

引水式电站对下游水动力与鱼类洄游适宜度的影响及其优化

贺蔚^{1,2,3}, 王海洋^{1,2,3}, 李国岭^{1,2,3}, 徐江涛⁴, 周武⁴, 熊强⁵

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098; 4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 5. 国能大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:以西南大渡河上某水电站为例,构建了水电站下游干支流三维水动力-鱼类洄游适宜度模型,并采用物理模型进行率定,解析了电站泄水时的干支流水力特性和鱼类洄游适宜度,探讨了不同来流流量和发电流量的影响效应;针对支流鱼类洄游适宜度较差的区域,评估了不同导流墙布置方式对鱼类洄游适宜度的改善效果。结果表明:水电站支流泄水会显著影响水动力条件,下游较大区域流速和水深随之增加,鱼类洄游适宜度总体减小,随着支流来流流量和发电流量的增加,上述影响进一步扩大;干支流汇口水动力条件受电站运行的影响最大,支流来流流量 459 m³/s、电站发电流量 535.0 m³/s 时(常规运行工况 C₃),汇口附近距左岸 1/6 河宽区域鱼类洄游适宜度仅为 0.11;按方案 7 设置导流墙,整体流速更加均匀,高流速和回流区减小,可使鱼类洄游条件明显改善。

关键词:引水式电站;河道干支流;水动力;鱼类洄游适宜度;数值模拟;物理模型试验

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)03-0255-10

Impacts of diversion-type hydropower stations on downstream hydrodynamics and fish migration suitability and their optimization//HE Wei^{1,2,3}, WANG Haiyang^{1,2,3}, LI Guoling^{1,2,3}, XU Jiangtao⁴, ZHOU Wu⁴, XIONG Qiang⁵
(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Collaborative Innovation Center for Water Safety and Water Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 5. Guoneng Dadu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Taking a hydropower station on the Dadu River in Southwest China as an example, a three-dimensional hydrodynamic and fish migration suitability model was established for the downstream mainstem and tributary of a hydropower station, with calibration conducted using a physical model. The study analyzed the hydraulic characteristics and fish migration suitability during power station discharge, while investigating the effects of varying inflow and generation flow rates. For tributary sections with poor fish migration suitability, different diversion wall configurations were evaluated to assess their improvement effects. The results demonstrate that hydropower discharge significantly alters hydrodynamic conditions, increasing flow velocity and water depth across a large downstream area while reducing overall fish migration suitability-effects that intensify with higher tributary inflow and generation flows. The confluence zone exhibits the most pronounced hydrodynamic impacts, with migration suitability dropping to 0.11 within a 1/6 channel-width area from the left bank under typical operation (C₃ scenario: tributary inflow is 459 m³/s, generation flow is 535.0 m³/s); implementation of diversion wall scheme 7 homogenizes flow distribution and reduces high-velocity zones and recirculation, thereby markedly improving fish migration conditions.

Key words: diversion-type hydropower station; mainstream and tributary of river channels; hydrodynamics; fish migration suitability; numerical simulation; physical model test

水电站具有缓解洪涝灾害、优化水资源配置和多样性造成负面影响^[2-3],例如,水电站泄水会改变
兴利发电^[1]等社会价值,但其运行可能对水生生物自然水文情势^[4-5],阻碍洄游性鱼类的迁徙,削弱上

下游鱼类种群间的基因交流,进而导致鱼类种群数量下降^[6-7]。因此,开展下游水动力变化及其对鱼类洄游影响的研究具有重要意义^[8]。

目前关于水电站泄水对鱼类洄游影响的研究主要采用数值模拟方法,其中 MIKE、FLOW-3D 和 Fluent 等水动力模型应用较为广泛。孙林等^[9]基于 FLOW-3D 软件,利用流速适宜度来模拟鱼类的上溯通道;Tan 等^[10]根据鱼类的游泳能力和河流的流量条件来确定不同情景下鱼类的洄游通道;黄月群等^[11]采用声学监测技术对大坝泄水后的流场特性及鱼类运行轨迹进行拟合分析,以研究不同流速对鱼类洄游能力的影响;李健超^[12]通过建立三维模型,利用生境指标研究不同运行方案下的鱼类洄游适宜度;文典等^[13]结合研究河段水流情况,根据主要过鱼的适宜性特征来研究鱼类主要上溯通道,对鱼道进口布置方案进行验证。

已有文献中有关水电站运行对下游水动力的影响及优化研究主要集中在水电站出口附近区域,模拟范围较小,多局限于同一条河流^[14-15],鲜有针对干支流交汇区域的系统性研究。此外,采用从干流取水、支流放水的方式可能对干流、支流尤其是汇口附近的水动力条件产生显著影响,而该影响对下游水动力及鱼类洄游的具体作用机制尚需进一步明确,且目前缺乏针对上述问题的工程优化方案研究。基于此,本文构建了三维水动力-鱼类洄游适宜度模型,模型涵盖了干流及水电站所在的支流,扩大了模拟范围,分析了水电站运行对下游水动力及鱼类洄游的影响,并提出通过增设导流墙等措施来提升鱼类洄游适宜性的优化策略。

1 研究区概况

以中国西南某水电站为例,对支流及汇口段展开研究。水电站位于四川省大渡河上,为中型引水式水电站,库容为 0.5 亿 m³,回水长度 17.4 km。水电站从大渡河干流取水,从支流泄水,取水口位于汇口上游 20 km 处,厂坝之间采用左岸约 17.4 km 处的引水系统连接。地面厂房距汇口 300~500 m,距侧向来流净距离约 150 m。电站设计发电流量 1 070 m³/s,共 4 台机组,每台机组泄流量为 267.5 m³/s。水电站下游干支流区域的主要洄游鱼类包括重口裂腹鱼、青石爬鮡、黄石爬鮡、齐口裂腹鱼、长须裂腹鱼、大渡河裸裂尻鱼等^[16]。由于水电站出水口位于支流,其运行将显著改变干支流的流量分配、流速等水文情势,从而对下游鱼类的洄游生境条件产生影响^[17]。综合考虑洄游鱼类的重要性、经济性和资料完整性,选择齐口裂腹鱼和长须裂腹

鱼作为模拟鱼类^[18]。

2 研究方法

2.1 数学模型

基于实测地形、水文数据和工程布置情况,构建水电站下游干支流三维水动力-鱼类洄游适宜度数学模型。该模型将河道各断面流速和水深数据转化为鱼类洄游适宜度指标,相较于传统水动力模型,能够更直观地体现鱼类对于不同流速条件的响应特征,并揭示流速-水深协同变化对鱼类行为的影响规律。

