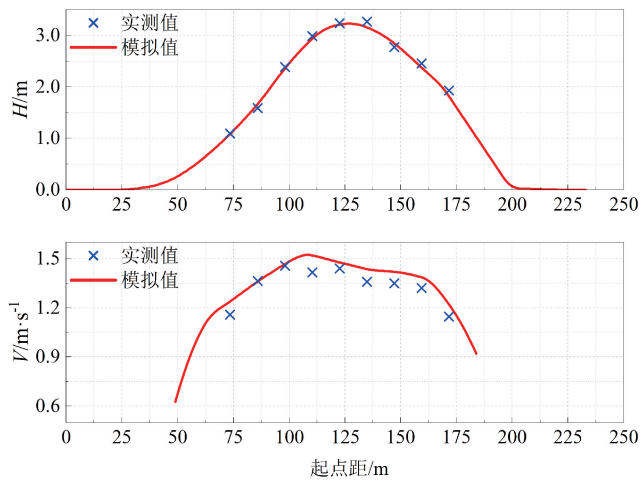
采用分裂指数 $SPLIT$ (Splitting Index) 反映河段中研究对象的生境空间分布情况。分裂指数是景观生态学中的一个量化生态系统破碎化的指标, 用于衡量景观中斑块间破碎程度^[33]。分裂指数由总斑块面积的平方与各个子斑块面积的平方求和相比得到, 涵盖子斑块的数量多少和面积大小, 描述斑块间的破碎化程度。分裂指数越高, 表示极边扁咽齿鱼产卵场面积越破碎, 对于鱼类繁殖越不利。分裂指数的计算过程如图4所示: 首先根据极边扁咽齿鱼产卵适宜性分布绘制适宜性云图; 然后对云图进行二值化处理; 之后进行产卵场斑块识别, 进而计算各个子斑块的面积, 最后根据识别结果计算 $SPLIT$ 。

分裂指数的计算公式为

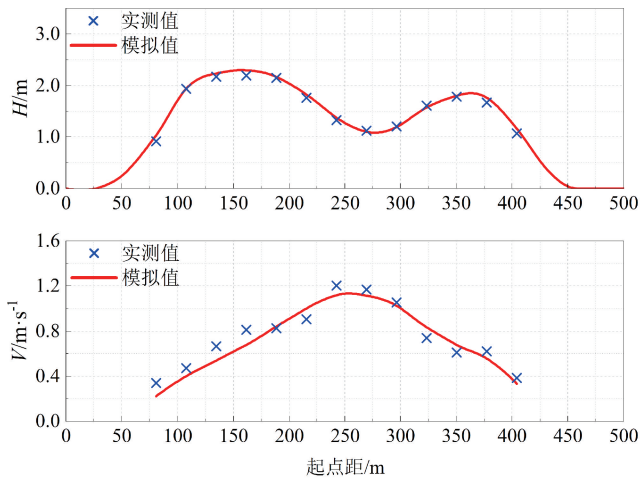
$$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (6)$$



