

韩宇瑶, 王军, 王航, 等. 水电站日内调峰对鱼类栖息地适宜性影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(9): 119-130. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.009

HAN Yuyao, WANG Jun, WANG Hang, et al. Impact of intra-day peak regulation of hydropower stations on fish habitat suitability [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(9): 119-130. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.009

水电站日内调峰对鱼类栖息地适宜性影响

韩宇瑶¹, 王 军², 王 航¹, 陈俊光¹, 李欣桐¹, 王远铭¹

(1. 四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 遵义市绥阳县水务局, 贵州 遵义 563300)

摘 要:【目的】控制性电站泄流深刻改变了河流的水文过程与水动力特征, 日调节水电站的日内调峰可对上游控制性电站泄流形成的流量过程进行再调节, 但这种再调节作用对坝下鱼类栖息地的影响尚不明晰。【方法】以泸定南桥产卵场河段为研究对象, 构建平面二维水动力模型, 基于泸定水电站2018—2021年齐口裂腹鱼产卵期(3、4月)典型日的逐时入库、出库流量过程, 模拟分析各典型流量工况下, 以及典型日内逐时流量过程下产卵场河段的水动力特征, 并采用栖息地模拟法, 分析各典型流量下产卵适宜栖息地的空间分布规律和水电站日内调峰对栖息地加权可利用面积(Weighted Usable Area, WUA)日内变化的影响。【结果】流量变化显著影响泸定南桥产卵场河段的流速与水深分布, 其WUA随流量增加而呈单峰变化, 并在 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 时达到峰值(3.38 万 m^2)。从生境总体水平上看, 相较于入库流量情景, 出库流量情景下大部分典型日的WUA平均值小幅下降, 下降率为 $1.96\%\sim 10.45\%$, 日内WUA最低值显著提升, 提升率为 $13.82\%\sim 40.89\%$ 。从生境稳定性上看, 出库流量情景下多数典型日的生境变异系数、日内WUA平均变化量出现下降, 仅2020年部分典型日内的生境变异系数、日内WUA平均变化量上升。从短时生境退化风险上看, 大部分典型日内的WUA小时最大减量降低, 下降量为 $903\sim 11747\text{ m}^2$ 。但在2020年3、4月典型日, 出库流量情景的WUA小时最大减量上升。【结论】泸定水电站日内调峰对产卵场栖息地的影响因调度过程而异, 其日调度在大部分典型日内对泸定南桥产卵场河段的生境总体水平影响较小, 但在一定程度上提高了产卵场栖息地的稳定性, 降低了短时生境退化风险。而在个别调度工况下, 其调度仍可能增加产卵场的生境波动和短时生境退化风险。

关键词: 鱼类栖息地; 日内调峰; 生态调度; 水动力模拟; 齐口裂腹鱼; 鱼类产卵期; 泸定水电站; 大渡河中游

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.009

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)09-0119-12



Impact of intra-day peak regulation of hydropower stations on fish habitat suitability

HAN Yuyao¹, WANG Jun², WANG Hang¹, CHEN Junguang¹, LI Xintong¹, WANG Yuanming¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan,

收稿日期: 2026-03-31; 修回日期: 2026-06-10; 录用日期: 2026-06-18; 网络出版日期: 2026-06-26

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2240212); 科技基础资源调查专项(2022FY100203)

作者简介: 韩宇瑶(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事水环境研究。E-mail: kripac@foxmail.com

通信作者: 王航(1984—), 男, 教授, 博士, 主要从事环境水力学研究。E-mail: wanghang39@scu.edu.cn

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

Abstract: [Objective] Regulating reservoir releases profoundly alters river hydrology and hydrodynamics. While intra-day peak regulation by daily-regulating hydropower stations can re-regulate the flow processes generated by upstream regulating reservoir releases, the impact of this re-regulation on fish habitats downstream of the dam remains unclear. [Methods] The Luding Nanqiao spawning reach was selected as the research object, and a two-dimensional planar hydrodynamic model was constructed. Based on the hourly inflow and outflow hydrographs on typical days during the spawning season (March and April) of *Schizothorax prenanti* from 2018 to 2021, the hydrodynamic characteristics of the reach under various typical flow conditions and intra-day hourly flow variations were simulated. Furthermore, the physical habitat simulation method was used to analyze the spatial distribution patterns of suitable spawning habitats and assess the impact of intra-day peak regulation on the intra-day variations of the weighted usable area (WUA). [Results] Flow variations significantly altered the distribution of flow velocity and water depth in Luding Nanqiao spawning ground reach. The WUA exhibited a unimodal response to increasing discharge, peaking at 33 800 m² at 80 m³/s. Regarding overall habitat suitability, compared to inflow scenarios, the average values of WUA on most typical days under outflow scenarios showed a slight decrease, with a reduction rate of 1.96% ~ 10.45%, while the intra-day minimum WUA increased significantly, with an increase rate of 13.82% ~ 40.89%. In terms of habitat stability, both the coefficient of variation for the habitat and the average intra-day WUA variation decreased on most typical days under outflow scenarios, with increases observed only on certain days in 2020. Concerning the risk of short-term habitat degradation, the maximum hourly WUA reduction effectively decreased by 903 ~ 11 747 m² on most days. However, the maximum hourly WUA reduction increased during the typical days of March and April 2020 under outflow scenarios. [Conclusion] The impact of intra-day peak regulation at Luding hydropower station on spawning habitat suitability varies with the operational regime. For most typical days, daily regulation has a limited influence on the overall habitat suitability of the Nanqiao spawning reach. However, it improves habitat stability to some extent and reduces the risk of short-term habitat degradation. Nevertheless, under certain operating scenarios, hydropower regulation may increase habitat fluctuations and exacerbate the risk of short-term habitat degradation within the spawning reach.

Keywords: fish habitat; intra-day peak regulation; ecological operation; hydrodynamic simulation; *Schizothorax prenanti*; fish spawning season; Luding hydropower station; middle reaches of Dadu River

0 引言

河流系统是地球的主要动脉,在全球水循环、气候变化和生态平衡中发挥着至关重要的作用,而人类活动日益影响着河流的生态功能^[1-2]。中国的水能资源极为丰富,截至2024年12月我国已建成大坝9.4万座,水电累计装机容量达4.36亿kW^[3]。这些水利工程在发电、航运、防洪等领域发挥着巨大作用,但其运行改变了天然河流的水文情势、水温条件和泥沙输移过程,进而影响河流生态系统的稳定性^[4-7]。水电站可在不同时间尺度上对河道水文情势产生影响,在月、日尺度上主要体现为“削峰补枯”效应、径流分配过程的改变^[8],而在日内尺度上,水电站日内调峰使河道流量在数小时内快速频繁波动,引起下游河道的水位、流速、水面宽度等要素在短时间内迅速变化,这种影响被称为“水峰效应”^[9]。

鱼类的产卵繁殖活动受到水文节律、水位、流速、水温及底质条件等多种环境要素的共同影响^[10-11]。水电站长时间尺度的调节主要改变河流的

季节性水文节律,可能削弱鱼类繁殖所需的天然水文信号,日内调峰产生的“水峰效应”则使鱼类栖息地水力生境在短时间内发生剧烈变化^[12-13]。鱼类的产卵行为通常并非瞬时完成,需要产卵场在一定时间内维持相对稳定的水力生境^[14]。裂腹鱼是产黏沉性卵的鱼类,其产卵场多分布于浅滩、边滩等对水位涨落较为敏感的区域^[15]。水电站日内调峰过程中的快速涨水和落水阶段,可能导致河流的流速与水深发生剧烈变化,从而增加黏沉性鱼卵的脱落风险及脱水风险^[16]。WANG等^[17]对长江上游受向家坝水电站日调峰影响的朱沱产卵场鱼卵存活情况展开现场研究,发现当水位波动幅度较大时,鱼卵暴露于空气中超过6h后完全失活。因此,开展水电站日内调峰导致的下游河道水力条件急剧变化对鱼类产卵栖息地影响研究,对于指导水电站生态优化调度具有重要意义。

