

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.010

拉洛鱼道过鱼效果量化评价及适宜过鱼条件研究

刘顺然¹, 王晓刚², 郭修云³, 辛沛¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029;
3. 西藏自治区拉洛水利枢纽及灌区管理局, 西藏 拉萨 851414)

摘要: 为量化评估拉洛鱼道过鱼效果, 揭示其适宜的过鱼环境条件, 实地测量了流场、水温和过鱼数量, 构建并验证了拉洛鱼道二维数学模型以获得更为详细的流场数据, 同时分析了过鱼的日间和季节节律。结果表明: 拉洛鱼道在4—5月、7月为过鱼高峰期; 流速是影响过鱼的关键因子, 维持竖缝平均流速在目标鱼类极限游速的74.8%~81.2%最有利于鱼类上溯; 水温也是显著的影响因子, 与鱼类上溯行为呈正相关关系, 具有显著阈值效应, 建议保持水温在8℃以上并适当提高; 流量对鱼类行为影响较小, 在0.4~0.8 m³/s的范围内最适宜过鱼。

关键词: 过鱼效果; 鱼道优化; 竖缝式鱼道; 水力特性; 整体模型; 拉洛鱼道

中图分类号: TV135 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2025)06-0082-08

Quantitative assessment of fish-passing efficiency and optimal conditions in the Laluo Fishway

LIU Shunran¹, WANG Xiaogang², GUO Xiuyun³, XIN Pei¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. Laluo Hydro-junction and Irrigation District Administration, Lhasa 851414, China)

Abstract: To quantitatively assess the fish-passing efficiency in the Laluo Fishway and identify its optimal environmental conditions, on-site observations of the flow field, water temperature, and number of passing fishes were conducted in the Laluo Fishway. A two-dimensional mathematical model of the Laluo Fishway was constructed and verified to obtain more detailed flow field data, and the diurnal and seasonal rhythms of fish-passing were analyzed. The results indicate that the Laluo Fishway experienced a fish-passing peak in April, May and July. Flow velocity is the key factor influencing fish-passing efficiency. The average flow velocity at the vertical slot between 74.8% and 81.2% of the target species swimming speed is the most favorable condition for their upstream migration. Water temperature is also identified as a significant factor, positively correlated with the upstream migration behavior of fishes. Furthermore, a significant threshold effect is observed with a recommendation to maintain water temperatures above 8℃. Additionally, Flow has a relatively small impact on fish behavior. A flow rate in the range of 0.4-0.8 m³/s is determined to be most favorable for fish-passing.

Key words: fish-passing efficiency; fishway optimization; vertical-slot fishway; hydraulic characteristic; integrated model; the Laluo Fishway

由于坝、堰等挡水建筑物截断了河道, 阻碍了鱼类的自然洄游通道^[1], 导致河流生态环境的破碎化。这种变化限制了鱼类的生存空间, 对原生鱼类栖息地造成了干扰和破坏^[2]。为解决这一问题, 鱼道作为一种关键的过鱼设施, 因其结构简单、形式多样、对地形和水位适应性强等特点, 得到了广泛推广和应用^[3]。其中, 竖缝式鱼道因能适应较大的水位变幅, 近年来被广泛采用, 如枕头坝水电站鱼道^[4]、藏木水电站鱼道^[5]、多布水电站鱼道^[6]等工程都采用了竖缝式鱼道。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3204200)

作者简介: 刘顺然(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: lsr123123a@163.com

通信作者: 王晓刚(1980—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xfwang@nhri.cn

引用本文: 刘顺然, 王晓刚, 郭修云, 等. 拉洛鱼道过鱼效果量化评价及适宜过鱼条件研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 82-89.

LIU Shunran, WANG Xiaogang, GUO Xiuyun, et al. Quantitative assessment of fish-passing efficiency and optimal conditions in the Laluo Fishway[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 82-89.

过鱼效果的评估是涉及水力学和鱼类学的交叉研究领域。然而,已有的鱼道研究主要集中在鱼道的水动力特性上^[7];李洋等^[8]通过数值模拟研究了鱼道底坡坡度和池室长宽比对竖缝式鱼道水力特性的影响;李恒等^[9]通过数值模拟发现梯形断面鱼道内水流具有明显的三维特性,增大梯形断面鱼道竖缝过水断面面积比会减弱鱼道内水流的三维特性。目前,过鱼效果的原型观测成果仍然较少,在一定程度上妨碍了对鱼道的全面认识。在鱼道过鱼效果评价方面,通常采用视频监控法或标记试验法统计过鱼数量;蔡跃平等^[10]采用陷阱法、张网法和水声学等方法对安谷竖缝式鱼道过鱼效果进行了监测,在 7—9 月将流量控制在一定范围内,维持竖缝流速在 0.50~0.58 m/s,有利于鱼类通过鱼道;陈国柱等^[4]使用视频监控设备记录了枕头坝水电站鱼道在 2017 年 4—7 月的鱼类种类、数量和体长,分析了鱼类活动的时间节律以及下游水位对过鱼效果的影响。

为进一步提升鱼道设计和运行的有效性,学者们开始关注鱼类行为特征与鱼道水力学特性之间的关系;Bravo-Córdoba 等^[11]通过现场试验收集了 20 个阶梯式鱼道的评估数据,并运用逻辑回归和生存分析技术建立了模型,发现鱼道类型、水池间高度落差、坡度、障碍物高度、水池深度等因素均显著影响鱼道的过鱼效率;Sun 等^[12]对安谷水电站库区附近建造的垂直槽型鱼道和自然型鱼道进行了水力学和水生态学调查,发现 2 种鱼道均能有效运行,并维持理想的水动力条件。在鱼道设计中,结合鱼类的游动行为和适宜的水力特性可以提高鱼道的通行效率。Mu 等^[13]以草鱼幼鱼为研究对象,采用增量水速法研究了鱼类游动特征指标(如临界游速和爆发游速)以及游动行为对鱼道通行效果的影响;Schütz 等^[14]指出鱼道设计中一个重要问题是平衡鱼道入口的吸引力和通行性,入口槽内高流速能有效吸引上游迁移的鱼类,但可能阻止小型鱼类或幼鱼进入鱼道;Bunt 等^[15]采用标记-再捕获和无线电遥测技术评估了鱼道的吸引力和鱼类通过效率,发现鱼道通过效率的差异与爆发游速、临界游速以及鱼道内休息池的速度有关。

