

金沙江下游支流黑水河松新电站鱼道过鱼效果监测与评估^{*}

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

(1:三峡大学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:上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

(5:中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081)

(6:中国三峡建工(集团)有限公司, 成都 610041)

摘要: 松新鱼道建设是恢复金沙江白鹤滩库区鱼类生境替代支流——黑水河连通性的重要工程措施之一, 其过鱼效果备受关注。本研究以黑水河松新鱼道为研究对象, 通过网捕法和射频识别遥测技术(RFID)开展松新鱼道过鱼效果监测与评估研究。结果表明:(1)黑水河松新坝址下游共监测到19种鱼类, 其中12种鱼类可以顺利通过鱼道抵达上游河道;(2)鱼道进出口鱼类多样性受到鱼类洄游动机影响呈现季节性规律, 非洄游期(12月)鱼道进出口鱼类Shannon-Wiener多样性指数显著低于洄游期(次年3、5月);(3)松新鱼道主要过鱼对象短须裂腹鱼的进口吸引率为31.50%, 通过率可达44.44%。利用张网监测数据发现:当水温超过20℃时, 过鱼种类和数量随着水温的升高呈递减趋势;当鱼道内流量超过0.50 m³/s时, 过鱼种类和数量随着鱼道内流量的增大而呈递减趋势。为识别影响鱼道过鱼效果的关键因素, 选取短须裂腹鱼为研究对象, 构建了基于多因素(鱼道内流量、水温、昼夜节律、pH、湿重、体长等)的Cox风险比例回归模型, 研究发现:鱼道内流量、水温和昼夜节律是影响短须裂腹鱼上溯效果的关键因素;当水温变化范围为14.0~20.0℃时, 短须裂腹鱼的通过率随水温的升高而呈递增趋势;当鱼道内流量变化范围为0.01~0.50 m³/s时, 短须裂腹鱼的通过率随鱼道内流量的增大而呈递增趋势;昼夜节律对短须裂腹鱼的上溯有显著影响, 短须裂腹鱼更偏好于夜晚上溯。本研究结果有助于黑水河开展鱼类栖息地修复及鱼类资源保护措施等工作, 为黑水河梯级小水电及西南地区山区河流低水头闸坝修建鱼道提供理论依据。

关键词: 黑水河松新鱼道; 鱼类多样性; 短须裂腹鱼; 过鱼效果; 环境因素

Monitoring and evaluation of effectiveness through fishway in Songxin Hydropower Station of Heishui River, lower reaches of Jinsha River^{*}

Shi Xiaotao^{1,2}, Bai Tianxiang^{1,2}, Xu Jiawei³, Zhu Dongzhou⁴, Li Dongqing², Jiao Yilin², Tao Yu⁵, Wang Yongmeng⁵, Jiang Zewen², Zhang Jian⁵, Sun Gan⁶ & 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: Shanghai Investigation Design & Research Institute Co. Ltd, Shanghai 200434, P.R.China)

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

* 2022-07-20 收稿; 2022-08-28 收修改稿。

国家自然科学基金项目(51922065, 52279069)、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。

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

Abstract: The construction of Songxin Fishway is one of the important engineering measures to restore the connectivity of Heishui River, an alternative tributary of fish habitat in Baihetan Reservoir area of Jinsha River. In this study, the Songxin Fishway in the Heishui River, monitoring and evaluation of fish passage effect in Songxin Fishway were studied by net catch method and radio frequency identification (RFID) remote sensing technology. The results showed that: (1) A total of 19 species of fish were detected in the downstream of the Songxin dam site of the Heishui River, of which 12 species could reach the upstream river smoothly through the fishway. (2) The fish diversity was influenced by the motivation of fish migration in a seasonal pattern, with the Shannon-Wiener index of fish diversity at the inlet and exit of fish passage being significantly lower in the non-migratory period (December) than in the migratory period (March and May); (3) The import attraction rate of *Schizothorax wangchiachii* is 31.50% and the passage rate is 44.44%. Using the monitoring data of net, it was found that: when the water temperature exceeded 20°C , the species and quantity of fish decreased with the increase of water temperature; When the discharge in the fishway exceeded 0.50 m³/s, the species and quantity of fish decreased with the increase of discharge in fish passage. In order to identify the key factors affecting the fish passage effect, the *S. wangchiachii* as a study subject, a Cox proportional hazard regression model was constructed based on multiple factors (fish passage flow, water temperature, circadian rhythm, pH, wet weight, body length etc.). It was found that: fish passage discharge, water temperature and circadian rhythm were the key factors affecting the fish passage effect; When water temperature varied from 14.0 to 20.0°C , the passing rate of *S. wangchiachii* increased with water temperature. When the discharge in the fishway ranged from 0.01 to 0.50 m³/s, the passing rate of *S. wangchiachii* showed an increasing trend with the increase of the discharge in the fish channel. The circadian rhythm had a significant effect on the abduction of *S. wangchiachii*, and *S. wangchiachii* preferred night upstream migration. The research results are helpful to the fish habitat restoration and the protection of fish resources in Heishui River, and provide a theoretical basis for the construction of fishway in cascade hydropower stations of Heishui River and low head sluice dams of mountainous rivers in southwest China.

Keywords: Songxin Fishway of Heishui River; fish diversity; *Schizothorax wangchiachii*; fish passage efficiency; environmental factor

随着《长江保护法》和“长江十年禁渔”等政策的相继出台,涉水工程鱼类保护研究已逐渐成为热点,尤其是闸坝修建引起的鱼类洄游通道阻隔问题广受关注^[1-3]。为修复鱼类洄游通道连通性,辅助鱼类上下行过坝,鱼道近年来被大量修建^[4]。据不完全统计,自2000年以后,我国有110多个水电工程修建了过鱼设施,其中鱼道占比高达65.14%,相比1989年之前增长了66.46%^[5-7]。尽管鱼道建设受到工程建设者的重视,但目前仍有超过2/3的鱼道缺乏过鱼效果监测,鱼道是否能过鱼及能过多少鱼尚未可知。开展鱼道过鱼效果监测工作对发现问题池室、优化鱼道设计、提升鱼道过鱼效率至关重要^[5-6]。目前,评估鱼道过鱼效果的关键要素有两点:鱼道过鱼有效性和过鱼效率^[6-7]。国内已开展的鱼道监测工作中大多数在鱼道出口采用网捕法(主要指张网法)或堵截法对过鱼种类和数量进行统计分析^[8-10],只证明了鱼道可以过鱼,但鱼道过鱼效率却难以量化。为解决过鱼效率量化问题,国外较早开发了基于视频、声学和射频的鱼道过鱼效果监测方法,并成熟应用于多个鱼道中,如2015年Yoon等采用射频识别监测设备对韩国锦江上的一座鱼道进行逐月监测,发现鱼道吸引率和通过率分别为15.3%和43.2%^[11]。目前,国外针对鱼道过鱼效果评估已形成较为完整的监测体系,具有监测手段多、监测范围广、监测指标完整等优势^[12-13]。国内鱼道过鱼效果监测研究起步较晚,随着近几年监测技术的发展,少数鱼道逐渐将跟踪识别技术应用于我国鱼道监测中,如2017年鲍江辉等采用视频监测法及射频识别监测设备对大渡河枕头坝一级水电站鱼道过鱼效果开展了监测评估,发现标记的6种试验鱼通过率在0~60%之间^[14]。尽管国内鱼道过鱼效果监测尝试借鉴国外先进技术,但监测方法单一、监测指标少和监测时间较短等问题仍普遍存在,迫切需要开展系统的鱼道过鱼效果监测研究。