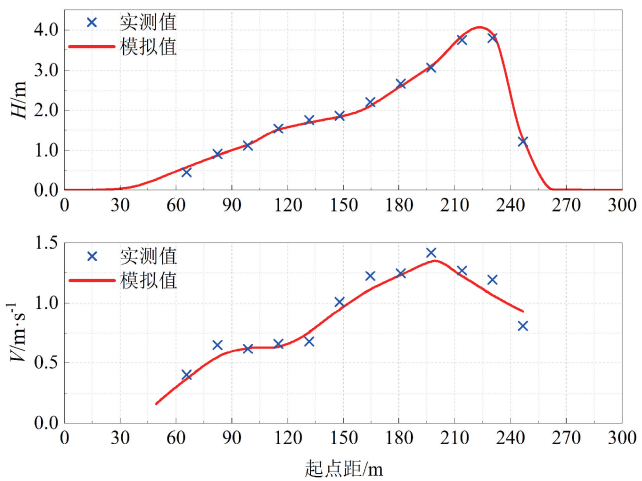
(a) 断面1模拟值与实测值对比



(b) 断面2模拟值与实测值对比



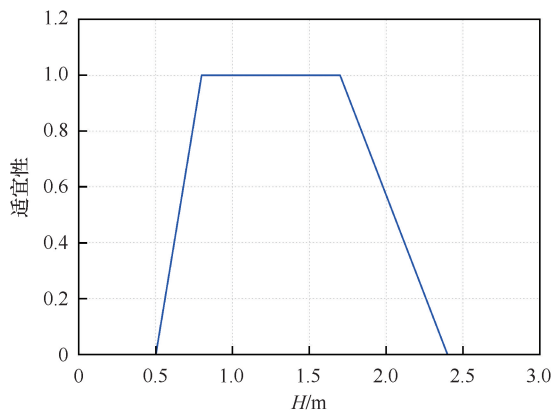
(c) 断面3模拟值与实测值对比



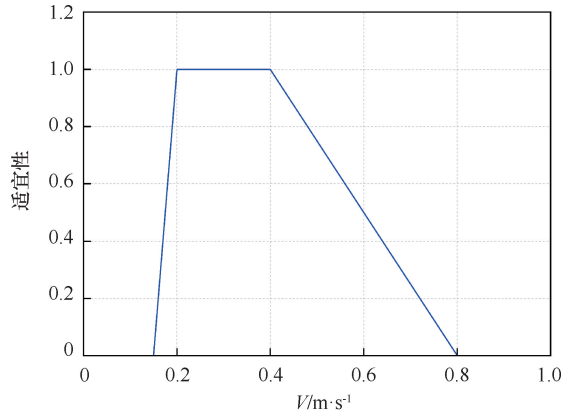
(d) 断面4模拟值与实测值对比

图2 模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured values



(a) 水深适宜性曲线



(b) 流速适宜性曲线

图3 极边扁咽齿鱼适宜性曲线

Fig. 3 Suitability curves for *Platyharodon extremus*

$$A = \sum_{i=1}^n a_i \quad (7)$$

式中, *SPLIT* 为分裂指数; *A* 为总斑块面积, 即极边扁咽齿鱼产卵场各个子斑块面积总和(m^2); a_i 为第 *i*

个子斑块面积(m^2); *n* 为极边扁咽齿鱼产卵场子斑块个数。

1.2.1.4 偏相关系数

采用偏相关系数^[34-35]描述入库流量、坝前水位

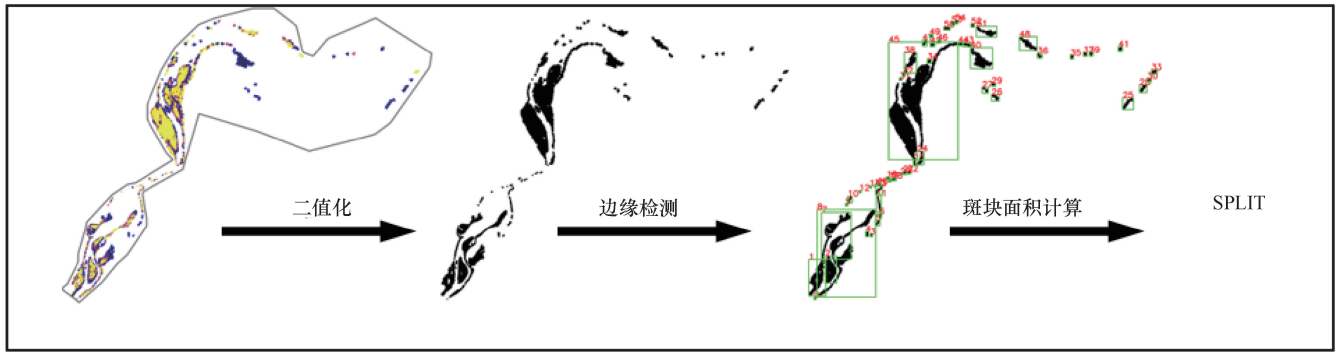


图4 分裂指数计算过程

Fig. 4 Splitting index calculation process

与 WUA 、 $SPLIT$ 间的相关程度, 偏相关系数计算方法为

$$r_{XY(Z)} = \frac{r_{XY} - r_{XZ}r_{YZ}}{\sqrt{1 - r_{XZ}^2} \sqrt{1 - r_{YZ}^2}} \quad (8)$$

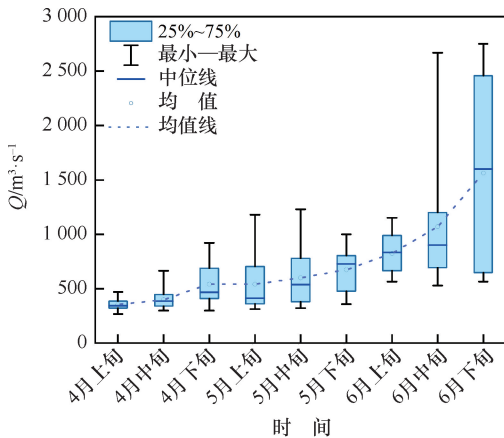
式中, r_{XY} 、 r_{XZ} 、 r_{YZ} 分别为 X 和 Y 、 X 和 Z 、 Y 和 Z 之间的简单相关系数, 其计算公式为

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (9)$$

式中, X_i 和 Y_i 分别表示第 i 个样本 X 和 Y 的值; \bar{X} 和 \bar{Y} 分别表示所有样本 X 和 Y 平均值。

1.2.2 研究数据

水动力学模型和鱼类栖息地模型构建采用的地形数据为 2023 年 3 月实测数据, 水上地形采用激光雷达扫描测量, 水下地形采用 ADCP 测量。模型验证采用的断面流速、水深分布为地形测量时同步测量。水文分析使用的流量、水位数据为水利部黄河委员会网站 (<http://www.yrcc.gov.cn/>) 获取的龙羊峡水库



1990—2023 年逐日入库流量、坝前水位数据。

2 结果与讨论

2.1 龙羊峡逐旬入库流量、水位

图 5 为龙羊峡水库首次蓄水至正常蓄水位以来, 鱼类繁殖期内 (2019—2023 年, 年内 4—6 月) 龙羊峡水库逐旬平均入库流量 Q 及坝前水位 H 统计。在鱼类繁殖期内, 最大流量出现在 6 月下旬, 为 $1563.8 \text{ m}^3/\text{s}$; 最小流量出现在 4 月上旬, 为 $352.58 \text{ m}^3/\text{s}$; 最高水位出现在 4 月上旬, 为 2589.69 m ; 最低水位出现在 5 月下旬, 为 2586.62 m 。入库流量整体呈现上涨趋势, 水库水位整体呈现先下降后上升趋势, 汛前的 4 月到 5 月水位逐渐降低, 电站腾出库容以应对汛期洪水。

2.2 鱼类繁殖期适宜性分布

根据龙羊峡水库逐旬入库流量、水位统计, 以各旬平均入库流量、坝前水位为边界条件, 计算极边扁咽齿鱼产卵场分布如图 6 所示, 图中黄色表示高适宜度区域, 红色表示中等适宜度区域, 蓝色表示低适宜度区域, 无色区域无适宜度。