此外,温度是影响鱼类生存的重要环境因子,直接影响其生理代谢和游泳性能。郭子琪等^[16]在竖缝式鱼道水工模型中进行了齐口裂腹鱼幼鱼的过鱼试验,发现水温对齐口裂腹鱼上溯行为有显著影响;王晓等^[17]测试了四大家鱼在不同温度下的临界游速,发现在 10~20℃ 范围内,随着水温升高,鱼的临界游速增加,20℃ 时达到最大值,这表明鱼类适宜的上溯水动力特性随温度变化;Kemp 等^[18]通过试验水槽研究温度和流量对洄游成年河七鳃鳗夜间通过小型堰坝行为的影响,发现鱼类上溯运动与温度正相关;Caudill 等^[19]指出水电大坝上游水库的热分层会在鱼道中形成温度梯度,成为许多溯河鱼类迁徙的障碍,不利的温度梯度在鱼道中较为常见,尤其在有季节性热分层的设施中;郑铁刚等^[20]指出高坝过鱼设施的温差效应可能对洄游鱼类的聚集和上溯产生直接影响,并通过建立三维水温水动力模型和物理模型,对过鱼行为进行了预测和实测研究。

为进一步了解鱼类通过拉洛鱼道的行为特征,本文采用 PIT 遥测结合水下视频智能识别系统,统计不同时间段的鱼道过鱼数量,同时使用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)、自计式水位计等设备测量水温、水位、流速等数据,分析不同水温和水动力条件对鱼道过鱼效果的影响,并通过综合分析,揭示过鱼数量的时空分布特征及适宜的过鱼环境条件,以期对拉洛鱼道的运行管理提供科学依据,也为其他鱼道的设计和运行提供参考。

1 研究区概况

西藏拉洛水利枢纽及配套灌区工程位于西藏自治区日喀则市西部、雅鲁藏布江以南地区。拉洛鱼道布置在电站厂房尾水渠的左侧边坡上,设有 1 个进鱼口以及 6 个出鱼口,鱼道全长约为 2 194 m。主要结构包括进鱼口、过鱼池、休息池和出鱼口等(图 1)。

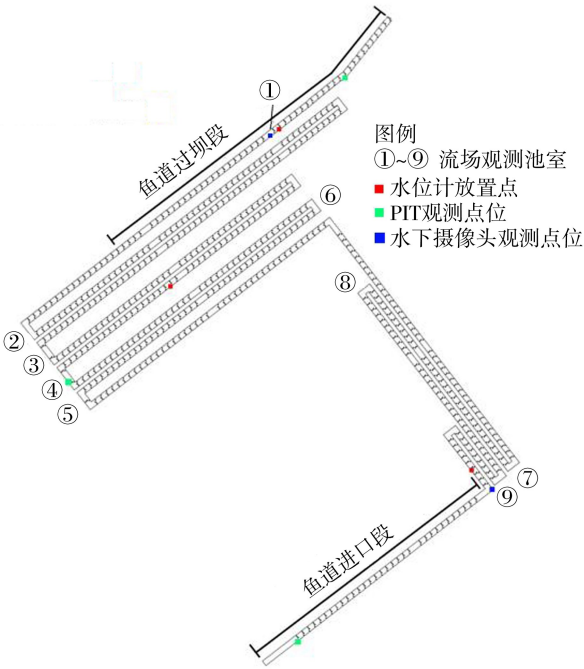


图 1 拉洛鱼道结构

Fig. 1 Structure of the Laluo Fishway

鱼道采用单侧导竖式隔板,底坡为 1 : 50,池室长 2.5 m、宽 2 m,设计总水位差为 39.87 m。鱼道的池室结构如图 2 所示。拉洛水利枢纽过鱼设施的过鱼季节为 3—8 月,主要过鱼对象为拉萨裸裂尻鱼、双须叶须鱼、异齿裂腹鱼、拉萨裂腹鱼,兼顾过鱼对象为黑斑原鲢、巨须裂腹和尖裸鲤,设计流速为 1.0 m/s^[10]。

2 研究方法

2.1 水位与水温测量

在鱼道上、中、下游的典型直线段内分别布置了一个自计式水位计(型号:HOBO U20L),布置位置如图 1 所示。水位计的记录间隔为 0.5 h,数据包括水深和水温,监测时间为 2023 年 6 月 30 日至 9 月 2 日。

2.2 流场与流量测量

为了进一步研究流场特性,使用 StreamPro 型走航式河流 ADCP 测量鱼道内的流场与流量。ADCP 为适用于浅水河流的智能全自动流量测验系统,可测量池室内部不同断面的流量与流场。于 2021 年 7 月 20 日、2023 年 7 月 2 日、2023 年 9 月 1 日分别对不同工况下拉洛鱼道的进口段、顺直段、90°弯道段、180°回转段、休息池段、180°宽回转段及出鱼口段开展流场观测。

2.3 鱼类视频监测系统

在鱼道进口段和过坝段分别安装了 2 套摄像头水下视频监测系统(图 1),这 2 套水下摄像头分别安装于鱼道进口段第一个转弯处和鱼道过坝段的最后一个转弯处,24 h 连续观测各鱼道进口段和过坝段的过鱼情况,详细记录过鱼的时间、数量、规格和通行方向。

