

# 鄱阳湖水利枢纽航道通航水流条件及优化措施试验研究<sup>\*</sup>

唐立模，房新宇，林青炜，陆阿坤，屈一晗

(河海大学 水利水电学院，江苏南京 210098)

**摘要：**针对鄱阳湖水利枢纽通航水流条件是否满足通航安全要求展开研究，建立鄱阳湖入江水道星子—湖山段物理模型，对鄱阳湖水利枢纽一期围堰阶段现状航道、二期围堰及运营期设计航道各典型工况下的通航水流条件进行试验研究。首先通过物理模型试验验证航道内是否产生不良流态；其次针对航道内出现的不良流态提出相应优化措施并进行方案比选；最后对优化后航道内通航水流条件进行试验验证以确保船舶安全通航。模型试验主要结论：二期围堰及运营期设计航道在大流量工况下存在上游口门区横向流速超标及下游锚地段生成大尺度回流等问题。通过实施调整上游隔流堤形式，航道右侧浅滩开挖，下游锚地段下移等措施后，设计航道各工况下水流条件均满足通航安全要求。

**关键词：**鄱阳湖水利枢纽；通航水流条件；优化措施；物理模型

中图分类号：TV61；U64

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)11-0099-07

## Experimental study on navigable flow condition and optimization measures of navigation channel of Poyang Lake water control project

TANG Limo, FANG Xinyu, LIN Qingwei, LU Akun, QU Yihan

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** A physical model of Xingzi-Hushan section of the North Lake of Poyang Lake is established, to study whether the navigable flow condition of Poyang Lake Water Control Project meets the navigable safety, including the experimental study on navigable flow condition of the current channel of the first stage cofferdam, the design channel of the second stage cofferdam and the operation period of Poyang Lake water control project under different conditions. Firstly, physical model tests are conducted to verify whether there are bad flow patterns in the channel. Secondly, the corresponding optimization measures are studied for the bad flow patterns. Finally, the navigable flow condition in the optimized channel is tested to ensure the safe navigation. The conclusions are as follows: The navigable flow condition of the design channel of the second cofferdam and the the operation period has some problems under the condition of large flow rate, such as the transverse velocity of the upstream entrance area exceeds the limit and large scale backflow is generated in the downstream anchorage. The flow conditions of the designed channel can meet the navigation safety requirements under all conditions by adjusting the form of upstream separation levee, excavating the shoal on the right side of the channel, and moving down the downstream anchorage, etc.

**Keywords:** Poyang Lake water control project; navigable flow condition; optimization measures; physical model

收稿日期：2023-02-23

\*基金项目：江西省水利厅科技项目（202325ZDKT04）

作者简介：唐立模（1977—），男，博士，教授，从事泥沙运动力学与现代流体测速技术研究。

为提高鄱阳湖枯水期水资源和水环境承载能力,改善湖区供水、灌溉、航运等条件,江西省拟于鄱阳湖入江水道屏峰山—长岭断面建设鄱阳湖水利枢纽。

鄱阳湖水利枢纽是具有通航功能的水利枢纽,在施工及运行阶段必须严格控制其航道内的水流条件不影响船舶的安全通航。工程中受所在河段的来流量大小、河道特性、枢纽运行方式,以及航道布置形式等多种因素的影响,在航道各区段尤其是引航道口门区易生成超出安全限值的纵向、横向水流以及大尺度回流等不良流态<sup>[1-2]</sup>,经过此处的船舶将被不利的水流条件带离航线,甚至造成船舵失控冲撞翻船等事故。为避免上述情况发生,研究人员通过物理模型和数值模拟等方法,针对航道优化进行多种尝试并取得良好成果<sup>[3-5]</sup>。其中比较常用的工程措施主要有调整隔流堤的长度、角度和堤头开孔形式,增设导流墩并优化布置形式以及河道的局部整治等<sup>[6-9]</sup>。

通过物理模型试验的方法对枢纽施工期(包含一期围堰与二期围堰阶段)及运营期(包含敞泄期与控泄期)典型工况下,通航航道各区段内的通航水流条件进行模拟试验,分析存在的问题并提出优化措施,以满足枢纽工程航道通航安全的要求。