地形数据来自工程业主单位,垂向精度为 0.01 m。结合水电站附近地形图,计算区域用三角形单元网格剖分。水动力-鱼类洄游适宜度模型水平方向共 8 510 个节点,16 040 个网格单元。计算域内网格平均尺寸 3 m,在湿地区域、各出入水口以及汇口附近区域对网格进行加密^[19]。垂向采用 Sigma 分层,共分 5 层。

模型共设 5 个出入流边界,4 个人流边界均为流量边界,1 个出流边界为水位边界;其余为陆地边界,侧向入流来自另外一个水电站的泄水。模型糙率采用 0.035,其余参数均采用默认值。为了对比不同方案下模拟区域的水动力分布情况,将支流和汇口下游大渡河段分为 13 个断面进行研究,见图 1 (1 号与 2 号断面之间为断面间区域 1,以此类推)。

控制方程采用水动力模块三维不可压缩的 N-S 方程,具体见文献[12]。

2.2 鱼类洄游适宜度评估模块

鱼类洄游适宜度主要考虑水动力(流速^[20]、水深^[21])、温度^[22-23]等生境指标^[24],其中水动力指标中流速和水深对鱼类洄游的影响较大^[25-26],因此将流速和水深作为鱼类洄游生境指标,构建鱼类洄游适宜度评估模块。

流速和水深适宜度是利用 0~1 之间的数值来反映目标鱼类在不同流速情况下的洄游情况(1 表示最适宜目标鱼类生存,0 表示最不适宜鱼类生存)。参考大渡河与邻近流域的水生态环境特征,将裂腹鱼流速区域分为 4 个部分,分别为感知区(>0~0.3 m/s)、舒适区(>0.3~3 m/s)、爆发冲刺区(>3~5 m/s)和屏障区(>5 m/s)^[9,27]。裂腹鱼适宜度曲线见图 2。

鱼类在水体环境中会迅速选择适宜的水深层(或动水压力)进行活动^[28-29]。在浅水区域,鱼类可能因底部障碍物的限制而无法正常游动;在深水区域,水深对洄游行为的限制较小,洄游行为主要受流速等因素的影响。对于洄游性鱼类齐口裂腹鱼^[30],

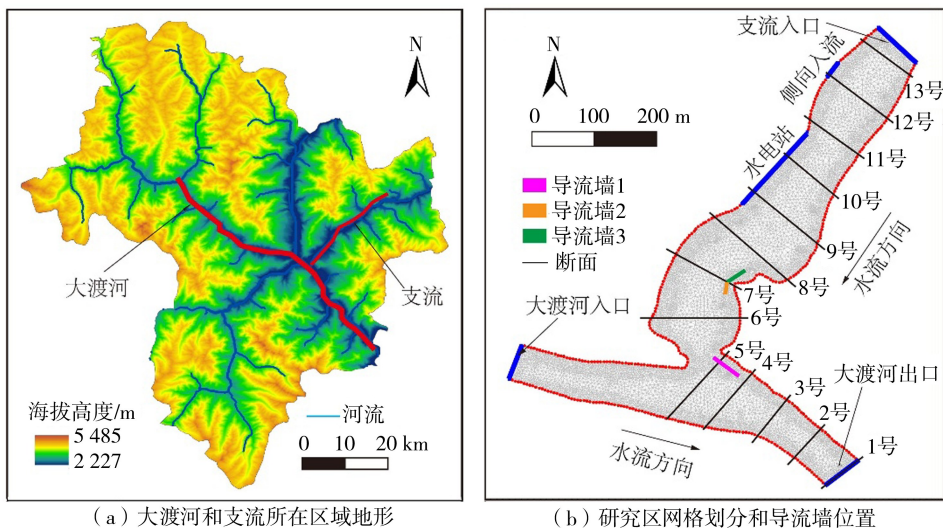


图 1 研究区及网格划分
Fig. 1 Study area and mesh division

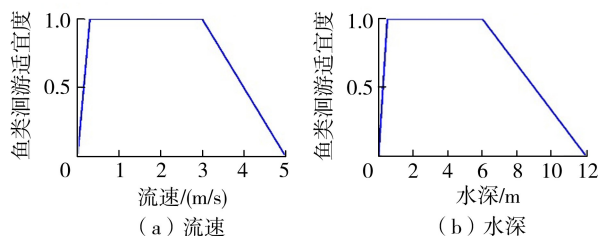


图 2 裂腹鱼适宜度曲线

Fig. 2 Suitability curves of Schizothorax

采用层次分析法对流速和水深进行权重分配,最终确定流速和水深的权重比为 0.64 : 0.36,即

$$S_{\text{总}} = S_V^{0.64} S_d^{0.36} \quad (1)$$

式中: $S_{\text{总}}$ 为总适宜度; S_V 为流速适宜度; S_d 为水深适宜度。

2.3 模型验证

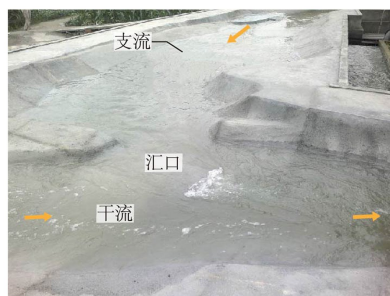
利用物理模型试验对数值模型进行验证。物理模型涵盖了水电站所在支流和大渡河干流部分区域,包括支流汇口上游 0.7 km 河道,大渡河汇口上游 0.3 km 与汇口下游 0.4 km 河道范围。物理模型采用重力相似准则,比尺为 1 : 50,物理模型示意图如图 3 所示。

验证模型时边界采用支流($p=50\%$, p 为径流量保证率)来流流量进行设置,通过对比流速和水位对数学模型进行验证,采用水位和流速的纳什效率系数(E_{NS})和均方根误差(E_{RMS})来评价模拟结果^[31],验证结果如图 4 所示。

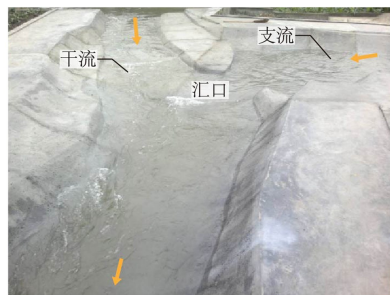
由图 4 可知,水位和流速模拟结果的 E_{NS} 值均大于 0.7,水位和流速的 E_{RMS} 值均较小,分别为 0.217 m 和 0.294 m/s,说明该模型拟合结果较好。

