



安谷竖缝式鱼道与1[#]仿自然通道的过鱼效果研究

郭涛¹, 廖艺红¹, 黄晋², 胥贤¹, 常娟¹

(1. 武汉中科瑞华生态科技股份有限公司, 湖北 武汉 430077;

2. 中国水电建设集团圣达水电有限公司, 四川 乐山 614013)

摘要: 为了解安谷竖缝式鱼道与1[#]仿自然通道的过鱼效果, 在2条鱼道内开展了2种鱼类的通过性与折返性试验。以白甲鱼和唇鲮为研究对象, 通过在鱼道内安装无源集成转发器(PIT)监测设备, 记录2种标记鱼类在竖缝式鱼道与1[#]仿自然通道的行为。结果表明, 调查期间鱼道内采集到鱼类14种, 共计131尾, 属2目5科13属, 其中蛇鮈、宽鳍鱮、贝氏高原鳅和裸腹片唇鲮占比较高, 分别为29.77%、16.79%、16.03%和12.98%。鱼道运行期间, 6月竖缝式鱼道进口处流速最高, 为(0.242±0.019) m/s; 5月竖缝池室流速最高, 为(0.493±0.009) m/s; 5月1[#]仿自然通道流速最高, 为(1.378±0.473) m/s; 各月1[#]仿自然通道流速均高于竖缝式鱼道进口处、鱼道池室。竖缝式鱼道的通过率为22.58%, 折返率为19.82%; 1[#]仿自然通道的通过率为18.06%, 折返率为27.08%。标记鱼类均在20—8时使用鱼道频率较高, 其中最频繁时间为2—3时与20—21时。

关键词: 鱼道; 通过率; 折返率; PIT标记

中图分类号: U643.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0111-06

Fish passing effect of Angu vertical slot fishway and 1[#] imitation natural channel

GUO Tao¹, LIAO Yihong¹, HUANG Jin², XU Xian¹, CHANG Juan¹

(1. Wuhan Zhongke Ruihua Ecological Technology Co., Ltd., Wuhan 430077, China;

2. China Hydropower Construction Group Shengda Hydropower Co., Ltd., Leshan 614013, China)

Abstract: In order to understand the fish passing effect of Angu vertical slot fishway and 1[#] imitation natural channel, we carry out the pass and turn-back tests of two kinds of fish in two fishways. Taking *Onychostoma sima* and *Hemibarbus labeo* as research objects, we install the PIT monitoring equipment in the fishway to record the behavior of two kinds of labeled fish in the vertical slot fishway and 1[#] imitation natural channel. The results show that 14 species of fish are collected in the fishway during the survey, with a total of 131 individuals, belonging to 2 orders, 5 families and 13 genera. The fish in the fishway are mainly *Saurogobio dabryi*, *Zacco platypus*, *Trilophysa bleekeri* and *Platysmacheilus nudiventris*, accounting for 29.77%, 16.79%, 16.03% and 12.98%, respectively. During the operation of the fishway, the flow velocity at the inlet of the vertical slot fishway is the highest in June, which is (0.242±0.019) m/s; in May, the flow velocity in the vertical slot pool is the highest, which is (0.493±0.009) m/s; the flow velocity of 1[#] imitation natural channel in May is the highest, which is (1.378±0.473) m/s. The flow velocity of 1[#] imitation natural channel in each month is higher than that of the inlet of the vertical slot fishway and the fishway pool. The pass rate of the vertical slot fishway is 22.58%, and the turn-back rate is 19.82%. The pass rate of 1[#] imitation natural channel is 18.06%, and the turn-back rate is 27.08%. The fish uses fishway more frequently between 20 and 8 o'clock. The most frequent use of fishway is between 2 and 3 o'clock, and between 20 and 21 o'clock.

Keywords: fishway; pass rate; turn-back rate; PIT marker

收稿日期: 2023-11-12

作者简介: 郭涛(1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事水生生态学研究。

我国河流众多，是水电资源较为丰富的国家。水电是一种重要的可再生能源，对我国经济的发展起着重要的推动作用^[1]。截至2019年底，全国水电装机容量约3.56亿kW，年发电量逾1万亿kW，均居世界第一。水利资源的开发对中国经济发展起到重要的推动作用，但同时也对水生生态系统带来了较大的负面影响，包括上下游水文条件的改变、鱼类生存环境的破坏、鱼类洄游通道和营养物质传输的阻碍等，严重威胁水生生物的多样性^[2-7]。目前，世界上绝大多数河流中都修建了大坝，其中一半以上的河流都受到了负面影响^[8]。恢复河流连通性是恢复鱼类种群最有效的方法，可以通过拆除大坝或建造过鱼设施解决^[9-10]。在大坝上建造鱼道、升鱼机、集运鱼系统等过鱼设施，可以恢复河流连通性，实现坝上与坝下鱼类的基因交流，最大限度地解决鱼类生境破碎的问题^[11-12]。

