



满足不同鱼类产卵需求的水库分组生态调度技术

胡鹏, 杨泽凡^{*}, 王浩, 闫肖瑶, 曾庆慧

中国水利水电科学研究院, 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038

^{*} E-mail: yangzefan@126.com

收稿日期: 2024-09-08; 接受日期: 2024-12-09; 网络版发表日期: 2025-03-11

国家重点研发计划项目(编号: 2022YFC3205000)和国家自然科学基金项目(批准号: U2240202, 52394233)资助

摘要 现阶段水库生态调度往往以促进“四大家鱼”等特定鱼类产卵为目标, 无法兼顾大多数鱼类需求. 如何在有限的生态调度期间, 满足更多种鱼类产卵需求是生态调度深入实施阶段面临的重要问题. 本文提出一套兼顾鱼类差异化产卵需求的分组生态调度技术, 将研究区土著鱼类根据产卵时间、产卵类型和水温要求进行分组, 确定水库生态调度的总体框架; 针对每一分组, 改进产卵生境适宜度评价方法, 协调产粘沉性卵和漂流性卵鱼类出库流量和水位变化约束, 提出最大化满足该调度期土著鱼类产卵需求的出库流量过程. 将该技术应用于金沙江下游梯级水库生态调度方案优化, 将生态调度临界水温设定为13.5℃, 16℃, 20℃和 22℃, 并提出基于产卵成效评价的生态调度时机优化策略, 形成不同时段兼顾鱼类差异化产卵需求的生态调度方案, 在不增加生态调度总的次数和时间前提下, 通过4次分组调度, 实现对土著鱼类产卵需求的覆盖率达到90%以上.

关键词 生境, 产卵, 鱼类, 水库, 生态调度

1 引言

我国是世界上筑坝数量最多的国家, 产生了防洪、发电、供水等巨大效益, 但也导致河流天然水文情势、水温节律改变等问题, 对鱼类栖息繁殖生境造成剧烈干扰, 长江生物完整性一度达到最差的“无鱼”级别^[1]. 开展生态调度是缓解水库生态环境影响的重要措施, 20世纪90年代以来, 美国^[2,3]、西班牙^[4]、澳大利亚^[5]等国家陆续实施面向鱼类产卵繁殖的生态调度试验, 取得了显著成效, 但也面临生态调度目标单一、与其他调度方式协调性差等问题, 往往造成生态

效益的发挥存在掣肘. 自2011年起, 长江三峡水库在国内率先开展面向鱼类产卵的水库生态调度实践, 2017年后, 逐步将金沙江下游水库群纳入生态调度范围, 覆盖长江干流超过2000 km江段, 成为世界上最大规模的梯级水库群联合生态调度. 三峡-金沙江下游梯级水库生态调度有效促进了长江鱼类自然产卵繁殖, 截至2023年, 长江中游“四大家鱼”累计总产卵规模达382.5亿粒, 较实施前增加了40倍以上, 家鱼数量基本恢复至建坝前水平^[6]. 近年来, 黄河小浪底、雅砻江锦屏一级、汉江丹江口等大型水利水电工程也逐步开始面向鱼类生境保护的生态调度实践, 但均处于探索和

引用格式: 胡鹏, 杨泽凡, 王浩, 等. 满足不同鱼类产卵需求的水库分组生态调度技术. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 955–967
Hu P, Yang Z F, Wang H, et al. A grouped ecological operation technique to accommodate the spawning needs of different fish species (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 955–967, doi: 10.1360/SST-2024-0230

发展阶段^[7]。

围绕水库生态调度, 国内外学者已深入研究鱼类繁殖所需的适宜水动力条件、栖息地保护策略及生态调度方法。当前研究主要采取两种路径: 一是以生态适宜流量^[8]、自然水文情势改变程度^[9]为基准, 制定中长期生态调度策略; 二是将水电站下泄流量转化为影响河流目标物种栖息地适宜度的关键因素, 并结合其繁殖所需的流量变化、水位波动和持续时间等条件, 通过短期调整水库下泄过程, 创造出有利于鱼类产卵的水文水动力条件^[10-12]。其中, 对于产粘性卵鱼类, 主要采用“基荷发电调度”模式, 严格控制水库出库流量与日内水位变化, 缓解水位频繁大幅度波动对产粘性卵鱼类繁殖孵化的不利影响^[13]; 而对于产漂流性卵鱼类, 则实施“人造洪峰调度”模拟洪水过程, 通过控制水库下泄流量制造特定的涨水-退水过程, 营造水流态多样性, 刺激产漂流性卵鱼类产卵繁殖^[10]。

然而, 现阶段生态调度往往以“四大家鱼”等特定鱼类产卵为调控目标, 虽然调度期间也能监测到其他鱼类产卵, 但监测到的产卵鱼类仍然为少数, 鱼类物种多样性恢复、珍稀特有鱼类保护效果并不明显。根据2020~2023年金沙江下游鱼类早期资源监测数据, 生态调度期间只采集到产卵鱼类26种, 不足现存物种的一半, 尤其是圆口铜鱼、长薄鳅、裂腹鱼等珍稀特有鱼类产卵极少。如何在有限的生态调度期间, 满足更多种土著鱼类产卵需求是生态调度深入实施阶段需要考虑的重要问题。

目前针对粘性卵鱼类的“基荷发电调度”和针对漂流性卵鱼类的“人造洪峰调度”是独立开展的, 但在“人造洪峰”生态调度期间监测到了较大规模的粘性卵鱼类早期资源^[14], 说明当水温合适时, 粘性卵鱼类和漂流性卵鱼类的生态调度过程是可以协调统一的。基于此, 本文以刺激更多土著鱼类产卵、保护鱼类多样性为目标, 提出兼顾鱼类差异化产卵需求的分组生态调度技术: 一是根据研究区土著鱼类产卵类型和水温需求进行分组, 最大化协调不同鱼类产卵需求, 提出生态调度整体框架和启动时机; 二是合并针对产粘性卵鱼类的“基荷发电调度”和针对产漂流性卵鱼类的“人造洪峰调度”, 提出了兼顾鱼类差异化需求的出库流量确定方法。将技术应用于金沙江下游梯级水库生态调度方案优化, 在不增加生态调度总的次数和时间前提下, 最大化满足土著鱼类产卵需求。

2 研究区概况

2.1 金沙江下游生态调度实践

金沙江位于长江上游玉树至宜宾江段, 全长约3500 km, 流域面积超过50万km²。金沙江以高、深、陡、窄的河床和湍急的水流著称, 河道落差3300 m, 多年平均径流量1565亿m³。金沙江流域孕育了丰富的水能资源, 下游攀枝花-宜宾江段分布有乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝等四座巨型水电站(图1), 总防洪库容为154.93亿m³, 总装机容量为4546万kW, 年均发电量可达1960亿kW·h, 是我国水电开发规模最大的地区。金沙江下游也是我国鱼类多样性最丰富的地区之一, 据文献资料记载^[15], 大规模水电开发前金沙江下游共有土著鱼类115种, 包括特有种64种。自2010年以来, 梯级水电开发破坏了鱼类赖以生存的生境条件, 导致鱼类种群数量锐减^[16]。

为缓解梯级水电开发对鱼类自然繁殖的不利影响, 2017, 2021, 2022年先后将溪洛渡-向家坝梯级、乌东德、白鹤滩纳入“人造洪峰”生态调度试验范围, 近两年开始实施乌东德、白鹤滩“基荷发电”生态调度, 目前各水库生态调度频次维持在三次左右, 其中3~4月份(水温达到13.5℃)重点开展“基荷发电”调度, 调度对象主要为裂腹鱼类; 5~6月份(水温达到18℃)重点开展“人造洪峰”调度, 调度对象主要为圆口铜鱼、长鳍吻鲈等。金沙江下游梯级生态调度对促进鱼类自然繁殖取得了较为显著的效果, 其中2023年“人造洪峰”生态调度响应期间, 向家坝坝下江津断面鱼卵径流量达到2.8亿粒。但总体效果不及三峡水库, 尤其是乌东德、白鹤滩水库, 调度期间产卵规模仅为200~300万粒, 部分场次并未出现明显的产卵高峰^[6]。