4 月上旬至 5 月下旬, 鱼类繁殖期适宜性面积逐

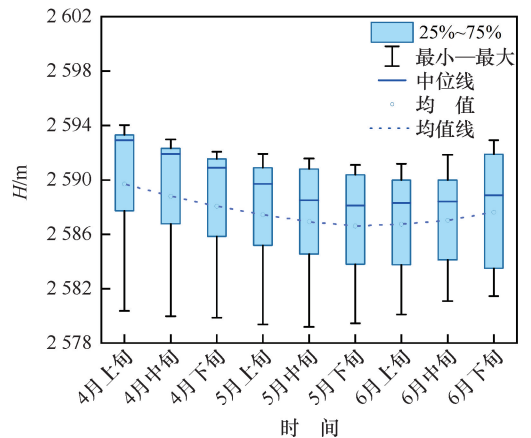


图5 2019—2023 年入库流量及坝前水位变化统计

Fig. 5 Statistics of inflow volume and water level changes from 2019 to 2023

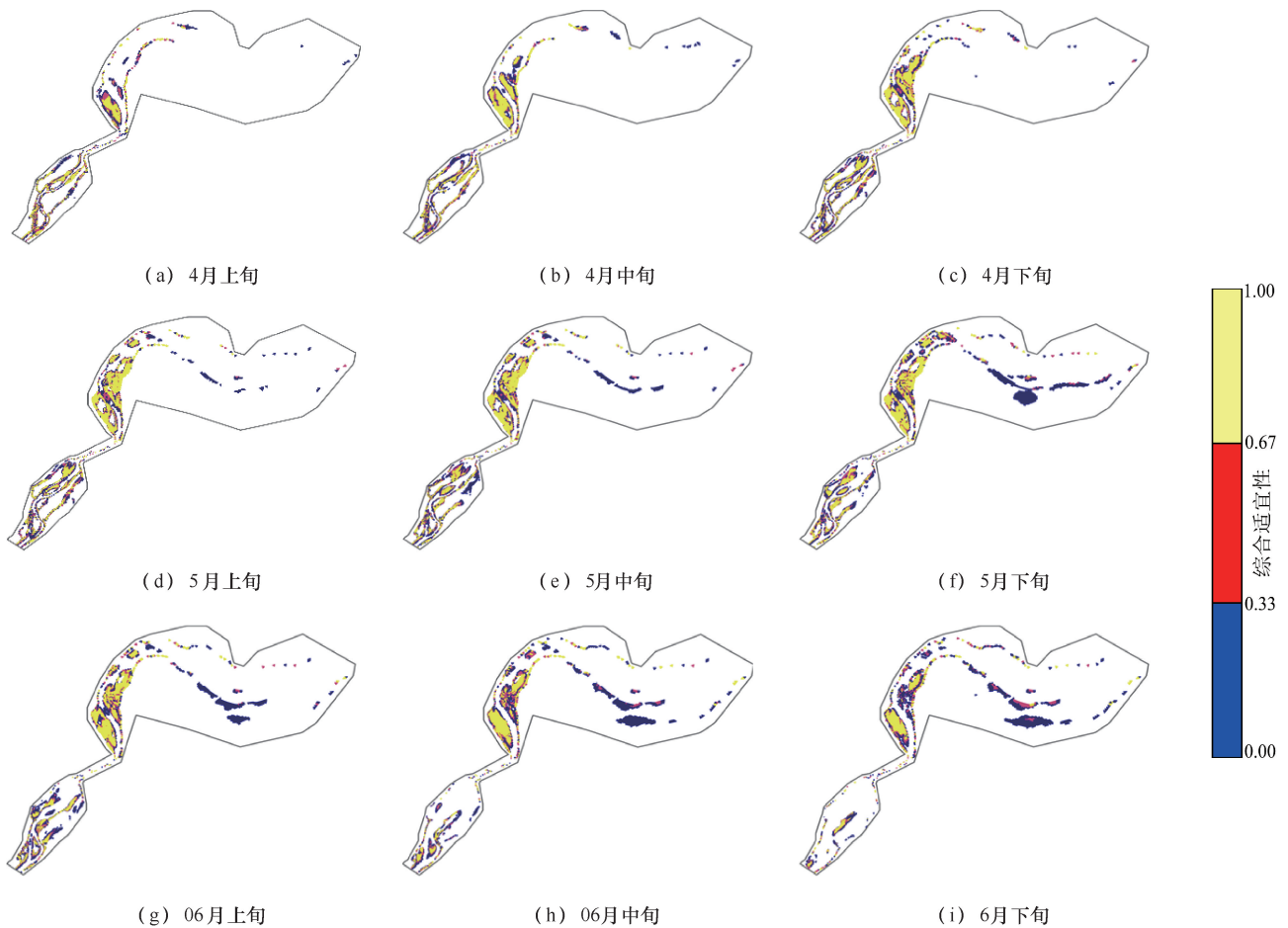


图6 产卵期适宜度指数分布

Fig. 6 Spawning period suitability index distribution

渐增大, 在5月下旬达到最大值, 此时入库流量及坝前水位分别为 $673.76 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 2586.62 m , 鱼类繁殖期适宜性分布主要在野狐峡上游主河道两侧浅滩以及野狐峡下游河道左岸滩地。5月下旬至6月下旬, 鱼类繁殖期适宜性逐渐降低, 在6月下旬达到最小值, 此时入库流量及坝前水位分别为 $2587.62 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 1563.58 m , 随着流量的增大, 野狐峡峡口上游区域壅水, 导致上游河道的大部分产卵场淹没, 鱼类繁殖期适宜性分布主要在野狐峡下游河道左岸滩地。

2.3 水电调度运行下 *WUA*、*SPLIT* 指标变化

WUA 由每个计算单元内适宜性值对所有计算单元面积加权求和计算得出, 反映整个研究区域内的产卵场面积情况; *SPLIT* 由产卵场总斑块面积的平方与各个子斑块面积的平方和相比得到, 考虑了子斑块的数量多少和面积大小, 描述产卵场的破碎化程度。

图7为研究区域内 *WUA* 和 *SPLIT* 逐旬变化。*WUA* 整体先增加后减小、*SPLIT* 整体增大的趋势。

4月上旬, 平均来流量较小, 同时水库运行水位

较高, 水流主要聚集于主河道, 极边扁咽齿鱼的产卵场主要分布在野狐峡上游的主河道及野狐峡下游水库未被回水淹没的小区域流水河段, 此时极边扁咽齿鱼的产卵场整体性较好。

4月上旬至5月下旬, *WUA*、*SPLIT* 增加幅度分别为 74.43% 、 36.96% 。*WUA*、*SPLIT* 变化的主要原因为: 随着来流量增加, 野狐峡峡口较窄导致上游小幅度壅水, 淹没了野狐峡上游主河道两侧的浅滩区域, 由于壅水程度较小, 主河道两侧浅滩区域流速、水深较为适宜, 野狐峡上游主河道两侧大面积的浅滩区域形成了新的产卵场; 同时龙羊峡水库运行水位下降, 野狐峡下游流水河段延长, 延长的流水河段流速、水深条件适宜, 产卵场面积增加, 导致 *WUA* 增加, 但由于流水河段产卵场因地形分割整体性变差, 破碎化程度提高, 导致 *SPLIT* 增加。