无源集成转发器(passive integrated transponder, PIT)遥测是通过射频识别天线接收PIT标签发送的射频识别信号对鱼类进行监测。PIT标签具有体积小、寿命长、对鱼类伤害低等优点，使用该监测手段可大幅降低监测人员的劳动强度，实现对标记鱼类的连续监测且不会对上溯鱼类造成影响。Yoon等^[13]采用PIT遥测研究韩国锦江Ice Harbortype鱼道的进口吸引率、上溯成功率和通过时间；Hatry等^[14]使用PIT遥测技术研究了银吸口鱼、河川吸口鱼和大鳞红马鱼在每级池室的上溯行为，结果显示84%的鱼类在第2个转弯池处上溯失败。

本文以大渡河安谷竖缝式鱼道和1#仿自然通道为对象，结合PIT标记开展鱼道过鱼效果研究，以为国内类似工程提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验地点概况

大渡河安谷水电站位于四川省乐山市沙湾区嘉农镇(左岸)和市中区安谷镇(右岸)接壤的大渡河干流安谷河段的生姜坡，是大渡河干流梯级开

发的最后一级，坝址位于四川省乐山市沙湾区。该工程拥有竖缝式鱼道和1#仿自然通道，过鱼主要对象为胭脂鱼、长薄鳅、长鳍吻鲈、异鳔鳅鲃、蛇鲈，同时兼顾河段内的其他鱼类，如犁头鳅、白甲鱼和唇鲮等，鱼道的过鱼季节为每年3—10月。

1.2 试验仪器

采用LS1206B便携式旋桨流速仪、PIT监测设备(PIT标签、数据采集器、监测天线、无线传输系统和计算机)、交直流两用增氧机。

1.3 试验方法

1.3.1 PIT监测设备的安装

根据试验竖缝式鱼道和1#仿自然通道尺寸和结构定制感应天线，将制定好的感应天线分别安装在竖缝式鱼道和1#仿自然通道内，PIT布设位置及放流点位见图1。

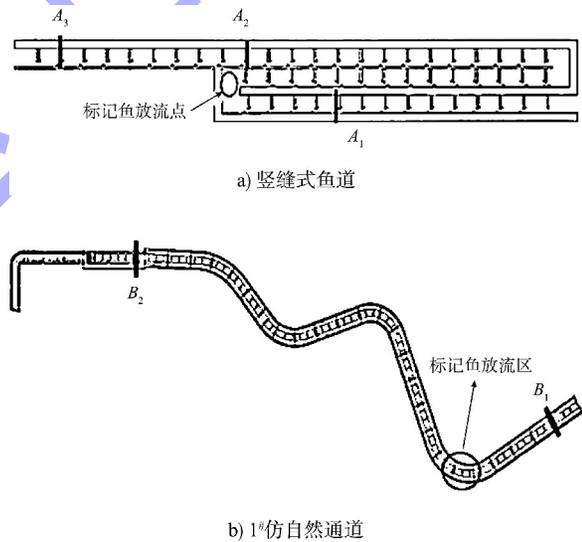


图1 PIT布设位置及标记鱼放流位置

1.3.2 PIT标签植入与鱼类放流

试验用鱼为白甲鱼和唇鲮。试验前使用大渡河水将鱼放置于暂养池中，利用交直流两用增氧机全天不间断增氧。暂养3d后对鱼类进行标签植入，挑选活力好、健康的鱼体记录体长、质量，对鱼进行麻醉，注射部位消毒，利用专用注射器将PIT标签植入鱼体腔内，入针处涂抹少量红霉素软膏。标签植入完成后，放入暂养箱中进行充氧，观察鱼类活动情况。

2021-05-23T09:30:00 在竖缝式鱼道放流,共标记鱼类 221 尾,死亡 4 尾,剩余 217 尾带有 PIT 标签进行放流,标记率为 98.19%。2021-06-01T10:00:00 在 1#仿自然通道放流,共标记鱼类 147 尾,死亡 2 尾,脱标 1 尾,剩余 144 尾带有 PIT 标签进行放流,标

