

平陆运河工程对钦江河口盐水入侵的影响研究

佟信睿, 肖毅*, 刘洁, 苗智斌

(重庆交通大学 国家内河航道工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 为探明平陆运河工程对钦江河口盐水入侵的影响,基于MIKE 3三维数值模型,模拟了工程前后枯水期钦江河口盐水入侵过程。结果表明:运河建成后枯水期径流对钦江河口盐水入侵抑制作用占优,盐水入侵距离向上游延伸约5 km,至青年枢纽船闸下引航道。研究模拟了径流对青年船闸减盐效果的影响,当青年枢纽下泄流量超过20 m³/s时,船闸下引航道减盐效果显著;当流量超过60 m³/s时,船闸下引航道盐度可在2天内降至1‰内。

关键词: 平陆运河;钦江河口;盐水入侵;MIKE 3模型;径流调控

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)04-0073-09

0 引言

平陆运河连通西江与钦江水系,是国家西部陆海新通道的骨干工程。该运河按照内河I级航道标准进行建设,入海口近海段航道尺度为(6.5 m×130 m×540 m),设计通航能力为3 000 t级船舶。钦江作为平陆运河建设的关键节点和重要组成部分,承担着江海联运枢纽的功能。钦江下游段的大幅开挖与拓宽可能会引起钦江河口盐水入侵强度增加,进而影响钦江流域居民饮用水及灌溉安全。因此,探明平陆运河工程对钦江河口盐水入侵的影响机制十分必要。

国内外学者针对河口盐水入侵现象开展了大量研究。黄晨^[1]基于MIKE 21研究了长江口深水航道工程对盐水入侵的影响;苏爱平等^[2]通过三维数值模型分析了南水北调工程对长江口盐水入侵的长期影响并提出了抑制盐水入侵的措施;林若兰等^[3]基于数值模拟,研究了风应力对珠江河口盐水入侵过程的影响;Ralston等^[4]和Kolb等^[5]基于区域海洋模式系统(Regional Ocean Model system, ROMS)和UnTRIM2模型研究了航道疏浚对哈德逊

河和威悉河河口盐水入侵的影响。国内学者已对长江口^[6-7]、珠江口^[8-9]等的盐水入侵规律开展了广泛研究。对于钦江这类低径流高潮差的河口,目前研究主要集中在天然条件下盐水入侵特性方面^[10-11],而对运河建设后的盐水入侵问题研究较少,该研究关系到钦州区域的饮水灌溉用水安全。

本文基于三维水动力模型MIKE 3构建了平陆运河工程前后钦江河口盐水入侵三维数值模型,开展了该河口枯水期盐水入侵过程的模拟,分析了运河工程的建设对河口盐水入侵特性的影响,探讨了青年枢纽径流下泄过程与青年船闸下引航道减盐速率的变化关系,提出了工程完成后青年船闸的减盐措施,以期平陆运河工程水资源管理提供一定参考。

1 研究区域

平陆运河起于广西横州市平塘江口,经钦州灵山陆屋镇,沿钦江干流进入茅尾海,最终汇入钦州湾,全长约135 km,设有马道、企石和青年三级枢纽,位于出海口附近的青年枢纽为拆除原有青年水

收稿日期: 2025-04-26。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700)。

作者简介: 佟信睿(2001-),男,硕士,主要从事水力学与河流动力学研究工作。E-mail: 1640095863@qq.com

*通信作者: 肖毅(1985-),女,教授,博士,主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail: xytmlove@163.com

闸后重建的水利设施。钦州湾位于北部湾湾顶,由内湾(茅尾海)和外湾(钦州湾)构成。内湾茅尾海是一个半封闭的海湾^[12],仅通过一个长约2 km的狭窄通道与北部湾相连。茅尾海水深较浅,平均水深约为4~9 m,其中,与钦州湾相连的潮汐通道和湾外钦州湾的水深较大,通常超过10 m^[13]。茅尾海潮汐类型为不规则全日潮,潮差较大,平均大潮高潮位为5.101 m^[14]。

本研究聚焦于平陆运河工程实施后青年枢纽—钦江河口段,共23 km,属于潮汐河段,其与茅尾海相接,面积约135 km²(见图1a)。参考Lao等^[14]的数据,钦江年均径流量和输沙量分别为 $1.163 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $2.69 \times 10^8 \text{ kg}$,河口受全日潮影响显著。钦江径流量受季风气候影响呈现典型的“夏丰冬枯”特征。夏季降水集中,径流动力较强,盐水入侵效应较弱;冬季水量较小,盐水入侵主要发生在冬季(12月—次年2月),尤其以1月最为突出。钦江原河道较窄且深度较浅(底宽约90 m),为保证运河设计航道尺度,钦江段底宽将挖宽至100 m,沿程疏浚深度约4~8 m(见图2),河床比降从0.13%降至0%。