5月下旬至6月下旬, *WUA* 减少幅度为 52.39% , *SPLIT* 增加幅度为 89.98% 。*WUA*、*SPLIT* 变化的主要原因为: 来流量进一步增加, 野狐峡峡口较窄导致上

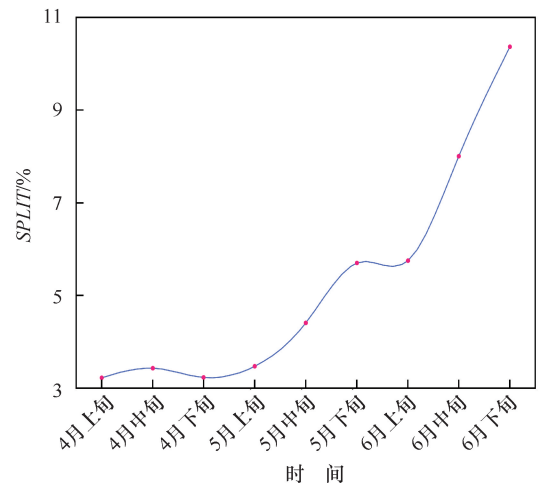
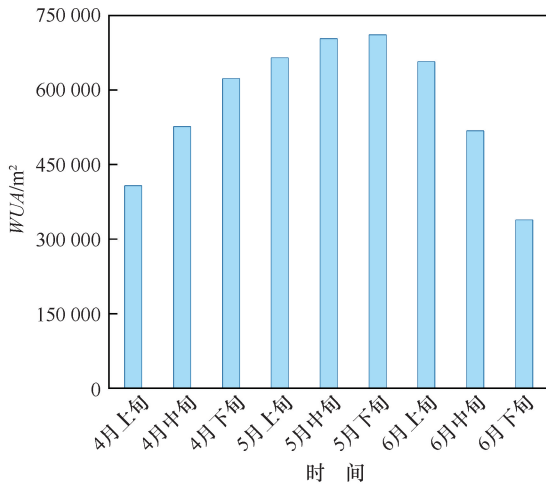


图7 年内 WUA、SPLIT 变化过程

Fig. 7 Annual WUA and SPLIT variation process

游壅水明显, 野狐峡上游来水淹没的浅滩区域水深增加、流速增大, 大部分的区域不再具有适宜性, 只有零碎分布的小部分产卵场, 导致 WUA 减小、SPLIT 增加; 同时龙羊峡水库运行水位抬升, 野狐峡下游被龙羊峡水库回水淹没区域增加, 适宜产卵的流水河段面积减小, 且由于地形分割产卵场整体性变差, 也导致 WUA 减小、SPLIT 增加。

综合 WUA 和 SPLIT 指标, 龙羊峡水库运行在 4 月上旬至 5 月上旬造成 WUA 持续增长, 同时增长幅度较大, SPLIT 小幅度增加, 研究区域内鱼类产卵适宜性整体改善; 5 月上旬至 5 月下旬, 龙羊峡水库运行造成 WUA 继续增长, 但增加幅度较小, SPLIT 较大幅度增加, 研究区域内鱼类产卵场面积增大, 但其空间分布格局开始恶化; 5 月下旬至 6 月下旬, 龙羊峡水库运行造成 WUA 快速减少, 同时, SPLIT 大幅度增加, 研究区域内鱼类产卵适宜性恶化。

假定无龙羊峡水库时, 即采用天然河道流量-水位关系曲线设置模型下游出口边界水位条件进行鱼类

栖息地模拟时, 计算得到假定无龙羊峡水库影响时的 WUA 和 SPLIT。对比龙羊峡水库现行运行情况下与假定无龙羊峡水库时的 WUA 和 SPLIT(见表 1)。

龙羊峡现行运行情况相对无龙羊峡水库时, WUA 平均减小 22.02%, SPLIT 平均增加 6.74%。其中, WUA 最大变化发生在 4 月上旬, 变化幅度 -44.95%, SPLIT 最大变化发生在 4 月中旬, 变化幅度 20.67%。在 4 月下旬和 6 月上旬 SPLIT 相对减小, 这是由于龙羊峡水库回水淹没了原本位于下游区域的小面积产卵场斑块, 碎片化斑块数量减小, 造成 SPLIT 减小。

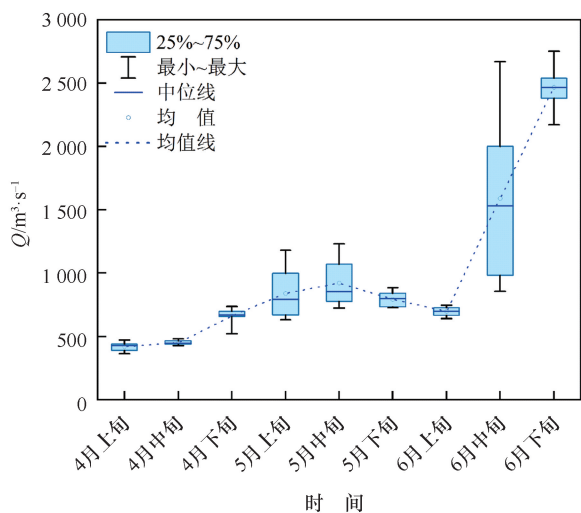
2.4 不同来水条件下 WUA、SPLIT 指标的差异

采用黄河上游 1990—2023 年调节水电站龙羊峡运行实况监测数据, 对龙羊峡水电站多年来的径流数据进行频率统计和分析, 选择频率 $P=20%$ 为偏丰水年、 $P=50%$ 为平水年、 $P=70%$ 偏枯水年, 对应 2020 年、2021 年和 2022 年分别为偏丰水年、平水年和偏枯水年。逐旬分析各水平年日平均流量, 得到不同水平年鱼类繁殖期逐旬平均流量及水位统计如图 8 所示。

