

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221993

# 藏木水电站竖缝式鱼道过鱼效果初探

姚 凡<sup>1</sup>,姜 昊<sup>1,2</sup>,刘 峰<sup>3</sup>,金冠峰<sup>3</sup>,刘晓锐<sup>3</sup>

(1. 乐山中电建生态环保科技有限公司,四川 乐山 614000; 2. 水电水利规划设计总院,北京 100120;  
3. 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司藏木水电厂,西藏 山南 856000)

**摘要:**藏木水电站鱼道是少有的海拔高、长度长的竖缝式鱼道,其建设运行对上下游鱼类基因交流、种群繁衍尤为重要。为了解藏木鱼道过鱼效果,2021年3~7月采用搬罾抽样调查和视频观测结合的方法连续监测藏木鱼道过鱼种类、数量及其环境因子,共监测到鱼类9种143 680尾,属2目4科7属,以设计主要过鱼对象异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼和拉萨裂腹鱼为主,并表现出明显的季节节律和昼夜节律,过鱼数量和种类呈5、6月份显著高于其他月份,白天明显高于夜间的特征。鱼道环境因子典范对应分析(CCA)结果表明,鱼道进出口水位和水温是影响过鱼效果的主要环境因子。研究结果可为藏木鱼道优化与有效运行提供数据支持,对雅鲁藏布江中下游渔业资源保护有重要意义。

**关键词:**鱼道;时间节律;鱼类多样性;环境因子  
**中图分类号:**S956.3;TV74 **文献标志码:**A

**文章编号:**1000-7709(2023)09-0107-05

## 1 概况

藏木鱼道位于海拔3 300 m的雅鲁藏布江中游桑日至加查峡谷段的藏木水电站,坝高116 m,正常蓄水位3 310.0 m,最大水头67.0 m,鱼道全长3 621.34 m,为竖缝式结构<sup>[1]</sup>,鱼道布置及具体结构参数见图1。现有鱼道监测手段主要为鱼道张网法和堵截法,此类抽样法对鱼体伤害大,结果具有随机性与偶然性且无法长期监测,所获数据往往不能实时、全面反映鱼道实际过鱼效果<sup>[2]</sup>。本文采用视频观测和搬罾抽样调查结合合法监测评

估藏木鱼道过鱼效果,视频观测简单直观且24 h不间断运行,更适用于长期监测,结合搬罾法的数据补充,可较为准确全面反映藏木鱼道实际过鱼效果。

## 2 研究方法

### 2.1 监测方法

为深入了解鱼道运行及过鱼效果,于2021年3~7月采用视频实时观测和搬罾抽样调查相结合的方式,对鱼道过鱼种类进行现场鉴定、生物学指标测量、成熟度判定。

搬罾法即在鱼道进口典型池室安装自搬罾(长2.5 m、宽2.0 m、高1.7 m),利用滑轮结构将搬罾从鱼道底部提出水面,对进入搬罾中的鱼类进行人工转移和生物学指标测量,2021年共进行4次调查,时间点分别为3月17日、5月15日、6月2日、7月9日。

视频观测法即在鱼道观测室玻璃窗后安装视频监测设备(图2),24 h不间断运行和存储,观测期为3月1日~7月9日,其中4月份由于鱼道检修设备未运行。人工记录上下行鱼类种类和数

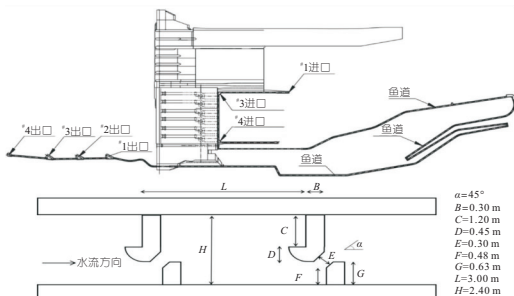


图1 藏木鱼道示意图及鱼道典型池室结构图

Fig.1 Schematic diagram and typical pond chamber structure diagram of ZM fishway

收稿日期:2022-09-23,修回日期:2022-11-03

基金项目:水电水利规划设计总院科研项目(ZMDC2019/U07)

