



东江沥口枢纽坝下游航道整治模型试验研究 *

叶雅思¹, 徐观兵^{2,3}, 张金明^{2,3}

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200;
2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611;
3. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东 广州 510611)

摘要: 东江航道整治条件复杂, 模型试验研究能够为航道整治技术方案的可行性提供重要技术支撑和依据。通过坝下游近坝段河床演变、水流条件分析及航道整治模型, 研究不同整治方案的合理性与整治效果, 提出航道整治推荐方案。结果表明: 航道整治设计方案在设计流量下嵒派浅滩、横岭浅滩以及观音阁浅滩下游段航道水深大于 2.5 m, 猛虎跳墙浅滩与观音阁上游段航槽水深小于 2.5 m; 推荐航槽整治方案, 设计流量下航槽沿程水深均大于 2.5 m, 沿程水位降低值为 0.77~2.26 m; 各浅滩段局部采砂后, 其上游水位均有不同程度的降低, 局部航槽采砂后, 航槽水深不满足 2.5 m 的要求。试验河段为采砂河段, 而采砂对航道整治方案的影响较为敏感, 东江沥口枢纽坝下游采用航道整治推荐方案, 并严格控制河道采砂行为。

关键词: 东江河道; 沥口枢纽; 航道整治; 模型试验

中图分类号: U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0163-06

Experimental study on downstream waterway regulation of Likou Dam in Dongjiang River

YE Yasi¹, XU Guanbing^{2,3}, ZHANG Jinming^{2,3}

(1. Hunan Provincial Communicational Planning Surveying & Designing Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China;
2. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China;
3. Key Laboratory of the Pearl River Estuary Regulation and Protection of Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China)

Abstract: The condition of waterway regulation in Dongjiang River is complicated, so the model study can provide important technical support and basis for the feasibility of waterway regulation technical scheme. Through the analysis of riverbed evolution, flow condition and channel regulation model, the rationality and regulation effect of different regulation schemes are studied, and the recommended channel regulation schemes are put forward. The results show that the water depth of Lanpai Shoal, Hengling Shoal and downstream section of Guanyinge Shoal is more than 2.5 m. The water depth of Menghutiaoqiang shoal and upstream section of Guanyinge trough is less than 2.5 m. The water depth along the channel is more than 2.5 m under the designed flow, and the water level reduction value along the channel is between 0.77 and 2.26 m. After local sand mining, the water level of the upper reaches of each shoal section is reduced to different degrees, and the water depth of the trough cannot meet the requirement of 2.5 m after local sand mining. The reach is sand mining, and the influence of sand mining on channel regulation scheme is very sensitive. The recommended channel regulation scheme is adopted and the sand mining behavior is strictly controlled for the channel regulation downstream of Likou Dam in Dongjiang River.

Keywords: Dongjiang River; Likou Dam; waterway regulation; experimental study

收稿日期: 2023-09-17

*基金项目: 国家自然科学基金项目(50909110); 广州市科技计划项目(201804010202)

作者简介: 叶雅思 (1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事航道整治相关研究。

通讯作者: 张金明 (1978—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事航道整治相关研究。E-mail: 237367310@qq.com

东江是珠江水系干流之一^[1], 集水面积 3.534 0 万 km², 河长 562 km, 平均年径流量 257 亿 m³。东江也是广东省内河主要水运通道之一, 承接产业转移和内联外通的任务, 通过东江水运通道可以使全省水运西通桂贵云, 东接赣闽地区, 全面对接粤港澳大湾区^[2]。沥口水利枢纽位于东江干流河段, 控制面积 1.712 4 万 km²^[3]。2008 年沥口水电站施工后, 河源—惠州段航道为断航状态, 根据广东省内河航道发展规划和区域经济发展的要求, 东江应充分利用水资源优势, 加快航道建设步伐, 提档升级, 为带动流域经济发展发挥积极作用^[4-5]。

研究河段存在猛虎跳墙浅滩、观音阁浅滩、岗派浅滩和横岭浅滩, 浅滩段存在航槽水深小于 2.5 m 的碍航段, 且各浅滩段航道沿程水面比降变化较大, 河段航槽水深不满足Ⅲ级航道的通航标准。因此, 为保障粤港澳大湾区的经济发展, 需要开展东江航道整治和二线船闸建设^[6-8]。考虑到东江航道整治条件复杂、方案确定难度大, 已有的研究表明模型研究成果是航道整治技术和二线船闸总平面布置可行性的重要技术支撑, 也是二线船闸平面布置方案是否满足防洪要求的重要技术支撑和依据, 有必要开展模型试验研究工作^[9-12]。

