



黑沙洲水道航道整治二期工程 水文观测方法与实践

江木春, 江午浩

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要: 针对黑沙洲水道分汊多、流量大且长江下游感潮河段水流复杂的综合特点, 对水文观测资料进行分析和总结。结合航道整治二期工程建设的现场实践工作, 对水文观测中的表面流速流向测量、比降观测、水文断面测量等进行深入研究, 依托现代新设备和新技术, 优化布设水文断面和水尺位置, 高效组织实施, 提高工作效能, 获取完整详实的水文观测数据。该方法有效解决了长江下游感潮河段水文观测中存在的问题, 为工程设计、施工及相关专题研究提供了可靠的基础资料。研究成果可为类似工程提供借鉴。

关键词: 原型观测; 纵比降; 横比降; 表面流速流向测量; 水文断面测量; 流量闭合差

中图分类号: U617, TV123

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0150-07

Hydrological observation method and practice of phase II waterway regulation project of Heishazhou waterway

JIANG Muchun, JIANG Wuhao

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: In response to the comprehensive characteristics of multiple branching and large flow of the Heishazhou waterway, as well as the complex flow of the tidal river section in the lower reaches of the Yangtze River, the hydrological observation data are analyzed and summarized. Combined with the on-site practical work of the second phase of waterway regulation project construction, in-depth research is conducted on surface velocity and flow direction measurement, gradient observation, hydrological section measurement, etc. in hydrological observation. Modern new equipment and technology are used to optimize the layout of hydrological sections and water gauge positions, efficiently organize and implement, improve work efficiency, and obtain complete and detailed hydrological observation data. This method effectively solves the problems existing in the hydrological observation of the tidal reach of the lower reaches of the Yangtze River, and provides reliable basic data for the project design, construction and related thematic research. The research results can provide reference for similar projects.

Keywords: prototype observation; vertical gradient; horizontal gradient; measurement of surface flow velocity and direction; hydrological section measurement; flow closure error

内河航道整治工程原型观测主要包括河道地形测量、水文观测、河床质和悬移质取样分析3方面的内容。目前国内内河航道整治工程水文观测项目的实施多集中在长江和珠江等内河航道中,

一般分为工可、初步设计、施工图设计、施工和后期维护效果分析等多个阶段, 有的周期长达数年, 在经历多次洪、枯水等各种复杂因素的综合影响下, 达到航道整治的目的。以长江为例, 主

收稿日期: 2024-04-28

作者简介: 江木春 (1971—), 男, 教授级高工, 从事公路、桥梁、港口和航道等工程测量工作。

要包括上游山区内河航道、中游平原地区内河航道和下游平原地区感潮河段航道,上中游航道水文条件在一段时期内相对稳定,如1天、1个月和洪、枯水期内;下游平原地区感潮河段受周期潮汐影响具有一定的自然规律,离河口越近受影响越大,且存在一定的时间差;每月、每天中不同时刻因潮汐大小不一致而不同,需通过长期科学的观测掌握水文特征及变化规律才能制定合理的技术方案。

黑沙洲水道位于长江下游安徽省铜陵市和芜

湖市之间,上起板子矶,下至高安圩,航道里程489~475 km。20世纪80年代以前,黑沙洲南、中、北3个水道分流条件基本均衡,主航道在南、中来回调整;80年代以后,中水道逐渐淤积衰亡,主航道一直稳定在南水道。南水道新港附近水深较浅,枯水期航道狭窄,有的年份需疏浚维护^[1]。天然洲洲头及右缘冲刷崩退,沿岸窜沟发展为深槽,使浅区流量减少,流速下降,航道条件恶化,成为长江下游航段的碍航瓶颈,是长江中下游地区典型需综合整治的水道,见图1^[2]。

