



新建运河盐水上溯及 船闸挡潮防咸数值模拟研究*

杨忠超, 胡江, 许克勤

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 柬埔寨新建扶南德佐运河地处湄公河三角洲, 地势低平, 盐水上溯严重危及运河两岸农业灌溉, 需要评估新建运河盐水上溯距离及浓度分布, 并提出有效的防咸措施, 为项目建设和运营提供技术支持。基于 MIKE3 构建扶南德佐运河三维水动力-盐度数学模型, 分析无船闸与船闸运行条件下盐水上溯规律。结果表明: 盐水上溯主要受潮汐和密度梯度驱动, 盐度 1 psu 的入侵最大距离与上游淡水流量呈负对数关系, 即流量 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时入侵距离达 25.2 km, 流量增至 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时缩短至 12.5 km; 船闸通过水位控制与闸门启闭程序可有效阻隔咸潮, 抑制盐水上溯距离并降低盐度, 运行 6 个月后, 盐度 1 psu 入侵距离降至 6.6 km, 闸首盐度由 27 psu 降至 5.5 psu。

关键词: 运河; 盐水上溯; 船闸; 挡潮; 防咸; 数值模拟

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0167-09

Numerical simulation of saltwater intrusion and tide/salt control by ship lock in newly constructed canals

YANG Zhongchao, HU Jiang, XU Keqin

(School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The new Funan Techo Canal in Cambodia's low-lying Mekong Delta faces significant salinity intrusion, threatening agricultural irrigation on both banks of the river. It is necessary to assess the extent and distribution of saltwater intrusion of the newly constructed canal and propose effective countermeasures. The three-dimensional hydrodynamic-salinity model of Funan Techo Canal is built using MIKE3 to systematically analyze saltwater intrusion patterns both without mitigation and with the operation of a ship lock. The results indicate that salinity intrusion is primarily driven by tidal dynamics and density gradients. The maximum intrusion distance of the 1 psu isohaline exhibits an inverse logarithmic relationship with the upstream freshwater discharge. At a low inflow $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$, the 1 psu saltwater intrudes up to 25.2 km, this distance is significantly reduced to 12.5 km when the inflow increases to $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$. The implementation of a ship lock can control upstream water levels and follow specific gate operation sequences to block seawater effectively. It markedly suppresses the intrusion distance and reduces salinity concentrations. After six months of ship lock operation, the 1 psu intrusion distance is limited to just 6.6 km, and the salinity at the lock head decreases from 27 psu to 5.5 psu. Therefore, the ship lock is identified as the key engineering measure for salinity control. Its operation, combined with upstream water level and flow regulation, can synergistically ensure the security of freshwater resources along the canal.

Keywords: canal; saltwater intrusion; ship lock; tidal barrier; salt prevention; numerical simulation

收稿日期: 2025-07-17 录用日期: 2025-11-14

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3208803)

作者简介: 杨忠超(1972—), 男, 博士, 研究员, 从事航道整治、计算流体力学方面的研究工作。

柬埔寨是一个内陆国家,近年随着经济发展,急需打通出海通道,为此拟修建扶南德佐运河,该运河上游连接巴萨河,下游在白马市入海,见图1。该运河所在的湄公河三角洲地区地势低平,海水倒灌风险较高。尤其在旱季,河流水量减少,盐水易沿运河上溯,威胁沿岸淡水水质和农业生产,因此需要评估新建运河后盐水上溯距离,提出有效的防咸措施。



图1 扶南德佐运河地理位置
Fig.1 Location of Funan Techo Canal

盐水上溯是河口及运河工程面临的重大环境问题,严重危胁区域取水和运河两岸农业灌溉安全^[1-2]。现有研究表明,盐水入侵受径流、潮汐、地形及人类活动等多因素耦合作用,其中潮汐动力与径流平流输运是主导机制^[3-5]。长江口枯季径流量低于1万 m^3/s 时,盐水入侵距离可达60 km以上,而三峡工程调蓄使枯季径流增加,显著抑制了盐水入侵强度^[6]。平陆运河工程中,青年枢纽下游引航道盐水上溯距离与上游径流量呈负幂指数关系,当流量从1.5万 m^3/s 增至5.0万 m^3/s 时,入侵距离减少60%以上,运河开挖宽度每减少15 m减盐效果提升23%^[7]。

数值模拟技术已成为盐水上溯研究的核心手段。二维模型因计算效率高而被广泛应用于河口盐水入侵时空分布研究,如长江口二维模型成功模拟了枯季大中潮长江口南北支盐水倒灌过程及盐度时空分布^[8]。但二维模型难以反映复杂地形对盐淡水混合的影响,三维模型逐渐成为研究热

点。长江口三维河口、海岸和海洋模型(estuarine, coastal and ocean model, ECOM)揭示了北支盐水倒灌与南支环流耦合机制,预测北支建闸后南支盐度可降低80%。