作者简介:姚凡(1994-),男,硕士研究生,研究方向为渔业资源与环境,E-mail:1667871316@qq.com

通讯作者:姜昊(1982-),男,博士、正高级工程师,研究方向为栖息地保护与修复,E-mail:jianghao@creei.cn

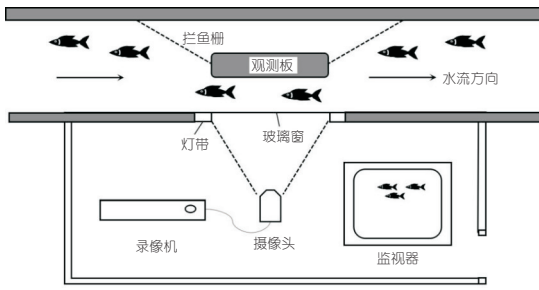


图 2 视频观测系统组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the composition of the video observation system

量,并估算过鱼体长。种类鉴定参照《青藏高原鱼类志》<sup>[3]</sup>,过鱼体长计算公式为:

$$L = (L_1/L_2)L_0 \quad (1)$$

式中, $L$  为鱼体实际长度; $L_1$  为实际方形框长; $L_2$  为视频中方形框长; $L_0$  为视频中鱼体长度。

定期监测鱼道内部环境因子,水温、pH 值、溶解氧、可溶解固体、盐度、电导率用多功能便携式水质分析仪(YSI Pro DSS)采集(频次 $\geq 10$ 次/月),鱼道进出口水位采用水位尺测量(视频逐日观测)。

## 2.2 数据分析

采用相对重要性指数( $I_{IRI}$ )描述坝下鱼类种类优势度,划定大于 500 的为优势种,计算公式为:

$$I_{IRI} = (W + N)F \times 10^4 \quad (2)$$

式中, $W$  为某一鱼类质量占比; $N$  为某一鱼类数量占比; $F$  为某一鱼类出现次数占总调查次数的比例。

采用 PRIMER 软件包中的多样性(DIVERSE)计算物种多样性指数( $H$ )、均匀度指

数( $J$ )和丰富度指数( $D$ ),计算公式为:

$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i \quad (3)$$

$$J = H/\ln S \quad (4)$$

$$D = (S - 1)/\ln N \quad (5)$$

式中, $S$  为所有样品的生物种属总数; $p_i$  为样品中属于第  $i$  种的个体的比例; $N$  为观察到的个体总数。

使用 Ranoco5.0 软件分析主要优势种与环境因子(水温、坝上坝下水位、溶解氧、pH 值、电导率、可溶解性固体、盐度)的典范对应(CCA)关系。本研究采用 SPSS 20.0 进行数据统计分析,并采用 T 检验分析差异性。

## 3 结果与分析

### 3.1 鱼道内鱼类种群结构及多样性分析

2021 年 3~7 月在藏木鱼道进口观测室观察到鱼类 9 种 143 680 尾,2 目 4 科 7 属,包括鱼道设计主要过鱼对象异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼、拉萨裂腹鱼,兼顾过鱼对象黑斑原鲃、拉萨裸裂尻鱼(其中巨须裂腹鱼、拉萨裂腹鱼和黑斑原鲃为国家 II 级保护动物),外来物种鲇、鲤、鲫及部分高原鳅类(详见表 1)。鱼道视频观测及搬罾调查结果显示,鱼道内异齿裂腹鱼为绝对优势种,数量占比 93.01%, $I_{IRI}$  高达 16 282,其次为巨须裂腹鱼(4.08%, $I_{IRI} = 1 921$ )和拉萨裂腹鱼(2.59%, $I_{IRI} = 770$ )。