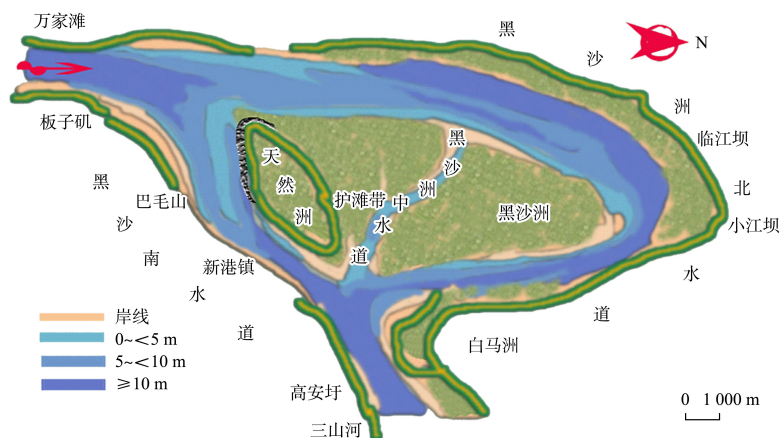


图1 黑沙洲水道河势

Fig. 1 River regime of Heishazhou waterway

1 黑沙洲水道二期整治工程

黑沙洲水道为典型的鹅头形分汊河段,汉道众多,河道演变复杂。黑沙洲水道航道整治一期工程于2011年9月竣工,为进一步改善船舶通航条件,巩固已实施完成航道整治一期工程效果,进行航道整治二期工程,航道建设标准为 $6.0\text{ m}\times 200\text{ m}\times 1\,050\text{ m}$ (水深 \times 航宽 \times 弯曲半径)^[3]。水文观测不但要满足二期工程河床演变趋势分析、方案布置和航道整治建筑物设计要求等,而且要满足物理模型试验和数学模型计算的需要,依据模型试验验证工程河段及方案的效果。根据最新水文观测结果,结合地形变化、水流条件变化和泥沙原型观测等对设计方案进行调整和优化。

二期工程治理措施以守护为主,采用梳齿坝、

护岸工程以及护岸加固工程等,稳定并抬高心滩,减弱漫滩水流,集中水流加强右槽冲刷,同时稳定边界,遏制高滩崩退和避免滩槽格局向不利方向演变等。整治工程主要为:在心滩建梳齿坝对左槽内3[#]、4[#]潜坝进行进一步加固,同时对3[#]、4[#]潜坝之间坝田冲深部位进行填槽加固,在天然洲左缘上段实施长约1 400 m护岸,对天然洲右缘险工段实施4 909 m护岸加固,对右岸新港一带已建护岸进行1 060 m水下加固^[4],以及建设整治专用标(7座建筑物)等。整治工程重点包括天然洲右缘护岸加固工程、天然洲左缘上段护岸工程、心滩梳齿坝工程、右岸新港一带护岸加固工程和左槽内潜坝加固工程等一系列工程,见图2。

