

# 钦江-茅尾海丰、枯水期盐水入侵的盐度分布特征： 以2021年盐水入侵为例

郑华<sup>1,2</sup>, 刘洁<sup>1,2\*</sup>, 张文武<sup>3</sup>, 肖毅<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学 国家内河航道工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 钦江-茅尾海地区受盐水入侵影响显著。基于MIKE 3模块构建盐水入侵三维数值模型, 在细致验证的基础上, 模拟丰水期和枯水期的盐水入侵过程并研究盐度分布特征。结果表明: 丰水期茅尾海内盐度平面变化梯度大, 枯水期钦江河道内盐度平面变化梯度大; 涨憩时刻钦江河道大部分为完全掺混状态, 盐度垂向混合较为良好; 枯水期的盐水上溯更加剧烈, 盐水上溯最远距离与平均距离较丰水期均增加50%以上。

**关键词:** 钦江河口; 盐水入侵; MIKE 3; 盐度分布特征

**中图分类号:** P731.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)02-0058-10

## 0 引言

盐水入侵是指海岸地区的地下水或地表水受海水影响而含有过高盐分的现象, 它会对人类活动和生态系统产生严重影响。钦州湾位于中国南海北部湾地区, 形状近似葫芦海湾。该海湾主要由三大部分组成——内湾(茅尾海)、外湾(钦州湾)与连接两者的湾颈(龙门水道)<sup>[1]</sup>。目前, 盐水入侵研究多集中于长江口<sup>[2-4]</sup>、珠江口<sup>[5-7]</sup>等大型河口, 而对钦州湾地区的研究大多关注在其潮流特性与污染物的分布、扩散等方面。李树华<sup>[1]</sup>、陈波等<sup>[8]</sup>、邱绍芳等<sup>[9]</sup>对钦州湾地区的潮流特性进行了研究, 结果表明该地区潮波以驻波式振动为主, 带有前进潮波特征, 潮流均为往复流且落潮流流速大于涨潮流, 最大流速出现在龙门水道附近。张敏等<sup>[10]</sup>发现钦州湾地区的围垦工程对潮汐动力场扰动较小。孙美燕等<sup>[11]</sup>计算了钦州港各港区特征点位置的波浪要素, 分析了不同陆域形成方案下各港区的波浪变化。史华明等<sup>[12]</sup>、梁千千等<sup>[13]</sup>、彭小燕等<sup>[14]</sup>对北部湾、钦

州湾的海水养殖污染、营养盐、重金属等污染物的分布特征进行了研究。李珂珂等<sup>[15]</sup>探讨了钦江河口的岸线变化和滩涂围垦工程对盐淡水输移的影响, 发现在围垦工程实施后, 高盐水入侵茅尾海的强度和距离均明显减小。

钦江作为钦州湾的主要入海河流和钦州市的主要水源地, 一直存在盐水入侵问题, 但目前鲜有该方面的研究, 西部陆海新通道——平陆运河建成后也会对钦江河口盐水入侵产生影响。本文基于Mike 3模块建立钦江-茅尾海三维数值模型, 并根据模拟结果分析丰水期和枯水期的盐水入侵及盐度分布特征, 所得结论可为钦江河口的盐水入侵防治与平陆运河后续的建设运营提供参考。

## 1 模型建立

### 1.1 模型简介

数值模型由丹麦水利研究所(Danish Hydraulic Institute, DHI)开发的MIKE软件中的三维水动力模

收稿日期: 2024-01-04。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700); 深圳市水务规划设计院股份有限公司重庆分公司土木水利研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD2020025)。

作者简介: 郑华(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail: 1600808969@qq.com

\*通信作者: 刘洁(1986-), 女, 副教授, 博士, 主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail: from\_mars@126.com

块 MIKE 3 建立。模型采用基于笛卡尔坐标下的平面非结构三角形网格系统, 通过有限体积法对控制方程进行离散求解。该软件在处理复杂边界问题方面功能较稳定, 已在国内外许多工程研究中得到广泛应用<sup>[7,16-17]</sup>。

## 1.2 模型设置

本文研究区域见图 1a。模型计算区域为钦江-茅尾海-钦州湾外海, 建模长度约为 48.8 km, 面积约为 320 km<sup>2</sup>。模型基于 2000 国家大地坐标系建立, 高程基于 1985 国家基准面; 采用非结构三角形网格, 其中钦江河道区域的网格分辨率约为 20 m,

钦州湾海域约为 200 m。为了维持计算精度与计算效率的平衡, 河口区网格采取渐变过渡方式, 模型在垂向  $\sigma$  坐标上划分 5 层。模型计算网格见图 1b。

下游出口边界条件采用 L3 测站的逐时潮位和盐度(时间选取 2021 年 7 月 1 日—2022 年 2 月 1 日), 上游边界条件采用青年枢纽的下泄流量(时间选取同上), 盐度为 0‰, 进出口边界条件见图 2。模型中不考虑降水、蒸发、风速以及海底淡水注入等因素的影响, 陆地边界采用干湿边界判别法, 即水深小于 0.005 m 时为干网格, 水深大于 0.1 m 时为湿网格。模型的计算时间步长为 30 s, 沿程河床糙率采用  $k_s=0.05$  m, 水平混合扩散系数为 0.28, 温盐场的