## 1 工程概况

鄱阳湖水利枢纽位于鄱阳湖入江水道长岭—屏峰山湖段。从左至右依次布置有:左岸连接段、三线单级船闸、隔流堤段、64孔泄水闸段、右岸鱼道段。枢纽主体工程布置见图1。

枢纽船闸级别为I级,主要建筑物包括船闸主体段和连接建筑物、上下游航道及其导航/靠船/隔流建筑物(隔流堤)、待闸锚地等。三线船闸并排布置共用上下游航道,上游航道长9.4 km,底高程0.15 m;下游航道长5.0 km,底高程设为-1.85 m。船闸上下游航道平面布置见图2。

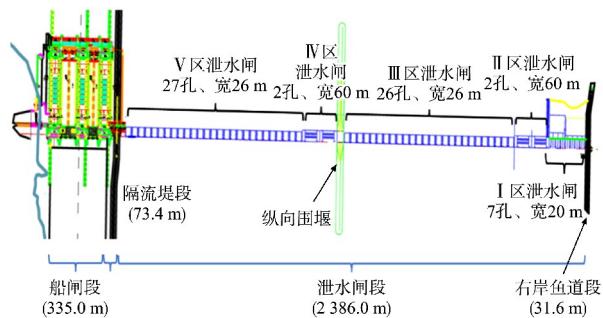


图1 枢纽主体工程布置

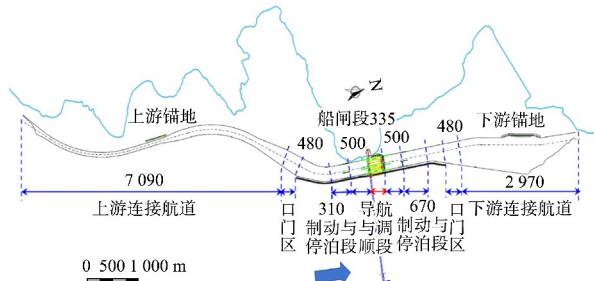


图2 枢纽上下游航道平面布置 (单位: m)

## 2 物理模型

### 2.1 模型设计

物理模型采用几何比尺为1:125的正态模型,依据2020年实测鄱阳湖入江水道1:10 000地形资料进行制模,确定枢纽上游16.0 km(星子)、下游10.0 km(湖山)作为物理模型范围。枢纽水工建筑物采用灰塑板和有机玻璃按照1:125比尺制作。设计模型长210 m,最大宽度约70 m,占地约7 800 m<sup>2</sup>。

### 2.2 测控布置

一期围堰由现状航道通航,试验于航道内设置36个水位观测点和3处表面流场观测区(闸址及上下游断面);二期围堰和运营期由设计航道通航,并于航道内设置36个水位观测点和13处表面流场观测区(口门区、连接段等重点关注区域)。一期围堰现航道测控布置见图3a),二期围堰及运营期设计航道分区及测控布置见图3b)。