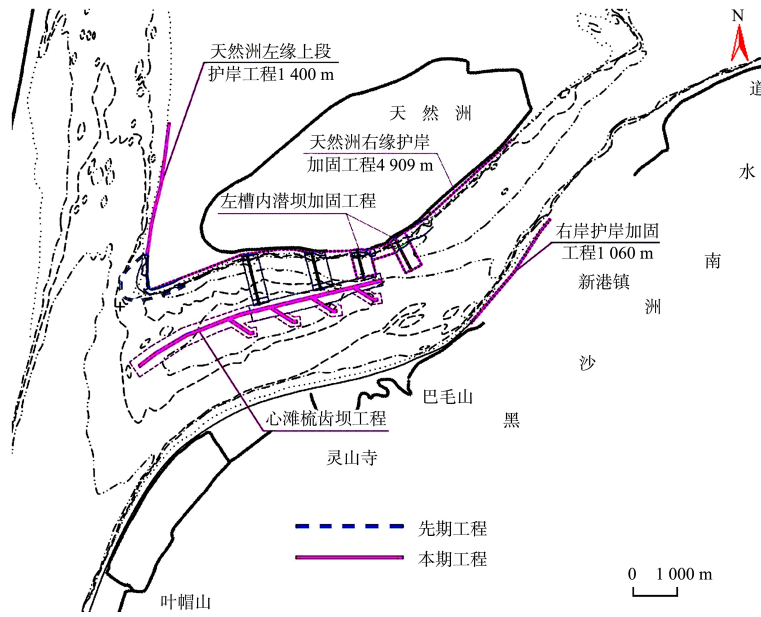


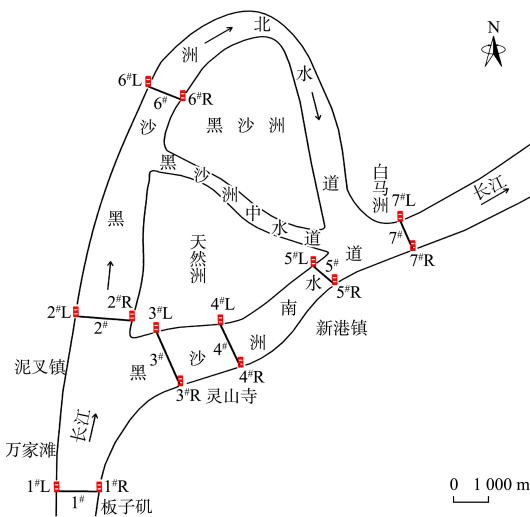
图2 黑沙洲水道整治工程
Fig.2 Heishazhou waterway regulation project

2 长江下游航道整治工程水文观测

水文观测主要包括表面流速流向测量，水位及比降观测，断面流量(流速、流向)测验等。黑沙洲水道属于长江下游感潮河段，板子矶—高安圩段无较大支流汇入，流量相对稳定，但受潮汐涨落影响较大，由于黑沙洲河段水道复杂，除中水道流量较小未考虑外，需综合考虑上游入口及下游出口处主流、北水道、南水道和航道整治工程重点区域等。沿南北水道布设水文观测断面7个，见图3。

3 表面流速、流向测量

表面流速、流向受地形、水位、风力风向、潮汐、波浪和水流障碍物等因素综合影响，呈现出复杂多样的特殊形态，是检验航道整治效果的重要手段，同一河段在不同的水文条件和自然气候条件下会呈现不同形态。表面流速、流向测量采用全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)自动定位和记录，后差分数据处理，测量前在已知点上参数校正和检核。测量时风力不大于3级，避免测得的成果失真，将GNSS接收机绑在浮标上，在起始位置开始定位和记录，再将浮标放入水中，顺水流淌，平面定位精度可达厘米级，间隔固定时间自动定位和记录，在复杂水流中保障测量精度和作业安全。流速流向线均匀分布于水道中，测量船只跟踪监测，遇到问题及时处置，浮标搁浅及时调整位置并记录相关情况。黑沙洲北水道施放5条流速流向线，南水道及主流施放8条。将表面流速、流向线绘制在地形图中的独立图层上，见图4^[5]。



注：1#断面位于上游入口，7#断面位于下游出口，6#断面位于黑沙洲北水道，2#~5#断面位于南水道整治工程重点区域，每条断面两端布设水尺，编号为1#断面左侧水尺1#L，右侧1#R。

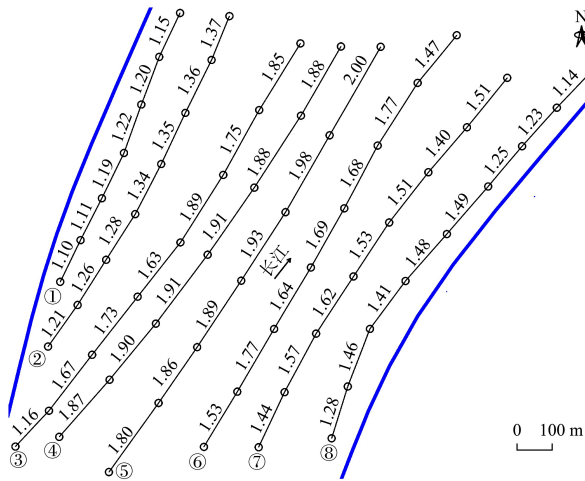
图3 水文断面及水尺分布

Fig.3 Hydrological section and water gauges distribution

对每条流速、流向线中最大、最小和平均流速流向、测量日期、风力风向、水位和涨落潮情况等进行统计，图4中第1、5、8条表面流速、流向统计结果见表1。

表 1 表面流速、流向统计
Tab. 1 Statistics of surface flow velocity and direction

条号	日期	涨落潮	水位/m	风力	风向/级	最大流速/(m·s ⁻¹)	最小流速/(m·s ⁻¹)	平均流速/(m·s ⁻¹)
1	10月16日	落潮	1.05~1.89	东南风	1~2	1.22	1.10	1.16
5	10月16日	落潮	1.05~1.89	东南风	1~2	2.00	1.80	1.91
8	10月16日	落潮	1.05~1.89	东南风	1~2	1.49	1.14	1.34



