

# 乌东德水电站日调峰对下游裂腹鱼类栖息地的影响

曹俊<sup>1,2</sup>, 陈小娟<sup>1</sup>, 卢晶莹<sup>3</sup>, 邓鑫欣<sup>3</sup>, 陶江平<sup>1</sup>

- 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;
- 长江水利委员会水旱灾害防御创新团队, 湖北 武汉 430010;
- 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610000

**摘要:** 日调峰是乌东德水电站日常运行的主要出力约束和调度目标。为了探讨电站调度引起的出库流量大幅涨落对下游生态环境的不利影响, 采用河道内流量增量法, 通过构建二维水动力模型, 研究了乌东德水电站日调峰引起的下游河段水文水动力条件波动对裂腹鱼类繁殖期栖息地适宜性的影响, 并分析了2023年电站基荷发电生态调度试验效果。结果表明, 乌东德电站下泄流量低于1 160 m<sup>3</sup>/s, 坝下江段裂腹鱼类潜在产卵场面积相对较大; 流量高于2 000 m<sup>3</sup>/s, 裂腹鱼类潜在的产卵场面积显著减少。电站日调峰结束时, 出库流量降幅越大, 裂腹鱼类潜在产卵场脱水面积及鱼卵脱水风险越大。乌东德电站基荷发电生态调度期间, 坝下江段裂腹鱼类潜在产卵场的加权面积有所减少, 但潜在产卵场和鱼卵早期的脱水风险显著降低。为提高繁殖期裂腹鱼类生境适宜性和持续性, 有必要进一步减少电站日调峰频率, 降低出库流量至适宜区间。

**关键词:** 裂腹鱼类; 日调峰; 生态调度; 生态流量; 乌东德电站

**中图分类号:** X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2024)01-0087-09

水电不仅是优质可再生清洁能源, 也是我国重要的调峰电源(程海花等, 2019)。水机组具有启停迅速、爬坡率高、调峰幅度大等特点, 在电网调峰调频中发挥了重要作用(唐新华和周建军, 2013; 王伟等, 2018)。水电站日调峰的基本方式是通过发电机组启停控制电站出力, 但由此引起的下泄流量快速变化可对下游河道生态环境造成不同程度的生态风险(Hauer et al, 2017; Greimel et al, 2018; Batalla et al, 2021)。流量的快速变化形成沿河道纵向传播的周期性小型洪峰, 引起下游河道的水位、流速、流态等水文水动力学特征也呈现周期性变化, 进而对河流的水文水动力、水质水环境等造成一系列影响, 并形成对水生物种的生境胁迫。

针对水电站调峰引起的水力波动对鱼类的影响, 国外已开展了大量研究。Schmutz等(2015)通过评价澳大利亚境内16条河流的水文条件和生态差异, 认为电站日调峰引起的水位跌落速率、发生频率

等是影响这些河流鱼类生物完整性的主要外在干扰因素; Burman等(2021)研究了电站调峰调度对几种鲑科鱼类(欧洲灰鲑、大西洋鲑和褐鳟)自然繁殖的影响, 认为调峰频率可能降低这几种鲑的潜在产卵场分布, 影响程度取决于物种和生活史阶段; Barton等(2022)通过声呐遥测阵列跟踪观测赤梢雅罗鱼在泽利夫卡河的繁殖行为, 发现电站调峰导致下游赤梢雅罗鱼繁殖行为的改变, 并可以造成亲鱼产卵活动中止或在不利于鱼卵发育的生境中产卵; 此外, 也有学者研究了电站调峰对鱼类摄食、生长、洄游等方面的影响(Gandini et al, 2014; Finch et al, 2015; Jones & Petreman, 2015)。目前, 这些研究涉及鱼类种群数量和分布、个体行为表现、生活史过程等, 其中受河流管理者关注最多的方面仍是电站调峰对鱼类、大型底栖生物等造成的脱水风险(Saltveit et al, 2001; Casas-Mulet et al, 2015; Hedger et al, 2018)。

在不考虑水轮机调节性能情况下, 通常电站单机容量越大, 调峰机组的启停引起电站下泄流量的变幅越大, 对下游河道水力条件及水生生境的扰动程度也越大。乌东德水电站作为金沙江下游的骨干水利工程, 单机容量居世界第二, 其调峰调度对流域生态环境的影响目前研究和关注较少。有学者和研究机构认为金沙江水位的快速波动可能对下游生态环境造成不利影响(蒋艳等, 2009; 长江水资源保护科

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200304); 中国三峡建工(集团)有限公司技术服务项目(合同号: JG-EP-0421003)。

作者简介: 曹俊, 1990年生, 男, 工程师, 主要从事生态流量与生态调度研究。E-mail: cjtjts@126.com

通信作者: 陈小娟, 1981年生, 女, 研究员, 主要从事水生态保护与修复研究。E-mail: chenxiaojuan@mail.ihe.ac.cn

学研究所,2015),但具体影响评价及缓解修复措施仍缺乏针对性研究。自 2021 年起,乌东德水电站开始实施基荷发电生态调度试验,这也是国内水利工程开展基荷发电生态调度的首例。基荷发电生态调度是通过减少电站调峰频率、降低电站出库流量峰谷差,以稳定坝下河段水位波动、减少水位大幅波动对鱼类自然繁殖不利影响的水库调度方式。浅滩生境作为水位波动影响最直接的河流生境类型,本研究以流水浅滩产卵的裂腹鱼类为研究对象,分析乌东德水电站日调峰调度对坝下江段裂腹鱼类繁殖期栖息地适宜性的影响,检验 2023 年基荷发电生态调度试验效果,旨在为优化水库生态调度与生态流量、开展鱼类栖息地保护与修复提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

