

· 综合 ·



## 强风对钦江河口盐水入侵的影响数值研究\*

杨森堂<sup>1,2</sup>, 刘洁<sup>1,2</sup>, 丁晴雨<sup>1,2</sup>, 郑华<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 3. 河南省中工设计研究院集团股份有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 平陆运河工程入海段是钦州湾—青年枢纽, 受潮汐过程影响, 盐水入侵剧烈。随着全球气候变化加剧, 强风作用对河口盐淡水交换过程影响日益显著, 对周边城市农田取水以及船闸防腐存在不利影响。因此, 研究强风背景下钦江河口盐水入侵影响机制是十分必要的。考虑平陆运河工程航道开挖尺度和枢纽运行模式, 构建了钦州湾-茅尾海-青年枢纽的大范围三维数值模型, 研究了强风作用下钦江河口流场、盐水分布、盐水上溯距离及盐通量的影响。结果表明: 风与潮水运动同向, 风应力作用使得表层流速增大, 底层流速降低, 反向则表层流速降低而底层流速增大; 风应力能显著促进高盐度水体上溯, 19‰等盐度线最大上溯3.1 km; 在小潮时, 风应力能有效抑制盐水分层; 盐水上溯距离最大增加2.08 km; 向陆盐通量最大增幅达11.53%, 向海盐通量最大降幅达10.61%。

**关键词:** 三维数值模型; 钦江河口; 盐水入侵; 风应力

中图分类号: U612.3; P731.12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0010-09

### Numerical study on effects of strong winds on saltwater intrusion in Qinjiang River Estuary

YANG Sentang<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>1,2</sup>, DING Qingyu<sup>1,2</sup>, ZHENG Hua<sup>3</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Henan Zhonggong Design & Research Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China )

**Abstract:** The sea-reaching section of the Pinglu Canal Project spans from Qinzhou Bay to Qingnian Hub, experiencing intense saltwater intrusion under tidal processes. With intensified global climate change, the impact of strong winds on the exchange of salt-fresh water in estuaries is becoming increasingly significant, which has adverse effects on the water abstraction for adjacent farmlands and the anti-corrosion of ship locks. Therefore, it is necessary to study the impact mechanism of saltwater intrusion in the Qinjiang River Estuary under strong wind conditions. Considering the channel excavation scale and hub operation mode of the Pinglu Canal Project, a large-scale three-dimensional numerical model of Qinzhou Bay-Maowei Sea-Qingnian Hub is developed to investigate the effects of flow field, salinity distribution, saltwater intrusion distance, and salt flux in the Qinjiang River Estuary under strong winds. Results show that when wind direction aligns with the tidal motion, wind stress increases surface flow velocity and decreases bottom flow velocity. When opposing, it decreases surface flow velocity and increases bottom flow velocity. Wind stress significantly promotes intrusion of high-salinity water, with the 19‰ isohaline advancing up to 3.1 km. During neap tide, wind stress effectively suppresses salinity stratification. The maximum saltwater intrusion distance increases by 2.08 km. The maximum increase in the landward salt flux is 11.53%, and the maximum decrease in the seaward salt flux is 10.61%.

**Keywords:** three-dimensional numerical model; Qinjiang River Estuary; saltwater intrusion; wind stress

收稿日期: 2025-07-27 录用日期: 2025-08-14

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604702); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(TKS20240504)

作者简介: 杨森堂(2001—), 男, 硕士, 研究方向为水力学及水环境。

盐水入侵是河口地区普遍存在的水文现象, 对河口水动力、泥沙输运、生态系统以及水资源管理具有深远影响<sup>[1-3]</sup>。随着全球气候变化的加剧, 极端气候事件的频发, 尤其是强风的影响日益显著, 进一步加剧了盐水入侵问题<sup>[4-5]</sup>。钦江河口作为连接内陆与海洋的关键水域, 长期面临盐水入侵问题的影响。平陆运河工程的航道开挖增加了钦江盐水入侵, 不仅对船闸的防腐工程造成压力, 还威胁着周边生态环境和城市农田用水安全<sup>[6-7]</sup>。

目前针对河口的盐水入侵问题已经进行了较多的研究, 但多集中于长江口<sup>[8-9]</sup>、珠江口<sup>[10-11]</sup>等区域, 钦江地区的研究相对匮乏, 且主要关注径流、潮差及海平面上升等因素。肖毅等<sup>[12]</sup>基于一维盐度扩散稳态方程, 预测了不同径流和潮差组合下的钦江河口盐水入侵距离, 明确了青年枢纽减盐的最低泄流流量为  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 。郑华等<sup>[13]</sup>基于三维模型揭示钦江河口盐水入侵距离与径流、潮差之间的响应关系, 盐水入侵距离径流成反比, 与潮差成正比。然而, 风应力是推动河口表层流的重要因素<sup>[14]</sup>, 其影响尚未在钦江地区深入探讨。风应力作用不仅影响水流的垂向结构, 还可能通过风引发的环流改变盐水的分布模式, 进而加剧盐水入侵<sup>[15]</sup>。林若兰等<sup>[16]</sup>研究发现珠江东四口门不同风向下的盐水入侵响应, 北风及东北风将促进盐水入侵。Li 等<sup>[17]</sup>基于数值模型发现不同风向会显著改变长江口南、北纬附近的环流, 进而改变盐度分布。李林江等<sup>[18]</sup>发现北风风速增强能够显著增加长江河口北港的盐水入侵。Manca 等<sup>[19]</sup>和 Wang<sup>[20]</sup>研究发现存在风应力抬升潮位加重盐水入侵的情况。

