

金沙江黑水河三种典型鱼类通过鱼道过坝后上溯行为规律

石小涛¹, 高生辉¹, 柯森繁^{1**}, 焦易林², 李冬晴¹, 许家炜^{3,4}, 杨吉¹, 李新宇¹, 卢建雨¹, 朱世龙¹, 涂志英⁴, 成必新⁵

(1: 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

(2: 四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室, 成都 610065)

(3: 珠江水利科学研究院, 广州 510635)

(4: 中山大学土木工程学院, 广州 519082)

(5: 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443002)

(6: 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘 要: 鱼道进口“找不到”、槽身“上不去”和过坝后“怎么游”一直是恢复鱼类洄游通道, 探明鱼类生活史过程需要回答的问题, 其中, 鱼类过坝后“怎么游”, 是否会陷入库区“生态陷阱”和能否通过库区到达栖息地亟待回答。本文选择金沙江黑水河三种典型鱼类齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)、红尾副鳅(*Paracobitis variegatus*)和短体副鳅(*Paracobitis potanini*)为过鱼对象, 通过网捕法调查目标鱼资源状况, 利用遥测技术获取 3 种目标鱼过坝后的上溯行为指标, 构建耦合库区水文水动力因素的鱼类过坝后上溯效果定量评价模型, 识别影响鱼类过坝后上溯效果的关键因子, 建立目标鱼库区上溯效果与各关键因子响应关系。结果表明: (1) 齐口裂腹鱼、红尾副鳅和短体副鳅在坝上-鱼道-坝下均为优势种, 资源量总和占有渔获物总量 40%以上。(2) 3 种目标鱼鱼道通过率为 11.14%, 自鱼道出口向库尾上溯成功率为 30.87%。(3) 目标鱼过坝后有不同生境选择占比, 70%的目标鱼停留于近坝库区, 占比最高; 28%的目标鱼继续上溯至卵石河床区; 未发现目标鱼从砾石辫状河床区上溯至沙砾蜿蜒河床区。(4) 影响鱼类过坝后上溯效果的敏感因素为鱼的种类、流量、水文条件变化率和昼夜节律。(5) 目标鱼过坝后上溯成功率随河道流量增大而下降; 目标鱼选择在短涨水时上溯; 超过 60%的目标鱼选择在夜间上溯; 齐口裂腹鱼过坝后上溯成功率显著高于红尾副鳅和短体副鳅。本研究以金沙江鱼类为例, 解析了鱼类过坝后上溯行为规律和识别了驱动目标鱼生境选择的关键因子。

关键词: 鱼类洄游; 跟踪监测; 水文水动力; 上溯行为; 生境选择

The upstream behavioral patterns of three typical fish species in the Jinsha River and the Heishui River after passing through the fishway and crossing the dam

Shi Xiaotao¹, Gao Shenghui¹, Ke Senfan¹, JIAO YiLin², LI DongQing¹, XU JiaWei³, YANG Ji¹, LI XinYu¹, LU JianYu¹, ZHU ShiLong¹, TU ZhiYing⁴, CHENG BiXin⁵,

(1: College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

(2: State key laboratory of hydraulics and mountain river engineering, Chengdu 610065, P.R.China)

(3: Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510635, P.R.China)

(4: School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 519082, P.R.China)

(5: College of Biological and Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

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

* 2024-10-02 收稿; 2024-12-29 收修稿。

国家自然科学基金项目(52279069)、国家自然科学基金联合基金项目(U2340218)和湖北省自然科学基金创新群体项目(2023AFA005)联合资助。

** 通信作者; E-mail: ksfctgu@163.com。

Abstract: Challenges such as the "invisibility" of fishway entrances, the "inaccessibility" of chutes, and "post-passage swimming behavior" have long persisted in the restoration of fish migration routes and the comprehension of fish life history. Specifically, urgent issues such as how fish swim after passing through a dam, whether they get entrapped in reservoir "ecological traps", and if they can traverse the reservoir to reach their habitats require immediate attention. In this study, three typical fish species in the Heishui River of the Jinsha River, namely *Schizothorax prenanti*, *Paracobitis variegatus*, and *Paracobitis potanini*, were chosen as research subjects. The status of these target fish resources was evaluated by means of net-capture methods, and post-passage upstream movement data were gathered using telemetry technology. Subsequently, a quantitative evaluation model of post-passage upstream movement effectiveness was developed, integrating the hydrological and hydrodynamic factors of the reservoir. The key factors influencing this effectiveness were determined, and the response relationships between upstream effectiveness and these factors were established. The results are as follows: 1) *Schizothorax prenanti*, *Paracobitis variegatus*, and *Paracobitis potanini* are dominant species in the area from the upper part of the dam to the fishway and then to the lower part of the dam, accounting for more than 40% of the total catch in aggregate. 2) The fishway passage rate of the three target species was 11.14%, and their success rate of upstream migration from the fishway exit to the reservoir tail was 30.87%. 3) After passing through the fishway, the target fish exhibited different habitat preferences. 70% remained in the near-dam reservoir area, which was the highest proportion; 28% continued to swim upstream to the pebble riverbed area; no target fish were observed to migrate upstream from the gravel braided riverbed area to the meandering gravel-sand riverbed area. 4) The sensitive factors affecting post-passage upstream effectiveness include fish species, flow rate, rate of change in hydrological conditions, and diurnal rhythm. 5) The success rate of upstream migration after passing the dam decreases as the river flow increases; target fish tend to migrate during short periods of rising water; over 60% of target fish chose to migrate at night; the success rate of post-passage upstream migration for *Schizothorax prenanti* was significantly higher than that for *Paracobitis variegatus* and *Paracobitis potanini*. This study, taking the fish from the Jinsha River as an example, analyzed the upstream movement behavior patterns of fish after passing through the dam and identified the key factors driving the habitat selection of target fish.

Keywords: Fish migration; tracking and monitoring; hydrology and hydrodynamics; upstream behavior; habitat selection

黑水河是金沙江下游干流大规模水电开发背景下白鹤滩水库干流鱼类重要的补偿生境和优先保护支流^[1,2]。黑水河干流现有 3 座引水式电站（苏家湾、公德房和松新水电站），构成梯级小水电群，阻断了黑水河重要保护鱼类上下行洄游路径。为恢复河流纵向连通性，辅助鱼类过坝，2019 年松新闸坝左岸修建了试验性鱼道，松新鱼道表现出较好的过鱼效果（通过率：44.44%）^[3]。鱼道进口“找不到”、槽身“上不去”和过坝后“怎么游”一直是鱼类过坝技术有待解决的难题。“找不到”原因是鱼道进口占据河道一小部分，鱼道进口难以形成与河道水流互异的区别流，以诱导鱼找到鱼道进口^[4]；“上不去”原因是鱼道内池室存在不利于鱼上溯的水力屏障，过鱼对象因过障力竭而导致上溯失败^[5]；“怎么游”目标是明晰过坝后的鱼会采用何种运动策略在坝上进行生命活动^[6]。近年来，为解决鱼道进口“找不到”和槽身“上不去”的问题，一系列辅助进口诱鱼和鱼道内池室优化的措施被提出，并已取得一定成效。如采用声^[7]、光^[8]和增设补水^[9]的方式提升进口诱鱼效果；通过延长进口^[10]和池室内铺设底质^[11]的方式改善槽身流态，提升槽身通过率。然而，过坝后“怎么游”仍有待回答，亟需开展相关研究。

电站运行调度过程中水文情势动态变化是驱动鱼类特征行为发生的重要成因。澳大利亚北部圭迪尔（Gwydir）河的本地保护鱼种墨瑞鳕（*Maccullochella peelii*）在科普顿（Copeton）电站生态流量下泄期间偏好选择高流量上溯^[12]；以四大家鱼产卵需求为目标的葛洲坝电站下游生态流量调度发现江上涨会促进四大家鱼产生高频次产卵行为^[13]。尽管国内外在解析鱼类对水文情势变化的行为响应研究已取得一定进展，但多数聚焦坝下鱼类行为探索。山区河流梯级小水电坝上水文情势随时间变化显著，呈现径流系数大、汇流时间短、洪峰暴涨猛落及水位变幅大等特点^[14]，所引发的水文水动力异变对鱼类过坝后游泳行为的影响尚未明晰，迫切需要分析鱼类过坝后上溯行为策略的水文水动力驱动成因。

鉴于此，本研究以山区河流小水电梯级开发下的黑水河松新闸坝下游 4km、松新鱼道和上游 4 km 为试验场，以黑水河 3 种形态迥异的鲤科和鲃科鱼类代表-齐口裂腹鱼（体呈长纺锤形、侧扁^[15]）、红尾副鲃（体细长，前部圆棒状、尾部侧扁^[15]）和短体副鲃（较红尾副鲃粗短，前段呈圆筒状、后段侧扁^[15]）为目标鱼

类,采用网捕法调查了坝下、鱼道内和坝上目标鱼资源分布状况,利用 PIT (Passive Integrated Transponder) 遥测技术,获取评价 3 种目标鱼过坝前后的上溯效果指标(过坝前-鱼道通过率;过坝后-河道上溯成功率),解析洄游期裂腹鱼和鳅科鱼过坝后响应水文情势变化下的上溯规律,构建耦合坝上水文水动力因素的鱼类过坝后上溯效果定量评价模型,识别影响鱼类过坝后上溯效果的关键因子,建立过坝后上溯效果与水文水动力响应关系生存曲线,为金沙江流域梯级小水电鱼类过坝后生境修复提供理论指导和技术支撑。