乌东德水电站是金沙江下游梯级水电开发的第一级,控制流域面积 40.6 万  $\text{km}^2$ ,坝址天然多年平均流量 3 850  $\text{m}^3/\text{s}$ 。本文以乌东德坝下、白鹤滩库尾的流水江段——金沙江干流乌东德尾水口至普渡河河口段为研究区域,长度约 37 km(图 1)。

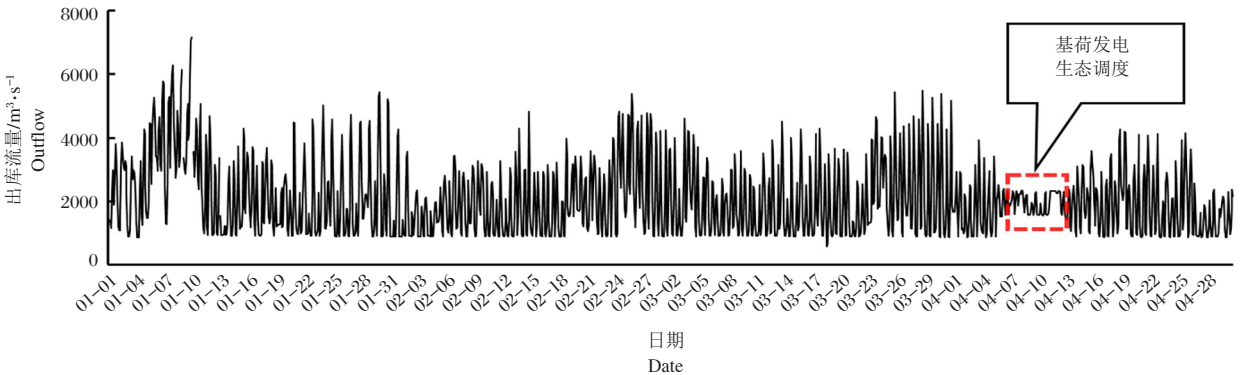


图 2 2023 年 1-4 月乌东德水库出库流量

Fig.2 Outflow of Wudongde reservoir from January to April, 2023

### 1.3 研究方法

1.3.1 鱼类产卵场生境指标选取 裂腹鱼通常栖息于高原地区水体,在流水浅滩上产卵。针对其产卵场特征,有学者通过对比野外产卵场和非产卵场水文水动力学特征,认为齐口裂腹鱼的产卵适宜水深为 0.5~1.5 m,适宜流速为 0.5~2.5 m/s(陈明千等,2013;李福霜等,2023);还有学者基于野外监测经验及国内相关研究观点,提出齐口裂腹鱼适宜产卵水深为 0.15~1.5 m,适宜流速为 0.07~1.5 m/s(孙莹等,2015;李轩等,2023);何清燕等(2018)参照大西洋鲑等冷水鱼的产卵生境,认为重口裂腹鱼产卵的最小水深为 0.6 m,最低流速为

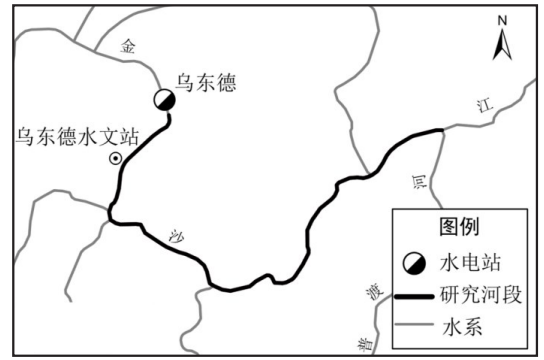


图 1 研究区域

Fig.1 Schematic map of the study area

### 1.2 水电站日调峰

依照调度规程和电网要求,乌东德水电站日常主要承担调峰调频任务。2023 年 1-4 月监测时段内的乌东德水电站出库流量过程如图 2 所示。期间电站日常运行主要采用早峰和晚峰双调峰调度方式,早峰调度通常在 10:00 左右,晚峰调度通常在 20:00 左右,峰荷运行持续时长基本不超过 2 h,基荷运行持续时长不超过 6 h。4 月 6-12 日电站实施了缓解下游水位波动的基荷发电生态调度试验,降低了电站峰谷负荷差及出库流量波动。

0.3 m/s;颜文斌等(2017)对野外围格的短须裂腹鱼产卵场行为进行原位观测,认为其偏好在 0.25~0.45 m 的流水环境中产卵。综上并结合野外监测及人工繁育等相关经验,本研究选取金沙江下游裂腹鱼类的产卵适宜水深为 0.2~1.5 m,适宜流速为 0.5~2.5 m/s。

1.3.2 鱼类栖息地模拟 首先,通过建立二维水动力学模型,模拟乌东德不同出库流量工况坝下江段的水文水动力条件,并采用水文站实测资料进行模型率定和验证;其次,结合目标鱼类自然繁殖对水深和流速适宜性需求,通过地学统计方法,提取目标鱼类潜在产卵场的空间分布,并通过不同河床淹没区域的空间重叠

关系,分析河床和潜在产卵场在不同工况下的脱水面积。水动力学模型采用HEC-RAS 6.4.1软件求解完整的浅水方程,模拟工况分别选择8个电站出库流量情景(表1)。鱼类潜在产卵场的提取、脱水面积计算等相关地理空间统计分析采用ArcGIS for Desktop 10.2和R 4.3.1软件完成。因地形等资料掌握有限,本研究不考虑白鹤滩水库回水对研究江段水动力条件的影响。

表1 模拟工况

Tab.1 Simulated scenarios

序号	模拟工况/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	工况特性/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
1	900	1-2月电站最小下泄流量
2	1160	3-7月电站最小下泄流量
3	2000	+840
4	3000	+1000
5	4000	+1000
6	5000	+1000
7	6000	+1000
8	7000	+1000