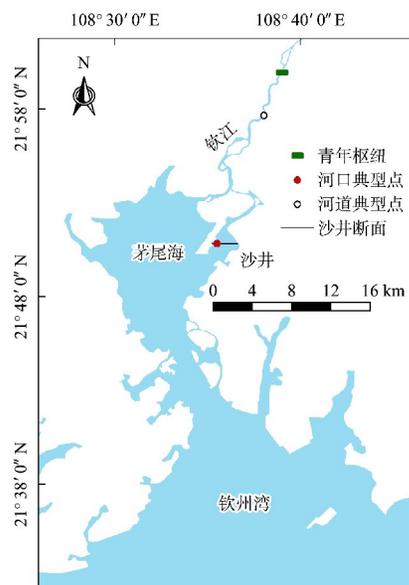
综上, 本文构建钦江河口三维数值模型, 探讨强风对钦江河口盐水入侵的影响, 特别是在枯水期强风作用下的盐水上溯、盐度变化和水动力响应, 并为防治盐水入侵、保护水资源提供科学依据。

## 1 研究区域与方法

平陆运河工程连接西江和北部湾, 经钦江出海, 工程设置 3 个梯级, 最下游梯级为钦州湾—青年水闸, 受潮汐过程影响<sup>[21]</sup>。因此本文研究区域为钦州湾—青年水闸, 模型长度约 40 km, 面积约  $151.46 \text{ km}^2$ , 采用非结构三角形网格, 共计 36 306 个网格, 19 410 个节点, 钦江段网格大小航道内沿流向 40 m, 沿河宽方向约为 20 m; 沙井—钦州湾沿轴向 50 m, 垂直轴向 40 m, 按照垂向分布规则划分为 5 层, 见图 1。



a) 模型网格



b) 研究区域

图 1 研究区域与计算网格

Fig. 1 Study area and computational grid

茅尾海东、西、北三面为陆地所包围，南部与钦州湾相通，其海湾地形呈两头大中间细的喇叭状，这种地形对潮汐起到有效的收束作用，逐渐抬高潮位，形成较大的潮差。钦州沿海是全日潮，每月大潮后有 2~4 d 出现一天两次的高低潮。每年间在农历五月和十月潮位最高，农历二月和八月最低。

## 2 计算工况及参数设置

模型上游边界条件分别由青年船闸与青年枢纽来流过程控制，见图 2，上游来流为淡水，因此盐度边界设置为 0‰；下游边界盐度采用测站实测数

据，见图 3。

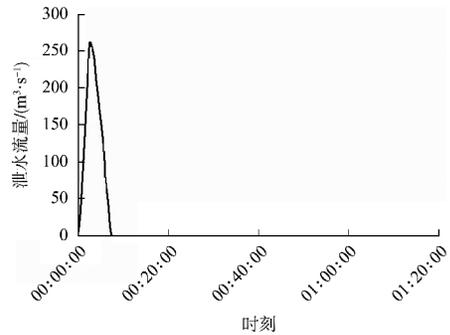


图 2 青年船闸泄流过程概化  
Fig. 2 Schematization of discharge process at Qingnian Ship Lock

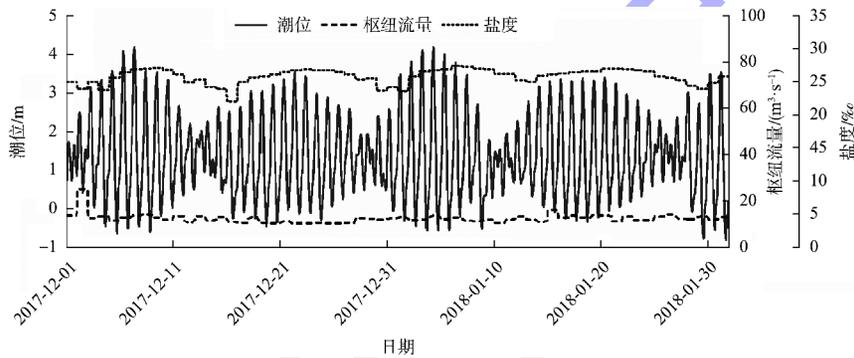


图 3 模型边界条件(2017 年 12 月—2018 年 1 月)  
Fig. 3 Model boundary conditions (from December 2017 to January 2018)