记率为 97.96%。放流前对标记鱼的健康状态进行评估,确保鱼类无异常行为,活力无显著影响,对标记鱼进行检测,确保其体内标签能正常监测,记录通过 PIT 天线的标记鱼数量、时间和 PIT 编号。试验标记鱼信息见表 1。

表 1 标记鱼信息

诱鱼方式	日期	品种	数量/尾	体长/cm	质量/g
竖缝式鱼道	2021-05-23—2021-05-31	白甲鱼	128	15.09±3.50	25.04±3.23
		唇鲮	89	18.46±2.96	21.72±4.52
1#仿自然通道	2021-06-01—2021-06-09	白甲鱼	86	15.06±3.15	24.54±3.05
		唇鲮	58	17.64±3.18	21.33±4.02

1.3.3 数据处理

流速、体长和质量数据使用 SPSS 20.0 软件统计分析,采用单因素方差分析,各组间比较使用 Duncan 法,结果表示为平均值±标准差,显著性检验的判断标准为:概率 $P \geq 0.05$ 表示差异不显著, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 竖缝式鱼道和 1#仿自然通道鱼类组成

2021 年调查期间,3、5 和 7 月利用张网法对鱼道内渔获物进行 1 次收集工作,共进行 3 次收集工作,每次进行 3 d,竖缝式鱼道和 1#仿自然通道的渔获物种类信息见表 3。

表 2 竖缝式鱼道和 1#仿自然通道渔获物信息

品种	数量/尾	占比/%	体长/cm	质量/g
蛇鲷	39	29.77	8.97±2.20	7.57±5.24
宽鳍鱲	22	16.79	6.47±1.03	12.53±13.17
贝氏高原鳅	21	16.03	7.35±0.79	5.42±1.80
裸腹片唇鲷	17	12.98	4.73±1.17	2.71±1.24
短须颌须鲷	10	7.63	6.72±0.51	3.93±0.77
凹尾拟鲮	6	4.58	10.90±2.29	14.18±8.64
花鲮	4	3.05	7.20±0.96	6.05±2.76
白甲鱼	4	3.05	10.03±1.81	22.35±13.64
马口鱼	2	1.53	18.75±5.02	10.15±1.34
红尾副鳅	2	1.53	10.90±0.57	11.60±0.14
鲢鱼	1	0.76	17.00	179.80
鲮鱼	1	0.76	23.00	328.50
泉水鱼	1	0.76	14.00	39.00
唇鲮	1	0.76	11.50	19.20

可以看出,在竖缝式鱼道和 1#仿自然通道内共采集到鱼类 14 种,共计 131 尾,属 2 目 5 科 13 属。进入竖缝式鱼道和 1#仿自然通道内的鱼类主要有蛇鲷、宽鳍鱲、贝氏高原鳅和裸腹片唇鲷,数量分别为 39、22、21 和 17 尾,占比分别为 29.77%、16.79%、16.03% 和 12.98%,其他鱼类采集数量较少,占比低于 10%。

2.2 运行期间鱼道水文状况

2021 年 3—9 月,竖缝式鱼道正常运行时间为 178 d,正常运行率为 83.18%;1#仿自然通道运行情况良好,水量充沛,正常运行率为 100%。鱼道运行期间对竖缝式鱼道进口处、鱼道池室及 1#仿自然通道流速进行测定,结果见表 3。

表 3 监测期间鱼道流速

月份	竖缝式鱼道进口处 流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	竖缝池室流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1#仿自然通道 流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
3	0.224±0.007 ^a	0.403±0.008 ^a	1.072±0.006 ^a
4	0.224±0.005 ^a	0.421±0.012 ^b	1.269±0.129 ^b
5	0.229±0.011 ^{ab}	0.493±0.009 ^c	1.378±0.473 ^c
6	0.242±0.019 ^b	0.483±0.011 ^c	1.359±0.008 ^c
7	0.232±0.011 ^{ab}	0.483±0.006 ^c	1.358±0.009 ^c
8	0.234±0.02 ^{ab}	0.427±0.009 ^b	1.343±0.009 ^c
9	0.235±0.02 ^{ab}	0.417±0.006 ^b	1.284±0.111 ^b

注:同一列中,上角标的字母相同表示差异不显著,上角标的字母不同表示差异显著。

可以看出,6 月的竖缝式鱼道进口处流速显著高于其他月份,流速为(0.242±0.019) m/s,与 3 和 4 月差异显著,与其他月份差异不显著;5 月的竖缝池室流速最高,流速为(0.493±0.009) m/s,