针对水电站日内调峰引起下游河道水力要素的快速变化对下游鱼类栖息地产生的影响,国内外已有相关研究。曹俊等^[16]通过二维水动力模拟与栖息地适

宜性分析发现, 乌东德水电站日调峰过程中, 出库流量降幅越大, 裂腹鱼类的潜在产卵场脱水面积越大, 鱼卵脱水风险越高, 实施基荷生态调度避免了河道大幅度退水事件, 降低了日调峰对裂腹鱼繁殖的不利影响。JELOVICA 等^[18]建立了基于栖息地适宜度的概率模型, 发现水电站日调峰导致下游水位急剧变化, 迫使褐鳟鱼短时间内向避难区移动, 且水位变幅越大, 褐鳟鱼的迁移成功率越低。BOAVIDA 等^[19]基于二维水动力模型研究了水电站日调峰对鲃鱼栖息地的影响, 结果表明, 日调峰引起的流量快速涨落会导致鲃鱼栖息地在短时间内发生剧烈变化。对于产黏沉性卵的鱼类, 鱼卵需要在一定的持续时间内完成孵化, 例如大渡河中游齐口裂腹鱼卵孵化至少需要 96 h^[11], 在此期间, 水力条件的快速变化可能导致鱼卵暴露于空气中而脱水失活。然而, 现有研究多侧重于日调峰条件下栖息地面积或适宜性的变化, 对小时尺度上栖息地动态变化过程、持续稳定特征及其对鱼类繁殖的影响关注相对不足。日内调峰在小时尺度上对鱼类栖息地的影响规律尚不明晰, 已成为限制水电站日内生态调度制定的关键瓶颈。

大渡河流域水能资源丰富, 是我国十三大水电基地之一, 水电开发程度较高, 已形成梯级开发格局, 中下游段的水电开发已经基本完成, 上游干流已建成猴子岩、黄金坪、长河坝和泸定等电站^[20]。近年来, 受水电开发等人类活动影响, 大渡河流域鱼类生境遭到破坏, 鱼类数量减少、分布范围缩小, 个体小型化现象加剧, 土著鱼类资源呈衰退趋势^[20-21]。泸定水电站的入库流量受上游控制性水电站调节的影响, 其日内调峰运行又会进一步改变下泄流量过程, 对下游鱼类栖息地产生的影响尚不明晰。本研究以大渡河干流泸定水电站下游泸定南桥齐口裂腹鱼 (*Schizothorax prenanti*) 产卵场河段为研究对象, 构建平面二维水动力模型, 模拟产卵期不同典型流量工况及典型日逐时入库、出库流量情景的水深、流速分布特征; 在此基础上, 采用栖息地模拟法计算产卵场的栖息地加权可利用面积 (Weighted Usable Area, WUA) 的面

积及分布, 分析泸定水电站日内调峰过程对栖息地适宜性的影响, 为水电站生态调度优化和鱼类栖息地保护提供参考。

1 研究区域概况及方法

1.1 研究区域概况

泸定水电站位于大渡河上游丹巴至泸定段, 于 2011 年正式投产发电, 具备日调节能力, 总库容 2.4 亿 m³, 坝址处天然多年平均流量 891 m³/s, 控制流域面积为 58 943 km²。其入库流量受上游梯级水电站调节过程的影响, 出库流量则受自身发电调度控制。泸定水电站于非汛期的最小下泄生态流量为 184 m³/s, 占坝址多年平均流量的 20.7%^[22]。泸定水文站位于泸定水电站坝下 3 km 处。

大渡河泸定坝下~硬梁包水电站库尾 13 km 的河段内, 沿岸湾、沱、汉等缓流回水区众多, 为适宜流水生境的鱼类繁殖提供了良好条件。齐口裂腹鱼产卵场主要分布于烹坝、泸定南桥、冷碛等处, 其中属泸定南桥产卵场规模最大, 最具代表性。泸定南桥产卵场位于泸定水电站下游 4 km 处, 河岸边滩发育, 河道内有浅滩, 水流缓急交替分布。该产卵场位置及水系情况如图 1 所示。

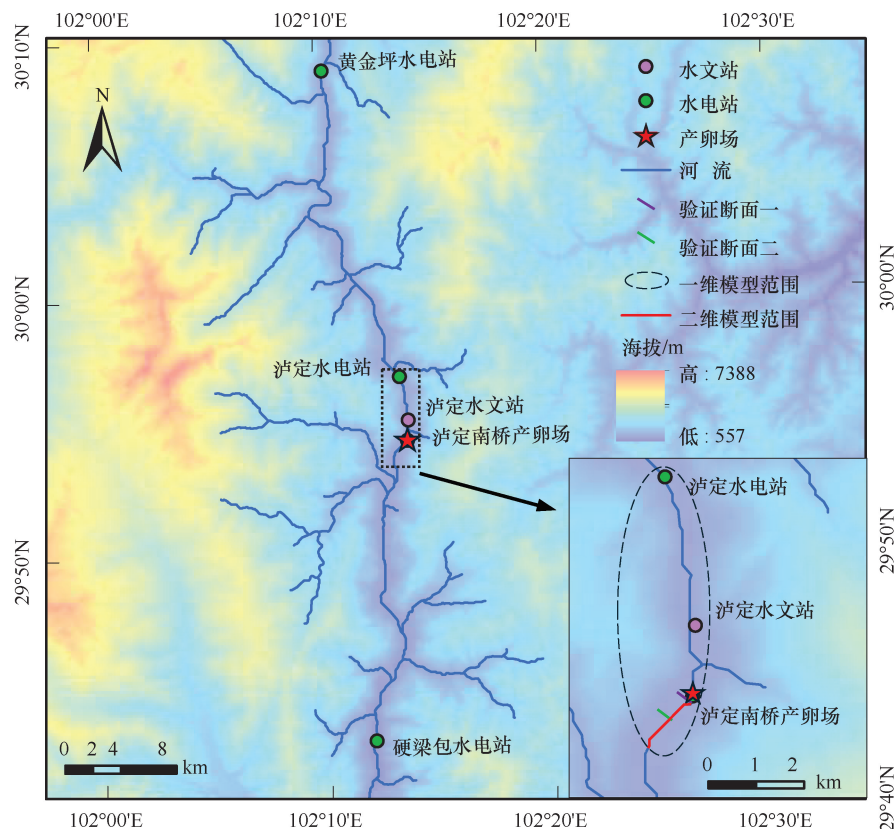


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 研究方法

1.2.1 目标鱼类选取

泸定水电站水域鱼类组成较为简单, 共有鱼类 21 种, 其中土著鱼类 2 目 5 科 10 属 13 种^[22]。近年来, 学者对大渡河上游的鱼类进行一系列的水生调查, 在丹巴至泸定段的渔获物组成中, 齐口裂腹鱼所占比例最大, 占 29.79%^[21]。因此本研究将齐口裂腹鱼确定为保护目标鱼类, 针对其产卵场的栖息地适宜性展开研究。

齐口裂腹鱼属于长江上游特有鱼类, 主要分布于岷江、青衣江和大渡河干支流, 为同步型产卵鱼类, 产卵时间集中, 对水文节律依赖度高, 喜多砾石、水流湍急河段, 不进行长距离洄游, 受水环境改变影响较大。大渡河中游齐口裂腹鱼产卵期为 3 月上旬至 5 月下旬^[23]。