1.3.3 鱼类繁殖期栖息地综合适宜度评价 对于繁殖期的鱼类,其潜在产卵场面积越大,维持时间越长,则能提供目标鱼类产卵的机会更多,栖息地综合适宜度越高。为评估水文水动力快速变化条件下裂腹鱼类的栖息地综合适宜度,分析2023年乌东德基荷发电生态调度试验效果,本研究提出一种时间加权的潜在产卵场面积( $S_{nw}$ )作为裂腹鱼类繁殖期栖息地综合适宜度的参考指标,计算公式如下:

$$S_{nw} = \frac{\sum S_i \cdot t_i}{\sum t_i} \quad (1)$$

式中: $S_{nw}$ 为评价期内时间加权的潜在产卵场面积( $\text{万 m}^2$ ), $S_i$ 为情景*i*对应的目标鱼类潜在产卵场面积( $\text{万 m}^2$ ), $t_i$ 为评价期内情景*i*的持续时长(h)。

在计算 $S_{nw}$ 时,对电站的运行工况等进行分段概化处理。流量数据时间间隔为2 h,每2 h内电站出库流量视为恒定值 $Q_i$ ,即电站在工况 $Q_i$ 下的运行持续时长为2 h;对应的鱼类潜在产卵场面积 $S_i$ 采用临近工况的模拟值进行线性插值估计。低于900  $\text{m}^3/\text{s}$ 和高于7000  $\text{m}^3/\text{s}$ 工况下的鱼类潜在产卵场面积采用900  $\text{m}^3/\text{s}$ 和7000  $\text{m}^3/\text{s}$ 工况模拟值代替。

## 2 结果与分析

### 2.1 流量大小对下游河道物理生境条件的影响

根据模型结果,8种工况下研究江段的水面面积变化如图3所示,水深和流速大小分布如图4和

图5所示。乌东德坝下河道淹没水面面积、平均水深及平均流速均随着上游电站出库流量的增加而增加;反之,随出库流量的减少而降低。当电站出库流量从7000  $\text{m}^3/\text{s}$ 降至900  $\text{m}^3/\text{s}$ ,河床淹没面积从773.15  $\text{万 m}^2$ 降至563.30  $\text{万 m}^2$ ,河道平均水深从11.30 m降至6.83 m,平均流速从2.76  $\text{m/s}$ 降至1.05  $\text{m/s}$ ;此外,电站出库流量每减少1000  $\text{m}^3/\text{s}$ ,河床淹没面积平均减少34.2  $\text{万 m}^2$ 。流量越低时,减少单位流量引起的河床脱水面积越大。

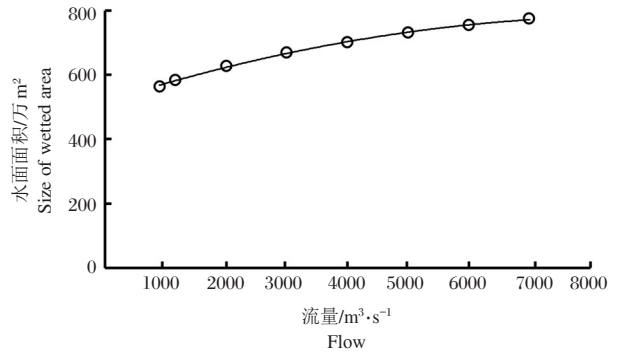


图3 不同流量工况的河床淹没面积

Fig.3 Inundated area of the riverbed under different flow conditions

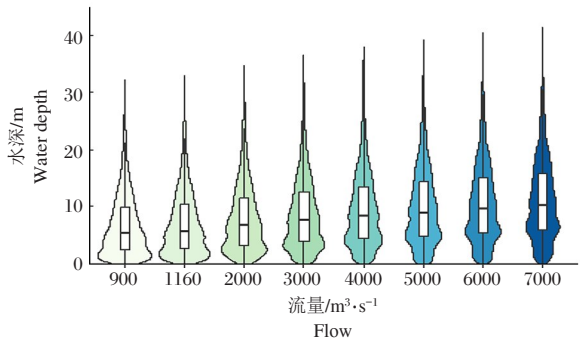


图4 不同流量工况的河道水深

Fig.4 Water depth in the river reach under different flow conditions

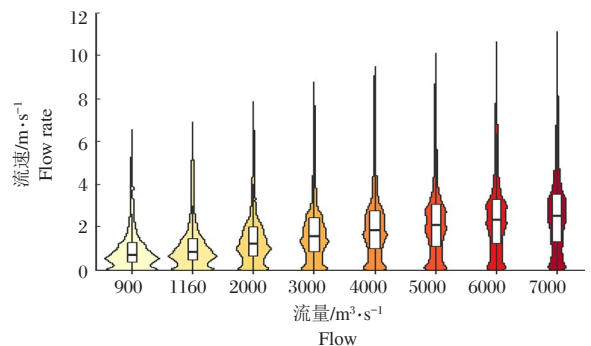


图5 不同流量工况的水流速度

Fig.5 Flow rate in the river reach under different flow conditions

## 2.2 流量大小对裂腹鱼类潜在产卵场分布的影响

根据模型结果,不同流量工况下裂腹鱼类在研究江段的潜在产卵场分布如图 6 所示。从空间分布来看,乌东德坝下裂腹鱼类潜在产卵场沿程空间分布不均,主要位于坝址以下 17 km 至普渡河口,17 km 以上至坝下几乎无分布。乌东德出库流量低于 2 000 m<sup>3</sup>/s 时,坝下裂腹鱼类潜在产卵场分布于主河槽浅滩及少量岸滩区域,2 处典型潜在产卵场主要分布于坝址下游 20 km 处(大

坪子村)和 29 km 处(黄草坪村),面积分别约 10.6 万 m<sup>2</sup> 和 8.7 万 m<sup>2</sup>;流量升至 2 000 m<sup>3</sup>/s 以上时,由于河道水文和水动力条件发生改变,大坪子村和黄草坪村潜在产卵场逐渐丧失,整个河段裂腹鱼类潜在产卵场主要分布于沿江岸滩区域,空间上呈零星状分布,面积显著减少;流量升至 5 000 m<sup>3</sup>/s 以上时,沿江岸滩的潜在产卵场面积进一步减少,仅在坝址下游 25 km 处(火头田村)形成 1 处分布较为连续的潜在产卵场,面积约 5.8 万 m<sup>2</sup>。