5—7月流速差异不显著，与其他月份差异显著，其中3月流速最低；5月的1#仿自然通道流速最高，流速为(1.378±0.473)m/s，5—8月的流速差异不显著，与3、4和9月差异显著，3月流速最低，为(1.072±0.006)m/s；各月1#仿自然通道流速均高于竖缝式鱼道进口处、鱼道池室。

2.3 竖缝式鱼道内标记鱼监测信息、通过率和折返率

竖缝式鱼道内设置感应天线3个，监测结果见表4。感应天线共获得标记试验鱼的信号399次。由于部分标记鱼在天线附近持续游动，从而导致检测信息出现重复。放流的217尾中有42尾未监

测到信息(白甲鱼25尾、唇鲮17尾)，竖缝式鱼道内共获得了175尾标记试验鱼信号，其中白甲鱼106尾、唇鲮79尾。有49尾鱼通过了A₃点位，其中白甲鱼37尾，通过率为28.91%；唇鲮12尾，通过率为13.48%；整体通过率为22.58%。有43尾鱼通过了A₁点位，其中白甲鱼26尾，折返率为20.31%；唇鲮17尾，折返率为19.10%；整体折返率为19.82%。单因素方差分析结果显示，各监测点位2种标记试验鱼的体长和质量均没有显著性差异。

表4 竖缝式鱼道内 PIT 监测信息

位置	触发/次	白甲鱼			唇鲮			合计/尾
		数量/尾	体长/cm	质量/g	数量/尾	体长/cm	质量/g	
A ₁	62	26	15.83±2.13	23.70±2.66	17	18.31±2.86	20.39±3.91	43
A ₂	281	80	14.98±2.89	24.89±2.89	52	17.70±3.40	21.09±3.53	132
A ₃	56	37	14.88±2.88	23.61±2.19	12	17.11±2.83	21.64±4.18	49

2.4 1#仿自然通道内标记鱼监测信息、通过率和折返率

1#仿自然通道内设置感应天线2个，监测结果见表5。可以看出，共获得标记试验鱼的信号179次。放流的144尾中有79尾未监测到信息(白甲鱼43尾、唇鲮36尾)，1#仿自然通道内共获得65尾标记试验鱼信号，其中白甲鱼43尾、唇鲮22尾。

有26尾鱼通过了B₂点位，其中白甲鱼19尾，通过率为22.09%；唇鲮7尾，通过率为12.07%；整体通过率为18.06%。有39尾鱼通过了B₁点位，其中白甲鱼24尾，折返率为27.91%；唇鲮15尾，折返率为25.86%；整体折返率为27.08%。单因素方差分析结果显示，各监测点位2种标记试验鱼的体长和质量均没有显著性差异。

表5 1#仿自然通道内 PIT 监测信息

位置	触发/次	白甲鱼			唇鲮			合计/尾
		数量/尾	体长/cm	质量/g	数量/尾	体长/cm	质量/g	
B ₁	116	24	14.92±2.46	23.79±2.71	15	17.96±2.95	21.21±4.06	39
B ₂	63	19	15.48±2.74	24.31±2.09	7	18.03±2.91	22.03±3.98	26

2.5 标记鱼使用鱼道时间

标记的鱼类使用鱼道时间分布见图2。可以看出，在竖缝式鱼道内共触发信号399次，8—20时监测到信号170次，占比42.61%；20—8时监测到信号229次，占比57.39%。1#仿自然通道内共获得信号179次，8—20时获得信号71次，占比39.66%，20—8时获得信号108次，占比60.34%。结果表明，在竖缝式鱼道和1#仿自然通道内，标记鱼类均在20—8时使用鱼道频率较高，在白天使用鱼道的鱼类数量相对较少，使用鱼道最频繁