2.2 金沙江下游现存鱼类调查

为明确金沙江下游现存鱼类物种组成情况, 本文利用鱼类环境DNA(eDNA)检测技术, 选取金沙江干流攀枝花至宜宾江段9个断面进行现场调查采样(见图1), 包括金沙江干流攀枝花段(S1~S3)、梯级库区段(S4~S7)、宜宾段(S8~S9)。为提升物种信息可靠性, 于2021~2022年先后四次开展了不同季节的采样调查, 共采集216个样本。采样过程中, 使用2.5 L采水器分别采集上、中、下水层水样, 充分混合后装入1 L采样瓶中。每个采样点采集平行样本2个, 各断面采样点位不

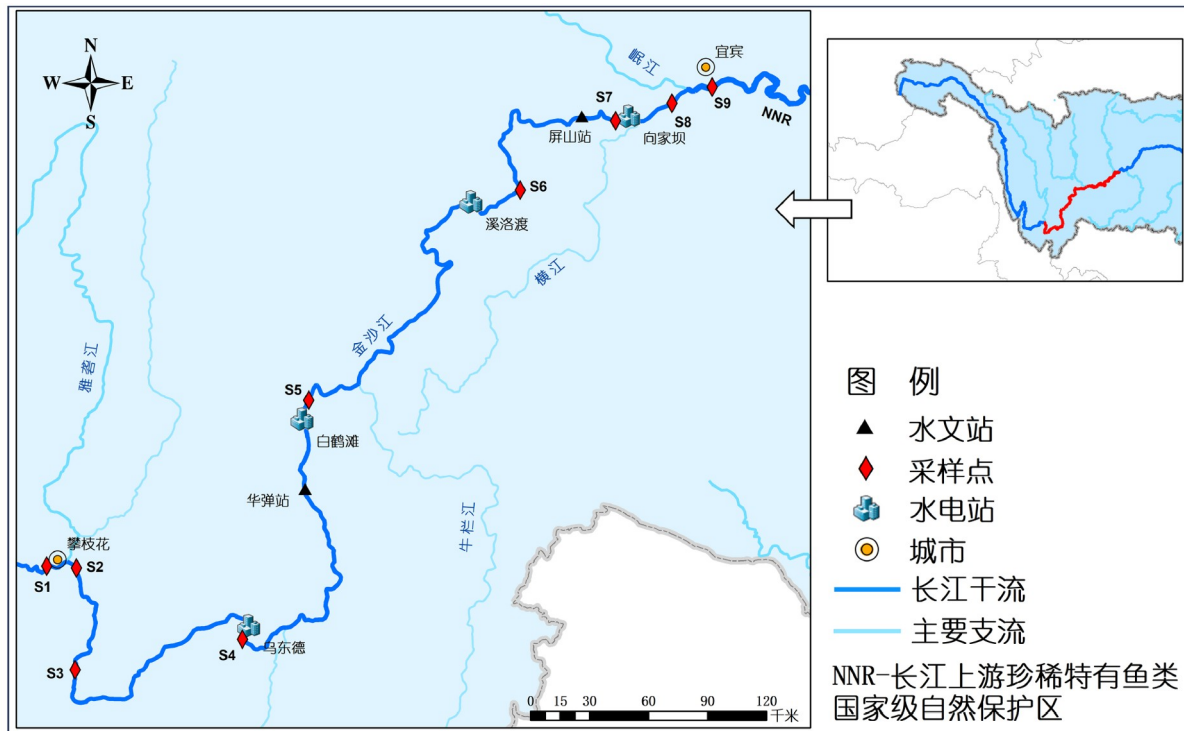


图 1 金沙江下游梯级水库分布图

Figure 1 Distribution of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River.

少于3个。样本采集完成后立即冷藏保存,并于24 h内抽滤至 $0.45\ \mu\text{m}$ 的混合纤维素滤膜,添加固定液后送至专业检测机构。为排除偶然性,最终确定的物种至少在三分之一的点位中被采集到,且同一断面被采集到不少于两次。

根据eDNA采样结果,金沙江下游现存主要鱼类共86种,其中粘沉性卵鱼类46种、漂流性卵鱼类35种、浮性卵鱼类5种。代表性鱼类包括圆口铜鱼、长薄鳅、长鳍吻鮡、圆筒吻鮡、裂腹鱼类等长江上游珍稀特有鱼类。现存优势物种为中华倒刺鲃、鲮、鲢、草鱼、马口鱼等,优势物种占鱼类总数量超过60%。根据文献资料^[17,18],整理了其中78种代表性鱼类产卵适宜水深、流速、涨水过程等信息,包含46种粘性卵、32种漂流性卵鱼类,如图2所示。发现漂流性卵鱼类产卵刺激条件整体倾向大流速($v > 0.8\ \text{m/s}$)、高水深($h > 2\ \text{m}$)的涨水过程,而粘性卵鱼类产卵多在浅水区($h < 1\ \text{m}$),且对水流刺激要求多样化。各类型产卵鱼类的生境偏好表现出既有的共性与特性,因此,在进行水库生态调度时,必须全面考量不同时间段及不同产卵类型鱼类生境需求的相似性与差异性。

3 方案制定方法

3.1 面向产粘沉性卵鱼类的生态调度关键指标确定方法

产粘沉性卵鱼类繁殖的核心需求是在产卵之后保持水位相对稳定,避免附着于水草、砾石上的鱼卵裸露在空气之中而死亡。粘沉性卵鱼类生态调度期关键控制指标包括出库流量范围、坝下水位日内变幅等,其中通过控制水库出库流量,营造产卵场适宜的水深、流速条件;控制出库流量的日内变幅,限制库区和坝下水位剧烈波动,保障鱼卵孵化及早期成活率。其中,适宜出库流量利用改进生境模拟法确定,出库流量日内变幅根据天然水位波动分析确定。

根据各调度期目标物种的产卵需求,结合加权平均法、生境模拟法确定有效栖息地面积(WUA)随流量变化关系,以80%最大 WUA 对应流量为标准,确定适宜粘沉性卵鱼类产卵的出库流量范围,如下式:

$$WUA = f[Q], \quad (1)$$

$$Q_{WUA_{\max}} = f^{-1}[WUA_{\max}], \quad (2)$$

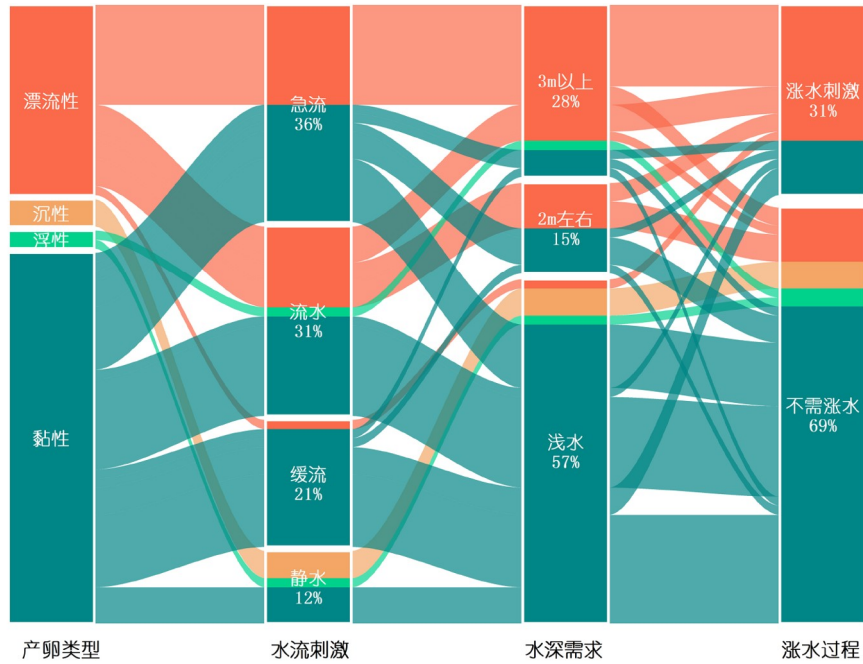


图2 金沙江下游不同产卵类型鱼类生境偏好分类图

Figure 2 Habitat preference classification of fish of different spawning types in the lower reaches of the Jinsha River.

$$Q_{粘}^1 = f^{-1}[80\% \times WUA_{max}], Q < Q_{WUA_{max}}, \quad (3)$$

$$Q_{粘}^2 = f^{-1}[80\% \times WUA_{max}], Q > Q_{WUA_{max}}, \quad (4)$$

式中, WUA 为有效栖息地面积, m^2 ; Q 为出库流量, m^3/s ; f 为 WUA 随流量变化的函数关系; $Q_{WUA_{max}}$ 为有效栖息地面积最大值对应流量; $Q_{粘}^1$ 为适宜粘沉性卵鱼类产卵的出库流量下限值; $Q_{粘}^2$ 为适宜粘沉性卵鱼类产卵的出库流量上限值, m^3/s .