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,流域面积 3591 km²,全长 173.0 km,天然落差 1931 m,平均比降 11.05‰,河口处多年平均流量为 80 m³/s、径流量 25.25 亿 m³,是乌东德白鹤滩电站生态补偿的栖息地保护重要生态修复区域。黑水河干流现有 3 座引水式电站,从上游至下游分别是苏家湾电站、公德房电站和松新电站,目前仅松新电站建成鱼道。松新闸坝至公德房厂房河段(松新闸坝上游 4 km),因其受松新闸坝蓄水和公德房厂房发电泄水双重影响,水文情势突变显著(鱼类洄游期日最高流量为最低流量的 5-7 倍),鱼类过坝后响应突变水文情势的行为策略对过坝后鱼类生境修复提供重要的数据参考,故选取松新鱼道及坝上 4 km 河段为鱼类过坝后行为监测区域(图 1)。

1.2 目标鱼资源调查

本研究选择以松新坝下主要过鱼对象的代表齐口裂腹鱼、红尾副鳅及短体副鳅为目标鱼,其中,齐口裂腹鱼是白鹤滩水电站环评批复中(环审(2015)240 号)重点放流对象,其资源量能反映黑水河作为鱼类补偿生境的适宜程度。齐口裂腹鱼主要以着生藻类、水生昆虫及其它小型无脊椎动物等为食,属于底栖冷水性鱼类,具有短距离洄游习性。红尾副鳅和短体副鳅为黑水河本土重要保护鱼类,其资源状况能反映黑水河鱼类生境修复效果。两种鳅主要以水生昆虫及其幼虫、小型甲壳动物、藻类以及有机碎屑等为食,常栖息于底层水域^[16]。在 2023 年洄游期 3-5 月份采用网捕法开展目标鱼资源调查,每月捕捞 12 天,下网 48h 后收取地笼网,3 个月共收取 18 次,总共沿松新坝下、鱼道内和坝上河段布置 13 个采样点(图 2),其中坝下和坝上河段采样点布置地笼网(5.5m×0.30m×0.25m,网目 4mm)获取渔获物,鱼道内布设张网(1.75m×1m×1m,网目 5mm)获取渔获物,张网网目小于目标鱼成鱼尺寸范围(体长:49~500mm;体高:11~71mm;体宽 8~46mm),网口朝向下。监测期间所有采样点鱼类资源调查同步进行,调查结束后,需对渔获物进行鉴定,并记录渔获物的种类、数量、体长、体重等形态学指标。

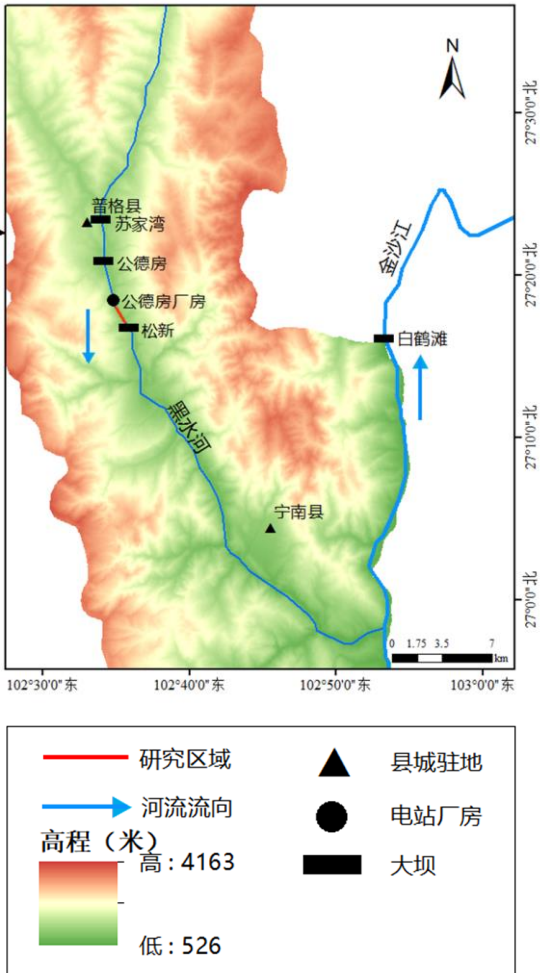


图 1 研究区域地理位置

Fig.1 Regional geographic location of study area

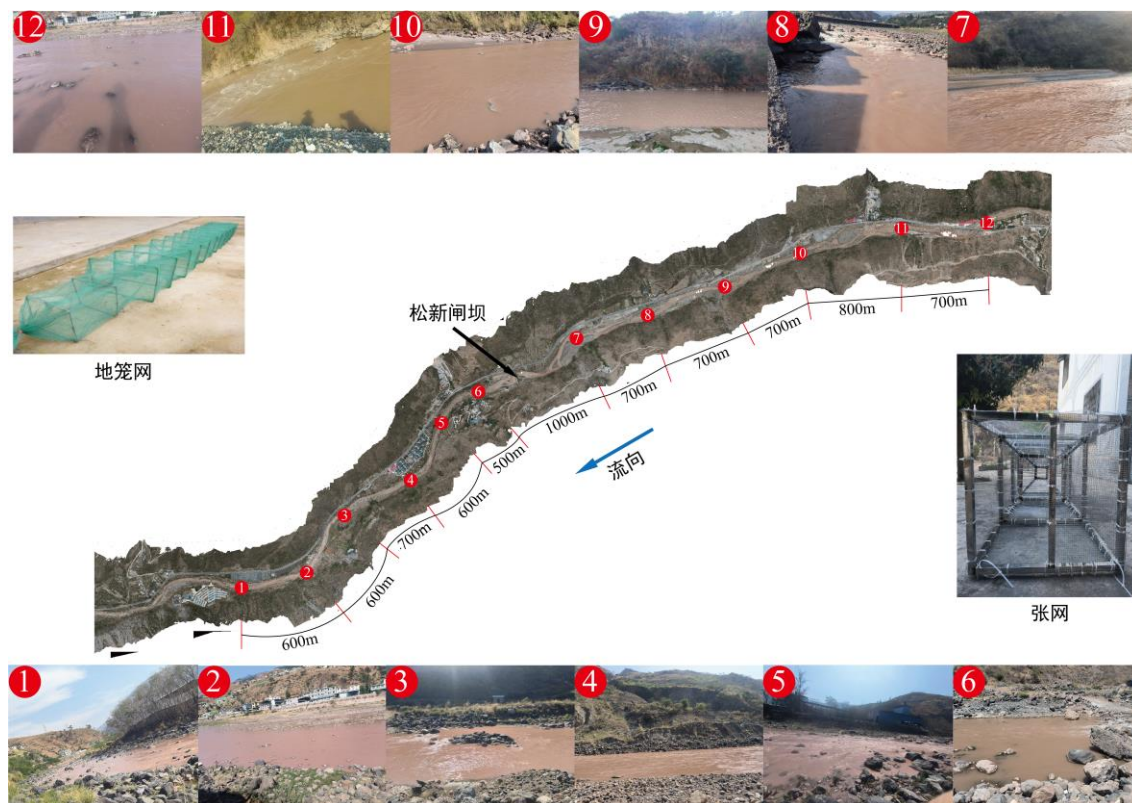


图2 鱼类资源调查点位分布图

Fig.2 Distribution Map of Fishery Resource Survey Sampling Points

1.3 鱼类过坝后行为监测

为明晰鱼类过坝后上溯行为规律，本研究采用射频识别技术监测目标鱼上溯过坝的全过程。设备由阅读器、识别天线、蓄电池及太阳能电池板组成，每个线圈只对应一个数据采集阅读器。当携带标签的鱼类进入与接收器相连的天线磁场范围时，每个 PIT 标签的唯一识别信号被接收器接收，接收器内部阅读器会对信号进行解码，从而实现了对植有超声波标签鱼的自动识别。因库区范围较大，天线布置原则上选择典型河道断面。前期生境调查发现松新闸坝上游 4km 内距离闸坝由近及远主要有四种典型生境特征分别为：A 区-近坝库区，水流特征为水深且缓；B 区-卵石河床型河道，水流特征为高流速、高湍动能、下切力强、多浅滩跌水；C 区-砾石辫状型河床，河道纵坡降较大，多河心洲且存在死水区域；D 区-沙砾蜿蜒型河床，多深潭、河道宽深比小。考虑四个生境区可能对鱼上溯行为产生影响，在区域交界处各布置 1 个 PIT 线圈，总计 4 个线圈，分别为距离鱼道出口 0km（鱼道出口天线）、0.7km（天线 1）、1.3km（天线 2）和 3.3km（天线 3）（图 3）。布置方式为跨河段截面布置，以保证天线磁场范围完全覆盖监测断面。