2.4 PIT 标记试验

PIT 标记试验主要是应用射频识别实现对标记鱼类的跟踪识别。该技术通过射频标签与天线线圈之间的磁场交互,交换能量和信息。鱼道内分别安装 3 台 PIT 主机和线圈,位置位于鱼道进口段、鱼道中段和过坝段(图 1),在大坝下游 100 m 处放流 PIT 标记鱼类,利用鱼道进口安装的 PIT 设备记录鱼类通过的详细信息。2023 年 8 月 14 日 15:00—15:30 于拉洛鱼道进口处放流 PIT 标记鱼类 57 尾,其中拉萨裸裂尻鱼 27 尾,拉萨裂腹鱼 21 尾,异齿裂腹鱼 9 尾。

2.5 鱼道水动力模型构建

2.5.1 控制方程

坡度小于 5% 的竖缝式鱼道的水流结构具有明显的二维特性^[21],因此本文基于二维数值模拟软件建立二维鱼道水动力模型,其中水动力控制方程由连续性方程和垂向积分的 x 、 y 方向动量方程组成:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

(1)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega_q - f v_w v_{wx} + \frac{h}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} = 0$$

(2)

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) \right] - \Omega_p - f v_w v_{wy} + \frac{h}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} = 0$$

(3)

式中: ζ 为水位; p 、 q 分别为 x 、 y 方向的单宽流量,其中 $p = \bar{u}h$ 、 $q = \bar{v}h$; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分别为 x 、 y 方向上沿水深的平均流速; h 为水深; t 为时间; g 为重力加速度; C 为谢才系数; ρ 为水的密度; f 为风摩擦系数; v_w 、 v_{wx} 、 v_{wy} 为风速及其在 x 、 y 方向上的分量; Ω_q 、 Ω_p 为科氏力; P_a 为大气压强; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} 为有效剪切力分量。

根据水动力控制方程,利用有限体积法求解即可得到每一时刻在 (x, y) 处的水位、水深以及流速 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 。

2.5.2 鱼道水动力模型验证

由图 3(a)可知,水流在隔板前水位稍有壅高,并在竖缝处形成明显跌落;由图 3(b)(c)可知,鱼道内水流流态基本呈“S”形,水流进入第一级池室后,主流偏向右侧,池室内侧墙边、隔板后形成较为明显的弱回流(大部分回流流速小于 0.3 m/s)。最大流速基本略超鱼道设计流速(1.0 m/s),鱼道总体水力特性良好。

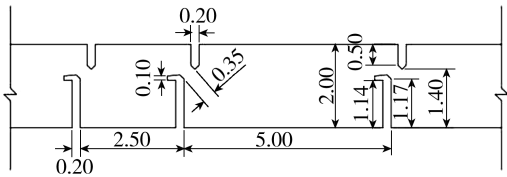


图 2 拉洛鱼道池室构造(单位:m)
Fig. 2 Structure of the Laluo Fishway pool (unit: m)

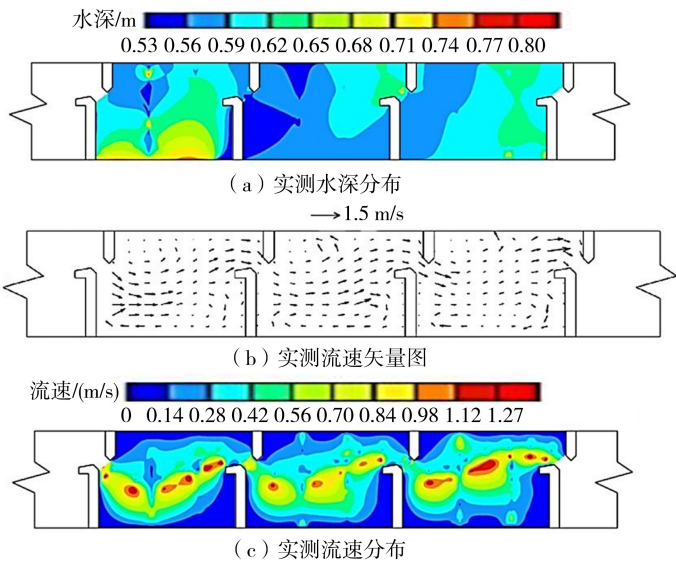


图 3 拉洛鱼道典型池室流场原型观测结果

Fig. 3 Observation results of typical pool flow field of the Laluo Fishway

由图 4 可知,数值模拟与实测结果吻合度高,水流特性一致。提取模拟结果中每个池室内 2 个断面的水深、竖缝处的流速分别和实测流场数据中相同断面的水深、竖缝处流速进行对比,误差率基本小于 10%。误差率与池室内流态表明,所选用的模型参数合理,数值模拟能够较为准确地反映实际的水流结构。

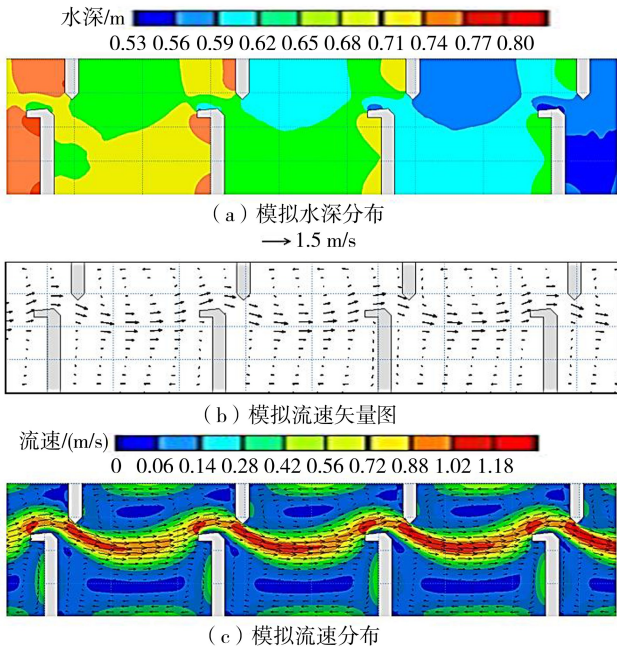


图 4 拉洛鱼道典型池室流场数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of typical pool flow field of the Laluo Fishway

