

金沙江支流黑水河松新电站短须裂腹鱼 (*Schizothorax wangchiachii*) 过坝后上溯行为*

焦易林^{1,2}, 石小涛^{1,2}, 许家炜³, 李冬晴², 白天翔², 陶宇⁴, 王永猛⁴, 孙干⁵, 朱冬舟⁶, 柯森繁^{1,2**}

(1: 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

(2: 三峡大学湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地, 宜昌 443002)

(3: 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

(4: 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081)

(5: 中国三峡建工(集团)有限公司, 成都 610041)

(6: 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要: 鱼类过坝后的上溯行为对鱼类寻找适宜的产卵、索饵等功能性栖息地至关重要。现阶段我国大多数研究聚焦于鱼类上溯通过鱼道的游泳行为量化, 而过坝后的上溯行为分析鲜有报道。本研究在金沙江下游支流黑水河松新坝址处利用 PIT (passive integrated transponder) 遥测技术对松新电站过鱼对象短须裂腹鱼 (*Schizothorax wangchiachii*) 过坝后的上溯行为开展监测, 考虑监测过程中水文情势变化对过坝后上溯行为的影响, 采用生存分析方法, 构建了耦合多因素 (流量、水温、河道涨落水率、昼夜节律、肥满度等) 的 Cox 风险比例回归模型, 利用 AIC 模型准则筛选出最优模型参数, 识别了影响鱼类过坝后上溯成功率的关键因素。结果表明: (1) 短须裂腹鱼在松新鱼道的上溯效果显著优于河道; (2) 水温及河道涨落率是影响短须裂腹鱼过坝后上溯效果的关键因素; (3) 水温与短须裂腹鱼过坝后河道上溯成功率呈负相关, 当水温超过短须裂腹鱼最适温度后, 河道上溯成功率随着温度的上升呈递减趋势; 河道涨落率与短须裂腹鱼过坝后河道上溯成功率呈正相关, 其中涨水情势下短须裂腹鱼河道成功上溯的概率高于落水, 河道上溯成功率随着涨水率增大呈递增趋势; (4) 尽管昼夜节律对短须裂腹鱼过坝后河道上溯成功率无显著影响, 但从数据结果发现有 61% 的短须裂腹鱼选择在夜间上溯。本研究旨在为恢复鱼类栖息地和优化小水电生态调度提供科学依据及参考价值。

关键词: 小水电; 短须裂腹鱼; 上溯行为; 河道流量涨落水率; 水温; 金沙江; 黑水河

Upstream behavior of *Schizothorax wangchiachii* after crossing dams at Songxin Hydro-power Station in Heishui River, a tributary of the Jinsha River*

Jiao Yilin^{1,2}, Shi Xiaotao^{1,2}, Xu Jiawei³, Li Dongqing², Bai Tianxiang², Tao Yu⁴, Wang Yongmong⁴, Sun Gan⁵, Zhu Dongzhou⁶ & Ke Senfan^{1,2**}

(1: Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

(2: Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

(3: College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(4: Power China Guiyang Engineering Co., Ltd, Guiyang 550081, P.R.China)

(5: China Three Gorges Construction (Group) Co., Ltd, Chengdu 610041, P.R.China)

(6: Shanghai Investigation, Design and Research Institute Corporation Limited, Shanghai 200434, P.R.China)

* 2022-05-10 收稿; 2022-07-05 收修改稿。

国家自然科学基金优秀青年科学基金项目 (51922065)、三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金项目 (KF2022-10) 和中国三峡建工(集团)有限公司科研项目 (JG/18056B, JG/18057B) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: 15926989126@163.com。

Abstract: The upstream behavior of fish after crossing the dam is critical for fish to find suitable functional habitats for spawning, baiting, etc. At present, most researches in China focus on quantifying the swimming behavior of fish upstream through the fishway, while the analysis of upstream behavior after crossing dams has rarely been reported. In this study, passive integrated transponder (PIT) telemetry was used at the Songxin Dam in the Heishui River, a tributary of the lower Jinsha River, to monitor the upstream behavior of *Schizothorax wangchiachii*, the target fish of Songxin Power Station, after crossing the dam. In view of the influence of changes in hydrological conditions on post-damming upstream behavior during monitoring, a Cox proportional regression model coupled with multiple factors (flow, water temperature, river rise and fall rate, diurnal rhythm relative fatness, etc.) was established by using survival analysis method. Meanwhile, the optimal model parameters were selected by utilizing the AIC model guideline to identify the key factors affecting the efficiency of fish's post-damming upstream movement. The results indicated that (1) The upstream effect of *Schizothorax wangchiachii* in the Songxin fishway passage rate is significantly better than that in the river channel; (2) Water temperature and rise and fall rate of river discharge are the key factors affecting the passage efficiency of *Schizothorax wangchiachii* after crossing the dam; (3) Water temperature was negatively correlated with the success rate of river upstream after *Schizothorax wangchiachii* crossed the dam, and when the water temperature exceeded the optimum temperature for *Schizothorax wangchiachii*, the success rate of river upstream was decreasing with temperature; The upstream success rate of *Schizothorax wangchiachii* after crossing the dam was positively correlated with the rate of river rise and fall rate, where the river successful upstream rate of *Schizothorax wangchiachii* in the situation of rising water is higher than that in falling water, and the river upstream success rate was increasing with water rise rate; (4) Although there was no significant effect of diurnal rhythm on the success of river upstream after crossing the dam for *Schizothorax wangchiachii*, the results showed that 61% of *Schizothorax wangchiachii* chose to upstream at night. This research provides scientific basis and reference for restoring fish habitat and optimizing ecological planning of small hydropower plants.