河口船闸既是保障航运的重要措施,又在挡潮防咸方面发挥着重要作用。周华兴等^[9]通过实测资料分析发现,船舶过闸时水位差调平、异重流交换是盐水主要入侵方式,提出防咸需控制水位与过闸时间,同时基于盐水异重流理论,提出考虑速度系数的计算公式,为船闸防咸设计提供理论依据^[10]。王贺等^[11]评估大芦线东延伸航道船闸运行引发的盐水入侵风险,提出防咸泵站和节制闸调度综合措施大幅减小盐水入侵面积,缩短盐水上溯距离。此外船闸防咸措施包括集咸坑法、气幕法、置换法、咸水箱法、省水池法、防咸门檻、径流冲泄法等。

本文通过数值模拟的研究手段,构建扶南德佐运河三维水动力-盐度耦合数学模型,研究不同淡水流量盐水上溯距离及盐度分布,评估船闸挡潮防咸效果,为项目建设和运营提供技术支撑。

1 模型的建立与验证

1.1 模型原理

本文采用丹麦水资源及水环境研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)开发的MIKE3软件中的三维水动力模块(flow model, FM)构建柬埔寨扶南德佐运河盐水入侵数学模型。模型控制方程包括水流连续性方程、动量守恒方程、盐度和温度输运方程,即:

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = S_c \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] + u_i S_c \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\phi u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_T \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度; Ω_{ij} 为科氏力张量, 其中 $i, j=1, 2, 3$; u_i, u_j 为 i, j 方向对应速度分量; x_i, x_j 为 i, j 方向坐标; p 为流体压强; g_i 为 i 方向重力加速度; ν_T 为湍流涡黏度; δ_{ij} 为 Kronecker 系数; φ, T 分别为盐度、温度; D_ϕ, D_T 分别为盐度、温度场各方向扩散系数, 可通过紊流模型按比例求得; t 为时间; S_c 为质量源汇项; S_ϕ 为盐分源汇项; S_T 为热量源汇项。本文模型采用 $k-\varepsilon$ 紊流模型求解, 其中 k 为湍动能, ε 为湍动能耗散率。

该三维数值模型在垂直方向通过 σ 变换分层, 以适应地形和水位的变化, 将控制坐标系 (x, y, z, t) 按式(5)转化成 (x, y, σ, t) 。

$$\sigma = \frac{z - \xi}{H + \xi} \quad (5)$$

式中: z 为原笛卡尔坐标系垂向坐标; H, ξ 分别为当地瞬时水深、自由水面高程。MIKE 3 FM 模块采用交替方向隐式 (alternating direction implicit, ADI) 方法对时域内质量和动量守恒方程进行积分, 各方向得到的控制方程的离散矩阵则通过采用双扫描 (double-scan, DS) 算法进行求解。

1.2 模型验证

1.2.1 潮位和潮流验证

利用 CS3 站点 2024 年 10 月 5 日—10 月 12 日实测潮位、流速数据验证潮流模型, 结果见图 2。可以看出, 潮流过程线模拟值与实测值趋势、峰值基本一致; 实测流速极大极小与模拟值基本相当; 受测时风场影响, 流向验证误差偏大。总体分析认为本文模型的计算结果可信。

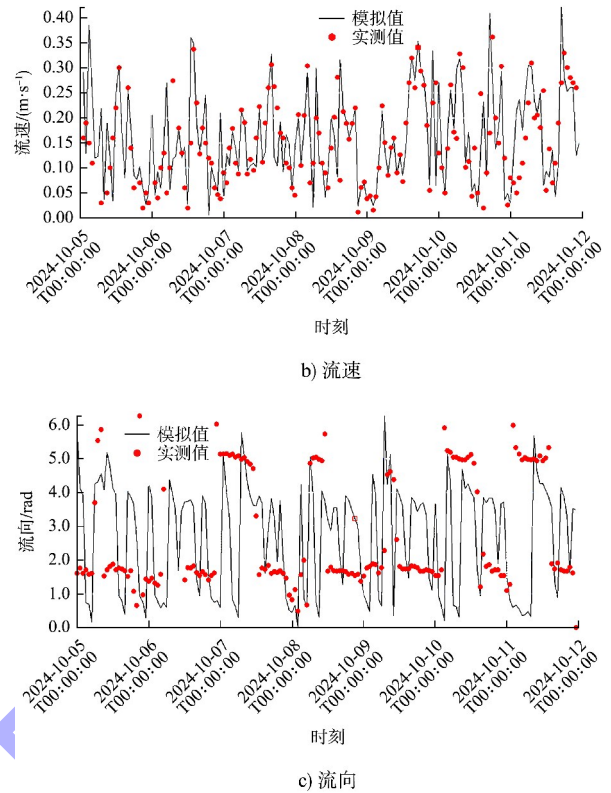
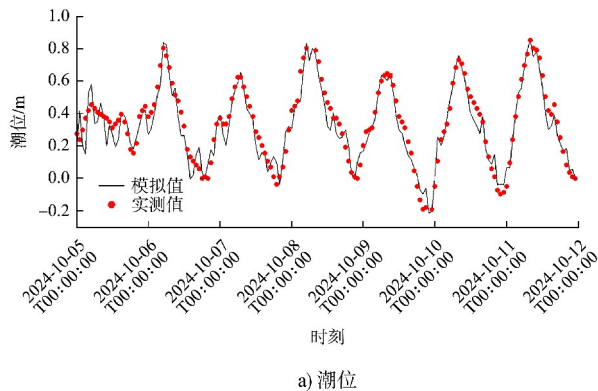