2.4 模拟工况

为了解水电站在不同情况下对支流流域的影



(a) 左视图



(b) 正视图

图 3 物理模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the physical model

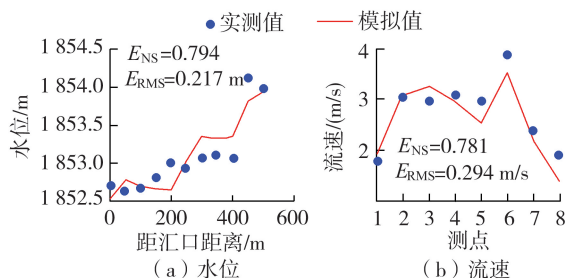


图 4 水位和流速验证结果

Fig. 4 Verification of water level and flow velocity

响,根据支流流量和运行机组台数,拟定如表 1 所示工况进行模拟研究,各情景下支流侧向入流量均为 $141 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

表 1 模拟工况设置

Table 1 Simulation conditions settings

时段	情景	工况	水电站发电 流量/(m ³ /s)	大渡河干流 来流流量/(m ³ /s)	支流来流流量/ (m ³ /s)	汇口总流量/ (m ³ /s)	干流下游 控制水位/m
水电站 运行前		A ₁	0	1 210	459($p=50\%$)	1 810	1 849. 70
		A ₂			8. 46(生态流量)	1 359	1 848. 42
		A ₃			796($p=10\%$)	2 147	1 850. 56
		A ₄			1 130($p=2\%$)	2 481	1 851. 35
	不同来流 流量影响	B ₁	1 070. 0	139	459($p=50\%$)	1 810	1 849. 70
		B ₂			8. 46(生态流量)	1 359	1 848. 42
		B ₃			796($p=10\%$)	2147	1 850. 56
		B ₄			1 130($p=2\%$)	2 481	1 851. 35
水电站 运行后	无导流墙时 不同发电 流量影响	C ₁	0	1 210	459($p=50\%$)	1 810	1 849. 70
		C ₂	267. 5	942			
		C ₃	535. 0	674			
		C ₄	802. 5	407			
		C ₅	1 070. 0	139			
	有导流墙后 不同发电流量 影响	D ₁	0	1 210	459($p=50\%$)	1 810	1 849. 70
		D ₂	267. 5	942			
		D ₃	535. 0	674			
		D ₄	802. 5	407			
		D ₅	1 070. 0	139			

3 水电站运行对下游支流水动力演变和鱼类洄游的影响

3.1 水电站运行前后水动力条件和鱼类洄游适宜度

3.1.1 水动力条件

从图 5(a) (b) 和 6(a) (b) 可知,与水电站未运行相比,工况 C₃(该工况运行时间较长,故作为典型工况)下,电站下游河段会通过增大支流流量来增大流速和水深。本文研究区河道主要以块石底质为主,稳定性较高,对水动力条件的扰动较小,整体水流状态接近恒定流。工况 C₃ 时,不同断面间各层流速和总垂向平均流速的模拟结果显示,表层流速略大,而底层流速相对略小,各层断面流速分布表现出较高的一致性,垂向差异并不显著;表层、中层和底层断面间平均流速与总垂向平均流速最大差值分别为 0. 17、0. 09、0. 07 m/s,总平均流速与总垂向平均流速分别相差 0. 12、0. 05、0. 04 m/s,故采用垂向平均流速来代表断面流速^[32]。图 5 中椭圆标记位

置为左岸不适宜鱼类洄游区域。

研究区域内,水电站下游河段平均流速、水深分别由 1. 77 m/s 和 3. 37 m 增大至 2. 30 m/s 和 3. 82 m,其中,干支流汇口水动力条件受水电站运行的影响最大,近左岸 1/6 区域流速剧增(从 1. 65 m/s 至 3. 23 m/s)且水深略增(从 1. 20 m 至 1. 48 m),流速条件显著偏离鱼类适宜范围,因而无法形成连续的鱼类洄游路径。汇口下游 100~400 m 处平均流速和水深变化不大,水电站上游流速出现减小的趋势。

3.1.2 鱼类洄游适宜度

结合裂腹鱼流速和水深适宜度曲线,其流速-水深适宜度分布见图 6 (c)。可见水电站运行后对汇口附近位置鱼类洄游适宜度影响较大,近左岸 1/6 区域适宜度急剧下降至 0. 11;水电站附近适宜度由 0. 89 降至 0. 56;其余位置适宜度变化不大。

3.2 不同来流流量的影响

3.2.1 水动力条件

图 7 中(a) (b) (d) (e) 为水电站运行前后各断

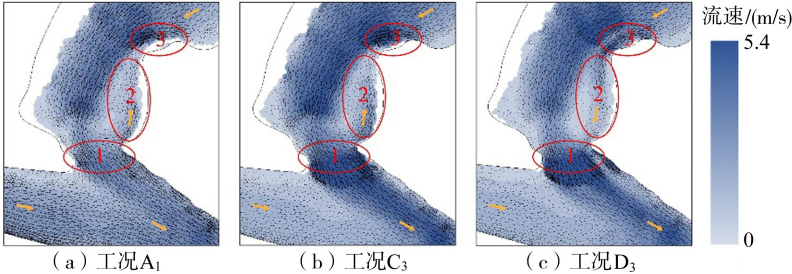


图 5 不同工况鱼类无法洄游区域

Fig. 5 Identified fish migration barrier areas under different conditions

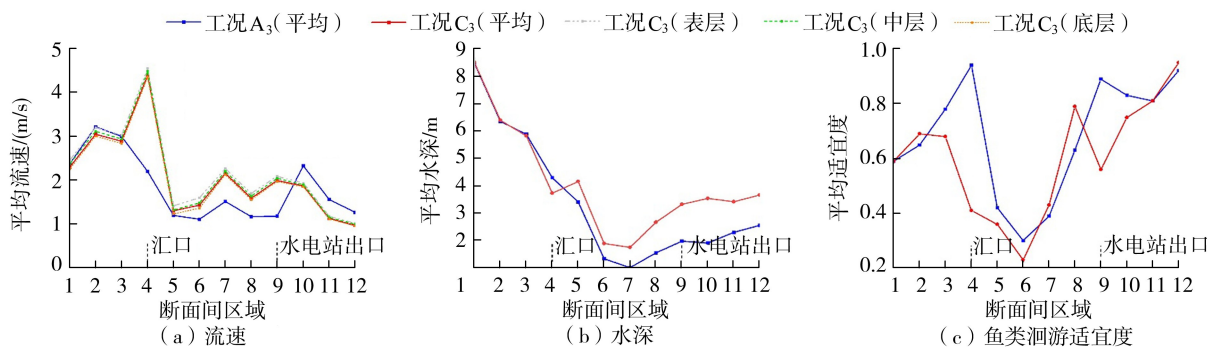


图 6 水电站运行前后各断面平均流速、水深和适宜度分布

Fig. 6 Distribution of average flow velocity, water depth, and habitat suitability at cross-sections before and after hydropower station operation