1.2.2 适宜生境评价指标

本研究引入栖息地适宜度指数 (Habitat Suitability Index, *HSI*) 用来评估栖息地质量, 首先确定目标鱼类的适宜度 (Suitability Index, *SI*) 曲线, 其适宜度指数范围为 0~1, 其中 0 代表完全不适宜生存情况, 1 代表最适宜生存情况。栖息地适宜度指数 *HSI_i* 计算公式为

$$HSI_i = VSI_i \times DSI_i \times CSI_i \quad (1)$$

式中, *HSI_i* 为第 *i* 个计算网格单元的栖息地综合适宜度指数; *VSI_i* 为第 *i* 个计算网格单元的流速适宜度指数; *DSI_i* 为第 *i* 个计算网格单元的水深适宜度指数; *CSI_i* 为第 *i* 个计算网格单元的底质适宜性指数, 本研究中的产卵场主要位于沙砾底质的浅滩区, 取 *CSI_i* = 1。

采用加权可利用面积 *WUA* 反映河段中齐口裂腹鱼的适宜生境面积, 其计算公式为

$$WUA = \sum_i^n HSI_i \times A_i \quad (2)$$

式中, *A_i* 为第 *i* 个计算网格单元的面积 (m²); *n* 为计算网格单元的总数。

大渡河中游齐口裂腹鱼产卵繁殖所需的适宜水深为 0.15~1.5 m, 最适宜水深为 0.2~0.8 m; 适宜流速为 0.07~1.5 m/s, 最适宜流速为 0.2~0.8 m/s^[24], 据此确定齐口裂腹鱼的水深、流速适宜性曲线如图 2 所示。

1.2.3 基于 *WUA* 的日内生境评价指标

本研究基于典型日内的逐时 *WUA*, 采用日内 *WUA* 平均值、生境变异系数 *CV*、日内 *WUA* 平均变化量、*WUA* 小时最大减量等指标对产卵场河段的典型日内生境进行评价。

日内 *WUA* 平均值的计算公式为

$$\overline{WUA} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} WUA_t \quad (3)$$

式中, *WUA_t* 为典型日内时刻 *t* 的适宜生境面积 (m²); *t* 为时刻序号, *t* = 1, 2, 3, ..., 24, 分别对应 1:00—24:00 的逐时模拟结果。

引入生境变异系数 *CV* 用于表示日内 *WUA* 的波动程度, 其计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} (WUA_t - \overline{WUA})^2} \quad (4)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\overline{WUA}} \quad (5)$$

式中, σ 为典型日内 *WUA* 的标准差; *CV* 为典型日内生境变异系数。

日内 *WUA* 平均变化量是指在一个典型日内, 相邻时刻 *WUA* 变化量绝对值的平均值, 用以表征生境适宜度的日内波动强度, 其计算公式为

$$\Delta WUA_{avg} = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} |WUA_{t+1} - WUA_t| \quad (6)$$

式中, ΔWUA_{avg} 为日内 *WUA* 平均变化量 (m²); *n* = 24。

WUA 小时最大减量是指在一个典型日内, 相邻时刻 *WUA* 变化量中下降幅度最大的值, 用于表征生境在短时间尺度上的恶化的剧烈程度。其计算公式为

$$\Delta WUA_{min} = \min(WUA_{t+1} - WUA_t) \quad (7)$$

1.2.4 模型构建与验证

本研究通过 MIKE 21 软件构建了泸定电站坝下 4~5.5 km 的泸定南桥产卵场河段的二维水动力模型,

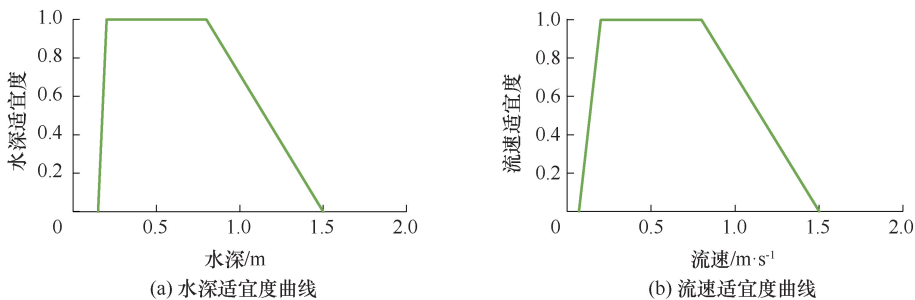


图 2 齐口裂腹鱼产卵栖息地水深、流速适宜度曲线

Fig. 2 Suitability curves of water depth and flow velocity for spawning habitat of *Schizothorax prenanti*

模拟产卵场河段的水动力特征。模型上游边界条件为河道流量, 下游边界条件为模型出口断面的水位, 河道糙率为曼宁系数, 经率定后取 0.035。考虑到该河段缺乏实测水位资料, 因此本研究使用 HEC-RAS 软件建立了泸定电站坝下 5.5 km 河道的一维水动力模型, 模拟 0~890 m³/s 流量下坝下 5.5 km 河段水位, 模型上游边界条件为河道流量, 下游边界条件为河道比降, 曼宁糙率系数取 0.035。采用位于坝下 3 km 处的泸定水文站断面的 2017 年逐日实测水位资料对一维水动力模型进行验证, 如图 3 所示, 模拟水位的均方根误差 (*RMSE*) 为 0.26 m, 相对误差最大为 8.03%, 表明一维水动力模型的模拟结果可靠。

在一维水动力模型通过实测资料验证的基础上, 模拟了距泸定电站坝下 4.2 km (距产卵场上边界 200 m) 的断面一与距泸定电站坝下 4.78 km (距产卵场上边界 775 m) 的断面二在来流 375 m³/s (产卵期典

型日平均流量) 时水深, 用以验证二维水动力模型的模拟精度, 验证结果如图 4 所示, 断面一、断面二水深的均方根误差 (*RMSE*) 分别为 0.15 m、0.11 m, 表明产卵场河段的二维水动力模型能够合理反映真实河段的水动力特征。

1.2.5 工况选取

本研究设置了典型流量工况和产卵期典型日内逐时流量过程两类模拟情景。典型流量工况的选取如表 1 所列, 采用恒定流进行二维水动力模拟。产卵期典型日内逐时流量过程选取泸定水电站在 2018—2021 年的 3、4 月典型日逐时入库、出库流量过程 (见图 5), 采用非恒定流进行二维水动力模拟。典型日入库流量工况可反映泸定水电站未调节状态的河道水动力特征, 典型日逐时出库流量工况则代表泸定水电站调节后的河道水动力特征。典型日的资料来源于四川省引大济岷工程环境影响报告书, 选取原则是当月



图3 河道一维水动力模型的水位验证

Fig.3 Water level validation of one-dimensional hydrodynamic model

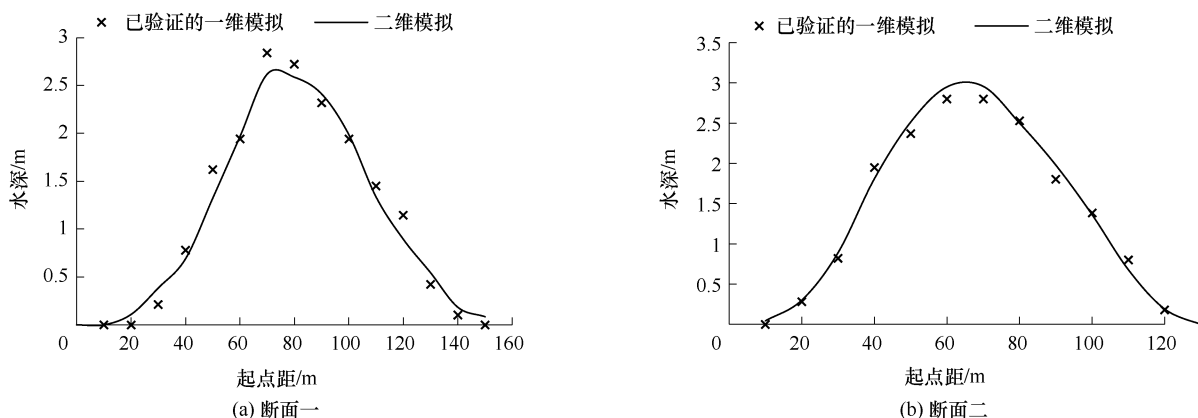


图4 产卵场河段的二维水动力模型水深验证

Fig.4 Water depth validation of two-dimensional hydrodynamic model for spawning ground reach