此外, 粘沉性卵鱼类生态调度期间, 水位日内最大变幅 $\Delta W_{粘}$ 根据天然流场条件下产卵期(4~7月)连续 N 日内最大水位差确定, 其中 N 为鱼卵孵化时间, 其原理为假设天然条件下超过一半天数的连续 N 天内的水位波动不会影响粘沉性卵发育. 进而根据水位-流量关系确定出库流量日内变幅 $\Delta Q_{粘}$.

$$\Delta W_j = \max_{i=j} (W_{i+1}, W_{i+2}, \dots, W_{i+N}) - \min_{i=j} (W_{i+1}, W_{i+2}, \dots, W_{i+N}), \quad (5)$$

$$\Delta W_{粘} = QUARTILE(\Delta W_j, 3), \quad (6)$$

$$\Delta Q_{粘} = g[\Delta W_{粘}], \quad (7)$$

式中: W_i 为第 i 天的日平均水位, m ; ΔW_j 为天然条件下产卵期连续 N 天最大水位差, m ; j 取值从1到产卵期最大天数, N 值根据鱼卵孵化时间确定; $\Delta W_{粘}$ 为粘沉性卵鱼类生态调度期日内最大水位变幅, m ; $\Delta Q_{粘}$ 为粘沉性卵鱼类生态调度期日内最大流量变幅, m^3/s ; g 为控制断面水位-流量关系曲线.

3.2 面向产漂流性卵鱼类的生态调度关键指标确定方法

刺激漂流性卵鱼类产卵除需满足必要水深、流速外, 还需要一定的涨水过程. 在梯级水库建设运行下, 天然涨水过程已不可恢复, 但涨水过程的相关指标仍可作为生态调度的依据. 本文根据产卵期内(4~7月)天然水文过程界定涨水持续时间、水位日涨幅、流量日涨幅等关键指标, 具体步骤如下:

(1) 根据已开展的“人造洪峰”生态调度期间鱼类早期资源监测数据, 筛选能够刺激产漂流性卵鱼类产卵的有效涨水过程, 判断依据为涨水前后鱼卵径流量增加幅度超过100%^[14],

(2) 根据同期实测流量、水位数据, 分析各有效涨水过程的水文参数, 按照75%保证率要求, 界定能够刺

激产卵的水位总涨幅标准 ΔW_{std} 、持续涨水时间标准 t_{std} ;

(3) 基于上述涨水过程标准, 分析产卵场相邻水文站断面长序列天然逐日流量数据, 筛选出符合同时满足 ΔW_{std} 和 Δt_{std} 的所有涨水过程, 按照75%保证率要求, 最终确定生态调度期间出库流量日涨幅 $\Delta Q_{漂}$ 、涨水持续时间 $t_{漂}$.

涨水过程的的初始流量 $Q_{漂}^1$ 根据各调度期目标鱼类产卵适宜流量的下限值确定, 计算过程参照 $Q_{粘}^1$.

3.3 兼顾鱼类差异化需求的出库流量确定方法

为兼顾粘沉性卵鱼类和漂流性卵鱼类的繁殖需求, 本文提出了基于日内水位波动约束的涨水-退水过程优化方法, 即整体上营造涨水过程刺激漂流性卵鱼产卵, 但涨水-退水过程考虑日内水位最大变幅的约束, 以满足粘沉性卵鱼类产卵生境. 关键控制指标包括初始出库流量、流量日涨幅、涨水持续时间、退水持续时间、日内水位最大变幅等.

根据前文提出的粘沉性卵鱼类、漂流性卵鱼类生态调度关键指标, 确定出库流量范围. 其中, 出库流量初始值不小于粘沉性卵、漂流性卵适宜流量下限值; 出库流量峰值由初始值和流量总涨幅决定. 公式如下:

$$Q_{初} = \min(Q_{粘}^1, Q_{漂}^1), \quad (8)$$

$$Q_{峰} \geq Q_{初} + \Delta Q_{漂} \times t_{漂}, \quad (9)$$

式中, $Q_{初}$ 为兼顾粘沉性卵和漂流性卵生态调度的出库流量初始值, m^3/s ; $Q_{峰}$ 为出库流量最大值, m^3/s ; $t_{漂}$ 为涨水持续时间, d; 在界定出库流量范围时, 以水位总涨幅作为刺激漂流性卵鱼类繁殖的关键控制指标, 而对绝对流量(即流量本底值)的要求相对宽松.

涨水过程中, 考虑粘沉性卵鱼类的水位稳定性, 要求出库流量日内最大变幅原则上不超过 $\Delta Q_{粘}$. 则兼顾粘沉性卵与漂流性卵的出库流量日涨幅公式为

$$\Delta Q_{涨} = \begin{cases} \Delta Q_{粘}, & \Delta Q_{漂} \geq \Delta Q_{粘}, \\ \in (\Delta Q_{漂}, \Delta Q_{粘}), & \Delta Q_{漂} < \Delta Q_{粘}. \end{cases} \quad (10)$$

而当漂流性卵水位上涨幅度要求超过粘沉性卵水位变幅要求时, 为同时保障水位总涨幅和日内水位变幅, 需增加持续涨水时间, 则涨水持续时间 $t_{涨}$ (单位d)为

$$t_{涨} \geq ROUNDUP [(Q_{峰} - Q_{初}) / \Delta Q_{涨}, 0]. \quad (11)$$

退水过程中, 出库流量日降幅根据粘沉性卵鱼类水位稳定控制指标, 即 $\Delta Q_{退} = \Delta Q_{粘}$, 则退水持续时间 $t_{退}$ (单位d)为

$$t_{退} \geq ROUNDUP [(Q_{峰} - Q_{初}) / \Delta Q_{退}, 0]. \quad (12)$$

4 结果与分析

4.1 生态调度总体框架与指示水温

在金沙江下游现存的86种土著鱼类中, 本文整理了其中68种鱼类产卵的适宜水温范围, 结果如图3所示. 适宜水温下限集中在 $13^\circ\text{C} \sim 22^\circ\text{C}$, 占比超过90%, 其中约50%的鱼类产卵下限水温超过 20°C ; 适宜水温上限大多超过 18°C , 其中 20°C (不含)以上的占比超过70%. 因此, 本文以 20°C 为分界点, 将金沙江下游主要鱼类分为低温产卵型和高温产卵型鱼类, 其中高温产卵型鱼类占比超过60%.

粘沉性卵鱼类主要为低温产卵型, 占比高达78%. 当前, 针对产粘沉性卵鱼类的调控水温设定为 13.5°C , 这一温度接近图3中多数低温产卵型鱼类适宜水温范围的下限. 因此, 仍采用 13.5°C 作为第一次生态调度的指示水温. 进一步地, 根据鱼类繁殖适宜水文条件的机理实验结果^[19], 在 16°C 水温条件下, 增大水流刺激能显著提升鱼类洄游产卵的效率. 因此, 将粘沉性卵鱼

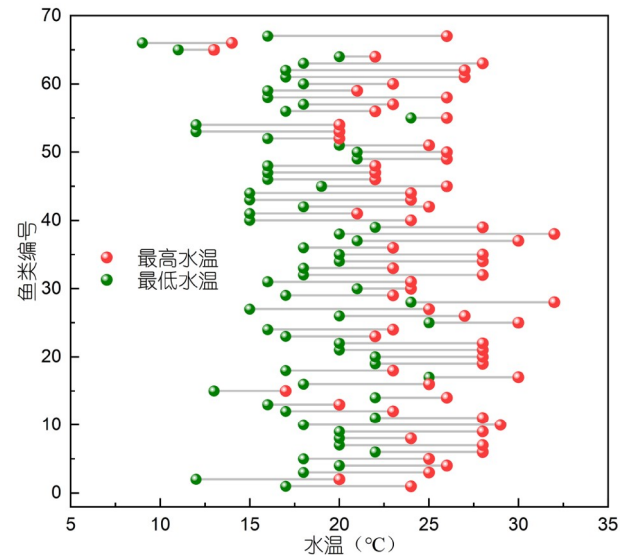


图3 金沙江下游主要鱼类产卵水温分布图

Figure 3 Distribution of spawning water temperature of main fish in the lower reaches of Jinsha River.