图 2 CS3 站点潮位、流速、流向验证结果
Fig. 2 Validation results of tide, current velocity, and direction at Station CS3

1.2.2 盐水输运验证

柬埔寨扶南德佐运河为新建工程, 没有相应的实测资料开展验证, 故采用室内概化水槽试验对无潮有径流条件下的盐水上溯模型进行验证。试验水槽长 110 m、宽 0.5 m、高 0.5 m。试验共模拟 5 个工况, 盐水输运距离对比见表 1。可以看出, 水槽试验盐水输运最远距离与计算结果相当, 最大相对误差在 $\pm 4\%$ 以内; 工况 5 盐水输运距离随时间的变化见图 5。可以看出, 数值模型计算结果与水槽试验变化趋势相同且数据接近。

表 1 各试验工况及盐水输运距离对比
Tab. 1 Test cases and comparison of saltwater transport distance

试验 工况	水深/ m	淡水 流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	盐水 盐度/ psu	盐水输运最远 距离/m		误差/ %
				水槽试验	数值模型	
1	0.25	15.0	17.7	75.5	76.3	-1.06
2	0.25	15.0	10.2	52.0	52.8	-1.54
3	0.25	12.4	10.2	73.0	72.6	0.55
4	0.20	9.0	10.0	68.0	67.8	0.29
5	0.22	15.0	10.9	28.0	28.9	-3.21

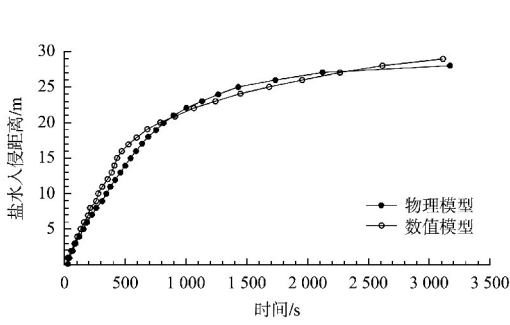
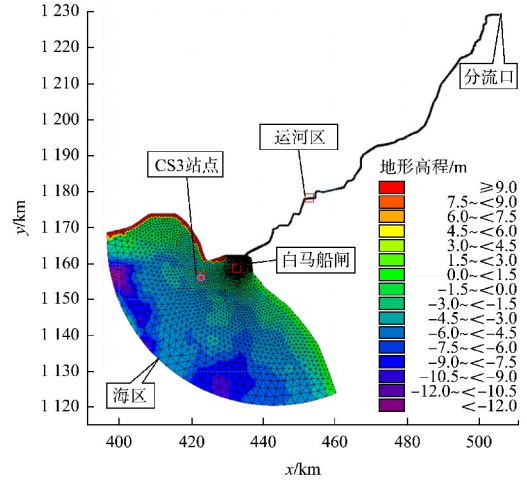


图3 工况5的盐水输运过程验证
Fig. 3 Validation of saltwater transport process of Case 5



1.3 模型构建

扶南德佐运河模型见图4a), 其构建范围上起巴萨河分流口(桩号:K29)、下至运河入海口(桩号:K143+56), 总长114.56 km, 运河底宽60 m, 断面采用梯形结构, 边坡坡率为1:3, 河底高程按最小通航水深4.7 m确定; 出口海区边界为半弧, 最远距运河入海口约32 km, 地形采用白马近岸区域海图数据(海图编号3879, 比尺1:240 000), 共5 600个水深点、156条等深线数据。采用非结构三角网格对计算域进行剖分, 见图4b), 沿河宽方向网格节点间距10 m, 纵向网格节点间距20 m。垂向按照 σ 分布原则等间距分为5层, 见图4c)。白马枢纽平面布置见图5, 白马船闸位于运河右侧, 长135 m、宽30 m, 下闸首距入海口约2 115 m; 运河左侧布置5个泄洪闸, 总宽56 m。

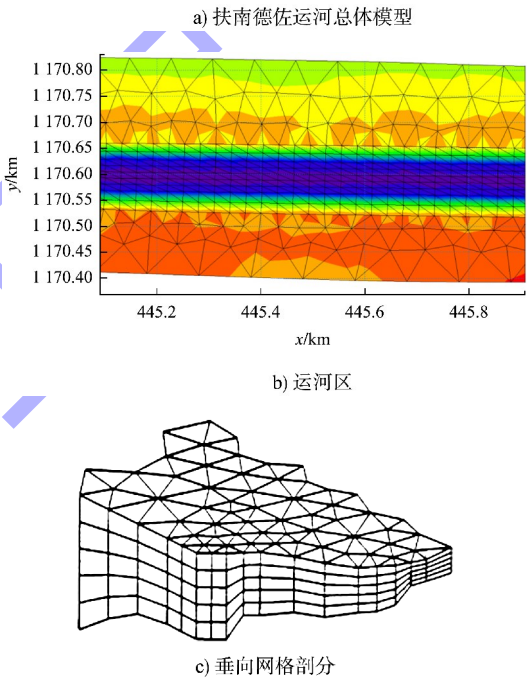


图4 扶南德佐运河数值模型及网格剖分
Fig. 4 Numerical model and mesh generation for Funan Techo Canal