Keywords: Small hydropower plants; *Schizothorax wangchiachii*; upstream behavior; river flow rise and fall rate; water temperature; Jinsha River; Heishui River

小水电是我国最具优势的分布式清洁可再生能源^[1]。长江经济带 2.4 万座小水电中,大部分以小水电群的形式分布在长江、金沙江等流域^[2]。黑水河是金沙江下游干流河段梯级开发的第二级电站(白鹤滩水电站)库区内鱼类栖息地的优先保护河流。2021 年金沙江流域因白鹤滩水电站蓄水,金沙江支流黑水河俨然成为当地鱼类栖息的主要场所,而流域内自上而下已修建苏家湾、公德房、松新和老木河 4 座小水电^[3],构成了梯级小水电群,所引发的鱼类洄游通道阻隔问题备受关注^[4-5]。为减缓黑水河流域小水电开发对鱼类洄游通道连通性阻隔的不利影响,2018 年老木河坝址被拆除,旨在恢复原有河道的连通性^[6]。考虑到拆坝成本费用高且技术难度大等因素,大规模拆坝难以实行^[7]。因此,2019 年又在松新坝址修建鱼道以辅助鱼类过坝^[3]。过鱼对象通过鱼道并不等同于能顺利完成生命周期。有过坝需求的成鱼,仍需在过坝后继续上溯找到能提供索饵、产卵等生命活动的功能性栖息地^[8]。然而,目前国内有关洄游鱼类成功通过鱼道进入库区后,是否继续上溯找到适宜生境鲜有报道,迫切需要开展过鱼对象过坝后上溯行为研究。

野外场景下鱼类上溯行为易受多重因素影响,主要包括水力因素(流量、流速等)^[9],生理因素(运动疲劳^[10]、体型^[11]等)及环境因素(水温^[12]、昼夜节律^[13]等)。溪红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)在涵洞式鱼道流量为 715 L/s 时上溯尝试率是流量为 55 L/s 的 7 倍^[14]。马口鱼(*Opsariichthys bidend*)在应对过鱼通道内不同流量形成的流速障碍时会选择低流速区进行上溯^[15]。在过鱼通道流量为 20 L/s 时,异鳃(*Parazacco spilurus*)上溯过程中,会主动避开高端动区,偏好选择湍动能(k)和雷诺切应力(τ)分别为 0~70 cm^2/s^2 和-10~40 dyn/cm^2 区域进行上溯^[16]。齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)在水温为 13~14℃时,上溯通过鱼道的比率(81%)显著高于 17~18℃(56%)^[17]。鲮鱼(*Chelon ramada* Risso)在洄游迁移时期,偏好在日出到黄昏时段内活动,其中有 60%的鱼选择在 12:00—19:00 间进行上溯^[18]。在众多影响因素中,识别影响鱼类上溯行为的关键因素对塑造适宜鱼上溯的生境条件至关重要^[19]。国外学者已构建了多个上溯效果的评价模型用于识别影响上溯行为的关键因素,如 Lothian 等利用了二元广义线性混合效应模型发现,温度、昼夜节律和流量为圆鳍雅罗鱼(*Squalius cephalus*)上溯尝试和成功率的关键影响因素^[20]。Goerig 等利用了生存分析的 Cox 风险比例回归模型,发现了流速、鱼的体型和昼夜节律是影响溪红点鲑上溯动机的驱动因子^[11]。Duguay 等利用加速时间失效模型,发现了挡板结构、鱼的全长和流量是影响河鲈(*Salmo trutta*)上溯效率的

关键影响因素^[21]。然而,国内耦合多因素鱼类上溯效果评价模型相对缺乏。尽管国内外已开展了大量有关鱼类上溯行为的研究,但现阶段仍普遍聚焦鱼类应对鱼道内流场及环境条件的上溯行为,针对水力及环境因素对鱼类过坝后上溯行为的影响认知不足。因此开展鱼类跟踪监测,深入了解鱼类水力和环境因素对鱼类坝后上溯行为的内在影响机理显得十分重要。松新电站为无调节性小水电,在蓄水和发电的过程中坝后库区水文情势易发生剧烈变化,从而引发库区水力及环境条件时刻发生改变^[3]。因此,迫切需要开展水文情势变化下鱼类过坝后上溯行为研究,尤其针对具有过坝需求的珍稀保护洄游鱼类。

鉴于此,本研究选取松新鱼道主要过鱼对象之一的短须裂腹鱼为研究对象^[22-23],采用 PIT (passive integrated transponder) 遥测技术实时监测短须裂腹鱼过坝后的上溯行为,构建耦合多因素的过坝后上溯效果评价模型,识别松新电站坝后水文情势变化下影响鱼类过坝后上溯行为的关键因素,为金沙江流域小水电生态调度和鱼类栖息地修复提供重要参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黑水河是金沙江左岸一级支流,位于我国西南部四川省凉山彝族自治州境内,是白鹤滩水电站库区内鱼类栖息地优先保护河流。黑水河干流现有 3 座电站,只有松新水电站已建成松新鱼道,故本研究区域选取为松新鱼道及松新坝址上游河段(图 1)。

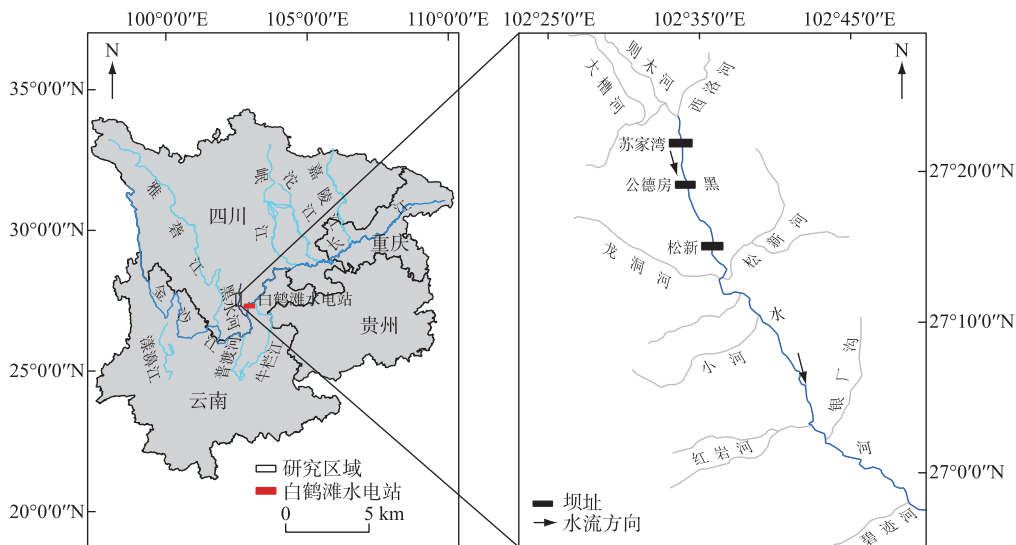


图 1 研究区域地理位置

Fig.1 Sketch of the study area

1.2 试验对象

本研究选取短须裂腹鱼作为试验对象,试验鱼由当地渔民在松新坝下游使用抛网进行采集。捕捞时需要保证鱼的活力,避免受伤,在起捕和转运的过程中均带水操作,确保对鱼造成的损伤降至最低。为减少试验鱼应激反应,将捕捞所获试验鱼暂养于自然河流中适应 24 h,试验开始前从中挑选出身体状况恢复良好、体质健康的试验鱼进行标记。