从鱼道内鱼类的性腺发育程度来看(表 2),

表 1 鱼道内鱼类种群结构

Tab. 1 The structure of fish population in the fishway

编号	种类	视频观测				搬罾调查			
		过鱼数量/尾	数量占比/%	体长范围/mm	平均体长/mm	数量/尾	体重范围/g	平均体重/g	$I_{IRI}$
SP1	异齿裂腹鱼	133 637	93.01	100~580	256±66	208	80.0~1 235.7	401.5±151	16 282
SP2	巨须裂腹鱼	5 862	4.08	100~500	253±65	29	38.6~760.3	202.3±102.7	1 921
SP3	拉萨裂腹鱼	3 721	2.59	100~500	227±59	17	161.6~925.8	268.9±143.4	770
SP4	黑斑原鲃	115	0.08	50~150	91±23	15	5.6~37.7	22.3±9.7	427
SP5	拉萨裸裂尻鱼	43	0.03	115~360	259±64	3	124.2~199.2	174.2±75	50
SP6	拟硬刺高原鳅	15	0.01	60~180	94±25	4	4.1~40.3	26.4±25.6	75
SP7	鲇	129	0.09	100~600	244±88	2	6.2~105.9	56.05±70.5	21
SP8	鲤	129	0.09	80~400	271±70	3	256.6~1 468.3	806.9±606.2	148
SP9	鲫	29	0.02	60~320	172±89				

不同发育阶段的鱼类个体均有通过鱼道上溯的需求,异齿裂腹鱼性成熟个体主要在 3~6 月通过鱼道,拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼性成熟个体主要在 5~6 月通过鱼道。另外,鱼道内异齿裂腹鱼与同期库区和坝下鱼类性腺发育程度接近,拉萨裂腹鱼除 5 月略低于库区及坝下外,其余月份相对一

致,巨须裂腹鱼 5~7 月均低于库区及坝下,这与鱼类本身繁殖期差异有关。

从鱼道内过鱼对象体长来看(数据来源于视频观测结果),与坝下和库区鱼类相比,鱼道内的异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼、拉萨裂腹鱼的平均体长均较低(图 3)。

表 2 鱼道内鱼类性腺发育程度与同期库区、坝下对比表

Tab. 2 Comparison of gonad development of fish in reservoir, tailwater and fishway

种类	性别	3月			5月			6月			7月						
		鱼道性腺发育	Ⅲ期以上占比/%		鱼道性腺发育	Ⅲ期以上占比/%		鱼道性腺发育	Ⅲ期以上占比/%		鱼道性腺发育	Ⅲ期以上占比/%					
			鱼道	库区		坝下	鱼道		库区	坝下		鱼道	库区	坝下	鱼道	库区	坝下
异齿裂腹鱼	♀	I~IV	11.8	13.3	9.8	I~III	29.0	20.5	22.2	I~II	14.3	15.8	18.0	II	8.7	4.4	9.5
	♂	I~IV				I~IV				I~III				I~III			
拉萨裂腹鱼	♀	I~II	0	0	0	I~II	14.3	28.6	25.0	II~IV	23.5	20.0	25.0				0
	♂	I~II				I~III				II~IV							
巨须裂腹鱼	♀	II	0	0	0	I~IV	9.1	69.7	33.3	II~IV	37.5	50.0	66.7	I~II	8.2	40.0	14.8
	♂	I~II				I~IV				II~III				I~III			

注:鱼道内调查时间为3月17日、5月15日、6月2日、7月9日;库区调查时间为3月20日、5月21日、6月30日、7月28日;坝下调查时间为3月19日、5月23日、6月28日、7月30日;Ⅲ期以上占比数据为♀、♂合起来的数据。

