

· 西部陆海新通道——平陆运河工程建设专栏 (6) ·



平陆运河航道行洪模拟研究*

邹宏荣, 农永欣, 蒋超华, 冯罗杰

(广西珠委南宁勘测设计院有限公司, 广西南宁 530007)

摘要: 平陆运河是西部陆海新通道的骨干工程,也是新中国成立以来建设的第一条连通江海的大运河,其航道行洪畅通意义重大。通过搭建概化平陆运河沿线涉河建筑物的二维水动力数学模型,模拟运河航道在行洪标准工况下的水流流态、水动力轴线情况。结果表明,平陆运河航道开挖疏浚建设后水流流态、水动力轴线更有利于航道洪水排泄和航道长期运行稳定。研究成果可为平陆运河规划管理提供参考。

关键词: 平陆运河; 西部陆海新通道; 航道行洪; 二维水动力数学模型

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0001-08

Simulation of flood control capacity of Pinglu Canal

ZOU Hongrong, NONG Yongxin, JIANG Chaohua, FENG Luojie

(Guangxi Nanning Survey & Design Institute Co., Ltd. of the Pearl River Water Resources Commission, Nanning 530007, China)

Abstract: The Pinglu Canal is the backbone project of the western land-sea new corridor, and it is also the first grand canal built to connect the river and sea since the founding of new China. Its navigation flood control is of great significance. This paper establishes a two-dimensional hydrodynamic mathematical model of the Pinglu Canal's river structures, simulating the water flow patterns and hydrodynamic axis situation of the canal's navigation channel under flood control standard conditions. The results show that the water flow patterns and hydrodynamic axis of the Pinglu Canal navigation channel after dredging and construction are more conducive to the discharge of floodwaters and the long-term stable operation of the canal. The research results can provide reference for the planning and management of the Pinglu Canal.

Keywords: the Pinglu Canal; the western land-sea new corridor; channel flood; two-dimensional hydrodynamic mathematical model

平陆运河是广西的世纪工程,其航道运行稳定对地区乃至国家都具有十分重要的战略意义,对平陆运河航道行洪过程水流流态和水动力轴线进行科学评估显得尤为重要。目前,行洪评估主要有数学模型和物理模型2种方法^[1],国内多采用数学模型进行模拟,一维、二维模型的研究已比较成熟,三维模型由于需要精细的定解和参数识别条件应用较少^[2]。一维模型使用便捷,但在应对复杂河道地形或特殊构筑物时很难处理,需

采用二维模型解决。一些常规的二维模型,如基于正交结构网格的二维ADI模型,常被用于洪水评价工作^[3-5],但它无激波捕捉能力,在处理复杂流态变化时容易出现数值震荡问题,其采用的正交结构网格对复杂边界的适应能力不足,限制了其使用范围^[6]。国际上目前已出现诸多成熟的平面二维水流模型商业软件,如美国陆军工程兵团水文研究中心研制的HEC-RAS软件^[7],丹麦水利工程和环境模拟公司开发的MIKE系列软件^[8],

收稿日期: 2024-04-11

*基金项目: 广西科技重大专项资助项目(桂科AA23062032)

作者简介: 邹宏荣(1990—),男,硕士,工程师,从事水文规划工作。

这些软件在我国就洪水过程模拟、河流水动力特征模拟、水流数值模拟以及水资源管理等方面都进行了大量应用^[9-11]，并取得了较好的应用效果。

本文通过搭建概化平陆运河沿线建筑物的二维水动力数学模型，模拟运河在行洪标准工况下的水流流态、水动力轴线情况，以期为平陆运河规划管理、国家其他运河及水网等类似工程的建设实施提供参考。

1 工程概况

平陆运河在广西境内将西江航运干线与钦州湾海运线相连，是西部陆海新通道的骨干工程，是有机衔接“一带一路”、服务构建新发展格局的重大战略工程，是加快建设交通强国的标志性工程，也是完善国家高等级航道布局、构建国家综合立体交通网的基础工程^[12]。平陆运河始于郁江干流西津库区南宁横州市沙坪河口，跨沙坪河与钦江支流旧州江分水岭，经钦州市灵山县陆屋镇沿钦江干流南下进入北部湾钦州港海域，全长约 134.2 km，是一条通江达海的水运通道^[13]。运河涉及水系众多，主要涉及郁江流域及其支流沙坪河、钦江流域及其支流旧州江等 26 条河流，流域水系见图 1。