基于此, 本文开展坝下游近坝段河床演变、水流条件分析及航道整治定床模型研究。通过实测资料结合模型试验, 研究坝下游近坝段的航道现状条件, 观测典型流量下的水位、水面比降和流速流态的变化情况; 通过构建航道整治定床模型, 研究不同整治方案的合理性与整治效果, 从而提出推荐方案, 相关研究结果以期为东江航道建设提供理论依据与数据支撑。

1 试验概况及方法

1.1 整治方案及模型范围

整治方案为设计航道整治线宽 150 m, 航槽底宽 60 m、航道最小水深 2.5 m、转弯半径 480 m, 航槽采用梯形或复式槽两种形式, 设计航槽整治

长度 10.3 km, 新建丁坝 22 座, 加高或加长丁坝 31 座。沥口枢纽坝下近坝段航道整治物理模型试验模拟范围为沥口枢纽坝轴线上游 1 km, 坎轴线下游 17 km 河段, 模拟河段全长约 18 km, 模型范围及布置见图 1。



图 1 沥口枢纽坝下近坝段航道模型范围及布置

1.2 试验工况

根据沥口枢纽下游近坝段航道整治标准及枢纽的调度运行方式, 确定本次试验工况见表 1。

表 1 沥口枢纽下游近坝段航道整治模型试验工况

工况	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	沥口枢纽坝下游 16.2 km 水位/m	备注
1	219	15.93	设计流量
2	611	17.29	整治流量
3	1 186	18.83	沥口最大发电流量
4	4 711	22.53	5 a 一遇洪水流量
5	6 139	23.55	10 a 一遇洪水流量

1.3 水位及流速验证

模型依据最新的实测水文测验资料, 对物理模型的水面线及流速进行验证, 通过调整糙率以达到相似要求。主要采用2017年4月19日水文测验成果进行, 其中上游沥口坝下流量 $317.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。模型与水文测验河道沿程水面线对比见图2a)。可见模型与水文测验成果水面线基本一致, 模型值与水文测验值差值基本在 $\pm 0.1 \text{ m}$ 以内, 满足误差要求。模型与水文测验河道流速对比见图2b)。可见模型与水文测验成果流速基本一致, 模型值与水文测验值差值基本在 $\pm 0.02 \text{ m/s}$ 以内, 满足误差要求。

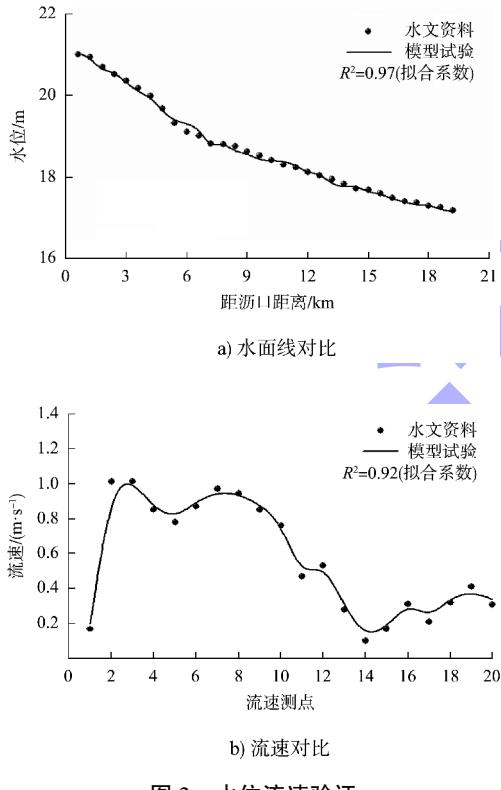


图2 水位流速验证

2 试验结果与分析

2.1 整治前

通过对典型试验工况下河段水流特性现状的量测, 分析现状条件下各浅滩段的河情河势、通航条件, 为下一步整治研究提供指导方向。

试验对现状条件下沥口枢纽—横岭浅滩河段的典型工况水面线进行测试, 本试验在研究河段共布设33个水位测点, 测点间距基本控制在500 m以内, 沿程水面线试验成果见图3。