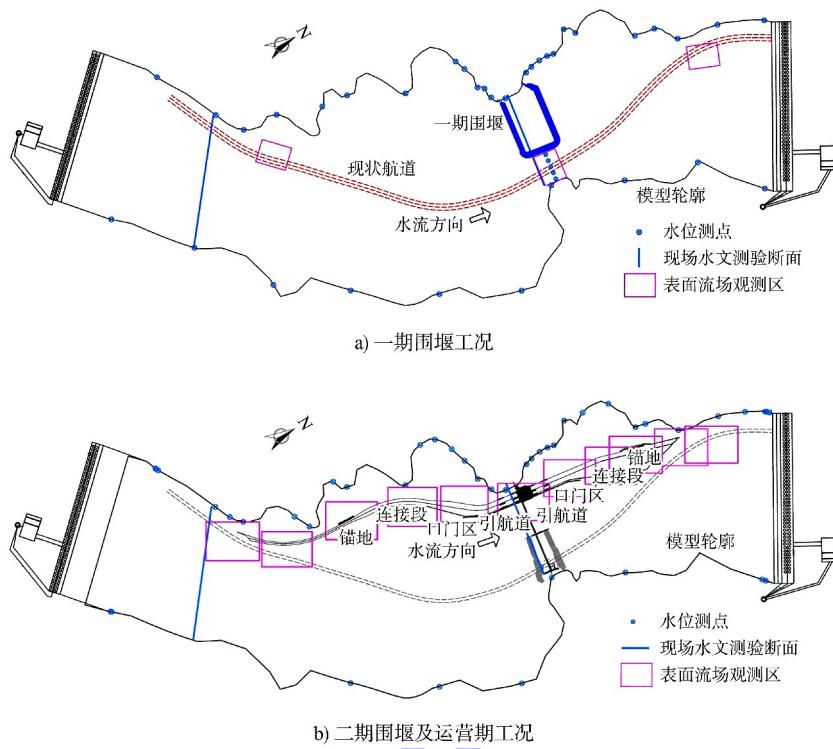


图 3 测控布置

### 3 工况选取

施工期导流建筑物导流标准为 10 a 一遇洪水位。施工期通航水流条件工况选择上游最低通航水位、平滩最大流量、10 a 一遇洪水位、上下游较大水位差、历史最大流量、倒灌最大流量 6 种情况。运营期枢纽通航水流工况根据规范要求包含: 设计最大通航流量、设计最小通航流量和最不利工况, 并针对历史实测水文条件, 根据“相同水位取最大流量、相同流量取最低水位”原则选取偏不利工况。施工期及运营期工况选取见表 1。

表 1 施工期及运营期工况选取

时期	工况编号	星子流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	湖山水位/m	备注
施 工 期	WY2-1 (WY1-1)	2 250	6.13	上游最低通航水位
	WY2-2 (WY1-2)	7 580	9.38	平滩最大流量
	WY2-3 (WY1-3)	23 500	17.41	10 a 一遇洪水位
	WY2-4	16 500	13.03	上下游较大水位差
	WY2-5	31 900	18.71	历史最大流量
运 营 期	WY2-DG (湖山流量)	13 600 (星子水位)	16.50	倒灌最大流量

续表1

时期	工况编号	星子流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	湖山水位/m	备注
	FK-1	2 250	6.13	上游最低通航水位
	FK-2	7 580	9.38	平滩最大流量
	FK-3	14 500	20.47	最高通航水位最大流量
运 营 期	FK-4	26 700	17.53	20 a 一遇流量
	FK-5	31 900	18.71	历史最大流量
	FK-6	16 500	13.03	上下游较大水位差
运 营 期	TK-1	1 980	5.85	上游最低通航水位
	TK-2	6 500	8.63	I 区下泄最大流量
	TK-3	11 800	13.20	I、III 区下泄最大流量
	FK-DG (湖山流量)	13 600 (星子水位)	16.59	倒灌最大流量

注: WY1 为围堰一期工况, WY2 为围堰二期工况, FK 为运营期敞泄工况, TK 为运营期控泄工况, DG 为倒灌工况。

### 4 试验分析

#### 4.1 设计方案

##### 4.1.1 一期围堰

物模试验结果表明上游来流量增加时, 断面测点流速相应增加, 在 10 a 一遇洪水流量工况下, 现状航道范围内最大合流位于一期围堰束窄区,

流速约  $1.87 \text{ m/s}$  未超规范限值。此外, 受壁面作用和水流剪切的影响, 在束窄段围堰附近形成较小的回流, 回流区距航道航线距离大于  $100 \text{ m}$ , 不影响正常通航。