平陆运河功能定位为北部湾国际门户港重要水运集疏运通道、南北大运河和水资源综合利用重要组成、西部地区经济高质量发展重要支撑。平陆运河的主要开发任务是航运，通过建设航运

梯级枢纽和运河航道工程，构建连接西江内河航道网和北部湾港的江海联运体系，在满足航运的同时结合供水、灌溉、防洪、改善水生态环境等功能，实现水资源综合利用。平陆运河从上游至下游依次建设马道枢纽、企石枢纽和青年枢纽，采用 3 个梯级方案对全河段进行连续渠化，按内河 I 级航道标准建设，通航 5 000 吨级船舶，各枢纽同步一次性建设双线 5 000 吨级船闸。平陆运河建设主要采取拓宽挖深现有河道，并对局部弯曲河段进行裁弯取直，同时对沿线跨河、临河、拦河建筑物进行改造，解决碍航问题，以达到内河 I 级通航标准^[14-17]，平陆运河航道尺寸见表 1。



图 1 平陆运河水系

Fig. 1 Pinglu Canal water system

表 1 平陆运河航道尺寸

Tab. 1 Channel dimensions of Pinglu Canal

航道名称	航道起讫点	长度/km	水深/m	宽度/m	最小弯曲半径/m	底高程/m
沙坪河段(平塘江口—三阳桥)航道	K0+000—K13+223	13.22	6.3	80	360	52.70
马道枢纽及上游航道	K13+223—K30+561	17.34	6.3	80	360	52.70
企石枢纽及上下游航道	K30+561—K50+037	19.48	6.3	80	360	27.70
钦江干流中游段航道	K50+037—K79+095	29.06	6.3	80	360	1.70
青年枢纽及上游航道	K79+095—K98+491	19.40	6.3	80	360	1.70
钦州城区段航道	K98+491—K119+935	21.44	6.3	90	450	-7.61
入海口近海段航道	K119+935—K134+223	14.29	6.5	130	540	-7.61

2 研究方法

2.1 模型构建

平陆运河马道枢纽、企石枢纽和青年枢纽前的流态均以枢纽为界构建水动力模型, 采用 MIKE21 共构建 4 个水动力模型, 囊括运河整条航线, 分别为: 1) 西津—马道段 (28 km) 模型; 2) 马道—企石段 (12 km) 模型; 3) 企石—青年段 (53.5 km) 模型; 4) 青年—入海段 (25 km) 模型。

2.1.1 模型原理

MIKE21 中的水动力模块采用非结构化网格, 控制方程离散方法采用有限体积法进行求解, 即基于数值解的二维浅水方程, 为三向不可压缩和 Reynolds 值均布的 Navier-Stokes 方程, 服从于静水压力假定和布辛涅斯克 (Boussinesq) 假定, 基本方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial (uh)}{\partial x} + v \frac{\partial (vh)}{\partial y} = q \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} u - fv = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_1 \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_1 \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} v + fu = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_1 \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_1 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为时间; x 、 y 为平面坐标; h 为水深, $h=Z-Z_0$, Z 为水位, Z_0 为河床高程; u 、 v 分别为沿 x 、 y 方向的流速; n 为糙率系数; f 为柯氏系数; v_1 为紊动黏性系数; q 为包括取排水在内的源项。

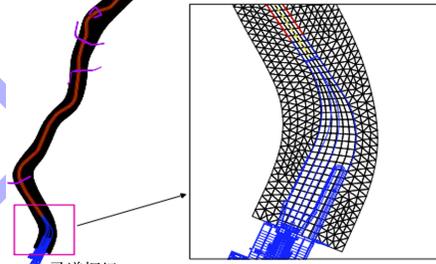
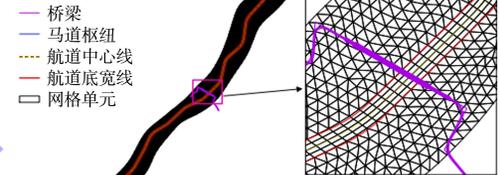
2.1.2 网格划分及建筑物概化

计算网格采用四边形+三角形混合型网格形式, 将航道、枢纽、水上服务区、桥梁工程等沿线建筑物概化进网格, 其中航道采用四边形网格, 边滩采用三角形网格, 流态计算单元网格中心点即为流速矢量图中流速矢量箭杆的起点。各航段模型网格参数见表 2, 航道网格及建筑物概化见图 2。