在鱼道过鱼效果监测中常出现过鱼对象在某个池室出现过鱼困难,最终导致上溯失败的现象^[15]。究其原因,往往是过鱼对象受到不利于上溯的环境因素(水温、昼夜、流速、流量、水位等)制约^[11,16-18]。因此,探究影响鱼道过鱼效果的关键因素对优化鱼道设计至关重要。国外目前注重在鱼道过鱼监测阶段对生物、环境参数开展实时采集;在鱼道过鱼效果评估阶段,将各因素纳入构建的鱼道评价模型中,识别及量化各因素

对鱼道过鱼效果的影响程度,进而提出详细的鱼道优化建议。如 Keffer 等在邦纳维尔大坝鱼道下游释放 2170 尾无线电标记的七鳃鳗(*Lampetra japonica*),发现有 49% 的目标鱼进入鱼道但未成功通过鱼道,通过构建基于时间一事件分析法的尝试率模型,识别影响目标鱼尝试进入鱼道的关键因素是上溯路径、水温、鱼体大小^[15]。然而,我国鱼道监测中易缺失可能对鱼道过鱼效果有影响的相关参数记录,缺乏可用于识别及量化过鱼效果影响因素的评价模型构建方法,导致针对过鱼效果不佳的鱼道难以提供有效的优化手段。

黑水河流域是金沙江左岸一级支流,流域自上而下修建有 4 座引水式电站,分别为苏家湾电站、公德房电站、松新电站和老木河电站(已拆除)。黑水河鱼类资源丰富,现有调查结果表明黑水河现有鱼类 44 种,隶属 4 目 10 科 33 属^[19-21]。随着白鹤滩电站建成蓄水,黑水河天然河道空间将被进一步压缩^[20],流水生境面临缩减。为减缓对鱼类生境造成破坏的不利影响,2019 年建成的松新鱼道成为黑水河生态修复工程中第一阶段的任务,其过鱼效果也备受关注。鉴于此,本研究以松新鱼道为试验场,采用地笼网捕调查近坝下游河道鱼类区系及物种组成,采用张网法和射频识别技术等多手段并用的监测技术,开展松新鱼道过鱼效果监测与评估工作,分析鱼道过鱼有效性,量化鱼道过鱼效率,构建评价鱼道过鱼效果的数学模型,识别影响鱼道过鱼效果的关键因素,为松新鱼道优化设计及后续黑水河上游公德房电站与苏家湾电站鱼道建设提供数据参考,对梯级小电站河流连通性修复具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究试验区域位于苏家湾和公德房坝址下游松新坝址处(图 1)。松新大坝为低水头溢流坝,为辅助松新坝址过鱼对象上下行过坝,2020 年修建了松新鱼道。松新鱼道位于闸坝左岸,为竖缝式鱼道。过鱼对象以裂腹鱼类(短须裂腹鱼、齐口裂腹鱼等)、鳅类(红尾副鳅、短体副鳅和大桥高原鳅等)和𬶐类(黄石爬𬶐和青石爬𬶐)为主,并适当兼顾其它可能鱼类^[22]。鱼道上游设计水位为 1067.16 m,下游设计水位为 1063.87 m,设计流速为 0.75 m/s,设计流量为 0.176 m³/s,池室净宽为 1.6 m,池室长度为 2.0 m,鱼道坡度为 1.80%,池室隔板采用带 45° 导向角的异侧竖缝式结构^[22]。为提高鱼道进口诱鱼效果,修建补水通道对鱼道进口进行补水。

1.2 监测方法

1.2.1 坝下地笼捕捞监测 为了解松新坝下鱼类资源分布规律,2020 年 12 月和 2021 年 3—5 月在松新坝下 50~100 m 的下游河道左右岸等间距(每隔 20 m)共设置 6 个采样点,均采用地笼网捕进行逐月采样^[21],每月采集渔获物 6 d。记录每天采样的具体时间及鱼体形态学指标(全长、体长、叉长和体重),并参照《四川鱼类志》^①对采集的渔获物进行种类鉴定,鉴定完成后在坝上库区放流。

1.2.2 张网捕捞监测 本实验于 2020 年 12 月和 2021 年 3—5 月每月定时采用张网法对鱼道过鱼种类及数量进行监测。在鱼道进、出口设置张网,将鱼道进口或出口全断面封堵,在竖缝处预留开口,张网分前中后 3 层,内层网口逐渐缩小,利用鱼类的逆流习性使其进入张网后无法逃脱(图 2)。根据池室竖缝尺寸确定鱼道进口和出口张网整体框架长×宽×高为 1.76 m×1 m×1 m,下游开口长×宽为 0.3 m×0.3 m、上游开口长×宽为 0.1 m×0.1 m,如图 2 所示。出口张网安装在鱼道上游最后一节池室,进口张网安装在鱼道进口第一节池室。为使渔网紧贴竖缝边壁,利用铁丝进行固定,确保鱼类在通过竖缝后全部进入张网。张网监测每个月进行 6 d,其中鱼道进口和出口依次各监测 3 d。每次监测结束后,先关闭鱼道闸门,提起张网,收集捕获鱼类,记录每次收集渔获物的具体时间及鱼体形态学指标(全长、体长、叉长和体重),并参照《四川鱼类志》对采集的渔获物进行种类鉴定,最终在上游库区放流。结束后将张网放回池室并固定,打开闸门后开始新一轮监测。

1.2.3 PIT 标记监测 本实验于 2021 年 3 月 19 日—25 日和 2021 年 5 月 2 日—8 日进行。PIT 标记监测主要采用半双工射频识别(RFID)设备,设备组成主要包括电源、阅读器、天线和电容等。试验鱼选取松新鱼道主要过鱼对象短须裂腹鱼(*Schizothorax wangchiachii*)。在植入标签前,对目标鱼进行麻醉(鱼安定 MS-222,0.10 mg/L),并测量其形态学数据。试验标记鱼的平均体长为 (249.71±96.70) mm,平均体重为 (247.93±34.55) g。待将用具和标签用医用酒精消毒后,将 PIT 标签植入鱼体腹腔内。为了将试验鱼的损伤降到最

^① 丁瑞华. 四川鱼类志. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.