3 结果与分析

3.1 拉洛鱼道过鱼数量统计及节律分析

3.1.1 鱼类数量统计

由图 5 可知,4—7 月上溯鱼类数量维持在每月 95~160 尾之间,下行鱼类数量在 160~220 尾之间,总体来看,下行鱼类数量高于上溯鱼类。具体分析过坝段的鱼类数据,4 月 10 日至 7 月 12 日,过坝段记录的鱼类总数为 587 尾,其中下行鱼类数量为 349 尾,显著高于上溯鱼类的 238 尾。相比之下,进口段的记录数量较少,仅为 284 尾,上溯和下行鱼类数量基本持平(上溯 141 尾,下行 143 尾)。进口段的鱼类数量总体低于

过坝段,可能是由于 7—8 月为鱼类的主要繁殖期,此后鱼道内以幼鱼下行为主。此外,拉洛鱼道作为全球海拔最高的鱼道,鱼类主要进行短距洄游。进入进口段的鱼类在过坝段形成聚集,并未迅速进入库区,这一现象与 PIT 遥测结果一致,PIT 遥测数据显示鱼类从进口段到达过坝段所需时间最快为 12.55 d,最慢为 72.81 d。

3.1.2 过鱼种类与规格

对 2023 年 4 月 10 日至 7 月 12 日的过鱼数据进行分析。在鱼道进口段和过坝段分别观测到 5 种鱼类:异齿裂腹鱼、拉萨裂腹鱼、拉萨裸裂尻鱼、西藏高原鳅、斯氏高原鳅。具体数量和体长数据如下:拉萨裂腹鱼的体长范围 20~27 cm,平均体长 22.4 cm,共 4 尾;异齿裂腹鱼的体长范围 19~33 cm,平均体长 25.6 cm,共 5 尾;拉萨裸裂尻鱼的体长范围 9~19 cm,平均体长 12.4 cm,共 85 尾;西藏高原鳅的体长范围 6~15 cm,平均体长 9 cm,共 32 尾。总体来看,拉萨裸裂尻鱼是鱼道内最主要的过鱼种类。

3.1.3 过鱼节律分析

在监测时段内,鱼道中的鱼类数量呈现出 4 个明显的过鱼高峰,分别出现在 4 月 23 日、5 月 28 日、7 月 5 日、7 月 7 日,过鱼数量分别为 88、140、86、103 尾/d。其中,4 月 23 日上溯鱼类数量为 17 尾,下行的数量为 71 尾,净上溯数量为-54 尾;5 月 28 日,鱼类上溯数量为 78 尾,下行数量为 62 尾,净上溯数量为 16 尾;7 月 5 日上溯的数量为 46 尾,下行数量为 40 尾,净上溯数量为 6 尾;7 月 7 日,鱼类上溯 54 尾,下行 49 尾,净上溯数量为 6 尾。分析发现,在过鱼高峰期内,鱼类的活动以上溯较大规格个体为主,表现出较高的过鱼效率,显示出鱼道在这些时段的过鱼效果较为理想,能够有效支持鱼类的上溯迁徙。

从月份节律的角度看,4 月拉洛鱼道的平均每日过鱼数量为 26.11 尾,这一数据表明,随着主要目标鱼类进入繁殖期,鱼类活动开始进入高峰阶段。5 月的平均每日过鱼数量略有下降,降至 18.15 尾,而 6 月的过鱼数量继续出现轻微下降,平均每日过鱼数量为 10.27 尾。到了 7 月,过鱼数量显著增加,达到了 29.36 尾/d,表现出较为明显的增长趋势。这一变化趋势表明,随着 7 月和 8 月鱼类繁殖季节的结束,大量幼鱼开始向下游洄游,进而导致 7 月的过鱼数量出现显著增加(图 6(a));同时反映了两种主要迁移行为的交替作用:一方面是繁殖季节成熟个体的集体上溯,形成了 4 月、5 月的过鱼高峰;另一方面则是幼鱼向下游洄游与成年鱼类的二次迁移相结合,形成了 7 月的高峰期。这一变化模式与鱼类的繁殖生态需求高度耦合,表明鱼道在支持鱼类全生命周期迁移行为中发挥了重要作用,并有效促进了鱼类的迁徙过程。