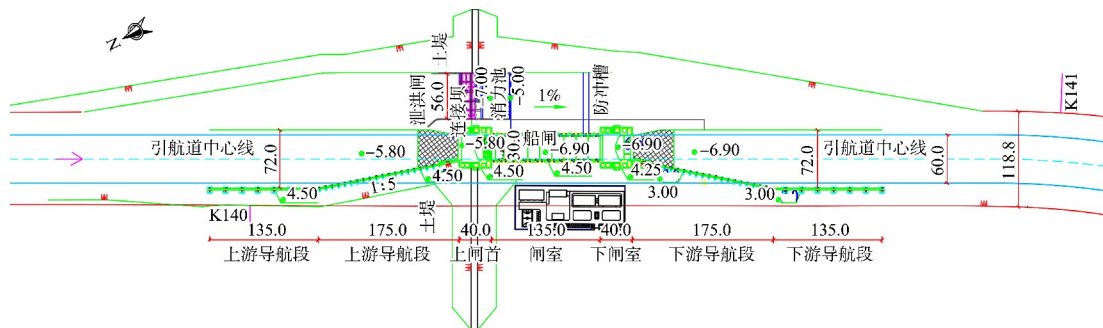


图5 白马枢纽平面布置(单位:m)
Fig. 5 Layout of Baima Junction (unit: m)

1.4 白马船闸概化及测点布置

船闸灌泄水系统十分复杂, 本文进行概化处理, 在模型中设置上闸门、下闸门, 通过启闭上、下闸门实现船闸灌泄水, 船闸概化图见图 6。左岸侧设置泄洪闸, 洪水期打开泄洪。在白马船闸前、闸中和闸后分别布置 P_1 、 P_2 和 P_3 共 3 个测点, 分析测点水位及盐度变化规律。

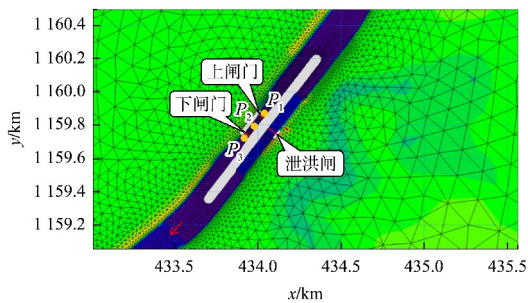


图 6 白马船闸概化图及测点布置

Fig. 6 Generalized diagram and monitoring points layout

2 无船闸挡潮盐水入侵特性分析

2.1 计算工况

运河清水下泄压咸, 流量越大, 压咸作用越

强, 本文选取 4 个工况研究不同流量的压咸作用, 其中 C1 工况取最小通航流量 $1 \text{ m}^3/\text{s}$, C4 工况取洪水期最大泄洪流量, 见表 2。所有工况运河分流口设置入流流量边界条件, 盐度为 0 psu ; 海区以图 7 的 2007 年潮位过程线作为水位边界条件, 盐度取实测的 28 psu 。C1 ~ C3 工况模拟旱季时间 6 个月(2007 年 1 月 1 日—2007 年 6 月 30 日)。C4 工况模拟旱季结束后雨季洪水 1 个月(2007 年 1 月 1 日—2007 年 1 月 31 日)。

表 2 无船闸挡潮计算工况

Tab. 2 Analysis cases for tide prevention without ship lock

工况	进口流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	海区潮位时段	进口盐度/ psu	海区盐度/ psu
C1	1	2007 年 1 月 1 日— 2007 年 6 月 30 日	0	28
C2	2	2007 年 1 月 1 日— 2007 年 6 月 30 日	0	28
C3	20	2007 年 1 月 1 日— 2007 年 6 月 30 日	0	28
C4	100	2007 年 1 月 1 日— 2007 年 1 月 31 日	0	28