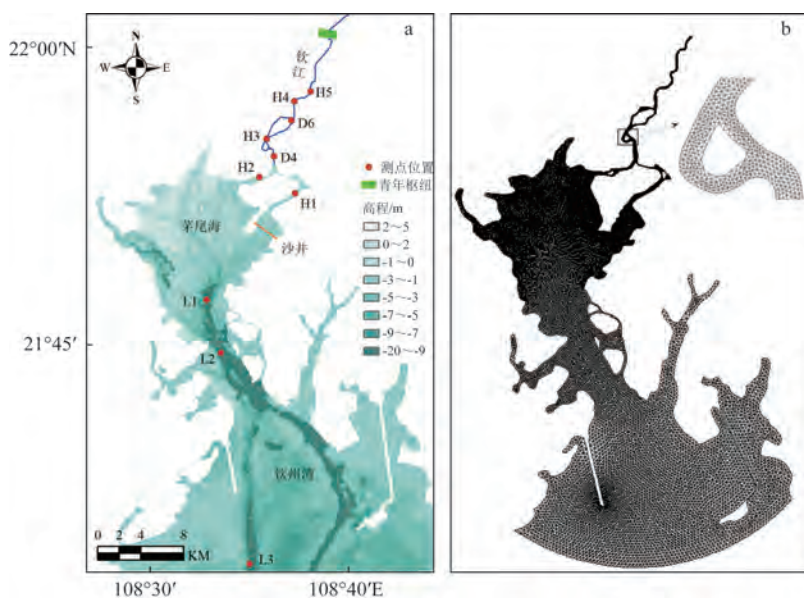


图 1 研究区域(a)与模型计算网格(b)

Fig.1 Research area (a) and computational grid (b) for model simulation

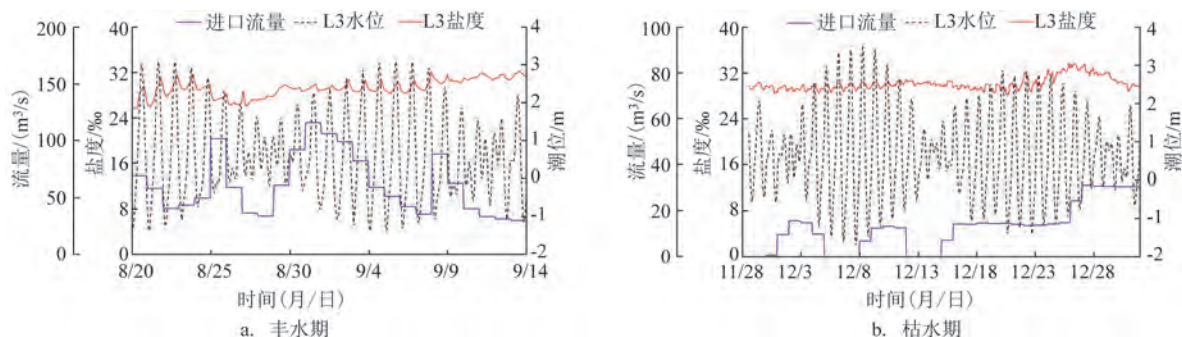


图 2 三维盐水上溯数值模型进出口边界条件

Fig.2 Three dimensional saltwater upwelling numerical model with inlet and outlet boundary conditions

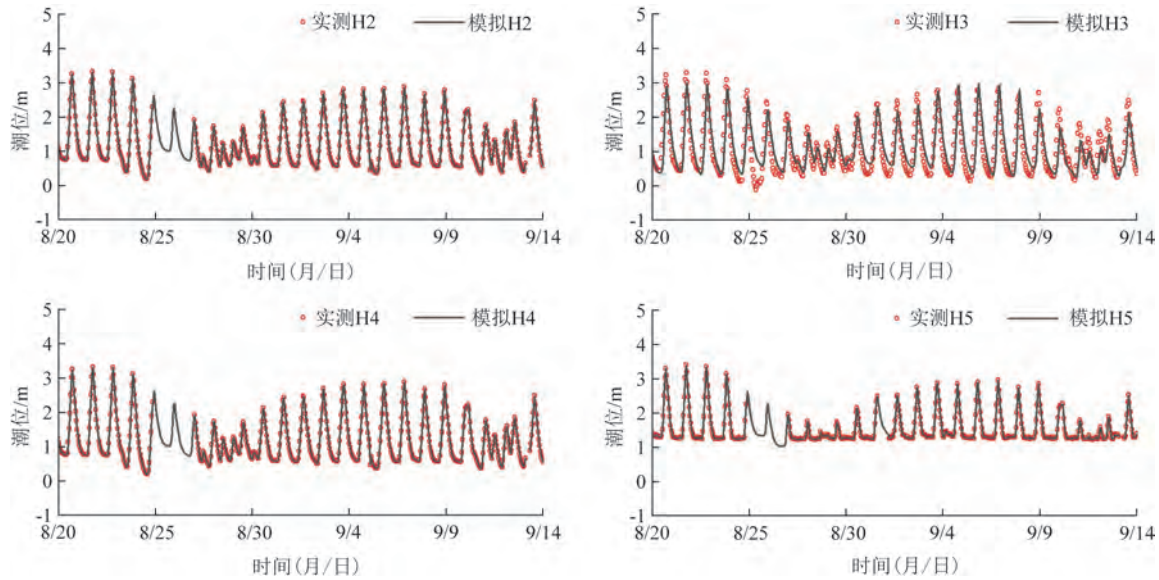


图3 潮位验证结果

Fig.3 Tide level verification results

垂向扩散系数利用 $k-\epsilon$ 湍流模型计算得到。潮动力模拟初始条件采用“冷启动”模式,即采用实测的海区盐度数据,通过线性插值得到模型的初始盐度场。由于盐度场模拟达到稳定状态大约需要10~15天,因此提前15天进行模拟确保模型达到稳定。

## 2 模型验证

采用重庆交通大学与交通运输部天津水运工程科学研究所共同实测的钦州湾水文资料进行模型验证,测量时间为2021年丰水期(8月20日—9月13日),其中潮位测站4个(H2尖沙濠、H3钦南、H4钦州(二)水位站、H5)、流速测站4个(H1、H3、L1、L2)、盐度测站4个(D4、D6、H1、L3)。各测站位置见图1a。