类的调度时机细分为两个温度点: 13.5℃和16℃.

现阶段产漂流性卵鱼类调控水温为18℃左右, 但根据2020~2023年金下梯级“人造洪峰”调度试验期间宜宾段鱼卵径流量和水温监测数据, 分析水温变化与漂流性卵径流量相关性(图4), 发现当水温处于21.5℃以下时, 产卵规模与水温呈现显著正相关($p < 0.05$); 当水温超过21.5℃后, 水温变化对于产漂流性卵鱼类的产卵规模并无显著影响. 这表明在18℃~21.5℃下产卵规模受水温限制较大, 这也解释了近两年三峡水库生态调度从18℃提高至20℃后产卵规模显著提升^[20]. 而超过21.5℃后, 产卵规模不再受水温限制, 可认为偏好高温产卵的鱼类产卵盛期水温为21℃~22℃, 此时进行生态调度效果最好. 虽然多数漂流性卵鱼类为高温产卵型, 但长鳍吻鲈等部分珍稀特有鱼类为低温产卵型, 因此, 产漂流性卵鱼类调控水温从“18℃”细分为16℃, 20℃和 22℃, 进一步扩大调度期覆盖范围, 刺激不同产卵水温需求的鱼类产卵.

根据不同鱼类适宜产卵水温, 全年开展4批次生态调度, 其中第一次主要针对产粘沉性卵鱼类, 第二次兼顾产粘沉性和漂流性卵鱼类, 第三次和第四次面向产漂流性卵鱼类. 生态调度的启动临界水温分别为13.5℃, 16℃, 20℃和22℃, 通过4次调度, 能覆盖研究区86种鱼类中77种的产卵繁殖需求, 占比达到90%. 各调度期针对的目标鱼类如表1所示.

4.2 各调度期出库流量范围

本文重点针对乌东德、向家坝坝下江段产卵场, 根据各调度期目标鱼类的生境偏好, 利用加权平均法构建不同调度期、不同产卵类型鱼类生境适宜度曲线

表1 金沙江下游主要鱼类分组生态调度总体框架及临界水温

Table 1 Overall framework for grouped ecological scheduling and critical water temperature of main fish in the lower reaches of the Jinsha River

产卵类型	临界调控水温 (°C)	代表性鱼类
粘沉性卵	13.5	达氏鲟、尖头大吻鲈、云南光唇鱼、金沙鲈鲤、短须裂腹鱼、厚唇裸重唇鱼、细鳞裂腹鱼、长丝裂腹鱼、昆明裂腹鱼、四川裂腹鱼、齐口裂腹鱼
	16	圆吻鲈、青鲈、宽鳍鱲、草胡子鲇、达氏鲈、尖头鲈、方氏鲈、棒花鱼、唇鲈、花鲈、似鲈、鲫、鲤、岩原鲤、光唇鱼、宽口光唇鱼、多鳞白甲鱼、中华花鲈、泥鳅、陈氏新银鱼、河川沙塘鳢、子陵吻虾虎鱼、月鳢、黄石爬鮠、大口鲇、胡子鲇、胭脂鱼
漂流性卵	16	似刺鲃、华鲈、蛇鲈、异鳔鳅、裸体异鳔鳅、光唇蛇鲈、长鳍吻鲈
	20	鳊、草鱼、寡鳞鲈、鲢、青鱼、圆口铜鱼、铜鱼、圆筒吻鲈、银鲈、短身金沙鲈、中华金沙鲈、中华沙鲈
	22	青鱼、蒙古鲈、翘嘴鲈、鳡、似鳊、银鲈、鲮、宜昌鳅、红唇薄鳅、犁头鳅、鳊、细鳞鲈、赤眼鳟、鳊、长薄鳅、紫薄鳅、小眼薄鳅、宽体沙鲈、大眼鳊、斑鳊

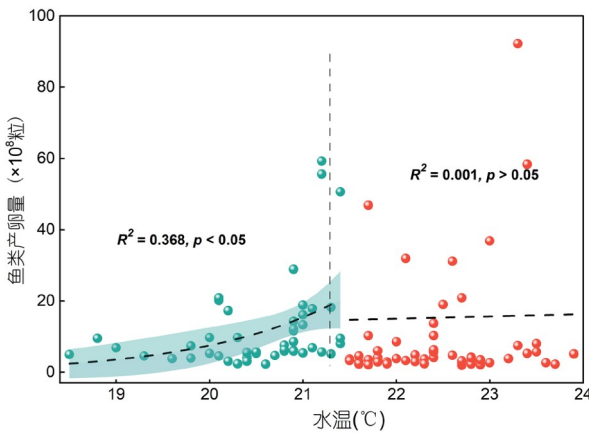


图4 产卵规模与水温变化相关性分析
Figure 4 Correlation analysis between spawning scale and water temperature.

(图5), 并综合生境适宜度评价和二维水动力模拟, 分析不同出库流量情景产卵场有效栖息地面积(WUA)随流量变化关系, 如图6所示. 结果显示, 不同调度期鱼类WUA随出库流量的变化趋势相似, 均呈现出先增加后缓慢降低的趋势. 其中, 相同流量下, 产漂流性卵鱼类不同调度期WUA变化差异性较大, 相较第二调度期, 第三调度期在低流量下($Q < 3000 \text{ m}^3/\text{s}$)WUA更小、在高流量下WUA明显增加.

根据式(1)~(4), 以最大WUA对应流量为最适出库流量, 以最大WUA的80%对应流量作为出库流量上、下边界范围, 分别确定各调度期出库流量范围, 结果如表2所示.

