

基于 HEC-RAS 的平陆运河河口段 流速模拟及疏浚施工影响分析

李庆, 覃振罡, 林振良

(北部湾大学建筑工程学院, 广西 钦州 535011)

摘要: 针对河口段水流形态复杂多变, 不利于组织河道疏浚施工的问题, 以西部陆海新通道(平陆运河)为例, 应用 HEC-RAS 一维非恒定流水力学计算模块, 构建运河河口段水动力模型, 并对模型糙率进行率定及模型精度进行验证。在此基础上, 根据青年水闸(闸下)水位及流量特征, 设定闸下 4 种流量(水位)工况, 模拟分析河道流速的变化。结果表明: HEC-RAS 模型在感潮河段模拟精度较高, 具有较好的适用性; 随断面流量的增加, 石江墩河段 S26—S32 流速响应迅速, 流速大值平均值较其他河段高约 34.0%。研究成果可为运河河口段航道疏浚工程施工提供技术支撑。

关键词: 平陆运河; HEC-RAS 软件; 流速模拟; 航道疏浚

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)10-0026-06

doi: 10.7640/zggwjs202410005

Simulation and dredging construction impact analysis of the Pinglu Canal estuary section based on HEC-RAS

LI Qing, QIN Zhen-gang, LIN Zhen-liang

(College of Engineering and Architecture, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi 535011, China)

Abstract: In response to the complex and variable water flow patterns in the estuary section, which are not conducive to organizing river dredging construction, taking the New Western Land-sea Corridor Channel (Pinglu Canal) as an example, the HEC-RAS one-dimensional unsteady flow mechanics calculation module is applied to construct a hydrodynamic model for the canal estuary section, and the roughness of the model is calibrated and the accuracy of the model is verified. On this basis, based on the water level and flow characteristics of the Youth Sluice (under the sluice), four flow (water level) conditions are set under the sluice to simulate and analyze the changes in river flow velocity. The results show that the HEC-RAS model has high simulation accuracy and good applicability in tidal river sections; With the increase of cross-sectional flow, the flow velocity response of the section from S26 to S32 near Shijiangdun is rapid, and the flow velocity is about 34.0% higher than other sections. The research results can provide technical support for the construction of dredging projects in the estuary of the canal.

Key words: Pinglu Canal; HEC-RAS software; flow velocity; channel dredging

0 引言

河口地处河流末端, 是河流与海洋自由沟通的区域, 动力因素十分复杂。河口段水位、流速变化是径流、潮汐及地形等多种因素耦合作用的

结果, 其形态变化与分布特征是研究海陆相互作用的基础, 对航道工程建设与运维具有重要意义。河道疏浚工程施工具有里程长、环境复杂及船机设备种类多等特点。水域面积、水深和流速等对

收稿日期: 2023-12-21 修回日期: 2024-01-20

基金项目: 北部湾大学高层次人才科研启动项目 (2019KYQD43); 广西教育厅高校科研项目 (2022KY0414); 北部湾大学创新训练项目 (S202211607215)

作者简介: 李庆 (1982—), 男, 广西大化人, 硕士, 高级工程师, 港口与航道工程专业, 从事港口航道工程施工技术及河流动力学研究。

E-mail: 123053268@qq.com

疏浚设备的选择及安全施工有着重要的影响, 流速是航道疏浚工程安全施工的主要影响因素之一。河道中疏浚船舶阻挡水流的行进, 产生了摩擦阻力和形体阻力^[1], 其荷载大小与液体流速平方成正比, 一般由锚缆或钢桩系统来承担, 以确保船舶的稳定。流速较大时, 易出现船舶操控困难、走锚等的现象, 影响施工安全和生产效率。目前对明渠非恒定流各要素的研究方法主要有理论计算、原型观测、物理模型和数值模拟^[2]。原型观测方法主要有浮标法测流和断面法测流^[3], 近年出现了与无人机相结合的雷达测流或定位抛投浮标技术^[4]。随着计算机的不断发展, 涌现出了多款用于水力学分析的软件, 常用的有 Flow3D^[5]、MIKE^[6]和 HEC-RAS^[7]等。为进一步地研究上游流量(水位)对河口段流速的影响, 以西部陆海新通道(平陆运河)城区下游段为例, 基于河道实际水深及地形数据, 采用 HEC-RAS 软件构建水动力模型, 并利用实际观测潮流资料验证其适用性, 在此基础上模拟分析上游不同流量(水位)和典型潮型组合下的河道流速变化规律, 为工程施工提供技术支撑。