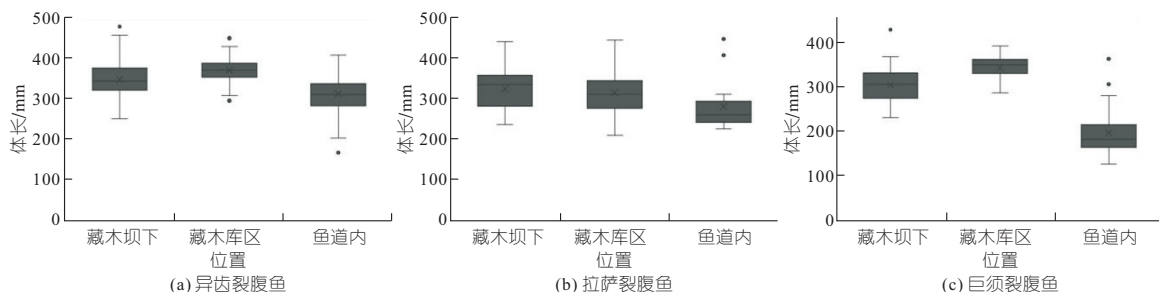


图 3 坝下、库区与鱼道内异齿裂腹鱼、拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼体长对比图

Fig. 3 Comparison of body lengths of *Schizothorax oconnori*, *Schizothorax macropogon*, *Racoma waltoni* in reservoir, tailwater and fishway

鱼类多样性分析结果(表 3)显示,物种多样性(H)和均匀度指数(J)最高为3月份,物种丰富度指数(D)最高在7月份,而物种多样性、均匀度和丰富度指数最低出现在5月份,这可能与5月份异齿裂腹鱼大量进入鱼道有关。鱼道优势种相对多度分析发现(图 4),主要过鱼对象异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼和拉萨裂腹鱼在各监测月份均有分布,其中异齿裂腹鱼个体数量最多,在各月份占比均超过 60%以上。

表 3 藏木鱼道 3~7 月鱼类的多样性

Tab. 3 The diversity of fish in the ZM fishway from March to July

月份	多样性指数 H	物种丰富度指数 D	均匀度指数 J
3月	0.809 003	0.503 271	0.583 572
5月	0.267 113	0.704 786	0.121 569
6月	0.370 938	0.737 984	0.168 821
7月	0.487 248	0.854 135	0.250 396

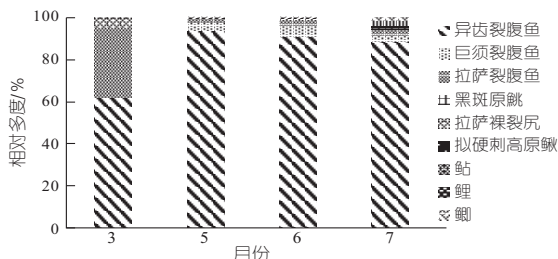


图 4 鱼道优势种相对多度

Fig. 4 Relative abundance of dominant species in the fishway

### 3.2 鱼道内鱼类上溯的时间节律

由表4可知,鱼道内过鱼种类及数量均呈现

表 4 藏木鱼道 3~7 月过鱼节律统计表

Tab. 4 Statistical table of fish passing rhythm in ZM fishway from March to July

月份	运行天数/d	上行数量/尾		下行数量/尾		过鱼总数/尾	净上行数/尾	日均净上行数/尾
		昼	夜	昼	夜			
3月	14	114	85	165	68	432	-34	-2
5月	23	46 192	21 763	12 835	87 86	89 664	46 334	2 043
6月	30	29 609	8 684	11 719	2 396	52 389	24 178	805
7月	8	394	412	266	123	1 195	417	51

明显季节差异,3月份过鱼数量和种类最少,5~6月达到峰值(≥98.87%),7月份数量和种类明显下降。

由图 5 可知,鱼道内鱼类上溯行为表现出显著的昼夜节律,白天(08:00~20:00)上溯鱼类的数量显著多于夜间(20:00~08:00) ( $P < 0.05$ ),超 2 倍以上。其中,异齿裂腹鱼数量白天显著多于夜间( $P < 0.05$ ),过鱼高峰期(>6 000 尾)集中在白天 11:00~16:00 时间段;巨须裂腹鱼和拉萨裂腹鱼白天数量为夜间 2 倍以上( $P < 0.05$ );而黑斑原鲌夜间过鱼数量显著高于白天( $P < 0.05$ )。

### 3.3 鱼道过鱼环境影响因素

藏木鱼道 3~7 月进出口水位、水温、pH 值、溶解氧、可溶解固体、盐度、电导率见表 5,将各月份鱼道内观察到的过鱼情况与以上环境因子进行典范对应分析(图 6),发现水温、pH 值等环境因子对轴 1 贡献大,进出口水位对轴 2 贡献大,轴 1、2 分别解释了 68.06%、25.66% 的载荷。经过