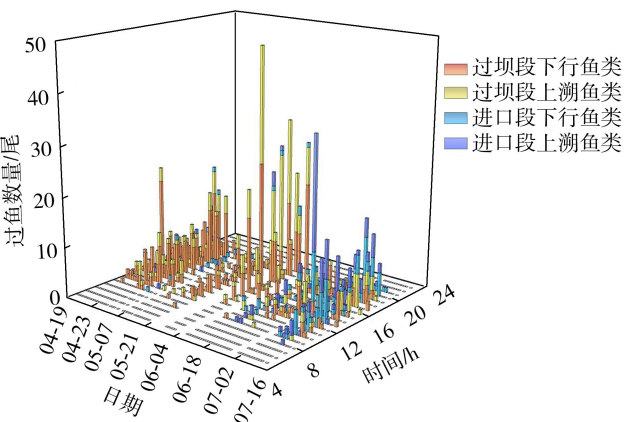


图 5 过鱼数量分布
Fig. 5 Distribution of number of passing fishes

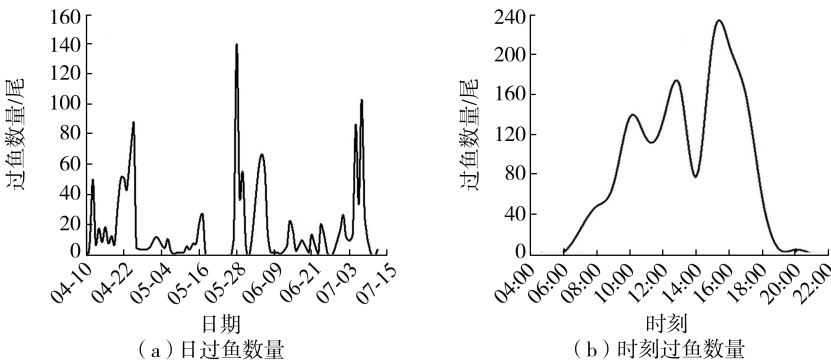


图 6 过鱼节律分析
Fig. 6 Analysis of fish-passing rhythm

从时间节律的角度看,本文仅对视频监测系统在日间 7:00—20:00 所记录的过鱼数据进行了分析,因此仅探讨拉洛鱼道的日间过鱼节律。由图 6(b)可知,主要的过鱼时段集中在 16:00—18:00,平均每小时过鱼数量为 131.6 尾,这与当地的太阳辐射及气温条件相符,表明水温对鱼类的上溯行为具有重要影响。

3.2 鱼道适宜过鱼环境条件分析

3.2.1 鱼道流量

通过分析鱼道内过鱼数量与相应时刻的流量数据,可以更深入地理解二者之间的相互关系。由图 7 可知,流量大于 $0.8\text{ m}^3/\text{s}$ 时,平均过鱼数量为 $1.5\text{ 尾}/\text{d}$ 。由于流量过大,鱼类难以上溯,需要及时切换出口口调整鱼道内的流量。当流量小于 $0.4\text{ m}^3/\text{s}$ 时,平均过鱼数量为 $2.71\text{ 尾}/\text{d}$ 。在这种情况下,由于流速减小,鱼类在鱼道中的上溯方向变得模糊,影响上溯效率,从而表现为上溯鱼类数量显著减少。此外,进口处流速变小,鱼类难以明显感知到进口的位置。当流量为 $0.4\sim 0.8\text{ m}^3/\text{s}$ 时,平均过鱼数量为 $4.02\text{ 尾}/\text{d}$,鱼道过鱼效果达到最大。因此,为了优化鱼道的过鱼效果,建议将鱼道流量范围控制在 $0.4\sim 0.8\text{ m}^3/\text{s}$,这样既可以避免流速过大使鱼类难以上溯的问题,又可以防止出现流速过小导致上溯方向模糊,从而最大化鱼道的过鱼数量。这一结论与蔡跃平等^[10]的研究结论吻合,即控制流量在适宜范围内能够显著提高鱼道的过鱼效果。

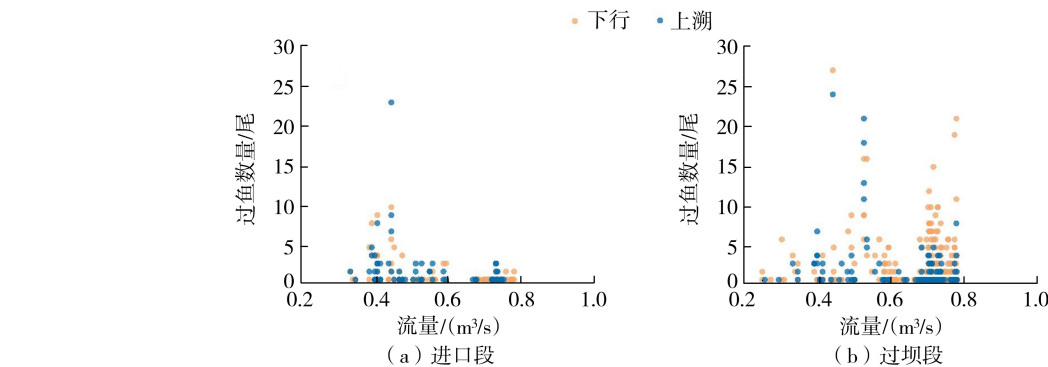


图 7 过鱼数量与鱼道流量的关系

Fig. 7 Relationship between number of passing fishes and fishway's flow rate

3.2.2 鱼道水温

由图 8 可知,水温在 $8\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,鱼类的过鱼数量较多,平均过鱼数量为 $4.02\text{ 尾}/\text{d}$ 。在这个温度区间内,对鱼类的生长和洄游行为有促进作用。在该水温下鱼类相对更加活跃,活动能力更强。因此,控制鱼道内水温在这一适宜范围内,可以有效提升鱼道的过鱼效率。水温对鱼类活动存在显著的阈值效应,当水温低于 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,鱼类过鱼数量明显减少,这是由于水温降低导致鱼类代谢能力显著降低,活动积极性下降,鱼类迁移行为减少。这一结论与夏朝辉等^[6]的研究结果一致,即鱼类的上溯活动与水温呈正相关关系。

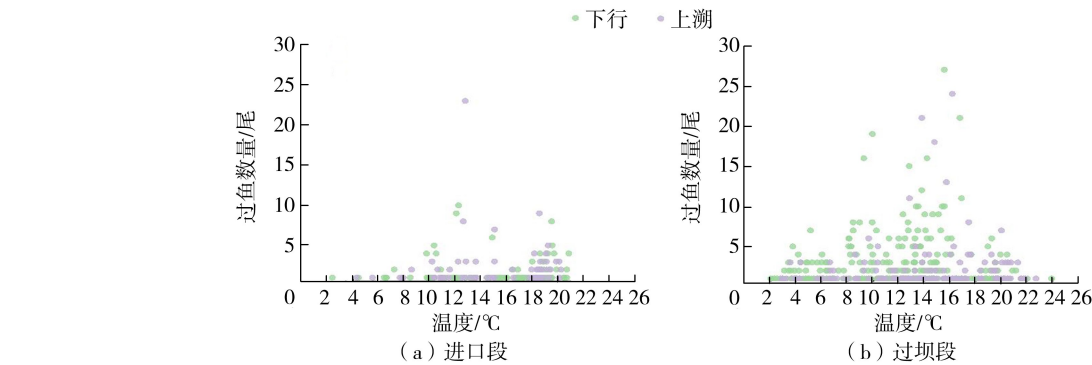


图 8 过鱼数量与鱼道水温的关系

Fig. 8 Relationship between number of passing fishes and fishway's water temperature