2 研究方法

2.1 钦江河口盐水入侵数值模型介绍

张文武^[10]、郑华等^[11]已采用MIKE 3(DHI水力模拟软件包)建立了天然条件下的钦江河口三维盐水入侵数值模型,模型介绍及验证过程详见文献[11]。本文基于此模型,开展平陆运河工程建设后的盐水入侵过程模拟及分析。

平陆运河工程建设后计算区域为钦江青年枢纽—茅尾海—钦州湾(见图3),基于2000国家大地坐标系建立,高程基准采用1985国家基准面。建模面积约为320 km²,非结构三角形网格共185 400个,垂向通过 σ 坐标变换分为10层;平陆运河工程前的计算区域参见文献[11]。整个模拟过程中河床糙率 k_s 取值为0.05 m,计算时间步长30 s,相关计算参数与验证工况一致,盐度场计算稳定时间需15天^[10-11]。

2.2 平陆运河工程前后模拟工况

钦江径流采用90%最枯流量保证率的典型年流量作为计算依据^[15],钦江河口数值模型出口边界

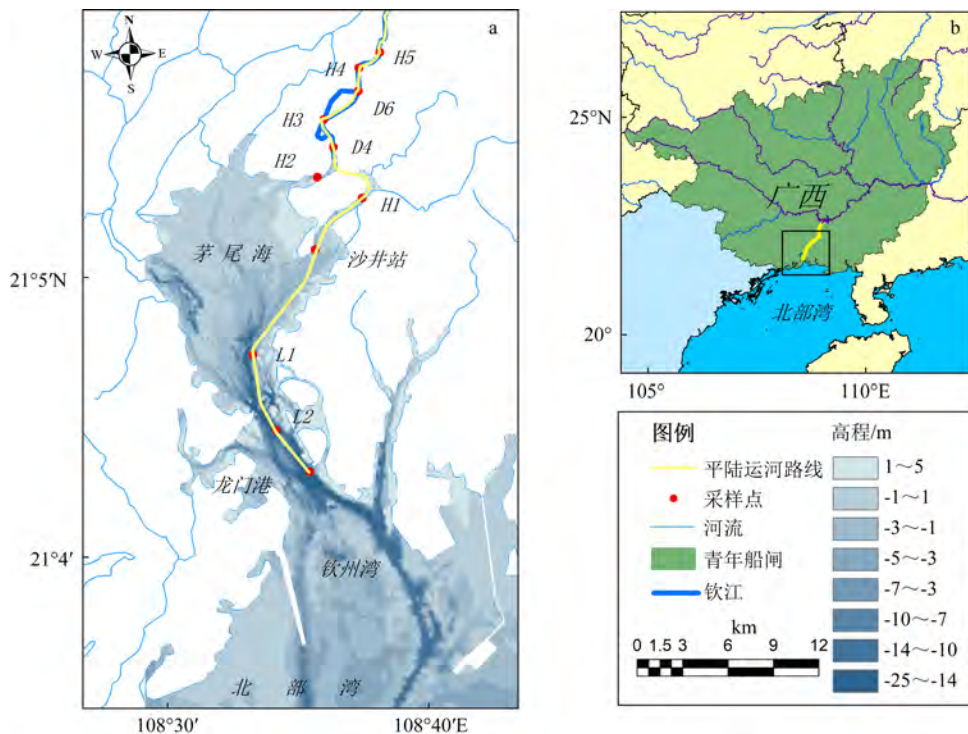


图1 钦江口地形(a)和平陆运河路线(b)

Fig.1 Topography of the Qinzhou River Estuary (a) and the route of the Pinglu Canal (b)

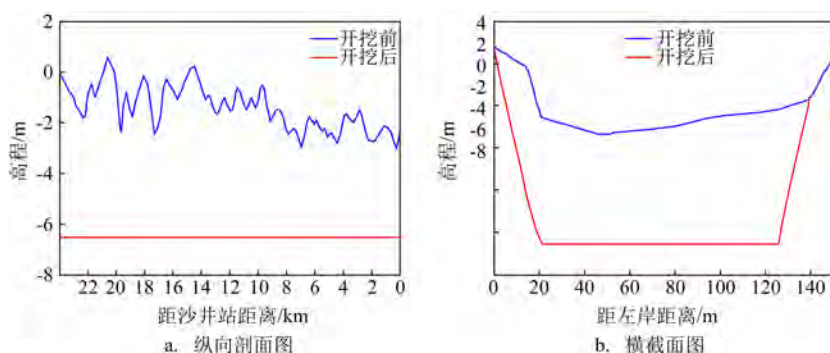


图2 运河开挖前后横断面图

Fig.2 The layout of canal excavation



图3 平陆运河建成后钦江口模型网格

Fig.3 Mesh grid of the Qinjiang Estuary model

采用对应典型年龙门港站潮位与盐度实测数据。风场数据来源于中山市水务局(网址:<http://water.zs.gov.cn>)。青年枢纽船闸过闸泄流过程见图4,按照每日16次过闸频次进行设置,剩余流量通过青年船闸泄流,具体计算工况见表1。