表 1 典型流量工况选取

Table 1 Selection of typical flow conditions

流量工况/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	特 征	含 义
85	产卵期典型日入库流量最小值	极低流量工况下的栖息地特征
184	非汛期泸定电站最小下泄流量	分析生态保障调度条件下产卵场河段生境适宜性
375	产卵期典型日平均流量	产卵期平均来流情况下的产卵场河段生境状态
600	产卵期的中高流量	流量增大过程中产卵场河段生境变化
740	产卵期典型日出库最大流量	水电站日内调度高出库流量下的产卵场河段生境
800	产卵期典型日入库最大流量	产卵期高来流条件下产卵场河段的生境响应
890	多年平均流量	评估多年平均流量下产卵场河段生境情况

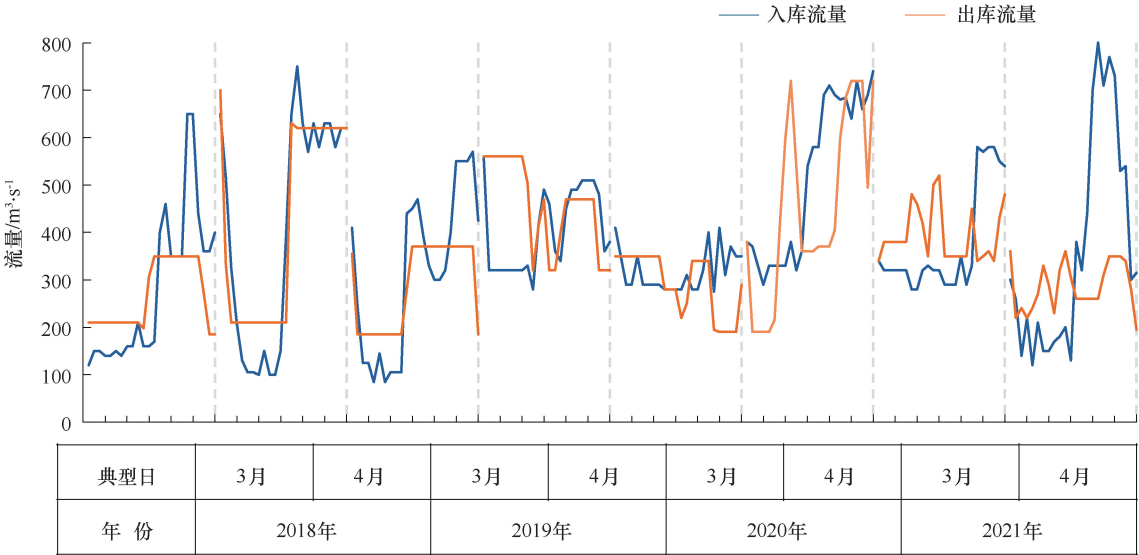


图 5 典型日逐时入库、出库流量过程

Fig. 5 Hourly inflow and outflow processes on typical days

资料完整，不受异常调度影响，且能够反映水电站随日内负荷变化进行日调节特征的日期^[25]。

2 结 果

2.1 典型流量工况下的栖息地水动力特征

各典型流量工况下的河床淹没面积如图 6 所示，随着河道流量增加，产卵场河段的河床淹没面积逐渐上升，当流量下降时，部分河道浅滩出露，河床淹没面积减小。在 85~890 m³/s 的流量范围内，流量每增加 100 m³/s，河床淹没面积平均约增加 0.94 万 m²。典型流量工况下栖息地的水深、流速统计分布与空间分布特征如图 7 和图 8 所示。产卵场河段的水深与流速随流量增大而升高。当流量由产卵期典型日入库流量最低值 85 m³/s 升高至最小下泄生态流量 184 m³/s 时，河床淹没面积从 17.3 万 m² 上升至 19.5 万 m²，河道平均水深从 1.57 m 上升至 1.83 m，河道平均流速由 0.89 m/s 上升至 1.22 m/s。在产卵期典型日平均流量 375 m³/s 下，河床淹没面积为 216.7 万 m²，河道平均水深为 2.31 m，平均流速为 1.52 m/s。当

流量由产卵期典型出库最大流量 740 m³/s 升高至入库最大流量 800 m³/s 时，河床淹没面积由 24.1 万 m² 上升至 24.3 万 m²，河道平均水深由 3.00 m 上升至 3.11 m，河道平均流速由 3.01 m/s 上升至 3.12 m/s。

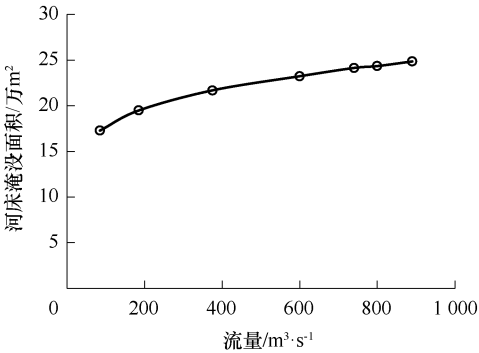


图 6 各典型流量工况下的河床淹没面积

Fig. 6 Inundated area of riverbed under different typical flow conditions

2.2 典型流量工况下的栖息地适宜生境空间分布

河道流量变化显著影响泸定南桥产卵场河段的适宜栖息地面积及其空间分布特征，其 WUA 随河道流

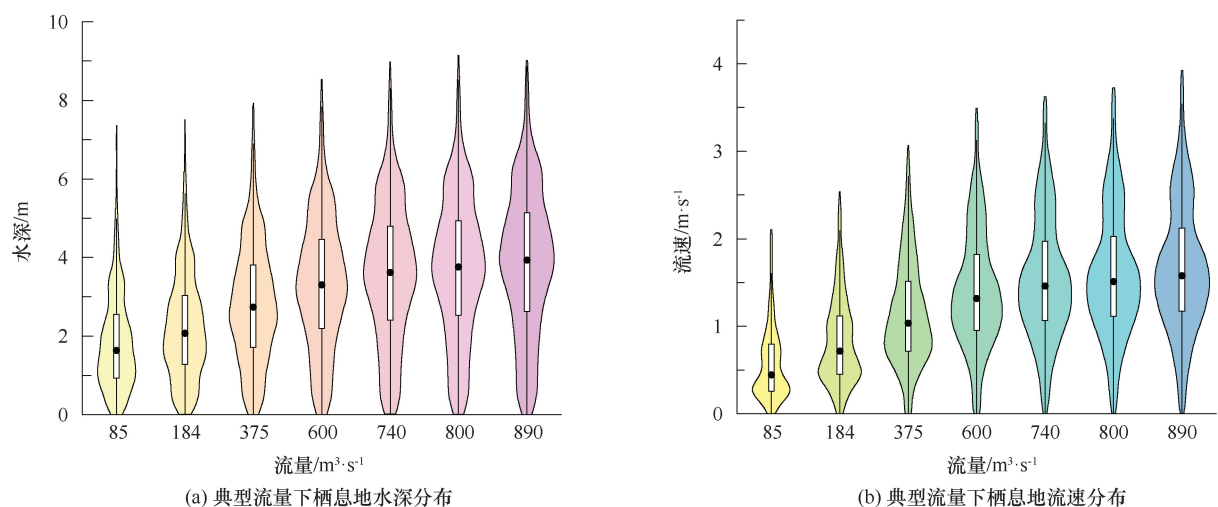


图 7 典型流量工况下的栖息地水深、流速统计分布

Fig. 7 Statistical distribution of habitat water depth and flow velocity under typical flow conditions