#### 4.1.2 二期围堰

物模试验结果表明二期围堰各工况下设计航道各区段纵向流速均满足通航要求。对于横向流速, 当上游来流较大时( $Q=16\,500, 23\,500, 31\,900 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 在隔流堤横向绕流以及VI、V区泄水闸过流引起的卷吸作用影响下, 上游航道有效口门区部分区域横向流速超标, 最大达  $0.41 \text{ m/s}$ , 位于隔流堤堤头附近(图4), 不满足通航安全要求。受上游地形以及隔流堤绕流作用影响, 下游待闸锚地段在大流量工况下生成明显回流(图5), 最大横向流速为  $0.46 \text{ m/s}$ , 最大回流速度为  $0.32 \text{ m/s}$ , 对船舶停靠产生较大影响。

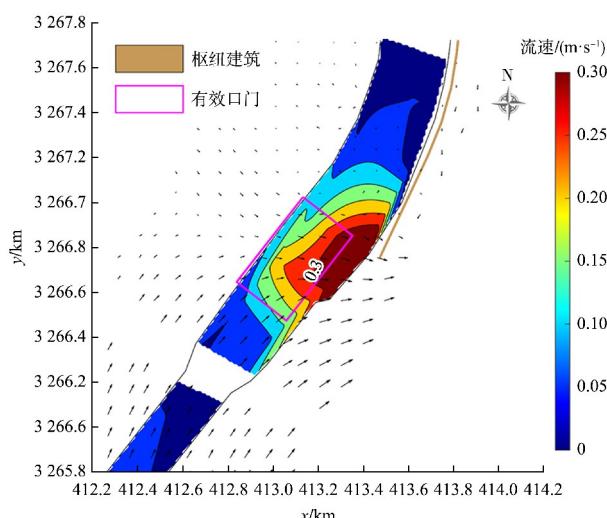


图4 工况 WY2-5 上游口门区横向流速分布



图5 工况 WY2-5 下游锚地区域流迹线

#### 4.1.3 运营期

物模试验结果表明, 各工况下设计航道内各区段纵向流速满足通航要求。对于横向流速, 在敞泄  $26\,700$  万、 $31\,900 \text{ m}^3/\text{s}$  流量条件下, 隔流堤引起的横向绕流及VI、V区泄水闸过流引起的卷吸作用导致上游口门区部分区域横向流速超标, 最大值为  $0.44 \text{ m/s}$ (图6), 位于隔流堤堤头附近, 未满足通航要求。随着流量的增大, 下游锚地生成较明显的回流区(图7), 最大横向流速为  $0.26 \text{ m/s}$ , 最大回流速度为  $0.12 \text{ m/s}$ , 对通航影响较小。

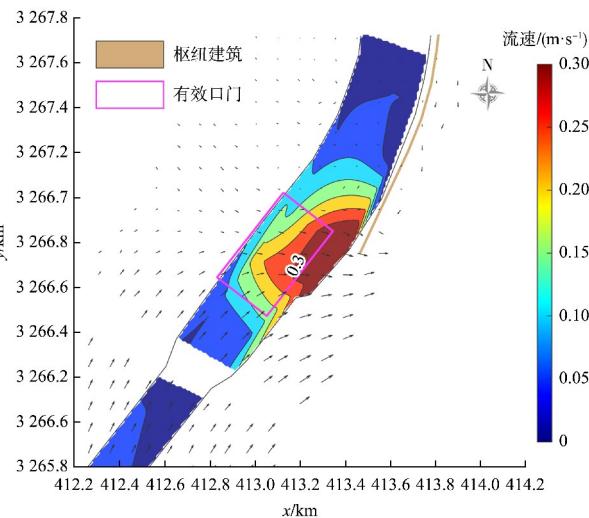


图6 工况 FK-5 上游口门区横向流速分布



图7 工况 FK-5 下游锚地区域流迹线

综上所述, 物模试验结果表明在  $10 \text{ a}$  一遇洪水流量下, 一期围堰现状航道通航水流条件满足船舶通航要求。设计航道在二期围堰及运营期工况下的主要问题为: 大流量条件下航道上游有效口门区横向流速超标以及下游锚地存在明显回流,