1.3.1 试验鱼标记 以目标鱼类达到初次性成熟的体长变幅作为依据，判断捕获鱼类是否达到成鱼规格^[17,18]，从松新坝下鱼类资源调查捕获的渔获物中选择具有上溯需求的成鱼—齐口裂腹鱼（体长：13~29.2cm）、红尾副鳅（体长：7~18.7cm）和短体副鳅（体长：5~12.3cm）进行标记，试验前用 75%酒精对标记工具注射器、针头、标签、试验员双手进行消毒，采用 MS-222 对目标鱼类进行麻醉，待鱼状态稳定后，先测量鱼的形态学数据（全长（cm）、叉长（cm）、体长（cm）、体高（cm）、体宽（cm）、体重（g）），再将具有独立编码的 PIT 标签植入鱼体腹腔内；标记完成后，即刻将鱼转移至放置在坝下缓流区暂养箱内进行恢复，暂养水来自河水，暂养水温与河道水温一致，暂养时间至少 24 h。暂养结束后选取其中健康鱼体进行鱼类过坝后行为监测试验。本试验周期为 2023 年 3 月至 5 月（鱼类洄游期），分 8 批次放鱼，共计试验标记鱼 1337 尾，包括齐口裂腹鱼（鲤科）993 尾、红尾副鳅（鳅科）149 尾和短体副鳅（鳅科）195 尾，其形态学相关数据见表 1。

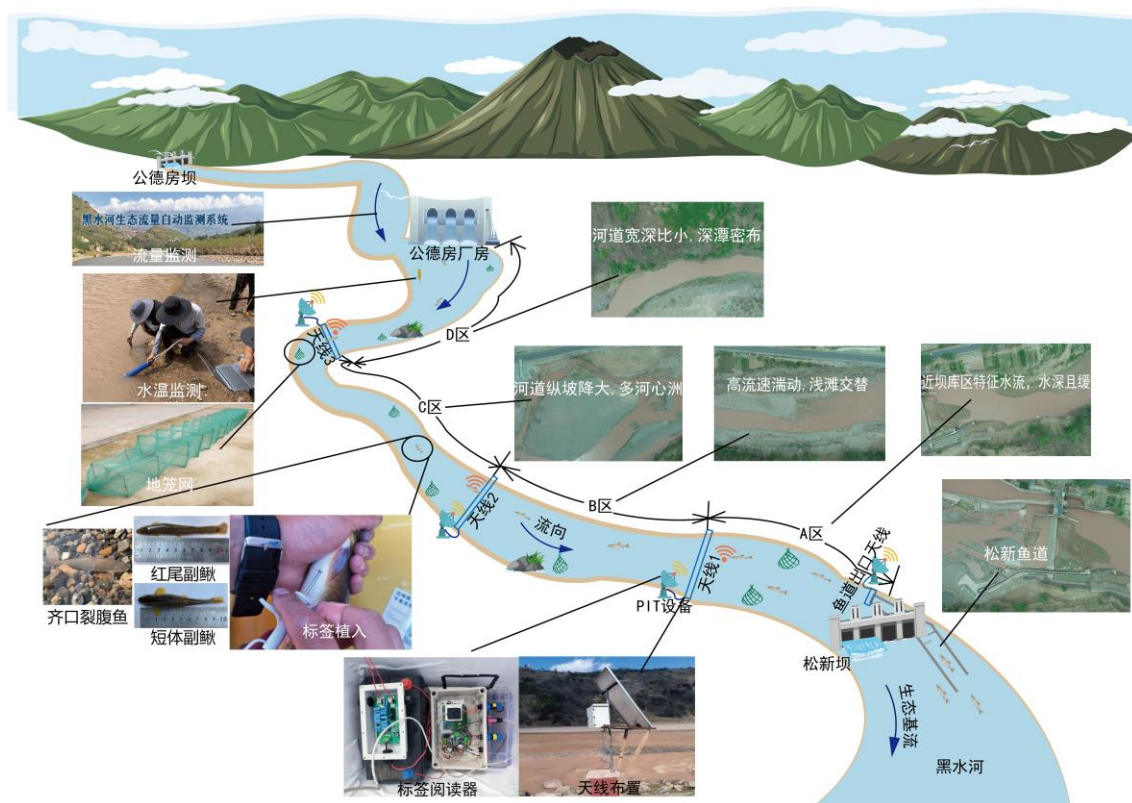


图3 研究区域生境特征及数据监测过程

Fig.3 Study the regional habitat characteristics and data monitoring process

表1 标记鱼形态学指标

Tab.1 Morphological indicators of fish were marked

放鱼时间	标记鱼的种类	标记数量/尾	体长/cm	体重/g	丰满度*/(100g/cm ³)
3-5 月	齐口裂腹鱼	993	23.82±2.49	204.78±62.78	1.50±0.17
	红尾副鲈	149	11.90±1.92	11.98±3.99	0.76±0.14
	短体副鲈	195	7.84±0.95	7.34±1.79	1.59±0.28

* 丰满度=体重(g)/体长³(cm)。

1.3.2 PIT 跟踪监测 每次试验从距离鱼道进口下游 10m 位置释放标记鱼,利用松新鱼道出口及坝上河道布置的天线实时采集标记鱼信号数据,每次监测周期为 30 天。当地昼夜节律分为凌晨(1:00~7:00)、上午(7:00~13:00)、下午(13:00~19:00)和晚上(19:00~1:00)。监测期间同步获取水文水动力参数,包括流量(m³/s)、水温(℃)、水文条件变化率(m³/min²),其中流量和水温由黑水河水文站提供,水文条件变化率指流量从一个值变成另一个值的速率,反应时间—流量过程线的斜率^[19],计算公式为:

$$H_c = \Delta Q / \Delta t \quad (1)$$

式中 ΔQ (m³/min) 为流量的变化量, Δt (min) 为时间的变化量。当 $H_c > 0$ 时表示此时河道处于短涨水情势, $H_c < 0$ 时表示此时河道处于短退水情势(“短涨水情势”和“短退水情势”表示在极短时间内河道流量瞬间涨退过程)。

鱼道及过坝后上溯效果以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成功率,其表达式如下:

$$P_0 = N_0 / N \times 100\% \quad (2)$$

$$P_1 = N_1/N_0 \times 100\% \quad (3)$$

$$P_2 = N_2/N_1 \times 100\% \quad (4)$$

$$P_3 = N_3/N_2 \times 100\% \quad (5)$$

式中, P_0 表示鱼道通过率; P_1 表示过坝后天线 1 上溯成功率; P_2 表示过坝后天线 2 上溯成功率; P_3 表示过坝后天线 3 上溯成功率; N 表示松新坝下放鱼的数量; N_0 表示鱼道出口天线识别到标记鱼的数量; N_1 表示上游河道天线 1 识别到标记鱼的数量; N_2 表示上游河道天线 2 识别到标记鱼的数量; N_3 表示上游河道天线 3 识别到标记鱼的数量。

1.4 数据分析

1.4.1 相对重要性指数 本研究以相对重要性指数 (IRI) 来确定坝下、鱼道和坝上鱼类的优势种、常见种、偶见种和稀有种, 其计算公式为^[3,20]:

$$IRI = 10^4 Fi \times (Ni + Wi) \quad (6)$$

式中: Ni 为某种鱼类数量占渔获物总数量的比例(%); Wi 为某种鱼类重量占渔获物总重量的比例(%); Fi 为某鱼种在调查中出现的频率(%)。

当 $IRI \geq 1000$ 时, 表示该物种为优势种; 当 $100 \leq IRI < 1000$ 时为常见种; 当 $10 \leq IRI < 100$ 时为偶见种; 当 $IRI < 10$ 时为少见种。

2.4.2 鱼类过坝后上溯效果评估 本研究使用 R 4.3.2 进行统计学分析, 以 2023 年坝下释放的目标鱼作为评估样本, 以进入 A 区时间与通过 A 区时间间隔为生存时间变量, 以是否通过库区继续上溯为结果变量, 采用 Cox 风险比例回归法构建了以生物因素: 鱼的种类 (S)、全长 (TL)、体长 (BL)、体高 (BH)、体长体高比 (LH)、体宽 (BW)、体重 (WE)、丰满度 (K) 和非生物因素: 坝上流量 (Q)、水温 (T)、昼夜节律 (R) 和水文条件变化率 (Hc) 为协变量的过坝后上溯成功率评价模型, 各变量的数据类型及定义见表 2。

为避免模型中协变量可能存在多重共线性问题, 提高模型精度, 采用矩阵相关性分析剔除相关性较高的协变量 ($R^2 > 0.7$)^[21], 采用 AIC 准则 (Akaike information criterion, AIC) 筛选最优模型。AIC 准则是一种用于衡量统计模型拟合优良性的标准, 从一组可供选择的模型中选择最佳模型时, 通常选择最小 AIC 值相对应的模型。Cox 风险回归模型公式^[22]和 AIC 计算公式^[23]为:

$$h\left(\frac{t}{n}\right) = h_0(t) \exp(\beta x^T + b_i) \quad (7)$$

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

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 是模型参数个数, $L(\theta)$ 表示似然函数。Cox 风险比例回归模型的数据文件变量见附表 I。