1 研究区概述

1.1 河流

钦江为桂南沿海诸多小河流之一, 独流入海。河流发源于钦州市灵山县罗阳山, 流经灵山县、浦北县及钦州市区, 在钦南区尖山镇沙井岛分 2 支, 经瓦泾村和沙井村分别注入茅尾海, 河道干流平均坡降为 0.32‰。钦江流域属亚热带气候, 高温多雨, 多年平均径流量为 20.6 亿 m³。每年 4—9 月为雨季, 受海洋气流和台风影响, 流域范围内暴雨较频繁, 呈现出强度大、时间长等特点, 导致洪水频发、洪峰流量大, 多年平均汛期径流量为 16.6 亿 m³, 占全年平均径流量的 80.7%^[8], 径流量时间分布差异性显著。

1.2 工程概况

平陆运河是西部陆海新通道骨干工程, 起于南宁市西津库区平塘江口, 经钦州市灵山县陆屋镇沿钦江进入茅尾海(北部湾)。城区下游段航道起于兰海高速大桥, 沿沙井河段, 止于沙井大桥与入海口段航道衔接处, 航道设计底宽为 105 m, 水深为 4.9 m, 航道设计底标高-6.9 m(56 黄海基准面, 下同), 最小弯曲半径为 360 m, 计划施工工期 31 个月^[9]。本文以城区下游沙井岛分叉河段为研究对象, 研究区北起钦江兰海高速大桥下游

500 m 处, 西至瓦泾村河口, 南至沙井大桥上游 1 000 m 处, 沙井河段长度为 6 000 m, 瓦泾河段长度为 5 730 m, 如图 1 所示。沙井河段岸线曲折, 存在 2 处较大的拐弯, 断面宽度较窄, 最窄处约为 113 m, 水深较浅, 平均河床标高为-2.0 m。研究区河滩部分区域分布有红树林、芦苇等挺水植物。河道内存在 1 座江心岛——石江墩, 不同径流潮位组合下, 河段流态趋于多变, 不利于船机设备的选择及施工。因此, 需研究分析不同断面流量(水位)工况下河段内流速的变化规律, 为船舶选型及施工提供依据。

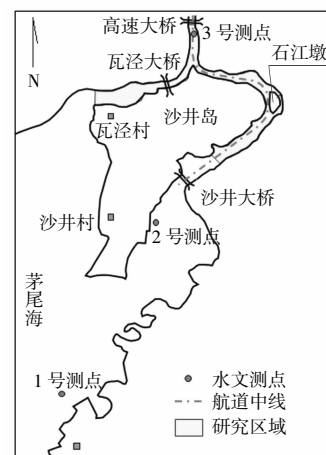


图 1 研究区平面位置图

Fig. 1 Plan location of the study area

2 计算模型

2.1 HEC-RAS 计算原理

HEC-RAS 由美国陆军工程兵团(USACE)研发的河流分析系统, 可进行河道一维恒定流和非恒定流的分析计算^[10]。其中, 一维非恒定流计算基于连续方程和动量方程, 其表达式如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

式中: ρ 为液体密度; u 为流速; x 为距离; t 为时间; ν 为动力黏滞系数; P 为压力; f 为质量力。控制方程组采用四点隐格式差分进行离散, 求解时采用迭代法, 用逐断面直接步进法演进。