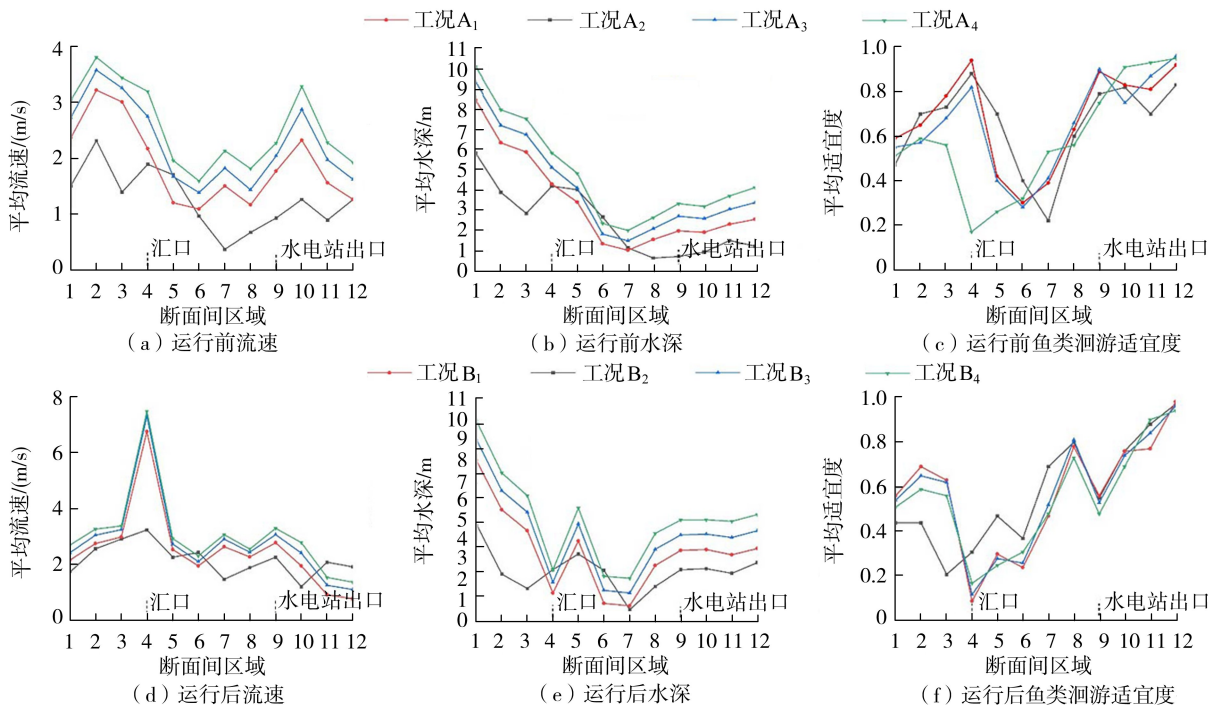


图 7 水电站运行前后不同支流来流流量下各断面平均流速、水深和适宜度分布

Fig. 7 Distribution of average flow velocity, water depth, and suitability at different cross-sections of tributary inflows before and after hydropower station operation

面间的平均流速和平均水深变化。可以看出,水电站运行前后,模拟区域各断面之间流速、水深都随着支流来流流量的增加而增大,水电站下游平均流速由 1.07、1.83、2.18、2.47 m/s 分别增至 2.21、2.60、2.83、3.04 m/s。其中,汇口附近流速增幅更为明显,从 1.13、2.00、2.44、2.81 m/s 分别增至 3.48、4.14、4.38、4.60 m/s。水电站运行之前,支流处流速较小,没有鱼类洄游适宜度明显较低的区域;而在水电站运行之后,汇口位置流速显著增加,出现了适宜度较低的区域。此外,与水电站运行前相比,汇口至汇口上游 50 m 范围内水深增加较为明显,随着支流来流流量的增大,平均水深由 4.02、3.40、4.09、4.83 m 增大至 4.71、5.25、5.94、6.59 m;支流其他区域的水深随着支流来流流量的增加稳步增大;汇口

下游干流水深与水电站运行前相比变化不大。

3.2.2 鱼类洄游适宜度

从图 7(c)(f)可以看出,水电站运行前,模拟区域内鱼类洄游适宜度总体趋势为随着支流来流流量的增加而减小,汇口至其上游 200 m 附近适宜度变化不明显;而水电站上游区域,适宜度出现了随来流流量增加而增大的趋势。在工况 B₁、B₂ 和 B₃ 下,适宜度波动范围较小,汇口处适宜度保持在较高水平。与工况 B₃ 相比,当支流来流流量增大至 1130 m³/s (B₄ 工况)时,汇口处由于流速增大,平均鱼类洄游适宜度发生了骤降,最大降值为 0.65。水电站运行后,在较大流量(459 m³/s 及以上)条件下,各工况适宜度波动范围较小,变化趋势一致。与水电站运行前相比,随着支流来流流量的增大,汇口位置附近

区域平均鱼类洄游适宜度显著降低,从 0.88、0.94、0.82、0.18 分别降为 0.31、0.09、0.12、0.17。水电站出口位置出现横向水流,影响裂腹鱼洄游,平均鱼类洄游适宜度减小,从 0.79、0.89、0.90、0.75 分别下降至 0.55、0.56、0.53、0.48。由于水电站运行后会对上游的水流产生一定的缓冲作用,使得水电站上游的适宜度保持相对稳定。与工况 B_2 相比,其余工况下汇口下游流速更加平稳,部分区域水深增大至适宜范围,适宜度反而有一定的增加。