2 结果

2.1 坝下-鱼道-坝上目标鱼资源量

鱼类资源监测期间, 采用网捕法在坝下共采集 978 尾鱼, 隶属于 2 目 5 科 12 属 14 种, 其中, 鲤科和鳅科鱼类分别占比 46.6% 和 46.0%, 其它科鱼类仅为 7.4%; 3 种目标鱼齐口裂腹鱼、红尾副鳅和短体副鳅占坝下总渔获量的 57%。鱼道内共采集 210 尾鱼, 隶属于 1 目 2 科 9 属 12 种, 鲤科和鳅科鱼类分别占比 60.5% 和 39.5%; 3 种目标鱼齐口裂腹鱼、红尾副鳅和短体副鳅占鱼道内总渔获量的 30%。坝上共采集 709 尾鱼, 隶属于 1 目 2 科 10 属 12 种, 鲤科和鳅科鱼类分别占比 54.3% 和 45.7%; 3 种目标鱼齐口裂腹鱼、红尾副鳅和短体副鳅占坝上总渔获量的 48% (图 4)。通过计算坝下-鱼道-坝上鱼类相对重要性指数, 发现齐

口裂腹鱼、红尾副鳅和短体副鳅均为坝下、鱼道和坝上的优势种（IRI>1000）（图 4）。

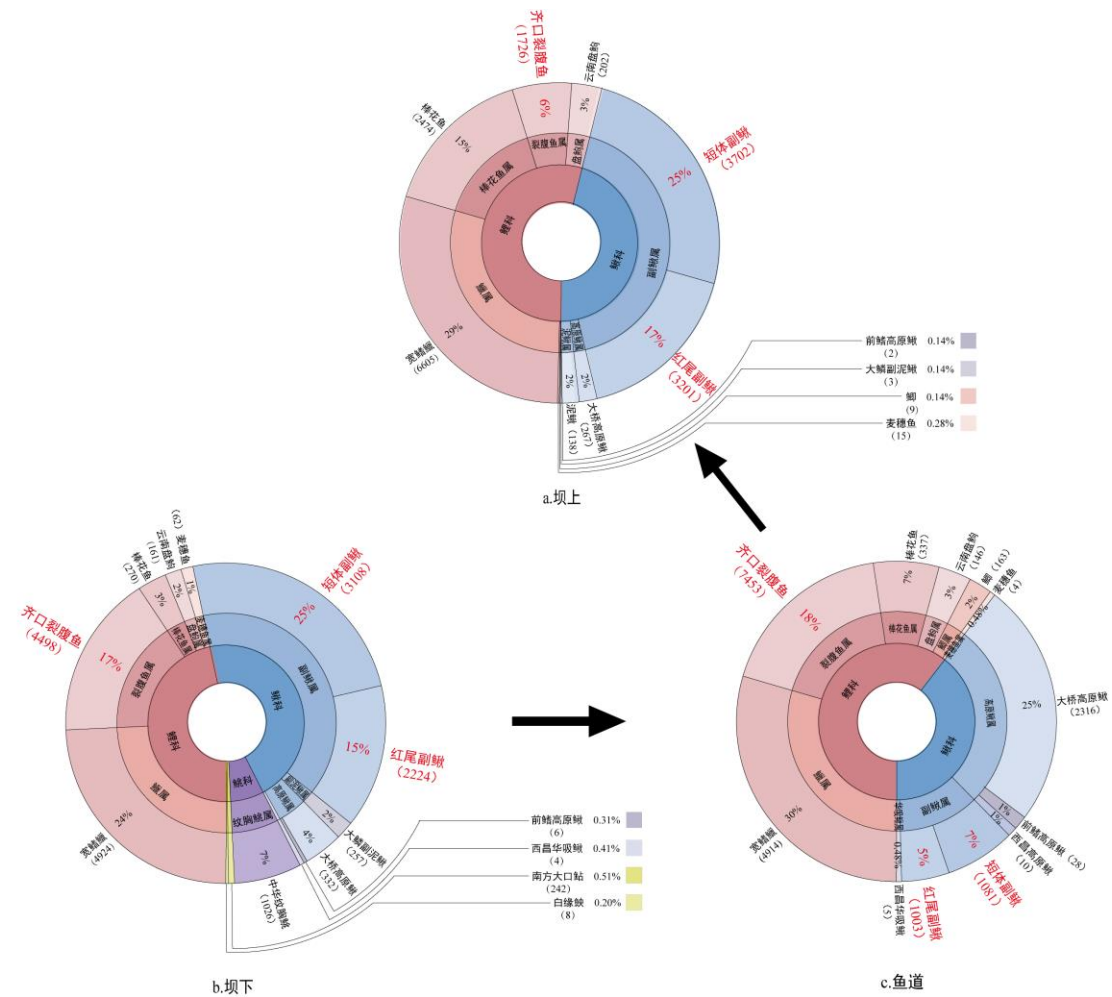


图 4 松新坝上-鱼道-坝下鱼类组成及相对重要性指数
(注：鱼名下方括号中数字代表相对重要性指数（IRI）)

Fig.4 Composition and relative importance index of fish above - fishway - below dam in Songxin Dam

2.2 过坝后各天线识别标记鱼数量及上溯成功率

在 2023 年 3 月至 5 月的监测期内，坝上 PIT 天线 1 和天线 2 识别到 2021 年和 2022 年 3-5 月洄游期在松新坝下释放的标记鱼部分信号代码（2021 年和 2022 年标记鱼主要用于松新鱼道过鱼效果监测试验，在 2023 年 3-5 月的监测周期内又再次被信号阅读器识别发现在坝上），且在 A 区、B 区和 C 区均有出现（图 5A）。结果表明：鱼道出口天线识别到 151 尾标记鱼，其中 2023 年标记鱼占 98%，2021、2022 年各占 1%；天线 1 处识别 79 尾标记鱼，其中 2023 年标记鱼占比 58%，2022 年占比 35%，2021 年占比 7%；天线 2 处识别 12 尾标记鱼，2023 年占比 25%，2022 年占比 67%，2021 年占比 8%；天线 3 处未接收任何标签信号。

2023 年坝上各天线识别的标记鱼信号结果表明：鱼道出口天线识别到 149 尾标记鱼，其中齐口裂腹鱼占比 79%，红尾副鳅占 13%，短体副鳅占比最小，为 8%；天线 1 识别 46 尾标记鱼，齐口裂腹鱼占比高达 96%，红尾副鳅和短体副鳅各占 2%；天线 2 只识别到 3 尾齐口裂腹鱼；天线 3 未识别任何信号（图 5B）。鱼道通过率（ P_0 ）为 11.14%，天线 1、2 和 3 的上溯成功率分别为 30.87%，6.52%和 0%（图 5B）。

2.3 坝上水文情势变化下鱼类过坝后上溯策略

2.3.1 鱼类过坝后响应河道流量涨落的上溯策略 本研究统计了坝上天线识别标记鱼上溯进入 A、B 和 C 区时刻对应的水文条件变化率（ H_c ），结果表明：64.9%目标鱼选择河道短涨水（ $H_c > 0$ ）时从鱼道出口上溯进入 A 区；目标鱼在河道 A-B-C 区间上溯时，72.2%目标鱼也会选择短涨水（ $H_c > 0$ ）时上溯，而 21.5%目标鱼选择短退水（ $H_c < 0$ ）时上溯，仅有 6.3%目标鱼在无涨退（ $H_c = 0$ ）时上溯（图 6）。