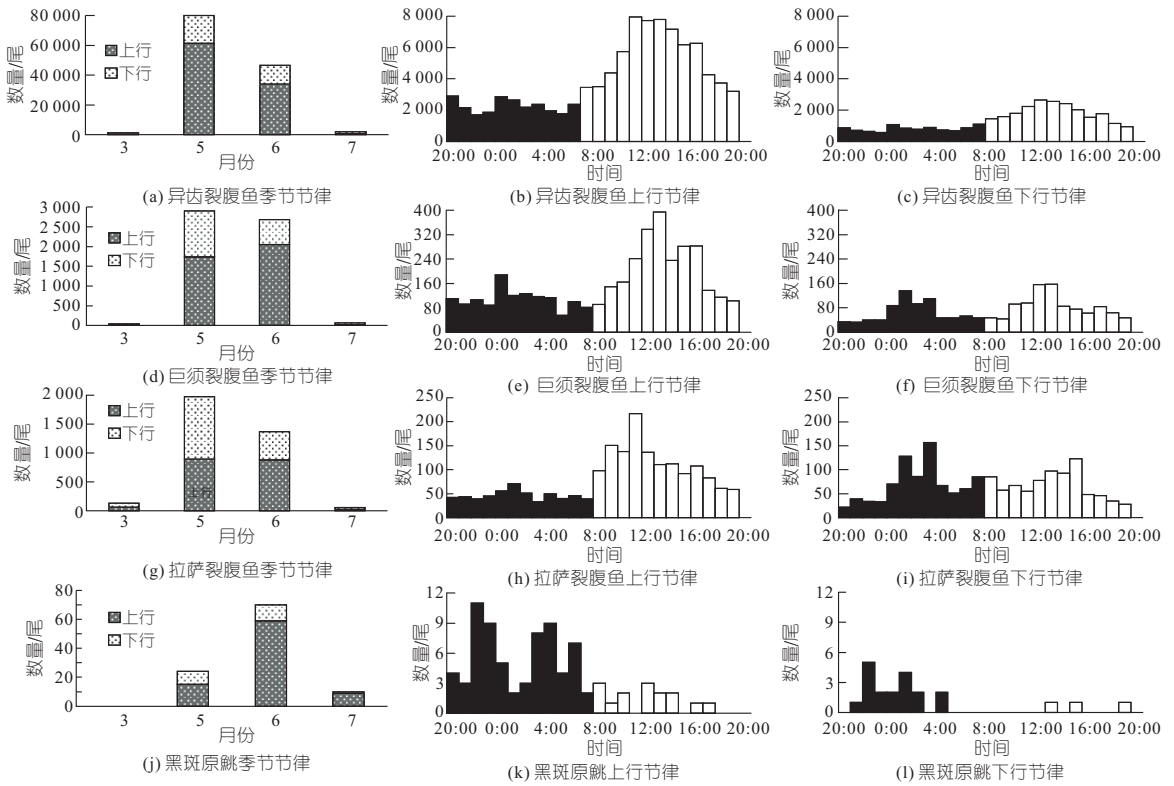


图5 鱼道内鱼道异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼、拉萨裂腹鱼、黑斑原鲃季节及昼夜节律分布图

Fig. 5 Distribution map of seasons and circadian rhythms of *Schizothorax oconnori*, *Schizothorax macropogon*, *Racoma waltoni*, *Glyptosternum maculatum* in the fishway

表5 藏木鱼道内部3~7月环境因子统计表  
Tab. 5 Statistical table of fish passing rhythm in ZM fishway from March to July

月份	pH	溶氧 /(mg · L <sup>-1</sup> )	水温 /℃	电导率	盐度	可溶解固 体/ppm	出口水 位/mm	进口水 位/mm
3月	8.54	8.35	9.6	293.5	0.15	147	253.4	129.6
5月	8.21	7.20	14.9	270.5	0.14	135	269.7	151.1
6月	8.24	7.63	18.1	238.5	0.13	119	273.4	145.1
7月	8.19	6.80	19.0	224.0	0.12	112	287.9	159.6