1.3 试验鱼标记及暂养

在试验鱼进行标记之前,先对鱼进行浸润麻醉(MS-222)并测量其生理学数据(全长、湿重等),使用医用酒精对标记工具和标签进行消毒,通过标记工具将已知编号的 PIT 标签植入鱼体腹腔内。标记完成后将鱼放置在自然河流段的网箱中进行暂养恢复,恢复周期至少 24 h,在恢复周期结束后选取健康个体进行正式试验。本试验依托于《松新鱼道设计优化试验及运行效果监测评估课题》,聚焦于过坝后短须裂腹鱼的上

溯行为,因此选取项目中第三批鱼道内部放鱼试验数据,本试验共标记 291 尾,其试验鱼相关生理学参数如表 1。

表 1 试验鱼的相关参数
Tab.1 Relevant parameters of test fish

放鱼批次	试验时间	湿重/g	全长/cm	肥满度 * / (100 g/cm ³)
1	2021 年 3 月 19 日	259.76±108.33	30.94±4.06	0.82±0.09
2	2021 年 4 月 9 日	201.44±94.60	29.10±4.25	0.77±0.09
3	2021 年 5 月 2 日	304.93±89.15	29.78±4.06	1.22±0.53

* 肥满度=湿重(g)/全长³(cm)^[24]。

1.4 试验装置

为监测野外浑浊水体中试验鱼过坝后的上溯行为,本研究采用 PIT 遥测系统 (passive integrated transponder system)。此系统由太阳能电池板、阅读器、天线、电容等组成(图 2)。太阳能电池板主要用于在野外对监测设备持续供电;天线和阅读器的主要功能是当植有标签的目标鱼出现在天线检测范围内,阅读器会自动记录标记鱼通过的时间信息;电容的作用是保证监测设备电压稳定性,提高标记鱼识别的准确率。为了观察短须裂腹鱼过坝后上溯行为,在鱼道出口和距离松新坝址上游 2 km 河道上分别布置一套半双工射频识别系统(图 2)。选择坝址上游 2 km 河段主要原因是上游电站发电泄水导致该河段水文情势变化显著(基于黑水河水文监测网站水文数据与现场勘测),对鱼类过坝后上溯行为可能有较大影响。

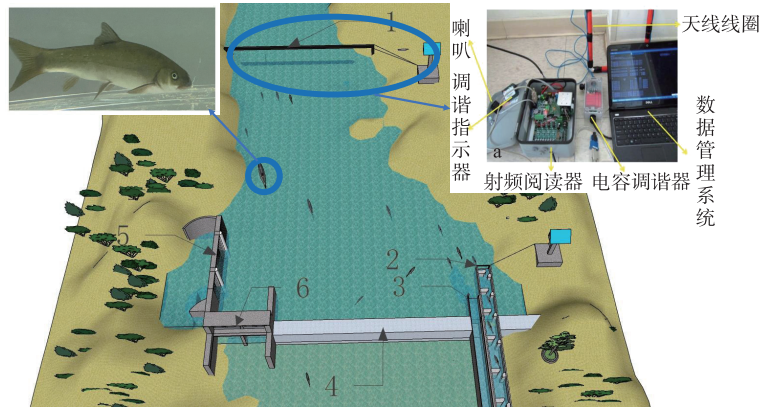


图 2 试验区域示意图(1:上游河道 PIT 遥测系统;2:鱼道出口 PIT 遥测系统;3:补水通道;4:松新大坝;5:引水渠;6:泄洪闸)

Fig.2 Schematic diagram of test area(1:Upstream channel PIT system; 2:Fish passage exit PIT system; 3:Water-recharge channel; 4:Songxin dam; 5:Diversion canal; 6:Sluice gate)

1.5 试验方法

本试验在鱼道进口释放标记鱼,利用鱼道出口布置的天线,监测评估通过鱼道出口的过鱼效果;利用松新坝址上游 2 km 河道处布置的天线,监测评估标记鱼过坝后继续上溯的效果。鱼道及过坝后上溯效果以半双工射频识别系统检测到的标签鱼通过天线的比率作为衡量标准,表示为鱼道通过率和过坝后上溯通过率。鱼道通过率定义为在鱼道出口天线识别到标记鱼的数量与鱼道内部放鱼的数量之比(式(1));过坝后上溯通过率定义为上游河道天线识别到标记鱼的数量与鱼道出口天线识别到标记鱼的数量之比(式(2)):

$$P_1 = \frac{N_1}{N} \times 100\% \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{N_2}{N_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, P_1 表示鱼道通过率; P_2 表示过坝后上溯通过率; N 表示鱼道内部放鱼的数量; N_1 表示鱼道出口天线识别到标记鱼的数量; N_2 表示上游河道天线识别到标记鱼的数量。

为识别可能影响目标鱼过坝后的关键因素, 每尾标记鱼通过天线时的河道流量、河道涨落水率、河道水温和昼夜节律等数据将被实时记录。河道水温、流量等水文数据来自黑水河水文监测网站 (<https://hsh.yaoce.com.cn/login.aspx>)。受上游梯级电站发电下泄流量的影响, 河道流量涨落水呈时段性变化, 根据黑水河水文监测网站流量数据的变化规律, 本研究将每天坝上流量划分为 6 个时段流量均值, 6 个时段分别为 0:00-4:00、4:00-8:00、8:00-12:00、12:00-16:00、16:00-20:00 和 20:00-24:00。统计过坝后成功上溯至 2 km 处的标记鱼对应的时段流量均值, 通过对时段流量均值进行差值计算, 获取每尾标记鱼对应的河道涨落水率。涨落水率计算公式如下:

$$C_i = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \quad (3)$$

式中, C_i 表示河道时段的涨落水率; Q_1 表示前时段流量均值; Q_2 表示后时段流量均值。根据河道水文情势变化将涨落水率分为低落水率 $-1 < C < 0$ 、低涨水率 $0 < C < 1$ 、高涨水率 $C > 1$ 共 3 个区间。