时间为2—3时与20—21时。

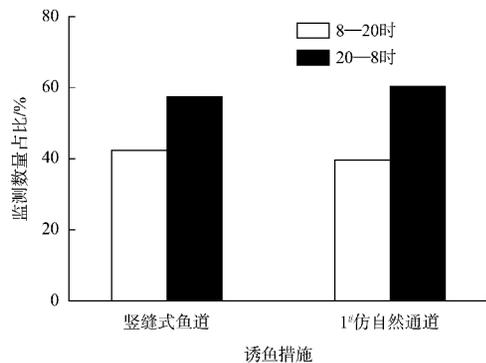


图2 日夜信号监测数量占比

3 讨论

研究表明,1#仿自然通道流速高于竖缝式鱼道进口处和鱼道池室。鱼道的流速是影响鱼类上溯时的重要因素,鱼道流速过大会导致鱼类上溯受阻。Standen等^[15]经研究发现,鱼的游泳行为会受鱼道内的流场影响,鱼道进口的流速应根据过鱼对象的最低爆发速度决定;赵希坤等^[16]对鲤鱼、鲢鱼、草鱼、梭鱼和团头鲂等鱼进行了流速能力研究,发现研究鱼类的感应流速多在0.2 m/s左右,适宜流速为0.3~0.8 m/s;杜浩等^[17]经研究发现,天然河道中规格较小的鱼类趋向选择较小的流速、较宽的流速范围,规格较大的鱼类趋向于选择较高的流速、较窄的流速范围,表明鱼体规格较大的鱼类选择环境的能力强,能够主动选择较高的流速范围。由于河道含有不同种类、规格、年龄的鱼类,因此鱼道的流速大小直接关系到鱼类能否成功上溯。而鱼道进口设计常以过鱼对象的最小爆发速度为参照,鱼道流速太大或太小都不利于鱼类上溯,因此如何平衡鱼类行为与鱼道内和鱼道进口流速的大小,对鱼类能否成功上溯至关重要。

2021年3—9月在竖缝式鱼道和1#仿自然通道内共采集到鱼类14种,合计131尾,以鲤科鱼类为主,占总种数的77.10%;其次为鳅科与鲮科鱼类。王文君等^[18]对大渡河乐山段的鱼类群落结构与多样性现状特征及变化进行研究,共采集到鱼类10751尾,鲤科鱼类最多,占比为50%,以杂食性、砂砾底栖型、产黏沉性卵类群为主;张志明等^[19]等对大渡河金川—丹巴河段干、支流的鱼类群落结构进行研究,研究发现该河段共分布鱼类18种,隶属2目6科10属,其中鲤形目最多,占比为83.33%。

竖缝式鱼道的鱼类通过率为22.58%,折返率为19.82%;1#仿自然通道的通过率为18.06%,折返率为27.08%。鱼类在竖缝式鱼道的通过率高于一#仿自然通道,折返率低于一#仿自然通道,可能是因为竖缝式鱼道的流速低于一#仿自然通道,鱼类更易上溯。根据鱼类使用鱼道时间发现,鱼

类在竖缝式鱼道和1#仿自然通道内均在20—8时使用鱼道频率较高,表明鱼类趋向夜间活动和上溯。王猛等^[20]经研究发现,鱼类的上溯存在季节和昼夜差异,鱼道内夜晚过鱼效果高于白天;张健^[21]经研究发现,鱼类在夜晚18—24时上溯至鱼道出口区域比例最大,但鱼类活跃度无明显的昼夜规律。鱼类上溯的昼夜差异可能与鱼类的生活习性相关,一般底栖性鱼类较为喜欢弱光环境,偏向于昼伏夜出;而中上层鱼类具有一定的趋光性,多表现为昼出夜伏。

4 结论

1) 1#仿自然通道流速高于竖缝式鱼道进口处和鱼道池室。

2) 2021年3—9月在竖缝式鱼道和1#仿自然通道内共采集到鱼类14种,共计131尾,以鲤科鱼类为主,占总种数的77.10%;其次为鳅科与鲮科鱼类。

3) 竖缝式鱼道的鱼类通过率为22.58%,折返率为19.82%;1#仿自然通道的通过率为18.06%,折返率为27.08%。鱼类在竖缝式鱼道的通过率高于一#仿自然通道,折返率低于一#仿自然通道,鱼类在竖缝式鱼道和1#仿自然通道内均在20—8时使用鱼道频率较高。

参考文献:

- [1] SHI X T, KYNARD B, LIU D F, et al. Development of fish passage in China[J]. Fisheries, 2015, 40(4): 161-169.
- [2] 陈凯麒,常仲农,曹晓红,等.我国鱼道的建设现状与展望[J].水利学报,2012,43(2): 182-188,197.
- [3] NOONAN M J, GRANT J W A, JACKSON C D. A quantitative assessment of fish passage efficiency[J]. Fish and fisheries, 2012, 13(4): 450-464.
- [4] POFF N L, HART D D. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal[J]. Bioscience, 2002, 52(8): 659-668.
- [5] SHEER M B, STEEL E A. Lost watersheds: barriers, aquatic Habitat connectivity, and salmon persistence in the Willamette and lower Columbia River Basins [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2006,

135(6): 1654-1669.