4.3 各调度期出库流量过程控制

根据2020~2023年长江干流宜宾、江津断面鱼卵

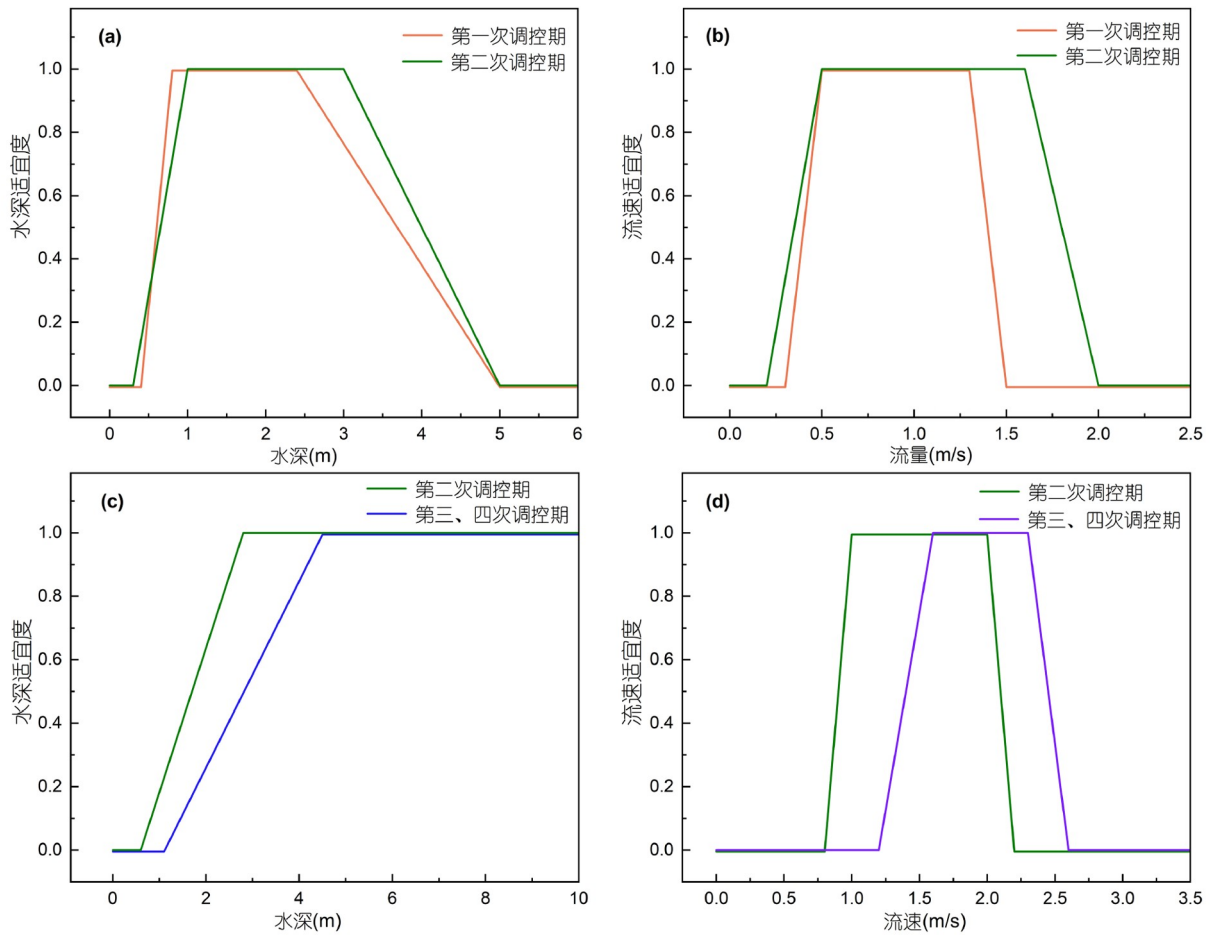


图5 金沙江下游分组分类鱼类产卵生境适宜度曲线。(a) 粘性卵鱼类产卵水深适宜度曲线; (b) 粘性卵鱼类产卵流速适宜度曲线; (c) 漂流性卵鱼类产卵水深适宜度曲线; (d) 漂流性卵鱼类产卵流速适宜度曲线

Figure 5 Spawning habitat suitability curves for grouped and classified fish species in the lower reaches of the Jinsha River. (a) Spawning depth suitability curve of Viscid-egg fish; (b) spawning flow velocity suitability curve of Viscid-egg fish; (c) spawning depth suitability curve of Drifting-egg fish; (d) spawning flow velocity suitability curve of Drifting-egg fish.

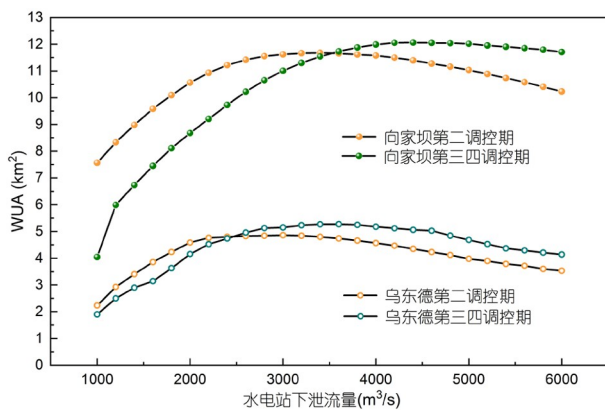


图6 各调度期鱼类WUA随出库流量变化关系

Figure 6 Changes of fish WUA with outbound flow in each dispatching period.

监测数据及同期逐日流量、水位数据, 界定刺激产漂流性卵鱼类产卵的有效涨水过程标准。图7展示了各次产卵高峰期对应的涨水历时、水位涨幅及流量涨幅分布, 以4~5月涨水过程作为第二次调度期的约束条件、以6~7月涨水过程作为第三次和第四次调度期的约束条件。按照75%保证率标准, 各调度期有效涨水过程的涨水历时应均不低于3 d; 第二次调度期水位总涨幅应不低于1 m, 第三次、第四次调度期水位总涨幅应不低于2.5 m。

基于上述涨水过程标准, 分析华弹站及屏山站1956~1998年4~7月实测日流量及水位数据, 确定乌东德坝下、向家坝坝下有效刺激鱼类产卵的涨水过程相关参数, 结果如图8所示。向家坝坝下第二调度期和

表 2 各调度期出库流量范围

Table 2 Outflow range of each dispatching period

	粘沉性卵鱼类调度期		漂流性卵鱼类调度期	
	第一调度期 (m ³ /s)	第二调度期 (m ³ /s)	第二调度期 (m ³ /s)	第三、四调度期 (m ³ /s)
乌东德	1400~2600	1400~2600	1800~5200	≥2200
白鹤滩	1400~2600	1400~2600	1800~5200	≥2200
溪洛渡	1800~3400	1800~3400	2300~5600	≥2800
向家坝	1800~3400	1800~3400	2300~5600	≥2800

三、四调度期水位日涨幅分别集中在0.34~0.56 m, 0.8~1.1 m, 流量日均涨幅分别为多年平均流量的5%~9%、18%~4%, 涨水持续时间均集中在4~6 d。乌东德坝下第二调度期和第三、四调度期水位日涨幅分别集中在0.25~0.35 m和0.62~0.94 m, 涨水持续时间分别集中在6~8 d和5~8 d, 流量日均涨幅分别为多年平均流量的7%~12%和20%~27%。按照75%保证率标准, 第二次生态调度期间, 向家坝水库出库流量日均涨幅不小于245 m³/s, 涨水持续时间不少于4 d; 乌东德水库出库流量日均涨幅不小于264 m³/s, 涨水持续时间不少于6 d。第三次和第四次生态调度期间, 向家坝水库出库流量日均涨幅不低于833 m³/s, 涨水持续时间不少于4 d; 乌东德水库出库流量日均涨幅不低于756 m³/s, 涨水持续时间不少于5 d。

此外, 由于梯级电站蓄水运行后坝下江段水位-流

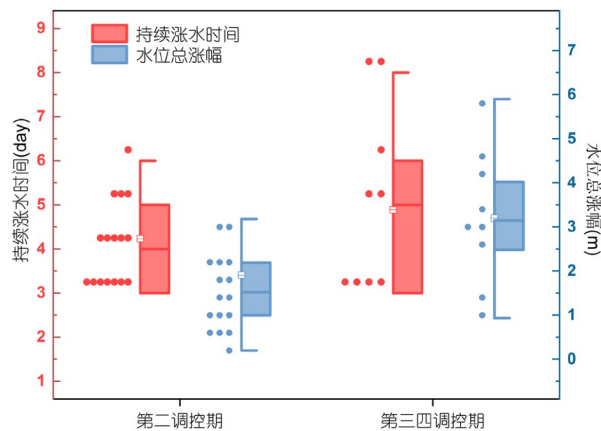


图 7 有效刺激漂流性卵鱼类产卵的涨水过程标准。注: 图中数据点代表2020~2023年宜宾断面鱼类大规模产卵期间的持续涨水时间、水位总涨幅统计数据

Figure 7 Criteria for increases process of flow that effectively stimulate the spawning of Drifting-egg fish. Note: The data points in the figure represent the statistical data of continuous water rise time and total water level rise during the mass spawning period of fish in Yibin Section from 2020 to 2023.

量关系发生改变, 需根据水位日涨幅对应流量进一步优化出库流量日涨幅。根据运行后坝下控制断面水位-流量关系, 向家坝坝下涨水过程满足日均水位涨幅为0.34 m时, 对应流量应大于396 m³/s, 满足日均水位涨幅为0.80 m时, 对应流量应大于907 m³/s; 乌东德坝下涨水过程满足日均水位涨幅为0.25 m时, 对应流量应大于178 m³/s, 满足日均水位涨幅为0.64 m时, 对应流量应大于459 m³/s。取水位日涨幅对应流量与天然流量日涨幅较大值, 则第二次调度期和第三、四次调度期向家坝水库出库流量日均涨幅控制指标分别调整为396和907 m³/s。

对于退水过程, 考虑到天然状态下日内水位变幅较小, 难以作为调控依据, 本文根据粘沉性鱼卵孵化时间, 以天然状态下7日内水位变幅作为水位日内波动控制指标。根据华弹站及屏山站1956~2000年4~7月实测水位数据, 分析天然流场7日内水位变幅, 其中华弹站7日内水位变幅中值约为0.8 m、屏山站约为1.4 m, 结合断面水位-流量关系, 退水过程中乌东德出库流量日变幅应低于750 m³/s, 向家坝应低于1200 m³/s。各调度期出库流量日变幅如表3所示。

4.4 金下梯级水库生态调度建议方案

综合不同调度期出库流量、涨水-退水过程计算结果, 分别形成乌东德-白鹤滩(乌-白)联合生态调度方

表 3 各调度期出库流量过程控制指标

Table 3 Process control index of outflow in each dispatching period

	日流量涨幅		日流量降幅 (m ³ /s)
	第二调度期 (m ³ /s)	第三、四调度期 (m ³ /s)	
乌东德-白鹤滩	≥264	≥756	≤750
溪洛渡-向家坝	≥396	≥907	≤1200

案和溪洛渡-向家坝(溪-向)联合生态调度方案, 关键指标如表4所示. 全年共开展四批次生态调度, 调度启动时机为乌东德坝下产卵场、向家坝坝下产卵场水温分别达到13.5℃, 16℃, 20℃和22℃.