风场数据采用中国气象数据网地面气象数据，获取钦州海洋站(108.36°N, 21.59°E)实测风场，见图 4。模型的计算步长为 60 s，河床糙率  $k_s$  取 0.05 m，盐度垂向扩散系数为  $k-\varepsilon$  湍流模型计算

所得。模型初始盐度场由实测海区盐度数据插值进行补充；模拟采用“冷启动”模式，提前模拟 15 d 使模型达到稳定。经过验证<sup>[22-23]</sup>，模型验证结果良好。

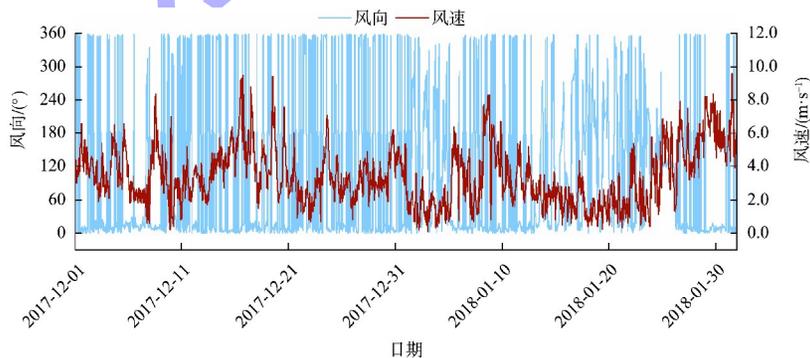


图 4 钦州海洋站实测风场(2017 年 12 月—2018 年 1 月)  
Fig. 4 Observed wind field at Qinzhou Marine Station (from December 2017 to January 2018)

根据钦州龙门气象站风况统计数据，钦江河口地区季风分布明显，常风向为 N 向，出现频率为 26%；次常风 NNE 向，出现频率 9.2%；强风向为 N 向，极大风速为 31.0 m/s。根据钦州湾地区

2016—2020 年度风况统计，最大风速超过 10.0 m/s，钦州市海洋站 95% 保证率最大风速为 9.9 m/s，设置 10.0 m/s 北风为强风工况，持续时间为 2 d；对照组为自然风况。由于枯水期径流量小，盐水入

侵更为剧烈, 因此本文仅针对枯水期进行具体分析, 计算工况见表 1。

表 1 计算工况  
Tab. 1 Computational condition

工况		潮位	船闸流量	枢纽流量	风况	盐度
自然风况	枯水期大潮 枯水期小潮	实测潮位	100%过闸	90%保证率	自然风	实测盐度
强风工况	枯水期大潮 枯水期小潮	实测潮位	100%过闸	90%保证率	10.0 m/s 强北风 (2 d)	实测盐度

### 3 结果与讨论

#### 3.1 风应力对河道水动力特性的影响

风应力作为影响盐水入侵的重要驱动力, 其通过作用水体表面改变表层水体的运动状态并进一步传播到更深层次。为探究这一变化, 统计了河道典型点各层流速及流场变化。

在大潮周期内, 风应力作用下, 河道水体表层流速呈现相反的变化趋势。涨潮阶段, 作用于水体表面的风应力方向与潮汐上溯方向相反, 风应力抑制表层流速, 流速降低 16.27%, 同时由于补偿流作用促使底层流速增大, 流速增大 18.26%; 落潮阶段, 风应力方向与潮汐方向相同, 风应力增大表层流速, 抑制底层流速, 变幅分别为 10.94%、-6.16%。在小潮周期内, 潮汐动力减弱, 潮差减小, 风应力使得该相反趋势增长较大。涨潮阶段, 表层流速降低 11.85%, 底层流速增大 22.59%; 落潮阶段, 表层流速增大 1.77%, 底层流速降低 11.36%, 见表 2。

河道表底层水体流向变化见图 5, 25°为涨潮流向, 205°为落潮流向。由图可知, 自然风况下涨憩时刻后表层水体流向无明显变化, 而底层水体流向存在振荡区间, 转向相对滞后。其中大潮期间较为明显, 这可能与表底层盐度梯度与补偿流作用有关<sup>[24]</sup>。风应力对河道水体流向的影响表现为表层水体无明显变化, 而底层水体在涨潮转向落潮阶段时流向转变滞后加剧, 在其后的一段时间内维持向陆运输的现象, 该现象表明风应力作用对底层盐水上溯有促进作用。

表 2 枯水期强风工况下河道流速变化率  
Tab. 2 Variation rate of channel flow velocity under strong wind conditions in dry season

潮汐现象		流速变化率/%		
		平均流速	表层流速	底层流速
涨潮	大潮	2.37	-16.27	18.26
	小潮	6.33	-11.85	22.59
落潮	大潮	-4.85	10.94	-6.16
	小潮	-7.97	1.77	-11.36