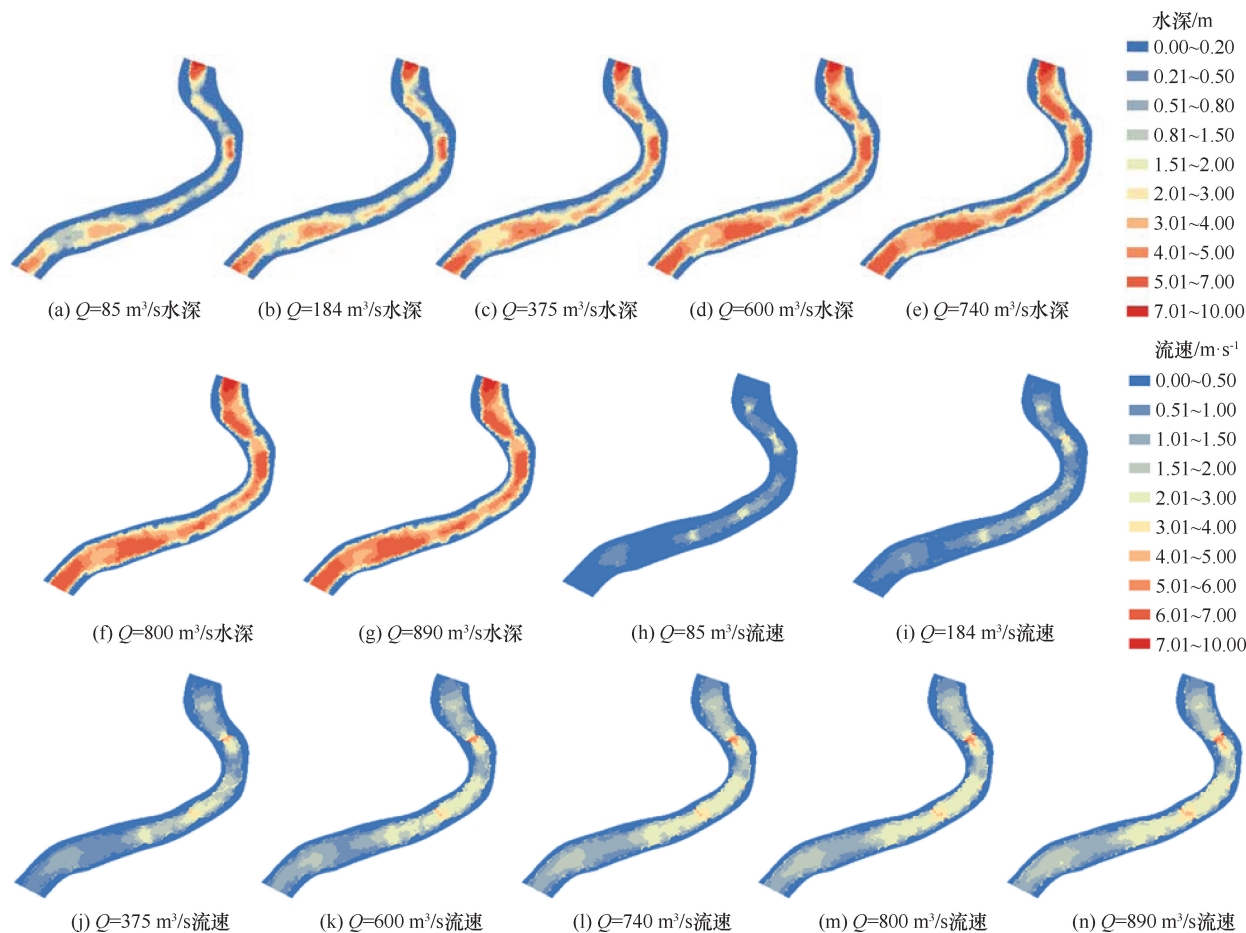


图 8 典型流量工况下的栖息地水深、流速空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of habitat water depth and flow velocity under typical flow conditions

量增加呈现先增后减的单峰变化趋势(见图 9)，且在 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 时达到峰值，为 3.38 万 m^2 ，此时适宜栖息地主要分布于河道中的浅滩、边滩地带，能够满足齐口裂腹鱼的产卵繁殖需求。各典型流量工况下的

WUA 如表 2 所列，空间分布特征如图 10 所示。当流量由 $85\text{ m}^3/\text{s}$ (产卵期入库流量最低值) 升高至 $184\text{ m}^3/\text{s}$ (非汛期泸定电站最小下泄生态流量) 时， WUA 由 3.35 万 m^2 下降至 2.15 万 m^2 。当流量由

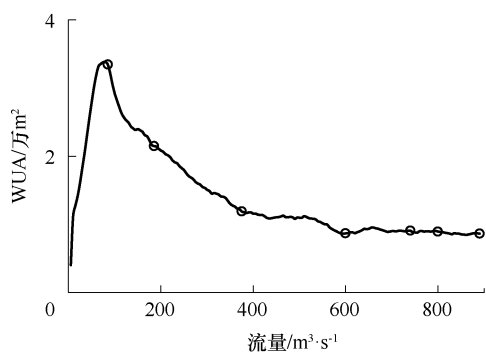


图9 河道 WUA 随流量变化曲线
Fig.9 Variation curve of WUA with flow

表2 各典型流量工况下的 WUA

Table 2 WUA under different typical flow conditions		
河道流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	总 WUA/ 万 m^2	WUA 占比/%
85	3.35	98.90
184	2.15	63.53
375	1.19	35.15
600	0.87	25.68
740	0.91	26.82
800	0.90	26.46
890	0.86	25.55

注: WUA 占比为当前河道 WUA 与河道最大 WUA(3.38 万 m²)之比。

184 m³/s 逐步提升至 600 m³/s 时, 适宜栖息地向河道边滩转移, 并逐渐缩减, 空间上呈现破碎化。当流量由 740 m³/s (产卵期出库流量最高值) 上升至 800 m³/s (产卵期入库流量最高值) 时, WUA 由

0.90 万 m² 下降至 0.86 万 m², 降幅约 3.45%。

2.3 日内调峰对栖息地适宜生境的影响

泸定南桥产卵场河段在产卵期 3、4 月的典型日内逐时 WUA 变化曲线与特征指标分别如图 11 所示和表 3 所列。

从生境总体水平上看, 相较于入库流量情景, 除 2020 年外, 出库流量情景下各年产卵期 3、4 月典型日的日均 WUA 出现了小幅下降, 下降量为 278 ~ 1 665 m², 下降率为 1.96% ~ 10.45%。仅 2020 年 3、4 月典型日的日均 WUA 有所提升, 提升率为 10.63%、14.90%。相较于入库流量情景, 出库流量情景下 2018—2021 年的 3 月典型日, 2021 年的 4 月典型日的日内 WUA 最低值有显著提升, 提升了 1 538 ~ 3 660 m², 提升率为 13.82% ~ 40.89%, 2020 年 4 月典型日的日内 WUA 最低值略有下降, 下降率为 2.54%。其余典型日的日内 WUA 最低值无明显改变。

从生境稳定性上看, 相较于入库流量情景, 出库流量情景下的 2018 年、2019 年及 2021 年的 3 月, 2018 年、2021 年 4 月典型日的生境变异系数大幅下降, 其中 2019 年 3 月典型日的生境变异系数由 0.47 降至 0.28, 2021 年 4 月典型日的生境变异系数由 0.37 降至 0.16, 下降幅度较大。同时, 2018—2020 年的 3 月典型日, 2018 年、2019 年及 2021 年的 4 月典型日的日内 WUA 平均变化量显著降低, 下降值为 269 ~ 2 098 m²。表明在这些典型日内, 泸定水电站的