注:电导率单位为 μS/cm。

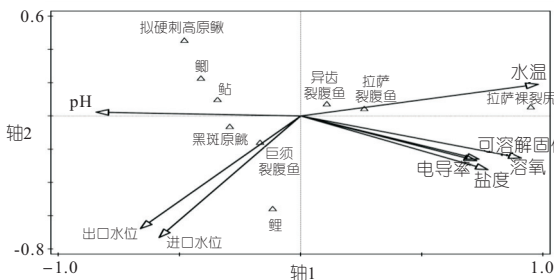


图6 鱼道内鱼类与环境因子典范对应分析(CCA)  
Fig. 6 Canonical correspondence analysis of environmental factors in the fishway

置换检验发现,鱼道进口水位、出口水位、水温较pH值、可溶解固体、电导率、溶解氧及盐度影响更大。

## 4 讨论

### 4.1 鱼道过鱼效果评价

2021年藏木水电站鱼道内共观测到6种土

著鱼类,其中5种为鱼道设计的主要过鱼对象及兼顾过鱼对象,且主要及兼顾过鱼对象数量高达143 378尾,占鱼道过鱼总数的99.79%,另外不同规格和成熟度的鱼类均能通过鱼道,表明藏木鱼道为该水域大多数鱼类提供了良好的洄游通道,较好地满足了藏木鱼道设计要求。

值得注意的是,2021年在鱼道内被采集和观测到115尾黑斑原鲃,而未在坝下采集到(2020年5月份采集到16尾),一方面是黑斑原鲃总体资源量较低,且调查具有不稳定性,因而未在坝下采集到;另一方面鱼道观测室附近营造的卵石微生物环境为黑斑原鲃提供了良好的栖息和索饵条件,至于其是否已在鱼道内完成整个生活史,需进一步跟踪其产卵繁殖活动来验证。

### 4.2 昼夜和季节节律

通过视频监控发现,藏木鱼道的过鱼数量呈明显季节和昼夜节律。鱼道上、下行过鱼数量从3月份开始增加,在5、6月份达到过鱼高峰期,7月份过鱼数量显著减少,表现出显著的季节性差异。另外,鱼道进口段上、下行过鱼数量还表现出明显的昼夜节律,主要过鱼对象异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼和拉萨裂腹鱼的上、下行过鱼数量均表现为白天多于夜间,而黑斑原鲃上溯昼夜节律刚好相反,表现为上、下行多发生于夜间。有研究显

示,鱼道内上溯的种类、数量与季节和昼夜变化有较大相关性,这种过鱼节律与鱼类所处的光线、温度、水情等外部环境变化及繁殖、索饵等自身生态习性密切相关<sup>[4]</sup>。根据监测结果,5~6 月藏木水电站所在河段水温升至 13~18℃ 之间,主要过鱼对象进入繁殖盛期,上溯行为活跃,加之鱼道进口诱鱼水流的吸引,在特定时间与时段表现出一定过鱼规律。

#### 4.3 过鱼效果与环境因子关系

相关研究表明,鱼道内环境因子变化也是影响鱼道的过鱼效果因素之一,主要环境影响因子有水温、水位、流速等<sup>[5]</sup>。本研究发现影响藏木鱼道过鱼效果的主要环境因子为鱼道进出口水位和水温。根据调查显示,裂腹鱼类适宜繁殖水温为 10~15℃,而藏木鱼道 5 月份平均水温为 14.9℃,为裂腹鱼类的适宜繁殖水温,这与 5 月份鱼道内裂腹鱼大量上溯相吻合。陈国柱等<sup>[6]</sup>发现过高或过低的水位均不利于鱼类上溯,本研究也显示出同样规律,当鱼道内进口水位低于 1.3 m,出口水位高于 2.8 m 时,上溯鱼类数量显著下降。过低的进口水位影响了诱鱼效果,而过高的水位会导致鱼道内流速过高<sup>[7]</sup>,藏木鱼道过鱼对象游泳能力测试表明,当鱼道内流速高于 1.5 m/s 时,裂腹鱼类上溯成功率会降低<sup>[8]</sup>,而本研究中鱼道流速未持续监测,因此关于鱼道过鱼数量与鱼道水位的对应关系,还需进一步采集流速数据加以分析验证。