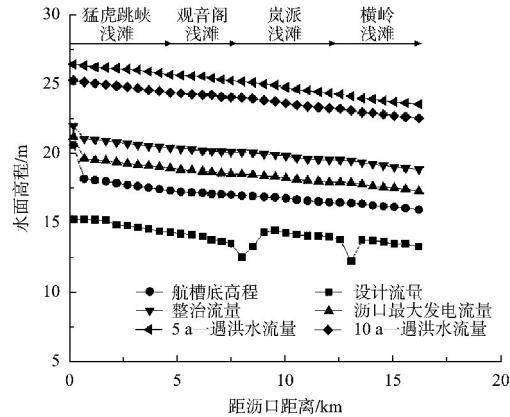


图3 现状河道沿程水面线

在设计流量情况下, 现状航道中心线试验测点处的水深为 $0.66\sim 9.07 \text{ m}$, 各浅滩段均存在航槽水深小于 2.5 m 的碍航段, 且各浅滩段航道沿程水面比降变化较大(最大值 0.77%), 局部河段存在水面明显跌落现象。现状情况下, 研究河段航槽水深不满足Ⅲ级航道的通航标准, 需要进行航道整治^[13]。

2.2 设计方案

利用设计流量 $Q=219 \text{ m}^3/\text{s}$ 开展航道整治设计方案验证试验, 沿程水面线与航槽底高程对比见图4。

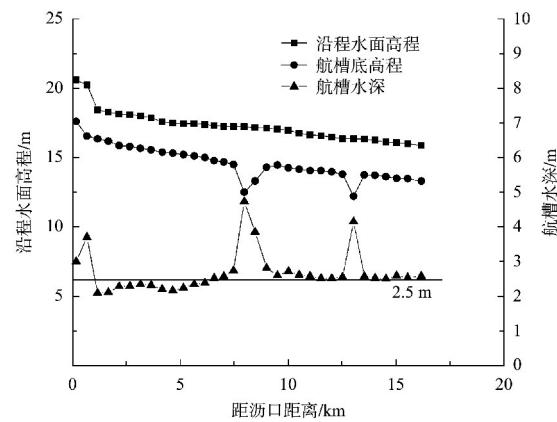


图4 设计方案航槽沿程水面线与航槽底高程对比

由图可见, 在设计流量情况下, 航道整治设计方案的岚派浅滩和横岭浅滩航道水深大于 2.5 m , 满足航槽设计水深要求; 观音阁浅滩下游段航槽水深满足 2.5 m 要求; 猛虎跳峡浅滩与观音阁上游段航槽水深小于 2.5 m 的设计要求, 需进行航道深度优化。

试验测得横岭浅滩航槽流速在 1.3 m/s 以内，岚派浅滩流速在 1.6 m/s 以内，猛虎跳峡浅滩与观音阁上游段航槽流速值在 1.8 m/s 以内。由于流速过大不利于航行安全^[14]，在水深能满足通航要求前提下，可以对航槽流速进行优化。

2.3 优化方案

针对设计方案猛虎浅滩全段及观音阁浅滩部分段航槽水深不满足设计要求的问题，试验首先在设计航道走向的基础上，通过航槽开挖满足水深要求，再根据航槽沿程河势对航道走向以及航槽开挖形式进行调整。试验主要对航槽水深不满足要求的猛虎跳峡浅滩和观音阁浅滩进行研究。

2.3.1 优化方案 1

优化方案 1 在保持现有航槽底坡比不变的情况下，将猛虎跳峡浅滩和观音阁浅滩段航道底高程统一降低 1.0 m，验证航槽挖深对航深的影响，沿程水面线与航槽底高程对比见图 5。

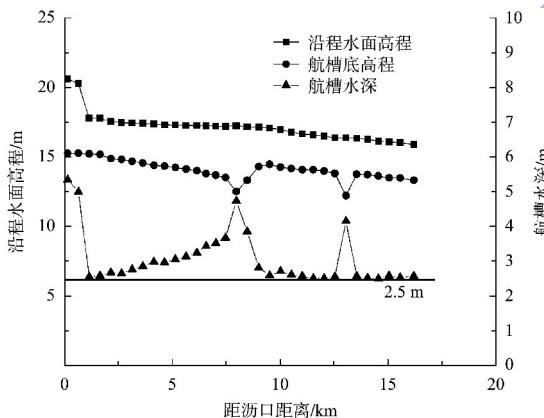


图 5 优化方案 1 航槽沿程水面线与航槽底高程对比

由图 5 可见，在猛虎跳峡浅滩和观音阁浅滩段航槽底高程统一降低 1.0 m 后，航槽水深均大于 2.5 m，尤其是观音阁浅滩段，航槽水深大于 3.0 m，向上游航槽水深逐渐减小，主航道与船闸口门区连接段水深为 2.6 m，局部航槽水深远大于 2.5 m 要求。