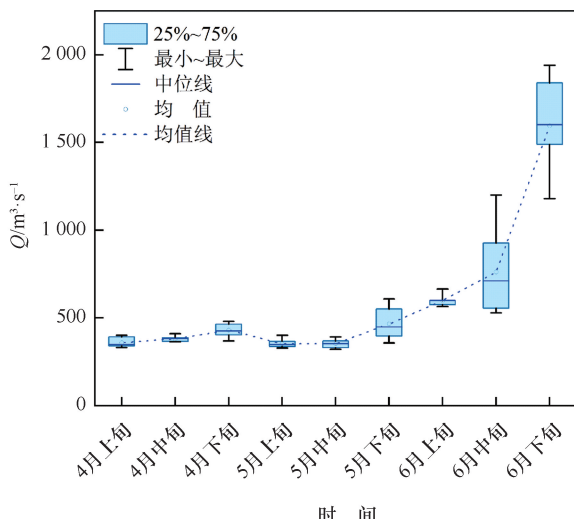
表 1 龙羊峡水位对鱼类产卵繁殖期 WUA、SPLIT 影响

Table 1 Impact of water level on WUA and SPLIT during fish spawning period at Longyangxia

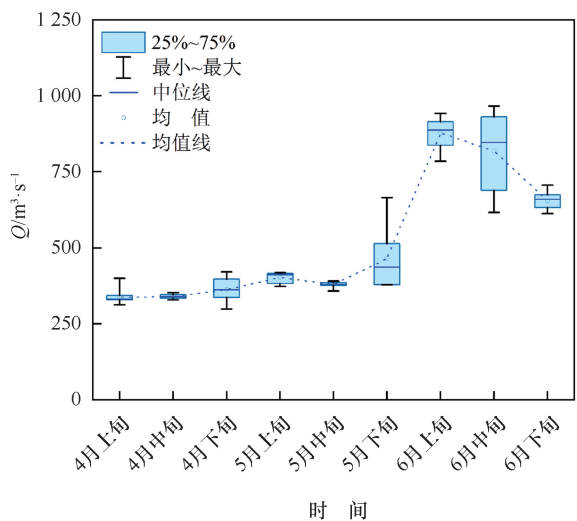
时 间	龙羊峡水库现行运行情况		假定无龙羊峡水库情况		变 幅	
	SPLIT	WUA/m ²	SPLIT	WUA/m ²	SPLIT/%	WUA/%
4 月上旬	3.222	407 779.027	2.764	740 685.136	16.57	-44.95
4 月中旬	3.433	526 422.637	2.845	773 165.396	20.67	-31.91
4 月下旬	3.299	623 543.958	3.440	826 161.394	-4.10	-24.53
5 月上旬	3.476	665 204.411	3.457	826 267.235	0.55	-19.49
5 月中旬	4.413	703 377.750	4.228	831 183.691	4.38	-15.38
5 月下旬	5.700	711 273.326	4.784	817 072.746	19.15	-12.95
6 月上旬	5.755	657 284.268	6.208	758 028.565	-7.30	-13.29
6 月中旬	8.007	518 187.846	8.323	616 097.342	-3.80	-15.89
6 月下旬	10.373	338 657.114	9.059	422 454.754	14.50	-19.84