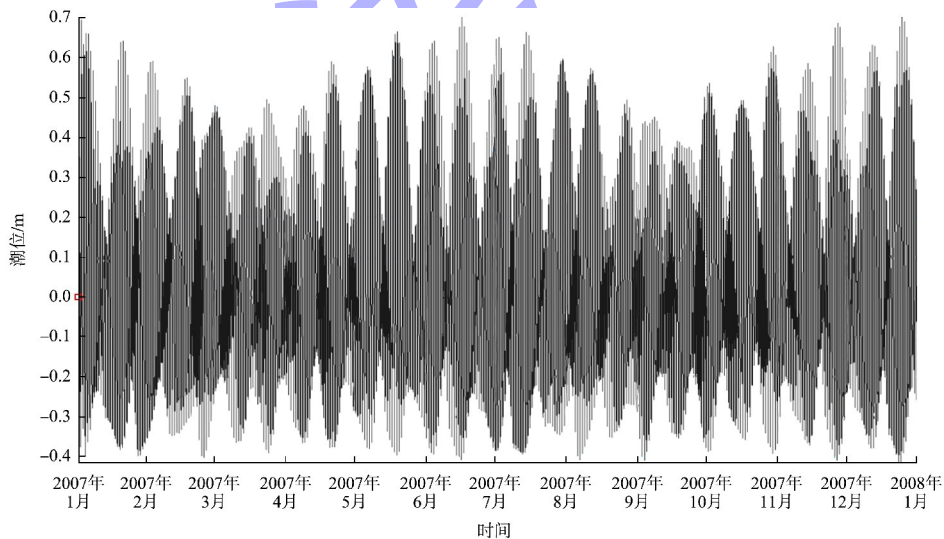


图 7 海区边界 2007 年潮位过程线

Fig. 7 Tidal level hydrograph in 2007 at sea area boundary

2.2 模拟成果分析

在模拟初期前 10 d, P_1 测点盐度不断累积迅速增大至 27 psu , 然后随潮位在 $17 \sim 27 \text{ psu}$ 之间

波动, P_1 测点水位与海区边界潮位波形相当, 相位落后约 0.5 h 。 P_1 测点盐度、水位与潮位关系见图 8。

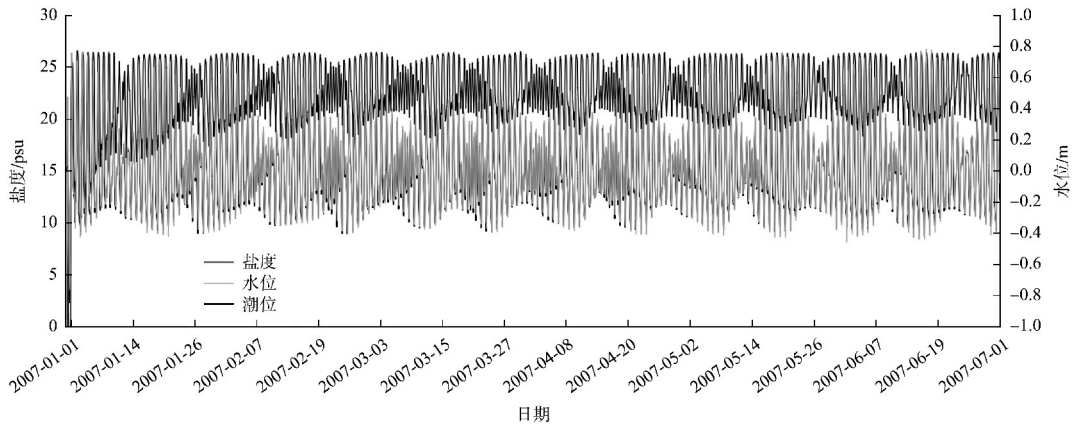


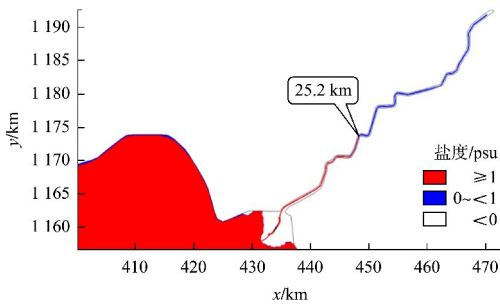
图 8 C1 工况 P_1 测点盐度、水位与潮位关系

Fig. 8 Relationship of salinity, water level, and tidal level at P_1 under Condition C1

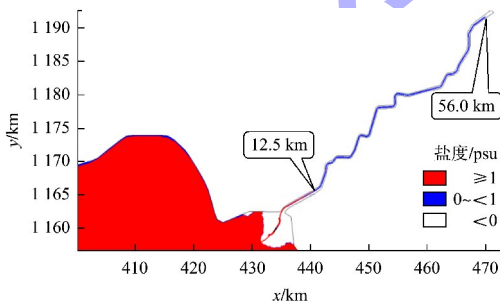
计算过程结果表明, 盐水在潮汐及浓度扩散作用下随时间不断向上游输移。C1 工况盐水上溯最远距离时盐度沿程分布见图 9、10, 涨憩时盐水楔头部最远距入海口 56.5 km, 浓度 1 psu 盐水头部距入海口 25.2 km; 落憩时盐水楔头部距入海口 56 km, 盐度 1 psu 盐水头部距入海口 12.5 km。

水上溯最远距离见表 3, 4 个流量盐度的沿程分布见图 11, 盐度 1 psu 最大入侵距离 L_{max} (km) 与淡水流量 Q (m^3/s) 的拟合公式为:

$$L_{max} = -4.167 \ln Q + 24.041 \quad (6)$$



a) 涨憩时刻



b) 落憩时刻

图 9 C1 工况盐水上溯最远距离时盐度分布
Fig. 9 Salinity distribution at maximum saltwater intrusion distance under Condition C1