2.3.2 优化方案 2

在优化方案 1 的基础上，对航槽水深较大的位置进行回填，回填深度为 0.3~1.0 m，回填深度自下而上逐渐减小，沿程水面线与航槽底高程对比见图 6。

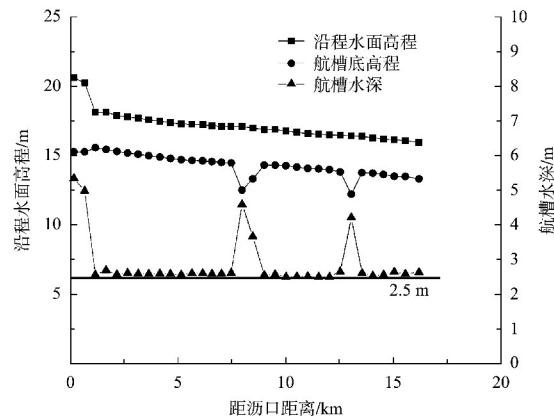


图 6 优化方案 2 航槽沿程水面线与航槽底高程对比

由图 6 可见，各浅滩段航槽水深均大于 2.5 m，航槽水深满足要求，考虑后续航槽轴线以及航槽结构形式的调整，各浅滩段均预留一定的水深。

试验测得优化方案 2 横岭浅滩航槽流速在 1.3 m/s 以内，岚派浅滩流速在 1.6 m/s 以内，猛虎跳峡浅滩与观音阁上游段航槽流速值在 1.8 m/s 以内。

2.3.3 优化方案 3

在优化方案 2 的基础上，对航槽形态进行优化。在沥口枢纽坝轴线下游 520 m 处设置 1 道潜坝（潜坝顶高程 21.0 m）以保护枢纽的安全，潜坝下游进行河道开挖，开挖高程与右侧航道底高程一致。调整观音阁弯道段上游左岸丁坝的长度，保证中小流量航槽流路基本一致，同时根据弯道上游段航槽内的流速分布，适当的将航槽中心线向右岸偏移。将观岚大桥上游约 1.0 km 的航槽底宽调整至 120 m，航槽中心线调整至设计方案的右侧边线处，同时在左岸设计 4 座丁坝，自上而下丁坝长度分别为 95、105、100 和 50 m。将岚派浅滩下游花果地对岸最后 3 座丁坝长度分别缩短（自上而下）20、30 和 25 m，沿程水面线与航槽底高程对比见图 7。

由图 7 可见，各浅滩段航槽水深大于 2.5 m，横岭浅滩航槽流速在 1.3 m/s 以内，岚派浅滩流速在 1.4 m/s 以内，猛虎跳峡浅滩与观音阁上游段航槽流速值在 1.5 m/s 以内。优化方案 3 与方案 2 相比，流速较小。

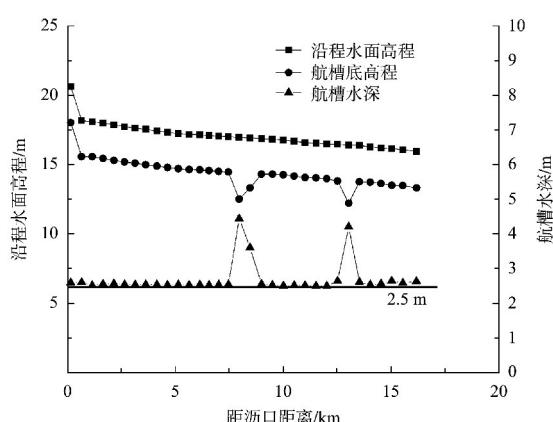


图 7 优化方案 3 航槽沿程水面线与航槽底高程对比

2.3.4 结果对比

对各方案航槽水深结果进行对比见图 8, 可见工程前各浅滩段航槽水深均小于 2.5 m; 设计方案中, 横岭浅滩和嵒派浅滩水深大于 2.5 m, 但猛虎跳峡浅滩与观音阁浅滩航槽水深依然小于 2.5 m; 在优化方案中, 各浅滩水深均大于 2.5 m。