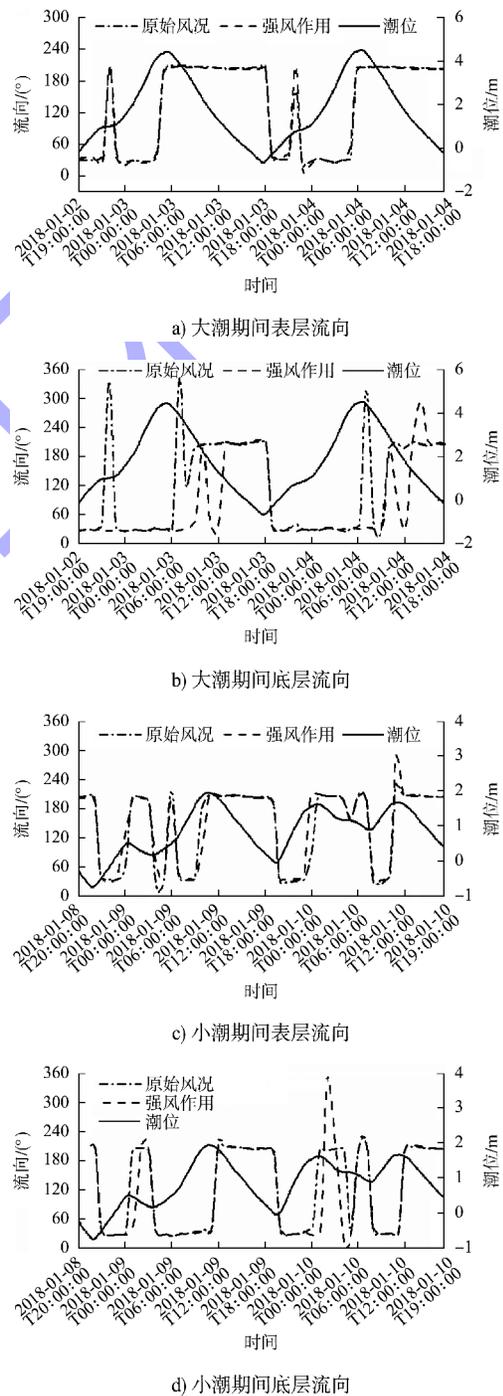


图 5 枯水期河道流向  
Fig. 5 Channel flow direction in dry season

### 3.2 风应力对盐水分布的影响

河道、河口典型点底层盐度变化见图6。小潮阶段，河道内大部分时刻水体盐度几乎为0‰，仅在涨憩时刻有少量盐水入侵到该点，在风应力作用下盐度降低50%；大潮阶段，盐水完全入侵到河道处且风应力作用使得此处盐度增长5.92%。河口处的风应力作用使得此处盐度有所升高，大潮时河口平均盐度增长4.21%，小潮时增长1.06%。