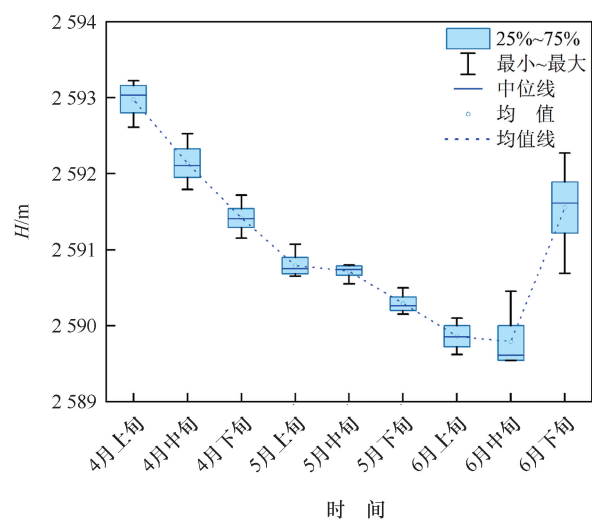
(a) 偏丰水年



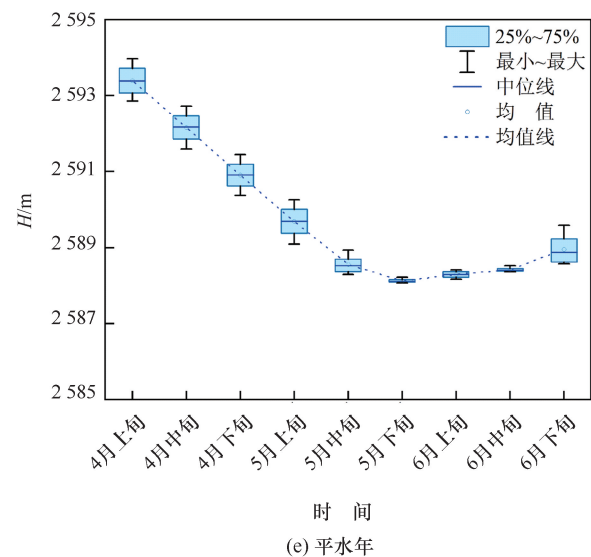
(b) 平水年



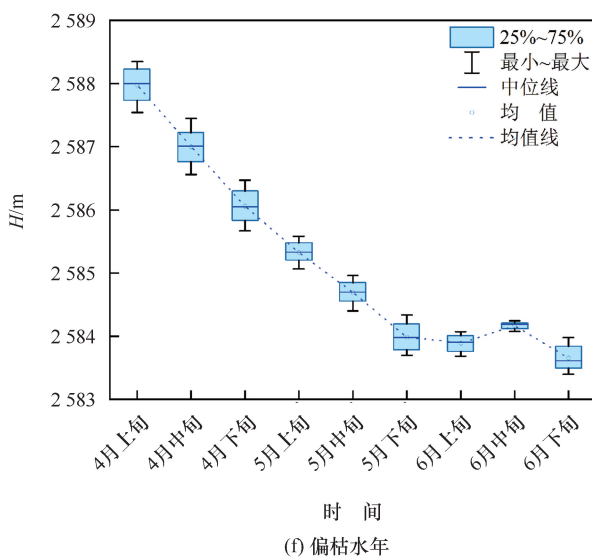
(c) 偏枯水年



(d) 偏丰水年



(e) 平水年



(f) 偏枯水年

图 8 不同水平年入库流量及坝前水位

Fig. 8 Annual inflow volume and water level at different levels

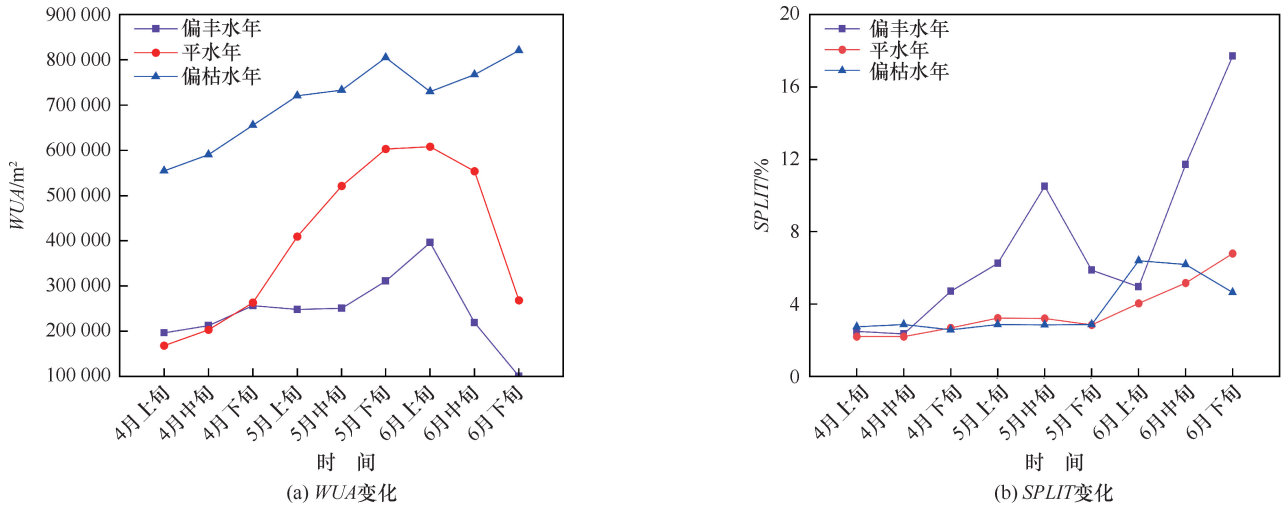


图9 不同水平年 WUA、SPLIT 变化

Fig. 9 Variation of WUA and SPLIT in years of different water levels

不同水平年极边扁咽齿鱼4月—6月产卵生境指标的变化如图9所示。不同水平年间WUA差异较大,偏枯水年WUA整体呈现逐渐增大的趋势,偏丰水年与平水年WUA呈现先增大后减小的趋势。偏丰水年、平水年及偏枯水年的最大WUA分别出现在6月上旬、6月上旬和6月下旬,对应的WUA分别为395 986 m²、608 671 m²和820 770 m²;偏丰水年、平水年及偏枯水年的平均WUA分别为243 578 m²、399 865 m²和708 631 m²。

偏丰水年与平水年、偏枯水年SPLIT之间差异较大,偏丰水年SPLIT呈现先增大后减小再增大的趋势;平水年SPLIT整体呈现逐渐增大的趋势;偏枯水年SPLIT呈现先增大后减小的趋势,同时变化较小。偏丰水年、平水年及偏枯水年的最小SPLIT分别出现4月中旬、4月上旬和4月上旬,对应的SPLIT分别为2.34、2.21和2.75;偏丰水年、平水年及偏枯水年的平均SPLIT分别为7.4、3.6和3.79。

偏枯水年WUA最大,偏丰水年和平水年WUA分别为偏枯水年的34%、56%;平水年SPLIT最小,偏丰水年和偏枯水年SPLIT分别为平水年的2.06倍、1.05倍。

2.5 评价指标的偏相关性分析

分别对WUA、SPLIT和入库流量、坝前水位进行相关性分析结果如表2所列。在控制入库流量时,坝前水位与SPLIT之间偏相关性系数为-0.05, P值为0.95,表明研究区域内坝前水位的变化对于鱼类产卵场的破碎化程度没有直接的线性相关关系;坝前水位与WUA之间偏相关性系数为-0.98, P值<0.000 1,表明两者具有较强的负相关关系,即在入库流量保持恒

定的情况下,坝前水位上升会导致鱼类产卵场面积减小。

表2 评价指标偏相关性分析

Table 2 Correlation analysis of evaluation indicators

变量1	变量2	控制变量	偏相关性系数	P 值
H	SPLIT	Q	-0.050 66	0.950 517
Q	SPLIT	H	0.971 91	<0.000 1
H	WUA	Q	-0.983 65	<0.000 1
Q	WUA	H	-0.979 26	<0.000 1

注: Q 为龙羊峡入库流量; H 为龙羊峡坝前水位

当控制坝前水位时,入库流量与SPLIT之间偏相关性系数为0.97, P值<0.000 1,表明两者具有较强的正相关关系,即在坝前水位保持恒定的情况下,入库流量的增加会显著加剧鱼类产卵场的破碎化程度;入库流量与WUA之间偏相关性系数为-0.98, P值<0.000 1,表明两者具有较强负相关关系,即在坝前水位保持稳定的情况下,入库流量的增加会导致鱼类产卵场面积减小。