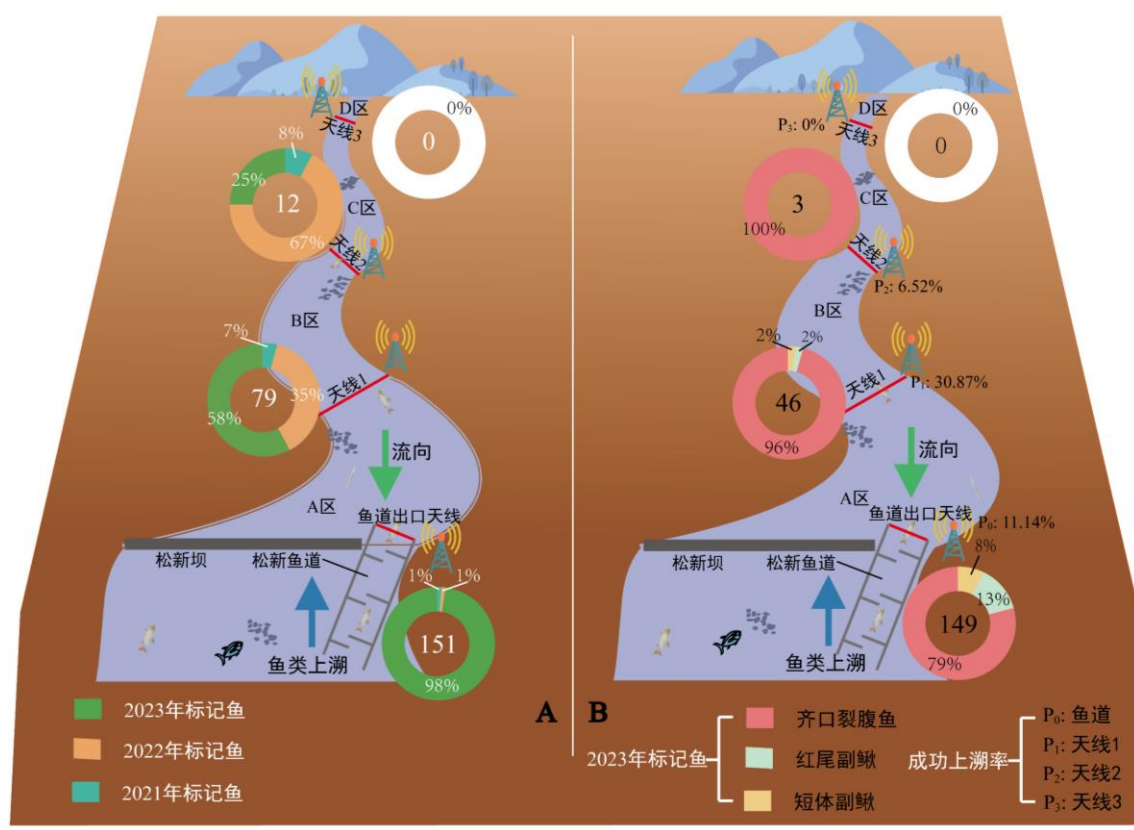


图 5 坝上 PIT 各天线识别标记鱼数量占比及上溯成功率

(注：A 区（近坝库区）；B 区（卵石河床区）；C 区（砾石辫状河床区）；D 区（沙砾蜿蜒河床区）)

Fig.5 The number proportion and successful tracing rate of each antenna in Bashang PIT

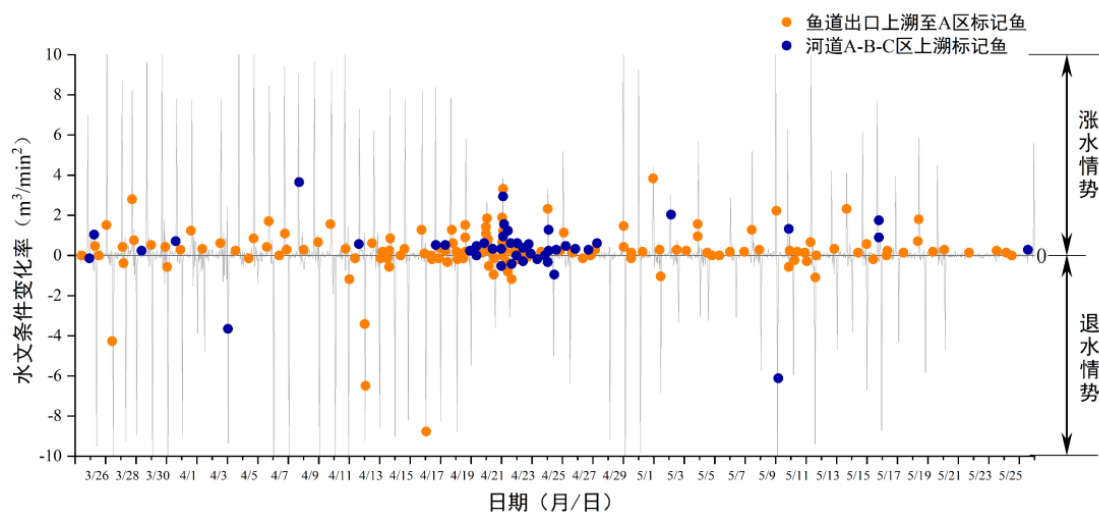


图 6 涨退水情势下目标鱼上溯过程

Fig.6 Upstream process of target fish under rising and falling water

2.3.2 鱼类过坝后昼夜上溯策略 通过统计坝上各天线识别标记鱼在凌晨、上午、下午和晚间的上溯数量，发现白天（上午、下午）和夜间（晚间、凌晨）目标鱼上溯数量表现出昼夜节律差异。标记鱼从鱼道出口天线上溯至 A 区的昼夜数量占比大小排序为：晚上>凌晨>下午>上午；标记鱼在河道 A-B-C 区间上溯的昼夜数量占比大小排序为：凌晨>晚上>下午>上午。通过比较白天和夜间目标鱼昼夜上溯数量占比，发现 62.2%

目标鱼选择在夜间上溯（图 7）。

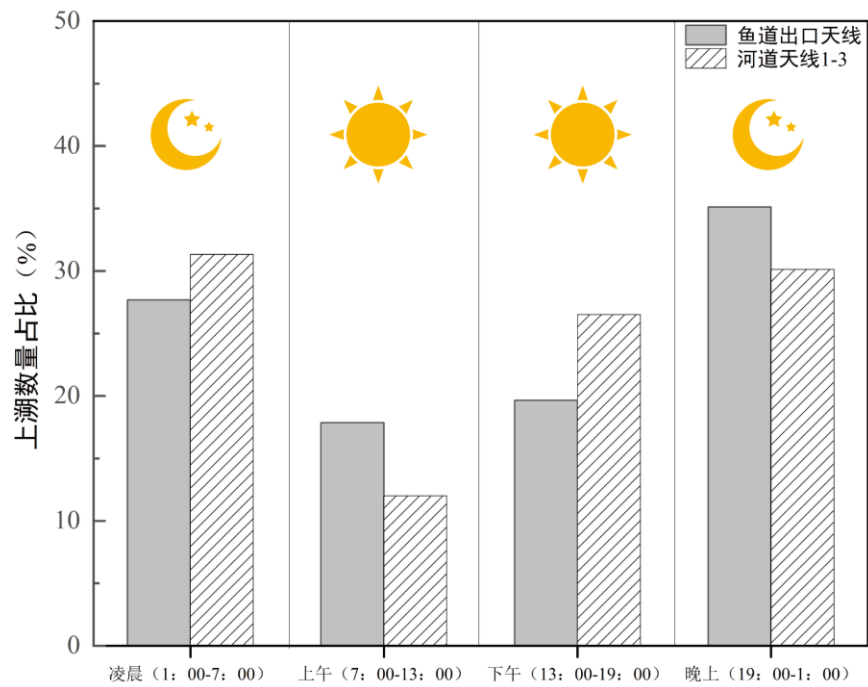


图 7 昼夜变化下鱼类过坝后上溯占比

Fig.7 The proportion of fish upstream after crossing the dam under diurnal variation

2. 4 识别鱼类过坝后上溯效果的关键影响因子

为避免模型产生多重共线性问题，协变量进行了矩阵相关性分析，剔除了全长、体长、体高、体长体高比、体宽和体重相关性较高的变量（图 8）；以鱼的种类、丰满度、流量、水温、昼夜节律和水文条件变化率为新协变量构建了鱼类过坝后上溯效果的风险比例回归模型，基于 AIC 值最小即模型最优的原则，从 AIC 值相对较小的 6 个模型中筛选出最优模型，发现鱼的种类、流量、水文条件变化率和昼夜节律是影响过坝后鱼类上溯效果的关键因素（表 2）。河道流量越大，目标鱼成功上溯概率越低（ $P<0.05$ ），河道流量每增加 $1\text{ m}^3/\text{s}$ ，成功上溯概率会降低 12.7%。水文条件变化率与目标鱼成功上溯概率显著正相关（ $P<0.05$ ），即短涨水下的成功上溯概率高于短退水（表 3）。

表 2 基于赤池信息准则（AIC）的模型选择¹⁾

Tab.2 Model selection based on Akaike Information criteria

模型	$-2\ln L(\theta)$	k	AIC_i	$\Delta_i AIC$	W_i
$S+Q+T+Hc$	333.03	4	341.03	14.73	0.00
$Q+R+Hc$	323.49	3	329.49	3.19	0.07
$S+K+Q+T+R+Hc$	316.33	6	328.33	2.03	0.12
$S+K+Q+R+Hc$	318.16	5	328.16	1.86	0.13
$S+Q+T+R+Hc$	316.35	5	326.35	0.05	0.33
$S+Q+R+Hc$	318.30	4	326.30	0.00	0.34

1) 根据 AIC 准则，表中最后一个模型 AIC 值最小，被认为是最优模型；S 为目标鱼的种类；K 为鱼体丰满度（ $100\text{g}/\text{cm}^3$ ）；Q 为河道流量（ m^3/s ）；T 为河道水温（ $^{\circ}\text{C}$ ）；R 为昼夜情况；Hc 为水文条件变化率（ m^3/min^2 ）； $-2\ln L(\theta)$ 指模型的对数似然函数的负两倍对数形式；k 指协变量的个数； $\Delta_i AIC$ 指第 i 模型与最优模型之间的 AIC 值之差； W_i 为模型权重， $W_i = \text{EXP}(-0.5\Delta_i AIC) / \sum_{i=1}^6 \text{EXP}(-0.5\Delta_i AIC)$ 。