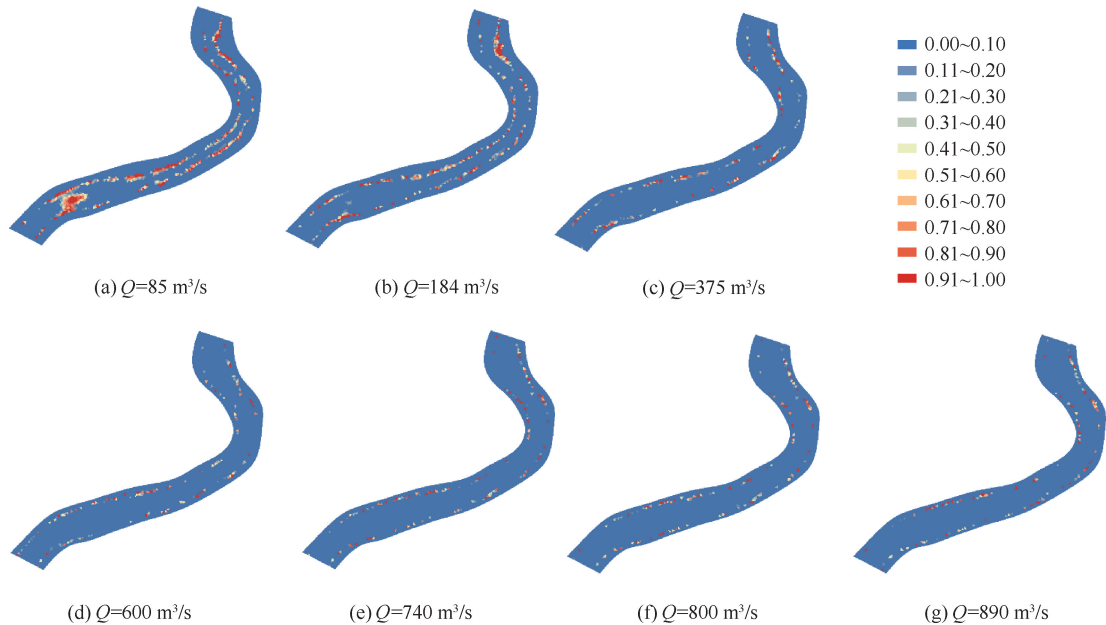


图10 各典型流量工况下的适宜栖息地空间分布

Fig.10 Spatial distribution of suitable habitats under different typical flow conditions

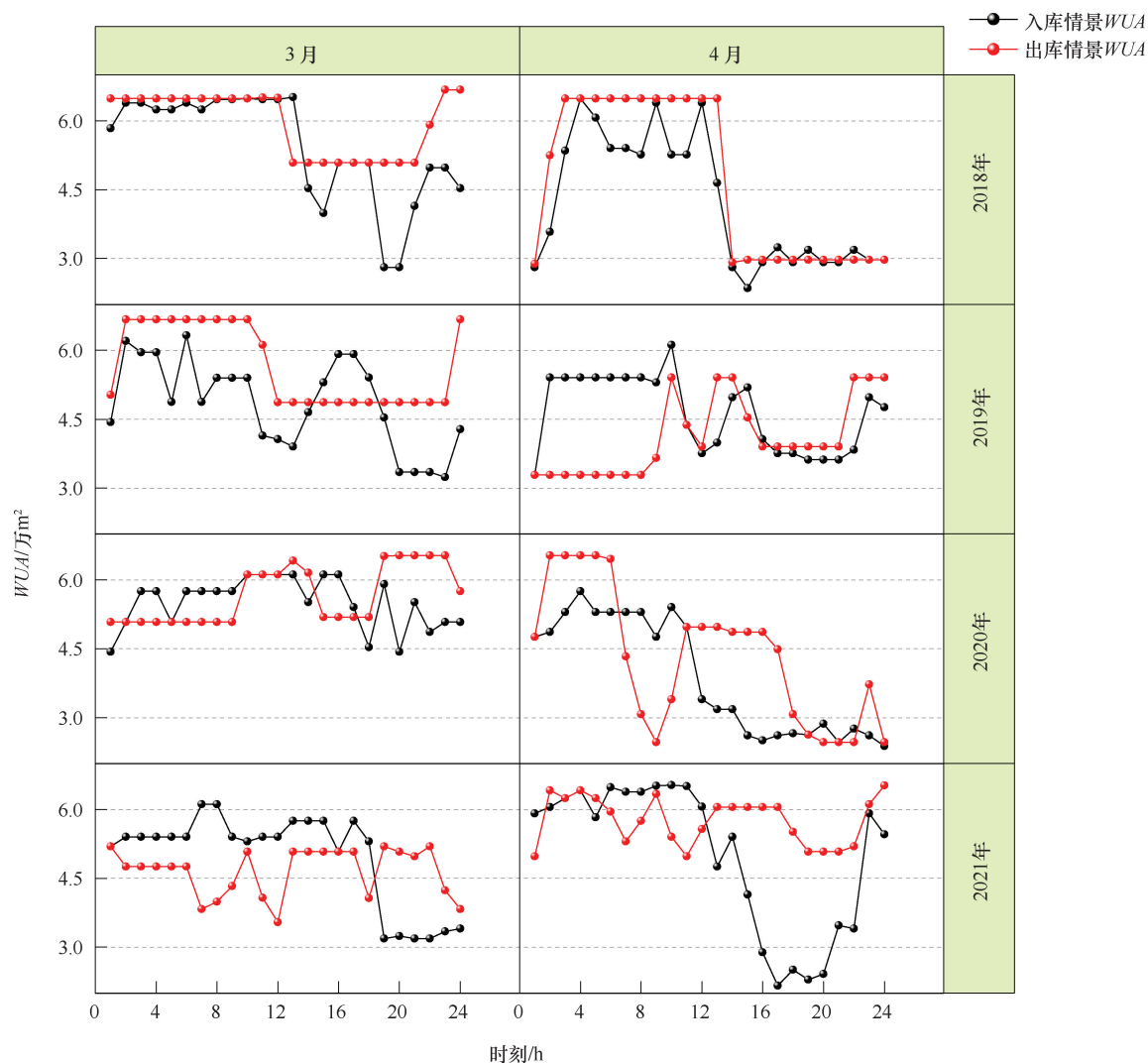


图 11 产卵期典型日入库、出库流量情景下逐时 WUA 变化

Fig. 11 Hourly variations in WUA under inflow and outflow scenarios on typical spawning days

表 3 产卵期入库、出库流量情景下泸定南桥产卵场河段的 WUA 特征指标对比

Table 3 Comparison of WUA characteristic indicators for Luding Nanqiao spawning ground reach under inflow and outflow scenarios during spawning season

指 标	产卵期-3 月							
	2018 年		2019 年		2020 年		2021 年	
	入 库	出 库	入 库	出 库	入 库	出 库	入 库	出 库
日内 WUA 平均值/m ²	18 151	17 296	17 564	16 270	14 474	15 861	13 417	12 206
生境变异系数 CV	0.34	0.21	0.47	0.28	0.11	0.21	0.18	0.08
日内 WUA 平均变化量/m ²	1 358	732	3 282	1 184	1 413	1 144	826	837
WUA 小时最大减量/m ²	11 350	5 932	17 244	5 497	4 805	5 930	5 114	2 932
日内 WUA 最低值/m ²	9 362	13 012	9 336	12 234	11 432	13 012	8 991	10 929
指 标	产卵期-4 月							
	2018 年		2019 年		2020 年		2021 年	
	入 库	出 库	入 库	出 库	入 库	出 库	入 库	出 库
日内 WUA 平均值/m ²	15 940	14 275	12 636	11 590	11 180	12 846	16 395	16 117
生境变异系数 CV	0.54	0.40	0.14	0.16	0.21	0.36	0.37	0.16
日内 WUA 平均变化量/m ²	2 254	995	911	797	785	1 499	2 788	1 904
WUA 小时最大减量/m ²	12 226	11 322	4 589	3 103	2 312	8 764	13 122	4 612
日内 WUA 最低值/m ²	8 720	8 720	9 971	9 971	8 913	8 687	8 952	12 612