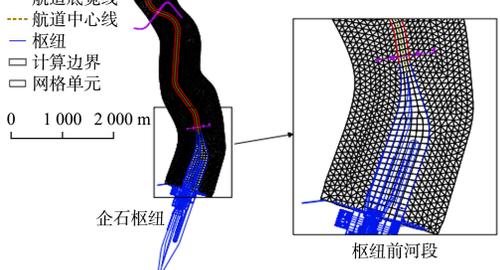
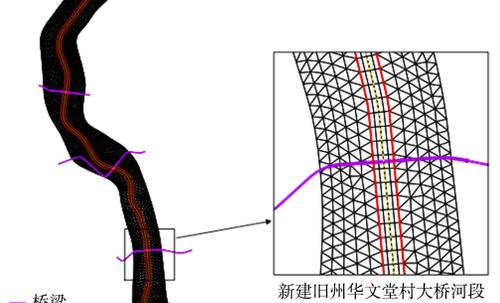
表 2 各航段模型网格参数

Tab. 2 Model grid parameters for each navigation segment

航段	模型长度/km	计算面积/km ²	平均计算宽度/m	划分网格数/个
西津—马道段	28.0	20.1	718.0	19 038
马道—企石段	12.0	9.4	782.5	8 863
企石—青年段	53.5	82.2	1 536.0	68 021
青年—入海段	25.0	23.5	940.0	20 701



a) 西津—马道段



b) 马道—企石段

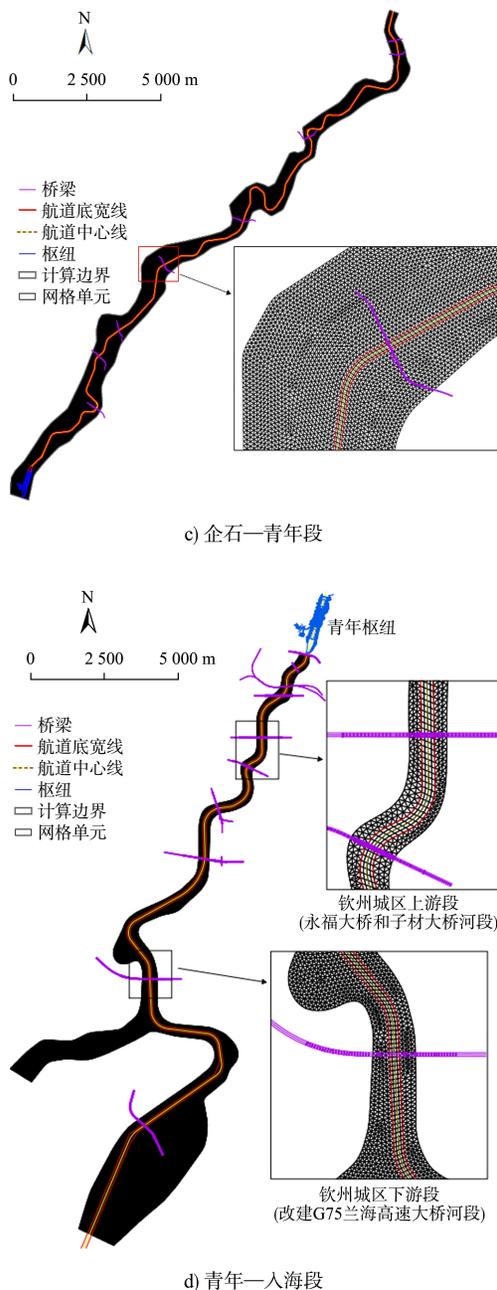


图 2 各航段网格及建筑物概化
Fig. 2 Grid and building generalization for each navigation segment

2.1.3 计算参数

二维水动力模型率定的主要参数有计算区域的曼宁值、涡旋黏性系数、模型干湿度等。

1) 曼宁值。计算区域的曼宁值反映区域内不同地物对水流的阻力作用，由糙率确定，等于糙率值的倒数经多组试算，糙率的取值范围为 0.025~0.045。

2) 涡旋黏性系数。根据洪水期水体资料选

取，本次模型取默认值 0.28。

3) 干湿边界。模型干湿边界是模型在计算二维洪水演进时判断水流在网格间传递的 2 个参数。低于干水深，洪水不再演进；高于干水深低于淹没深度，洪水演进但不参与计算；高于淹没深度，洪水演进且参与计算。根据现场查勘对滩面组成的分析，计算干水深选用 0.005 m，半干湿选用 0.050 m，湿水深选用 0.100 m。