### 2.1 潮流验证

#### 2.1.1 潮位验证

各测站潮位实测数据与模拟结果的对比见图3,模拟结果与实测值的误差见表1。结果表明,各测站的潮位模拟结果与实测值基本相符,绝对误差值均在0.1 m以内。

#### 2.1.2 流速验证

8月20日17:00(北京时,下同)—21日20:00各

表1 丰水期潮位误差统计(单位:m)

Tab.1 Statistics of tide level errors during the high water period (unit: m)

潮型	特征值	项目	测站			
			H2	H3	H4	H5
大潮	高潮位	实测值	3.09	3.27	3.30	3.39
		计算值	3.03	3.24	3.27	3.35
		误差	-0.06	-0.03	-0.03	-0.04
	低潮位	实测值	-0.04	0.45	1.30	1.27
		计算值	0.01	0.42	1.26	1.24
		误差	0.05	-0.03	-0.04	-0.03
小潮	高潮位	实测值	1.09	1.23	1.23	1.27
		计算值	1.07	1.22	1.15	1.19
		误差	-0.02	-0.01	-0.08	-0.08
	低潮位	实测值	0.16	0.38	0.61	1.33
		计算值	0.12	0.46	0.61	1.27
		误差	-0.04	0.08	0.00	-0.06

测站的流速实测数据与模拟结果对比见图4。各测点的流速模拟值与实测值基本相符,模拟结果与实测值的误差见表2,相对误差均在10%以内。



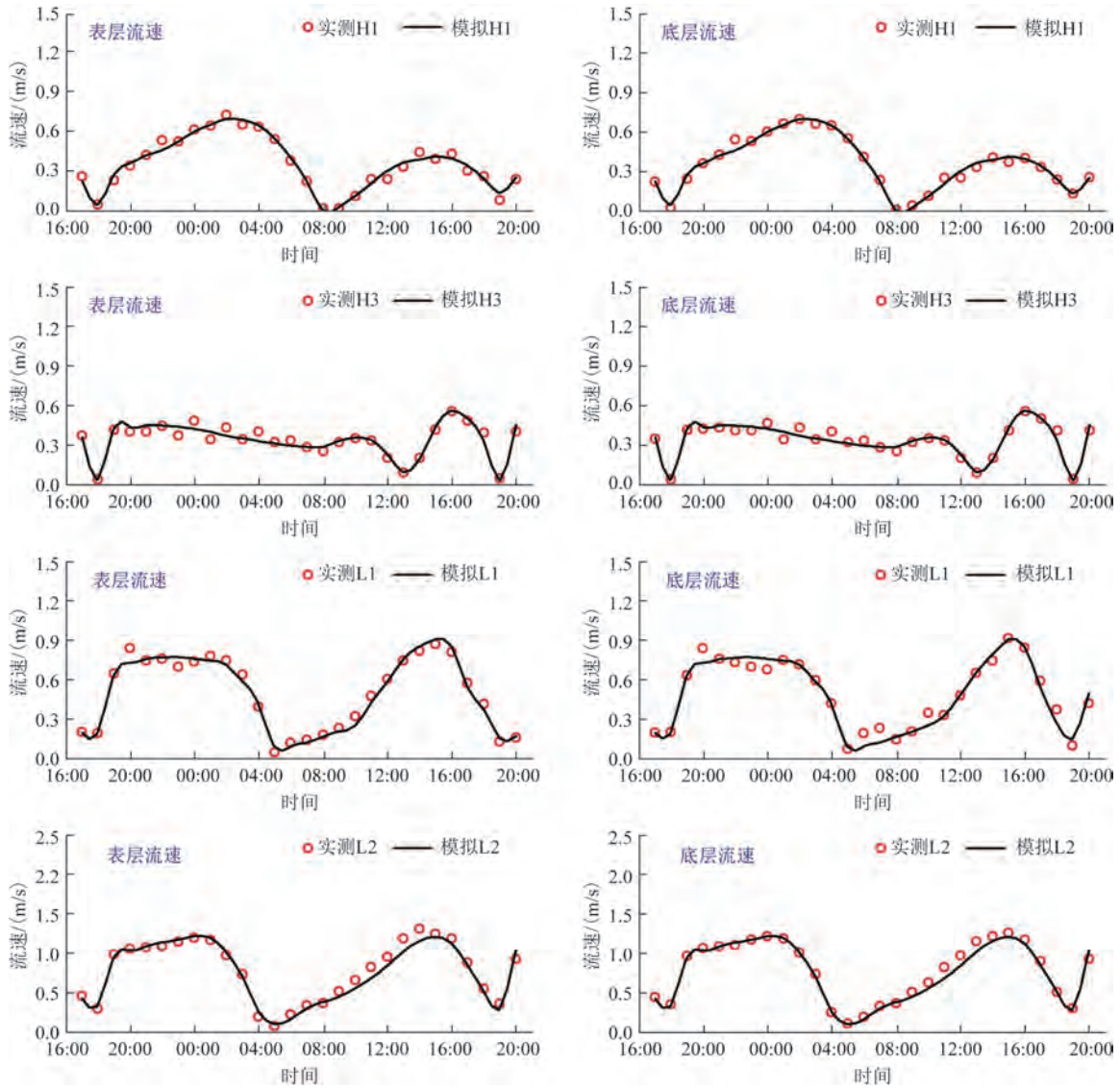


图4 流速验证结果

Fig.4 Flow velocity verification results

## 2.2 盐度验证

各测站盐度实测数据与模拟结果对比见图5。不同测点的盐度模拟结果与实测值的变化趋势基本一致。

## 2.3 相关性分析

为更好地量化模型结果的准确度,采用统计学的相关系数(Correlation Coefficient, CC)和预测能力系数(Skill Score, SS)<sup>[3,18-21]</sup>两个指标对模拟结果进行评估。公式为:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (X_m - \bar{X}_m)(X_0 - \bar{X}_0)}{\left[ \sum_{i=1}^n (X_m - \bar{X}_m)^2 \sum_{i=1}^n (X_0 - \bar{X}_0)^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

$$SS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_m - X_0|^2}{\sum_{i=1}^n (|X_m - \bar{X}_m| + |X_0 - \bar{X}_0|)^2} \quad (2)$$