1.6 数据分析

试验数据利用 Microsoft Excel 2019 软件进行处理和统计, 使用 Origin 2021 软件对数据进行图形绘制, 采用 SPSS 26.0 进行统计学分析。用卡方检验 (Chi-square test) 比较短须裂腹鱼在鱼道和河道上溯效率的显著差异性, 用秩和检验 (非参数检验, Mann-Whitney U) 比较河道不同上溯时段温度和流量之间鱼上溯的显著性差异, $P < 0.05$ 表示差异性显著, 结果均用平均值 \pm 标准差 (Mean \pm SD) 表示。

采用时间-事件分析法构建了以流量、水温、涨落水率、昼夜和肥满度为自变量的 Cox 风险比例回归模型, 用于量化各变量对短须裂腹鱼河道上溯效果的影响程度, 各变量的数据类型及定义如下: 流量、水温、河道涨落水率和肥满度为连续变量, 昼夜节律为分类变量 (1-凌晨; 2-上午; 3-下午; 4-晚上)。Cox 风险比例回归模型是利用时间-事件分析法建立终点事件的发生风险与这些影响因素之间的函数关系。为避免模型中自变量可能存在多重共线性问题, 提高模型精度, 模型采用逐步回归法, 选择赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 筛选出最优模型。AIC 准则是衡量统计模型拟合优良性的一种标准, 从一组可供选择的模型中选择最佳模型时, 通常选择 AIC 最小的模型 (Cox 模型构建和 AIC 值计算均采用 R 4.0.1 软件)。Cox 风险回归模型公式和 AIC 计算公式如下^[25]:

$$h\left(\frac{t}{x}\right) = h_0(t) \exp(\beta x^T + b_i) \quad (4)$$

$$AIC = 2k - 2 \ln L(\theta) \quad (5)$$

式中, $h_0(t)$ 表示与时间有关的基准风险函数; β 表示模型参数; x 表示影响因子; b_i 表示随机效应项; k 为模型参数个数; $L(\theta)$ 表示似然函数。

2 结果

2.1 短须裂腹鱼通过鱼道及过坝后的上溯成功率

本研究统计了标记鱼通过鱼道出口天线和坝上游河道天线的数量, 结果表明通过鱼道出口的标记鱼数量为 113 尾; 过鱼道后的标记鱼有 18 尾成功上溯到达上游河道天线, 显著低于鱼道上溯效果 ($\chi^2 = 19.484$, $P < 0.001$)。

2.2 坝上河道流量、涨落水率、水温和昼夜变化下短须裂腹鱼过坝后的上溯效果

本研究统计了 2021 年 3 月 19 日至 6 月 1 日松新坝上河道流量、涨落水率、水温和昼夜变化下 18 尾短须裂腹鱼过坝后的上溯情况。通过监测过坝后的短须裂腹鱼到达上游天线时对应的坝上河道流量和水温情况, 发现短须裂腹鱼主要集中在水温为 19.3~22.9℃ 时过坝后上溯至河道天线, 而在水温为 13.9℃ 时仅有 1 条鱼选择上溯 (图 3a); 过坝后成功上溯至河道天线的短须裂腹鱼中有超过 60% 的鱼选择在低流量 (2.72

m^3/s)下成功上溯,而少量选择在高流量($17.69 m^3/s$)下成功上溯(图 3b)。

由监测过坝后的短须裂腹鱼通过上游天线时对应的坝上河道涨落水率变化可见,18 尾成功上溯的短须裂腹鱼中有 61.11% 的鱼集中在河道涨水过程中上溯,而 38.89% 的鱼则在河道落水过程中上溯(图 4)。

通过监测过坝后的短须裂腹鱼通过上游天线时对应的昼夜情况,发现在低流量($2.53 \sim 2.97 m^3/s$)和高流量($17.43 \sim 18.05 m^3/s$)下夜间(凌晨(0:00—6:00)和晚上(18:00—0:00))总计有 61.11% 的短须裂腹鱼成功上溯,而白天(上午(6:00—12:00)和下午(12:00—18:00))占 38.89%(图 5)。

2.3 短须裂腹鱼过坝后上溯效果的关键因素识别

本文将流量、水温、河道涨落水率、昼夜节律、饱满度作为影响因子构建了基于 Cox 风险比例回归的鱼类过坝后上溯成功率预判模型。运用 AIC 准则筛选出最优模型,从表 2 可知,以温度 and 涨落水率为自变量的模型 AIC 值最低,模型最优。从最优模型中各因子的系数估计值发现,水温(T)和涨落水率(C)对过坝后短须裂腹鱼成功上溯概率有显著影响($P < 0.05$)(表 3)。随着温度的提高,过坝后短须裂腹鱼成功上溯概率显著下降,温度每增加 $1^\circ C$,成功上溯概率降低 37.4%;过坝后的短须裂腹鱼成功上溯概率随着流量涨落率增加而增加,涨落水率每增加 1,成功上溯概率会增加 37.3%。

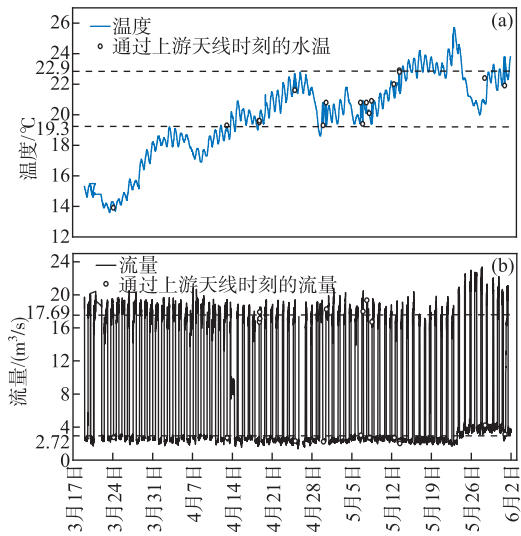


图 3 2021 年 3 月 19 日至 6 月 1 日松新坝水温(a)和流量(b)随时间变化
Fig.3 Time series of water temperature(a) and discharge (b) situation of Songxin dam from 19 March to 1 June, 2021

表 2 基于赤池信息准则(AIC)的模型选择*

Tab.2 Model selection based on the Akaike information criterion(AIC)

模型	AIC_i	$\Delta_i AIC$	w_i	w_i/w_j
$T+C$	64.80	0	0.39	
$T+C+K$	65.70	0.90	0.25	1.56
$T+C+Q$	66.40	1.60	0.18	2.17
$T+C+Q+K$	66.41	1.61	0.17	2.29