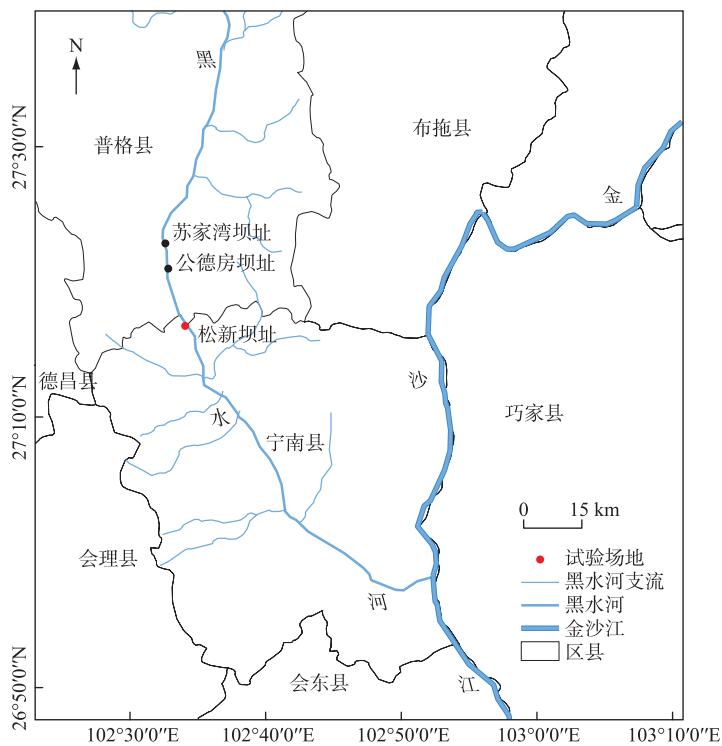


图 1 研究区域地理位置
Fig.1 Geographical location of the study area

低,所有的处理过程均在 1 min 内完成。标记完成后,即刻将鱼转移至提前处理好的自然河段中进行暂养恢复,暂养时间至少为 24 h。正式试验前,选用健康状况良好的标记鱼进行放鱼试验。为监测标记鱼的上溯过程,在松新电站鱼道进口和出口各布置一套半双工射频识别设备。每套设备配备一个 PIT 天线,并将天线固定在对应位置的竖缝处(图 2)。当带有标签的试验鱼通过 PIT 天线时其时间及编号等信息将被实时记录。射频识别设备的阅读器和电容调谐器放置于线圈所在的鱼道顶部并做防水处理,实现鱼道全天候过鱼效果实时监测。该设备通过现场测试,准确率高达 95%,满足监测精度要求。

2021 年 3 月 19 日与 5 月 2 日在鱼道进口下游 5 m 的河道中各标记放流 100 尾试验鱼,每次试验持续 1 周。每天测量鱼道水体的 pH 值,监测过程中鱼道上游水位、水温和流量数据均通过松新电站自动监测系统获取(<https://hsh.yaoce.com.cn/login.aspx>),其中流量包含鱼道进口吸引流量(鱼道内流量与补水通道流量之和)和鱼道内流量。

1.3 数据分析

坝下及鱼道进、出口每月每次捕获的鱼类数据用 Excel 整理汇总,采用 SPSS 19.0 进行数据统计学分析,用 Origin 8.0 软件进行实验数据绘图。坝下、鱼道进出口的鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、体长和鱼道进口过鱼数量及种类数据满足方差齐性和正态分布。用单因素方差分析(One-way ANOVA)分析坝下、鱼道进出口的鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和体长的差异性,采用 Pearson 相关性分析吸引流量与鱼道进口的过鱼种类和数量的相关性, $P < 0.05$ 表示有显著性差异。统计值用平均值±标准差(Mean±SD)描述。采用 H' 计算坝下和鱼道进、出口每月每次捕获的鱼类多样性,以相对重要性指数(IRI)确定坝下和鱼道进、出口鱼类的常见种、偶见种、稀有种和优势种。当 $IRI > 1000$ 定义为优势种;当 $1000 > IRI \geq 100$ 定义为常见种;当 $100 < IRI \leq 10$ 定义为偶见种;当 $IRI < 10$ 定义为少见种,计算公式分别为^[21]:

$$H' = - \sum P_i \cdot \ln P_i \quad (1)$$

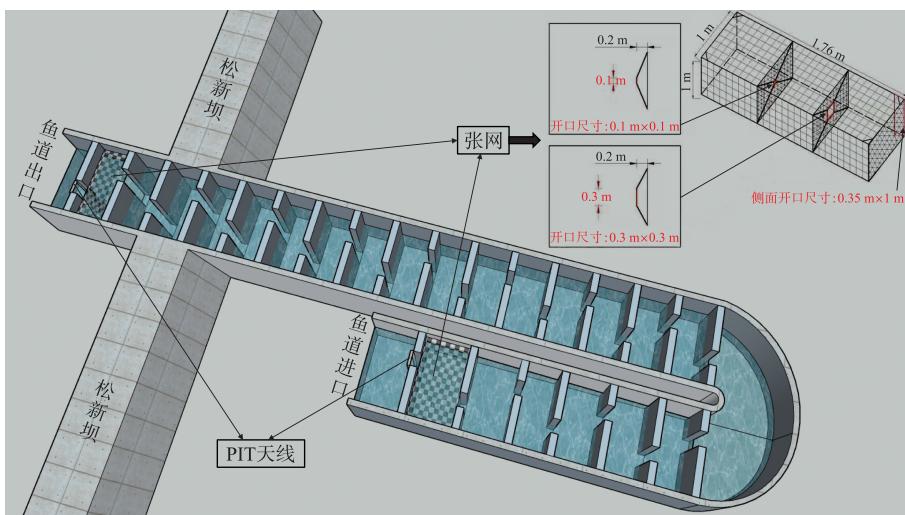


图 2 松新鱼道及试验设备布置示意

Fig.2 Schematic diagram of the Songxin fish passage and test equipment arrangement

$$F_i = 100\% (S_i/S) \quad (2)$$

$$P_i = 100\% (N_i/N) \quad (3)$$

$$IRI_i = 10^4 F_i \cdot (P_i + W_i) \quad (4)$$

式中, S_i 和 N_i 分别代表鱼种 i 的采样次数和累积个体数, S 和 N 分别代表全部采样次数和全部鱼类个体数, W_i 为鱼种 i 的质量占所有捕获鱼类总质量的百分比, F_i 为鱼种的频率, P_i 为相对多度。

以鱼道进口和鱼道出口为监测断面,采用射频识别监测技术量化鱼道进口吸引率和鱼道通过率的统计。鱼道进口吸引率表达式为^[14] :

$$E_0 = \frac{N_1}{N_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中, E_0 表示鱼道进口吸引率(%), N_1 表示鱼道进口天线监测到的标记鱼数量, N_0 表示下游河道实际放流的标记鱼数量。

鱼道通过率表达式为^[14] :

$$E_1 = \frac{N_2}{N_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中, E_1 表示鱼道通过率(%), N_2 表示鱼道出口天线监测到的标记鱼数量, N_1 表示鱼道进口天线监测到的标记鱼数量; 鱼道进口吸引时间定义为: 试验鱼放流时间与鱼道进口第一次检测的时间间隔(h); 鱼道通过时间定义为: 试验鱼类在鱼道进口天线第一次检测的时间与鱼道出口天线第一次检测的时间间隔(h)。

利用射频识别监测技术所获数据采用 R 4.0.1 语言进行处理, 为识别影响鱼道过鱼效果的关键因素及量化各关键因素的影响程度, 选取短须裂腹鱼, 采用时间—事件分析法构建了以植入标签恢复时间、湿重、昼夜节律、鱼道内流量、水温和水体 pH 值为协变量的 Cox 风险比例回归上溯成功率模型, 各变量的数据类型及定义见表 1。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, 采用 AIC 准则(Akaike information criterion, AIC)筛选最优模型。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 ΔAIC 值最小时停止分析。Cox 风险回归模型公式和 AIC 计算公式为:

$$h(\frac{t}{h}) = h_o(t) \exp(\beta x^T + b_i) \quad (7)$$

$$AIC = 2k - 2\ln L(\theta) \quad (8)$$

式中, $h_o(t)$ 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 是模型参数个数, $L(\theta)$ 表示似然函数。