式中:  $X_m$  为计算值,  $X_0$  为实测值,  $\bar{X}_m$ ,  $\bar{X}_0$  分别为计算值和实测值的平均值。CC 的值越接近 1, 表明计算值和实测值越接近;  $CC > 0.8$  表明两者的相关性较

表2 丰水期流速误差统计

Tab.2 Statistics of flow velocity errors during the high water period

测站	比较类别	实测值/ (m/s)	模拟值/ (m/s)	误差/%
H1	最大值	0.70	0.70	0
	最小值	0.02	0.02	-0.5
H3	最大值	0.56	0.57	-1.4
	最小值	0.05	0.05	-1.5
L1	最大值	0.92	0.91	1.0
	最小值	0.16	0.16	0.2
L2	最大值	1.26	1.21	3.7
	最小值	0.13	0.12	4.7

强;CC<0.5表明两者的相关性较弱。SS的值为1,表明模型结果与实测资料完美吻合,SS>0.65表明计算效果极好,0.5~0.65为很好,0.2~0.5为好,0.2以下则为差。

表3为模型相关性分析结果。各测点模拟结果的CC均在0.77及以上,SS均在0.83及以上,模型验证结果良好。

### 3 钦江-茅尾海季节性盐度分布特征

根据模型结果,对2021年盐水入侵的盐度分布特征进行分析,其中8月为丰水期代表月,12月为枯水期代表月。

#### 3.1 盐度平面分布特征

在丰水期,钦江的平均日径流量为31.3 m<sup>3</sup>/s,大量的淡水将会抑制盐水的上溯。大小潮涨憩时刻(见图6,其中大潮为8月21日17:00,小潮为8月29日12:00),钦江河道内盐度均未超过1‰,河口地区

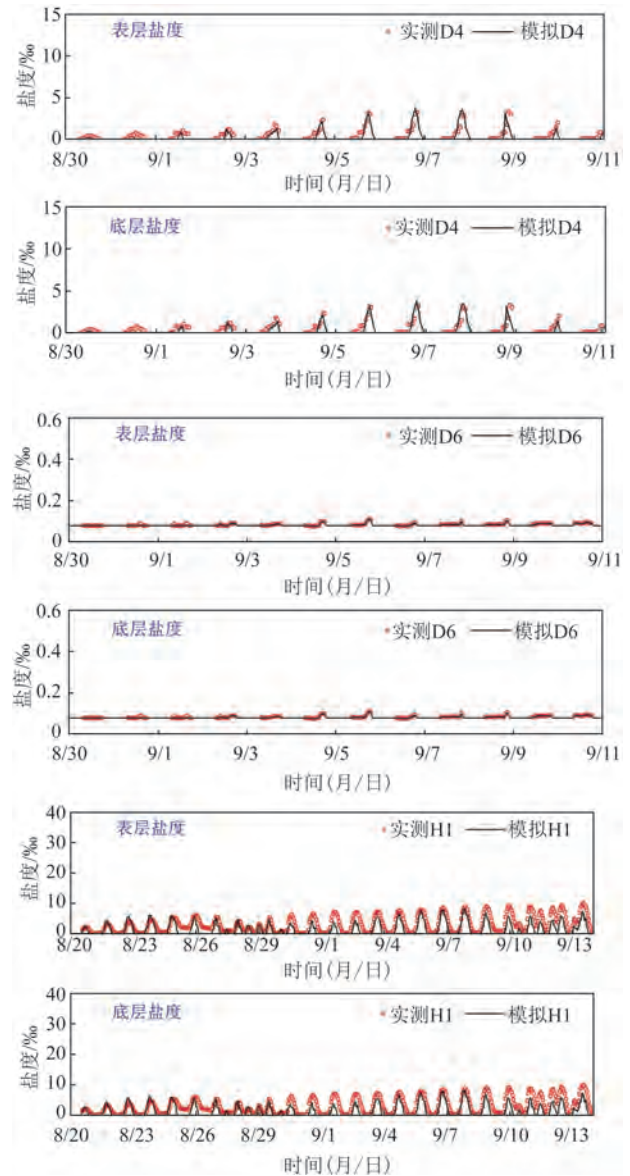


图5 盐度验证结果

Fig.5 Salinity verification results

盐度在1‰~8‰之间,这是由于丰水期上游较大的径流量将盐水带向下游,抑制了盐水上溯,在河道

表3 模型相关性分析

Tab.3 Model correlation analysis

指标	潮位				流速				盐度			
	H2	H3	H4	H5	H1	H3	L1	L2	D4	H1	D4	H1
									表层		底层	
CC	0.90	0.86	0.97	0.95	0.99	0.95	0.99	0.98	0.77	0.80	0.83	0.84
SS	0.95	0.92	0.98	0.97	0.99	0.98	0.99	0.99	0.83	0.84	0.83	0.83

和河口地区,淡水的影响力更大。大潮时茅尾海内盐度为5‰~23‰,小潮时为5‰~20‰,大潮时盐度变化梯度较小潮时更大。茅尾海内盐度主要受潮汐控制,大潮时较大的涨潮流导致外海高盐水更多地涌入茅尾海,茅尾海内盐度更高,盐度平面变化梯度更大。对比大小潮涨憩时刻,茅尾海内8‰等盐度线未发生明显的位置变化,主要集中在11‰~20‰等盐度线附近,这是由于茅尾海水域面积宽广,湾顶流速较小导致等盐度线随潮摆动不明显,潮汐主要作用在茅尾海南部,此处等盐度线变化剧烈。