模型上游为流量边界，下游为水位边界，各模型沿程支流入流以点源边界形式嵌入模型，自然边界取工程前、后河道两岸的实际高程。《平陆运河工程可行性研究报告》和《平陆运河工程初步设计报告》均对西津坝址、企石枢纽、陆屋站、青年“卡口”、青年枢纽设计洪水及各航段水面线予以确认，模型边界成果直接采用《平陆运河工程初步设计报告》的成果。频率 $P=5\%$ 的水位边界条件见表 3。

表 3 运河模型水文边界条件

Tab. 3 Hydrological boundary conditions of canal model

航段	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水位/m
西津—马道段	0~2140	63.40
马道—企石段	0~916	35.00
企石—青年段	916~3 300	9.32
青年—入海段	3 300	3.65

2.1.4 计算工况

平陆运河航道按 10 a 一遇标准设计，同时满足 20 a 一遇行洪标准，本研究模拟运河发生 20 a 一遇洪水的工况。

2.2 模型率定和验证

河段糙率率定方法：将一维数学模型选定的糙率作为初始值，通过对比天然、工程后各河段二维模型与《平陆运河工程初步设计报告》中的水位结果，经反复试算，使得二者结果尽量接近。选取 20 a 一遇洪水计算结果验证模型，取若干特征断面进行验证，使各模型特征断面水位的绝对误差均小于 3 cm，由此确定二维模型的糙率取值范围为 0.025~0.045，模型验证结果 ($P=5\%$) 见表 4。

表 4 模型验证结果
Tab. 4 Model verification results

航段	位置	天然			工程后		
		一维水位/m	二维水位/m	差值/m	一维水位/m	二维水位/m	差值/m
西津—马道段	沙坪镇	66.82	66.79	-0.03	63.44	63.44	0.00
马道—企石段	旧洲江与航道交汇处	40.79	40.81	0.02	35.91	35.94	0.03
企石—青年段	企石坝下	32.20	32.18	-0.02	20.02	20.03	0.01
青年—入海段	永福大桥	7.66	7.63	-0.03	5.90	5.91	0.01

3 结果与讨论

3.1 航道流态分析

平陆运河航道开挖有两种情形, 一是在现状河道上疏浚航道; 二是直接陆地开挖航道。通过对比有无航道分析航道流态成果, 鉴于运河航道较长, 对各段模型选取典型河段进行分析。

1) 西津—马道段模型。选取三阳桥、沙坪河口河段进行流态分析。发生 20 a 一遇设计洪水时, 工程前后取样点最大流速分别为 1.33、0.87 m/s, 流速变化最大增加 0.11 m/s, 最大减小 0.60 m/s, 流向变化最大 12.89°。

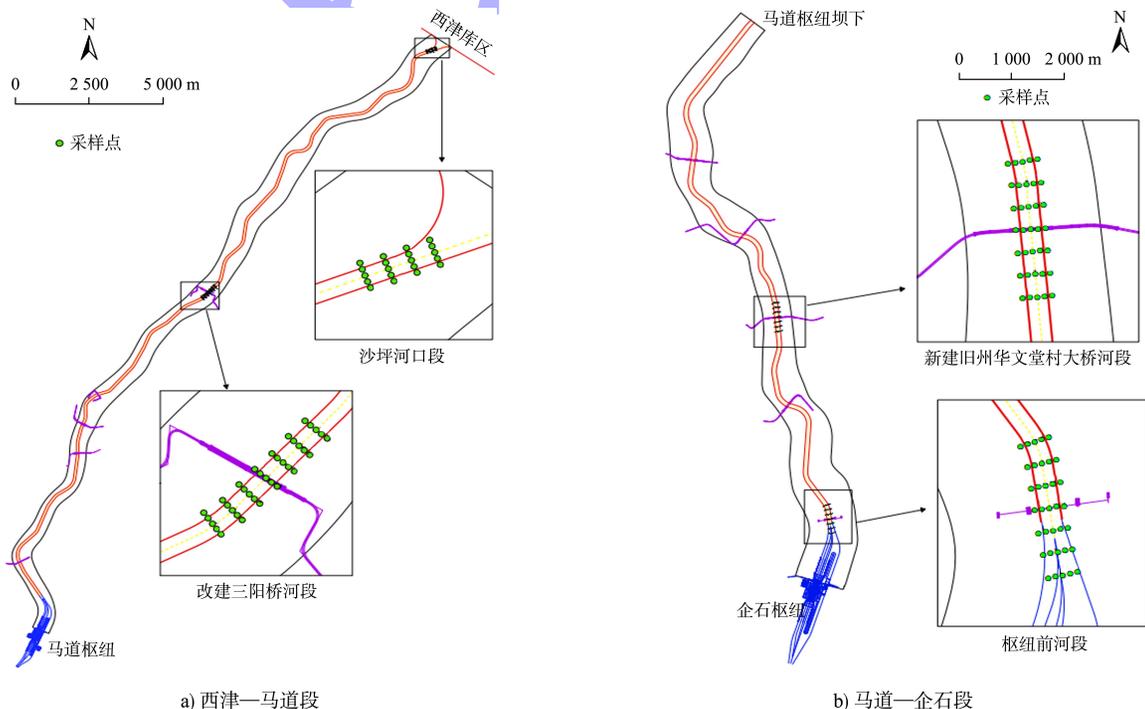
2) 马道—企石段模型。选取旧州华文堂村大桥、企石枢纽河段进行流态分析。发生 20 a 一遇设计洪水时, 工程前后取样点最大流速分别为