表 1 Cox 风险比例回归模型的数据文件变量

Tab.1 Data file variables of Cox proportional hazard regression model

变量名	变量含义	取值范围	赋值说明
<i>W</i>	试验鱼湿重	96.40~498.70 g	连续变量
<i>BL</i>	试验鱼体长	17.3~38.9 cm	连续变量
<i>RT</i>	植入标签后恢复时间	8.83~176 h	连续变量
<i>WT</i>	水温	14.2~20°C	连续变量
<i>Q</i>	鱼道内流量	0.01~0.5 m ³ /s	连续变量
<i>D</i>	昼夜节律	—	分类变量; 0-“夜晚(18:00~06:00)”, 1-“白天(06:00~18:00)”, 2-缺失
<i>pH</i>	水体酸碱度	8.3~8.4	连续变量
<i>Time</i>	成功上溯时间	—	—
<i>Status</i>	结局	—	0-“删失”, 1-“成功”

2 结果

2.1 近坝下游河道鱼类区系及物种组成

试验期间在松新坝下共捕获鱼类 1661 尾, 隶属于 2 目 4 科 15 属 19 种(表 2)。其中, 鲤形目最多, 有 17 种, 占总数的 89.47%, 鲇形目有 2 种, 占总数的 10.53%; 在全部 4 科中, 鲤科鱼类最多有 9 种, 占总数的 52.94%, 其次是鳅科鱼类 8 种, 占总数的 42.11%, 鲇科和𬶐科鱼类各占 5.26%。

在坝下河道所捕获的 19 种鱼类中, 优势种($IRI > 1000$)有 4 种, 分别为: 棒花鱼、大桥高原鳅、短体副鳅和红尾副鳅; 常见种($1000 > IRI \geq 100$)有 4 种, 分别为短须裂腹鱼、横纹南鳅、宽鳍鱲、麦穗鱼、鲫; 偶见种($100 < IRI \leq 10$)有 7 种, 分别为: 鲤、云南盘鮈、泥鳅、西昌高原鳅、贝氏高原鳅、鮈和黄石爬𬶐; 少见种($IRI < 10$)有 3 种, 分别为: 鲦、彩石鳑鲏、前鳍高原鳅。

本次调查发现 4 种长江上游特有鱼类, 分别为短体副鳅、前鳍高原鳅、黄石爬𬶐和短须裂腹鱼。2018—2019 年滕航等在黑水河共调查到鱼类 44 种, 隶属 3 目 9 科 32 属^[21], 松新坝下鱼种有 19 种, 占整条黑水河鱼种的 43.18%。

2.2 鱼道进出口鱼类种类组成

试验期间在松新鱼道进口共捕获鱼类 284 尾, 隶属于 2 目 3 科 10 属 14 种, 鱼类体长范围为 4.00~31.40 cm, 体重范围为 1.20~349.7 g(表 3)。进口捕获鱼类种类占坝下鱼类种的 73.68%, 占整条黑水河鱼种的 29.55%。在进入鱼道的 14 种鱼类中, 优势种有棒花鱼、大桥高原鳅、短须裂腹鱼和云南盘鮈; 常见种有短体副鳅、红尾副鳅、宽鳍鱲和麦穗鱼; 偶见种有齐口裂腹鱼、横纹南鳅、鲫鱼和贝氏高原鳅; 少见种有西昌高原鳅和黄石爬𬶐。

在鱼道出口共捕获 99 尾, 隶属于 2 目 3 科 9 属 12 种, 鱼类体长范围为 5.00~29.00 cm, 体重范围为 2.10~244.10 g(表 3)。鱼道出口捕获的鱼类占鱼道进口捕获种类的 92.31%, 占坝下捕获种类的 63.16%, 占黑水河整条流域鱼种的 27.27%。在通过鱼道的 12 种鱼类中, 优势种有棒花鱼和大桥高原鳅; 常见种有短体副鳅、短须裂腹鱼、红尾副鳅和云南盘鮈; 偶见种有横纹南鳅、宽鳍鱲、麦穗鱼、西昌高原鳅和贝氏高原鳅。

2.3 鱼道过鱼的季节规律

通过统计坝下、鱼道进口和鱼道出口各个月份的数据, 分别计算不同月份鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数(图 3), 发现坝下非洄游期与洄游期各个月份捕获的鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数无显著性差异($P > 0.05$); 鱼道进口次年 3、5 月鱼类的多样 Shannon-Wiener 指数显著高于 12 月和次年 4 月($P < 0.05$); 鱼道出口洄游期(次年 3、4 和 5 月)鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于非洄游期(12 月)($P < 0.05$)。

表 2 松新坝下鱼类资源分布
Tab.2 Distribution of fish resources below Songxin Dam

种类	湿重/g	体长/cm	尾数/ 相对多度 P/%	频率 F/%	IRI
一、鲤形目					
(一) 鲤科					
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	7.57±5.43	7.10±1.14	745/64.17	96.15	10099.97
短须裂腹鱼 <i>Schizothorax wangchiachii</i>	40.02±65.12	8.89±7.29	30/2.58	42.31	472.70
鱊 <i>Hemiculter leucisculus</i>	1.77±1.23	4.43±0.76	3/0.26	7.69	2.28
鲫 <i>Carassius auratus</i>	29.73±36.43	9.50±3.13	23/1.98	30.77	211.50
宽鳍鱲 <i>Zacco platypus</i>	29.41±9.32	11.10±1.13	38/3.27	57.69	650.09
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	6.55±1.80	7.00±0.54	14/1.21	30.77	57.29
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	7.31±10.06	6.40±1.79	69/5.94	69.23	661.36
云南盘鮈 <i>Discogobio yunnanensis</i>	6.40±3.45	6.77±1.33	9/0.78	23.08	27.40
彩石鳑鲏 <i>Rhodeus lighti</i>	1.90	4.40	1/0.09	3.85	0.38
(二) 鳉科					
泥鳅 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	7.19±2.37	9.37±0.96	7/0.60	19.23	18.51
西昌高原鳅 <i>Triplophysa xichangensis</i>	4.44±3.77	6.86±2.18	29/2.50	23.08	78.91
贝氏高原鳅 <i>Trilophysa bleekeri</i>	2.40±1.42	4.92±0.84	13/1.12	26.92	36.16
大桥高原鳅 <i>Triplophysa aquaensis</i>	5.85±2.84	7.16±1.43	273/23.51	96.15	3360.27
前鳍高原鳅 <i>Triplophysa anterodorsalis</i>	5.43±0.82	7.50±0.41	3/0.26	7.69	2.88
短体副鳅 <i>Paracobitis potanini</i>	5.56±1.60	7.06±0.84	231/19.90	84.62	2461.71
横纹南鳅 <i>Schistura fasciolatus</i>	4.25±2.17	6.63±1.29	30/2.58	34.62	120.99
红尾副鳅 <i>Paracobitis variegatus</i>	6.27±3.06	8.89±1.83	131/11.28	92.31	1580.13
二、鮀形目					
(三) 鮀科					
鮀 <i>Silurus asotus</i>	8.13±10.33	21.97±1.29	6/0.52	15.38	61.66
(四) 鳅科					
黄石爬𬶐 <i>Euchiloglanis kishinouyei</i>	10.15±14.49	7.17±3.06	6/0.52	11.54	10.99

通过统计分析不同月份在鱼道进口和鱼道出口捕获各个鱼种的数量,发现鱼道进口和鱼道出口不同鱼种数量占比在月份上呈现差异(图4)。𬶐科鱼类中黄石爬𬶐仅在5月出现在鱼道进口;鳅科鱼类中,大桥高原鳅每月都能在进口被捕获到,除4月外,在其他月份占比均最高,且洄游期各个月份都能在出口被捕获到;鲤科鱼类中仅棒花鱼在鱼道进口和出口每月均被捕获,其它鱼种在不同月份进入鱼道和通过鱼道各有差异。