3.2.3 竖缝流速

在鱼道实际运行过程中,由于电站调峰的影响,上下游水位持续波动,导致鱼道内水面线呈现动态变化,池室竖缝的流速亦表现出非恒定特性^[22]。本文基于现场 ADCP 的监测数据和二维数学模型的计算结果,结合鱼类洄游节律,系统分析了适宜鱼类上溯的鱼道内流速特征。通过鱼道内放置的水位计实测水位发现,鱼道内大部分时间的流量变化相对平缓(每小时变化量小于 $0.01\text{ m}^3/\text{s}$),因此可将其简化为恒定流状态进行模拟。然而,针对少数流量变化较显著的工况,需采用非恒定流模型进行模拟分析,以准确反映鱼道内复杂的水动力学条件。

由图 9 可知:①流速低于 0.85 m/s 时,平均过鱼数量为 3.40 尾/d,鱼类数量普遍较少。流速过低,不足以刺激鱼类上溯,无法激发鱼类的上溯行为。②流速高于 0.95 m/s 时,平均过鱼数量为 2.35 尾/d,过高的流速可能导致鱼类体力消耗过大,难以持续上溯使其无法顺利通过鱼道。③流速为 0.85 ~ 0.95 m/s 时,平均过鱼数量为 21.67 尾/d,此时的过鱼数量比①②区间均值高出 73.46%。尤其在 0.9 m/s 附近达到高峰,此流速提供了最佳的上溯条件,使得鱼类能够顺利上溯。这一结论与 Mu 等^[13]认为竖缝内的水流速度不应超过鱼类暴发游速的 76%~79%。相关研究^[23]显示,拉洛鱼道主要过鱼物种的暴发游速范围为 1.17~1.27 m/s,本文的最适宜鱼类上溯流速为主要过鱼物种爆发游泳速度的 74.8%~81.2%,基本符合这一速度范围。

3.3 鱼道过鱼效果的关键影响因素与适宜过鱼条件

为分析鱼道过鱼效果的关键影响因素,开展了冗余分析。由表 1 可知:流速是过鱼数量变化的最重要因子,分别有 74.1%与 65.6%的贡献度,具有显著的统计意义,在进口段流速对鱼类上溯行为有较大负相关影响,过大的流速会使鱼类上溯困难,与第 3.2.3 节分析结果吻合;水温也具有较大的影响,分别有 21.8%与 28.9%的贡献度,水温对过坝段与进口段的鱼类上溯行为均有正相关影响,较高的水温会促进鱼类上溯,与第 3.2.2 节分析结果吻合;流量对鱼类的行为影响较小,流量对进口段和过坝段的鱼类行为有不同影响。在进口段,流量与下行鱼类行为有正相关关系,在过坝段,流量与鱼类行为的关系不显著。

表 1 环境变量对过鱼数量的影响

Table 1 Influence of environmental variables on number of passing fishes

环境变量	解释度%		贡献度%		伪 F 值		P	
	过坝段	进口段	过坝段	进口段	过坝段	进口段	过坝段	进口段
流速	6.2	9.2	74.1	65.6	4.4	6.4	0.032	0.012
温度	2.8	4.0	21.8	28.9	1.3	2.6	0.29	0.078
流量	0.2	0.8	4.1	5.5	0.2	0.5	0.734	0.582

4 结 论

- a. 拉洛鱼道过鱼活动呈现 2 个高峰,分别为 4—5 月上溯产卵高峰期和 7 月洄游迁移高峰期,4—5 月高峰主要由繁殖季节鱼类集体上溯产卵所致,而 7 月高峰与幼鱼洄游和成鱼二次迁移相关。此模式与鱼类繁殖需求耦合,印证了鱼道对鱼类全生命周期迁移行为的支撑作用。日间节律角度看,每日 16:00—18:00 上溯鱼类较多。
- b. 冗余分析显示,流速是影响拉洛鱼道鱼类上溯最关键的因子,最佳竖缝处平均流速范围为 0.85 ~ 0.95 m/s,揭示了促进鱼类上溯行为的最佳竖缝平均流速范围为目标鱼类极限游泳速度的 74.8%~81.2%;水温对鱼类上溯行为也有较大影响且正相关,拉洛鱼道最佳水温运行区间为 8~20 ℃,同时,水温对鱼类活动存在显著的阈值效应:当水温低于 8℃时,鱼类代谢能力显著降低,活动积极性下降,导致迁移行为减少。因此建议将流量控制在 0.4~0.8 m³/s,维持竖缝平均流速在目标鱼类极限游泳速度的 74.8%~81.2%,将水温保持在 8℃以上并适当提高水温,有利于目标鱼类通过鱼道。

参考文献:

[1] 杨红玉,李雪凤,刘晶晶. 国内外鱼道及其结构发展状况综述[J]. 红水河,2021,40(1):5-8. (YANG Hongyu,LI Xuefeng,LIU Jingjing. Overview of fishway and its structure development at home and abroad[J]. Hongshui River,2021,40(1):5-8. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 曹娜,钟治国,曹晓红,等. 我国鱼道建设现状及典型案例分析[J]. 水资源保护,2016,32(6):156-162. (CAO Na,ZHONG