C2~C4 工况有类似的盐度分布, 但由于下泄流量增大, 盐水上溯的距离缩短, 可见淡水来流量对盐水入侵距离抑制效果显著。4 个流量涨憩盐

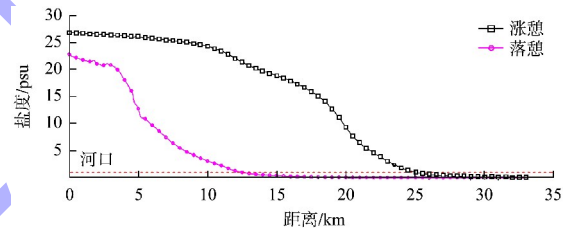


图 10 C1 工况盐水上溯最远距离时盐度沿程分布
Fig. 10 Longitudinal salinity distribution at maximum saltwater intrusion distance under Condition C1

表 3 不同来流量涨憩盐水上溯最远距离
Tab. 3 Maximum saltwater intrusion distance at high water slack under different inflow rates

工况	来流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	盐水楔头部上溯 最远距离/km	盐度 1 psu 头部上溯 最远距离/km
C1	1	56.5	25.2
C2	2	51.1	19.4
C3	20	32.6	12.5
C4	100	9.8	4.5

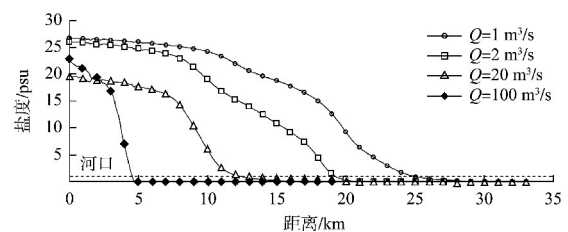


图 11 不同来流量上溯最远距离盐度沿程分布
Fig. 11 Longitudinal salinity distribution at maximum intrusion distance under different inflow rates

3 船闸挡潮防咸效果分析

3.1 计算工况

基于最不利情况考虑, 计算工况 C5 模拟来流量与船闸泄水量平衡, 船闸上游运河水位保持最低通航水位 0.8 m。

3.2 船闸运行方式

根据白马船闸通过能力计算, 概化闸门开启时间 10 min、关门时间 2 min。按 2050 年水平年, 上、下行过闸一次总时间取 76 min, 上行、下行各 38 min。由此概化白马船闸闸门启闭过程, 其运行程序见图 12。

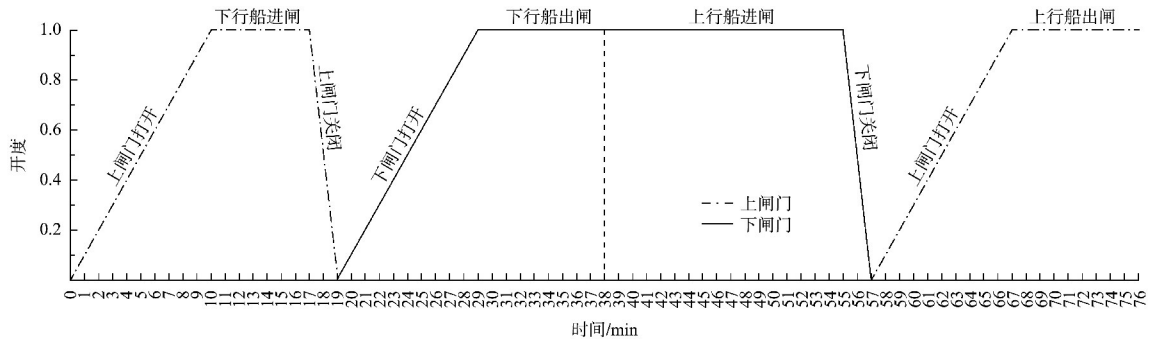


图 12 白马船闸闸门启闭运行程序

Fig. 12 Gate operation procedure of Baima ship lock

3.3 模拟成果分析

白马船闸上游的 P_1 测点水位不受潮位边界条件的影响, 维持在 0.80 m 左右。闸室内 P_2 测点水位高值与上游水位 0.80 m 平齐, 低值受潮

位影响, 水位在 -0.45 ~ 0.80 m 之间变化。船闸下游的 P_3 测点水位受潮位和船闸泄水影响, 水位在 -0.45 ~ 0.80 m 之间变化。3 个测点水位变化过程见图 13。