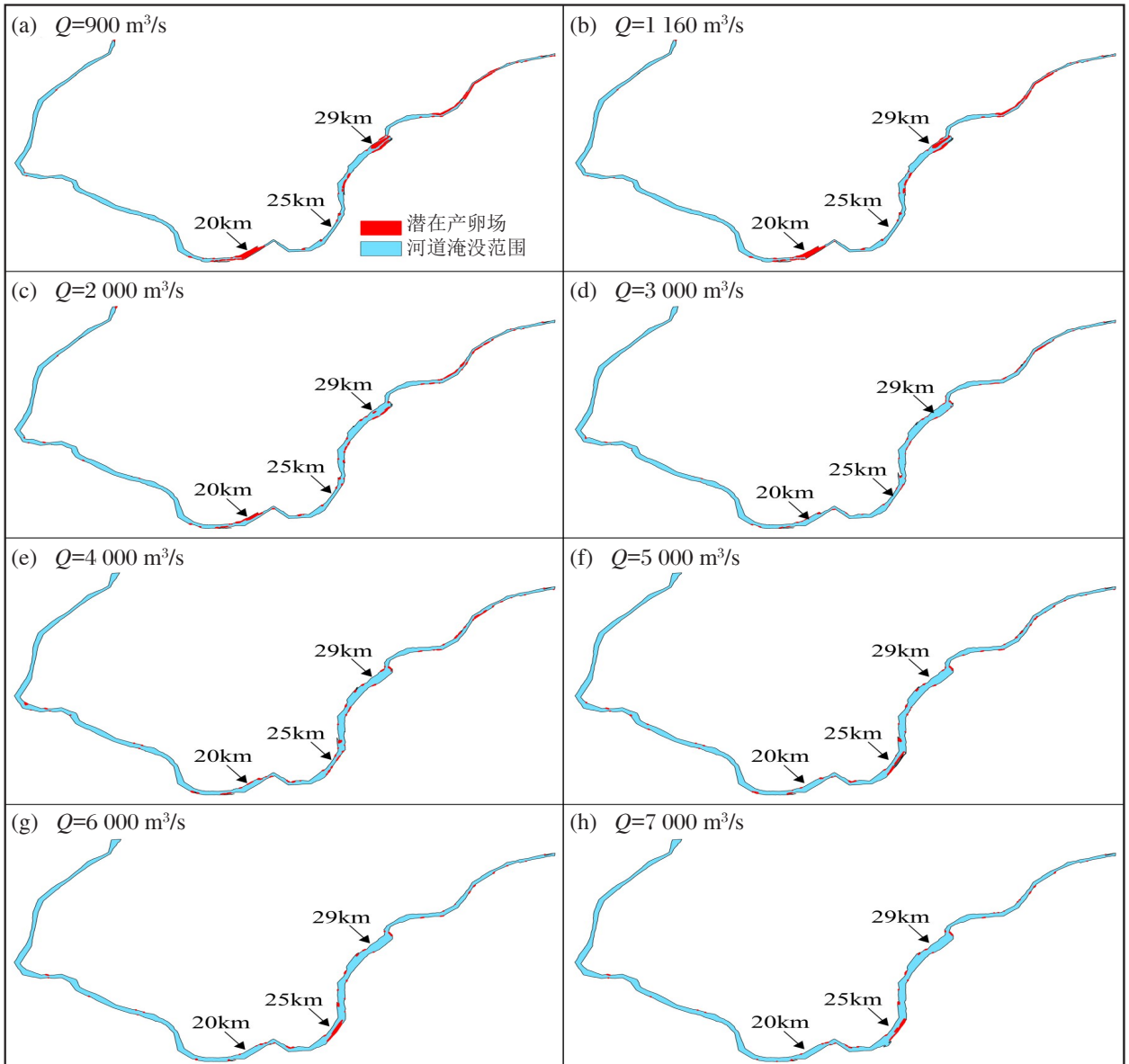


图 6 不同流量工况的裂腹鱼类潜在产卵场分布

Fig.6 Spatial distribution of the potential spawning areas (PSAs) under different flow conditions

不同流量工况下裂腹鱼类在研究江段的潜在产卵场面积如图 7 所示。结果表明,乌东德坝下裂腹鱼类潜在产卵场随流量条件变化而变化,8 种不同流量条件下,裂腹鱼类潜在产卵场面

积为 4.3 万~25.2 万 m<sup>2</sup>, 占河床淹没面积的 0.6%~4.5%。整体上看,流量低于 1 160 m<sup>3</sup>/s 时,适合裂腹鱼类产卵的生境面积相对较大,为 22.6 万~25.2 万 m<sup>2</sup>;流量高于 2 000 m<sup>3</sup>/s 时,适合裂腹鱼类产卵的生

境面积相对较小,为4.3万~8.0万 $\text{m}^2$ ,相比前者平均减少了76.5%;表明适宜下游江段裂腹鱼类产卵的乌东德电站出库流量不宜超过2000 $\text{m}^3/\text{s}$ 。