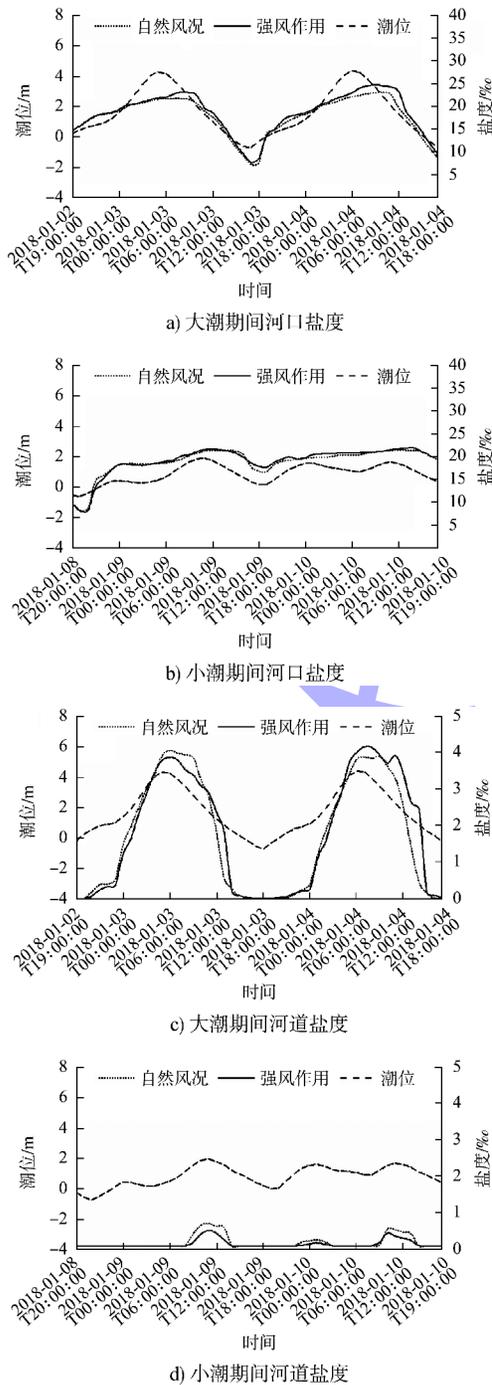


图6 枯水期盐度变化情况  
Fig.6 Salinity change in dry season

风应力对盐水上溯垂向特征存在不同影响。枯水期大潮在风应力作用下除0.5‰、3‰等值线无明显变化外，其他等值线均有所前进，19‰等盐度线前进最多约1.2 km。小潮时盐水上溯最远距离减小，即0.5‰等盐度线后退约0.3 km，其他等值线向前推进，19‰等盐度线前进最多约3.1 km，见图7。说明风应力能显著加剧河口高盐度水体入侵，而对河道内低盐度水体作用微弱。其原因是河口区域垂向上存在较大的密度梯度，风应力有效促进河口环流的发展，驱动底层高盐度水体入侵河道；而深入河道内的低盐度水体垂向梯度变化微弱，潮汐能减弱，径流顶托作用逐渐占主导地位，在向海风应力和径流的双重作用下与入侵盐水相持，甚至在小潮时其作用强于潮汐作用，导致低盐度水体向海压缩。

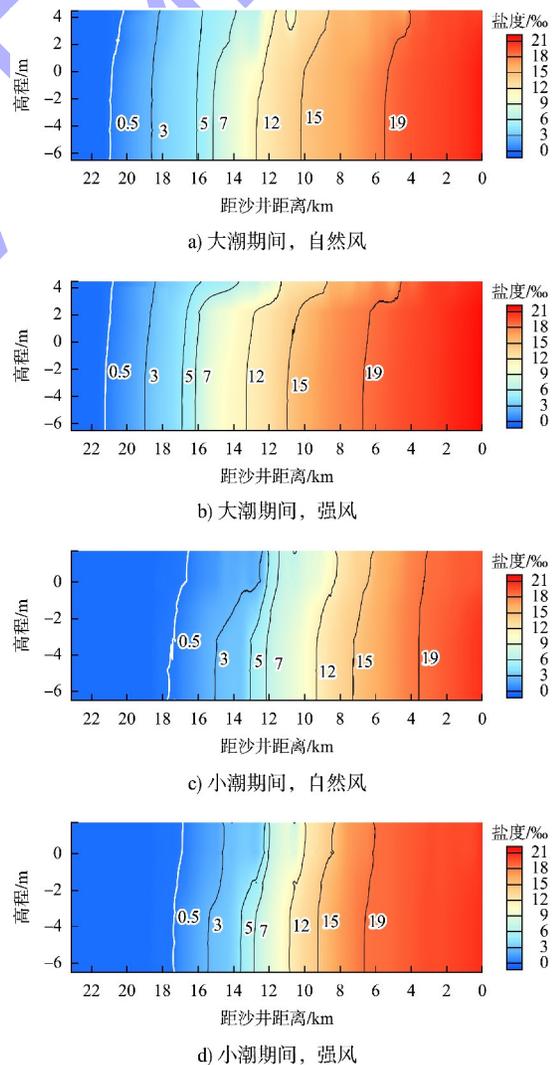


图7 枯水期涨憩垂向盐度  
Fig.7 Vertical salinity during high water in dry season

为研究风应力对于水体盐度垂向分层的影响, 引用盐度分层类型公式<sup>[25-26]</sup>, 计算垂向分层系数  $n$ , 具体公式如下。

$$n = \frac{S_{\text{bot}} - S_{\text{sur}}}{S_{\text{mean}}} \quad (1)$$

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。根据河口类型与分层系数  $n$  之间的关系判别依据,  $n < 0.01$ , 为完全混掺;  $0.01 < n < 1$ , 为部分混掺;  $n > 1$ , 为分层。

河口处分层系数区间为 0.00~0.16, 呈现部分混掺状态; 河道处分层系数区间为-0.6~1.8, 基本为部分混掺状态, 出现数次盐度分层, 且无论河口还是河道均表现出在落潮阶段盐度分层更加剧烈, 见图 8。在风应力作用下, 大潮期间垂向分层系数无明显变化, 小潮期间垂向分层系数显著减小, 最大降幅达 54%, 见表 3。这表明风应力有较好的混掺作用, 小潮期间尤为明显, 这可能与潮汐能变化有关, 小潮时潮汐能减弱, 风应力相对增强, 进而有效促进表底层水体混掺, 抑制盐度分层。