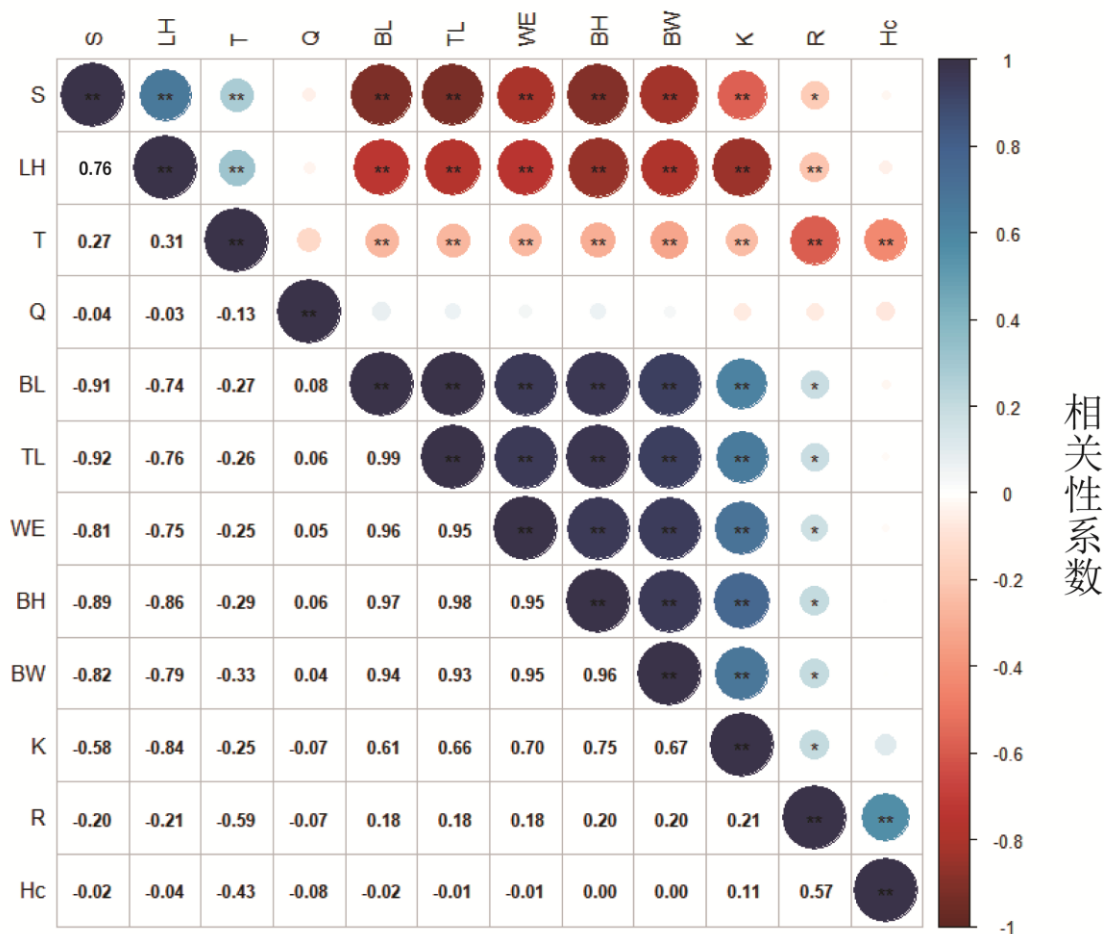


图 8 协变量矩阵相关性分析图

（图中 S 表示鱼的种类、LH 表示试验鱼体长体高比、T 表示河道水温、Q 表示河道流量、BL 表示试验鱼体长、TL 表示试验鱼全长、WE 表示试验鱼体重、BH 表示试验鱼体高、BW 表示试验鱼体宽、K 表示鱼体丰满度、R 表示昼夜节律、Hc 表示水文条件变化率）

Fig.8 Covariate matrix correlation analysis diagram

表 3 最优模型协变量参数评估¹⁾

Tab.3 Parameter evaluation of optimal model covariate

参数	估计值	HR 值（风险比）	标准误差	P 值
S	-0.931	0.394	0.515	0.041*
Q	-0.136	0.873	0.077	0.048*
R	0.527	1.694	0.117	< 0.01*
Hc	1.193	3.296	0.252	< 0.01*

1) 表中 S 为目标鱼的种类；Q 为河道流量（m³/s）；R 为昼夜情况；Hc 为水文条件变化率（m³/min²）。

通过绘制 3 种目标鱼在 Hc>0（短涨水）和 Hc<0（短退水）下上溯成功率随时间变化的生存曲线图（图 9），发现涨退情势下，齐口裂腹鱼上溯成功率均高于红尾副鳅和短体副鳅；3 种目标鱼上溯成功率均表现出短涨水情势条件高于短退水。

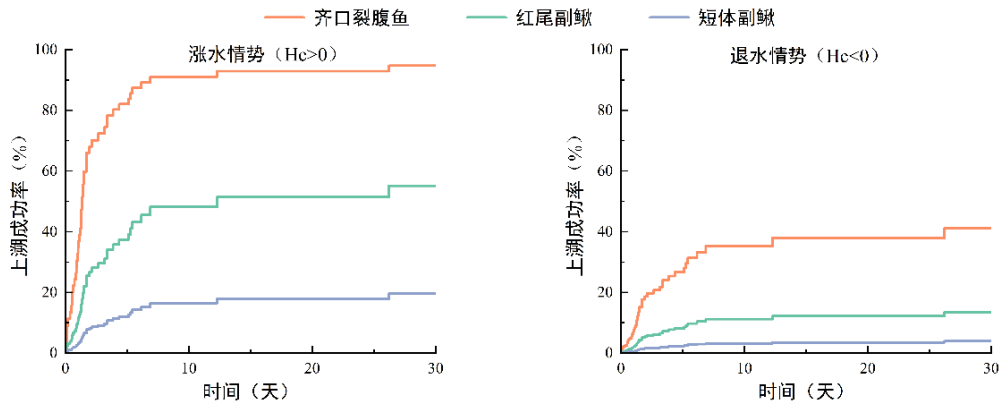


图9 涨退水情势下3种目标鱼上溯成功率随时间变化曲线

Fig.9 Change curve of success rate of three target fish with time under rising and retreating water

3 讨论

3.1 目标鱼坝下-鱼道-坝上资源分布规律

坝上-鱼道-坝下鱼类资源分布特征对明晰河段鱼类种群结构,了解鱼类生活史过程,确定过坝对象至关重要^[24]。本研究发现齐口裂腹鱼、红尾副鳅和短体副鳅在坝上-鱼道-坝下均为优势种,资源量总和占所有渔获物总量40%以上,对比2021年在松新坝下和松新鱼道内的鱼类资源监测结果,3种目标鱼的资源量占比提升了10%~20%^[3];鱼道内齐口裂腹鱼的相对重要性从常见种提升为优势种。从坝上的PIT监测数据也发现在2021年和2022年洄游期坝下释放的标记鱼在2023年坝上监测中再次出现41尾,这都表明松新鱼道对打通黑水河纵向连通性,助力鱼类资源恢复正发挥积极作用。此外,宽鳍鱲在坝上-鱼道-坝下资源量占比也较高且为优势种,麦穗鱼、云南盘鮈和前鳍高原鳅在坝上-鱼道-坝下均有分布,但数量较少,相似规律也在往年黑水河鱼类资源调查中发现^[3,25]。可见,这些种类的鱼同样有过坝需求,未来仍需关注其它鱼种资源变化情况,旨在全面提升黑水河鱼类物种多样性水平。

3.2 目标鱼过坝后上溯规律解析

过坝后鱼类上溯行为策略是鉴别坝上鱼类生境适宜性的重要佐证。在监测周期内,标志放流鱼类有26%进入鱼道内,有11%标记鱼顺利通过鱼道到达坝上,3种目标鱼表现出过坝需求。本研究发现齐口裂腹鱼、红尾副鳅和短体副鳅过坝后70%的鱼停留至A区,占比最高;28%的目标鱼继续上溯至B区,其中多数是齐口裂腹鱼表现较强的上溯行为;选择继续上溯至C区和D区的目标鱼甚少。不同区域生境特征差异可能是导致目标鱼表现出上溯策略的区别化。A区位于近坝库区,水深且缓,库尾河段深潭浅滩交错,分布有淤泥(<0.05mm)、细砂(0.05-2mm)、砾石(2-16mm)和圆石(64-256mm)等多种底质类型。齐口裂腹鱼多偏好在细砂和砾石底质上产卵^[26];红尾副鳅和短体副鳅常生活在有细砂和砾石的山区河流中^[27]。A区的生境特征对3种目标鱼适宜程度较高,目标鱼选择A区概率较大。B区为卵石河床型河道,呈现流速快、湍动能强、下切力高、多浅滩跌水等生境特征。鳅科鱼克流能力弱,底部游泳属性表明鳅需借助底部加糙部件形成的低流速才能克服高速水流^[28]。有研究表明齐口裂腹鱼爆发游泳能力是2种小型鳅科鱼的1.6倍^[29],当面对河道跌水形成的高流速及高湍动力屏障时,鳅可能难以通过。齐口裂腹鱼喜急缓流交界处,偏好主动寻找高流速带所释放的水流刺激信号^[30]。但是,坝上B区、C区和D区平均流速分别为鱼道平均流速的1.8倍、1.3倍和1.5倍,齐口裂腹鱼在鱼道内完成上溯可能已接近爆发游泳能力,再继续上溯克服更高流速、高湍动水流,可能易发生过度疲劳。过度运动耗能对身体机能及产卵行为均会产生一定负面影响。有研究发现过度运动或高强度的活动可能会对裂腹鱼的身体机能造成负担,影响其正常的生理功能^[31]。这也解释了齐口裂腹鱼仅有37.29%选择继续上溯至B区,大多数仍在A区的原因。C区是公德房引水式电站流量下泄区域,发电过程引发该区域水文情势复杂多变,这可能导致过坝后鱼类难以上溯至C区。从2021年和2022年识别的标记鱼数量少,C区对鱼类适宜性较低。D区生境特征是沙砾蜿蜒型河床,多深潭、河