3.3 不同发电流量的影响

3.3.1 水动力条件

为了进一步了解水电站常用工况对鱼类洄游的影响,以支流来流量为 $459\text{ m}^3/\text{s}$ ($p=50\%$) 为例,研究水电站日常运行时模拟区域的鱼类洄游适宜度情况。各断面间平均流速和水深变化如图 8 (a) (b) 所示。可见,随着水电站发电流量的增大,汇口下游 100~400 m 位置流速变化不大;而在汇口下游 100 m 到水电站出水口之间,流速逐渐增大,尤其是汇口附近增幅显著,平均流速从 2.17 m/s 依次增至 2.92、4.24、5.62、6.78 m/s;水电站上游流速随着发电流量的增大而逐渐减小。水深方面,汇口下游水深基本不变,汇口上游水深随着水电站发电流量的增大而增大。

3.3.2 鱼类洄游适宜度

图 8(c) 为水电站不同发电流量下,各断面间平均鱼类洄游适宜度变化。随着发电流量的增加,汇口附近鱼类洄游适宜度呈现较大的波动,平均适宜度显著下降,从 0.93 分别降低至 0.68、0.41、0.21、0.09。这是由于高发电流量下汇口附近流速剧增,使流速超出鱼类适宜洄游的范围。与工况 C_1 相比,工况 $C_2\sim C_5$ 水电站出口处出现了横向水流,抑制了裂腹鱼洄游,随着发电流量的增加,其平均适宜度从 0.88 依次下降至 0.52、0.56、0.56、0.56,且各工况间适宜度波动较小,变化趋势一致。在水电站上游

区域,鱼类洄游适宜度相对稳定,变化幅度较小。这可能是水电站运行后对上游水流产生了缓冲效应,使流速逐渐减小,同时水深有所增加,但仍保持在鱼类洄游的适宜范围内。而在汇口下游,由于总流量保持不变,流速和水深变化幅度较小,水动力环境较为稳定,因此该区域的鱼类洄游适宜度未到受明显的影响。

3.4 运行后鱼类洄游适宜度较低区域

综合上述各工况,由图 5 (a) (b) 可知,水电站运行前区域 2 和区域 3 属于低适宜度区,区域 2 会形成回流,导致鱼类迷失方向而无法正常洄游^[33-34],区域 3 流速过大将导致鱼类无法正常通过。电站运行后新增低适宜度区(区域 1),该位置通过增大流速形成了流速屏障,因而鱼类无法通过,从而无法形成连续的洄游通道。因此需要通过工程措施来提高上述区域的鱼类洄游适宜度。

4 水电站导流墙优化方案研究

针对水电站运行后出现的 3 个鱼类洄游适宜度较低区域,陈永灿等^[21,25]认为可通过在适宜度较低的区域增设导流墙的方式来改善河流水动力状态。本文采用在图 5 区域 1、区域 2、区域 3 增设导流墙的方式来提高鱼类上溯的效率。因为河道左右两岸流速较低,更加适合鱼类洄游。然而水电站位于支流右岸,属于侧向出口,泄水时会产生横向水流,不适合鱼类的洄游,故只需考虑洄游路径在支流左岸的情况^[13,35]。

本文采用在鱼类洄游适宜度较低区域左岸 1/6 河宽的位置设置导流墙来进行优化,并通过对比鱼类洄游适宜度较低区域水动力和适宜度的改善效果来确定最终方案。导流墙大致位置见图 1 (b)。

4.1 水动力条件

为了改善裂腹鱼洄游适宜度较低的区域,从而形成连续的洄游通道,根据导流墙的位置和数量不

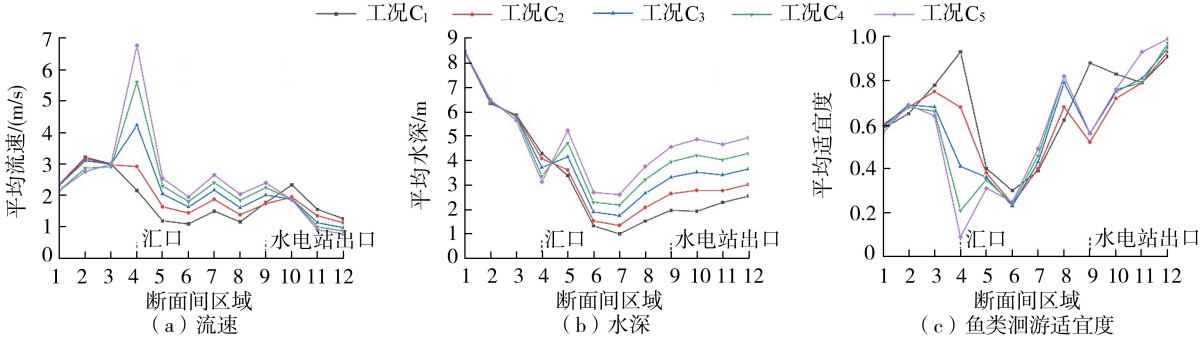


图 8 不同发电流量下各断面平均流速、水深和鱼类洄游适宜度分布

Fig.8 Distribution of average flow velocity, water depth, and suitability at different cross-sections under various power generation discharge conditions

同设置 7 个方案,见表 2。无导流墙时 3 个区域距左岸 1/6 处 $C_1 \sim C_5$ 工况鱼类洄游适宜度分别为 0.18、0.16、0.13、0.10、0.08,各工况适宜度平均值为 0.13。不同导流墙设置方案对应的鱼类洄游适宜度见表 2。

表 2 导流墙设置方案
Table 2 Guide wall schemes

方案	导流墙位置	鱼类洄游适宜度					
		工况 C_1	工况 C_2	工况 C_3	工况 C_4	工况 C_5	平均值
1	导流墙 1	0.18	0.16	0.13	0.12	0.13	0.14
2	导流墙 2	0.25	0.27	0.17	0.19	0.20	0.22
3	导流墙 3	0.25	0.23	0.19	0.21	0.19	0.21
4	导流墙 1+ 导流墙 2	0.17	0.17	0.20	0.22	0.29	0.21
5	导流墙 1+ 导流墙 3	0.26	0.25	0.27	0.25	0.24	0.25
6	导流墙 2+ 导流墙 3	0.41	0.59	0.61	0.55	0.55	0.54
7	导流墙 1+ 导流墙 2+ 导流墙 3	0.45	0.64	0.61	0.58	0.57	0.57