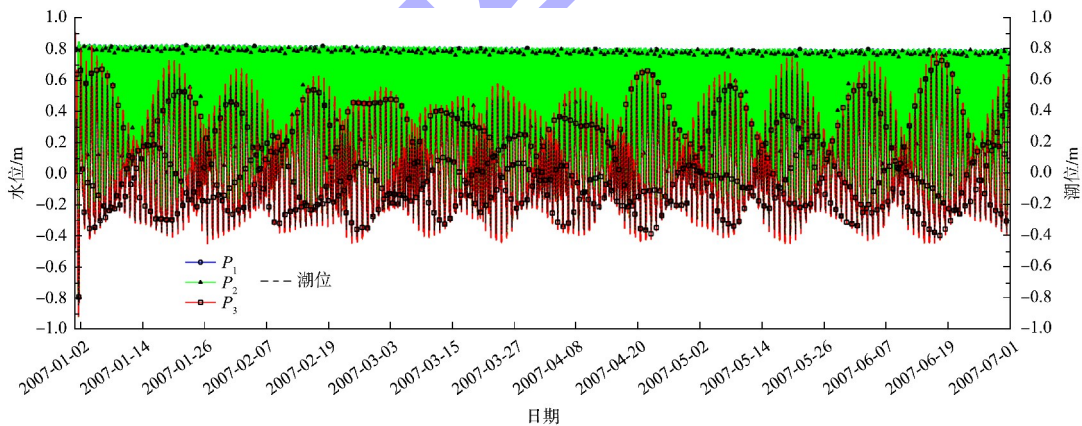


图 13 C5 工况 3 个测点水位变化过程线

Fig. 13 Water level hydrographs at three measuring points under Condition C5

P_1 测点位于白马船闸上游, 受闸门挡潮影响, 盐度与潮位关系不大, 随着船闸运行, 盐分通过闸室水体交换和浓度扩散上溯, 盐度不断累积达到 5.5 psu; P_2 测点位于闸室中间, 当下闸门打开时与海区相通进行盐分交换和灌水掺混, 最大盐度可达 6.7 psu, 位于船闸下游的 P_3 测点盐度受潮

位和船闸泄水共同影响, 最大盐度为 9 psu。3 个测点盐度累积过程见图 14。

有船闸挡潮运行 6 个月后盐水楔头部最远距入海口 12.5 km, 浓度 1 psu 盐水头部距入海口仅 6.6 km, 盐度分布见图 15。

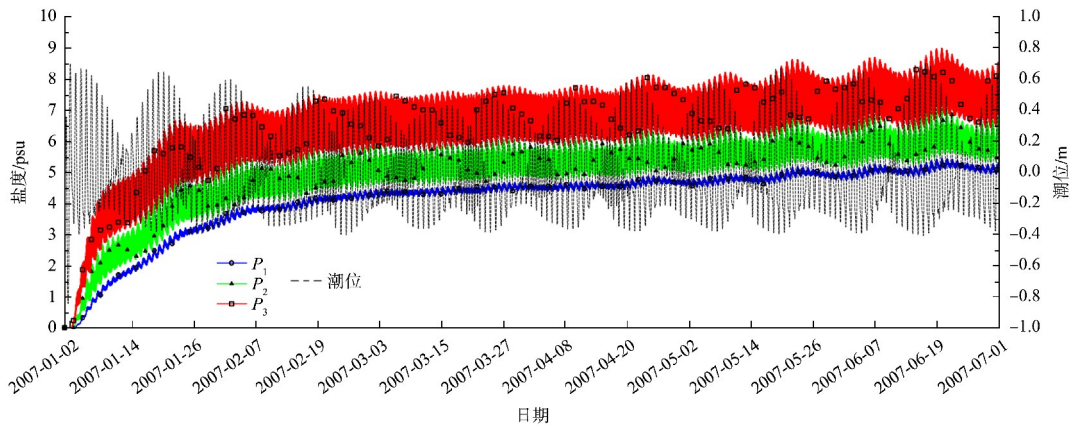


图 14 C5 工况 3 个测点盐度累积过程线

Fig. 14 Salinity accumulation hydrographs at three measuring points under Condition C5

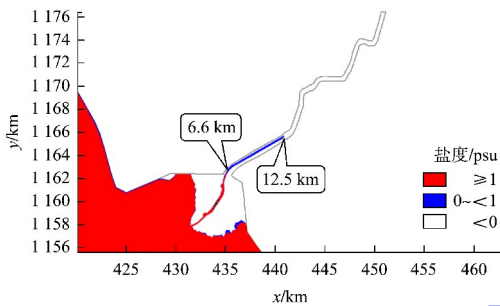


图 15 C5 工况运行 6 个月后盐度分布

Fig. 15 Salinity distribution after 6 months of operation under Condition C5

3.4 船闸挡潮防咸效果分析

C1 和 C5 工况盐度沿程分布对比见图 16。可以看出, C1 工况无船闸挡潮时盐度沿程逐渐减小, 盐水楔上溯最远距离高达 56.5 km, 盐度 1 psu 头部距入海口 25.2 km, P_1 测点最大盐度 27 psu; C5 工况有船闸挡潮时盐度沿程迅速降低, 盐水楔上溯最远距离仅为 12.5 km, 盐度 1 psu 头部距入海口 6.6 km, P_1 测点最大盐度仅为 5.5 psu。可见船闸挡潮防咸效果十分显著。

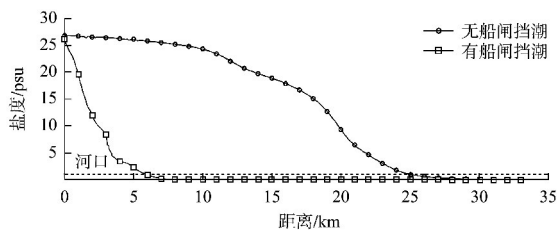


图 16 有无船闸挡潮盐度沿程分布

Fig. 16 Longitudinal salinity distribution along canal for tide control with and without ship lock