3 钦江河口盐水入侵变化

3.1 工程建设前后沿程盐度剖面变化

盐水入侵长度定义为:以沙井站为起点,在一个涨落潮周期内,盐水降低至0.5‰的最远距离^[16-18]。图5为平陆运河建设前后大小潮期间沿程盐度剖面变化过程。由图可知,运河建设前盐水入

侵长度约为15 km(见图5a),落潮期间,建设前盐水混合较为充分,高浓度盐水可充分向外海撤退(见图5c)。建成后,盐水将会入侵至青年枢纽下引航道处,该位置盐度约为2‰(见图5b);落潮期间盐水分合作用减弱,高盐度海水滞留在航道深槽中(见图5d),青年枢纽下游引航道仍维持约2‰。

3.2 工程建成后沿程盐度变化

图6为运河建设前后青年船闸下引航道处和距青年船闸10 km处(H3)盐度与径流、潮差的变化关系。由图可知,工程前青年枢纽船闸下引航道处盐度为0,运河开挖后盐水入侵至船闸下引航道,当径流 $Q < 15 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,盐度将升高至2‰,径流量超过 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,盐度将降至0.5‰以内(见图6a);同时,H3断面的盐度变幅较工程前降低约3‰,径流增至 $Q > 80 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,该断面盐度从10‰降至5‰,表明工程后径流对钦江青年船闸以下河段盐度影响作用较工程前显著提升。

为进一步讨论运河建设对钦江河口盐水垂向分布的影响,本文对比了工程前后钦江河口河段的环流变化,采用Hansen等^[19]提出的河口环流 U_e 表达式:

$$U_e = \frac{1}{48} \frac{\beta g \frac{\partial s}{\partial x} H^3}{K_M} \quad (1)$$

式中: H 为水深; $\frac{\partial s}{\partial x}$ 为沿河口盐度梯度; K_M 为涡流粘度; β 为盐度收缩系数; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