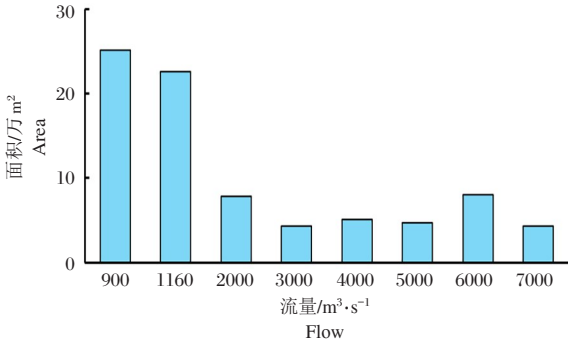


图7 不同流量工况的裂腹鱼类潜在产卵场面积

Fig.7 PSAs under different flow conditions

### 2.3 不同退水事件下产卵场和卵早期脱水风险

根据模拟结果,8种流量条件构成的28种不同退水情景下乌东德坝下江段裂腹鱼类潜在产卵场的脱水面积如图8所示。结果表明,河道退水情景下,坝下裂腹鱼类潜在产卵场脱水面积为1.2万~30.4万 $\text{m}^2$ 。整体趋势上,不同退水情景下的流量降幅越大,裂腹鱼类潜在产卵场脱水面积越大。从减少单位流量引起的裂腹鱼类潜在产卵场脱水面积来看,流量越小,坝下江段裂腹鱼类潜在产卵场的脱水面积越大。由于裂腹鱼卵通常沉于河床底部孵化发育,产卵场的脱水可以进一步造成产于该产卵场的粘沉性鱼卵脱水。因此,乌东德电站日调峰结束时,出库流量降幅越大,坝下裂腹鱼卵发生脱水的风险也越大,且低流量条件下不利效应更加明显。

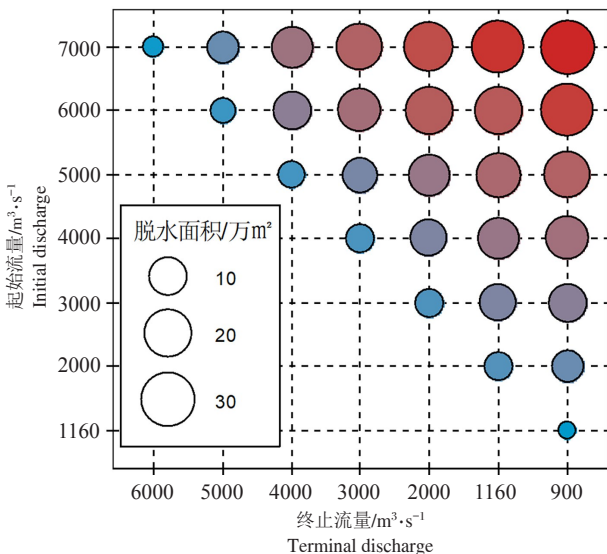
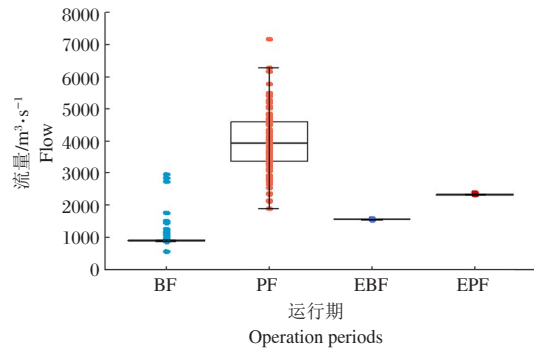


图8 不同退水情景下裂腹鱼类潜在产卵场脱水面积

Fig.8 Dewatered PSAs under different reduction scenarios

### 2.4 电站基荷发电生态调度实施效果

2.4.1 电站出库流量特征 统计2023年1~4月乌东德电站峰荷和基荷出库流量如图9所示。在非生态调度期间,除1月中上旬部分时段外,乌东德电站的基荷出库流量均值为900 $\text{m}^3/\text{s}$ ,峰荷出库流量均值为3932 $\text{m}^3/\text{s}$ ,最高峰值流量为7170 $\text{m}^3/\text{s}$ ,峰谷流量差为990~6270 $\text{m}^3/\text{s}$ 。生态调度期间,电站基荷出库流量均值为1560 $\text{m}^3/\text{s}$ ,峰荷出库流量均值为2300 $\text{m}^3/\text{s}$ ,峰谷流量差为740 $\text{m}^3/\text{s}$ 。相比非生态调度期间,生态调度试验提高了乌东德基荷出库流量,降低了峰荷出库流量,调峰周期内电站出库流量峰谷差显著缩小。



BF和PF表示非生态调度期间基荷和峰荷出库流量,EBF和EPF表示生态调度期间基荷和峰荷出库流量

图9 非生态调度和生态调度期间乌东德电站峰谷流量

BF and PF indicate base-load flow and peak-load flow during the non-ecological period, EBF and EPF indicate base-load flow and peak-load flow during the ecological period

Fig.9 Peak-load flow and base-load flow in non-ecological and ecological operation periods

2.4.2 鱼类潜在产卵场面积 计算结果表明,非生态调度和生态调度期间裂腹鱼类潜在产卵场的时间加权面积分别为13.9万 $\text{m}^2$ 和10.3万 $\text{m}^2$ ,表明生态调度期间裂腹鱼类潜在产卵场面积相比非生态调度期间有所减少。主要原因在于生态调度期间乌东德电站每日处于适宜生态流量区间(低于2000 $\text{m}^3/\text{s}$ )的平均时间略有缩短。由于电站出库流量低于2000 $\text{m}^3/\text{s}$ 流量条件坝下裂腹鱼类潜在产卵场面积显著增加,而高于此流量条件的面积相差不大,因此电站在出库流量低于2000 $\text{m}^3/\text{s}$ 工况下的运行时间长短会显著影响下游江段裂腹鱼类栖息地综合适宜度。以2000 $\text{m}^3/\text{s}$ 为临界值,研究期间乌东德出库低于此流量的每日时长如图10所示。非生态调度期间每日下泄流量低于2000 $\text{m}^3/\text{s}$ 的平均时长为13.3h,而生态调度期间平均时长为12.3h,平均缩短了1h。此外,非生态调度和生态调度期间裂腹鱼类潜在产卵场的时间加权面积相比恒定流情景900 $\text{m}^3/\text{s}$ 和1160 $\text{m}^3/\text{s}$ 流量条件平均减少了41.9%