[6] PARK D, SULLIVAN M, BAYNE E, et al. Landscape-level stream fragmentation caused by hanging culverts along roads in Alberta's boreal forest[J]. Canadian journal of forest research, 2008, 38(3): 566-575.

[7] MAGILLIGAN F J, NISLOW K H. Changes in hydrologic regime by dams [J]. Geomorphology, 2004, 71 (1/2): 61-78.

[8] NILSSON C, REIDY C A., DYNESIUS M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems[J]. Science , 2005, 308: 405-408.

[9] RONI P, HANSON K, BEECHIE T. Global review of the physical and biological effectiveness of stream habitat rehabilitation techniques [J]. Fisheries management, 2008, 28(3): 856-890.

[10] TUMMERS J S, KERR J R, O'BRIEN P, et al. Enhancing the upstream passage of river lamprey at a microhydropower installation using horizontally-mounted studded tiles [J]. Ecological engineering, 2018, 125: 87-97.

[11] 陈凯麒, 葛怀凤, 郭军, 等. 我国过鱼设施现状分析及鱼道适宜性管理的关键问题 [J]. 水生态学杂志, 2013, 34(4): 1-6.

[12] CHEN K Q, TAO J, CHANG Z N, et al. Difficulties and prospects of fishways in China: an overview of the construction status and operation practice since 2000[J]. Ecological engineering, 2014, 70: 82-91.

[13] 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(3): 417-429.

[14] HATRY C, THIEM J D, HATIN D, et al. Fishway approach behaviour and passage of three redhorse species (*Moxostoma anisurum*, *M. carinatum*, and *M. macrolepidotum*) in the Richelieu River, Quebec [J]. Environmental biology of fishes, 2016, 99(2/3): 249-263.

[15] STANDEN E M, HINCH S G, HEALEY M C, et al. Energetic costs of migration through the Fraser River Canyon, British Columbia, in adult pink (*Oncorhynchus gorbuscha*) and sockeye (*Oncorhynchus nerka*) salmon as assessed by EMG telemetry [J]. Canadian journal of fisheries and aquatic sciences, 2002, 59(11): 1809-1818.

[16] 赵希坤, 韩桢鐸. 鱼类克服流速能力的试验 [J]. 水产学报, 1980, 4(1): 31-37.

[17] 杜浩, 班璇, 张辉, 等. 天然河道中鱼类对水深、流速选择特性的初步观测: 以长江江口至涪市段为例 [J]. 长江科学院院报, 2010, 27(10): 70-74.

[18] 王文君, 方艳红, 杨钟, 等. 大渡河乐山段鱼类群落结构及其多样性分布特征 [J]. 水生态学杂志, 2023, 44(3): 62-69.

[19] 张志明, 梁炆汉, 张东亚, 等. 大渡河金川至丹巴河段干、支流鱼类资源及其多样性分布 [J]. 水生态学杂志, 2023, 44(3): 54-61.

[20] 王猛, 金志军, 杜健康, 等. 枕头坝一级鱼道过鱼效果监测 [J]. 水力发电, 2022, 48(11): 22-27, 42.

[21] 张健. 松新鱼道过鱼效果监测与优化研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.

(本文编辑 王璁)

(上接第 110 页)

[6] 李兴亮, 陈野鹰. 弯曲河段下游引航道口门区通航水流条件研究 [J]. 水运工程, 2016(2): 127-130, 141.

[7] 胡亮亮, 谭家万, 袁浩. 基于隔流堤的下游引航道通航水流条件优化 [J]. 水运工程, 2022(5): 72-77.

[8] 刘亚辉, 王云莉, 张绍培, 等. 窄深河道急弯下游枢纽上引航道布置及通航水流条件试验 [J]. 水运工程, 2020(9): 118-125.

[9] 李艳, 周勤, 米家杉, 等. 瓦村枢纽下游引航道通航水流条件试验研究 [J]. 水运工程, 2018(2): 136-141.

[10] 郑星伟, 张铭, 范洪浩, 等. 小溪滩枢纽下游导流堤布置及形式优化 [J]. 水运工程, 2018(9): 96-100, 118.

[11] 张羽, 杨朝辉, 赵集云, 等. 弯曲河段船闸引航道通航水流条件模拟 [J]. 水运工程, 2022(6): 132-138.

[12] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 王璁)