2.2 模型构建

将河道实测地形水深数据导入 CAD 图形软件中, 以航道中心线为基线, 生成断面起点距高程数据 *.hdm 文件和起点距坐标 *.dat 文件; 断面起

点距高程文件转为 *.CAV 文件,对格式进行适当调整后导入 HEC-RAS 分析软件,确定河道断面形状;输入河道断面中心点坐标、断面左右岸距离,确定河道走向及断面位置;确定桥梁和浅坝

在河道中的位置,并根据其结构尺寸进行绘制导入。研究区内除汇流(分汊)节点外,河道断面中点间距均为 100 m,共设置 120 个断面,几何模型如图 2 所示。

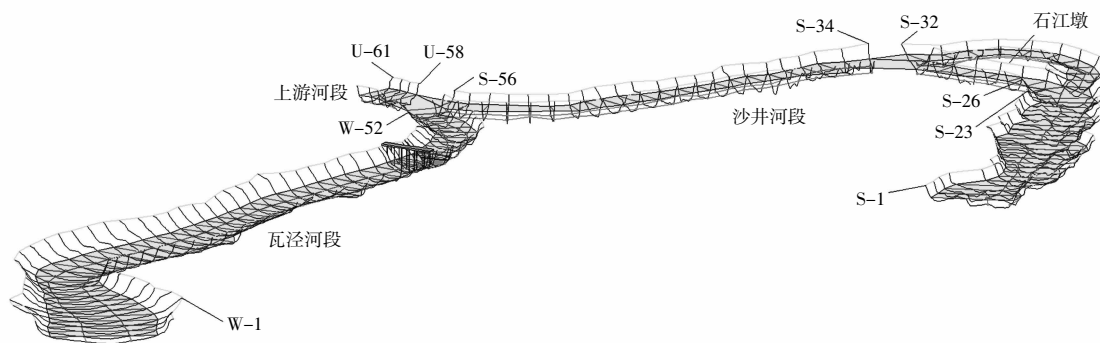


图 2 研究区河道几何模型

Fig. 2 Geometric modeling of river channel in the study area

2.3 模型参数率定及精度验证

2.3.1 参数率定

糙率在水力计算中是一个综合参数,其与河床泥沙特性、水深、植被及地形等都有一定的关系,是河道水流计算的主要参数之一,反映了水流运动过程中的阻力特性,一般采用实测断面,试算河段流量,率定河段糙率。钦江青年水闸至陆屋河段主槽糙率为 0.02~0.04,边滩糙率为 0.06^[9]。2001 年 9 月,广西珠委南宁勘测设计院实地调查

河段内 1971 年、1985 年历史洪水水面线,反算青年水闸以下河段糙率值约为 0.04。2023 年 9 月 26—27 日,设计单位在设计航道沿线典型地段布设了 7 处水文观测点,进行了潮位同步观测和泓线垂线流速观测(部分)。与本研究区距离较接近的测点为沙坡(1 号测点)、沙井(2 号测点)和北部湾大学(3 号测点),1 号测点与 2 号测点的距离为 6 460 m,2 号测点与 3 号测点距离为 8 642 m,如图 1 所示。大潮期各测点潮位过程线如图 3 所示。

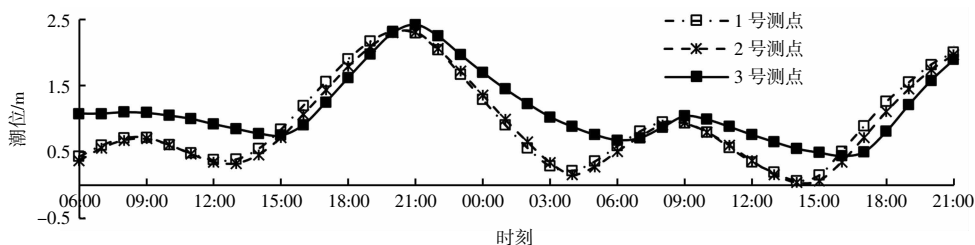


图 3 潮位同步观测过程线

Fig. 3 Tidal level synchronous observation hydrograph

模型采用非恒定流模块进行计算,以水位过程线为模型计算边界条件。运行前输入上游断面(U-61 断面)、瓦泾起始断面(W-1 断面)和沙井起始断面(S-1 断面)3 个目标位置的水位过程线。