* $w_i = \text{EXP}(-0.5\Delta_i AIC) / [\text{EXP}(-0.5\Delta_1 AIC) + \text{EXP}(-0.5\Delta_2 AIC) + \text{EXP}(-0.5\Delta_3 AIC) + \text{EXP}(-0.5\Delta_4 AIC)]$; 本研究总共有 30 个模型,根据 AIC 准则,其中第一个模型 AIC 值最小,被认为是最优模型。 T 为水温($^\circ C$); C 为涨落水率; Q 为流量(m^3/s); K 为饱满度; w_i, w_j 均为模型权重。

通过绘制不同涨落水率的生存曲线(分别选取上溯成功的短须裂腹鱼对应的涨落水率中间值作为预测值,其中高涨水率=3.5、低涨水率=0.5、低落水率=-0.5),结果表明在同一上溯时间内,涨水情势下过坝后的短须裂腹鱼成功上溯的概率高于落水,而在低涨水率情势下过坝后的短须裂腹鱼成功上溯的概率低于河道高涨水率(图 6)。

表 3 水温和涨落水率参数评估*

Tab.3 Estimation of parameters for modeling T and C

参数	估计值	标准误	风险率	P
T	-0.469	0.167	0.626	0.004
C	0.317	0.136	1.373	0.02

* 模型参数采用估计值 \pm 标准误($\beta \pm SE$); T 为水温($^\circ C$); C 为涨落水率。

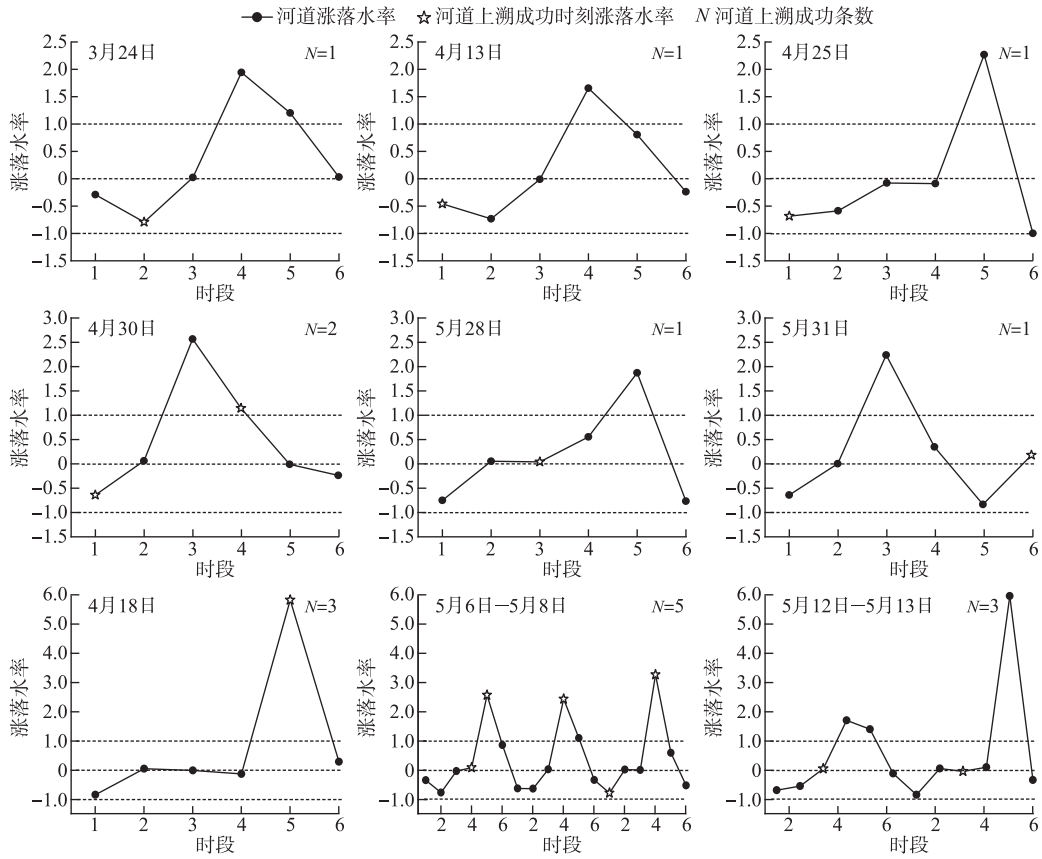


图 4 短须裂腹鱼在不同河道涨落水率下的上溯情况

Fig.4 The influence of rising and falling rate of river discharge of *Schizothorax wangchiachii*

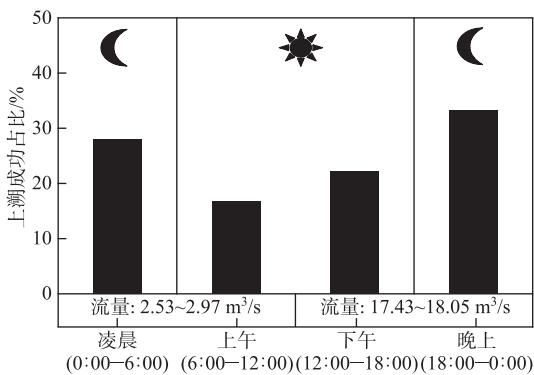


图 5 昼夜变化对短须裂腹鱼上溯的影响

Fig.5 The effect of day and night changes on the migration behavior of *Schizothorax wangchiachii*

3 讨论

3.1 河道水文情势变化对过坝后鱼类上溯的影响

黑水河梯级小水电受水库调度的影响,河道水文情势呈现流量变化频繁且涨落速率快等特征^[3]。河道流量变化对鱼在关键生命活动阶段(生殖、索饵和越冬洄游等)能否找到适宜栖息地至关重要^[26]。本文聚焦成鱼在洄游季节过坝后的上溯行为,发现松新电站过鱼对象短须裂腹鱼过坝后有超过 60% 以上的鱼选择在河道流量较低时上溯。国内外关于鱼类过坝后河道流量对鱼类上溯行为影响的研究较少,但相似的结论在目标鱼上溯通过鱼道的研究中被大量报道。如比利时 Bocq 河上的鳟鱼(*Salmo platycephalus*)在流量处于 1~2 m³/s 的低流量工况时上溯通过鱼道的数量较多,当流量上涨到较高时河鳟上溯数量呈显著下降趋势^[27]。高流