2.4 鱼道过鱼效果的关键影响因素识别

本文在监测鱼道进出口过鱼数量时,同步采集了流量和水温数据,发现鱼道进口过鱼数量和种类与进口吸引流量显著呈正相关($r=0.896, P<0.01; r=0.705, P<0.05$),鱼道进口吸引流量越大,进口过鱼数量和种类越多(图5)。通过统计鱼道出口的过鱼数量发现,鱼道内的高流量会减少鱼道出口的过鱼数量和种类:在洄游期,鱼道内最高流量为 $0.73 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,鱼道出口的过鱼种类最少为3种,且过鱼数量仅有6尾。

从12月到次年的5月,水温逐渐上升($13.38\sim23.45^\circ\text{C}$),当水温超过 20.0°C 时,鱼道进口和出口的过鱼数量均呈现下降趋势(图5)。

利用射频识别技术对放流的标记鱼开展鱼道过鱼效果监测,结果表明:在实验周期内,在鱼道进口天线识别到标记鱼63尾,鱼道出口天线识别到标记鱼28尾,松新鱼道进口吸引率为31.50%,通过率为44.44%,鱼道进口吸引时间为(12.28 ± 16.05) h,鱼道通过时间为(55.09 ± 73.54) h。

为识别影响鱼道过鱼效果的关键因素,选取短须裂腹鱼为研究对象,构建了基于生存分析的Cox风险比例回归的上溯成功率模型。运用AIC准则从所有可能的协变量组合中依据 ΔAIC 值小时停止分析原则,

表3 鱼道进口和出口过鱼的种类及规格
Tab.3 Types and sizes of fish imported and exported through the fishway

鱼种	湿重/g		体长/cm		尾数/相对多度 P/%		频率 F/%		IRI	
	进口	出口	进口	出口	进口	出口	进口	出口	进口	出口
短须裂腹鱼	29.06±80.92	99.14±90.73	7.67±6.21	17.72±8.14	21/7.66	5/5.15	41.67	16.67	1333.33	639.83
齐口裂腹鱼	41.85	—	29.60	—	1/0.36	—	8.33	—	16.95	—
鲫	45.70	—	11.30	—	1/0.36	—	8.33	—	18.23	—
棒花鱼	8.37±3.29	8.70±2.90	7.41±0.94	8.12±1.12	45/16.42	31/31.96	75.00	66.67	2358.61	3608.74
宽鳍鱲	30.26±7.14	20.45±1.25	11.59±1.02	1.16±0.20	16/5.84	2/2.06	25.00	16.67	628.57	80.07
云南盘鮈	5.26±2.89	9.69±4.22	5.94±1.23	7.57±1.08	44/16.06	16/16.49	50.00	25.00	1264.27	867.11
麦穗鱼	10.53±5.01	3.40	7.53±1.35	6.00	6/2.19	1/1.03	25.00	8.33	117.75	10.49
大桥高原鳅	4.68±3.10	5.85±3.61	6.50±1.59	7.47±1.93	75/27.37	19/19.59	66.67%	50.00	2772.24	1410.49
贝氏高原鳅	6.10±0.40	3.65±0.85	0.75±0.00	6.05±0.75	2/0.73	2/2.06	16.67	16.67	20.27	42.52
西昌高原鳅	7.70	5.30±0.80	8.40	8.10±0.70	1/0.36	2/2.06	8.33	16.67	5.60	46.21
红尾副鳅	4.70±2.01	4.41±1.44	7.61±1.38	7.73±0.97	34/12.41	7/7.22	33.33	25.00	626.03	254.33
短体副鳅	4.35±1.93	4.81±1.85	6.38±8.67	6.86±1.31	20/7.30	8/8.25	33.33	33.33	358.81	371.68
横纹南鳅	4.07±1.34	6.60	6.69±6.87	7.70	7/2.55	1/1.03	25.00	8.33	92.28	12.28
黄石爬𬶐	3.00	3.63±0.19	5.30	5.33±0.47	1/0.36	3/3.09	8.33	16.67	4.04	173.35

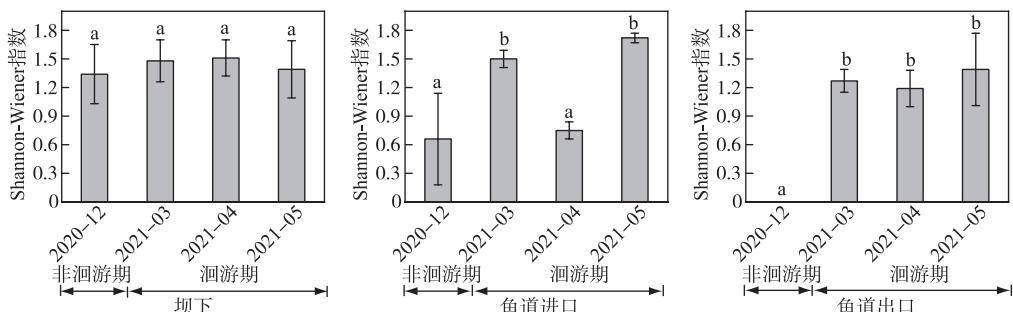


图3 各样点不同时期物种多样性的比较(不同小写字母表示有显著性差异)

Fig.3 Comparison of species diversity at different sites in different periods
(different lowercase letters indicate significant difference)

筛选出以植入标签恢复时间(RT)、湿重(W)、昼夜节律(D)、鱼道内流量(Q)和水温(WT)为影响因子的最优模型(表4)。从表5可知,短须裂腹鱼的通过率与 WT 和 Q 呈显著正相关关系($P<0.05$)。昼夜节律上,夜晚的通过率显著高于白天($P<0.05$)。

表4 基于赤池信息准则(AIC)的模型选择
Tab.4 Model selection based on the Akaike information criterion (AIC)

模型	AIC_i	$\Delta_i AIC$	W_i	W_i^*/W_j
$W+RT+WT+Q+D$	126.38	0	0.26	
$BL+RT+WT+Q+D$	126.53	0.15	0.25	1.04
$W+BL+RT+WT+Q+D$	127.56	1.03	0.15	1.67
$W+RT+WT+Q+D+pH$	128.49	0.93	0.16	0.94
$W+BL+RT+WT+Q+D+pH$	129.31	0.82	0.17	0.94

* W_i 、 W_j 均为模型权重,计算公式为 W_i (W_j) = $\text{EXP}(-0.5\Delta_i AIC)/[\text{EXP}(-0.5\Delta_1 AIC) + \text{EXP}(-0.5\Delta_2 AIC) + \text{EXP}(-0.5\Delta_3 AIC) + \text{EXP}(-0.5\Delta_4 AIC)]$ 。