在枯水期,钦江的平均日径流量急剧减小,约为13 m<sup>3</sup>/s。大小潮涨憩时刻(见图7,其中大潮为12月8日9:00,小潮为12月13日14:00),整个龙门水道、茅尾海的盐度值几乎都超过了20‰,盐度平面变化梯度很小。相对于小潮时期,大潮时17‰等盐度线从河口前进到钦江河道内,1‰等盐度线前进约5 km,几乎到达钦州市区(见图7a)。由于枯水期上游径流骤减,导致盐水可以轻易上溯到钦江河道内,受潮汐与径流双重影响,河道内的盐度变化幅度更大,大潮时约8 km范围内的盐度由1‰升高到15‰。此外,龙门水道处的盐度横向差异明显,东侧盐度高于西侧,这是由其东侧深槽引起的,东槽水深更大,底摩擦更小,盐度增大更明显。

### 3.2 盐度垂向分布特征

以钦江河口沙井处(见图1a)为起点,沿钦江河道中泓线绘制剖面图,分析盐度垂向分布特征,所选时刻与平面图保持一致。通常生活饮用水以氯化物质量浓度低于250 mg/L(盐度约为0.5‰)作为界线,在此将盐度值超过0.5‰的水体定义为盐水<sup>[22-24]</sup>。在枯水期大潮期间(见图8c),0.5‰等盐度线可达到距沙井21.5 km处,几乎达到钦州市区,相比于丰水期大潮(见图7a)前进约10 km;在枯水小潮期间(见图8d),该等盐度线可达到距沙井17.5 km处,相较于丰水期小潮(见图8b)前进约9 km。0.5‰等盐度线在丰水期大潮(见图8a)可达到距沙井11.5 km处,相较于小潮期间(见图8b)前进约3 km;在枯水期大潮期间(见图8c)可达到距沙井21.5 km处,相较于小潮期间(见图8d)前进约4 km。这表明钦江-茅尾海的盐水入侵受径流影响更大,由于茅尾海河口区域的潮汐动力相对较弱,潮汐强度对盐水入侵的影响相对较小,而径流对盐水入侵的顶冲效果更加明显。

丰水期和小潮期仅在7‰等盐度线附近略有盐度垂向差异,且表层和底层的盐度差小于2‰。引入分层系数 $n$ 来判断河口盐水混合类型<sup>[25]</sup>, $n \leq 0.01$

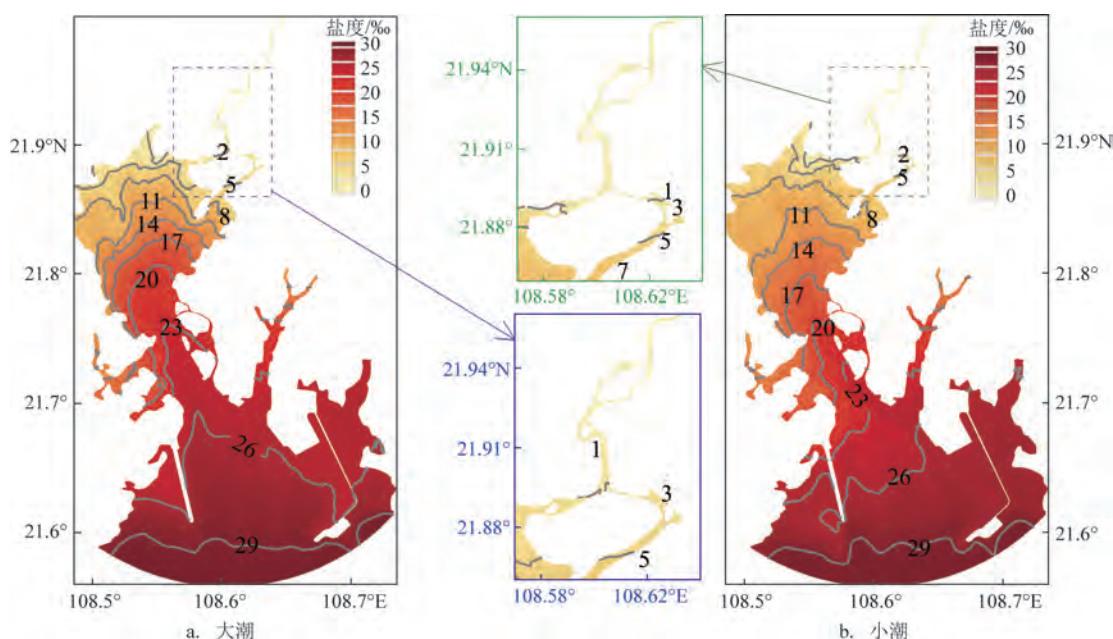


图6 丰水期涨憩时刻钦江-茅尾海盐度分布图

Fig.6 Salinity distribution map of Qinjiang-Maowei Sea during the flood season rising and resting periods