研究区上游目标断面(U-61 断面)采用 3 号测点潮位数据,下游瓦泾、沙井目标位置无实测资料,需进行推算。为方便求解,假定水面坡降为线性变化,未知点潮位由已知点潮位及其水面坡

降进行计算。通过计算,发现沙井河段 S-1 断面潮位由 1 号、2 号测点潮位及其水面坡降计算的结果与由 2 号、3 号测点潮位坡降计算的结果并不完全一致,在低潮位时体现得尤为突出,差值最大达到 0.26 m。出现差值的主要原因是 1 号、2 号测点同在茅尾海内(面积约 135 km²),2 个测点涨落基本一致,潮差小,水面坡降小,3 号测点到沙井段注入口的距离为 7 050 m,河道弯曲、河

口处扩散损失强烈, 局部存在较大坡降。为使推算的目标断面潮位更贴近实际, 本文由上述 2 种方法分别推算沙井河段 S-1 和瓦泾河段 W-1 的潮位, 取 2 种方法计算差值均小于 0.1 m 时间段及对应的潮位值作为模型的验证边界条件。采用逐时实测水位和流速资料对模型进行率定, 采用糙率断面分区取值方法, 得到河道断面率定参数为: 主槽糙率取值为 0.035, 边滩糙率取值为 0.06。

2.3.2 精度验证

采用同一时间段 3 号测点泓线流速资料对水动力模型进行精度验证, 如图 4 所示, 3 号测点泓线实测的垂线平均流速与模型模拟计算的主槽流速吻合较好, 流向过程趋势一致, R 值为 0.98, 表明模型能较好地反映河段的水流动态变化, 建立的水动力模型符合精度要求, 可应用于实际工程的分析与预测。

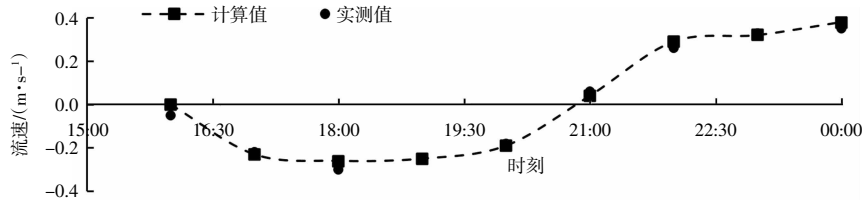


图 4 3 号测点流速流向验证图

Fig. 4 Verification diagram of flow velocity and direction at measuring point 3

3 工程应用

3.1 计算条件

3.1.1 上游流量边界

青年水闸闸下水位流量关系曲线如图 5 所示^[11]。

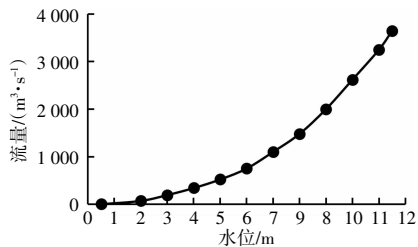


图 5 青年水闸闸下水位-流量关系曲线

Fig. 5 The relationship curve between water level and flow under the Youth Sluice

平陆运河工程施工预计经历 3~4 个雨季, 钦江一次洪水历时一般为 1~2 d。

对青年水闸闸下 4 种流量工况进行模拟分析, 将流量分别为 520 m³、750 m³、1 100 m³ 和 1 480 m³ 作为上游入口 U-61 断面流量边界, 并假定边界流量为定值, 相对应的闸下水位分别为 5 m、6 m、7 m 和 8 m (20 a 一遇水位^[12])。

3.1.2 下游潮位边界

利用实际观测水文资料, 由 1 号测点和 2 号测点潮位数据计算茅尾海内水面坡降, 推算模型瓦泾河段下游 W-1 断面和沙井河段 S-1 断面边界潮位过程线, 如图 6 所示, 作为模型下游水位边界条件。