第一次生态调度重点面向裂腹鱼等喜低温产卵的粘沉性卵鱼类, 调度过程中重点控制梯级水库出库流

量的变化幅度, 减小坝下河段水位日内降幅调度期间, 其中乌-白控制日最大流量变幅不超750 m³/s/d, 最大出库流量不超过2600 m³/s, 持续10 d左右, 保障产卵水域水位日变幅不超过0.8 m; 溪-向控制日最大流量变幅不超1200 m³/s/d, 最大出库流量不超3400 m³/s, 持续10 d左右, 保障宜宾江段水位日变幅不超过1.4 m.

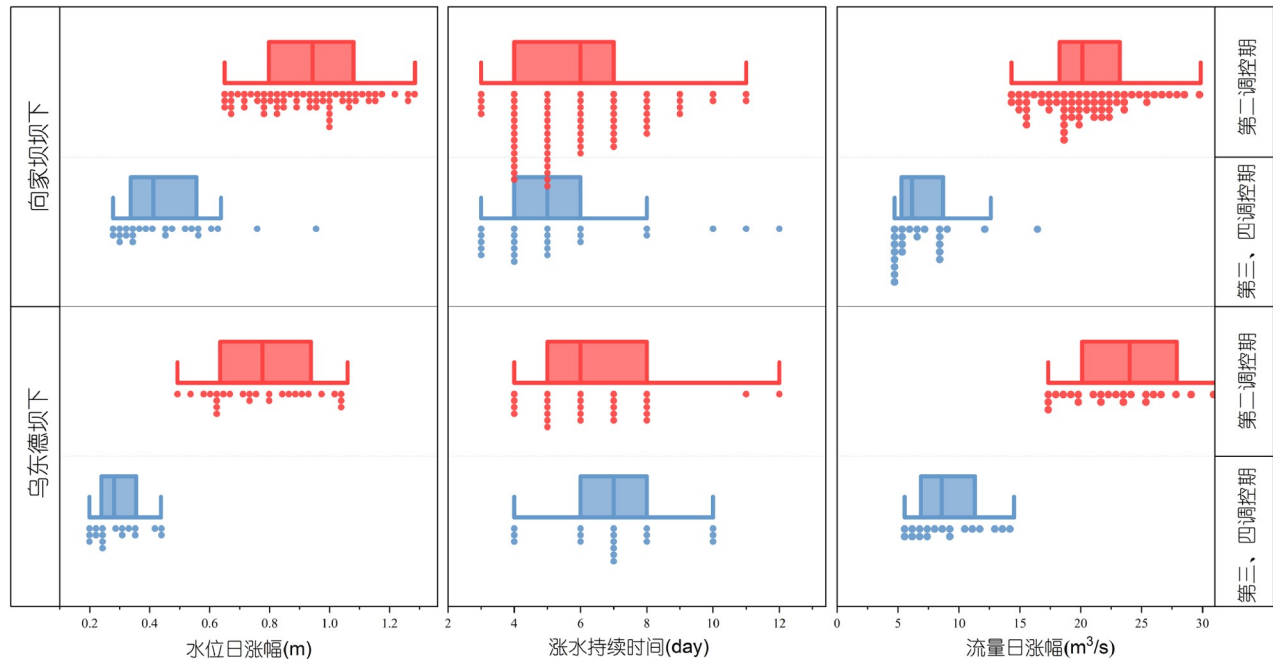


图 8 金沙江下游天然涨水过程分析. 注: 图中数据点代表1956~1998年4~7月华弹站、屏山站每次有效涨水过程的水位总涨幅、持续涨水时间、流量日涨幅统计数据

Figure 8 Analysis of natural increases process of flow in the lower reaches of Jinsha River. Note: The data points in the figure represent the statistical data of the total rise of water level, continuous rise time and daily rise of discharge during each effective rise of water at Huatan Station and Pingshan Station from April to July in the year from 1956 to 1998.

表 4 各生态调度期关键指标

Table 4 Key indicators of each ecological dispatching period

调度期	梯级水库	指示水温 (℃)	出库流量范 围(m ³ /s)	持续 时间 (d)	日内水位 最大变幅 (m)	涨水段		退水段	
						日流量涨幅 (m ³ /s/d)	涨水持续 时间(d)	日流量降幅 (m ³ /s/d)	退水持续 时间(d)
第一次	乌东德-白鹤滩	13.5	1400~2600	10	≤0.8	—	—	≤750	—
	溪洛渡-向家坝	13.5	1800~3400	10	≤1.4	—	—	≤1200	—
第二次	乌东德-白鹤滩	16	1800~5200	≥10	≤0.8	264~560	5~6	≤750	4~5
	溪洛渡-向家坝	16	2300~5600	≥10	≤1.4	396~550	5~6	≤1200	4~5
第三次	乌东德-白鹤滩	20	≥2200	≥9	—	≥756	≥5	≤750	≥4
	溪洛渡-向家坝	20	≥2800	≥7	—	≥907	≥4	≤1200	≥3
第四次	乌东德-白鹤滩	22	≥2200	≥9	—	≥756	≥5	≤750	≥4
	溪洛渡-向家坝	22	≥2800	≥7	—	≥907	≥4	≤1200	≥3

第二次生态调度兼顾产粘性卵和产漂流性卵鱼类, 其中产漂流性卵鱼类重点保护目标为长鳍吻鲈、异鳔鳅鲃等喜低温产卵的物种。调度过程中需控制水位日内稳定, 逐步增加水库出库流量, 营造平稳的涨-退水过程, 关键控制指标包括初始流量、日内水位变幅、日均流量涨幅、涨水持续时间、退水时间及流量日降幅。涨水过程中, 控制乌-白水库初始出库流量不低于 $1800\text{ m}^3/\text{s}$ 、日均涨幅为 $264\sim 560\text{ m}^3/\text{s/d}$, 控制溪-向水库初始出库流量不低于 $2300\text{ m}^3/\text{s}$ 、日均涨幅为 $396\sim 550\text{ m}^3/\text{s/d}$, 其中流量涨幅下限值根据天然涨水分析确定, 上限值根据出库流量范围和涨水历时确定; 退水过程中, 乌-白水库日均流量降幅不超过 $750\text{ m}^3/\text{s}$, 溪-向日均流量降幅不超过 $1200\text{ m}^3/\text{s/d}$; 总持续时间10 d左右, 其中涨水持续时间5~6 d、退水持续4~5 d。

第三、四次生态调度重点针对“四大家鱼”、鳅类等喜高温产卵的产漂流性卵鱼类, 营造持续涨水过程。相较第二次调度, 由于目标鱼类对涨水刺激需求更强烈, 第三、四次生态调度涨水幅度更大、绝对流量更大, 持续时间缩短。调度期间乌-白初始出库流量均不低于 $2200\text{ m}^3/\text{s}$, 流量日涨幅不低于 $756\text{ m}^3/\text{s/d}$, 涨水持续5 d以上, 退水阶段流量日降幅不高于 $750\text{ m}^3/\text{s/d}$, 退水持续4 d左右。溪-向初始出库流量不低于 $2800\text{ m}^3/\text{s}$, 流量日涨幅不低于 $907\text{ m}^3/\text{s/d}$, 退水阶段向家坝出库流量日减幅不高于 $1200\text{ m}^3/\text{s/d}$, 退水持续天数均不低于3 d。