3.00、2.74 m/s, 流速变化最大增加 0.94 m/s, 最大减小 1.45 m/s, 流向变化最大 -22.82°。

3) 企石—青年段模型。选取平吉镇、久隆镇河段进行流态分析。发生 20 a 一遇设计洪水时, 工程前后取样点最大流速分别为 2.22、2.01 m/s, 流速变化最大增加 0.89 m/s, 最大减小 0.8 m/s, 流向变化最大 -75.54°。

4) 青年—入海段模型: 选取钦州城区上游段(永福大桥、子材大桥河段)、钦州城区下游段(改建 G75 兰海高速大桥河段)进行流态分析。发生 20 a 一遇设计洪水时, 工程前后采样点最大流速分别为 3.03、2.56 m/s, 流速变化最大增加 0.32 m/s, 最大减小 1.10 m/s, 流向变化最大 -5.33°。

各航段模型采样点分布见图 3, 流态成果 ($P=5\%$) 见图 4 和表 5。



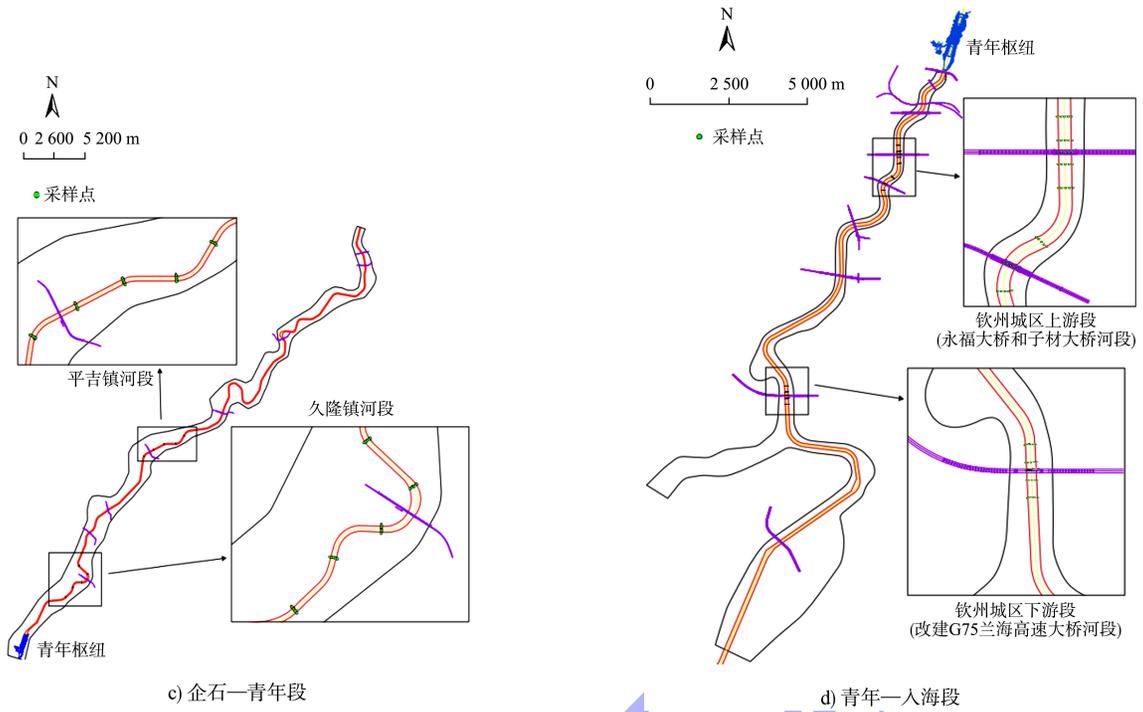
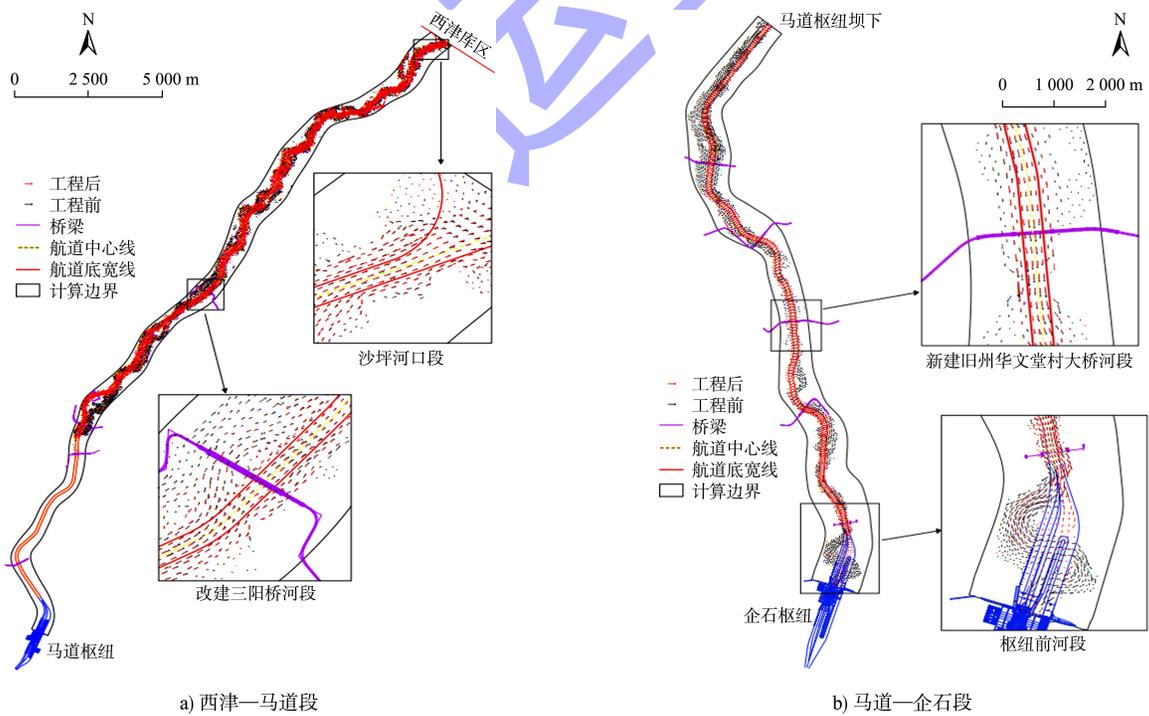