2.6 水库生态运行建议

龙羊峡库尾是黄河上游重要的鱼类产卵河段,在不同来水条件下,龙羊峡调度运行会对库尾变动回水区的水动力条件产生显著影响,进而影响该区域鱼类产卵适宜性。4月上旬至5月下旬,流量增大、水库运行水位降低使得研究区域的流速、水深更加适宜极边扁咽齿鱼产卵,此时WUA最大、SPLIT增幅36.96%,SPLIT增幅相对缓慢;5月下旬至6月下旬,来流量进一步增大,水库运行水位抬升,研究区域的流速、水深满足极边扁咽齿鱼产卵条件的区域大大压缩,且适宜产卵的区域破碎化程度加剧。

因此, 在5月下旬至6月下旬, 可在一定范围内通过生态调度控制水库运行水位抬升, 降低龙羊峡水库回水对研究区域的影响作用, 提高极边扁咽齿鱼产卵场面积。

2.7 研究局限与展望

在构建鱼类栖息地模型时, 考虑了流速、水深两个关键生境因子, 缺乏对水温、溶解氧、水质等其他生境因子的考虑; 此外, 基于龙羊峡水库首次蓄水至正常蓄水位以来实测入库流量及坝前水位数据, 探究水库运行对极边扁咽齿鱼产卵生境的影响, 但由于龙羊峡水库首次蓄水至正常蓄水位后, 高水位运行的年份较少, 数据有限, 难以全面反映不同来水情况下的水库运行方式, 进而难以全面反映其对极边扁咽齿鱼产卵场的影响。

在后续研究中需要考虑更多的生境因子及时空范围, 深入探究水电站调度运行对不同生境因子(水温、溶解氧、水质等)的影响, 及如何进一步影响鱼类生境, 以更全面地评估水电站调度运行对鱼类生境的影响情况。

3 结论

以实测的龙羊峡入库流量及坝前水位为边界条件, 探究龙羊峡年内调度运行对库尾鱼类生境适宜性影响, 结论如下:

(1) 龙羊峡水电站年内调度运行对库尾鱼类生境的影响表现为 *WUA* 先增大后减小, *SPLIT* 逐渐增大。4月上旬至5月下旬 *WUA* 逐渐增加, 增加 74.43%, 5月下旬至6月下旬 *WUA* 逐渐减小, 减小 52.39%; 4月上旬至6月下旬 *SPLIT* 逐渐增加, 增加 221.94%。

(2) 对比龙羊峡水库现行运行情况与无龙羊峡水库时, 龙羊峡水库现行运行情况下极边扁咽齿鱼产卵生境 *WUA* 平均减小 22.06%, *SPLIT* 平均增加 6.74%, 即极边扁咽齿鱼产卵场面积减小且破碎化程度增加。

(3) 龙羊峡运行水位显著影响 *WUA* 指标, 偏相关系数为 -0.98, 具有较强的负相关关系; 龙羊峡入库流量显著影响 *SPLIT* 与 *WUA*, 偏相关系数分别为 0.97、-0.97, 龙羊峡入库流量与 *SPLIT* 具有较强的正相关关系, 与 *WUA* 具有较强的负相关关系。相关性的显著性水平均小于 0.000 1, 可靠性较强。

参考文献 (References):

[1] FARÒ D, WOLTER C. Linking functional habitat and fish population

dynamics modeling to improve river rehabilitation planning and assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 12233.

[2] 林育青, 马君秀, 陈求稳. 拆坝对河流生态系统的影响及评估方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 9-15.

LIN Y Q, MA J X, CHEN Q W. Research on effects of dam removal on river ecosystem and review of its assessment methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5): 9-15.

[3] CARRASQUILLA-HENAO M, RUEDA M, JUANES F. Fish habitat use in a Caribbean mangrove lagoon system[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2022, 278: 108090.

[4] 赵新磊, 李姝蕾, 尚文绣. 龙羊峡和刘家峡梯级水库生态流量核定与保障[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 473-481.

ZHAO X L, LI S L, SHANG W X. Ecological flow assessment and guarantee of Longyangxia and Liujiaxia cascade reservoirs[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 473-481.

[5] 徐薇, 杨志, 万力, 等. 银盘电站蓄水前后乌江下游产漂流性卵鱼类自然繁殖变化[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(6): 8-15.

XU W, YANG Z, WAN L, et al. Natural reproduction status of fish species producing pelagic eggs before and after impoundment of Yinpan Hydropower Station in the lower Wujiang River[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(6): 8-15.

[6] 刘乐和. 长江葛洲坝水利枢纽兴建后对中、上游主要经济鱼类影响的综合评价[J]. 淡水渔业, 1991(3): 3-7.

LIU L H. Comprehensive evaluation of the impact of the construction of the Gezhouba Dam water reservoirs of the Yangtze River on major economic fish species in the middle and upper reaches of the river [J]. Freshwater Fisheries, 1991(3): 3-7.

[7] 鲁芸, 吴紫涵, 刘清园, 等. 基于鱼类产卵需求的栖息地修复效果评价[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 733-741.

LU Y, WU Z H, LIU Q Y, et al. Evaluation of habitat restoration effect based on fish spawning requirements [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 733-741.

[8] GUO L, LI G, ZHANG Q, et al. Study on the key ecological factors for the reproduction of *Gymnocypris eckloni* in the upper reaches of the Yellow River [J]. Ecology and Evolution, 2024, 14(8): e70202.

[9] YI Y, LIN C, WANG W, et al. Habitat and seasonal variations in bacterial community structure and diversity in sediments of a shallow lake[J]. Ecological Indicators, 2021, 120: 106959.

[10] HE W, JIANG A, ZHANG J, et al. Reservoir optimization operation considering regulating temperature stratification for a deep reservoir in early flood season[J]. Journal of Hydrology, 2022, 604: 127253.

[11] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话 [J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.

LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into

- a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(1): 1-10.
- [12] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在2023年全国水利工作会议上的讲话[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(1): 1-11.
- LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(1): 1-11.
- [13] 吴丰昌. 我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(12): 1-8.
- WU F C. Effectiveness, scientific and technological support, and prospects for water pollution control and management in China [J]. *Water Resources Development Research* 2023, 23(12): 1-8.
- [14] 田佳佳, 冯兴无, 蒲德永, 等. 嘉陵江渠化对主要经济鱼类产卵场的影响[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(3): 9-17.
- TIAN J J, FENG X W, PU D Y, et al. Effects of channelizing Jialing River on the spawning grounds of major commercial fish species [J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(3): 9-17.
- [15] ZHANG P, LIU Q, WANG Y, et al. Does drifting passage need to be linked to fish habitat assessment? Assessing environmental flow for multiple fish species with different spawning patterns with a framework integrating habitat connectivity [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: 128247.
- [16] ZENG Q, HU P, WANG H, et al. The influence of cascade hydropower development on the hydrodynamic conditions impacting the reproductive process of fish with semi-buoyant eggs [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 865-874.
- [17] 侯俊, 黄喻威, 苗令占, 等. 基于鱼类栖息地需求的雅鲁藏布江中游环境流量计算[J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 8-12.
- HOU J, HUANG Y W, MIAO L Z, et al. Calculating environmental flows in middle reach of Yarlung Tsangpo River based on fish habitat requirements [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(4): 8-12.
- [18] 韩仕清, 李永, 梁瑞峰, 等. 基于鱼类产卵场水力学与生态水文特征的生态流量过程研究[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(6): 9-13.
- HAN S Q, LI Y, LIANG R F, et al. Study on ecological flow regime based on hydraulics and eco-hydrological characteristics of fishing spawning area [J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(6): 9-13.
- [19] 党莉, 马超, 练继建. 水库调节对下游鱼类栖息地适宜性的影响[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2018, 51(6): 566-574.
- DANG L, MA C, LIAN J J. Effects of reservoir regulation on downstream fish habitat suitability [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2018, 51(6): 566-574.
- [20] 樊皓, 张登成. 乌东德水电站库尾栖息地水力生境优化调度 [J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(5): 18-24.
- FAN H, ZHANG D C. Optimization of hydraulic conditions in the tailwater habitat of Wudongde Hydropower Station [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(5): 18-24.
- [21] 周恒, 牛乐, 李厚峰, 等. 黄河上游水电开发与生态保护路径研究[J]. *海河水利*, 2023, (6): 12-18.
- ZHOU H, NIU L, LI H F, et al. Path of hydropower development and ecological protection in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Haihe Water Resources*, 2023, (6): 12-18.
- [22] ZHANG P, YANG Z, CAI L, et al. Effects of upstream and downstream dam operation on the spawning habitat suitability of *Coreius guichenoti* in the middle reach of the Jinsha River [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 198-208.
- [23] XIAO Y, DENG J, YANG S, et al. Study on the spawning habitat suitability of four major Chinese carps in the fluctuating backwater area of the Three Gorges Reservoir [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109314.
- [24] 王中敏, 樊皓, 刘金珍. 孤山电站对库区鱼类产卵场水文情势的影响研究[J]. *人民长江*, 2017, 48(1): 20-24.
- WANG Z M, FAN H, LIU J Z. Research on hydrological impact on spawning grounds of fish in reservoir area by Gushan Hydropower Station [J]. *Yangtze River*, 2017, 48(1): 20-24.
- [25] 李航, 李洁玉, 王远见, 等. 不确定来水条件下龙羊峡水库年末水位优化[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(2): 258-264.
- LI H, LI J Y, WANG Y J, et al. Year-end water level optimization of Longyangxia Reservoir under uncertain inflow conditions [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(2): 258-264.
- [26] ZHANG Q, LIU Z, WANG W, et al. Quantitative determination of flow rate variations in reservoir eco-scheduling: A case study of Yangqu Dam in the upper Yellow River [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365: 121620.
- [27] 娄忠玉, 张艳萍, 焦文龙, 等. 黄河上游极边扁咽齿鱼人工繁殖试验[J]. *水产科学*, 2010, 29(10): 610-612.
- LOU Z Y, ZHANG Y P, JIAO W L, et al. Artificial reproduction technology of platy *pharodon extremus* in upper Reaches of Yellow River [J]. *Fisheries Science*, 2010, 29(10): 610-612.
- [28] 张艳萍, 娄忠玉, 苏军虎, 等. 极边扁咽齿鱼人工繁殖技术 [J]. *水产学报*, 2010, 34(11): 1698-1703.
- ZHANG Y P, LOU Z Y, SU J H, et al. Artificial propagation of *Platypharodon extremus* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(11): 1698-1703.
- [29] 梁云, 殷峻暹, 祝雪萍, 等. MIKE21 水动力学模型在洪泽湖水位模拟中的应用[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(1): 135-137.
- LIANG Y, YIN J X, ZHU X P, et al. Application of MIKE21 hydrodynamic model in water level simulation of Hongze Lake [J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(1): 135-137.
- [30] XING Y, LV B, MA D, et al. Hydrodynamic modeling to evaluate the influence of inland navigation channel training works on fish

habitats in the Upper Yellow River [J]. *Ecological Engineering*, 2021, 169: 106289.

- [31] COLLIER J J, CHIOTTI J A, BOASE J, et al. Assessing habitat for lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) reintroduction to the Maumee River, Ohio using habitat suitability index models [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2022, 48(1): 219-228.
- [32] 英晓明, 李凌. 河道内流量增加方法 IFIM 研究及其应用 [J]. *生态学报*, 2006, 26(5): 1567-1573.
YING X M, LI L. Review on instream flow incremental methodology (IFIM) and applications [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1567-1573.
- [33] 邬鑫. 三峡变动回水区典型河段鱼类栖息地景观格局研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
WU X. Study on the Landscape Patterns of Fish Habitats in Typical River Sections in the Fluctuating Backwaters of Three Gorges

Reservoir [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.

- [34] 白贵书. 高维偏相关系数的估计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
BAI G S. Estimation for High-dimensional Partial Correlation Coefficient [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [35] 王珊, 苏亮, 刘远立, 等. 皮尔森和偏相关系数模型在稻谷重金属污染程度研究中的应用 [J]. *中国食品卫生杂志*, 2020, 32(6): 631-635.
WANG S, SU L, LIU Y L, et al. Application of Pearson and partial correlation coefficient model in the research of heavy metal pollution in rice [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2020, 32(6): 631-635.

(责任编辑 王海锋)