表5 绝对流量约束对产卵规模的影响显著性

Table 5 The impact significance of absolute flow constraints on spawning scale

指标	乌东德坝下		白鹤滩坝下		宜宾	
	无流量约束	有流量约束	无流量约束	有流量约束	无流量约束	有流量约束
产卵当日流量(Q)	—	$P<0.05$	—	$P<0.1$	—	$P<0.1$
产卵前1日流量($Q1$)	$P<0.1$	$P<0.05$	$P<0.1$	$P<0.05$	—	$P<0.1$
产卵前2日流量($Q2$)	$P<0.1$	$P<0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$	—	—
产卵当日流量涨幅(QR)	—	—	—	—	$P<0.1$	$P<0.05$
产卵前1日流量涨幅($QR1$)	$P<0.1$	$P<0.05$	—	—	$P<0.1$	$P<0.1$
产卵前2日流量涨幅($QR2$)	—	$P<0.1$	$P<0.05$	$P<0.05$	—	—
产卵当日水位涨幅(ZR)	—	—	—	—	$P<0.1$	$P<0.05$
产卵前1日水位涨幅($ZR1$)	$P<0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$	$P<0.05$	$P<0.1$	$P<0.1$
产卵前2日水位涨幅($ZR2$)	—	$P<0.1$	$P<0.1$	$P<0.1$	—	—

注: P 值小于0.1, 通过90%显著性检验, 影响弱显著; P 值小于0.05, 通过95%显著性检验, 影响显著

Note: If the P value is less than 0.1, the effect is weakly significant through 90% significance test; If the P value is less than 0.05, the effect is significant through 95% significance test.

5 讨论

5.1 绝对流量对生态调度效果的影响

现阶段“人造洪峰”生态调度重点关注持续涨水过程, 对于绝对流量和流场条件考虑不足, 缺乏明确的初始流量(调度期首日平均流量)和峰值流量(调度期内最高日平均流量)要求。同时, 为营造持续涨水过程, 调度前两日往往会先降低出库流量, 导致部分场次调度期间绝对流量偏低。根据2022~2023年调度期间流量监测数据, 乌东德、向家坝初始出库流量范围分别为 $1381\sim 5069$ 和 $2363\sim 6422\text{ m}^3/\text{s}$, 占多年平均天然流量比例为36%~139%, 不同场次调度试验的初始流量差别较大, 而部分场次绝对流量较低、调度期间出库流量不足多年平均流量的80%。但产漂流性卵鱼类往往需急流产卵生境或急流漩涡等复杂流场刺激, 调度期绝对流量要求不明确是限制部分场次生态调度效果欠佳的重要原因。

结合2022~2023年金沙江下游乌东德坝下断面、白鹤滩坝下断面、宜宾断面逐日产卵量及对应断面水文数据, 分析绝对流量对漂流性卵鱼类产卵规模的影响。表5展示了绝对流量作为约束条件时各水文因子对产卵规模的影响显著性变化, 即当设置流量约束时, 对超过该流量的涨水过程与产卵规模进行回归分析, 反之则分析全部产卵过程的水文因子相关性。其中, 乌东德和白鹤滩出库流量约束设置为 $2050\text{ m}^3/\text{s}$, 宜宾江

段流量约束设置为 $4250 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据单因子回归显著性检验结果, 设定流量约束后, 各水文因子与产卵规模的 P 值普遍呈现下降趋势, 影响的显著性增强, 如乌东德坝下的产卵当日流量、产卵前1日流量及产卵前2日流量对产卵量的影响呈现强显著性; 白鹤滩坝下产卵当日流量呈现弱显著性, 产卵前1日流量由弱显著性转变为强显著性; 宜宾断面水位涨幅对产卵量的影响由弱显著性转变为强显著性。整体来看, 在绝对流量阈值以上, 流量水位(涨幅)对于产漂流性卵鱼类产卵的影响更为显著。

5.2 生态调度启动时机优化

除水温外, 生态调度的启动时机要综合考虑天然涨水过程及鱼类产卵的自然规律。根据2022~2023年断面鱼卵径流量与流量变化, 金沙江下游及三峡梯级水库共开展10次“人造洪峰”生态调度试验, 其中4次处于天然涨水状态, 调度期间日最高产卵量明显高于非天然涨水期生态调度, 产卵量峰值增加50%以上。因此, 建议天然涨水期开展生态调度, 将“人造洪峰”与天然涨水协同刺激, 更有利于鱼类产卵。

进一步地, 以5.1节设定的流量、水位(涨幅)指标作为因变量, 通过逐步多元回归分析剔除共线性因子后, 筛选显著相关的环境因子。其中, 产卵前1日流量(Q_1)、产卵前2日流量(Q_2)、产卵前2日流量涨幅(QR_2)、产卵当日水位涨幅(ZR)、产卵前1日水位涨幅(ZR_1)、产卵前2日水位涨幅(ZR_2)对产卵量存在显著影响, 尤其是产卵前1日流量、产卵前2日流量因子, 呈现极显著影响。采用相对重要性分析定量探究上述环境因子对产卵量的贡献率, 结果如图9所示, 产卵前1日流量和产卵前2日流量涨幅对鱼卵产卵量影响最大, 贡献率分别为40.6%和33.5%, 其次为产卵前2日流量, 说明产卵过程多发生在涨水2天后。因此, 建议自然涨水2天后启动生态调度。

此外, 鱼类早期资源监测结果表明, 部分场次调度前刚发生过自然涨水过程带来的较大规模产卵, 导致调度期间产卵效果不佳^[6]。因此, 建议选择生态调度启动时机时, 注意调度期与上一次产卵集中期的时间间隔, 并且以鱼类开始产卵联合水温作为调度初始条件。根据2020~2023年鱼卵早期资源监测数据, 距上一次产卵高峰期5 d左右开展调度试验效果最佳。同时, 进一步加强鱼类早期资源的持续监测, 观察鱼类产卵的规

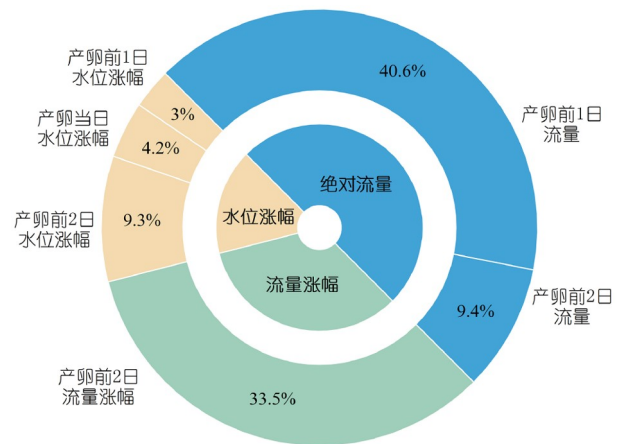


图9 水文因子对产卵规模的相对贡献率

Figure 9 Relative contribution rate of hydrological factors to spawning scale.

律, 明确两次产卵高峰期的时间间隔。

整体上, 本文提出的生态调度优化方法, 重点针对现阶段存在的调度目标单一、鱼类物种覆盖范围不足等问题, 对生态调度启动时机、部分关键参数进行了优化。相对于现行方案, 优化方法能够在不增加调度频次和调度时间的基础上, 尽可能满足更多鱼类的产卵生境需求, 推动生态调度目标从重点物种保护向鱼类生物多样性保护的理念转变。除此之外, 本文着重强调了调度时机的重要性, 综合建议调度时机除要求水温达标外, 注意与上次产卵高峰期间隔5 d以上, 或首次监测到鱼类产卵后; 对于“人造洪峰”调度试验, 调度期尽可能在出现自然涨水2 d后。具体实施时间及流量控制过程结合实时水文预报、鱼类早期资源监测和水电站运行工况动态调整。

6 结论

现阶段生态调度目标以保护“四大家鱼”等重点鱼类产卵需求为主, 显著促进了部分鱼类的繁殖规模, 但调度期间刺激产卵的鱼类物种不足现存物种的一半, 尤其是部分珍稀特有鱼类产卵效果不佳。本文从恢复生物多样性角度, 提出最大化满足土著鱼类产卵需求的分组分类生态调度方法, 并应用于金沙江下游梯级水库生态调度方案优化, 形成不同时段覆盖不同鱼类需求的生态调度方案。主要结论如下。

(1) 金沙江下游现存86种土著鱼类, 其中产粘沉性卵鱼类49种、产漂流性卵鱼类37种, 根据鱼类产卵时间、类型和水温要求分组优化水库生态调度总体框架, 将生态调度临界水温设定为13.5℃, 16℃, 20℃和22℃, 并通过4次分组调度对土著鱼类的覆盖率达到90%以上。