注: 点与点之间的方向表示流向, 流向线上的数值表示流速。

图 4 表面流速、流向
Fig. 4 Surface flow velocity and direction

4 水位比降观测

比降包括纵比降和横比降, 纵比降是上下游断面水位差与断面间距离的比值, 横比降是断面左右岸水位差与断面宽度的比值^[6]。当上下游断面间有支流汇入、水流障碍物导致水流变化, 或河段较长时, 纵比降出现明显变化, 需增加比降水尺, 进行分段观测。一般山区河段比降较大, 平原河段比降较小, 感潮河段还需考虑潮汐的影响^[7]。统一采用自动水位记录仪观测和记录, 提高测量精度; 统一采用北京时间, 观测前校准时间, 误差宜小于 1 min。采用人工观测对自动观测成果进行验证, 整个比降观测期间不间断观测, 将观测水位成果列表统计, 选择观测期间流量、水位较为稳定的一组水位数据进行比降计算。

水位观测共设置水尺 14 处(图 3), 水位记录仪同步观测和记录, 读数误差不大于 0.5 cm, 记

录仪设置为每 10 min 观测 1 次, 水位数据取 3 次读数平均值, 3 次读数间隔 10 s, 同步连续观测 3 d。以 2016-10-05T13:00:00 落潮稳定期的水位成果计算水位比降, 水位及比降结果见表 2、3, 水位及横比降结果见图 5。

表 2 水位及纵比降
Tab. 2 Water level and longitudinal gradient

编号	上游水位/m	下游水位/m	水位差/m	水尺间距/km	比降/‰	备注
1#L—2#L	4.862	4.798	0.064	5.258	1.22	北水道
2#L—6#L	4.798	4.731	0.067	7.950	0.84	左岸
1#L—3#L	4.862	4.782	0.080	5.490	1.46	
3#L—4#L	4.782	4.762	0.020	1.795	1.11	南水道
4#L—5#L	4.762	4.729	0.033	1.100	3.00	左岸
5#L—7#L	4.729	4.678	0.051	4.956	1.03	
1#R—2#R	4.866	4.796	0.070	5.230	1.34	北水道
2#R—6#R	4.796	4.736	0.060	7.482	0.80	右岸
1#R—3#R	4.866	4.781	0.085	3.858	2.20	
3#R—4#R	4.781	4.754	0.027	1.739	1.55	南水道
4#R—5#R	4.754	4.742	0.012	1.665	0.72	右岸
5#R—7#R	4.742	4.681	0.061	4.472	1.36	

表 3 水位及横比降
Tab. 3 Water level and horizontal gradient

编号	左尺水位/m	右尺水位/m	水位差/m	水尺间距/km	比降/‰	备注
1#L—1#R	4.862	4.866	-0.004	1.151	-0.35	主水道
2#L—2#R	4.798	4.796	0.002	1.776	0.11	
6#L—6#R	4.731	4.736	-0.005	1.083	-0.46	北水道
3#L—3#R	4.782	4.781	0.001	1.758	0.06	
4#L—4#R	4.762	4.754	0.008	1.495	0.54	南水道
5#L—5#R	4.729	4.742	-0.013	1.188	-1.09	
7#L—7#R	4.678	4.681	-0.003	0.985	-0.30	主水道