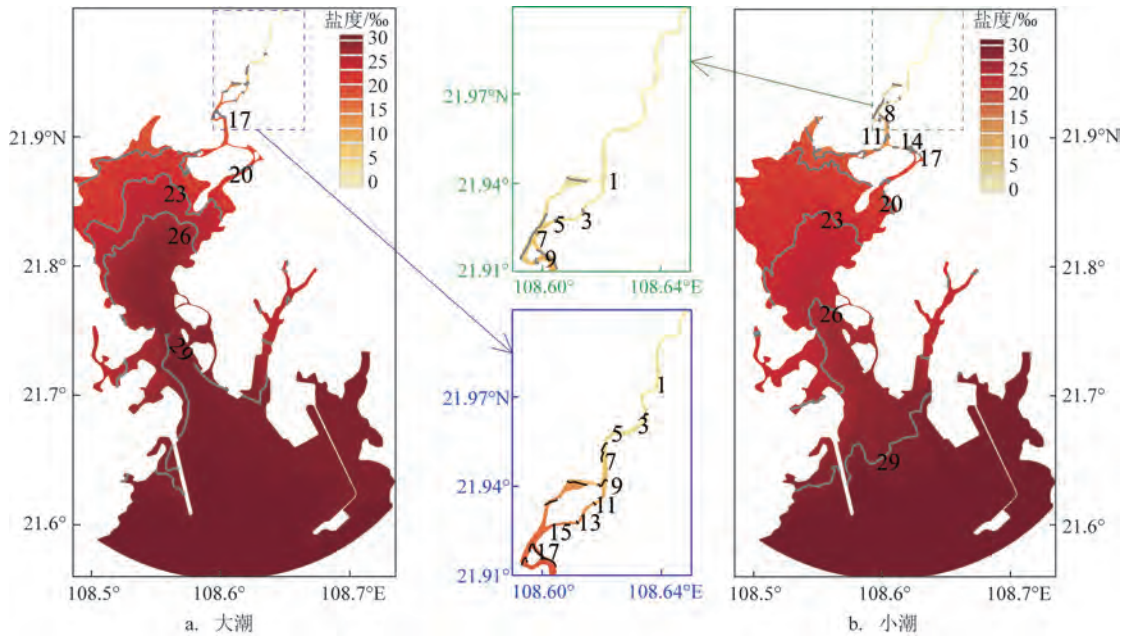


图7 枯水期涨憩时刻钦江-茅尾海盐度分布图

Fig.7 Salinity distribution map of Qinjiang-Maowei Sea during the dry season rising and resting periods

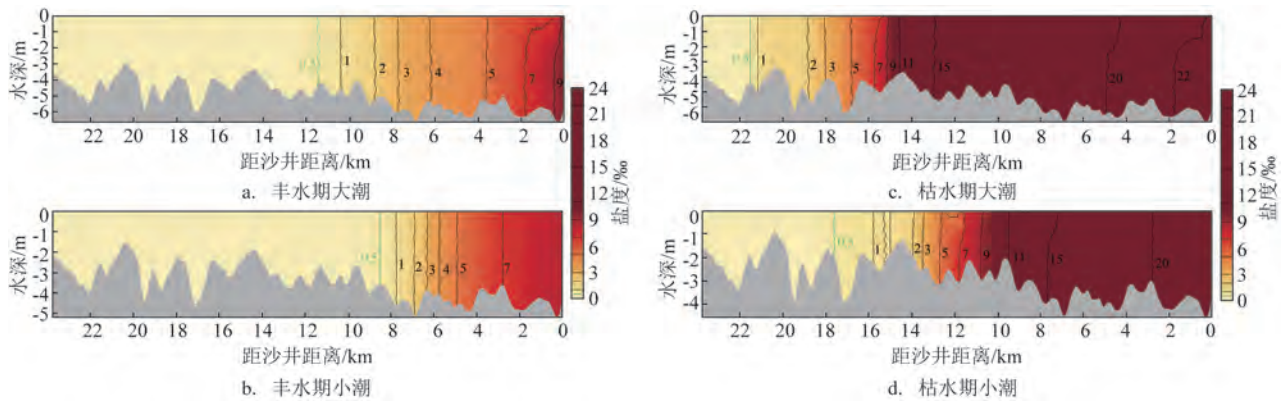


图8 钦江河口涨憩时刻垂向盐度分布图

Fig.8 Vertical salinity distribution map at Qinjiang River estuary during rising and resting periods

时为垂向完全掺混,  $0.01 < n < 1$  时为垂向部分掺混,  $n \geq 1$  时为垂向为分层状态。具体公式为:

$$n = \frac{S_{\text{bot}} - S_{\text{sur}}}{S_{\text{mean}}} \quad (3)$$

式中:  $S_{\text{bot}}$  为底层盐度;  $S_{\text{sur}}$  为表层盐度;  $S_{\text{mean}}$  为垂向平均盐度。结果表明(见图9), 大部分河道内的盐度分层系数  $n < 0.01$ , 即处于完全掺混状态, 仅部分河道内的盐度分层系数增大, 达到部分掺混状态; 丰水期大小潮与枯水期大小潮的平均分层系数分别

为 0.02、0.003、0.02、0.03, 表明钦江河道内盐度垂向混合较为良好。

### 3.3 盐水上溯距离

以钦江河口沙井(见图1a)为起点, 统计每日盐水上溯最远距离。从图10可以看到, 丰水期盐水上溯最远可达 13.57 km, 枯水期最远可达 21.60 km, 比丰水期前进了 8.03 km, 即增加了 59%; 丰水期平均盐水上溯距离为 8.98 km, 而枯水期为 16.41 km, 比