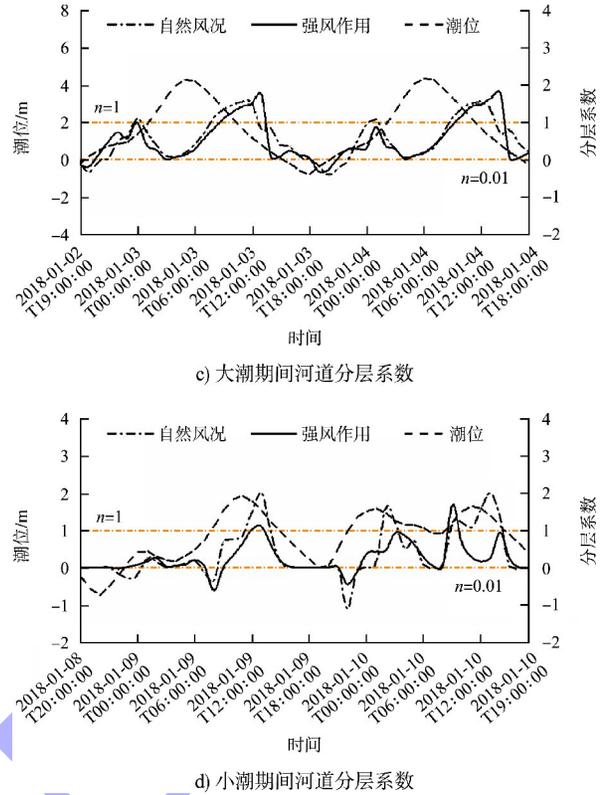
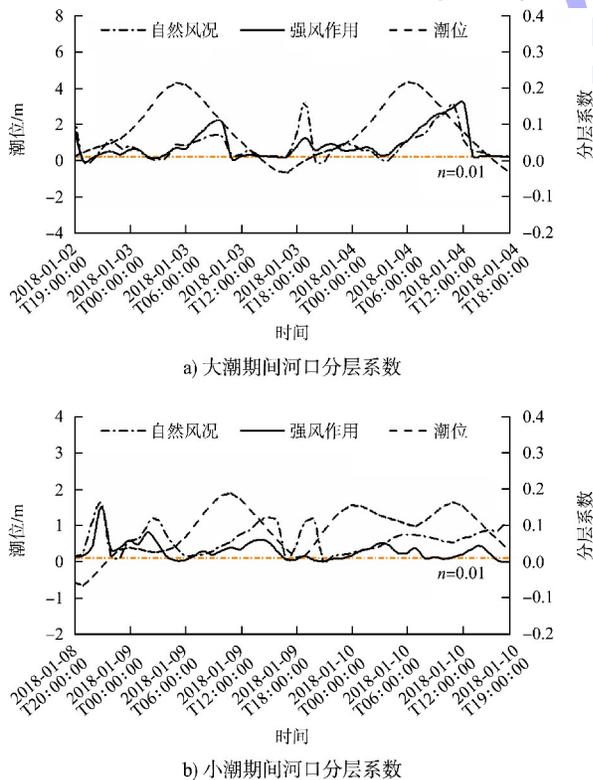


图 8 枯水期分层系数变化情况

Fig. 8 Stratification coefficient change in dry season

表 3 枯水期涨落潮阶段分层系数

Tab. 3 Stratification coefficient during flood-ebb phase in dry season

位置	潮汐现象	分层系数		
		自然风况	强风风况	
河口	涨潮	大潮	0.034 0	0.029 3
		小潮	0.050 3	0.024 0
	落潮	大潮	0.046 2	0.054 4
		小潮	0.069 8	0.032 1
河道	涨潮	大潮	0.264 7	0.239 8
		小潮	0.193 6	0.176 1
	落潮	大潮	0.865 7	0.795 5
	小潮	0.535 6	0.315 6	

### 3.3 风作用下钦江盐水上溯距离和盐通量变化

河口作为连接河流与海洋的要道, 是物质运输的重要场所, 其中盐水上溯距离和盐通量变化对河口生态、水资源规划利用有重要影响, 同时也为后续采取“以淡压咸”、水资源调度等措施提供一定的科学指导。

钦江横穿钦州市，汇入茅尾海，是城市农田用水的重要水源。而一般生活饮用水以含氯浓度 250 mg/L (盐度值为 0.5‰) 为临界标准<sup>[27-28]</sup>，因此以 0.5‰盐度等值线作为最大上溯距离，盐水上溯距离从钦江河口沙井处为起点统计。在施加强

风作用下，大潮时盐水上溯距离有所增加，最多可增加 2.08 km；小潮时在强风作用下盐水上溯距离反而略有减小。无论大潮期间还是小潮期间，强风作用结束后一段时间内的盐水上溯距离均有所增加，并随时间延续影响逐渐减弱，见图 9。

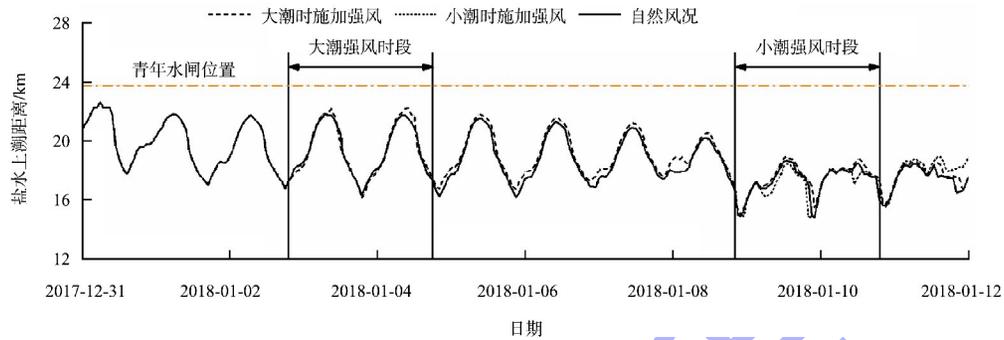


图 9 强风作用下枯水期盐水上溯距离

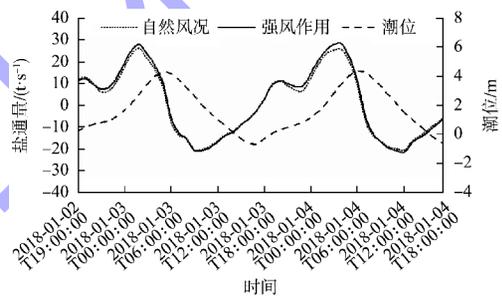
Fig. 9 Saltwater intrusion distance under strong winds in dry season