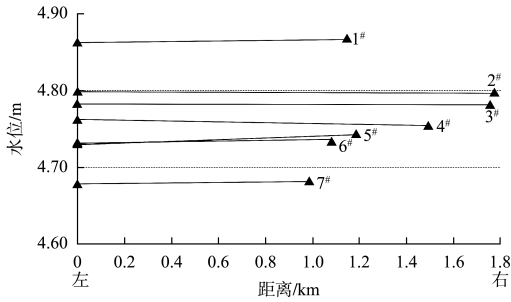


图 5 横比降

Fig. 5 Horizontal gradient

5 水文断面测量

5.1 断面流速、流向、流量测验

采用声学多普勒流速剖面仪 (acoustic doppler current profiler, ADCP) 监测断面流量等, 数据分辨率和采样率高。将断面分成若干测流垂线, 通过分层测得每层流速和流向及垂线水深, 计算每条测流垂线上的流速向量积和垂线平均流速等。

根据大断面测量数据设置每条断面的 ADCP 相关参数, 同步观测水位, 在 GNSS-RTK 实时导航下按设计断面线行驶, 并记录相应轨迹, 将实测坐标标识在地形图中。ADCP 连续向水体及河底发射声脉冲, 自动观测与记录。在感潮河段测验时, 断面流速、流向、流量测验均选择在退潮和低平潮时段进行。测船在 GNSS-RTK 实时导航下按布设断面线施测, 保持慢速、匀速运动; 为提高测量精度, 左右岸需测至 ADCP 盲区水深处; 以左岸→右岸、右岸→左岸为一个测回, 测回断面流量的平均值作为实测流量值, 对施测过程中相关数据进行记录。测回流量闭合差宜小于 5%, 如超标需及时重测。

5.2 数据处理

水文断面流量数据处理采用 WinRiver II 软件, 测流断面垂线数和垂线测点设置参照 JTS 132—2015《水运工程水文观测规范》第 7 章中内河流速、流向和流量观测规定。对断面顶、底层盲区的处理采用幂指数法进行估算, 采用 0.3~0.9 系数对实测大断面图形进行处理得出岸边流量, 输入现场记录的一系列相关参数, 按坡度缓陡程度输入

系数, 充分拟合流量等, 提高断面流量观测精度^[8]。

部分流向偏角大于 10° 的测点需进行余弦改正数据处理, 将断面流量、水位、断面面积、水面宽、断面平均流速、断面最大流速、平均水深、最大水深等编制成相应的图和表。如 3# 断面水深、流速分布曲线见图 6^[9-10]。

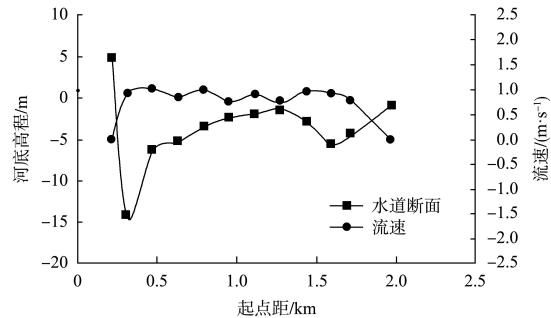


图 6 黑沙洲水道 3# 断面水深、流速分布曲线

Fig. 6 Curves of water depth and flow velocity at section 3# of Heishazhou waterway

测流断面流量闭合差应控制在 5% 以内, 并按式(1)、(2)计算:

$$\text{单一河段: } \delta = 1 - \frac{Q_i}{Q_m} \quad (1)$$

$$\text{分汊河段: } \delta = 1 - \frac{2 \sum Q_i}{Q_{mn} + \sum Q_i} \quad (2)$$

式中: δ 为流量闭合相对误差, %; Q_i 为上游断面流量, m^3/s ; Q_m 为下游断面流量, m^3/s ; Q_{mn} 为主水道控制断面的流量, m^3/s ; $\sum Q_i$ 为汊道进口或出口控制断面流量的总和, m^3/s 。

黑沙洲水道水文断面流量分流比及闭合差见表 4。

表 4 水文断面流量分流比及闭合差

Tab. 4 Hydrological section flow diversion ratio and closure error

断面号	流量/(万 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	分流比/%	闭合差/%	备注
1#	2.10	96.8	3.2	上游主水道
2#	0.90	41.5	0.4	汊道进口断面
3#	1.26	58.1		
5#	1.26	58.1	1.8	汊道出口断面
6#	0.87	40.1		
7#	2.17	100.0	-	下游主水道