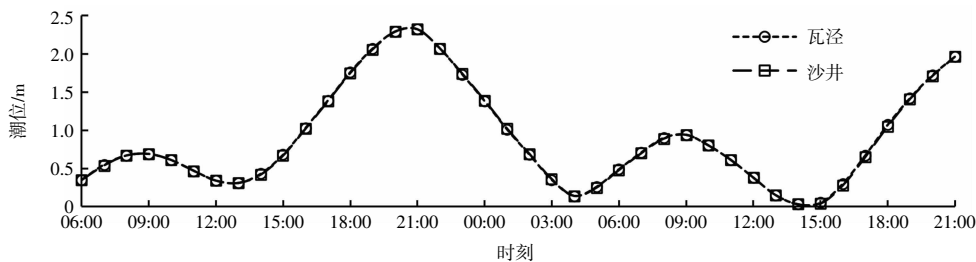


图 6 潮位过程线

Fig. 6 Tidal level hydrograph

3.2 模拟成果及分析

通过计算可知, 不同流量条件下, 在次日下午 15:00 左右, 即瓦泾下游边界水位和沙井下游边界水位分别为 0.04 m 和 0.05 m 时 (最低潮位

时), 河道中线流速最大, 且均为正值, 表明无潮流作用。

不同流量工况条件下, 沙井河段纵断面最大流速分布如图 7 所示。

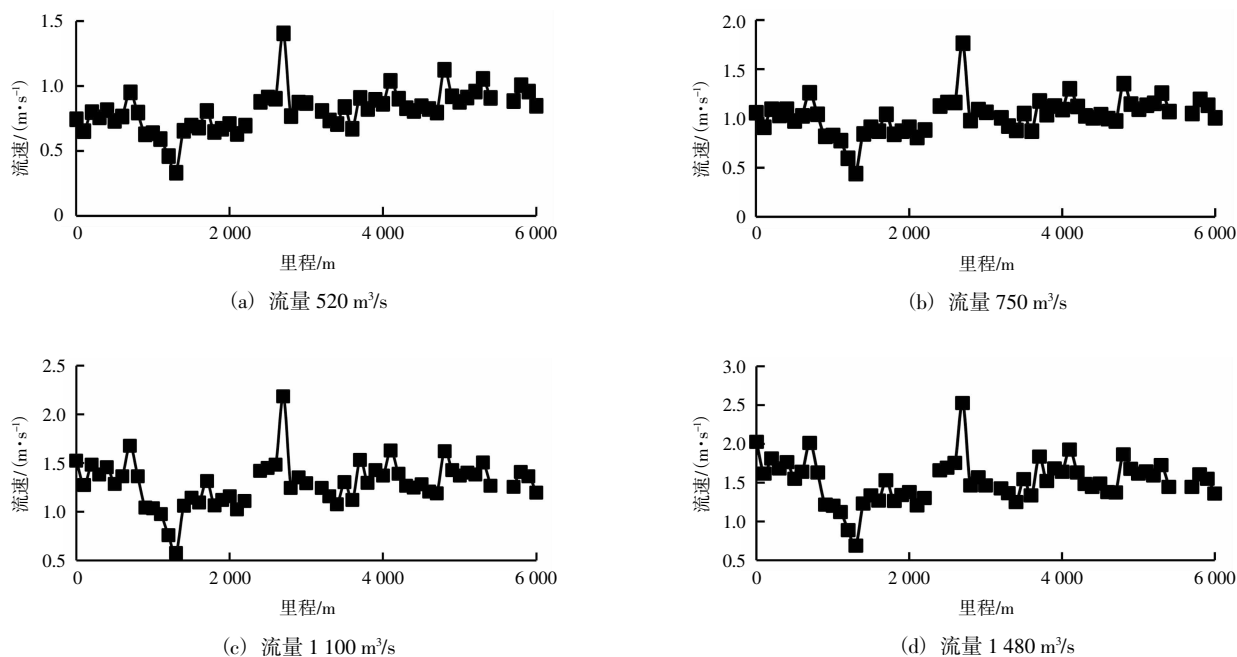


图7 不同流量工况下纵断面最大流速分布

Fig. 7 Distribution of maximum flow velocity in vertical section under different flow conditions