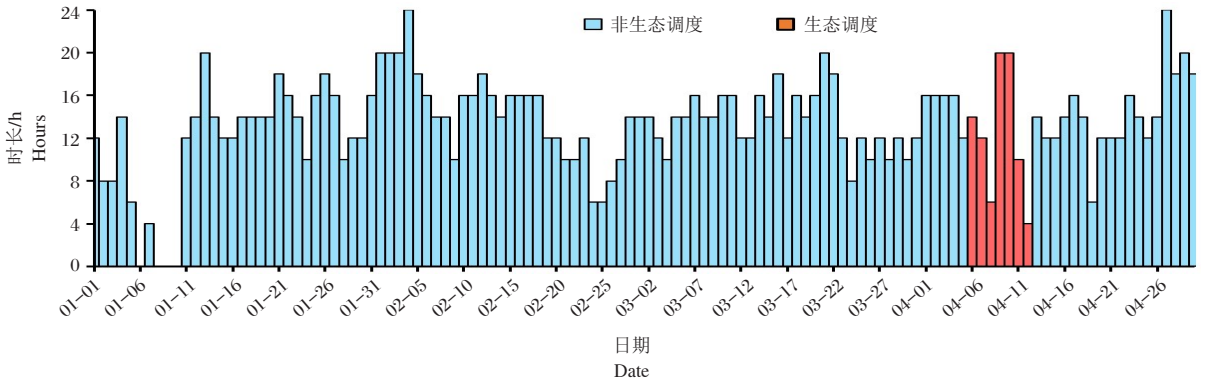


图 10 电站出库流量低于  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  的每日时长

Fig.10 Daily hours for power plant discharge less than  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$

和 54.5%，这意味着无论是生态调度还是非生态调度期间，电站日调峰调度均引起了下游江段裂腹鱼类栖息地适宜性的显著下降。

**2.4.3 鱼卵早期脱水风险** 1-4 月乌东德电站日调峰引起的退水事件如图 11 所示。结果显示，非生态调度期间，电站调峰引起的出库流量降幅在  $110\sim 4885 \text{ m}^3/\text{s}$ ，生态调度期间为  $380\sim 880 \text{ m}^3/\text{s}$ ，可见生态调度试验大幅缩小了电站日调峰结束引起的流量降幅，基本避免了非生态调度期间河道大幅度退水事件(图 11 右侧框内的红点)。退水事件中乌东德出库流量降幅越大，下游江段裂腹鱼类潜在产卵场脱水面积越大、鱼卵脱水风险越高，表明随着峰谷流量差的降低，乌东德生态调度试验降低了坝下裂腹鱼卵早期的脱水风险，减轻了日调峰对裂腹鱼类自然繁殖可能造成的不利影响。

目前，基于水动力学模拟的水生生物物理栖息地评价方法在国内外已广泛使用，如物理栖息地适宜度模型(Maddock, 1999; Yi et al, 2017)，但较少研究关注物理栖息地在时间和空间维度上的连续性。当流量条件发生变化时，目标物种的适宜生境空间分布发生改变，伴随着部分生境由适宜区域转变为非适宜区域，部分生境由非适宜区域转变为适宜区域。以粘沉性鱼卵为例，由于鱼卵在孵化前不具备主动迁移能力，通常停留在原产卵场孵化、发育。当产卵场水文条件发生变化、孵化区域从河床淹没区演变成非淹没区时，鱼卵并不会主动迁移至其他淹没区或新生的适宜生境，即会发生脱水风险，但此时目标鱼类总的可利用栖息地面积可能保持不变甚至增加，这表明栖息地可利用面积大小并不能全面反映鱼类在早期生活史阶段对适宜生境的需求。

除鱼类早期孵化育幼阶段外，鱼类在产卵场选择、配偶挑选以及产卵过程等也需要栖息地在高适宜度区间维持足够的时长。颜文斌等(2017)观察野外水域短须裂腹鱼的产卵行为，发现其产卵活动按时序包括产卵场探索、产卵场占据与领域争夺、配偶互动及选择、交配、护卫等行为，其产卵前特殊状态行为一般可能持续数小时至数日不等，表明裂腹鱼类同大多数其他鱼类一样，产卵前存在特殊行为时期，这期间保证生境的高适宜度对于亲鱼的生物信息交换、雌雄配对等生殖活动是十分重要的前提条件；其研究还发现，短须裂腹鱼为分批产卵型，1 尾雌鱼 1 d 可产卵 8 次，这意味着产卵场需维持足够久的适宜度才能保证亲鱼完成整个产卵过程。因此，维持目标物种物理栖息地在时间尺度上的连续性，对于评价非恒定流条件下鱼类物理栖息地适宜性十分重要。

此外，非恒定流条件下鱼类潜在产卵场的空间分布随流量变化而呈现非线性变化，对于定量评

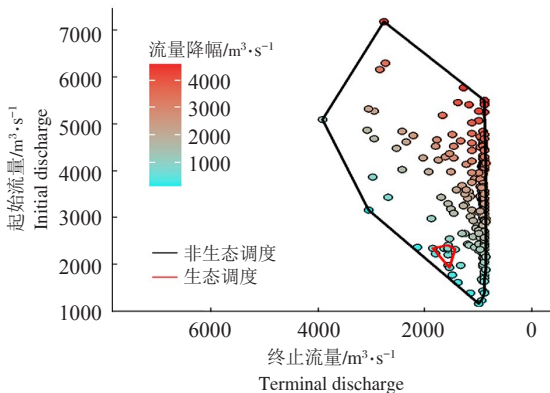


图 11 非生态调度和生态调度期间退水事件

Fig.11 Flow recession events during non-ecological and ecological operation periods