日内调峰在一定程度上削弱了产卵场河段的栖息地适宜度波动。但 2020 年 3、4 月典型日出库流量情景下的生境变异系数, 以及 2020 年 4 月典型日出库流量情景下的日内 *WUA* 平均变化量相较于入库流量情景有所升高, 表明在泸定水电站特定的日调度工况下, 仍可能给下游产卵场造成一定的生境波动。

从短时生境退化风险来看, 相较于入库流量情景, 出库流量情景下的 2018 年、2019 年及 2021 年的 3、4 月典型日, *WUA* 小时最大减量均有降低, 下降量为 903 ~ 11 747 m²。从图 11 中能够观察到, 2021 年 4 月典型日的 12—13 h 范围内, 入库流量情景的 *WUA* 经历剧烈快速的下降过程, *WUA* 小时最大减量为 13 122 m², 而与此同时出库流量情景的 *WUA* 则较为平稳。但在 2020 年 3、4 月典型日, 相较于入库流量情景, 出库流量情景的 *WUA* 小时最大减量分别增加了 1 125 m²、6 452 m²。

3 讨论

在梯级水电站群中, 上游控制性水电站泄流会显著改变河道的水文过程, 位于下游的日调节水电站入库流量已具有明显的人工调节特征^[26-27]。泸定水电站的日内调峰是在上游波动来流基础上的再调节过程, 其坝下鱼类栖息地适宜性的影响仍需进一步分析。

目前, 国内的鱼类栖息地适宜性评价多基于典型流量、日均流量或更长时间尺度的流量展开, 仅能反映适宜栖息地的总体水平, 难以揭示水电站日内调峰导致的小时尺度上的流量快速变化对鱼类栖息地的影响。然而, 在裂腹鱼的产卵孵化阶段, 鱼卵附着于河床基质, 其孵化发育依赖相对稳定的水力环境, 在考虑某流量下的水深、流速条件是否满足要求的同时, 也需要考虑产卵时间窗口期内的适宜生境能否持续支持鱼卵孵化。

近年来, 乌东德、三峡、白鹤滩等水电站已多次开展了针对产黏沉性卵鱼类的生态调度试验, 这些试验采用基荷发电的调度方式, 控制了坝下河道的水位变幅, 以保障黏沉性鱼卵的正常孵化^[28]。曹俊等^[16]构建了时间加权的潜在产卵场面积指标, 基于该指标量化了乌东德电站的日调峰对下游裂腹鱼栖息地适宜性日内平均水平的影响, 结果表明其日调峰运行导致裂腹鱼栖息地适宜性下降。上述指标仅能反映产卵场 *WUA* 的日内平均水平, 但对于生境稳定性的刻画则较为有限。与之相比, 本研究提出了日内 *WUA* 平均值、生境变异系数 *CV*、日内 *WUA* 平均变化、*WUA*

小时最大减量及日内 *WUA* 最低值等五个指标, 从典型日生境总体水平、稳定性和短时生境退化风险三个角度, 综合评价了泸定水电站日内调峰对齐口裂腹鱼产卵场栖息地适宜性的影响, 结果表明, 泸定水电站在多数典型日的日内调度提高了下游产卵场的生境稳定性, 降低了生境短时退化风险, 但在 2020 年的典型日调度仍造成产卵场生境质量一定程度的降低。鉴于泸定水电站调节库容有限, 产卵期内难以维持长历时的低下泄流量来提高生境的总体水平, 其调度优化重点在于降低下泄流量的峰谷差异, 减少调峰频次, 平抑流量波动。这将为下游鱼类产卵场营造稳定的水动力环境, 有利于提高生境稳定性, 降低短时生境退化风险。

大渡河中游的齐口裂腹鱼喜好在流水浅滩生境进行产卵繁殖, 其繁殖期主要在枯水期^[11]。本研究的模拟结果表明, 泸定南桥产卵场河段的 *WUA* 在流量为 80 m³/s 时达到峰值, 与齐口裂腹鱼的低流量繁殖偏好吻合度较高。泸定水电站于非汛期的最小下泄生态流量为 184 m³/s, 在此流量条件下, 虽然该产卵适宜生境面积已出现一定缩减, 但在产卵场河段内仍保留 2.1 万 m² 的适宜栖息地, 可基本满足齐口裂腹鱼的产卵繁殖需求。在敏感期的水利设施下泄生态流量确定, 需优先考虑鱼类等保护目标的繁殖需求, 但并非根据单个产卵场的生境适宜性, 而是参考较长河段内的水位、流速、水面宽度等情况, 同时也需兼顾基本生态用水、生活用水、工农业用水、航运等需求^[29-30], 因此本研究确定的泸定南桥产卵场生境适宜度最优的流量与泸定水电站下泄生态流量并不冲突。

本研究仍存在一定局限性, 首先, 水电站的调节能够改变下游河道的水温、底质的情况, 鱼类繁殖亦受到这些因素的影响^[31-32]。而本研究的栖息地评价指标中仅关注了水动力条件, 而未能将底质、水温等要素纳入考虑; 在时间尺度上, 大渡河中游齐口裂腹鱼卵的孵化时间超过 4 d^[11], 而本研究仅选取了典型日内调度过程进行分析, 未能充分揭示持续数日的调峰过程的累积效应。未来的研究工作可建立综合适应性指数评价指标体系, 并结合长序列的数据展开分析, 以更加全面地评估梯级水电站群中日调节水电站对鱼类栖息地的影响, 为优化水电站生态调度提供科学依据。

4 结论

本研究针对大渡河中游齐口裂腹鱼产卵期的生境

需求,以泸定南桥产卵场河段为研究区域,模拟计算了其在不同典型流量下的水动力特征与适宜栖息地面积,并对泸定水电站日内调峰对产卵场适宜生境的影响进行分析,主要结论如下。

(1)流量变化显著影响泸定南桥产卵场河段的水深、流速分布特征。在低流量下以浅水、低流速生境为主,河床淹没面积小;随着流量增加,河床淹没面积增加,河道平均水深和流速上升。在 $85 \sim 890 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量范围内,流量每增加 $100 \text{ m}^3/\text{s}$,河床淹没面积平均增加 0.94 万 m^2 。

(2)泸定南桥产卵场河段的 WUA 随流量增加呈现单峰变化趋势,在流量 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ 时达到峰值 3.38 万 m^2 。当流量持续增大时,适宜栖息地逐渐由河道中的浅滩向边滩转移,面积缩减,空间上呈现破碎化。

(3)泸定水电站日内调峰对泸定南桥产卵场栖息地适宜性的影响随调度过程而变化。总体上,调峰运行使多数典型日的 WUA 均值略有下降,但提高了 WUA 最低值;同时降低了生境变异系数、日内 WUA 平均变化量及 WUA 小时最大减量,提高了产卵场的生境稳定性并降低了短时生境退化风险。然而,在部分调度工况下,调峰运行仍可能造成生境波动并增加短时生境退化风险。

参考文献 (References):

- [1] DE CASTRO-CATALÀ N, DOLÉDEC S, KALOGIANNI E, et al. Unravelling the effects of multiple stressors on diatom and macroinvertebrate communities in European river basins using structural and functional approaches [J]. Science of the Total Environment, 2020, 742: 140543.
- [2] GUDMUNDSSON L, BRUNNER M I, DÖLL P, et al. Past and future change in global river flows [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2026, 7(1): 7-23.
- [3] 国家能源局. 2024 年可再生能源并网运行情况 [EB/OL]. (2025-01-27) [2025-09-27]. <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>. National Energy Administration. Grid-connected operation of renewable energy in 2024 [EB/OL]. (2025-01-27) [2025-09-27]. <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>.
- [4] WANG X M, DENG Y, AN R D, et al. Evaluating the impact of power station regulation on the suitability of drifting spawning fish habitat based on the fuzzy evaluation method [J]. Science of the Total Environment, 2023, 866: 161327.
- [5] LIERMANN C R, NILSSON C, ROBERTSON J, et al. Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity [J]. BioScience, 2012, 62(6): 539-548.