道宽深比小,满足目标生命活动需求。2018 年 11 月~2019 年 9 月鱼类资源表明,公德房坝下分布有鱼类 13 种^[32]。然而,D 区未发现目标鱼与 A、B、C 区上溯累计影响相关,B 区和 C 区较大程度削弱了上溯成功率。

3.3 鱼类过坝后上溯效果的影响成因分析

鱼类上溯过程会因水文情势动态起伏发生时刻变化,如松新鱼道内短须裂腹鱼上溯成功率会随着鱼道内流量的增大而增大^[3]。本研究发现影响鱼类过坝后上溯效果的敏感因素为鱼的种类、流量、水文条件变化率和昼夜节律。温度作为鱼类索饵、产卵、发育及洄游等生命活动重要的驱动因子^[6],本文却未发现对目标鱼过坝后上溯效果有显著影响。主要原因是本研究监测期间水温变化范围为 15.8~24.3℃,变化范围较小,建议未来分析季节性温度差异对过坝后鱼类上溯行为的影响。流量普遍认为是影响鱼类上溯效果的直接因素之一。其中,鱼道内流量变化对鱼类上溯效率的影响已被广泛报道,如鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)^[33]、褐鲮(*Salmo trutta*)^[34]和七鳃鳗(*Petromyzon marinus*)^[35]均发现随着鱼道流量增大,上溯成功率降低,并证实因流量增大引发某个池室形成高于过鱼对象极限游泳速度的水流障碍,对鱼形成了上溯屏障。本研究中也得到相似结论,目标鱼过坝后上溯成功率随河道流量增大而下降。尽管鱼道与河道场景有较大区别,但河道流量增大会加快河道主流流速,高流速形成的水力挑战会加速鱼形成疲劳状态,仍然可能是导致目标鱼上溯效果不佳的主因。水文条件变化率是流量的另一种表现形式,与流量影响趋势不同的是,目标鱼偏好在水文变化率大于 0 即短涨水过程中上溯。短须裂腹鱼和长丝裂腹鱼(*Schizothorax dolichonema*)也发现相似现象。过坝后短须裂腹鱼大部分选择短涨水条件下成功上溯^[6];长丝裂腹鱼在流量 138~257.7 m³/s 上涨过程中喜好上溯觅食^[36]。这主要因为水文变化导致的短涨水过程常被认为是诱导鱼类产卵的水流刺激信号。如林俊强等人^[13]发现涨水持续时间、日流量上涨率等是刺激四大家鱼产卵的水文指标;张陵蕾等人^[37]表明涨落水变化和流量脉冲过程对齐口裂腹鱼产卵活动形成水文信号刺激。此外,涨水过程促进河流主河道与河漫滩区水系连通及营养物质交换,形成了浅滩、沙洲等新栖息地,为一些鱼类的繁殖、仔鱼或幼鱼生长提供了良好的繁育场所^[38]。河道短涨水时鱼通常喜欢上溯至浅水区寻找新的栖息环境进行产卵和摄食活动^[39];而当河道短退水时,鱼会下行迁移至库区以避免因水位快速降低导致被搁浅^[40]。

目标鱼昼夜活动节律对其上溯成败与否有重要影响。不同种类的鱼上溯昼夜节律存在显著差异,如短须裂腹鱼^[6]和澳洲鳎鲡(*Anguilla australis*)^[41]多在夜间进行上溯行为,而青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*)集中选择在白天上溯^[42]。本研究中超 60%的目标鱼选择在夜间上溯。三种目标鱼均为底栖鱼类,偏好暗环境下进行索饵、产卵和集群等行为,白天强光可能会干扰满足生命需求行为的发生过程^[43]。强光条件下,齐口裂腹鱼的觅食能力会减弱,活跃程度降低,雌鱼繁殖能力下降^[44]。针对三种鱼偏好夜间上溯的规律,建议夜间增加松新鱼道运行时长,以提升鱼道过鱼效率。

裂腹鱼和鳅科鱼过坝后上溯效果表现出明显差异,生存曲线图表明齐口裂腹鱼过坝后上溯成功率显著高于红尾副鳅和短体副鳅。身体形态迥异可能是形成不同种类的鱼上溯效果差异的主因。在鱼道中已有研究证实身体形态越偏向流线型,在鱼道中的上溯成功率就越高^[45]。齐口裂腹鱼流线型身体,喜急流生境等特征进化出能克服自身 6.85~16 倍体长的流速障碍^[46],相较之下两种鳅非流线型身体,克流能力弱于裂腹鱼^[27],齐口裂腹鱼对过坝后上溯能力显然强于两种鳅。两种鳅科鱼中短体副鳅过坝后上溯效果低于红尾副鳅,这可能与短体副鳅较粗短的身体形态有关。粗短型体态可能限制了在湍急的水流中运动的灵活性,尤其是需快速通过急流或进行高难度身体转向躲避天敌^[45],这增加了自然环境中的生存和繁殖难度。

本研究解析了 3 种目标鱼过坝后上溯行为规律,而其中一个重要发现是往年标记鱼在坝后区域重现,因监测过程是间断式,往年标记鱼在坝上采用何种运动策略不知,但这对明晰目标鱼具体洄游轨迹和完整生活史过程可提供重要线索,建议未来仍需开展全年度连续监测工作,形成长序列监测数据,旨在为金沙江流域梯级小水电鱼类过坝后生境修复提供理论指导和数据支撑。

4 附件

附表 I 见电子版(DOI: 10.18307/2025.0533)。

5 参考文献

- [1] Zhang X, Liu F, Lin PC et al. Fish habitat assessment and conservation priority study in the lower reaches of Jinsha River. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2014, 23(4): 496-503. [张雄, 刘飞, 林鹏程等. 金沙江下游鱼类栖息地评估和保护优先级研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 496-503.]
- [2] Lv YN, Xie Y, Wang SM et al. Study on alternative habitat of Heishui River based on community similarity of benthic fauna. *China Environmental Science*, 2020, 40(6): 2647-2657. [吕雅宁, 解莹, 王少明等. 基于底栖动物群落相似性的黑水河替代生境的研究. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2647-2657.]
- [3] Shi XT, Bai X, Xu JW et al. Monitoring and evaluation of the effect of fish passage in Songxin Power Station of Heishui River, a tributary of the lower reaches of Jinsha River. *Journal of Lake Science*, 2023, 35(3): 972-984. [石小涛, 白天翔, 许家炜等. 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. 湖泊科学, 2023, 35(3): 972-984.]
- [4] Tan HL, Tan JJ, Shi XT et al. Research progress of fish entrapment technology in fishway. *Chinese Journal of Ecology*, 201, 40(04): 1198-1209. [谭红林, 谭均军, 石小涛, 等. 鱼道进口诱鱼技术研究进展. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1198-1209.]
- [5] Mao X, Li J, Yi WM et al. Research on Optimization of fishway structure. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(S1): 54-59. [毛熹, 李嘉, 易文敏, 等. 鱼道结构优化研究. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(S1): 54-59.]
- [6] Jiao YL, Shi XT, Xu JW et al. Upstream behavior of *Schizothorax wangchiachii* after crossing the dam in Heishui River Songxin Hydropower Station, a tributary of Jinsha River. *Journal of Lake Science*, 2023, 35(2): 622-631. [焦易林, 石小涛, 许家炜等. 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. 湖泊科学, 2023, 35(2): 622-631.]
- [7] Popper A N, Hawkins A D, Jacobs F, et al. Use of sound to guide the movement of eels and other fishes within rivers: a critical review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2020, 30(4): 605-622.
- [8] Xu J, Sang W, Dai H, et al. A detailed analysis of the effect of different environmental factors on fish phototactic behavior: Directional fish guiding and expelling technique. *Animals*, 2022, 12(3): 240.
- [9] Luo KQ, Kang ZJ, Xia W et al. Effects of different water replenishment patterns on upstream behavior of *Schizothorax* at fishway inlet. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(4): 1182-1191. [罗凯强, 康昭君, 夏威等. 鱼道进口不同补水形式对齐口裂腹鱼上溯行为的影响. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1182-1191.]
- [10] Tan JJ, Wang DC, Wang YY, et al. Analysis on the Fish Attraction Effect at the Inlet of a Fishway under Different Water Replenishment Modes. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(2): 555-565. DOI:10.18307/2025.0233. [谭均军, 王德辰, 王渊洋等. 不同补水方式下鱼道进口诱鱼效果分析. 湖泊科学, 2025, 37(2): 555-565.]
- [11] Song Y, Xie S. Effects of substrate roughening on the swimming performance of *Schizothorax wangchiachii* (Fang, 1936) in the Heishui River: Implications for vertical slot fishway design. *Journal of Fish Biology*, 2024, 104(2): 473-483.
- [12] Carpenter-Bundhoo L, Butler G L, Bond N R, et al. Fish movements in response to environmental flow releases in intermittent rivers. *Freshwater Biology*, 2023, 68(2): 260-273.
- [13] Lin JQ, Li YK, Liu Y et al. Research progress of ecological scheduling and adaptive management to stimulate natural reproduction of fish. *Journal of Hydraulic Engineering*, 202, 53(04): 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(4): 483-495.]
- [14] Xie HP, Xu WL, Liu C et al. Problems and Countermeasures of river water disasters in mountainous areas. *Engineering Science and Technology*, 2018, 50(03): 1-14. [谢和平, 许唯临, 刘超等. 山区河流水灾害问题及应对. 工程科学与技术, 2018, 50(3): 1-14.]
- [15] 丁瑞华. 四川鱼类志. 成都: 四川科学技术出版社, 1994
- [16] 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. [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(06): 847-855.]
- [17] He Z, Gao K, Chen H, et al. Comparative Population Dynamics of *Schizothorax wangchiachii* (Cyprinidae: Schizothoracinae) in the Middle Reaches of the Yalong River and the Upper Reaches of the Jinsha River, China. *Animals*, 2023, 13(13): 2209.
- [18] Shi X, Ke S, Tu Z, et al. Swimming capability of target fish from eight hydropower stations in China relative to fishway design. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2022, 79(1): 124-132.