由图7可知,各工况条件下最大值出现在石江墩S26—S32附近(K2+700断面,宽度115 m)处,最小值出现在上游河段(K1+300断面,宽度480 m)处。河段内流速与断面流量及下游潮位有着直接的关系,断面流量越大、下游潮位越低,流速越大,反之亦然。断面狭窄河段流速变化明显大于一般河段,流速大值平均值比一般河段流速增大约为34.0%。各工况水位工程条件下流量及流速值统计如表1所示。

表1 各水位工况条件的流量及流速值统计表

Table 1 Statistical table of flow and velocity values under various water level operating conditions

工况	闸下水位/ m	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最大流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流速大值平均值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	5	520	1.41	1.06
2	6	750	1.76	1.28
3	7	1 100	2.18	1.64
4	8	1 480	2.53	1.91

根据模拟计算结果可求得不同闸下水位对应的断面流速关系拟合公式。以断面K2+700为例,将青年水闸闸下水位设为横坐标,断面流速为纵坐标,如图8所示,求出拟合公式,可对断面流速进行预测。

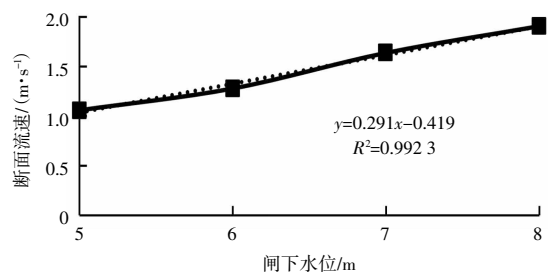


图8 闸下水位与断面流速关系曲线(断面K2+700)

Fig. 8 Relationship curve between water level and cross-sectional flow velocity (K2+700)

3.3 施工影响

JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规范》^[13]提出各类挖泥船对自然条件的适应能力应根据船舶性能确定,并推荐纵向流速参考值:小于 8 m^3 抓斗船纵向流速限值为 1.50 m/s ,小于 10 m^3 反铲船纵向流速限值为 1.8 m/s ,自航泥驳纵向流速限值为 2.0 m/s 。根据模拟计算结果,以流速大值平均值为判定标准,除K2+700断面附近外,当闸下水位为5~6 m,疏浚设备均可正常施工,当闸下水位为7 m时,建议 8 m^3 抓斗船停工候命,当闸下水位达到8 m,建议河段所有疏浚设备停工。

针对沙井河段断面窄、水深浅的情况,施工过程中建议采取以下安全措施:1)关注水文部门河道水位预报,根据上游闸下水位及断面流速拟

合公式预测河道断面流速,指导船舶施工;2) 艏锚、艉锚适当增重,锚缆适当加长;3) 枯水期集中完成石江墩 S26—S32 段的航道施工,实现促排缓流的目的;4) 尽量顺流开挖,避免横流施工。

4 结语

本文基于 HEC-RAS 水力计算软件,对平陆运河城区下游段河道进行了模拟,计算分析了 4 种流量工况下河道流速的大小及分布特征,结论如下:

1) HEC-RAS 软件可较为方便地计算分析河口段径流潮位影响下的流速变化,具有较好的适用性,可根据拟合公式预测河道断面流速变化。

2) 断面流量大于 $520 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,潮流作用消失,河道流速随流量的增大和下游潮位的降低而增大,狭窄河段流速较一般河段流速增大了 34.0%。

3) 除狭窄河段外,青年水闸闸下水位低于 7 m 时,挖泥船可正常施工;水位达到 7 m 时, 8 m^3 抓斗船停工候命;水位达到 8 m 时,建议石江墩 S26—S32 段停工待命。

4) 河道内水文实测点分布少,模型未能按完整潮位进行分析,下一步将根据工程实际进展,在河道内增设水文监测点,并从闸下水位与河道水流变化过程方面加以研究,为船舶调遣、移船移锚提供更精准的服务。