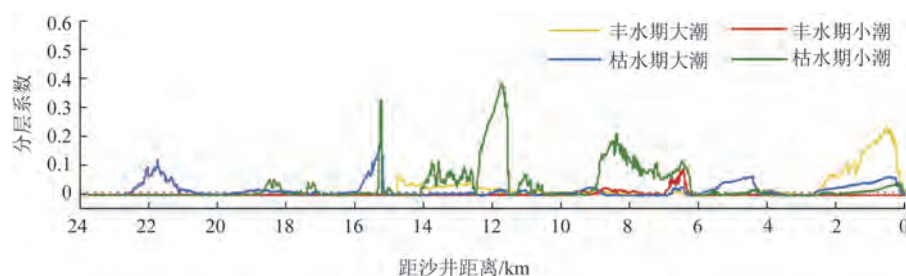


图9 垂向分层系数

Fig.9 Vertical stratification coefficient

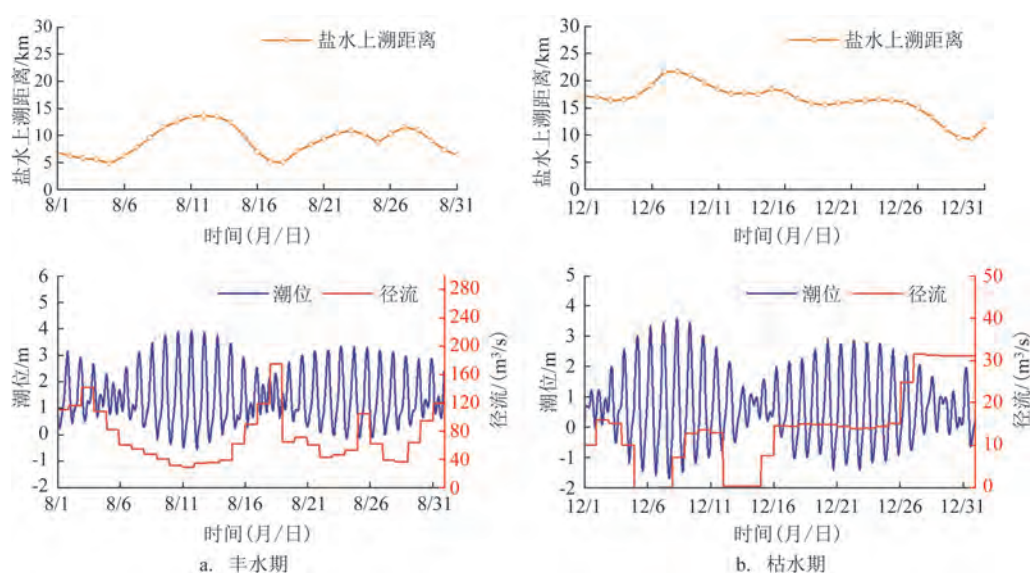


图10 每日盐水上溯最远距离统计

Fig.10 Daily saltwater upstream longest distance statistics

丰水期高 7.43 km, 增加了 83%。对盐水上溯距离与上游径流以及 L3 测站的模型边界潮位共同进行分析, 发现盐水入侵同时受径流和潮位控制, 即潮汐强度决定了盐水入侵距离变化的相位并为其提供驱动力, 而径流的顶冲效果明显, 决定了盐水入侵距离的最大值, 当径流最小且潮差最大时, 盐水上溯距离会达到最大值。

## 4 结论

本文基于 MIKE 3 模块构建了钦江-茅尾海盐水入侵三维数值模型, 并根据模拟结果对盐水入侵的盐度季节性分布特征进行分析。结论如下:

①构建的三维盐水入侵数值模型的模拟结果表明, 各测站的计算潮位绝对误差控制在 0.1 m 内,

模拟流速与实测流速的相对误差均在 10% 以内, 模型模拟计算所得各参数的相关系数达到并超过 0.77, 预测能力系数达到并超过 0.83, 模型验证表现良好。

②在丰水期, 钦江河道内受径流控制, 盐度变化梯度小, 盐度等值线变化不大; 由于茅尾海河口区域的潮汐动力相对较弱, 上游来流较大, 潮汐主要作用在茅尾海南部, 盐度平面变化梯度较大, 盐度等值线变化剧烈。而在枯水期, 由于上游径流较小, 茅尾海内受潮汐控制, 涨憩时刻的盐度几乎都超过 20‰, 盐水上溯到钦江河道使河道内盐度平面变化梯度更大。

③盐水的垂向混合良好, 大部分河段处于完全掺混状态。以钦江河口沙井为起点统计盐水上溯距离, 结果表明枯水期盐水上溯距离最远可达 21.6 km,



比丰水期前进了8.03 km,增加59%;枯水期平均每日盐水上溯距离为16.41 km,比丰水期高7.43 km,增加83%。河口区域的潮汐动力作用相对较弱,潮汐对盐水入侵距离的影响相对较小,径流的顶冲效果明显。