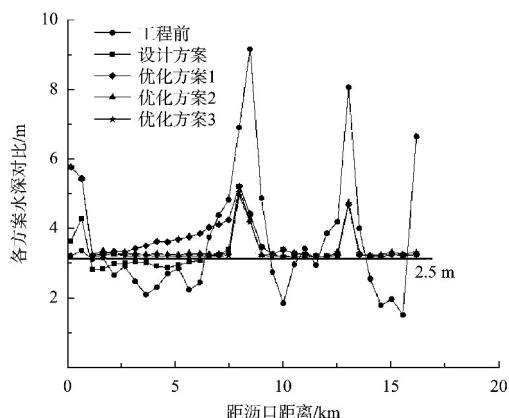


图 8 各方案航槽水深对比

综上, 3 个优化方案的航槽水深均大于 2.5 m, 但优化方案 3 航槽流速较其他方案小, 流态平顺, 因此作为推荐方案。

2.4 河道采砂试验

研究河段属于东江干流规划的采砂河段, 实际采砂量远大于规划采砂量, 为分析河道采砂对航道的影响, 试验设计了两种采砂超挖方案, 分析采砂超挖的敏感性。

2.4.1 方案 1

仅对观音阁浅滩上游段进行局部开挖, 开挖范

围为推荐航槽、长度 2.0 km、深度为航槽以下 6.0 m, 平均开挖宽度 200 m, 总挖砂量约 240 万 m³。

局部超挖后沿程水位及变化见图 9。可见局部超挖后, 其上游水位降低值为 0.01~0.25 m, 距离超挖点越近影响越大。

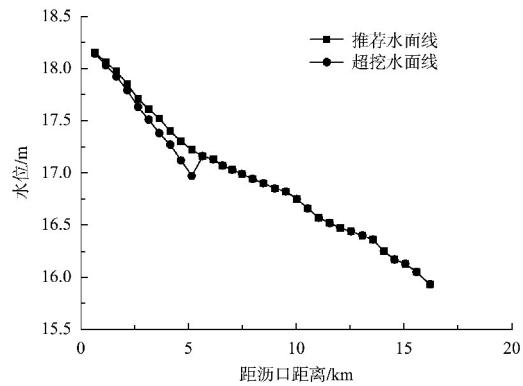


图 9 采砂超挖方案 1 航槽局部超挖后沿程水位及变化

2.4.2 方案 2

考虑到局部超挖的影响以及河道可挖的位置, 试验对各浅滩段进行局部超挖, 其中, 观音阁浅滩上游段开挖同超挖方案 1, 观岚大桥上游 500 m, 嵒派浅滩中部 800 m, 横岭浅滩进口段 800 m, 开挖深度均为航槽以下 6.0 m, 平均开挖宽度 120 m, 总挖砂量约 390 万 m³。

局部超挖后沿程水位及变化见图 10。可见各浅滩段局部超挖后, 其上游水位均有不同程度的降低, 水位降低值为 0.01~0.29 m, 主要集中于观音阁浅滩段上下游, 局部航槽超挖后, 航槽水深不满足 2.5 m 的要求, 因此要严格控制航槽的超采。