## 5 结论

a. 本研究在藏木鱼道内监测到鱼类 9 种

143 680 尾,净上行 70 895 尾,基本满足了藏木鱼道设计过鱼种类及数量要求。

b. 鱼道过鱼对象上溯行为有明显昼夜和季节节律,过鱼数量白天高于夜间,5、6 月份高于 3、7 月份。

c. 鱼道过鱼数量的主要环境影响因子为鱼道进出口水位和水温,在过鱼高峰期应确保鱼道水位稳定,避免库区低温水进入鱼道,保障鱼类生殖洄游。

#### 参考文献:

- [1] 陈静,郎建,何涛,等.高坝鱼道工程设计案例分析[J].水生生态学杂志,2014,34(4):19-25.
- [2] 王义川,王煜,林晨宇,等.鱼道过鱼效果监测方法述评[J].生态学杂志,2019,38(2):586-593.
- [3] 武云飞,吴翠珍.青藏高原鱼类志[M].成都:四川科学技术出版社,1992.
- [4] AGOSTINHO A A, GOMES L C, FERNANDEZ D R, et al. Efficiency of fish ladders for neotropical ichthyofauna[J]. River research and applications, 2002, 18(3):299-306.
- [5] YOON J D, KIM J H, YOON J, et al. Efficiency of a modified ice harbor-type fishway for Korean freshwater fishes passing a weir in South Korea[J]. Aquatic ecology, 2015, 49(4):417-429.
- [6] 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):4-8,58.
- [7] 段鸿锋,孙治才,赵绍熙,等.高水位变幅鱼道进口布置水力学试验研究[J].水电能源科学,2020,38(1):116-118,73.
- [8] 周小波,陈静,张连明.浅论鱼道设计方法与过程——以藏木水电站鱼道设计为例[J].水电站设计,2017,33(3):29-32,79.

## Preliminary Study on Fish Passing Effect of Vertical-slot Fishway in ZM Hydropower Station

YAO Fan<sup>1</sup>, JIANG Hao<sup>1,2</sup>, LIU Feng<sup>3</sup>, JIN Guan-feng<sup>3</sup>, LIU Xiao-rui<sup>3</sup>

(1. PowerChina Leshan Ecological Environmental Protection Technology Co., LTD., Leshan 614000, China; 2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China; 3. Zangmu Hydropower Plant of HUANENG Tibet Brahmaputra Hydropower Development Investment Co., LTD., Shannan 856000, China)

**Abstract:** The ZM Fishway is the rare vertical slot fishway with high altitude and the long length at the domestic and foreign. The effect of fishway is particularly vital for the gene exchange and population reproduction of the upstream and downstream fish. To investigate the effectiveness of the fishway, we monitored the species, quantity and environmental factors of fish by trap and video observation method from March to July in 2021. In total, 9 species of 143 680 fish belonging to 2 orders, 4 families and 7 genera were captured. The species and quantity of fish passing through were mainly *Schizothorax oconnori*, *Schizothorax macropogon* and *Racoma waltoni*, which were the main objects of fishway designed. The number and species of fish showed obvious seasonal and circadian rhythms. The number and species of fish in May and June were significantly higher than those in other months, and the number of fish during the day was significantly higher than that at night. The canonical correspondence analysis (CCA) results of fishway environmental factors show that the main environmental factors affecting the effect of fishway were the water stage and water temperature. The research results could provide reference data for the optimization and effective operation of the ZM fishway, and it was of great significance to the protection of fishery resources in the middle and lower reaches of the Brahmaputra River.

**Key words:** fishway; time rhythm; fish diversity; environmental factor