在上述水动力基础上进一步计算得到在连续潮周期内钦江河口断面盐通量变化情况，盐通量指  $t$  时刻通过某一断面的盐分总量，本文所取断面为沙井断面，盐通量  $F_s$  计算公式为：

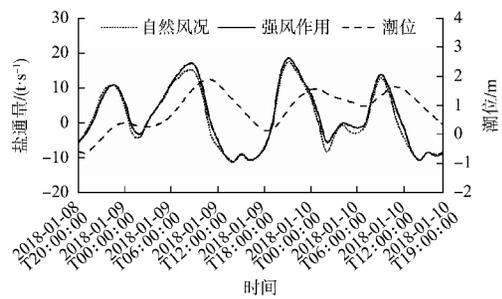
$$F_s = \sum_{i=1}^n \bar{V}_i \bar{S}_i D_i W_i \quad (2)$$

式中： $n$  为断面网格单元数； $\bar{V}_i$  为网格平均流速； $\bar{S}_i$  为网格平均盐度； $D_i$  为网格水深； $W_i$  为网格宽度。

枯水期河口盐通量见图 10，图中盐通量正值为向陆盐通量，负值为向海盐通量。由图可知，盐通量曲线与潮位曲线存在一个明显的相位差。这与潮周期内的潮汐动力变化有关，在一个潮周期中，涨急时刻与落急时刻潮汐动力最强、流速最大，受此影响盐通量在此刻达到峰值。涨急时刻与落急时刻后流速减慢，在涨憩时刻与落憩时刻趋近于 0 t/s，盐通量也在此刻转变运输方向。在风应力作用下，小潮时盐通量变化更加显著，其向陆盐通量的增幅最大达 11.53%，向海盐通量降幅最大为 10.61%；大潮时向陆盐通量增幅为 9.9%，向海盐通量无明显变化，见表 4。风应力作用对盐通量的影响表现为“涨增落减”，即涨潮阶段向陆盐通量增加，落潮阶段向海盐通量减少，这增加了潮周期内进入河道的盐量，加剧了盐水入侵的程度。



a) 大潮期间



b) 小潮期间

图 10 枯水期河口盐通量

Fig. 10 Estuarine salt flux in dry season

表 4 强风作用枯水期河口盐通量变化率

Tab. 4 Variation rate of estuarine salt flux under strong winds in dry season

潮汐现象		盐通量变化率 / %
涨潮	大潮	9.90
	小潮	11.53
落潮	大潮	0.97
	小潮	-10.61

#### 4 结论

1) 钦江河道流速表现出表底层相反的变化趋势,涨潮时表层流速降低,底层流速增加,落潮时表层流速增加,底层流速降低。在涨潮转向落潮阶段,底层水体流向存在振荡区间,转向滞后,并在其后一段时间维持向陆输运。

2) 钦江河口整体盐度均有所升高,盐度最大增长4.21%,河道处仅在大潮时增长5.92%。风应力显著促进高盐度水体上溯,19‰等盐度线最大上溯3.1 km。在落潮阶段,盐度分层更加剧烈,且在小潮时风应力有效抑制了盐水分层。

3) 盐水上溯距离最大增加2.08 km,且强风作用结束后对后续潮周期仍有影响,该影响随时间减弱。钦江河口盐通量变化呈现为涨潮时向陆的盐通量增加,落潮时向海的盐通量减少,小潮期间该变化更为突出,其中向陆盐通量最大增幅达11.53%,向海盐通量最大降幅达10.61%,增加了进入钦江河道的盐量。

4) 当前研究聚焦单一的10.0 m/s强北风影响,后续可从以下方面继续深入研究:在已有研究基础上考虑水温、悬沙等影响因素,进一步探究多因素耦合作用下的盐水入侵机制;考虑开展不同风向、风速以及极端天气(如风暴潮)的盐水入侵研究,完善不同情景下盐水入侵的响应情况,可进一步提升盐水入侵预测的时空准确性。