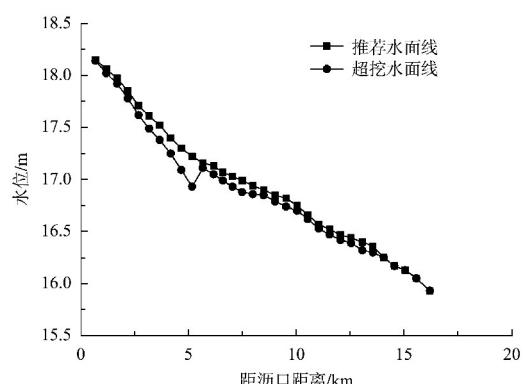


图 10 采砂超挖方案 2 航槽局部超挖后沿程水位及变化

3 影响河床形态变化的因素

研究河段河床形态变化受众多因素影响,而近期人类活动影响最为显著^[15]。通过对河道河床滩槽地形分析可知,研究河段的猛虎跳峡浅滩、观音阁浅滩、嵒派浅滩和横岭浅滩两岸岸线稳定,近年内无明显变化。受航道整治、河道泄流以及人工无序采砂的多重影响,滩槽形态变化主要发生在主槽和丁坝间的泥沙淤积区内,而两岸边滩处于缓慢的淤积中,其中猛虎跳峡浅滩河道主槽基本处于缓慢的自然下切过程中;观音阁浅滩与嵒派浅滩近期受人工挖沙和自然回淤影响,河床处于变化较为剧烈的状态;横岭浅滩近期河床处于逐渐下切的状态,且下切量呈增长趋势。人类采砂是河床及河势发生较大调整的主要原因^[16],工程河段又作为近期采砂规划的采砂区,在经济利益驱动下的偷挖、超采行为势必对研究河段河势产生较大影响。通过航槽局部挖深来模拟河道超挖的敏感性影响,试验表明观音阁浅滩上游段2.0 km 的局部超挖后,上游水位降低值为0.01~0.25 m,距离超挖点越近影响越大。各浅滩段局部超挖后,其上游水位降低值为0.01~0.29 m,主要集中于观音阁浅滩段上下游,局部航槽超挖后,航槽水深不满足2.5 m 的要求。因此,在完成航道整治后,需要严格控制河段采砂,以确保河床形态不发生较大变化,保护通航安全。

4 结论

1) 研究河段航槽水深现状不满足Ⅲ级航道的通航标准,需要进行航道整治;工程前各浅滩段航槽水深均小于2.5 m,航道整治设计方案依然有猛虎跳峡浅滩与观音阁浅滩航槽水深小于2.5 m,航道整治优化后的推荐方案各浅滩水深均大于2.5 m,航槽流速较其它方案小。

2) 试验河段为采砂河段,而采砂对航道的影响非常敏感,局部航槽超挖后,会导致航槽水深不满足2.5 m 的要求。

3) 东江沥口枢纽航道整治工程采用航道整治优化后的推荐方案,并且需要严格控制河道采砂行为。

参考文献:

- [1] 杨芳,邹华志,卢陈,等.东江三角洲咸潮加剧原因和对策探讨[J].中国水利,2022(4): 28-30.
- [2] 陈奕芬,黄春华,王建平.航道疏浚及筑坝固滩工程对东江河段鱼类栖息地影响研究[J].人民珠江,2023,44(S1): 84-88, 94.
- [3] 刘超,张世宝,张金明,等.沥口枢纽上游口门区通航水流条件试验研究[J].水运工程,2019(4): 141-146.
- [4] 郑健良.东江干流开发高等级航道方案技术研究[J].珠江水运,2012(15): 73.
- [5] 王冉,林桦,师雯.东江航道扩能升级对沿江经济的贡献研究[J].物流技术,2018,37(9): 99-102.
- [6] 李艳,刘亚辉,周勤,等.东江(河源至石龙段)航道整治研究技术难点分析[J].人民珠江,2019,40(1): 20-24.
- [7] 何海胜,杨志明,蒋昌波,等.东江航道潜能分析与开发研究:Ⅱ.东江中游优良河段河相关系分析[J].中国水运(下半月),2016,16(1): 51-54.
- [8] 何海胜,杨志明,蒋昌波,等.东江航道潜能分析与开发研究:Ⅰ.枢纽调节下东江中游非恒定流传播特性[J].中国水运(下半月),2015,15(12): 55-57, 66.
- [9] TAO G L, SHI X L, JIANG C H, et al. Experimental study of dredged sediment sample analysis and solidification in waterway regulation engineering [J]. Applied mechanics and materials, 2014, 3489(1278): 638-640.
- [10] LIU P, WANG N, LEI X. Structural design of the waterway regulation project of dongbei waterway in the lower reaches of Yangtze River [J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2019, 283(1).
- [11] 杨静黎,蒋孜伟.长江上游关刀碛急滩段航道整治模型试验研究[J].科学技术创新,2019(20): 105-106.
- [12] 陈希,范鹏朋,许光祥,等.长江上游莲石滩航道整治模型试验[J].水运工程,2019(10): 130-133, 153.
- [13] 杨靓,袁其军,李歌清,等.内河航道发展规划技术等级评定[J].水运管理,2021,43(5): 23-25.
- [14] 杨晓霞.弯曲航道水流对船舶通航安全的影响[D].郑州:华北水利水电大学,2022.
- [15] 孙丽荣,陈涟,李荣辉.长江下游扬中河段演变与影响因素分析[J].水利建设与管理,2020,40(12): 6-12.
- [16] 刘朋.山区河道采砂对河床演变影响分析[J].水科学与工程技术,2016(5): 15-17.

(本文编辑 赵娟)