(2) 协调产粘沉性卵和漂流性卵鱼类出库流量和

求的出库流量、流量日变幅等关键指标, 形成不同时段兼顾鱼类差异化需求的生态调度方案, 在不增加生态调度总的次数和时间前提下, 实现了满足更多鱼类产卵的目标。

(3) 调度时机除要求水温达标外, 注意与上次产卵高峰期间隔5 d以上, 或首次监测到鱼类产卵后。对于“人造洪峰”调度试验, 调度期尽可能在出现自然涨水2 d后。

参考文献

- 1 Xi J P. Speech at the symposium on further promoting the development of the Yangtze River economic belt (in Chinese). *Contemp Party Mem*, 2018, 13: 4–8 [习近平. 在深入推动长江经济带发展座谈会上的讲话. 当代党员, 2018, 13: 4–8]
- 2 Wang J N, Dong Z R, Liao W G, et al. Practice on reservoirs operation improvement in the United States (in Chinese). *Water Resour Hydropower Eng*, 2011, 42: 15–20 [王俊娜, 董哲仁, 廖文根, 等. 美国的水库生态调度实践. 水利水电技术, 2011, 42: 15–20]
- 3 Rood S B, Samuelson G M, Braatne J H, et al. Managing river flows to restore floodplain forests. *Front Ecol Environ*, 2005, 3: 193–201
- 4 Magdaleno F. Experimental floods: A new era for Spanish and Mediterranean rivers? *Environ Sci Policy*, 2017, 75: 10–18
- 5 Jager H I, Smith B T. Sustainable reservoir operation: Can we generate hydropower and preserve ecosystem values? *River Res Apps*, 2008, 24: 340–352
- 6 Gong W T, Li S, Jiang W, et al. Ecological operation practice of Artificial Flood Peak for fish spawning- Taking the Lower Jinsha River-Three Gorges cascade reservoirs as an example (in Chinese). *China Rural Water Hydropower*, 2024, 9: 1–15 [龚文婷, 李帅, 姜伟, 等. 面向鱼类产卵繁殖的人造洪峰生态调度实践—以金沙江下游-三峡梯级水库为例. 中国农村水利水电, 2024, 9: 1–15]
- 7 Wang Y J, Wang Q, Liu Y H, et al. Morphological effects of the operation of Xiaolangdi Reservoir on the Lower Yellow River in recent years (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2024, 55: 505–515 [王远见, 王强, 刘彦晖, 等. 小浪底水库运行以来对黄河下游河道河床演变特性的影响. 水利学报, 2024, 55: 505–515]
- 8 Yang Z F, Hu P, Wang Y L, et al. A detailed energy budget model for the Central Route of the South-to-North Water Diversion Project in China (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2024, 55: 190–201 [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. 水利学报, 2024, 55: 190–201]
- 9 Deng M J, Zhou H Y, Xu H L, et al. Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2016, 46: 864–876 [邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 864–876]
- 10 Lin J Q, Li Y K, Liu Y, et al. Recent progress in ecological operation and adaptive management for stimulating fish natural spawning (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2022, 53: 483–495 [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. 水利学报, 2022, 53: 483–495]
- 11 Quinn J D, Reed P M, Giuliani M, et al. Exploring how changing Monsoonal dynamics and human pressures challenge multireservoir management for flood protection, hydropower production, and agricultural water supply. *Water Resour Res*, 2018, 54: 4638–4662
- 12 Chen Q W, Zhan J Y, Mo K L, et al. Effects of hydropower development on aquatic eco-environment and adaptive managements (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2020, 31: 793–810 [陈求稳, 张建云, 莫康乐, 等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施. 水科学进展, 2020, 31: 793–810]
- 13 Cao G R, Yang X, Fan X J, et al. Practice of ecological environmental protection in the lower reaches of Jinsha River - Three Gorges Cascade reservoir (in Chinese). *Yangtze River*, 2022, 53: 28–33 [曹光荣, 杨霞, 范向军, 等. 金沙江下游-三峡梯级水库生态环保工作实践. 人民长江, 2022, 53: 28–33]
- 14 Ren Y F, Zhao L S, Cao H, et al. Influence of ecological regulation of cascade reservoirs in the lower Jinsha River (in Chinese). *Ecol Environ Monit Three Gorges*, 2020, 5: 8–13 [任玉峰, 赵良水, 曹辉, 等. 金沙江下游梯级水库生态调度影响研究. 三峡生态环境监测, 2020, 5: 8–13]
- 15 Wu J, Wu M S. An investigation of fish resources about the Jinshajiang from Shigu to Yibin (in Chinese). *Artif Intell Sci Eng*, 1985, 1: 80–87 [吴

- 江, 吴明森. 关于金沙江石鼓到宜宾段鱼类资源的概况及其利用问题. 西南师范学院学报(自然科学版), 1985, 1: 80–87]
- 16 Chen Y, Zhang S, Huang D, et al. The development of China's Yangtze River Economic Belt: How to make it in a green way? *Sci Bull*, 2017, 62: 648–651
 - 17 Zhang C G, Yang J X, Zhao Y H, et al. Fishes in the Jinsha Jiang River Basin, the Upper Reaches of the Yangtze River, China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2019 [张春光, 杨君兴, 赵亚辉, 等. 金沙江流域鱼类. 北京: 科学出版社, 2019]
 - 18 Zeng Q H, Tang J X, Hu P, et al. Review of research on the hydrodynamic requirements for sustained drifting and hatching of buoyant fish eggs (in Chinese). *J Hydroecol*, 2022, 43: 141–148 [曾庆慧, 唐家璇, 胡鹏, 等. 漂流性鱼卵的孵化特性及水动力需求研究进展. 水生态学杂志, 2022, 43: 141–148]
 - 19 Yan X Y, Yang Z F, Zeng Q H, et al. Experimental study on the interaction of flow velocity and water temperature on the grass carp reproductive migration (in Chinese). *J Hydroecol*, 2024 [闫肖瑶, 杨泽凡, 曾庆慧, 等. 流速-水温对草鱼生殖洄游的交互作用实验研究. 水生态学杂志, 2024]
 - 20 Xu W, Jin Y, Chen G Y, et al. Changes of natural reproduction of fish producing drifting eggs in downstream Shashi section, middle reaches of Yangtze River during the ten-year (2011–2020) ecological operation of Three Gorges Reservoir (in Chinese). *J Lake Sci*, 2023, 35: 1729–1740 [徐薇, 金瑶, 陈桂亚, 等. 三峡水库十年生态调度(2011–2020年)期间下游沙市江段产漂流性卵鱼类自然繁殖变化. 湖泊科学, 2023, 35: 1729–1741]

A grouped ecological operation technique to accommodate the spawning needs of different fish species

HU Peng, YANG ZeFan, WANG Hao, YAN XiaoYao & ZENG QingHui

State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

At present, ecological reservoir operations mainly focus on promoting the spawning of specific fish species, such as the “Four Major Chinese Carps”, often neglecting the needs of other fish species. A major challenge in advancing ecological regulation is accommodating the spawning requirements of a wider range of fish species within a limited regulation period. This paper proposes a grouped ecological regulation technique that considers the diverse spawning needs of various fish species. In the study area, indigenous fish were classified based on spawning time, spawning type, and water temperature requirements to establish an overall framework for ecological regulation. For each group, the spawning habitat suitability evaluation method was improved, and discharge and water level constraints were coordinated for fish species that lay adhesive demersal eggs and drifting eggs. This approach proposes a discharge process designed to maximize the spawning requirements of indigenous fish during the regulation period. This technique was applied to optimize the ecological regulation plan for the cascade reservoirs in the lower reaches of the Jinsha River. Critical water temperatures for ecological regulation were set at 13.5°C, 16°C, 20°C and 22°C. An optimization strategy for the timing of ecological regulation, based on spawning effectiveness evaluation, was proposed, forming an ecological regulation plan that addresses the diverse spawning demands of fish at different periods. Without increasing the total number and duration of ecological regulation, the four-group regulation approach can cover more than 90% of the spawning demand of indigenous fish.

habitat, spawning, fish species, reservoir, ecological operation

doi: [10.1360/SST-2024-0230](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0230)