尚需进一步优化。

#### 4.2 优化方案

针对原设计航道上游有效口门区横向流速超

标与下游待闸锚地存在回流的问题提出 7 种优化方案, 具体方案措施见表 2, 优化布置见图 8。通过多种工况试验比选, 确定最终优化方案。

表 2 航道优化方案

区域	方案	优化措施	方案内容	试验工况
上游口门区	1	上游口门区至锚地航段右侧洲滩进行挖滩, 形成一个边坡坡比为 1:4 的 5.0 m 高程平台, 挖方量约 810 万 $m^3$	WY2-3	
	2	上游隔流堤弯曲段角度调小一半( $10^\circ$ ), 上游航道相应调整	WY2-4	
	3	上游隔流堤弯曲段角度完全调直, 上游航道相应调整	WY2-5	
	4	方案 1 与方案 2 内容组合	FK-3	
	5	方案 1 与方案 3 内容组合	FK-4	
下游待闸锚地	6	下游待闸锚地航道对面设置隔流墩, 墩柱直径 4 m, 并排布置 50 个, 间距 4 m	FK-5	
	7	下游锚地向下迁移至 6.5 km 处的滩地	FK-6	
			FK-DG	TK-3

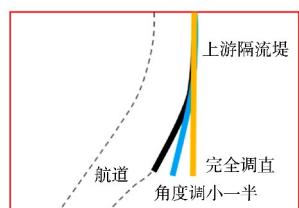


图 8 优化方案

为减少物模试验工程量, 针对上游口门区优化措施利用数学模型辅助设计, 模型试验表明: 方案 1 和 2 工程实施后上游有效口门区最大横向流速仍大于 0.3 m/s; 方案 3~5 有效口门区最大横向流速均小于 0.3 m/s, 但方案 3 和 5 隔流堤右侧存在较大范围的回流, 影响泄水闸泄流, 因此推荐方案 4 优化上游口门区的通航水流条件。

针对下游待闸锚地回流较大的问题, 在物理模型中测试了方案 6 和 7 的优化效果。V 区泄水闸的水流沿隔流堤下行, 至堤头下游约 1 km 的位置明显进入设计航道范围, 剪切船闸下游左侧静水区, 造成锚地区域大范围回流。方案 6 在此区域设置隔流墩(图 9), 以消减进入锚地区的水流流速, 隔流墩设计为直径 4 m 的圆柱体, 间距 4 m, 并排布置 50 个。

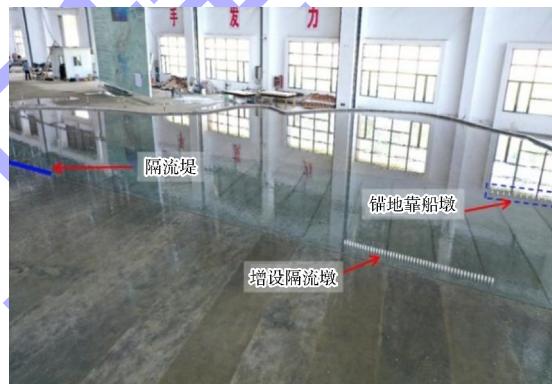


图 9 隔流墩平面布置

物模试验结果表明方案 6 设置隔流墩后下游锚地附近的流态更加紊乱, 尽管在减小流速方面略有成效, 但效果不佳, 未消除下游待闸锚地回流。方案 7 将锚地下移至 6.5 km 滩地后流态平顺, 避开下游的回流区域, 满足通航条件。

最终优化方案在上游口门区采用方案 4, 上游口门区至锚地航段右侧洲滩进行挖滩, 减少了上游航道隔流堤头流量聚集, 使流量在上游连接段提前疏散至主流区, 降低上游口门区横向流速。随着上游隔流堤调整, 上游航道也相应地进行调整, 增加了有效口门区与隔流堤之间的无效宽度, 使口门区水流更加平缓。口门区上游航道顺直, 避免了弯曲航段造成主流偏移与顶冲作用, 确保船舶安全快捷通航。下游待闸锚地采用方案 7, 将下游锚地挪至闸址下游约 6.5 km 远的滩地处, 避免了原方案下游锚地区域存在回流的影响。