图 3 各航段模型采样点分布

Fig. 3 Distribution of model sampling points for each navigation segment



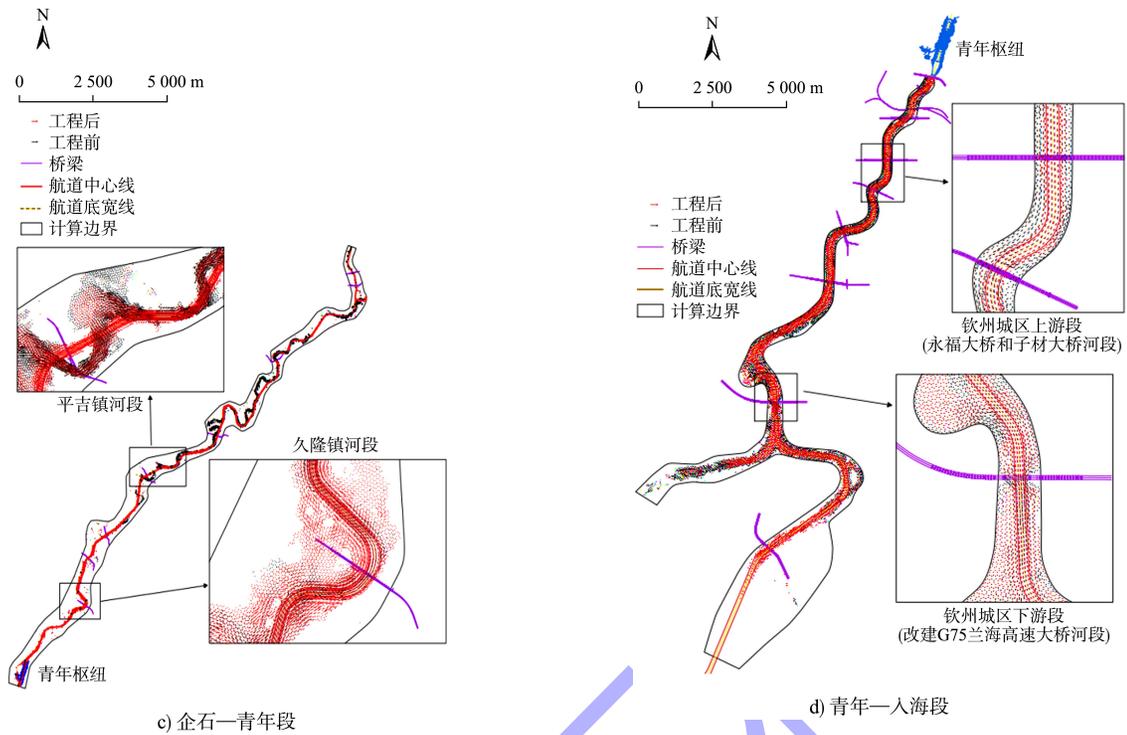


图 4 各航段典型河段工程前后流态对比

Fig. 4 Flow patterns before and after project in typical reach of each navigation segment

表 5 各航段工程前后模拟变化结果

Tab. 5 Simulated changes before and after construction of each navigation segment

航段	典型河段	采样点最大流速/(m·s ⁻¹)		流速最大 增加值/(m·s ⁻¹)	流速最大 减少值/(m·s ⁻¹)	流向变化 最大值/(°)
		工程前	工程后			
西津—马道段	三阳桥河段、沙坪河口河段	1.33	0.87	0.11	0.60	12.89
马道—企石段	旧州华文堂村大桥河段、企石枢纽河段	3.00	2.74	0.94	1.45	-22.82
企石—青年段	平吉镇河段、久隆镇河段	2.22	2.01	0.89	0.80	-75.57
青年—入海段	钦州城区上游段(永福大桥和子材大桥河段)、 钦州城区下游段(改建 G75 兰海高速大桥河段)	3.03	2.56	0.32	1.10	-5.33

3.2 航道水动力轴线分析

由各航段工程前后流态对比可知, 工程后河道水动力轴线有较大调整, 由原天然蜿蜒曲折转为平顺通畅, 原河道长度大幅缩短, 工程后水动力轴线更加平顺。

3.3 行洪分析

西津水库—马道枢纽航道基本顺着原河道进行开挖疏浚, 未改变河道流向, 工程后河道有较大幅度拓宽和挖深, 河道过流面积整体加大, 马道—企石段、企石—青年段及青年—入海段工程后航道纵向顺直、横向拓宽, 河道动力轴线由原天然蜿蜒曲折转为平顺通畅, 流态更趋平稳。运河中的临河建筑如水上服务区不占用航道行洪面积, 跨河设施如桥梁工程跨过航道亦无阻水, 对航道行洪影响极小, 且航道开挖后为深宽航道,

洪水过流面积较开挖前大幅度增加, 航道顺直, 水动力轴线平顺, 有利于航道行洪。

4 结论

1) 航道流态分析: 平陆运河各典型河段在 20 a 一遇设计洪水条件下, 航道开挖工程前后的流速和流向均有变化, 但变化幅度因河段而异。流速变化最大增减幅度在 0.11~1.45 m/s, 流向变化最大角度在 -75.54°~12.89°。

2) 航道水动力轴线分析: 工程后原河道水动力轴线由天然蜿蜒曲折转为平顺通畅, 长度大幅缩短。

3) 行洪分析: 运河开挖后, 航道拓宽挖深, 过流面积大幅增加, 且临河建筑和跨河设施亦不占用航道行洪断面, 将更有利于航道洪水排泄及其长期运行稳定。

参考文献:

[1] 朱大伟, 杨侃, 常蒲婷, 等. MIKE21 模型在涉河大桥防洪影响数值模拟中的应用[J]. 黑龙江水专学报, 2010, 37(2): 1-4.