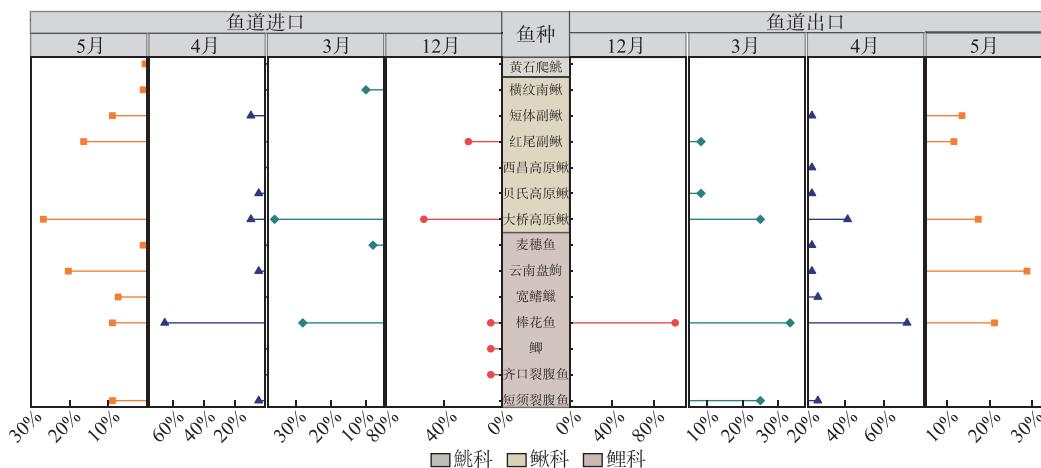


图 4 鱼道进、出口捕获鱼种在当月所占比例

Fig.4 Proportion of fish species caught in the fishway inlet and outlet in the month

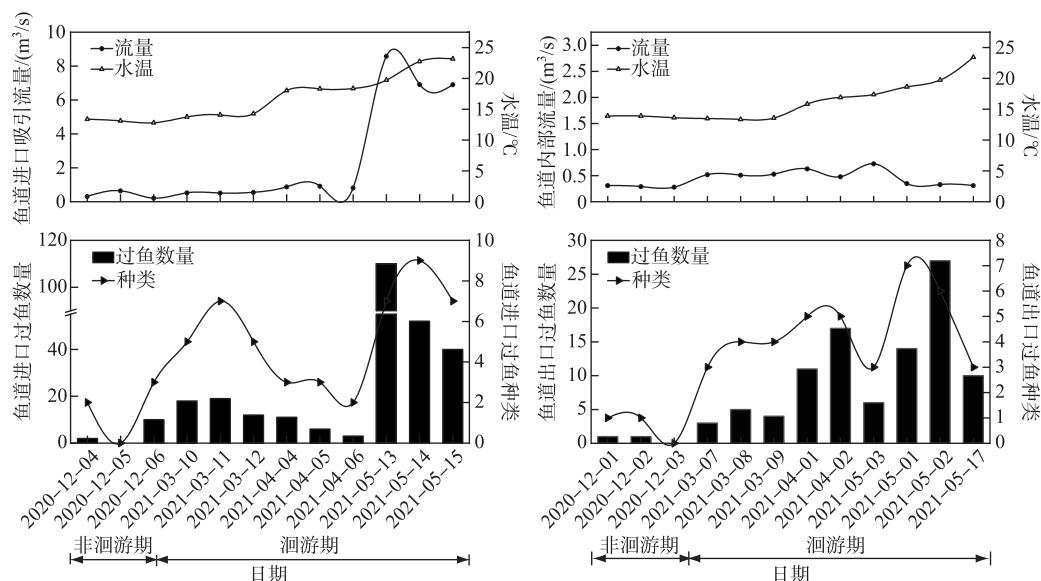


图 5 流量及水温变化对进口诱鱼及出口过鱼的影响

Fig.5 Effect of flow and water temperature changes on inlet fish attraction and outlet fish passage

表 5 Cox 风险比例回归通过率最优模型参数评估

Tab.5 Evaluation of parameters of the optimal model for Cox risk proportional regression pass rate

影响因素	估计值	标准误	风险率	P 值
W	-0.004	0.003	0.996	0.143
RT	0.027	0.014	1.027	0.066
D	-1.299	0.629	0.273	0.039 *
WT	0.930	0.414	2.534	0.025 *
Q	3.058	0.751	21.282	<0.001 *

* 表示有显著性。

3 讨论

3.1 松新坝下及鱼道进出口鱼类区系分析

黑水河作为金沙江白鹤滩库区的鱼类支流替代生境场,在实施老木河拆坝及修建松新鱼道等措施后,通过现场监测鱼类资源调查结果发现有 27.27% 的黑水河鱼种可顺利上行过坝^[20-21],对鱼类完成关键生活史阶段具有重要作用。松新坝下(43.18%)—鱼道进口(29.55%)—鱼道出口(27.27%) 的过鱼种类占黑水河鱼种的比例呈现递减趋势,与枕头坝一级电站鱼道的监测结果有相似规律(坝下 40 种,出口 20 种)^[14],表明并非坝下所有鱼种都会进入鱼道并通过鱼道,主要原因可能有两点:1)松新坝下部分鱼种可能存在适宜于自身完成生长发育、索饵、产卵等关键生命活动的生境,如前鳍高原鳅为杂食偏植食性,对栖息环境要求低^[23];白鹤滩电站蓄水后,靠近河口的黑水河下游河段常年处于回水变动区^[19],水流较缓,更适宜喜静水或缓流生境的鱼类栖息^[24],本研究也发现鲤鱼只在坝下监测到,并未发现有上溯过坝需求。2)有过坝需求的鱼种可能因生活习性及自身游泳能力之间的不同,成功通过鱼道的上溯效率存在差异,如大桥高原鳅和棒花在坝下、鱼道进口和鱼道出口均为优势种,表明松新鱼道有利于这两种鱼上溯,而短须裂腹鱼作为松新鱼道的过鱼对象,在鱼道进口为优势种,但在鱼道出口却降为常见种,表明松新鱼道针对短须裂腹鱼的上溯效率仍有待提高。

3.2 鱼道过鱼的季节性差异

鱼道的过鱼效果受到鱼类洄游动机的影响,通常会呈现较强的季节性规律^[11],如曹娥江大闸鱼道春、夏季过鱼数量远高于秋、冬季^[25];连江西牛鱼道 4 月过鱼数量约为 12 月的 54 倍^[26];大马哈鱼(*Oncorhynchus keta*)通过博内维尔水坝鱼道的成功率在春季(81.7%)高于秋季(57.19%)^[27]。分析松新鱼道进出口鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数发现,与上述文献中的结论基本吻合,即非洄游期(12 月)鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数显著低于洄游期(次年 3、5 月)($P<0.05$)。然而,在松新坝下,非洄游期和洄游期鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数之间无显著性差异(图 3),表明坝下部分鱼种在洄游期选择通过鱼道上溯。在鱼道进口出现了洄游期 4 月与非洄游期 12 月的鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数无显著差异的异常结果,主要原因可能是 4 月份试验期间因松新大坝上游来水量较大,大坝右岸泄洪闸大流量下泄水流,泄洪段水流对鱼类的吸引范围远高于左岸鱼道进口。在监测中发现,短须裂腹鱼和贝氏高原鳅只在产卵期(3—4 月)被监测到^[24];棒花鱼、云南盘鮈、短体副鳅和红尾副鳅只在产卵期(4—5 月)在鱼道进出口占比较高(图 4),表明鱼类产卵期是影响其上溯过坝的重要因素。