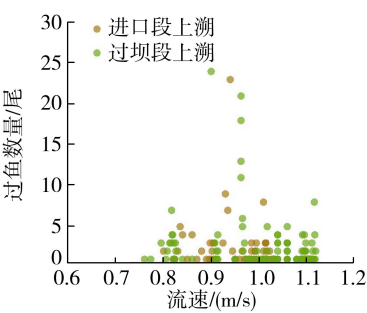


图 9 过鱼数量与竖缝流速的关系

Fig.9 Relationship between number of passing fishes and flow velocity at vertical slot

- Zhiguo, CAO Xiaohong, et al. Status of fishway construction in China and typical case analysis[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 156-162. (in Chinese))
- [4] 陈国柱,王猛,王海胜,等. 枕头坝一级水电站竖缝式鱼道过鱼效果初探[J]. 水力发电, 2018, 44(7): 4-8. (CHEN Guozhu, WANG Meng, WANG Haisheng, et al. Preliminary study on fish passing effect of the vertical-slot fishway in Zhentouba I hydropower station[J]. Water Power, 2018, 44(7): 4-8. (in Chinese))
- [5] 邓希,吕琳莉,胡建生,等. 西藏部分水利设施的鱼道设计及鱼道监测技术分析[J]. 西藏科技, 2023, 45(7): 43-47. (DENG Xi, LYU Linli, HU Jiansheng, et al. Analysis of fishway design and fishway monitoring technology of some water conservancy facilities in Xizang[J]. Xizang Science and Technology, 2023, 45(7): 43-47. (in Chinese))
- [6] 夏朝辉,张彤,牛乐,等. 多布水电站鱼道运行效果评价[J]. 西北水电, 2022(5): 66-71. (XIA Zhaohui, ZHANG Tong, NIU Le, et al. Evaluation of fishway operation of Duobo hydropower station[J]. Northwest Hydropower, 2022(5): 66-71. (in Chinese))
- [7] 吕春玮,韩雷,王正君,等. 鱼道水力特性研究现状综述[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(4): 46-50. (LYU Chunwei, HAN Lei, WANG Zhengjun, et al. Review of research status of fishway hydraulic characteristics[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2022, 5(4): 46-50. (in Chinese))
- [8] 李洋,韩雷,李树航,等. 异侧竖缝式鱼道在某工程的数值模拟与分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(6): 23-30. (LI Yang, HAN Lei, LI Shuhang, et al. Numerical simulation and analysis of different side vertical seam fishway in a project[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(6): 23-30. (in Chinese))
- [9] 李恒,王晓刚,郑飞东. 梯形断面鱼道内水流的三维特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 61-65. (LI Heng, WANG Xiaogang, ZHENG Feidong. Three-dimensional characteristics analysis of flow in trapezoidal fishway[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 61-65. (in Chinese))
- [10] 蔡跃平,姜昊,黄晋,等. 大渡河安谷竖缝式鱼道过鱼效果监测与评估研究[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(5): 115-123. (CAI Yueping, JIANG Hao, HUANG Jin, et al. Monitoring and assessment of Angu vertical slot fishway performance in the Dadu river[J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(5): 115-123. (in Chinese))
- [11] BRAVO-CÓRDOBA F J, VALBUENA-CASTRO J, GARCÍA-VEGA A, et al. Fish passage assessment in stepped fishways: passage success and transit time as standardized metrics[J]. Ecological Engineering, 2021, 162: 106172.
- [12] SUN Junjian, SHI Jiayue, ZHANG Qi, et al. Survey on performance of vertical slot and nature-like fishways at Angu hydropower station, Southwest China[J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(1): 83-91.
- [13] MU Xiangpeng, CAO Ping, GONG Li, et al. A classification method for fish swimming behaviors under incremental water velocity for fishway hydraulic design[J]. Water, 2019, 11(10): 2131.
- [14] SCHÜTZ C, CZERNY R, HERBST M, et al. Passage through a fishway entrance at different velocities-results from flume experiments with small non-salmonids[J]. River Research and Applications, 2024, 40(7): 1205-1218.
- [15] BUNT C M, KATOPODIS C, MCKINLEY R S. Attraction and passage efficiency of white suckers and smallmouth bass by two Denil fishways[J]. North American Journal of Fisheries Management, 1999, 19(3): 793-803.
- [16] 郭子琪,李广宁,郗志红,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[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 255-261. (GUO Ziqi, LI Guangning, QIE Zhihong, et al. Study on effect of water temperature on migration of schizothorax prenanthi in vertical slot fishway[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(2): 255-261. (in Chinese))
- [17] 王晓,廖冬芽,俞立雄,等. 温度梯度对四大家鱼临界游泳速度的影响[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(2): 53-61. (WANG Xiao, LIAO Dongya, YU Lixiong, et al. Effect of temperature gradient on the critical swimming speed of four major Chinese carps[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(2): 53-61. (in Chinese))
- [18] KEMP P S, RUSSON I J, VOWLES A S, et al. The influence of discharge and temperature on the ability of upstream migrant adult river lamprey (*Lampetra fluviatilis*) to pass experimental overshot and undershot weirs[J]. River Research and Applications, 2011, 27(4): 488-498.
- [19] CAUDILL C C, KEEFER M L, CLABOUGH T S, et al. Indirect effects of impoundment on migrating fish: temperature gradients in fish ladders slow dam passage by adult Chinook salmon and steelhead[J]. PLoS One, 2013, 8(12): e85586.
- [20] 郑铁刚,孙双科,柳海涛,等. 过鱼设施进口区域水温对集诱鱼效果的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 195-202. (ZHENG Tiegang, SUN Shuangke, LIU Haitao, et al. Effects of water temperature on luring fish in the inlet zone of fish passage facilities[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(1): 195-202. (in Chinese))

based on electromagnetic thermal multi field coupling[J]. Acta Metrologica Sinica,2022,43(7):877-884. (in Chinese))