图7为平陆运河工程前后不同径流下钦江河口沿程分层环流和盐度的变化,上中下3条曲线分别

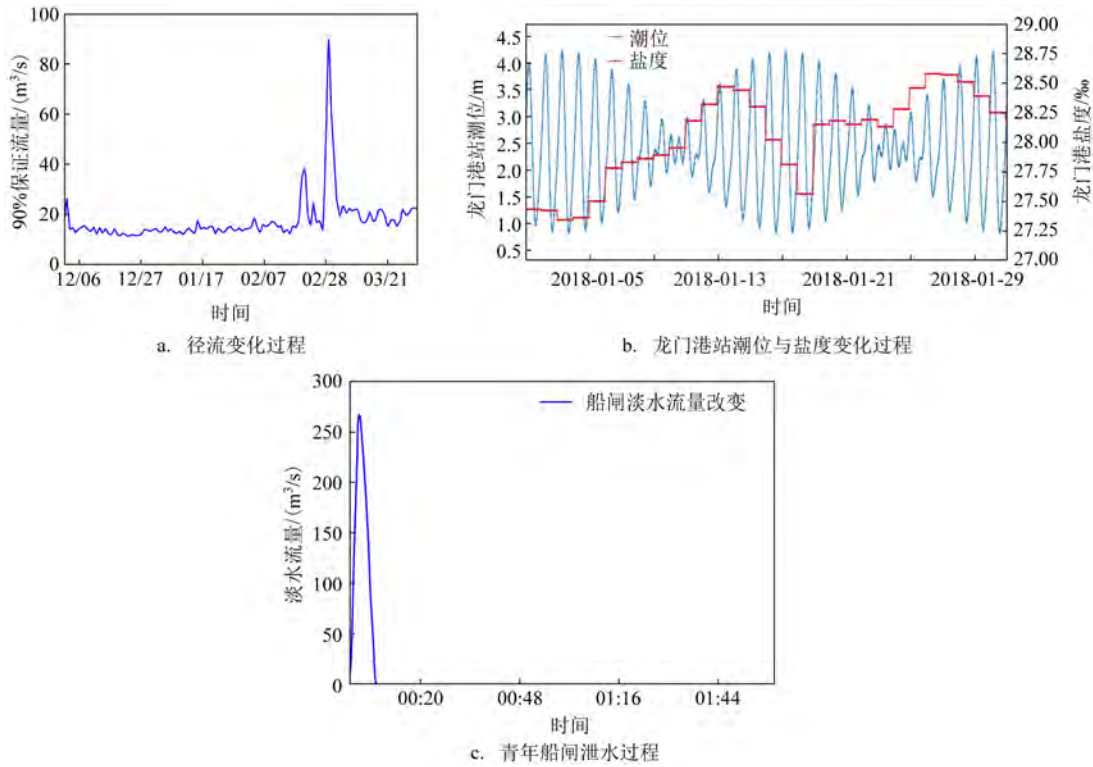


图4 模型进出口边界条件

Fig.4 Inlet and outlet boundary conditions

表1 数值模拟计算工况

Tab.1 Design conditions

工况	青年船闸下泄流量/(m³/s)	开闸频率(次/d)	潮汐范围(月)	风力过程(月)	盐度过程(月)
建设前	90%年保证流量下的12月—	—	12月—次年3月	12月—次年3月	12月—次年3月
建成后	次年3月	16			

代表表层、中层及底层环流与盐度变化。由图可知,平陆运河建设前后 U_z 整体变化趋势基本一致,但工程后河口环流速度减缓,且随径流增大而进一步降低。当径流 $Q < 30 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,钦江河口沿程盐水分层现象随距青年枢纽距离缩短而减弱,抵达青年枢纽位置时盐水处于完全混掺状态。

3.3 工程建成后盐水入侵长度变化

本研究统计90%径流保证率下运河建设前后盐水入侵长度与潮差、径流的对应变化关系,不同流量和潮差组合下的盐水入侵长度见图8。运河修建前,钦江河口盐水入侵长度为6.5~22.0 km;径流 $Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 且潮差超过3.0 m时,钦江河口盐水入侵

强度达到最大(见图8a)。工程后相同潮差与径流条件下,盐水入侵长度最长可达27 km(见图8b),入侵范围延伸至青年枢纽船闸下引航道处;径流 $Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,盐水入侵长度较工程前增加约5 km;径流超过20 m^3/s 时,盐水入侵长度增幅缩减至2.5 km;径流 $Q > 40 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,盐水入侵程度与工程前基本一致(见图8c)。

3.4 工程建设后盐水入侵影响因素分析

图9为工程建设前后90%保证率工况下钦江河口沿程盐度与潮差、径流相关系数的变化。工程前钦江河口沿程盐度与潮差呈正相关,且相关性随距河口距离减小而增加,相关系数由0.62升至0.86;运

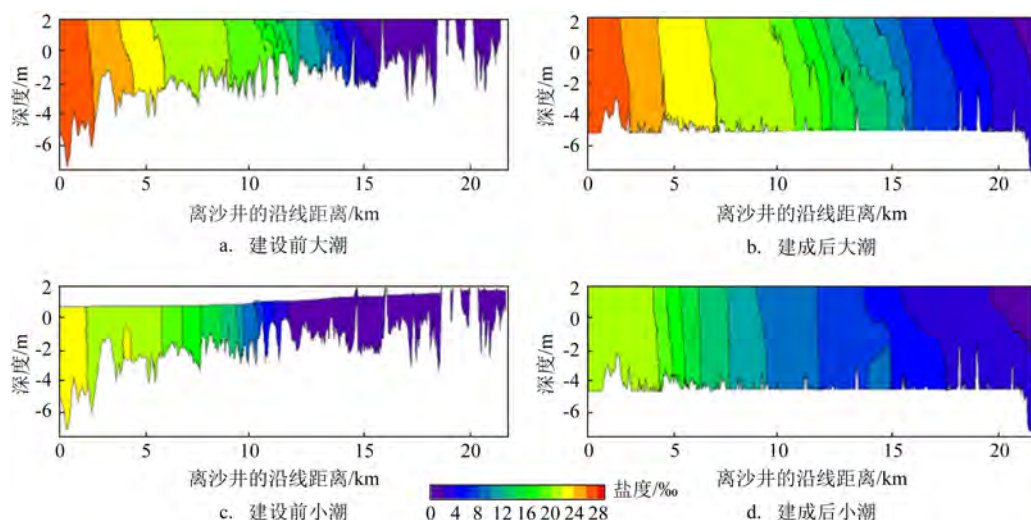


图5 平陆运河建设前后大小潮盐度剖面

Fig.5 Salinity profiles of spring and neap tides before and after the construction of Pinglu Canal