分析可知,方案 4、5、6、7 可有效提高鱼类洄游

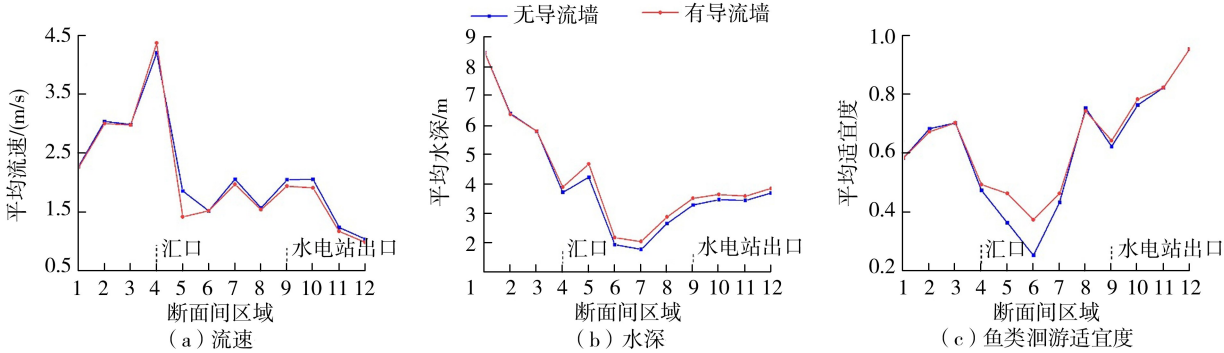


图 9 不同发电流量下导流墙增设前后各断面平均流速、水深和鱼类洄游适宜度分布

Fig. 9 Average flow velocity, water depth, and suitability at different cross-sections under varying power generation discharges before and after diversion wall installation

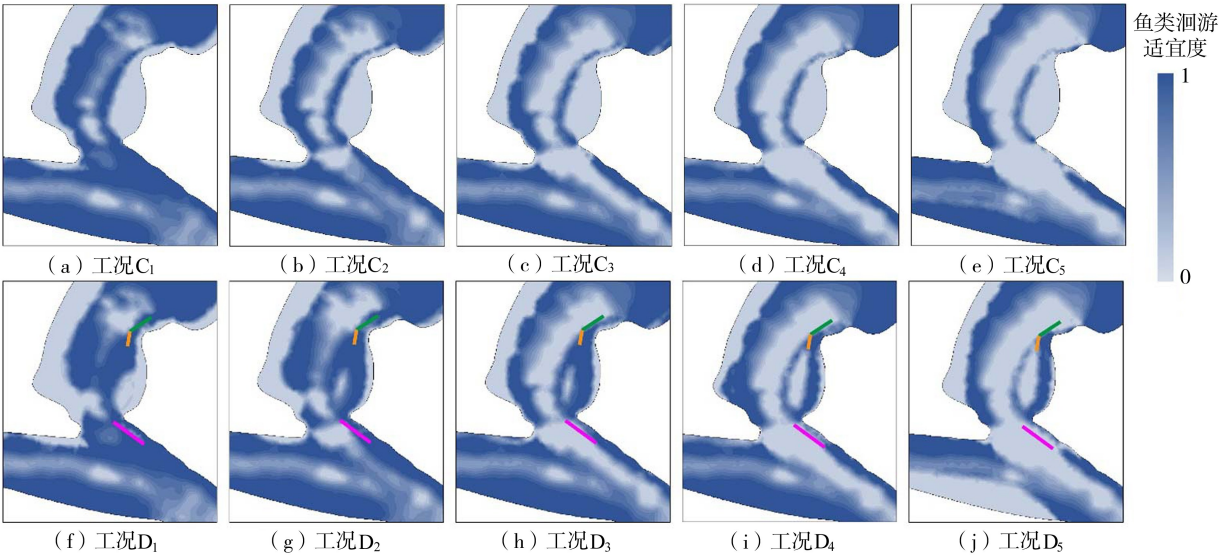


图 10 工况 $C_1 \sim C_5$ 和工况 $D_1 \sim D_5$ 鱼类洄游适宜度分布云图

Fig. 10 Contour map of fish migration suitability distribution under conditions $C_1 \sim C_5$ and $D_1 \sim D_5$

适宜度,但采用方案 4 会使区域 3 流速增大,方案 5 仍会在区域 2 形成大量回流区,方案 6 会使汇口左岸流速增大,不适合鱼类洄游。因此选择方案 7 最为合理。

以工况 C_3 为例,增设导流墙后鱼类无法洄游的 3 个区域改进情况见图 5(c)。可见,按方案 7 设置导流墙后,区域 2 在左岸附近回流区减少,水流更加平顺;同时,区域 1 和区域 3 导流墙与左岸间水流平均流速从 2.12 m/s 减小至 1.44 m/s,水动力得到明显改善,能够形成连续的洄游路线,更有利于鱼类的洄游。

4.2 鱼类洄游适宜度

从图 9 和图 10(工况 C 没有导流墙,工况 D 增设导流墙)可以看出,按方案 7 设置导流墙之后,导流墙内部鱼类洄游适宜度总体变好,汇口下游干流流域 50~400 m 处变化不大,汇口下游大渡河流域 50 m 处到水电站出水口下游区域鱼类洄游适宜度变好,其中导流墙内部区域工况 $C_1 \sim C_5$ 平均鱼类洄游适宜度分别由原来的 0.18、0.16、0.11、0.10、

0.08 变为 0.45、0.64、0.61、0.58、0.57,其余位置变化不大,基本能够满足裂腹鱼的洄游要求。但工况 D₅4 台机组运行时,汇口下游附近大渡河流域左岸 50 m 处鱼类洄游适宜度较小,仅为 0.36,不能满足鱼类正常洄游的要求。

5 引水式电站影响下的干流鱼类洄游适宜度

在探讨水电站泄水对支流鱼类洄游适宜度的影响时,还需关注汇口上游干流的变化^[36]。水电站运行会同时对支流和干流的水动力条件产生影响,进而影响洄游鱼类的生态环境。当支流来流和侧向入流一定时,随着水电站发电流量的增大,干流流量逐渐减少,使汇口上游流速随之降低。当发电流量达到 535.0 m³/s 时,汇口上游干流的流速降至适宜鱼类洄游的范围。如表 3 所示,该位置鱼类洄游适宜度随着发电流量的增大呈现先增大后减少的趋势。

表 3 汇口上游干流鱼类洄游适宜度变化
Table 3 Variation of fish migration suitability in upstream mainstream of confluence

发电流量/(m ³ /s)	干流流量/(m ³ /s)	鱼类洄游适宜度
0	1 210	0.79
267.5	942	0.82
535.0	674	0.84
802.5	407	0.82
1 070.0	139	0.50

考虑到该流域裂腹鱼从支流上溯,为确保鱼类洄游高峰期的适宜水流,可降低水电站发电流量。建议控制在 267.5 m³/s 或 535.0 m³/s,即运行 1 台或两台机组。