[14] 刘俊博,杨宁,宋余来,等. 回填土高热阻系数下电缆集群敷设载流量的解析计算[J]. 东北电力大学学报,2019,39(3):23-28. (LIU Junbo, YANG Ning, SONG Yulai, et al. Analytical calculation of carrying capacity of cable cluster laying under high thermal resistance coefficient of backfill soil[J]. Journal of Northeast Electric Power University,2019,39(3):23-28. (in Chinese))

[15] 刘士利,罗英楠,刘宗烨,等. 饱和和多孔介质对流特性对高压交流海底电缆载流性能的影响[J]. 电工技术学报,2023,38(4):1023-1031. (LIU Shili, LUO Yingnan, LIU Zongye, et al. The influence of convective characteristics of saturated porous media on ampacity performance of submarine cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(4):1023-1031. (in Chinese))

[16] 刘文博,谢茂杰,周游,等. 土壤微观结构参数对埋地电缆温度与载流量的影响分析[J]. 高电压技术,2024,50(2):749-757. (LIU Wenbo, XIE Maojie, ZHOU You, et al. Effects of microstructural parameters of soil on temperature and ampacity of the buried cables[J]. High Voltage Engineering,2024,50(2):749-757. (in Chinese))

[17] 鲍玲玲,靳鹏飞,王雪,等. 非饱和和多孔介质有效导热系数模型[J]. 科学技术与工程,2022,22(19):8327-8332. (BAO Lingling, JIN Pengfei, WANG Xue, et al. Model of effective thermal conductivity of unsaturated porous materials based on fractal theory[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(19):8327-8332. (in Chinese))

[18] 于建立,隋琳琳,田际平,等. 预埋管电缆载流量的有限容积法计算和分析[J]. 东北电力大学学报,2013,33(3):43-46. (YU Jianli, SUI Linlin, TIAN Jiping, et al. Calculation and analysis of cable ampacity lay in pipe based on FVM[J]. Journal of Northeast Electric Power University,2013,33(3):43-46. (in Chinese))

[19] 李红发,程绍兵,王金城,等. 回填低热阻材料对排管敷设电缆载流量的提升研究[J]. 绝缘材料,2022,55(3):84-92. (LI Hongfa, CHENG Shaobing, WANG Jincheng, et al. Study on improving ampacity of cables laid in pipes by backfilling low thermal resistance materials[J]. Insulating Materials,2022,55(3):84-92. (in Chinese))

[20] 曲名新,邓少平,翟学,等. 基于电-热-流多场耦合仿真的海底电缆载流量分析[J]. 电力勘测设计,2022(7):17-24. (QU Mingxin, DENG Shaoping, ZHAI Xue, et al. Ampacity analysis of submarine cable based on electric- thermal-flow multiphysics coupling simulation[J]. Electric Power Survey & Design,2022(7):17-24. (in Chinese))

[21] 陈振新,徐蓓蓓,乐彦杰,等. XLPE 交流电缆线路改为直流运行的载流量设计与分析[J]. 高压电器,2020,56(4):165-171. (CHEN Zhenxin, XU Beibei, LE Yanjie, et al. Design and analysis of current ratings of XLPE cable AC lines transformed into DC operation[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(4):165-171. (in Chinese))

[22] 邱超. 双回路单芯电力电缆不同敷设与排列方式下温度场与载流量计算[D]. 广州:华南理工大学,2013.

[23] 徐晋卿,王琼,熊坤,等. 高压电缆在不同敷设方式下经济技术的比较[J]. 江西电力,2020,44(10):12-15. (XU Jinqing, WANG Qiong, XIONG Kun, et al. Comparison of economic and technical aspects of high voltage cable installation in different ways[J]. Jiangxi Electric Power,2020,44(10):12-15. (in Chinese))

[24] 陈文教,郑志豪,徐研,等. 基于高导热管道提升排管敷设下的电力电缆载流量的研究[J]. 绝缘材料,2022,55(2):97-103. (CHEN Wenjiao, ZHENG Zhihao, XU Yan, et al. Research on improving cable capacity under duct laying based on high thermal conductivity pipeline[J]. Insulating Materials,2022,55(2):97-103. (in Chinese))

[25] 石大城,李乾,余志强,等. 基于电磁-热-流体耦合的隧道敷设电缆载流量分析[J]. 绝缘材料,2022,55(12):111-118. (SHI Dacheng, LI Qian, YU Zhiqiang, et al. Current carrying capacity analysis of cables laid in tunnel based on electromagnetism-heat-fluid coupling[J]. Insulating Materials,2022,55(12):111-118. (in Chinese))

(收稿日期:2024-12-14 编辑:熊水斌)

(上接第 89 页)

[21] 邓斌,黄皎凤,徐拓,等. 基于竖缝隔板的大底坡鱼道水力优化数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):17-23. (DENG Bin, HUANG Jiaofeng, XU Tuo, et al. Numerical simulation of a large-slope fishway based on vertical slot sills for hydraulic optimization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):17-23. (in Chinese)).

[22] 缪婧娴,王晓刚,辛沛,等. 进口口水深不足时竖缝式鱼道水力特性及进出口允许最大水深差[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):99-105. (MIAO Jingxian, WANG Xiaogang, XIN Pei, et al. Hydraulic characteristics of vertical slot fishway and allowable maximum water depth difference between inlet and outlet subject to insufficient inlet water depth[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):99-105. (in Chinese))

[23] 张文传,高乐,王翔,等. 西藏拉洛水利枢纽工程鱼道设计研究[J]. 水利水电快报,2022,43(11):100-104. (ZHANG Wenchuan, GAO Le, WANG Xiang, et al. Design and research on fishway of Laluo Hydro Project in Tibet[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,2022,43(11):100-104. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-23 编辑:刘晓艳)