### 3 讨论

#### 3.1 非恒定流条件鱼类栖息地适宜性及面积变化

非恒定流是自然界河流水动力学的基本特征。

估鱼类产卵场和鱼卵早期的脱水风险也会造成额外困难和不确定性。本研究中,乌东德出库流量恒定为 $7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,坝下裂腹鱼类潜在产卵场面积为 $3.4\ \text{万}\ \text{m}^2$ ,恒定流量 $900\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,潜在产卵场面积为 $25.2\ \text{万}\ \text{m}^2$ ;但退水情景中乌东德出库流量从 $7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 降至 $900\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,始末状态下鱼类潜在产卵场面积有所增加,潜在产卵场脱水面积却为 $30.4\ \text{万}\ \text{m}^2$ 。主要原因是在乌东德出库流量过程中,下游江段裂腹鱼类潜在产卵场的空间分布不断变化,主河槽淹没区域演化出新的潜在产卵场,新形成的潜在产卵场在此退水过程中也发生了脱水,造成了潜在产卵场脱水面积和鱼卵脱水风险的不断累积。整个退水过程中,产卵场的脱水面积不仅包含了 $7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 恒定流状态下产卵场的脱水面积,还包含了该过程中新增潜在产卵场的脱水面积。基于此,本研究采用 $7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}\rightarrow 6\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $6\ 000\ \text{m}^3/\text{s}\rightarrow 5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 、……、 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}\rightarrow 1\ 160\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $1\ 160\ \text{m}^3/\text{s}\rightarrow 900\ \text{m}^3/\text{s}$ 先分段、后综合的方式,使用二维恒定流模拟结果来估算 $7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}\rightarrow 900\ \text{m}^3/\text{s}$ 退水情景下的潜在产卵场脱水面积,以提高模拟结果的可靠性;分段的精细程度也对最终估算的脱水面积有直接影响,分段越精细,脱水面积估算越精确,但也会产生较大的计算成本。此外,虽然此问题也可采用二维非恒定流模拟该江段的水动力学条件,但一方面会导致计算成本偏高;另一方面,在使用非恒定流模拟结果估算鱼类潜在产卵场脱水面积时,也会面临类似的时间分割问题。

### 3.2 低流量情景更符合裂腹鱼类产卵生境需求

大量研究表明,生物群落与非生物环境之间的相互依存关系是由物种的生态习性以及栖息地分布区域的地势地貌、水文气象等因素共同作用的结果(Dunson & Travis, 1991; Jackson et al, 2001; Turcotte et al, 2012)。乌东德坝址处于低纬度高原区,属于干热河谷气候,年内径流分布不均,汛期径流量占全年的80%以上,枯水期径流量不到20%。从裂腹鱼类的主要繁殖季节来看,在金沙江下游为冬春季,正处于枯水期;该时期河道水位消落、流速减缓、沙洲出露、浅滩交错,易形成适宜裂腹鱼类产卵的流水浅滩型生境。本研究表明,低流量情景乌东德坝下河段生境条件更符合裂腹鱼类产卵的生境需求,高流量情景坝下河段的整体适宜性降低,与自然条件下裂腹鱼类的繁殖习性相吻合。根据本研究结果,2020年水利部批复的《金沙江流域水量分配方案》乌东德水电站下泄生态流量目标 $900\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $1\ 160\ \text{m}^3/\text{s}$ 是坝下江段裂腹鱼

类繁殖期的适宜流量。但枯水期生态流量目标并不是越大越好,生态流量的制定需要基于研究区域生态系统的结构特征及保护对象的生态习性而因地制宜。

根据乌东德电站目前的运行调度方式,由于调峰机组的频繁启停,每天运行在低流量的持续时间较短,生态保护目标鱼类产卵的适宜生境可能极为短暂。针对裂腹鱼类繁殖期的生态调度,乌东德电站有必要进一步降低峰荷出库流量以及日调峰频率,减少电站峰荷出库流量,并尽可能降至 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以下,可以促使下游河道水位消落,形成浅滩生境,保障裂腹鱼类栖息地适宜性以及潜在产卵场面积;减少电站日调峰频率,可以进一步降低下游河道水位波动,有助于维持裂腹鱼类栖息地足够久的高适宜度,保障亲鱼顺利完成产卵场挑选、生物信息交流、雌雄配对、分批产卵等个体和群体生殖行为。

### 参考文献

- 陈明千,脱友才,李嘉,等,2013. 鱼类产卵场水力生境指标体系初步研究[J]. 水利学报, 44(11):1303-1308.
- 长江水资源保护科学研究所,2015. 金沙江乌东德水电站环境影响报告书[R]. 武汉:长江水资源保护科学研究所.
- 程海花,寇宇,周琳,等,2019. 面向清洁能源消纳的流域型风光水多能互补基地协同优化调度模式与机制[J]. 电力自动化设备, 39(10):61-70.
- 何清燕,刘明洋,蒋辉霞,等,2018. 冷水鱼类产卵季生态需水量研究——以重口裂腹鱼为例[J]. 吉林水利, (5):38-40.
- 蒋艳,冯顺新,马巍,等,2009. 金沙江下游梯级水电开发对鱼类影响的分析[C]/西安:第四届全国水力学与水利信息学学术大会论文集.
- 李福霜,李洪,由丽华,等,2023. 水库变动回水区鱼类产卵场生境重塑的生态调度目标研究[J]. 中国农村水利水电, (8): 70-76,81.
- 李轩,赵进勇,张晶,等,2023. 赤水河上游鱼类产卵场砾石群修复模拟研究[J]. 长江流域资源与环境, 32(5):939-949.
- 孙莹,牛天祥,王玉蓉,等,2015. 基于地形重塑的鱼类栖息地模拟修复设计[J]. 环境影响评价, 37(3):29-32.
- 唐新华,周建军,2013. 梯级水电群联合调峰调能研究[J]. 水力发电学报, 32(4):260-266.
- 王伟,梅亚东,鲍正风,2018. 基于日调峰模式的梯级电站长期调峰效益模型[J]. 水力发电学报, 37(2):47-58.
- 颜文斌,朱挺兵,吴兴兵,等,2017. 短须裂腹鱼产卵行为观察[J]. 淡水渔业, 47(3):9-15.
- Bartoň D, Brabec M, Sajdlová Z, et al, 2022. Hydropeaking causes spatial shifts in a reproducing rheophilic fish[J]. Science of the Total Environment, 806:150649.