- [19] 董哲仁.生态水利工程学.中国水利水电出版社:2019
- [20] Zare-Shahraki M, Ebrahimi-Dorche E, Bruder A, et al. Fish species composition, distribution and community structure in relation to environmental variation in a semi-arid mountainous river basin, Iran. *Water*, 2022, 14(14): 2226.
- [21] Temtem M, Serrao M, Mendonca M I, et al. Is HNF4A gene, a risk factor or protection against coronary artery disease?. *European Heart Journal*, 2021, 42(Supplement_1): ehab724-3196.
- [22] Cox D R. Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1972, 34(2): 187-202.
- [23] Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 1974, 19(6): 716-723.
- [24] Moniruzzaman M, Bhowmick A R, Karan S et al. Spatial heterogeneity within habitat indicates the community assemblage pattern and life strategies. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107365.
- [25] Li DQ, Ke SF, Xu JW et al. Study on juvenile fish crossing the dam in Heishui River Songxin Power Station, a tributary of the lower Jinsha River . *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 985-997. [李冬晴,柯森繁,许家炜等.金沙江下游支流黑水河松新电站幼鱼下行过坝研究.湖泊科学, 2023, 35(3): 985-997.]
- [26] Ma BS, Wei KJ, Zhao TY et al. Advances in phylogeny and plateau adaptation of schizothorax fishes . *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 808-824. [马宝珊, 魏开金, 赵天一等. 裂腹鱼类系统进化及高原适应性研究进展. 湖泊科学, 2023, 35(3): 808-824.]
- [27] Li W, Pu Y, Tian HW, et al. Spatiotemporal Distribution Characteristics and Optimal Habitat Conditions of *Paracoptis variegatus* in the Heishui River . *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(4): 515-524. [李文,蒲艳,田辉伍等.黑水河红尾副鳅时空分布特征及其最适生境条件.中国水产科学, 2023, 30(4): 515-524.]
- [28] Ke SF, Jin ZJ, Li ZM et al. Study on swimming ability of 15 species of fish in 8 hydropower stations in China . *Journal of Lake Science*, 2022, 34(5): 1608-1619. [柯森繁,金志军,李志敏等.我国 8 个水电站 15 种过鱼对象游泳能力研究.湖泊科学, 2022, 34(5): 1608-1619.]
- [29] 雷青松.典型裂腹鱼和鳅类游泳能力测试研究及鱼道初步设计[学位论文].三峡大学, 2020.
- [30] Li MP, Duan B, Wang HS, et al. Evaluation on the Habitat Suitability of Fishes in a Certain River Section in the Upper Reaches of the Dadu River . *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(5): 30-36. [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.河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 30-36.]
- [31] CAI L, Katopodis Christos, Jin Y et al. Comprehensive analysis and application of swimming ability of Cyprinids in China . *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(6): 1788-1801. [蔡露, Katopodis Christos, 金瑶等.中国鲤科鱼类游泳能力综合分析和应用.湖泊科学, 2022, 34(6): 1788-1801.]
- [32] Teng H, Tian HW, Liu HW et al. Status of fish resources in Heishui River, a tributary of the lower Jinsha River . *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5): 1499-1511. [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.]
- [33] Shi XT, Wang NN, Xu JW et al. Design and effect of indoor pipe fishway for low head dam. *Journal of Fisheries of China*, 1-12. [石小涛,王楠楠,许家炜等.适用于低水头闸坝的室内管式鱼道设计与效果初探.水产学报, 1-12]
- [34] 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.
- [35] Pereira E, Cardoso G R, Quintella B R et al. Proposals for optimizing sea lamprey passage through a vertical-slot fishway. *Ecohydrology*, 2019, 12(4): e2087.
- [36] Zhang P, Li K, Liu Q 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.
- [37] Zhang LL, Wu YL, Zhang ZG et al. Research on ecological flow process based on ecological hydrological characteristics of fish habitat . *Hydropower and Energy Science*, 2015, 33(3): 10-13. [张陵雷,吴宇雷,张志广等.基于鱼类栖息地生态水文特征的生态流量过程研究.水电能源科学, 2015, 33(3): 10-13.]
- [38] Dong ZR. Characteristics of five ecological elements of water ecosystem. *Water Resources and Hydropower Technology*, 2015, 46(6): 42-47. [董哲仁.论水生态系统五大生态要素特征.水利水电技术, 2015, 46(6): 42-47.]

- [39] Liu Q, Zhang P, Cheng B 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.
- [40] Capra H, Plichard L, Bergé J et al. Fish habitat selection in a large hydropowering river: Strong individual and temporal variations revealed by telemetry. *Science of the Total Environment*, 2017, 578: 109-120.
- [41] Baker N J, Boubée J, Lokman P M 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.
- [42] Ke S, Goerig E, Pang K et al. Evaluation of pool-and-weir fishway efficiency for the upstream spawning migration of Qinghai Lake's naked carp. *Ecological Engineering*, 2024, 208: 107373.
- [43] Huang J, Lin CY, Shi XT et al. Optimization of light environment in culvert fish channel based on phototropism characteristics of *Schizothorax homostoma*. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(7): 2155-2163. [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.]
- [44] Xu JW, Chen J, Lin CY, et al. Phototactic Behavior of *Schizothorax prenanti* under Low Illumination. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(8): 2394-2402. [许家伟, 陈静, 林晨宇等. 齐口裂腹鱼在低照度下的趋光行为. *生态学杂志*, 2018, 37(8): 2394-2402.]
- [45] Goerig E, Wasserman B A, 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.
- [46] Wang YM, Li ZM, Tu ZY et al. Fishway design based on swimming ability of two *Schizothorax* species along the Yalong River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2785-2792. [王永猛, 李志敏, 涂志英等. 基于雅砻江两种裂腹鱼游泳能力的鱼道设计. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2785-2792.]

附表 I Cox 风险比例回归模型的数据文件变量

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

变量名	变量含义	赋值说明	取值范围
S	鱼的种类	分类变量	1- “齐口裂腹鱼”，2- “红尾副鳅”，3- “短体副鳅” 齐口裂腹鱼：17~35
TL	全长/cm	连续变量	红尾副鳅：9~21 短体副鳅：6~14 齐口裂腹鱼：13~29.2
BL	体长/cm	连续变量	红尾副鳅：7~18.7 短体副鳅：5~12.3 齐口裂腹鱼：2.9~6.5
BH	体高/cm	连续变量	红尾副鳅：0.9~2.5 短体副鳅：0.5~1.9 齐口裂腹鱼：4.1~5.8
LH	体长体高比	连续变量	红尾副鳅：5.8~8.2 短体副鳅：7.1~12.5 齐口裂腹鱼：1.6~4.7
BW	体宽/cm	连续变量	红尾副鳅：0.5~1.8 短体副鳅：0.7~2.2 齐口裂腹鱼：37.6~366.7
WE	体重/g	连续变量	红尾副鳅：6.1~27.8 短体副鳅：4.8~13.9 齐口裂腹鱼：0.76~2.85
K	丰满度/（100g/cm ³ ）	连续变量	红尾副鳅：0.36~1.8 短体副鳅：0.67~3.99
Q	河道流量/（m ³ /s）	连续变量	1.08 ~15.84
T	河道水温/℃	连续变量	15.8~24.3
R	昼夜节律	分类变量	0-缺失，1- “凌晨（1:00-7:00）”，2- “上午（7:00-13:00）”，3- “下午（13:00-19:00）”，4- “晚上（19:00-1:00）”
Hc	河道水文条件变化率/（m ³ /min ² ）	分类变量	0- “Hc=0（河道无涨退）”，1- “Hc<0（河道短退水）”，2- “Hc>0（河道短涨水）”
Time	成功上溯时间/天	——	——
Status	上溯状态	——	0- “停留库区”，1- “游出库区”