### 4.3 优化方案成果

#### 4.3.1 二期围堰

物模试验结果表明：优化后各工况下设计航道各区段内纵向流速均满足相关通航要求。WY2-4 ( $16\ 500\ m^3/s$ ) 和 WY2-5 ( $31\ 900\ m^3/s$ ) 流量条件下，上游口门区存在横向流速大于  $0.30\ m/s$  的区域，最大横向流速分别是  $0.41$ 、 $0.45\ m/s$ ，均在设计航道有效口门区范围之外，有效口门区内的最大横向流速分别是  $0.21$ 、 $0.16\ m/s$ ，满足规范要求（图 10）。优化后，下游待闸锚地附近水域流态平顺无回流覆盖（图 11）。

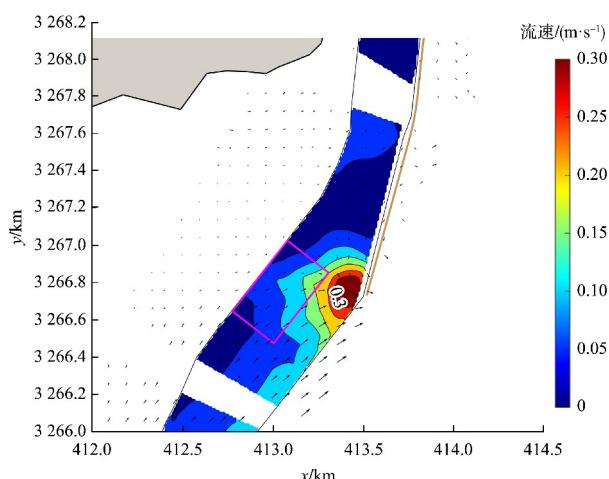


图 10 工况 WY2-5 优化后上游口门区横向流速分布



图 11 工况 WY2-5 优化后下游锚地区域流迹线

#### 4.3.2 运营期

物模试验的结果表明：各工况下设计航道各分区纵向流速均满足相关通航的要求。航道各区

段横向流速随流量增加而增大，FK-4、FK-5、FK-6 流量条件下，口门区存在流速大于  $0.30\ m/s$  的区域，最大横向流速分别为  $0.34$ 、 $0.31$ 、 $0.35\ m/s$ ，均在设计航道有效口门区范围之外，有效口门区内的最大横向流速分别是  $0.13$ 、 $0.11$ 、 $0.16\ m/s$ ，满足规范要求（图 12）。方案优化后，下游待闸锚地附近水域流态平顺无回流覆盖（图 13）。

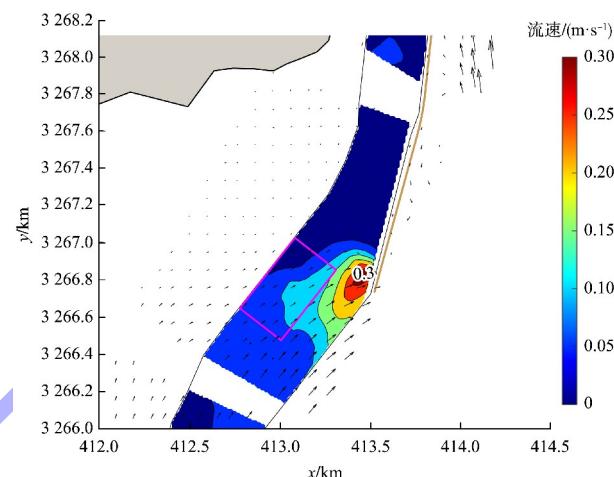


图 12 工况 FK-5 优化后上游口门区横向流速分布



图 13 工况 FK-5 优化后下游锚地流迹线

### 5 结论

1) 一期围堰现状航道在  $10\ a$  一遇洪水工况下未产生不良流态，最大合流流速为  $1.87\ m/s$ ，满足规范要求。

2) 二期围堰和运营期，设计航道在大流量工况下 ( $16\ 500\ m^3/s$  及以上) 存在上游有效口门区横向流速超标和下游待闸锚地回流较大的问题。

3) 通过优化航道及上游隔流堤并下移下游待闸锚地, 各典型工况下二期围堰和运营期上游有效口门区最大横向流速分别为 0.21 和 0.16 m/s, 下游待闸锚地附近区域流场较为平顺, 在现有工况条件下, 枢纽工程河段航道通航水流条件满足通航要求。