长江下游黑沙洲段属于感潮河段,潮汐呈周期性变化,流速和流量亦随潮位的不同而变化,特别是在涨潮、落潮更替阶段;不同季节流量不同,感潮影响程度也有差异。潮汐运动会影响走航式 ADCP 测量结果产生较大影响^[1]。在高潮情况下,与水流方向相反的潮波造成 ADCP 测量的流速和流量较小,在枯水期甚至能检测到逆向流速和流量;而在低潮情况下,潮波运动与水流运动叠加造成流速和流量均较大。经多年在长江下游感潮河段实测数据分析,宜在稳定平潮时同步进行相关水文断面测量。

黑沙洲段主、汊河段 ADCP 测流期间,上游 1#R 水尺最大潮差 0.22 m,下游 7#R 水尺最大潮差 0.26 m,上下游主流及南水道右岸部分水尺水位过程线见图 7。根据图 7 分析结果,测流断面流速、流向、流量测验宜选择在 09:00:00—11:00:00 和 16:00:00—18:00:00 时段内进行,测量结果可较好地反映落潮平稳期流量情况。

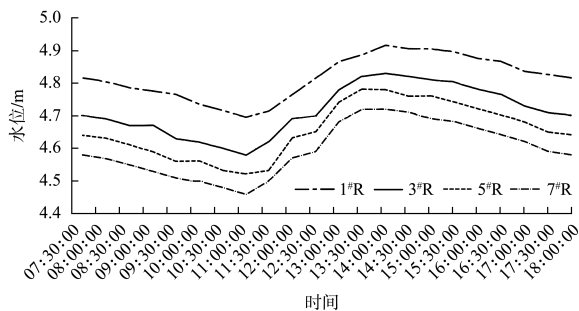


图 7 右岸水尺水位过程线

Fig. 7 Water level curves of right bank water gauge

对长江黑沙洲段在 2016 年 3 月、2016 年 10 月分别进行 2 次原型观测。2 次水文观测结果对比分析表明,季节性影响是导致流速、流量不一致的主要原因;在断面流量减小的情况下,南汊分流比由 55% 增大至约 58%,表明在低水位情况下主流会偏向南汊;各个断面流量较上次均有所减小,主要是因为季节性因素影响上游来水量;断面平均流速相比上次出现整体性减小,部分垂线段出现增大。

6 结论

1) 长江中下游多为平原多洲滩复杂河段,不但流量大、水道分汊水流复杂多样,而且航运发达,来往船舶多,洪、中、枯水期对水流影响均不同。航道整治工程水文观测需合理布设水文断面,优化技术方案,统筹兼顾整体和局部,主河段和分汊河段均需布设,考虑支流汇入的影响,整治工程重点区域需加密布设。采用表面流速流向测量、水位纵横比降测量和水文断面测量多种综合水文观测方法,确保数据的准确性和可靠性,为航道整治工程提供科学依据。

2) 感潮河段水文观测需考虑潮汐的影响,不同河段受潮汐影响不同,非感潮河段在一定时间内水流相对稳定,感潮河段受潮汐影响水流呈周期性变化,潮汐的影响自上游向下游逐渐增大,水文观测方案需综合考虑各种因素的影响,选择合适时机同步观测。

参考文献:

- [1] 陈冬,陈一梅,黄召彪.长江下游黑沙洲南水道演变特征分析[J].水利水运工程学报,2015(2):84-90.
CHEND, CHEN Y M, HUANG Z B. Evolution characteristics analysis of Heishazhou southern waterway of the lower Yangtze River [J]. Hydro-science and engineering, 2015(2): 84-90.
- [2] 黄晶晶.长江干线武汉至安庆段 6 米水深航道整治产生的经济效益分析[J].中国水运,2020(12):74-76.
HUANG JJ. Economic benefits analysis of 6-meter deep waterway regulation in the Wuhan to Anqing section of the Yangtze River trunk line [J]. China water transport, 2020(12): 74-76.
- [3] 梁向棋,舒晓明,曹树青,等.长江下游黑沙洲水道原型观测技术实施[J].中国水运,2014(9):60-61.
LIANG X Q, SHU X M, CAO S Q, et al. Implementation of prototype observation technology for Heishazhou waterway in lower reaches of the Yangtze River [J]. China water transport, 2014(9): 60-61.
- [4] 牛晨曦,假冬冬,张幸农.长江下游黑沙洲水道航道整治二期工程模型试验研究[J].水运工程,2017(7):149-154.