#### 参考文献:

- [1] 李树华. 钦州湾的流况及其水文特征[J]. 海洋湖沼通报, 1988(3): 15-20.  
LI S H. Flow condition and hydrologic character in the Qinzhou Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1988(3): 15-20.
- [2] 仇威, 朱建荣. 持续强北风天气下长江口盐水入侵对径流量的响应[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2023(3): 132-146.  
QIU W, ZHU J R. Responses of saltwater intrusion in the Changjiang Estuary to various river discharge under a persistent and strong northerly wind[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2023(3): 132-146.
- [3] 徐志, 戴会超, 高希超, 等. 长江口盐水入侵对径流变异和海平面变化的响应[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 15-21.  
XU Z, DAI H C, GAO X C, et al. Response of saltwater intrusion to runoff variability and sea level change in Yangtze River Estuary[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 15-21.
- [4] 李志鹏, 朱建荣. 2007—2016年北支河势变化对长江口盐水入侵影响数值研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2022(3): 109-124.  
LI Z P, ZHU J R. Numerical simulation of the North Branch regime change impact on saltwater intrusion in the Yangtze River Estuary from 2007 to 2016[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2022(3): 109-124.
- [5] 王彪, 朱建荣, 吕爱琴. 珠江河口磨刀门枯水期盐度统计模型[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 42-48.  
WANG B, ZHU J R, LYU A Q. Salinity statistical model for Modaomen of Pearl River Estuary during dry season[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 42-48.
- [6] 王嘉希. 珠江河口盐水入侵动力机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.  
WANG J X. Study on the mechanism of saltwater intrusion in the pearl river estuary[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [7] 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 R L, ZHUO W S, ZENG K, 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.
- [8] 陈波, 邱绍芳, 葛文标, 等. 广西沿岸主要海湾潮流的数值计算[J]. 广西科学, 2001, 8(4): 295-300.  
CHEN B, QIU S F, GE W B, et al. Numerical calculation about the tidal currents in the main bays of Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2001, 8(4): 295-300.
- [9] 邱绍芳, 侍茂崇, 陈波. 钦州湾潮流特征分析[J]. 海洋通报, 2003, 22(3): 9-14.  
QIU S F, SHI M C, CHEN B. Analysis of tidal current characteristics in Qinzhou Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2003, 22(3): 9-14.
- [10] 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]. 应用海洋学报, 2024, 43(1): 45-54.  
ZHANG M, ZENG F R, WU H X, 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.
- [11] 孙美燕, 王永兴, 朱峰. 钦州港附近海域波浪要素数值模拟研究[J]. 水道港口, 2023, 44(4): 586-593.  
SUN M Y, WANG Y X, ZHU F. Numerical simulation of wave parameters in sea area near Qinzhou Port[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2023, 44(4): 586-593.
- [12] 史华明, 王翔, 马玉, 等. 2017—2018年北部湾东北部海湾营养盐的时空分布特征[J]. 广西科学, 2023, 30(4): 663-671.  
SHI H M, WANG X, MA Y, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of nutrients in the Northeastern Beibu Gulf from 2017 to 2018[J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(4): 663-671.
- [13] 梁千千, 谭凯燕, 戴圣生, 等. 钦州湾海域表层沉积物重金属分布与污染评价[J]. 广西科学, 2023, 30(2): 291-298.  
LIANG Q Q, TAN K Y, DAI S S, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Qinzhou Bay[J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(2): 291-298.
- [14] 彭小燕, 郭梅修, 庞敏倩, 等. 广西钦州湾茅尾海海水养殖污染影响及防治对策[J]. 环境保护与循环经济, 2022, 42(11): 57-60.  
PENG X Y, GUO M X, PANG M Q, et al. Impact and prevention measures of marine aquaculture pollution in Maowei Sea, Qinzhou Bay, Guangxi[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2022, 42(11): 57-60.
- [15] 李珂珂, 邹华志, 张娜. 岸线变化对钦江河口盐水入侵的影响[J]. 中国水运, 2020(7): 124-127.  
LI K K, ZOU H Z, ZHANG N. Impact of shoreline changes on saltwater intrusion at the mouth of the Qinjiang River[J]. China Water Transport, 2020(7): 124-127.
- [16] 陈维, 匡翠萍, 顾杰, 等. 长江口盐水入侵对海平面上升的响应特征[J]. 水利水运工程学报, 2018(1): 58-65.  
CHEN W, KUANG C P, GU J, et al. Responses of saline water intrusion to sea level rise in the Yangtze Estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(1): 58-65.
- [17] 李娜, 娄安刚, 张学庆, 等. 基于MIKE3的渤海三维温盐数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2019(2): 1-9.  
LI N, LOU A G, ZHANG X Q, et al. Three dimensional numerical simulation of temperature and salinity in the Bohai Sea

- Based on MIKE3[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019(2): 1-9.
- [18] WARNER J C, GEYER W R, LERCZAK J A. Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assessment[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C5): C05001.
- [19] ALLEN J I, SOMERFIELD P J, GILBERT F J. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 64(1-4): 3-14.
- [20] 俞珠珠. 台风影响下杭州湾水沙动力特性数值研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- YU Z Z. Numerical study on the hydrodynamic characteristics of water and sediment in Hangzhou Bay under the influence of typhoons[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [21] 陆凡, 沈良朵, 高郁, 等. 舟山绿色石化三维潮流特性数值研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(5): 134-147.
- LU F, SHEN L D, GAO Y, et al. Numerical study on three-dimensional tidal current characteristics of Zhoushan Green Petrochemical Company[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 44(5): 134-147.
- [22] 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 J B, BAO Y. The movement of saltwater intrusion border of Modaomen channel in the dry season[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(S2): 122-125.
- [23] GONG W P, SHEN J. 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.
- [24] 王伟. 上游大通径流量对长江盐水入侵影响研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(3): 106-111.
- WANG W. 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.
- [25] 赵雪峰, 尹小玲. 潮汐强度对河口盐水入侵影响的数值模型研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2017, 32(6): 756-763.
- ZHAO X F, YIN X L. Numerical model for effect of tide strength on estuarine salt intrusion[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32(6): 756-763.

## Salinity distribution characteristics of Qinjiang Maowei Sea saltwater intrusion during high and low water periods: Taking the saltwater intrusion in 2021 as an example

ZHENG Hua<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Wenwu<sup>3</sup>, XIAO Yi<sup>1,2</sup>

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. CCCC Fourth Navigation Engineering Survey and Design Institute Co. Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** The Qinjiang-Maowei Sea area is significantly affected by saltwater intrusion. Based on MIKE 3, this paper constructs a three-dimensional numerical model of saltwater intrusion. After detailed verification, the process of saltwater intrusion during the wet and dry seasons is simulated to study the salinity distribution characteristics of saltwater intrusion. The results show that during the wet season, the salinity level gradient in Maowei Sea is greater, while during the dry season, the salinity level gradient in the Qinjiang River channel is greater. During the period of rising and resting, most of the Qinjiang River channel is in a completely mixed state, with adequate vertical mixing of salinity. The upward movement of saltwater during the dry season is more intense, with the longest and average distance of saltwater upstream increasing by more than 50% compared to the wet season.

**Key words:** Qinjiang River estuary; saltwater intrusion; MIKE 3; salinity distribution characteristics