4 结论

- 1) 扶南德佐运河盐水入侵主要由潮汐和盐水密度梯度力驱动, 受淡水来流和船闸挡潮影响。
- 2) 无船闸挡潮时盐水上溯距离随淡水流量的增加而减小, 呈负对数关系, 当来流量 $Q=1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 盐度 1 psu 头部上溯最大距离为 25.2 km, 当来流量增大至 $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$, 则迅速降低至 12.5 km。
- 3) 船闸通过控制水位和闸门启闭程序有效阻隔海水倒灌, 可显著抑制盐水上溯距离并降低盐度, 船闸运行 6 个月后, 盐度 1 psu 入侵距离仅为 6.6 km, 闸首测点盐度从无闸工况的 27 psu 降低至 5.5 psu。
- 4) 船闸是运河防咸的核心工程措施, 结合船闸调度、上游水位流量调控可协同保障扶南德佐运河两岸淡水资源安全。本文研究成果可为扶南德佐运河的建设和运营提供了技术支撑, 为类似河口运河工程的防咸设计提供参考。

参考文献:

[1] 金智, 朱建荣, 仇威. 长江流域梯级水库夏末秋初蓄水对河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), 2024(1): 90-103.
JIN Z, ZHU J R, QIU W. Effects of cascade reservoirs in the Yangtze River Basin on estuarine saltwater intrusion and freshwater resources during late summer and early autumn [J]. Journal of East China Normal University (natural science), 2024(1): 90-103.

- [2] 许克勤, 吴澎, 杨胜发, 等. 平陆运河青年库区盐水入侵数值模拟研究[J]. 水运工程, 2025(6): 7-12, 54.
XU K Q, WU P, YANG S F, et al. Numerical investigation of salt water intrusion in Qingnian reservoir of Pinglu Canal [J]. Port & waterway engineering, 2025(6): 7-12, 54.
- [3] 王辉, 黄睿, 张蔚, 等. 上游径流对长江口盐水上溯距离影响研究[J]. 海洋学报, 2025, 47(1): 1-12.
WANG H, HUANG R, ZHANG W, et al. Study on the impact of upstream discharge on saltwater intrusion distance in the Changjiang Estuary[J]. Acta oceanologica Sinica, 2025, 47(1): 1-12.
- [4] 杨莉玲. 河口盐水入侵的数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
YANG L L. Study of saltwater intrusion in estuary by simulation modeling [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [5] 张朋. 径流和潮汐作用下的河口盐水入侵机理实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
ZHANG P. Experimental study on the mechanism of saltwater intrusion in estuary with runoff and tide [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [6] 朱建荣, 鲁佩仪, 唐川敏, 等. 长江河口北支建闸对减轻盐水入侵的数值模拟[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2020(3): 13-22.
ZHU J R, LU P Y, TANG C M, et al. Numerical simulation of saltwater intrusion mitigation by building a sluice in the North Branch of the Changjiang Estuary [J]. Journal of East China Normal University (natural science), 2020(3): 13-22.
- [7] 李达宏. 平陆运河盐水上溯机制及减盐措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
LI D H. Study on the mechanism of saltwater intrusion and mitigation measures in the Pinglu Canal [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [8] 杨同军, 王义刚, 黄惠明, 等. 长江河口盐水入侵数值模拟研究[J]. 水道港口, 2013, 34(6): 473-481.
YANG T J, WANG Y G, HUANG H M, et al. Research on salinity intrusion in the Yangtze River Estuary by numerical simulation [J]. Journal of waterway and harbor, 2013, 34(6): 473-481.
- [9] 周华兴, 孙玉萍. 船舶过“海船闸”时盐水入侵量的分析与计算[J]. 海岸工程, 1986, 5(2): 48-57.
ZHOU H X, SUN Y P. Analysis and calculation of the quantity of saltwater intrusion from ship-lock during ship passing [J]. Coastal engineering, 1986, 5(2): 48-57.
- [10] 周华兴, 白志敏, 孙玉萍. 异重流盐水楔运动速度的试验研究[J]. 水道港口, 1986(1): 20-31, 8.
ZHOU H X, BAI Z M, SUN Y P. Experimental study on the motion velocity of gravity current saline wedge [J]. Journal of waterways and harbor, 1986(1): 20-31, 8.
- [11] 王贺, 李池鸿, 陈虹, 等. 入海船闸防盐措施规模数值模拟分析评价研究[J]. 港口航道与近海工程, 2024, 61(5): 6-13.
WANG H, LI C H, CHEN H, et al. Analysis and assessment of numerical simulation of measures against salt-water intrusion adopted for ship locks at estuary of inland rivers [J]. Port, waterway and offshore engineering, 2024, 61(5): 6-13.

(本文编辑 王璁)

(上接第 158 页)

- [10] 欧阳澍, 刘成林, 程永舟, 等. 透空潜坝附近水流特性的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2019(1): 109-118.
OUYANG S, LIU C L, CHENG Y Z, et al. Numerical simulation of flow characteristics near the permeable submerged dam [J]. Hydro-science and engineering, 2019(1): 109-118.
- [11] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2025[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2025.
Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2025[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2025.
- [12] 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Navigation standard of inland waterway: GB 50139-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

(本文编辑 赵娟)