6 结 论

- a. 大渡河某引水式水电站采用干流取水、支流放水的特殊布置形式,支流流量增大,显著改变了支流和汇口区域的水动力条件,支流流速和水深受到显著影响,从而影响到鱼类洄游。
- b. 在支流来流流量为 459 m³/s、发电流量为 535.0 m³/s 的条件下,水电站下游河段平均流速由 1.77 m/s 增至 2.30 m/s,平均水深由 3.37 m 增大至 3.82 m,鱼类洄游适宜度从 0.53 减小至 0.49。汇口左岸 1/6 区域流速剧增,流速条件显著偏离鱼类适宜范围,导致鱼类洄游适宜度降至 0.11,难以形成连续的鱼类洄游路径。
- c. 随着支流来流流量和发电流量的增加,干支流大部分区域流速和水深随之增大,鱼类洄游适宜度总体降低。
- d. 增设导流墙可以通过改善水流形态提高鱼

类洄游适宜度。最终选择方案 7,即在水电站出水口下游约 100 m、距左岸 1/6 河宽位置以及汇口处设置导流墙,减小高流速区,均匀流态,增大了鱼类的洄游路径。导流墙内平均鱼类洄游适宜度从 0.11 增大至 0.61,明显改善了该区域的洄游条件。

参考文献:

[1] 丁紫玉,方国华,毛莺池,等.考虑发电与弃水风险的梯级水电站水库风险调度模型[J].水资源保护,2024,40(2):100-106. (DING Ziyu, FANG Guohua, MAO Yingchi, et al. Research on risk control methods for cascade hydropower station reservoirs considering power generation and water spillage risks[J]. Water Resources Protection,2024,40(2):100-106. (in Chinese))

[2] 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[J].水科学进展,2020,31(5):793-810. (CHEN Qiuwen, ZHANG Jianyun, MO Kangle, et al. Effects of hydropower development on aquatic eco-environment and adaptive managements[J]. Advances in Water Science,2020,31(5):793-810. (in Chinese))

[3] 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 Li, MA Chao, LIAN Jijian. Effects of reservoir regulation on downstream fish habitat suitability [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51 (6): 566-574. (in Chinese))

[4] 李沁园,陈默,张思九,等.水电开发对河流生态系统生产总值的影响[J].水资源保护,2024,40(6):233-241. (LI Qinyuan, CHEN Mo, ZHANG Sijiu, et al. Impact of hydropower development on the gross river ecosystem product[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6): 233-241. (in Chinese))

[5] 韩文彪,姚成,李致家,等.考虑水库泄水影响的逐网格汇流演算方法[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):34-41. (HAN Wenbiao, YAO Cheng, LI Zhijia, et al. Routing method of confluence considering the influence of reservoir drainage at grid scale[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (3): 34-41. (in Chinese))

[6] 李欣桐,王远铭,梁瑞峰,等.河流系统生态完整性评估的回顾与展望[J].中国环境科学,2024,44(4):2256-2272. (LI Xintong, WANG Yuanming, LIANG Ruifeng, et al. A review and prospect for ecological integrity assessment of river systems [J]. China Environmental Science,2024,44(4):2256-2272. (in Chinese))

[7] BENEJAM L, SAURA-MAS S, BARDINA M, et al. Ecological impacts of small hydropower plants on headwater stream fish: from individual to community effects[J]. Ecology of Freshwater Fish,2016,25(2):295-

- 306.
- [8] 温佳琦,王皓冉,陈永灿,等. 梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3266-3274. (WEN Jiaqi, WANG Haoran, CHEN Yongcan, et al. Longitudinal distribution of benthic macroinvertebrates affected by a hydropower plant cascade in the Mudan River[J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3266-3274. (in Chinese))
- [9] 孙林,易文敏,张兴磊,等. 变流场情景下基于鱼类游泳特性的上溯通道分析[J]. 水力发电学报, 2021, 40(10): 1-9. (SUN Lin, YI Wenmin, ZHANG Xinglei, et al. Analysis of upstream migrating channels based on characteristics of fish swimming in variable flow field[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(10): 1-9. (in Chinese))
- [10] TAN Junjun, TAN Honglin, GOERIG E, et al. Optimization of fishway attraction flow based on endemic fish swimming performance and hydraulics[J]. Ecological Engineering, 2021, 170: 106332.
- [11] 黄月群,蔡德所,李明泉,等. 大坝泄水对鱼类洄游能力的影响研究[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 74-80. (HUANG Yuequn, CAI Desuo, LI Mingquan. et al. Influence of dam discharge on fish swimming ability[J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 74-80. (in Chinese))
- [12] 李健超. 多布水电站坝下流场分析及鱼类洄游水力生境指标研究[D]. 西安:西安理工大学, 2022.
- [13] 文典,李洪泽,王晓刚,等. 基于鱼类集群及上溯通道分析的鱼道进口位置论证[J]. 水利水运工程学报, 2021(6): 89-96. (WEN Dian, LI Hongze, WANG Xiaogang. et al. Demonstration of layout of fishway entrance based on fish clusters distribution and fish upstream passage[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(6): 89-96. (in Chinese))
- [14] HE Wei, ZHANG Xufang, ZHANG Jian, et al. Regulating outflow temperature for multi-objective operation of cascade reservoirs: a case study[J]. Renewable Energy, 2023, 211: 155-165.
- [15] 郑铁刚,孙双科,柳海涛,等. 基于鱼类行为学与水力学的水电站鱼道进口位置选择[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 164-170. (ZHENG Tiegang, SUN Shuangke, LIU Haitao, et al. Location choice of fishway entrance in hydropower project based on fish behavioristics and hydraulics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(24): 164-170. (in Chinese))
- [16] 李美萍,段斌,王海胜,等. 大渡河上游某河段鱼类栖息地适宜性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 30-36. (LI Meiping, DUAN Bin, WANG Haisheng, et al. Suitability evaluation of fish habitat for one upper reach of Dadu River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 30-36. (in Chinese))
- [17] 肖洋,姚晨欣,张涛涛,等. 交汇区水流结构对水温分布特征的影响机理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 1-11. (XIAO Yang, YAO Chenxin, ZHANG Taotao, et al. Influence mechanisms of flow structure on water temperature distribution characteristics in junction areas[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 1-11. (in Chinese))
- [18] 刘猛,张逸譔,刘园,等. 雅砻江锦屏大河湾鱼类多样性及群落结构的年际变化[J]. 淡水渔业, 2022, 52(2): 22-33. (LIU Meng, ZHANG Yixuan, LIU Yuan, et al. Temporal variation of fish diversity and community structure in the Jinping Bend of the Yalong River[J]. Freshwater Fisheries, 2022, 52(2): 22-33. (in Chinese))
- [19] 马铁梅,付俊峰,孙英. 基于 MIKE21 的异龙湖水动力优化与水质改善研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(7): 54-58. (MA Tiemei, FU Junfeng, SUN Ying. et al. Study on hydrodynamic optimization and water quality improvement of Yilong Lake based on MIKE21[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(7): 54-58. (in Chinese))
- [20] ZHAO Zilong, LIANG Ruifeng, WANG Yuanming, et al. Study on the swimming ability of endemic fish in the lower reaches of the yangtze river: a case study[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e01014.
- [21] 陈永灿,付健,刘昭伟,等. 三峡大坝下游溶解氧变化特性及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 526-530. (CHEN Yongcan, FU Jian, LIU Zhaowei, et al. Analysis of the variety and impact factors of dissolved oxygen downstream of Three Gorges Dam after the impoundment[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 526-530. (in Chinese))
- [22] HE Wei, WANG Haiyang, ZHANG Jian, et al. Diurnal variation characteristics of thermal structure in a deep reservoir and the effects of selective withdrawal[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 333: 117459.
- [23] 脱友才,周晨阳,梁瑞峰,等. 水电开发对大渡河瀑布沟以下河段的水温影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(2): 299-306. (TUO Youcai, ZHOU Chenyang, LIANG Ruifeng, et al. Influence of hydroelectric development on water temperature downstream the Pubugou hydropower station of the Dadu River[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(2): 299-306. (in Chinese))
- [24] 黄冬菁,李一平,崔广柏,等. 基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 142-148. (HUANG Dongjing, LI Yiping, CUI Guangbo, et al. Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 142-148. (in Chinese))
- [25] 夏继红,秦如照,窦传彬,等. 中小河流鱼类生境适宜性评估模型与等级分区[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42