3.3 不同因素对鱼道过鱼效果的影响

常见影响鱼道过鱼效果的因素有生物因素(鱼种、体长、体重、肥满度、性别等^[11,14])、环境因素(水温、水体 pH、昼夜、浊度、溶氧、流量、流速和水位等^[11,16-18])。本文通过构建 Cox 风险比例回归的上溯成功率模型,识别了对鱼道上溯成功率有显著影响的 3 个关键因素,分别为鱼道内流量、水温和昼夜节律。本研究中试验鱼的体长与湿重并非主要影响因素,为减小 PIT 标签大小对试验鱼体的损伤,在实验中均选取成体试验鱼,而本试验中成体的短须裂腹鱼体型规格差异不大,可能导致体长和湿重对上溯通过率的影响并不显著。从模型结果可知,上溯成功率随着鱼道内流量增大而增大(表 5)。然而,有诸多国外鱼道监测案例发现上溯成功率与流量呈负相关,对博克河下游的一座鱼道监测发现过鱼对象偏好于低流量上溯通过鱼道^[28]。本文研究结果与之产生矛盾的主要原因是博克河鱼道流量递增幅度较大(试验期间流速区间为 1.06~4.20 m³/s),在高流量(4.20 m³/s)下鱼道流速较高,导致高流量下的成功上溯率较低。本研究在射频识别系统监测鱼道过鱼效果期间,鱼道内的流量变化范围为 0.01~0.50 m³/s,鱼道平均流速为 0.78 m/s(小于短须裂腹鱼的临界游泳速度 1.41 m/s^[29]),在松新鱼道流量递增期间,鱼道难以对短须裂腹鱼形成流速障碍,反而因流量增加形成了流速刺激,增强了鱼的上溯动机(图 5),提高了上溯成功率。若松新鱼道流量持续增加,鱼道上溯成功率也会面临挑战,从张网的监测数据发现,当鱼道内流量超过 0.5 m³/s 时,过鱼数量和种类均呈现下降趋势(图 5),这表明鱼道内流量为 0.5 m³/s 可能是不利于鱼类上溯的临界流量值。

鱼道中昼夜节律通常被认为是影响过鱼对象上溯效果的重要环境因素之一^[30]。有研究表明鱼类上溯效果表现出昼夜节律的差异性^[31],在科英布拉鱼道监测发现七鳃鳗主要选择在夜晚上溯通过鱼道^[30]。本

研究构建的模型中发现了相似结论,即短须裂腹鱼在夜晚上溯效果强于白天(表5)。短须裂腹鱼属底栖冷水性鱼类,偏好弱光环境,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^[32],这可能是短须裂腹鱼选择在夜间上溯的原因之一。

水温是影响鱼道过鱼效果的另一个重要环境因子^[33-35]。如对伊比利亚河上的一座鱼道监测发现,随着水温的增加,鱼道过鱼效果提升^[36],本文也得到相似结论。从模型结果可知,当水温从14.0~15.7°C和17.8~20.0°C变化时,上溯成功率与水温呈正相关(表5);从张网监测数据结果发现,鱼道过鱼数量和种类随着水温的增大而增大(图5)。国内外有大量研究表明,水温升高可增加个体的活跃性^[37]、有氧肌肉纤维中酶的活性^[38]以及提升鱼的克流能力^[39-40],如当水温从22.0°C上升至28.0°C时,大马哈鱼摆尾频率显著提升^[37],当水温从5.0°C上升至15.0°C,底鳉鱼(*Fundulus heteroclitus*)肌肉中的三磷酸腺苷由1.38 μmol/g上升至1.72 μmol/g^[38]。因此,水温增加可能会促进鱼类代谢和游泳能力水平的提升,使鱼类快速进入并通过鱼道。然而,水温并非越高越好,从张网监测结果发现,当水温高于20.0°C时,鱼道进口和出口的过鱼数量和种类随着水温的升高而下降(图5)。该结果推测20.0°C可能是短须裂腹鱼成功上溯的适宜临界水温,当水温超过临界水温时,水温的增加引起的代谢应激可能对鱼类摄食、上溯和生理功能均产生不良影响^[38],这可能间接导致短须裂腹鱼上溯动机减弱,上溯效率降低。相似的结果在Goniea等的研究中也被发现,哥伦比亚河大马哈鱼洄游的水温阈值为20.0~21.0°C,超过该阈值会减弱大马哈鱼的洄游^[41]。

本研究数据来源于松新鱼道修建完工后首年过鱼效果监测评估研究。然而,理想的过鱼效果需要持续实施多年的鱼道监测工作,以不断发现导致鱼道过鱼困难的原因,并优化鱼道设计。因此,未来将继续开展松新鱼道过鱼效果监测,为松新鱼道优化设计及后续黑水河上游公德水电站与苏家湾电站鱼道建设提供数据参考。

4 参考文献

- [1] Wei YC, Yu YJ, Hu X et al. Application of radio frequency identification in fishway monitoring. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(2): 11-17. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2018.02.002. [魏永才, 余英俊, 胡晓等. 射频识别技术(RFID)在鱼道监测中的应用. 水生态学杂志, 2018, 39(2): 11-17.]
- [2] Zhang J, Wang YC, Shi XT et al. Monitoring effectiveness of half-duplex PIT telemetry technology. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(8): 2802-2809. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202008.025. [张健, 王义川, 石小涛等. 半双工PIT遥测技术的监测效果. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2802-2809.]
- [3] Cao WX. 10-year fishing ban is an important measure for the great protection of the Yangtze River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(1): 1. [曹文宣. 十年禁渔是长江大保护的重要举措. 水生生物学报, 2022, 46(1): 1.]
- [4] Wang K, Liu SP, Chen DQ et al. Fishway effect of Cuijiaying navigation-power junction project. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 184-189. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.03.025. [王珂, 刘绍平, 陈大庆等. 崔家营航电枢纽工程鱼道过鱼效果. 农业工程学报, 2013, 29(3): 184-189.]
- [5] Tao JP, Wen JY, He D et al. Review on monitoring and evaluating of fish passage facilities for upper migration. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(10): 2270-2282. DOI: 10.11870/cjlyzyhhj201810013. [陶江平, 温静雅, 贺达等. 上行过鱼设施过鱼效果监测研究进展. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2270-2282.]
- [6] Wen JY, Chen A, Wang PY et al. A review of effectiveness assessment and monitoring technologies for fish passage facilities. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(5): 49-55. DOI: 1006-7647(2019)05-0049-07. [温静雅, 陈昂, 王鹏远等. 国内外过鱼设施运行效果评估与监测技术研究综述. 水利水电科技进展, 2019, 39(5): 49-55.]
- [7] Hou YQ, Cai L, Chen XJ et al. Design points and effectiveness evaluation for fish passage. *Environmental Impact Assessment*, 2020, 42(3): 19-23. DOI: 10.14068/j.ceia.2020.03.005. [侯轶群, 蔡露, 陈小娟等. 过鱼设施设计要点及有效性评价. 环境影响评价, 2020, 42(3): 19-23.]
- [8] Connor AR, Elling CH, Black EC et al. Changes in glycogen and lactate levels in migrating salmonid fishes ascending experimental “end-less” fishways. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 1964, 21(2): 255-290.
- [9] Baras E, Lambert H, Philippart JC. A comprehensive assessment of the failure of *Barbus barbus* spawning migrations through a fish pass in the canalized River Meuse (Belgium). *Aquatic Living Resources*, 1994, 7(3): 181-189.
- [10] Wang X, Gao L, Wang K et al. Effects of fish passing through the fishway of the Xiajiang Water Control Project. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(1): 130-140. DOI: 10.12264/JFSC2021-0181. [王晓, 高雷, 王珂等. 峡江水利枢纽鱼道过鱼效果的初步研究. 中国水产科学, 2022, 29(1): 130-140.]