### 参考文献:

- [1] 段元振, 邹开明. 湘江湘祁枢纽船闸下游引航道口门区通航水流条件影响及对策 [J]. 水运工程, 2022(4): 116-121, 137.
- [2] 苏莹, 付菁, 张春泽, 等. 北江清远枢纽三线船闸通航水流条件及优化措施 [J]. 水运工程, 2022(6): 150-157, 189.
- [3] 王建平, 杨聿, 张金明, 等. 大藤峡水利枢纽船闸下游引航道口门区方案优化研究 [J]. 人民珠江, 2016, 37(4): 59-64.
- [4] 赵明辉, 汤雷, 张建勋, 等. 盘龙寺拦河闸枢纽引航道模型试验研究 [J]. 水利水电技术, 2017, 48(12): 101-105.
- [5] 王建平, 邢方亮, 陈奕芬. 弯曲河道船闸口门区通航水流条件优化 [J]. 水运工程, 2019(11): 86-91.
- [6] 朱红, 郝品正. 导流墩改善船闸引航道口门区水流条件试验研究 [J]. 水道港口, 2005, 26(2): 109-112.
- [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] 李君涛, 张公略, 冯小香. 导流墩改善口门区水流条件机理研究 [J]. 中国港湾建设, 2011(2): 1-3.
- [9] 李金合, 李君涛, 郝媛媛. 湘江长沙综合枢纽通航水流条件及改善措施研究 [J]. 水道港口, 2008, 29(6): 414-418.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 87 页)

- [3] SYMMANK L, NATHO S, SCHOLZ M, et al. The impact of bioengineering techniques for riverbank protection on ecosystem services of riparian zones [J]. Ecological engineering, 2020, 158.
- [4] JOHN S, CHRISTOPHER H, NATHAN C. Failure modes in cedar tree revetments: Observations on rivers and streams in eastern Kansas, USA [J]. River research and applications, 2022, 38(7): 1285-1295.
- [5] 陈小华, 李小平. 河道生态护坡关键技术及其生态功能 [J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1168-1176.
- [6] 潘美元, 王晓燕, 王欣霖. 透水框架群促淤护滩效果 I: 平面布置形式 [J]. 水运工程, 2018(11): 5-10, 24.
- [7] SEON P H, WOO J D, SELENGE E, et al. Evaluation of stability for ecological revetment method with stone mattress and vegetation mound using ANSYS fluent [J]. International Journal of u- and e-service, science and technology, 2016, 9(1): 363-372.
- [8] RECKING A, PITON G, MONTABONNET L, et al. Design of fascines for riverbank protection in Alpine rivers: insight from flume experiments [J]. Ecological engineering: The Journal of Ecotechnology, 2019, 138(C): 323-333.
- [9] 廖鹏, 丁天平, 郑龙, 等. 箱体与插板组合型生态护岸消浪试验研究 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5): 815-820.
- [10] 张君, 洪波, 许国辉, 等. 波浪作用下新型六角块体固沙效果试验研究 [J]. 水运工程, 2020(8): 8-14.
- [11] 丁兵, 刘同宦, 雷文韬, 等. 四面六边透水框架防护层稳定性试验 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(2): 251-256.
- [12] 费晓昕, 张幸农. 平顺抛石护岸水毁速率试验研究 [J]. 人民长江, 2021, 52(11): 207-211.
- [13] 路鼎. 新型生态护岸结构破坏机理研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [14] 党宛笛. 基于颗粒流方法的洪水冲刷下岸坡变形破坏研究: 以北洛河甘泉段为例 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [15] 咸国盛, 徐骏, 王强, 等. 浅谈平顺抛石护岸质量控制 [J]. 科技创新与应用, 2014(2): 161.

(本文编辑 王传瑜)