- Batalla R J, Gibbins C N, Alcázar J, et al, 2021. Hydropeaked rivers need attention[J]. *Environmental Research Letters*, 16(2):021001.
- Burman A J, Hedger R D, Hellström J G I, et al, 2021. Modelling the downstream longitudinal effects of frequent hydropeaking on the spawning potential and stranding susceptibility of salmonids[J]. *Science of the Total Environment*, 796:148999.
- Casas-Mulet R, Saltveit S J, Alfredsen K, 2015. The survival of Atlantic salmon (*Salmo salar*) eggs during dewatering in a river subjected to hydropeaking[J]. *River Research and Applications*, 31(4):433-446.
- Dunson W A, Travis J, 1991. The role of abiotic factors in community organization[J]. *The American Naturalist*, 138(5):1067-1091.
- Finch C, Pine Iii W E, Limburg K E, 2015. Do hydropeaking flows alter juvenile fish growth rates? A test with juvenile humpback chub in the Colorado River[J]. *River Research and Applications*, 31(2):156-164.
- Gandini C V, Sampaio F A C, Pompeu P S, 2014. Hydropeaking effects of on the diet of a Neotropical fish community [J]. *Neotropical Ichthyology*, 12:795-802.
- Greimel F, Schülting L, Graf W, et al, 2018. Hydropeaking impacts and mitigation[J]. *Riverine Ecosystem Management*, 8:91-110.
- Hauer C, Siviglia A, Zolezzi G, 2017. Hydropeaking in regulated rivers: from process understanding to design of mitigation measures[J]. *Science of the Total Environment*, 579: 22-26.
- Hedger R D, Sauterleute J, Sundt-Hansen L E, et al, 2018. Modelling the effect of hydropeaking-induced stranding mortality on Atlantic salmon population abundance[J]. *Ecohydrology*, 11(5):e1960.
- Jackson D A, Peres-Neto P R, Olden J D, 2001. What controls who is where in freshwater fish communities the roles of biotic, abiotic, and spatial factors[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(1):157-170.
- Jones N E, Petreman I C, 2015. Environmental influences on fish migration in a hydropeaking river[J]. *River Research and Applications*, 31(9):1109-1118.
- Maddock I, 1999. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health[J]. *Freshwater Biology*, 41(2):373-391.
- Saltveit S J, Halleraker J H, Arnekleiv J V, et al, 2001. Field experiments on stranding in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) during rapid flow decreases caused by hydropeaking[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 17(4/5):609-622.
- Schmutz S, Bakken T H, Friedrich T, et al, 2015. Response of fish communities to hydrological and morphological alterations in hydropeaking rivers of Austria[J]. *River Research and Applications*, 31(8):919-930.
- Turcotte M M, Corrin M S C, Johnson M T J, 2012. Adaptive evolution in ecological communities[J]. *PLoS Biology*, 10(5):e1001332.
- Yi Y, Cheng X, Yang Z, et al, 2017. Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68:748-762.

(责任编辑 万月华)



## Effects of Daily Peak-shaving on Schizothoracine Fish Habitat Downstream of Wudongde Hydropower Station

CAO Jun<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-juan<sup>1</sup>, LU Jing-ying<sup>3</sup>, DENG Xin-xin<sup>3</sup>, TAO Jiang-ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem, Ministry of Water Resources, Hubei Engineering Research Center of Hydroecology Protection and Restoration, Wuhan 430079, P.R. China;

2. Innovation Team for Flood and Drought Disaster Prevention of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R. China;

3. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610000, P.R. China)

**Abstract:** Daily peak-shaving is the main output constraint and scheduling goal for daily operation of the Wudongde hydropower plant, but the sharp rise and fall of reservoir outflow caused by scheduling has also adversely impacted the downstream aquatic habitat. In this study, Schizothoracinae were selected for a case study, and we analyzed the effects of fluctuating hydrological and hydrodynamic conditions caused by daily peak-shaving at Wudongde hydropower plant on the physical habitats of Schizothoracine species during spawning season. Additionally, we analyzed the effectiveness of ecological operation based on baseload-power-generation at Wudongde hydropower plant in 2023. The aim of the study was to provide a reference for optimizing ecological regulation and flow, and support efforts to conserve and restore fish habitat. The river reach studied is from Wudongde Dam to the Pudu River estuary, stretching 37 km. A two-dimensional hydrodynamic model was constructed using the instream flow incremental method, and the hydrological and hydrodynamic conditions of the Wudongde hydropower plant were simulated under eight flow scenarios. Results show that the potential spawning areas (PSAs) of Schizothoracinae were relatively large when the discharge from Wudongde hydropower plant was less than 1 160 m<sup>3</sup>/s, and the size of the PSAs decreased significantly when the discharge exceeded 2 000 m<sup>3</sup>/s. When the power plant used daily peak-shaving, the larger the decrease of discharge, the larger the dewatered PSAs, and the higher the egg-dewatering risk. During ecological operation in 2023, based on baseload-power-generation of Wudongde hydropower plant, the time-weighted size of PSAs for Schizothoracine species decreased slightly in reaches below the dam, but the dewatering risk of the PSAs and eggs was significantly reduced. To improve habitat suitability and duration for Schizothoracinae during spawning season, we recommend further reduction in the frequency of peak-shaving and decreased outflow at Wudongde hydropower plant.

**Key words:** Schizothoracine fishes; daily peak-shaving; ecological operation; ecological flow; Wudongde hydropower plant