[2] 黄萍, 雷文韬, 李德龙, 等. MIKE21 模型在南新联圩洪水模拟中的应用[J]. 人民长江, 2017, 48(17): 1-5.

[3] 余萍, 李绍飞, 康丽. 永定新河口滩涂改造工程的防洪影响评价[J]. 中国农村水利水电, 2011(1): 78-81.

[4] 李磊, 李月玉, 孙艳, 等. Hec-Ras 软件在桥梁防洪评价中的应用[J]. 水力发电, 2008(3): 103-105.

[5] 崔玉炎, 杨芳, 陈文龙. 二维水流数学模型在河道桥梁阻水计算中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2007(7): 97-98, 101.

[6] 张大伟, 穆杰, 马建明, 等. 精细化二维水动力模型在防洪评价中的应用: 以滹沱河部分河段为例[J]. 水利水电技术, 2018, 49(8): 150-154.

[7] 张玉涛, 白静, 陈振宇, 等. HEC-RAS 模型原理及应用研究进展[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 233-237.

[8] 许婷. MIKE21 HD 计算原理及应用实例[J]. 港工技术, 2010, 47(5): 1-5.

[9] 胡克龙, 计勇, 岑奕兴, 等. 基于 MIKE21 的信江八字嘴顺直分汊河道水动力特性及河床演变分析[J]. 人民珠江, 2023, 44(6): 83-90.

[10] 常赓, 张琼海, 姜宇, 等. 基于 MIKE21 模型的人海排污口对澳门近岸海域水质影响分析[J]. 人民珠江, 2021, 42(3): 70-80.

[11] 刘金铎. MIKE BASIN 软件平台在双柏县水资源配置的应用[J]. 云南水力发电, 2018, 34(5): 184-186.

[12] 《国家综合立体交通网规划纲要》[J]. 前瞻科技, 2023, 2(3): 122.

[13] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J]. 水运工程, 2024(6): 1-11.

[14] 宁武. 平陆运河建设理念与方案探讨[J]. 水利水电工程学报, 2023(2): 162-168.

[15] 郑维宽, 余浩铭. 从历史时期广西出海水路通道变迁大势看平陆运河开凿的重要意义[J]. 广西地方志, 2023(2): 22-28.

[16] 吕小龙, 吴澎, 刘晓玲. 平陆运河航道等级论证[J]. 水运工程, 2021(10): 266-270.

[17] 穆森, 吕小龙. 平陆运河船闸通过能力研究[J]. 水运工程, 2021(3): 145-150.

(本文编辑 王传瑜)

· 消 息 ·

中交集团暨中国交建召开科技创新大会

近日, 中交集团暨中国交建科技创新大会在中交大厦召开。大会深入贯彻党的二十大及二十届二中、三中全会精神, 深入学习领会习近平总书记关于科技创新的重要论述, 全面落实中央企业科技创新大会会议精神和工作要求, 总结工作, 分析形势, 明确下一阶段科技创新目标和重点任务, 以科技创新推动产业创新, 加快发展新质生产力, 扎实推进高质量发展, 加快建设“三型”世界一流企业, 奋力推进中国式现代化中交实践。

国家自然科学基金委员会党组成员、副主任王希勤出席大会并与公司签约成立企业创新发展联合基金。公司党委书记、董事长王彤宙出席大会并讲话。国务院国资委科创局局长方磊、交通运输部科技司司长徐文强、中国科学技术协会企业创新服务中心主任张清、工业和信息化部装备工业二司副司长李毅出席大会并致辞。国家自然科学基金委员会计划与政策局局长王岩出席大会。公司党委副书记、总经理王海怀主持大会。

会议播放了公司科技创新成就视频; 发布了公司“十四五”以来的一批核心技术、核心装备和数字化成果; 表彰了公司“十四五”以来对科技创新工作作出突出贡献的优秀科技攻关团队和科技创新先进个人, 3 个优秀科技攻关团队代表做了交流发言。

https://www.cccltd.cn/news/gsyw/202412/t20241231_218610.html (2024-12-31)