参考文献:

- [1] 陈志乐,杨静思. 船舶所受水动力国内外规范对比分析[J]. 水运工程,2022(11):93-98.
CHEN Zhi-le, YANG Jing-si. Comparison of current force on ships in Chinese and foreign codes[J]. Port & Waterway Engineering, 2022 (11): 93-98.
- [2] 齐佳硕,王双银,甘治国,等. 基于 HEC-RAS 的渠道边坡滑塌水流响应模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(9): 87-96.
QI Jia-shuo, WANG Shuang-yin, GAN Zhi-guo, et al. Study on simulation of water flow response to channel slope landslide based on HEC-RAS model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(9): 87-96.
- [3] 邱大洪. 工程水文学[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
QIU Da-hong. Engineering hydrology[M]. Beijing: China communications Press, 2011.
- [4] 刘望天,陈慧莎. 基于无人机技术的航空水面流速法测流系统开发及应用研究[J]. 广东水利水电,2021(5):33-39.
LIU Wang-tian, CHEN Hui-sha. Research on development and application of air surface velocity measurement system based on UAV technology[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2021(5): 33-39.
- [5] 李庆,杨刚,刘世通. 管袋堤坝龙口顶袋过水滑移稳定预测[J]. 水运工程,2023(1):170-174.
LI Qing, YANG Gang, LIU Shi-tong. Prediction and analysis of slippage of geotextile tube in closure gaps[J]. Port & Waterway Engineering, 2023(1): 170-174.
- [6] 魏清福. 平原河网圩区水利工程生态调度方案研究:以苏州吴中城南包围为例[J]. 人民长江,2022,53(10):31-36.
WEI Qing-fu. Ecological operation scheme of water conservancy project in plain river network polder area: Case of Chengnan polder area in Wuzhong District, Suzhou City[J]. Yangtze River, 2022, 53 (10): 31-36.
- [7] SHAHVERDI K, TALEBMORAD H. Automating HEC-RAS and linking with particle swarm optimizer to calibrate manning's roughness coefficient[J]. Water Resources Management, 2023, 37(2): 975-993.
- [8] 王焰. 热带气旋影响下风雨联合概率模型构建及防洪优化调度研究:以广西钦州市为例[D]. 南宁:广西大学,2018.
WANG Yan. A study on the construction of the combined probability model of tropical cyclones and its influence on the optimal control of river flood control: A case study of Qinzhou City in Guangxi Province[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.
- [9] 交通运输部规划研究院. 平陆运河(兰海高速钦江大桥以下段)工程环境影响报告书(征求意见稿)[R]. 北京:交通运输部规划研究院,2022.
Transport Planning and Research Institute Ministry of Transport. Environmental impact assessment report for Pinglu Canal (Below Qinqiang Bridge on Lanhai Expressway) Project (Draft for comments)[R]. Beijing: Transport Planning and Research Institute Ministry of Transport, 2022.
- [10] Hydrologic Engineering Center of USACE. HEC-RAS: River analysis system[M]. User's manual version 5.0. Davis CA: US Army Corps of Engineers, 2016.
- [11] 彭高著. 广西钦州市青年水闸消能防冲建筑物设计初步研究[J]. 科学与财富,2018(24):254-255.
PENG Gao-zhu. Preliminary study on the design of energy dissipation and anti erosion buildings for Qingnian Sluice in Qinzhou City, Guangxi[J]. Science and Wealth, 2018(24): 254-255.
- [12] 广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院有限责任公司. 广西钦州市青年水闸除险加固工程初步设计报告[R]. 南宁:广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院有限责任公司,2009.
Guangxi Water & Power Design Institute Co., Ltd. Preliminary design report on the reinforcement project of Qingnian Sluice in Qinzhou City, Guangxi[R]. Nanning: Guangxi Water & Power Design Institute Co., Ltd., 2009.
- [13] JTS 181-5—2012,疏浚与吹填工程设计规范[S].
JTS 181-5—2012, Design code for dredging and reclamation work [S].