量导致鱼类上溯效果不佳原因可能是高流量在河道中形成了不利于鱼类上溯的流场条件。黑水河属于山

区河流,存在着大量的浅滩河段,浅滩河床分布着大量不规则的巨石和大颗粒的卵石,当河道出现较高的流量时,浅滩河段局部区域的水流可能呈现高流速、高湍动且分布有不同尺度旋涡等水力特征^[9,28],这种复杂的水流环境可能会导致目标鱼上溯过程中出现因克流产生的疲劳^[29]、失稳^[30]及迷失方向等行为^[31],增加了游泳能耗,降低了上溯成功的可能性^[32]。

流量涨落变化对过鱼对象完成关键生命活动也发挥重要作用。溪洛渡-向家坝水库在进行生态调度试验时发现在河道流量从 2400 m³/s 上涨到 4500 m³/s 的过程中河道鱼类产卵量呈显著上升趋势,鱼卵密度是未实施生态调度的 1.3 倍^[33]。长丝裂腹鱼(*Schizothorax dolichonema*)在流量 138~257.7 m³/s 上涨过程中觅食和栖息生境质量呈上升趋势^[34]。本研究发现过坝后的短须裂腹鱼大部分在涨水条件下成功上溯,仅有少数选择在河道落水条件下上溯。随涨水率的增大,过坝后的短须裂腹鱼在河道上溯成功的概率增加,上溯耗时减少(图 6)。根据现场观察,松新库区河道在落水条件下,库岸呈现裸露和淹没交替的水流状态,大幅度增加短须裂腹鱼在上溯过程中搁浅的概率^[26,35];这可能是过坝后的短须裂腹鱼在河道落水条件下难以上溯的原因之一。短须裂腹鱼在河道涨水时完成河道上溯概率较大,库区涨水在河道内会形成多样化的流态,库岸的沙石及水草会形成低流速区^[36-37],这都为短须裂腹鱼过坝后继续上溯找到适宜的产卵、觅食和休息的栖息生境提供了基础条件。

3.2 河道环境变化对过坝后鱼类上溯的影响

水温是影响鱼类洄游上溯的关键驱动因子^[38-39]。本研究发现过坝后成功上溯的短须裂腹鱼中有 95% 偏好选择在水温为 19.3~22.9℃ 区间内完成上溯,在此温度范围内,随着温度的上升,过坝后的短须裂腹鱼上溯成功率呈下降趋势(表 4)。然而,Bayse 等的研究发现在鱼道中随着水温的升高,美洲鲥鱼的上溯动机和上溯成功率均有显著提升^[40],与本研究结果不一致。各自试验水温选择的范围可能是造成结果差异性的主要原因。美洲鲥鱼(*Alosa sapidissima*)在水温为 10~22℃ 区间进行上溯行为试验,温度梯度变化较大,本研究选取了短须裂腹鱼过坝后上溯数量最多的小范围水温区间(19.3~22.9℃),用于分析水温变化对过坝后鱼类上溯效率的影响。在实际监测中发现水温低于 19.3℃ 时,短须裂腹鱼完成上溯的概率极低,仅有 1 尾在 13.9℃ 完成上溯,上溯成功的短须裂腹鱼中又有超过 60% 的鱼选择在水温低于 20.8℃ 时成功上溯,而水温高于 22.9℃ 时未检测到短须裂腹鱼上溯行为。此结果推测 19.3℃ 可能是短须裂腹鱼完成上溯的最适水温。当水温超过最适温度后,水温增加引起的代谢应激对鱼类摄食、上溯洄游和生理功能均产生不利影响^[41],鱼类洄游速度会呈现下降趋势,如拉萨裂腹鱼(*Schizothorax waltoni*)的温度耐受性试验中发现,温度为 23℃ 时,拉萨裂腹鱼游泳行为正常,而当温度上涨 1℃ 后,部分鱼产生应激反应,出现游动频繁的表现^[42]。超过最适水温后,鱼类游泳行为对水温变化有较强的敏感反应,这可能间接导致短须裂腹鱼上溯动机减弱,洄游延迟^[43-44]。

鱼道中昼夜节律通常被认为是影响过鱼对象上溯效果的关键因素之一^[45]。大量的研究发现鱼类在进行上溯行为时,表现出昼夜节律偏好^[46],但在本研究构建的模型中并未发现昼夜节律对短须裂腹鱼在河道中成功上溯率有显著影响($P>0.05$)。然而,从图 5 中发现在低流量(2.53~2.97 m³/s)和高流量(17.43~18.05 m³/s)下夜间可能有利于短须裂腹鱼上溯,有超过 60% 的鱼选择在夜晚上溯。短须裂腹鱼属底栖冷水性鱼类,偏好自然光较弱的水体,喜好在阴凉处栖息。强光对短须裂腹鱼会产生应激反应,鱼通常选择向光强较弱的区域进行逃避^[47],这可能是短须裂腹鱼选择在夜间上溯的原因之一。此外,短须裂腹鱼日常觅食等活动也主要发生在黄昏和夜晚,且白天的活跃程度远远低于晚上^[48]。

本研究利用射频识别技术分析了黑水河流域松新大坝过鱼对象短须裂腹鱼过坝后的上溯行为,发现影响过坝后上溯成功率的关键因素为河道流量涨落率与水温。本文回答了河道变化水文情势下,鱼类是否上

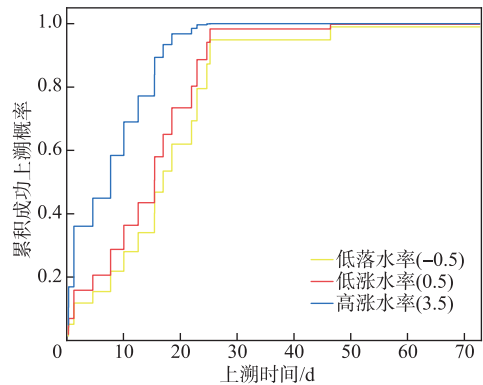


图 6 不同涨落水率下累计成功上溯概率随时间变化

Fig.6 Chart of cumulative successful ascending probability over time under different water fluctuation rates

溯的问题,这对修复鱼类整个洄游过程(坝下-坝上-库区)通道的连通性有重要参考价值,为黑水河小水电群背景下的河流连通性修复提供技术支撑,助力金沙江干流梯级水电的可持续性开发。