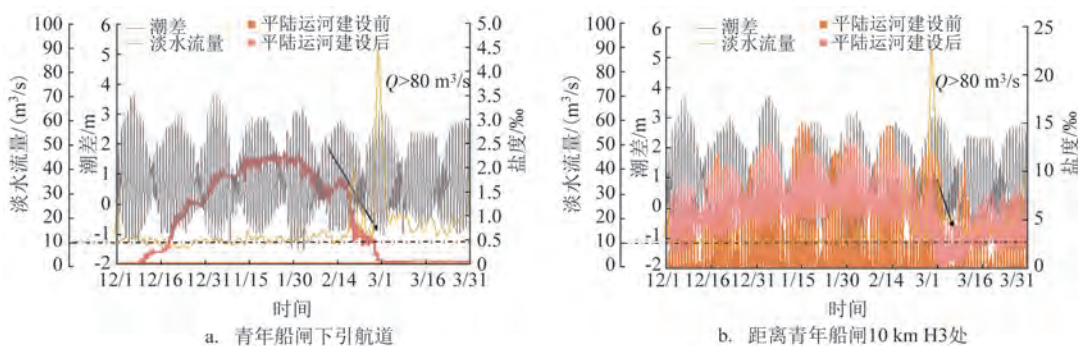
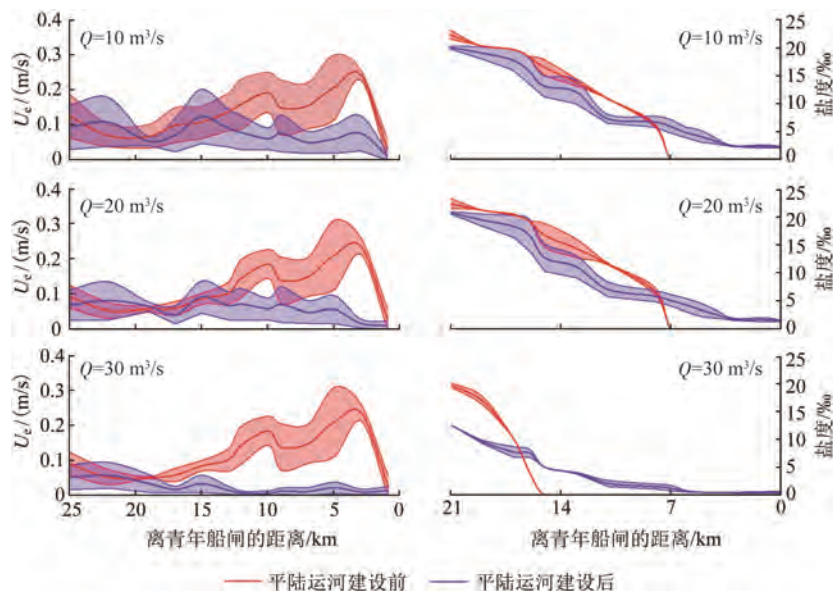


图6 平陆运河建设前后盐度、径流和潮差对比

Fig.6 Comparison of salinity, runoff, and tidal range before and after the construction of Pinglu Canal



注:每种颜色从上到下3条线分别代表表层、中层、底层

图7 平陆运河建设前后河口环流和分层的对比

Fig.7 Comparison of estuarine circulation and stratification before and after the construction of Pinglu Canal