- NIU CX, JIA D D, ZHANG X N. Model experiments of phase II channel regulation project Heishazhou Waterway downstream the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2017(7): 149-154.
- [5] 陈建桥, 万鹏, 甘建国, 等. 略谈航道整治初设原型观测内容及技术要点[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(12): 203-204.
- CHEN J Q, WAN P, GAN J G, et al. Slightly prototype observation content and talk at the beginning of waterway regulation requirement [J]. Geomatics & spatial information technology, 2016, 39(12): 203-204.
- [6] 贾萍阳. 溢洪道弯段泄槽中糙条对冲击波影响分析及布置参数研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.
- JIA P Y. Influence analysis of the roughness on shock wave in the curved spillway chute and study of layout parameters [D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2020.
- [7] 韩亚民, 江木春. 江乌航道整治工程水泥沙原型观测方法与实践[J]. 海洋测绘, 2023, 43(4): 42-46.
- HAN Y M, JIANG M C. Implementation method of prototype observation of Jiangwu channel regulation project [J]. Hydrographic surveying and charting, 2023, 43(4): 42-46.
- [8] 卢自来, 朱运权. 基于无人船技术的山区河流航道测量[J]. 工程建设与设计, 2022(2): 67-69, 123.
- LU Z L, ZHU Y Q. Hydrographic survey of mountain river based on unmanned ship technology [J]. Construction & design for project, 2022(2): 67-69, 123.
- [9] 张家军, 拓自亮, 郭德成. 受水库调节影响的代表垂线法测流应用研究[C]//中国科学技术协会. 第十二届中国科协年会论文集, 福州: 中国科学技术协会, 2010: 1-6.
- ZHANG JJ, TUO Z L, GUO D C. Application of the typical vertical method in flow measurement of affect by the dam regulating [C]//China Association for Science and Technology. Proceedings of the 12th annual meeting of China Association for Science and Technology, Fuzhou: China Association for Science and Technology, 2010: 1-6.
- [10] 欧阳和平, 肖丹, 夏波, 等. 枢纽运行对城区流域污染物输移影响模拟研究[J]. 工程技术研究, 2020, 5(18): 1-4.
- OUYANG H P, XIAO D, XIA B, et al. Simulation study on impact of hub operation on pollutant transport in urban watersheds [J]. Engineering and technology research, 2020, 5(18): 1-4.
- [11] 黄敏, 黄监初, 刘卫根, 等. 走航式 ADCP 流量测验精度校测分析[J]. 江西水利科技, 2019, 45(2): 84-88.
- HUANG M, HUANG J C, LIU W G, et al. Analysis of calibration results of river discharge measured by cruising ADCP [J]. Jiangxi hydraulic science & technology, 2019, 45(2): 84-88.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 149 页)

- [15] 杨忠超, 杨雷, 巴添. 渠江丹溪口航道整治方案优化数值模拟[J]. 水运工程, 2022(8): 114-120, 140.
- YANG Z C, YANG L, BA T. Numerical simulation for optimization of channel regulation scheme for Danxikou in the Qujiang river [J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 114-120, 140.
- [16] 邵锦焯, 翟丽嫦, 刘晓鹏, 等. 分汊河道不同治理方案的数值模拟[J]. 广东水利水电, 2023(10): 20-24.
- SHAO J Z, YAO L C, LIU X P, et al. Numerical simulation of different treatment schemes for branching river channel [J]. Guangdong water resources and hydropower, 2023(10): 20-24.
- [17] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering. M. O. T. Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231 - 2021 [S]. Beijing: China Communications Press, 2021.
- [18] 重庆交通大学. 怒江中下游航道建设工程数学模型研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- Chongqing Jiaotong University. Research report on mathematical model of waterway construction in middle and lower reaches of Nujiang River [R]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.

(本文编辑 王传瑜)