4 参考文献

- [1] Zhang XJ. Boost green small hydropower development in China: Practices and thinking. *China Water Resources*, 2018, (18): 18-20. [张学进. 推进我国绿色小水电发展的实践与思考. 中国水利, 2018, (18): 18-20.]
- [2] Chang ZN. Taking the pulse of the small hydropower problem in the Yangtze River Economic Belt. *Unity*, 2018, **5**: 35-37. [常仲农. 为长江经济带小水电问题把脉问诊. 团结, 2018, **5**: 35-37.]
- [3] Yan X, Cheng BX, Yang SR. An ecological-restoration case study of mountain river; analysis and restoration measures of eco-environmental issues in the Heishuihe River. *Environmental Engineering*, 2021, (1): 105-112. [严鑫, 成必新, 杨少荣. 山区河流生态修复案例: 黑水河生态环境问题诊断及对策. 环境工程, 2021, (1): 105-112.]
- [4] Fu HL, Li YL. Thinking on propelling exploration of green rural small hydropower industry in Changjiang River Basin. *Yangtze River*, 2020, **51**(S2): 37-40. [付浩龙, 李亚龙. 关于加快长江流域农村水电绿色发展的思考. 人民长江, 2020, **51**(S2): 37-40.]
- [5] Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(1): 7-21. DOI: 10.1038/s41561-018-0262-x.
- [6] Chen QW, Zhang JY, Mo KL *et al.* Effects of hydropower development on aquatic eco-environment and adaptive managements. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(5): 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**(5): 793-810.]
- [7] Lin YQ, Ma JX, Chen QW. Research on effects of dam removal on river ecosystem and review of its assessment methods. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, **37**(5): 9-15, 21. [林育青, 马君秀, 陈求稳. 拆坝对河流生态系统的影响及评估方法综述. 水利水电科技进展, 2017, **37**(5): 9-15, 21.]
- [8] Benitez JP, Dierckx A, Matondo BN *et al.* Movement behaviours of potamodromous fish within a large anthropised river after the reestablishment of the longitudinal connectivity. *Fisheries Research*, 2018, **207**: 140-149. DOI: 10.1016/j.fishres.2018.06.008
- [9] Harbicht AB, Castro-Santos T, Gorsky D *et al.* Environmental, anthropogenic, and dietary influences on fine-scale movement patterns of Atlantic salmon through challenging waters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2018, **75**(12): 2198-2210. DOI: 10.1139/cjfas-2017-0476.
- [10] Cai L, Liu GY, Taupier R *et al.* The recovery of swimming performance of juvenile *Schizothorax prenanti* after fatigue. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(6): 993-998. DOI: 10.7541/2013.131. [蔡露, 刘国勇, Taupier Rachel 等. 齐口裂腹鱼幼鱼疲劳后游泳特性恢复状况研究. 水生生物学报, 2013, **37**(6): 993-998.]
- [11] Goerig E, Wasserman BA, Castro-Santos T *et al.* Body shape is related to the attempt rate and passage success of brook trout at in-stream barriers. *Journal of Applied Ecology*, 2020, **57**(1): 91-100. DOI: 10.1111/1365-2664.13497.
- [12] Benitez JP, Ovidio M. The influence of environmental factors on the upstream movements of rheophilic cyprinids according to their position in a river basin. *Ecology of Freshwater Fish*, 2018, **27**(3): 660-671. DOI: 10.1111/eff.12382.
- [13] Li J, Li XH, Zhu SL *et al.* Study on the efficiency and influencing factors of xiniu fishway in the Lianjiang River. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(12): 1593-1600. [李捷, 李新辉, 朱书礼等. 连江西牛鱼道过鱼效果及其影响因子研究. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(12): 1593-1600.]
- [14] Goerig E, Castro-Santos T. Is motivation important to brook trout passage through culverts? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017, **74**(6): 885-893. DOI: 10.1139/cjfas-2016-0237.
- [15] Lei QS, Tu ZY, Li ZM *et al.* Swimming performance and flow-field selection strategy of *Opsariichthys bidend* during upstream migration. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2020, **53**(6): 483-491. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2020-06-002. [雷青松, 涂志英, 李志敏等. 马口鱼自主上溯游泳行为及对流场选择策略研究. 武汉大学学报: 工学版, 2020, **53**(6): 483-491.]
- [16] Wang Y, Wai OWH, Chen QW. Laboratory study on fish behavioral response to meandering flow and riffle-pool sequence driven by deflectors in straight concrete flood channels. *Journal of Hydrology*, 2021, **598**: 125736. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125736.
- [17] Guo ZQ, Li GN, Qie ZH *et al.* Study on effect of water temperature on migration of *Schizothorax prenanti* in vertical slot fishway. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, **19**(2): 255-261. [郭子琪, 李广宁, 鄯志红等. 水温对竖缝式鱼道中齐口裂腹鱼上溯行为影响试验研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, **19**(2): 255-261.]
- [18] Pereira E, Quintella BR, Lança MJ *et al.* Temporal patterns of the catadromous thinlip grey mullet migration in freshwater. *Ecology*, 2021, **14**(8): e2345. DOI: 10.1002/eco.2345.
- [19] Goerig E, Castro-Santos T, Bergeron NÉ. Brook trout passage performance through culverts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, **73**(1): 94-104. DOI: 10.1139/cjfas-2015-0089.
- [20] Lothian AJ, Gardner CJ, Hull T *et al.* Passage performance and behaviour of wild and stocked cyprinid fish at a sloping weir with a Low Cost Baffle fishway. *Ecological Engineering*, 2019, **130**: 67-79. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.02.006.
- [21] Duguay JM, Lacey RWJ, Castro-Santos T. Influence of baffles on upstream passage of brook trout and brown trout in an experimental box culvert. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2019, **76**(1): 28-41. DOI: 10.1139/cjfas-2017-0453.
- [22] Li ZM, Zhu DZ, Yang SR. Design of fishway for Songxin hydropower station on Heishui River. *Small Hydro Power*, 2020, (4): 33-37. [李志敏, 朱冬舟, 杨少荣. 黑水河松新电站鱼道设计. 小水电, 2020, (4): 33-37.]
- [23] 张健. 松新鱼道过鱼效果监测与优化研究[学位论文]. 宜昌: 三峡大学, 2021.