- [6] ZHOU H B, YU C X, XU Z H, et al. Spatial suitability evaluation of spawning reach revealing the location preference for fish producing drifting eggs [J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 947908.
- [7] CHEN Q W, LI Q Y, LIN Y Q, et al. River damming impacts on fish habitat and associated conservation measures [J]. Reviews of Geophysics, 2023, 61(4): e2023RG000819.
- [8] 黄鸿蓝, 马昱斐, 刘艳丽, 等. 三峡水库建库前后下游区域水平衡评价与适应性调控 [J]. 水科学进展, 2026, 37(1): 43-53. HUANG H L, MA Y F, LIU Y L, et al. Water balance evaluation of downstream areas before and after the construction of the Three Gorges Reservoir and adaptive regulation [J]. Advances in Water Science, 2026, 37(1): 43-53.
- [9] ALONSO C, ROMÁN A, BEJARANO M D, et al. A graphical approach to characterize sub-daily flow regimes and evaluate its alterations due to hydropеaking [J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 532-543.
- [10] AHMAD BHAT I, RATHER M A, AHMAD I, et al. Impact of shifting abiotic factors in aquaculture on fish breeding and reproduction: A review [J]. Blue Biotechnology, 2025, 2(1): 3.
- [11] 严太明, 高阔, 刘小帅, 等. 大渡河中游齐口裂腹鱼繁殖时间及其主要影响因素分析 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(3): 49-56. YAN T M, GAO K, LIU X S, et al. Reproduction time and main influencing factors of *Schizothorax prenanti* in the middle reaches of the Dadu river [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2025, 49(3): 49-56.
- [12] YOUNG P S, CECHE J J, THOMPSON L C. Hydropower-related pulsed-flow impacts on stream fishes: A brief review, conceptual model, knowledge gaps, and research needs [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2011, 21(4): 713-731.
- [13] BOZEMAN B B, PRACHEIL B M, MATSON P G. The environmental impact of hydropower: A systematic review of the ecological effects of sub-daily flow variability on riverine fish [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2025, 35(1): 45-76.
- [14] LI B, HU F X, LI W J, et al. Study on the reproductive group behavior of *Schizothorax wangchiachii* based on acoustic telemetry [J]. Fishes, 2025, 10(7): 362.
- [15] 刘明洋. 齐口裂腹鱼栖息地产卵场水力微生境修复研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2025, 34(4): 813-823. LIU M Y. Research on hydraulic microhabitat restoration of habitat spawning ground of *Schizothorax prenanti* [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(4): 813-823.
- [16] 曹俊, 陈小娟, 卢晶莹, 等. 乌东德水电站日调峰对下游裂腹鱼类栖息地的影响 [J]. 水生态学杂志, 2024, 45(1): 87-95. CAO J, CHEN X J, LU J Y, et al. Effects of daily peak-shaving on *Schizothoracine* fish habitat downstream of wudongde hydropower station [J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(1): 87-95.
- [17] WANG L, HUANG B Y, YANG J, et al. Evaluating the ecological effects of daily hydropеaking on lithophilous fish spawning habitat in a large mountainous river [J]. Journal of Environmental Management, 2026, 400: 128678.
- [18] JELOVICA B, MARTTILA H, BIN ASHRAF F, et al. A probability-based model to quantify the impact of hydropеaking on habitat

suitability in rivers[J]. River Research and Applications, 2023, 39 (3): 490-500.

[19] BOAVIDA I, CAETANO L, PINHEIRO A N. E-flows to reduce the hydropeaking impacts on the Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*) habitat. An effectiveness assessment based on the COSH Tool application[J]. Science of the Total Environment, 2020, 699: 134209.

[20] 罗涵, 巨莉, 罗茂盛, 等. 四川省水电开发基地水电开发程度评估[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1): 71-80.

LUO H, JU L, LUO M S, et al. Hydropower development degree evaluation of Sichuan hydropower development base[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1): 71-80.

[21] 徐梓立, 季睿. 鱼类通道建设的国际经验及启示[J]. 水利发展研究, 2022, 22(6): 95-101.

XU Zili, JI Rui. International experience and enlightenment on fishpassage construction [J]. Water Resources Development Research, 2022, 22(6): 95-101.

[22] 成都勘测设计研究院. 四川省大渡河泸定水电站环境影响报告书[R]. 成都: 成都勘测设计研究院, 2006.

PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited. Environmental impact assessment report of Luding Hydropower Station on the Dadu River, Sichuan Province [R]. Chengdu: Chengdu Engineering Corporation Limited, 2006.

[23] 丁瑞华. 四川鱼类志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.

DING R H. The Fishes of Sichuan, China[M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Publishers, 1994.

[24] 李茜, 张天予, 冯镜洁, 等. 齐口裂腹鱼产卵场生境模拟和底质修复技术研究[J]. 四川环境, 2024, 43(4): 84-93.

LI Q, ZHANG T Y, FENG J J, et al. Study on habitat simulation and substrate rehabilitation techniques for spawning grounds of *Schizothorax prenanti*[J]. Sichuan Environment, 2024, 43(4): 84-93.

[25] 四川水发勘测设计研究有限公司. 四川省引大济岷工程环境影响报告书[R]. 成都: 四川水发勘测设计研究有限公司, 2024.

Sichuan Water Development Investigation, Design & Research Co., Ltd, Environmental impact report of the Yindajimin project in Sichuan Province[R]. Chengdu: Sichuan Water Development Investigation, Design& Research Co., Ltd, 2024.

[26] 李时, 杨雪, 李凤年, 等. 日调节水电站对水文情势的再调节作用研究: 以尼那—拉西瓦为例[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38 (9): 115-124.

LI S, YANG X, LI F N, et al. Additional influence of daily regulatable hydroplant on hydrological regime: An example of Nina-Laxiwa[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(9): 115-124.

[27] WANG Y F, WANG X X, VIRGUEZ E, et al. The effect of down-cascade re-regulation on alleviating the flow regime alteration induced by an up-cascade reservoir[J]. Water, 2023, 15(12): 2166.

[28] 长江电力. 梯级水库促进产黏沉性卵鱼类繁殖生态调度试验正式启动 [EB/OL]. (2026-03-13) [2026-05-07]. <https://www.cypc.com.cn/cypc/zxgg99/xwzx29/ssxw/2026031315011210882/index.html>.

China Yangtze Power. The ecological regulation experiment of cascade reservoirs promoting the reproduction of fish producing adhesive demersal eggs officially launched[EB/OL]. (2026-03-13)[2026-05-07]. <https://www.cypc.com.cn/cypc/zxgg99/xwzx29/ssxw/2026031315011210882/index.html>.

[29] LUO W G, ZHAO J X, HAN Y C, et al. A unified ecological flow indicator reveals long-term regime shifts and connectivity changes in a regulated river-lake system[J]. Ecological Indicators, 2026, 186: 114839.

[30] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程生态流量计算与泄放设计规范: SL/T 820—2023[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.

Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specifications on Ecological Flow Computation and Discharge Design for Water and Hydropower Projects: SL/T 820—2023[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2023.

[31] 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 Xinlei, LI Shulei, SHANG Wenxiu. 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.

[32] PEETERS A, HOUBRECHTS G, DE LE COURT B, et al. Suitability and sustainability of spawning gravel placement in degraded river reaches, Belgium[J]. Catena, 2021, 201: 105217.

(责任编辑 王海锋)