(3): 9-13. (XIA Jihong, QIN Ruzhao, DOU Chuanbin. et al. Habitat suitability assessment model and suitability grading classification for fishes in small and medium rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 9-13. (in Chinese))

[26] 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[J/OL]. 水生态学杂志, 2023: 1-10 [2024-09-20]. DOI: 10. 15928/j. 1674-3075. 202306190163. (YAN Xiaoyao, YANG Zefan, ZENG Qinghui, et al. Experimental study on the interaction of flow velocity and water temperature on the grass carp reproductive migration [J/OL]. Journal of Hydroecology, 2023: 1-10 [2024-09-20]. DOI: 10. 15928/j. 1674-3075. 202306190163. (in Chinese))

[27] 谭燕平, 王玉蓉, 李嘉, 等. 雅砻江锦屏大河湾减水河段中鱼类栖息地模拟研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(3): 40-43. (TAN Yanping, WANG Yurong, LI Jia, et al. [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(3): 40-43. (in Chinese))

[28] 邓月曦, 唐锡良, 严忠奎, 等. 齐口裂腹鱼上溯洄游过程中的感官圈解译研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(8): 3882-3889. (DENG Yuexi, TANG Xiliang, YAN Zhongluan, et al. Interpretation of sensory query distance during upstream migration of Schizothorax prenanti [J]. China Environmental Science, 2022, 42(8): 3882-3889. (in Chinese))

[29] 朱天然, 孙林, 李嘉, 等. 齐口裂腹鱼集群行为对流态的响应[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 144-150. (ZHU Tianran, SUN Lin, Li Jia, et al. Response of the behavior of the Schizothorax prenati to the flow pattern [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 144-150. (in Chinese))

[30] 刘小帆. 高坝过鱼设施集诱鱼流态营造与生境适宜性评价[D]. 成都: 四川大学, 2021.

[31] LIU Shikang, JIAN Yuxang, LI Pengcheng, et al. Optimization schemes to significantly improve the upstream migration of fish: a case study in the lower Yangtze River Basin[J]. Ecological Engineering, 2023, 186: 106838.

[32] 张辉, 莫康乐, 李婷, 等. 鄱阳湖水利枢纽工程建设对草鱼江湖洄游潜在的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 600-610. (ZHANG Hui, MO Kangle, LI Ting, et al. The potential influence of the Poyang Lake Hydraulic Project construction on river-lake migration of grass carp [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 600-610. (in Chinese))

[33] 廖磊, 安瑞冬, 李嘉, 等. 齐口裂腹鱼趋流行为的水力学特性研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 69-72. (LIAO Lei, AN Ruidong, LI Jia, et al. Study on hydraulic characteristics of Schizothorax prenantis rheotaxis behavior [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(5): 69-72. (in Chinese))

[34] 谢春航, 安瑞冬, 李嘉, 等. 鱼道进口布置方式对集诱鱼水流水力学特性的影响研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(增刊2): 25-32. (XIE Chunhang, AN Ruidong, LI Jia, et al. Study on the influence of fishway entrance layout mode on hydraulic characteristics of fish luring flow [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(Sup2): 25-32. (in Chinese))

[35] 甄婉月, 王晓松, 穆祥鹏, 等. 基于坝下流场模拟的集鱼系统进口位置选择研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(3): 204-211. (ZHEN Wanyue, WANG Xiaosong, MU Xiangpeng, et al. Study on the optimal positioning of fish collection system based on numerical simulation of reservoir downstream [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(3): 204-211. (in Chinese))

[36] 肖洋, 刘扬扬, 王中敏, 等. 引调水工程对汉江中下游水文情势累积影响研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 169-178. (XIAO Yang, LIU Yangyang, WANG Zhongmin, et al. Cumulative influence of water diversion projects on hydrological regime of middle and lower reaches of the Hanjiang River [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 169-178. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 21 编辑: 胡新宇)

(上接第 243 页)

[22] EILANDER D, VAN VERSEVELD W, YAMAZAKI D, et al. A hydrography upscaling method for scale-invariant parametrization of distributed hydrological models [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(9): 5287-5313.

[23] YAMAZAKI D, IKESHIMA D, SOSA J, et al. MERIT Hydro: a high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset [J]. Water Resources Research, 2019, 55(6): 5053-5073.

[24] ZHANG Y, SCHAAP M G. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3) [J]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 39-53.

[25] WADA Y, FLÖRKE M, HANASAKI N, et al. Modeling global water use for the 21st century: the water futures and solutions (WFaS) initiative and its approaches [J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(1): 175-222.

(收稿日期: 2024 - 12 - 18 编辑: 胡新宇)