#### 参考文献:

- [1] 潘存鸿,张舒羽,唐子文. 钱塘江河口水流-河床相互作用及对盐水入侵的影响[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 535-542.  
PAN C H, ZHANG S Y, TANG Z W. Interaction of flow-riverbed and its effects on saltwater intrusion in Qiantang River estuary [J]. Advances in water science, 2015, 26(4): 535-542.
- [2] 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 River Estuary [J]. Hydro-science and engineering, 2018 (1): 58-65.
- [3] 张钊汇,危小艳,张蔚. 三维理想河口盐水入侵对径潮驱动变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 96-102.  
ZHANG Z H, WEI X Y, ZHANG W. Response of three-dimensional ideal estuarine salt intrusion to changes in river and tidal forcing [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2024, 52(3): 96-102.
- [4] PAN M J, KONG J, LUO Z Y, et al. Influence of typhoon path on salt water intrusion in the modaomen waterway, China [J]. Journal of coastal research, 2018, 85: 936-940.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 刘明维,杜波,吴林键,等. 盐水入侵与干湿交替共同作用下船闸金属结构腐蚀特征研究[J]. 水运工程, 2023(4): 96-103.  
LIU M W, DU B, WU L J, et al. Corrosion characteristics of metal structure for ship lock under saltwater intrusion and drying-wetting alternation [J]. Port & waterway engineering, 2023(4): 96-103.
- [8] 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.
- [9] 袁昊,王金华. 流域枯水条件下长江口盐水入侵变化特征[J]. 科学技术创新, 2024(12): 54-57.  
YUAN H, WANG J H. Variation characteristics of saltwater intrusion in the Yangtze Estuary under dry water conditions [J]. Scientific and technological innovation, 2024(12): 54-57.
- [10] 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.
- [11] 王彪. 珠江河口盐水入侵[D]. 上海: 华东师范大

- 学, 2011.  
WANG B. Salt intrusion in the Pearl River Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [12] 肖毅, 李达宏, 邓敬宏, 等. 钦江河口盐水入侵距离预测模型研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(5): 32-37, 45.  
XIAO Y, LI D H, DENG J H, et al. Prediction model of saltwater intrusion distance in the Qinjiang River Estuary [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2024, 43(5): 32-37, 45.
- [13] 郑华, 刘洁, 张文武, 等. 径流与潮差对钦江河口盐水入侵距离的影响机制[J]. 海洋预报, 2025, 42(1): 56-63.  
ZHENG H, LIU J, ZHANG W W, et al. Mechanisms of the runoff and tidal impacting on the distance of saltwater intrusion in the Qinjiang River Estuary [J]. Marine forecasts, 2025, 42(1): 56-63.
- [14] DECASTRO M, GÓMEZ-GESTEIRA M, PREGO R, et al. Wind and tidal influence on water circulation in a Galician ria (NW Spain) [J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2000, 51(2): 161-176.
- [15] 程香菊, 詹威, 郭振仁, 等. 珠江西四口门盐水入侵数值模拟及分析[J]. 水利学报, 2012, 43(5): 554-563.  
CHENG X J, ZHAN W, GUO Z R, et al. Numerical simulation and analysis of saltwater intrusion to four western watercourses of Pearl River estuary [J]. Journal of hydraulic engineering, 2012, 43(5): 554-563.
- [16] 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.
- [17] LI L, ZHU J R, WU H. Impacts of wind stress on saltwater intrusion in the Yangtze Estuary [J]. Science China earth sciences, 2012, 55(7): 1178-1192.
- [18] 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 L J, ZHU J R. The effects of north wind speed in winter on saltwater intrusion in the Changjiang Estuary [J]. Acta oceanologica sinica, 2021, 43(10): 10-22.
- [19] MANCA F, CAPELLI G, LA VIGNA F, et al. Wind-induced salt-wedge intrusion in the Tiber river mouth (Rome-Central Italy) [J]. Environmental earth sciences, 2014, 72(4): 1083-1095.
- [20] WANG D P. Wind-driven circulation in the Chesapeake Bay, winter, 1975 [J]. Journal of physical oceanography, 1979, 9(3): 564-572.
- [21] 吕小龙, 吴澎, 潘海涛. 平陆运河航运枢纽梯级布置全要素比选方法[J]. 水运工程, 2025(4): 1-7.  
LYU X L, WU P, PAN H T. Multi-element comparison and selection method for cascade layout of Pinglu Canal navigation hubs [J]. Port & waterway engineering, 2025(4): 1-7.
- [22] 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.
- [23] 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 W W. Numerical simulation of saline intrusion in Qinjiang River estuary [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [24] 方神光. 珠江河口磨刀门水道枯季盐水入侵特性分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(11): 90-99.  
FANG S G. Analysis on salt water intrusion characteristics of Modaomen waterway in Pearl River Estuary in dry season [J]. Marine sciences, 2014, 38(11): 90-99.
- [25] 童朝锋, 李磊, 孟艳秋, 等. 磨刀门水道枯季大潮水体层化混合分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(1): 48-57.  
TONG C F, LI L, MENG Y Q, et al. Analysis of stratification-mixing mechanism during spring tide of dry season in the Modaomen waterway [J]. Hydro-science and engineering, 2018(1): 48-57.
- [26] 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 A 辑, 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.
- [27] 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(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.
- [28] 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 River Estuary [J]. Science technology and engineering, 2016, 16(3): 106-111.