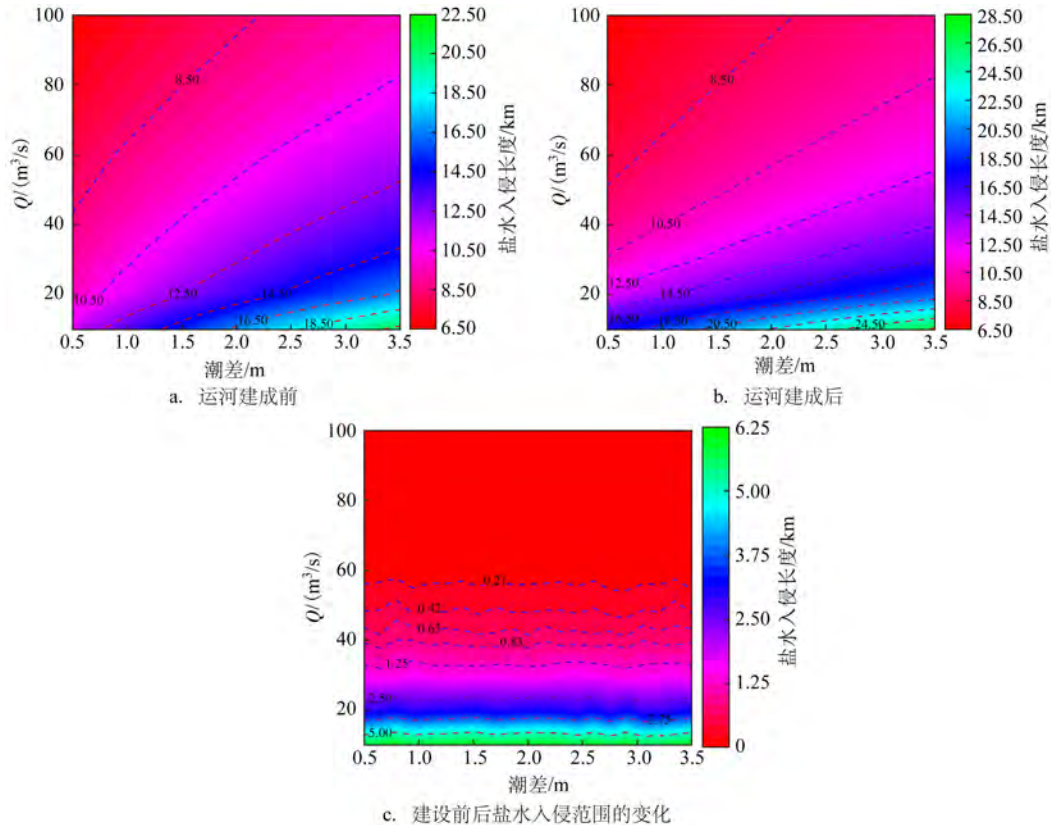


图8 盐水入侵与潮差和径流的关系

Fig.8 Relationship between saltwater intrusion and tidal range/runoff

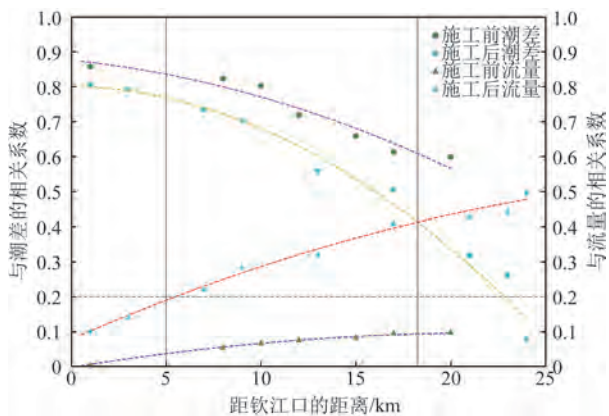


图9 运河建设前后盐度与潮差及径流作用相关性

Fig.9 Correlation between salinity and tidal range/runoff effects before and after canal construction

河修建后, 钦江河口盐水入侵对潮差的敏感度下降, 青年船闸下引航道处(约 24 km 断面)盐度和潮差的相关系数降至 0.09。同时, 工程前后钦江河口沿程盐度与径流的相关关系呈相反特征: 工程前沿

程相关系数不超过 0.1, 工程建成后径流对河口盐水入侵的影响逐渐增大, 至青年船闸引航道处相关系数达 0.51。结果表明, 平陆运河建成后径流对钦江河口盐水入侵的影响作用占优。

4 青年船闸减盐措施研究

4.1 模拟工况设置

由前述研究分析可知, 工程后青年船闸下引航道盐度的主要影响因子为径流, 本节针对青年船闸下引航道不同初始盐度, 设置多组径流工况, 模拟船闸下引航道盐度降至 1.0‰ 所需时长(见表 2)。

4.2 下引航道减盐效果分析

表 3 为青年船闸下引航道在不同初始盐度、下泄流量条件下, 盐度降至 1.0‰ 所需天数。由表可知, 青年枢纽泄水流量 $Q > 20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 减盐效果逐渐凸显; 径流 $Q > 60 \text{ m}^3/\text{s}$ 且初始盐度小于 5‰ 时, 盐度

表2 模拟工况设置

Tab.2 Simulation scenario settings

工况序号	初始盐度/%	开闸频率/(次/d)	青年枢纽泄流/(m ³ /s)	潮差/月
1	20.05			
2	12.55			
3	5.58	16	10, 20, 40, 60, 90	1
4	2.35			

表3 不同工况下盐度减少到1.0‰所需时间(单位:d)

Tab.3 Time required (days) for salinity reduction to 1.0‰ under different scenarios(unit:d)

初始盐度/‰	流量/(m ³ /s)				
	10	20	40	60	90
20.05	34	16	9	5	3
12.55	28	13	7	4	3
5.58	20	11	5	3	2
2.35	12	7	3	2	1

降至1.0‰仅需2天。图10为固定潮差条件下,径流大小与盐度降至1.0‰耗时的对应关系。由图可知,青年枢纽盐度下降时长与径流呈负相关、与船闸下引航道初始盐度呈正相关。

为了更有效地评估径流增量对船闸下引航道的减盐作用,引入无量纲参数 K 表征船闸下引航道减盐能力,其表达式为:

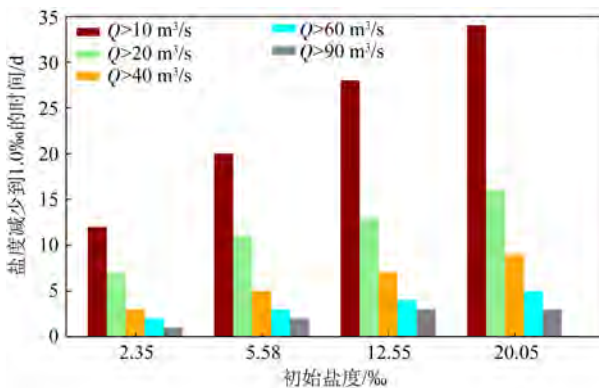


图10 青年船闸下引航道减盐至1.0‰的耗时与初始盐度的关系

Fig.10 Relationship between desalination time (to 1.0‰) and initial salinity for the ship lock

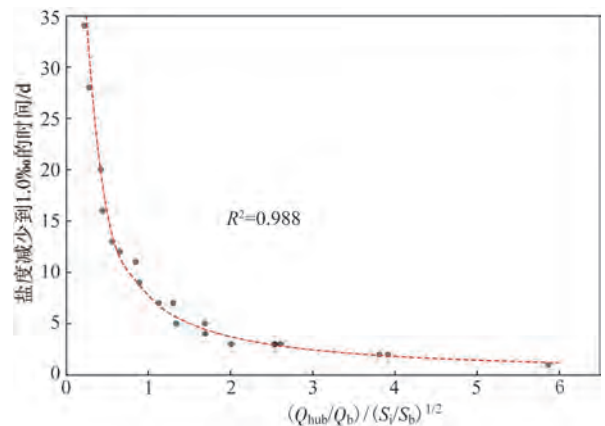
$$K = \frac{Q_{\text{hub}}}{Q_b} \left/ \left(\frac{S_i}{S_b} \right)^{1/2} \right. \quad (2)$$

式中: Q_{hub} 为青年枢纽泄水流量(单位:m³/s); Q_b 为基流流量,取值10 m³/s; S_i 为青年枢纽引航道初始盐度(单位:‰); S_b 为目标减盐浓度,设置为1.0‰。参数 K 值越大,说明减盐能力越强。

基于无量纲参数 K 与减盐耗时 D 开展回归分析,构建幂函数关系式如下:

$$D = 7.67 \cdot K^{-1.04} \quad (3)$$

图11为无量纲参数 K 随时间 D 的变化曲线。将数值模拟结果与式(3)的理论计算结果比对,两者相关系数可达98.8%。结果表明,基于无量纲参数 K 构建的幂函数关系能够有效实现两类预测:①给定初始盐度与径流量,估算盐度达标所需时间;②限定目标时长和初始盐度,计算所需下泄径流量。

图11 无量纲参数 K 随时间 D 的变化规律Fig.11 Variation of dimensionless parameter K with time D

5 结论

本文模拟了平陆运河建成前后钦江河口盐水入侵全过程,分析工程对河口盐水入侵特性的影响。结论如下:

①平陆运河建成后钦江河口盐水入侵增强。工程建设前,钦江口径流 $Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 、潮差超过3.0 m时,盐水入侵最远距离为22 km;工程建成后,在相同潮差和径流条件下,盐水入侵距离增加约5 km。

②平陆运河建成后,枯水期径流对河口盐水入侵的抑制作用占主导。工程后青年船闸下引航道处

盐度与径流相关系数升至0.51,与潮差相关系数降至0.09。

③青年船闸下引航道减盐效果可通过径流调控显著优化。下泄径流超过20 m³/s时,青年船闸下引航道减盐效果明显提升;径流超过60 m³/s且初始盐度低于5‰时,盐度可在2天内降至1.0‰以内。

参考文献:

- [1] 黄晨. 长江口深水航道工程对盐水入侵的影响[J]. 水电能源科学, 2019, 37(3): 29-32.
Huang Chen. Impacts of deep water channel project in Yangtze River estuary on saltwater intrusion[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(3): 29-32.
- [2] 苏爱平, 吕行行, 吴宇帆. 南水北调工程对长江口盐水入侵和淡水资源的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2020(3): 32-42.
Su Aiping, Lü Hanghang, Wu Yufan. Impact of the South-to-North Water Diversion Project on saltwater intrusion and freshwater resources in the Changjiang Estuary[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2020(3): 32-42.
- [3] 林若兰, 卓文珊, 曾珂, 等. 不同风向对珠江东四口门盐水入侵的影响[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 66-75.
Lin Ruolan, Zhuo Wenshan, Zeng Ke, et al. Influence of different wind direction on saltwater intrusion in East four portals of Pearl River[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 66-75.
- [4] Ralston D K, Geyer W R. Response to channel deepening of the salinity intrusion, estuarine circulation, and stratification in an urbanized estuary[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(7): 4784-4802.
- [5] Kolb P, Zorndt A, Burchard H, et al. Modelling the impact of anthropogenic measures on saltwater intrusion in the Weser Estuary[J]. Ocean Science, 2022, 18(6): 1725-1739.
- [6] 马瑞. 低径流量和台风联合作用对长江口盐水入侵和淡水资源影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2024.
Ma Rui. The combined influence of low river discharge and typhoons on saltwater intrusion and freshwater resources in the Changjiang Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2024.
- [7] 李林江, 朱建荣. 冬季北风风速对长江河口盐水入侵的影响[J]. 海洋学报, 2021, 43(10): 10-22.
Li Linjiang, Zhu Jianrong. The effects of north wind speed in winter on saltwater intrusion in the Changjiang Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(10): 10-22.
- [8] Chen Yuxiang, Zuo Juncheng, Zou Huazhi, et al. Responses of estuarine salinity and transport processes to sea level rise in the Zhujiang (Pearl River) Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(5): 38-48.
- [9] Wang Hui, Li Wensheng, Zuo Changsheng, et al. Saltwater intrusion in the pearl river estuary (China): variation characteristics and cause analysis[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 36(6): 1145-1153.
- [10] 张文武. 钦江河口盐水入侵数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
Zhang Wenwu. Numerical simulation of saline intrusion in Qinjiang River Estuary[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [11] 郑华, 刘洁, 张文武, 等. 钦江-茅尾海盐水入侵丰、枯水期盐度分布特征: 以2021年盐水入侵为例[J]. 海洋预报, 2025(2): 58-67.
Zheng Hua, Liu Jie, Zhang Wenwu, et al. Salinity distribution characteristics of Qinjiang Maowei Sea saltwater intrusion during high and low water periods: taking the saltwater intrusion in 2021 as an example[J]. Marine Forecasts, 2025(2): 58-67.
- [12] 李平阳. 广西北部湾沉积物高分辨率有机地球化学记录研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
Li Pingyang. High-resolution organic geochemical record in the Beibu Gulf, China[D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [13] 张敏, 曾繁如, 吴航星, 等. 广西钦州湾围垦工程对茅尾海潮汐动力参数的影响[J]. 应用海洋学学报, 2024, 43(1): 45-54.
Zhang Min, Zeng Fanru, Wu Hangxing, et al. Impacts of reclamation projects on tidal parameter dynamics in Maowei Sea of Qinzhou Bay, Guangxi[J]. Journal of Applied Oceanography, 2024, 43(1): 45-54.
- [14] Lao Qibin, Liu Guoqiang, Shen Youli, et al. Biogeochemical processes and eutrophication status of nutrients in the northern Beibu Gulf, South China[J]. Journal of Earth System Science, 2021, 130(4): 199.
- [15] 重庆交通大学. 船闸泄水模式对盐水上溯的影响研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
Chongqing Jiaotong University. Research report on the influence of lock discharge modes on saltwater intrusion[R]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [16] 刘杰斌, 包芸. 磨刀门水道枯季盐水入侵咸界运动规律研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(S2): 122-125.
Liu Jiebin, Bao Yun. The movement of saltwater intrusion border of Modaomen channel in the dry season[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(S2): 122-125.
- [17] Gong Wenping, Shen Jian. The response of salt intrusion to changes in river discharge and tidal mixing during the dry season in the Modaomen Estuary, China[J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(7/8): 769-788.
- [18] 王伟. 上游大通径流量对长江口水入侵影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(3): 106-111.
Wang Wei. The research on the influence of the change of river discharge at Datong on the saltwater intrusion in Yangtze Estuary[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(3): 106-111.
- [19] Hansen D V, Rattray Jr M. Gravitational circulation in straits and estuaries[J]. Journal of Marine Research, 1965, 23(2): 104-122.

Effects of the Pinglu Canal Project on saltwater intrusion in the Qinjiang River estuary

TONG Xinrui, XIAO Yi*, LIU Jie, MIAO Zhibin

(National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To investigate the impact of the Pinglu canal project on saltwater intrusion in the Qinjiang River estuary, this study employs the MIKE 3 three-dimensional numerical model to simulate the saltwater intrusion process during the dry season before and after the project implementation. The results show that after the completion of the canal, runoff becomes the dominant factor influencing saltwater intrusion in the Qinjiang River estuary during the dry season, with the saltwater intrusion distance extending approximately 5 km upstream, reaching the lower approach channel of the Qingnian Ship Lock. This study also simulates the effect of runoff on salinity reduction at the Qingnian Ship Lock. When the discharge from the Qingnian hub exceeds 20 m³/s, the salinity reduction effect in the lower approach channel becomes significant. When the discharge exceeds 60 m³/s, the salinity in the lower approach channel drops below 1‰ within two days.

Key words: Pinglu canal; Qinjiang River estuary; saltwater intrusion; MIKE 3 model; flow regulation