- [24] Wang YM, Ke SF, Lin CY *et al.* Investigation of the swimming ability of typical fish in the Red River (Yuanjiang) basin and its application to the design of fish passage facilities. *J Lake Sci*, 2021, **33**(6): 1820-1831. DOI:10.18307/2021.0620. [王永猛, 柯森繁, 林晨宇等. 红河(元江)流域的典型鱼类游泳能力探究及在过鱼设施流速设计中的应用. *湖泊科学*, 2021, **33**(6): 1820-1831.]
- [25] Castro-Santos T, Haro A. Quantifying migratory delay: A new application of survival analysis methods. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2003, **60**(8): 986-996. DOI: 10.1139/f03-086.
- [26] Capra H, Plichard L, Bergé J *et al.* Fish habitat selection in a large hydropeaking river; Strong individual and temporal variations revealed by telemetry. *Science of the Total Environment*, 2017, **578**: 109-120. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.155.
- [27] Ovidio M, Sonny D, Dierckx A *et al.* The use of behavioural metrics to evaluate fishway efficiency. *River Research and Applications*, 2017, **33**(9): 1484-1493. DOI: 10.1002/rra.3217.
- [28] 邱阳凌. 黑水河生态河貌模拟及鱼类替代生境评价[学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [29] Jonsson N, Jonsson B. Migration of anadromous brown trout *Salmo trutta* in a Norwegian River. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(8): 1391-1401. DOI: 10.1046/j.1365-2427.2002.00873.x.
- [30] Ke SF, Tu ZY, Goerig E *et al.* Swimming behaviour of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) in response to turbulent flow induced by a D-cylinder. *Journal of Fish Biology*, 2022, **100**(2): 486-497. DOI: 10.1111/jfb.14958.
- [31] Silva AT, Bærum KM, Hedger RD *et al.* The effects of hydrodynamics on the three-dimensional downstream migratory movement of Atlantic salmon. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**: 135773. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135773.
- [32] Tritico HM, Cotel AJ. The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*). *The Journal of Experimental Biology*, 2010, **213**(Pt 13): 2284-2293. DOI: 10.1242/jeb.041806.
- [33] Ren YF, Zhao LS, Cao H *et al.* Influence of ecological regulation of cascade reservoirs in the lower Jinsha River. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2020, **5**(1): 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**(1): 8-13.]
- [34] Zhang P, Li KF, Liu QY *et al.* Linking bait and feeding opportunities to fish foraging habitat for the assessment of environmental flows and river restoration. *Science of the Total Environment*, 2021, **768**: 144580. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144580.
- [35] Morán-López R, Tolosa OU. Obstacle negotiation attempts by leaping cyprinids indicate bank-side spawning migration routes. *Fisheries Research*, 2018, **197**: 84-87. DOI: 10.1016/j.fishres.2017.09.010.
- [36] Zhao F, Huai WX, Hu Y *et al.* Characteristic study of open-channel flow through double layer rigid vegetation. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2015, **43**(1): 85-90. DOI: 10.13245/j.hust.150118. [赵芳, 槐文信, 胡阳等. 双层刚性植被明渠水流特性实验研究. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2015, **43**(1): 85-90.]
- [37] Liu QY, Zhang P, Cheng BX *et al.* Incorporating the life stages of fish into habitat assessment frameworks: A case study in the Baihetan Reservoir. *Journal of Environmental Management*, 2021, **299**: 113663. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113663.
- [38] Zimmer M, Schreer JF, Power M. Seasonal movement patterns of Credit River brown trout (*Salmo trutta*). *Ecology of Freshwater Fish*, 2010, **19**(2): 290-299. DOI: 10.1111/j.1600-0633.2010.00413.x.
- [39] Benitez JP, Nzau Matondo B, Dierckx A *et al.* An overview of potamodromous fish upstream movements in medium-sized rivers, by means of fish passes monitoring. *Aquatic Ecology*, 2015, **49**(4): 481-497. DOI: 10.1007/s10452-015-9541-4.
- [40] Bayse SM, McCormick SD, Castro-Santos T. How lipid content and temperature affect American shad (*Alosa sapidissima*) attempt rate and sprint swimming: Implications for overcoming migration barriers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2019, **76**(12): 2235-2244. DOI: 10.1139/cjfas-2018-0406.
- [41] Samaras A, Papandroulakis N, Lika K *et al.* Water temperature modifies the acute stress response of European Sea bass, *Dicentrarchus labrax* L. (1758). *Journal of Thermal Biology*, 2018, **78**: 84-91. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2018.09.006.
- [42] Hen LQ, Wang WL, Zeng BH *et al.* Study on temperature tolerance of *Schizothoracus waltoni* with different specifications. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(6): 1230-1238. [何林强, 王万良, 曾本和等. 不同规格拉萨裂腹鱼温度耐受性研究. *水生生物学报*, 2020, **44**(6): 1230-1238.]
- [43] Cai L, Liu GY, Taupier R *et al.* Effect of temperature on swimming performance of juvenile *Schizothorax prenanti*. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2014, **40**(2): 491-498. DOI: 10.1007/s10695-013-9860-0.
- [44] Salinger DH, Anderson JJ. Effects of water temperature and flow on adult salmon migration swim speed and delay. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2006, **135**(1): 188-199. DOI: 10.1577/T04-181.1.
- [45] García-Vega A, Sanz-Ronda FJ, Fuentes-Pérez JF. Seasonal and daily upstream movements of brown trout *Salmo trutta* in an Iberian regulated river. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 2017(418): 9. DOI: 10.1051/kmae/2016041.
- [46] Baker NJ, Boubée J, Lokman PM *et al.* Evaluating the impact of hydropower on downstream migrating anguillid eels: Catchment-wide and fine-scale approaches to identify cost-effective solutions. *Science of the Total Environment*, 2020, **748**: 141111. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141111.
- [47] Huang J, Lin CY, Shi XT *et al.* Light environment optimization of culvert fishway based on the phototaxis of *Schizothorax prenanti*. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(7): 2155-2163. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202107.035. [黄婕, 林晨宇, 石小涛等. 基于齐口裂腹鱼趋光特性的涵洞式鱼道光环境优化. *生态学杂志*, 2021, **40**(7): 2155-2163.]
- [48] Hou YQ, Yang Z, An RD *et al.* Water flow and substrate preferences of *Schizothorax wangchiachii* (Fang, 1936). *Ecological Engineering*, 2019, **138**: 1-7. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.07.008.