- [11] Yoon JD, Kim JH, Yoon J et al. Efficiency of a modified Ice Harbor-type fishway for Korean freshwater fishes passing a weir in South Korea. *Aquatic Ecology*, 2015, **49**(4) : 417-429. DOI: 10.1007/s10452-015-9534-3.
- [12] Roscoe DW, Hinch SG. Effectiveness monitoring of fish passage facilities: Historical trends, geographic patterns and future directions. *Fish and Fisheries*, 2010, **11**(1) : 12-33.
- [13] Croze O, Bau F, Delmouly L. Efficiency of a fish lift for returning Atlantic salmon at a large-scale hydroelectric complex in France. *Fisheries Management and Ecology*, 2008, **15**(5/6) : 467-476. DOI: 10.1111/j.1365-2400.2008.00628.
- [14] Bao JH, Li WW, Zhang CS et al. Quantitative assessment of fish passage efficiency at a vertical-slot fishway on the Daduhe River in Southwest China. *Ecological Engineering*, 2019, **141** : 105597. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.105597.
- [15] Keefer ML, Caudill CC, Clabough TS et al. Fishway passage bottleneck identification and prioritization: A case study of Pacific lamprey at Bonneville Dam. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013, **70**(10) : 1551-1565.
- [16] Kim JH, Yoon JD, Baek SH et al. An efficiency analysis of a nature-like fishway for freshwater fish ascending a large Korean River. *Water*, 2015, **8**(1) : 3. DOI: 10.3390/w8010003.
- [17] Makiguchi Y, Konno Y, Konishi K et al. EMG telemetry studies on upstream migration of chum salmon in the Toyohira River, Hokkaido, Japan. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2011, **37**(2) : 273-284. DOI: 10.1007/s10695-011-9495-y.
- [18] Pon LB, Hinch SG, Cooke SJ et al. Physiological, energetic and behavioural correlates of successful fishway passage of adult sockeye salmon *Oncorhynchus nerka* in the Seton River, British Columbia. *Journal of Fish Biology*, 2009, **74**(6) : 1323-36. DOI: 10.1111/j.1095-8649.2009.02213.
- [19] Song YQ, Cheng BX, Hu W. Quantitative analysis of conservation priority for fish species in Heishui River. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(6) : 65-72. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2018.06.010. [宋一清, 成必新, 胡伟. 黑水河鱼类优先保护次序的定量分析. 水生态学杂志, 2018, **39**(6) : 65-72.]
- [20] Yang Z, Gong Y, Dong C et al. Fish resource status of the lower reaches of the Heishui River and the measures for their conservation. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(6) : 847-855. DOI: 10.11870/cjlyzyhhj201706007. [杨志, 龚云, 董纯等. 黑水河下游鱼类资源现状及其保护措施. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(6) : 847-855.]
- [21] Teng H, Tian HW, Liu HW et al. Fish resources status in Heishui River, a tributary of the lower reaches of Jinsha River. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(5) : 1499-1511. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202105.016. [滕航, 田辉伍, 刘寒文等. 金沙江下游支流黑水河鱼类资源现状. 生态学杂志, 2021, **40**(5) : 1499-1511.]
- [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] Gao XC, Zhang Q, Su W et al. Environmental quality assessment based on fish biotic integrity index and eco-restoration mode discussion for the Heishui River, Jinsha River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(1) : 104-112. DOI: 10.11870/cjlyzyhhj202201010. [郜星辰, 张琪, 苏巍等. 基于鱼类生物完整性的金沙江黑水河健康评估及修复模式探讨. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(1) : 104-112.]
- [24] Chen MQ, Tuo YC, Li J et al. Preliminary study on index system describing hydraulic characteristics of fish spawning ground. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(11) : 1303-1308. [陈明千, 脱友才, 李嘉等. 鱼类产卵场水力生境指标体系初步研究. 水利学报, 2013, **44**(11) : 1303-1308.]
- [25] Hui Y, Fuqing B, Xinchuang C et al. Study on the population and effect of fish passing through the fishway in Ca'e River Gate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, **510**(4) : 042013. DOI: 10.1088/1755-1315/510/4/042013.
- [26] Li J, Li XH, Zhu SL et al. Study on the efficiency and influencing factors of Xinjiu fishway in the Lianjiang River. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, (12) : 1593-1600. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0894. [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, (12) : 1593-1600.]
- [27] Keefer ML, Peery CA, Bjornm TC et al. Hydrosystem, dam, and reservoir passage rates of adult Chinook salmon and steelhead in the Columbia and snake rivers. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2004, **133**(6) : 1413-1439. DOI: 10.1577/T03-223.1.
- [28] 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.
- [29] Zhong ZY, Shi XT, Tan JJ et al. Fishway velocity design analysis based on fish swimming ability. *Journal of Hydroecology*, 2021, **42**(6) : 92-99. DOI: 10.15928/j.1674-3075.201910080249. [仲召源, 石小涛, 谭均军等. 基于鱼类游泳能力的鱼道设计流速解析. 水生态学杂志, 2021, **42**(6) : 92-99.]
- [30] Pereira E, Cardoso GR, Quintella BR et al. Proposals for optimizing sea lamprey passage through a vertical-slot fishway. *Ecohydrology*, 2019, **12**(4) : e2087. DOI: 10.1002/eco.2087.
- [31] 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.

- [32] Shi K, Li GN, Liu ST *et al.* Experimental study on the passage behavior of juvenile *Schizothorax prenanti* by configuring local colors in the vertical slot fishways. *Science of the Total Environment*, 2022, **843**: 156989. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156989.
- [33] Bizzotto PM, Godinho AL, Vono V *et al.* Influence of seasonal, diel, lunar, and other environmental factors on upstream fish passage in the Igarapava Fish Ladder, Brazil. *Ecology of Freshwater Fish*, 2009, **18**(3): 461-472. DOI: 10.1111/j.1600-0633.2009.00361.
- [34] Fernández D, Agostinho A, Bini LM *et al.* Environmental factors related to entry into and ascent of fish in the experimental ladder located close to Itaipu Dam. *Neotropical Ichthyology*, 2007, **5**: 153-160. DOI: 10.1590/S1679-62252007000200009.
- [35] Leggett HD, Jordaan A, Roy AH *et al.* Daily patterns of River Herring (*Alosa* spp.) Spawning migrations: Environmental drivers and variation among coastal streams in Massachusetts. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2021, **150**(4): 501-513. DOI: 10.1002/tafs.10301.
- [36] Ana GV, Javier SRF, Francisco FPJ. Seasonal and daily upstream movements of brown trout *Salmo trutta* in an Iberian regulated river. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 2017, (418): 9. DOI: 10.1051/kmae/2016041.
- [37] Bartolini T, Butail S, Porfiri M. Temperature influences sociality and activity of freshwater fish. *Environmental Biology of Fishes*, 2015, **98**(3): 825-832. DOI: 10.1007/s10641-014-0318-8.
- [38] Fangue NA, Mandic M, Richards JG *et al.* Swimming performance and energetics as a function of temperature in killifish *Fundulus heteroclitus*. *Physiological and Biochemical Zoology: PBZ*, 2008, **81**(4): 389-401. DOI: 10.1086/589109.
- [39] Brett JR. Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 1967, **24**(8): 1731-1741. DOI: 10.1139/f67-142.
- [40] Pang X, Yuan XZ, Cao ZD *et al.* The effects of temperature and exercise training on swimming performance in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*). *Journal of Comparative Physiology B*, 2013, **183**(1): 99-108. DOI: 10.1007/s00360-012-0690-7.
- [41] Goniea TM, Keefer ML, Bjornn TC *et al.* Behavioral thermoregulation and slowed migration by adult fall Chinook salmon in response to high Columbia River water temperatures. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2006, **135**(2): 408-419.