

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, doi:10.12284/hyxb2025009
Wang Hui, Huang Rui, Zhang Wei, et al. Study on the impact of upstream discharge on saltwater intrusion distance in the Changjiang Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(1): 1–12, doi:10.12284/hyxb2025009

上游径流对长江口盐水上溯距离影响研究

王辉^{1,2}, 黄睿^{1,2*}, 张蔚^{1,2}, 陈中³, 王晓光^{1,2}, 李昊², 曾建峰³

(1. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024; 3. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 长江口盐水入侵严重影响上游供水安全、农业灌溉和生态环境健康, 其中在径流和潮动力的相互作用下盐水上溯距离一直受到较多的关注, 然而径潮相互作用下盐水上溯距离研究并不充分。本文利用 MIKE 3 水动力学模型建立了长江口三维水动力和盐度数学模型, 采用 2016 年长江口实测潮位、流速、流向和盐度资料对长江口三维水动力和盐度数学模型进行了验证, 验证结果显示模拟值和实测值较为吻合, 表明本文所建立的长江口三维水动力和盐度数学模型可以较好地模拟长江口附近的水动力和盐度特性。为了探究上游径流对长江口盐水上溯距离的影响, 本文设置了长江口上游 15 000~50 000 m³/s 中 8 个径流量, 分别模拟研究了上游不同径流量对长江口南支-北港、南支-南港-北槽和南支-南港-南槽 3 条航道盐水入侵上溯距离的影响。模拟结果表明, 3 条航道的盐水入侵程度显著依赖于潮汐动力, 大潮潮动力强, 外海与北支盐水倒灌的盐水入侵都强于小潮期间, 盐水上溯距离整体大于小潮期间。当径流较低时, 北支存在盐水倒灌现象, 也会增加盐水入侵距离。同时分析了不同径流条件下 3 条航道盐度垂向分布和层化现象, 并分别建立了上游径流量和 3 条航道盐水上溯距离的相关关系。研究结果可对长江河口“压咸补淡”和物质输运等研究提供一定的参考。

关键词: 长江口; 数值模拟; 盐水入侵; 上溯距离; 径流

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2025)01-0001-12

1 引言

河口地区经济发达, 交通便利, 具有独特的地理优势, 因此全球有近三分之一的人口居住于河口三角洲区域^[1]。随着社会的发展以及河口地区人口的激增, 通常需要兴建水库来解决水资源短缺问题。但外海的高浓度盐水会随着潮汐进入河口影响水库口的取水, 一般认为当盐度达到 0.2 (practical salinity units, PSU) 时该河口水域就发生了盐水入侵, 当盐度达到 0.45 时水库取水问题受到威胁^[2]。盐水入侵河口水域不仅影响着淡水资源的利用, 同时对河口沉积物的输运过程以及水生物种的分布同样有着重要的作用^[3-7]。

目前世界上许多国家的河口都面临着盐水入侵的问题, 特别在河口面积丰富的国家, 如中国、德国、意大利以及美国等, 因此深入研究河口盐水入侵问题具有重要的科学价值和应用价值^[8]。长江是中国第一大河, 其河口区域经过长期的演变呈现出“三级分汊, 四口入海”的格局^[9], 如图 1 所示。长江径流量充沛, 大通水文站多年平均径流量为 29 300 m³/s, 且季节性变化明显, 当上游径流量小于 30 000 m³/s 时, 南支上段可发生盐水入侵, 当流量小于 10 000 m³/s 的极端干旱情况下, 盐水入侵可能会持续一个以上潮周期^[10-11]。因此研究长江口盐水入侵问题对上海市用水安全具有重要的现实意义。

收稿日期: 2024-11-06; 修订日期: 2024-12-20。

基金项目: 国家自然科学基金(U2040203, 42206165)。

作者简介: 王辉(2000—), 男, 河南省邓州市人, 主要从事河口海岸水动力研究。E-mail: 2742806650@qq.com

* 通信作者: 黄睿, 副研究员, 主要从事河口海岸水动力与泥沙运动研究。E-mail: ruihuang@hhu.edu.cn

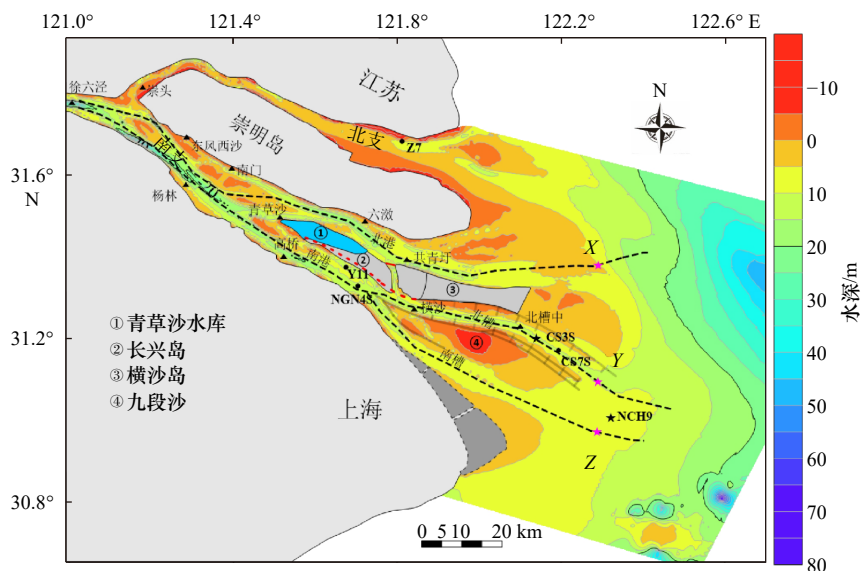


图 1 长江河口测站点分布

Fig. 1 Monitoring site distribution at the Changjiang River Estuary

河口盐水入侵受到上游径流、外海潮汐、地形演变、海平面上升以及风应力等因素的影响,众多学者对其影响因素进行了深入研究^[12-17]。长江口的盐水入侵研究,最早主要集中在径流、潮汐、与地形的影响^[18-19]。仇威^[20-21]利用 UnFECOM 模型模拟了 2014 年 2 月份的盐水入侵,分析强北风天气下长江口盐水入侵对增加不同径流量的响应,结果表明当上游径流量增加值达到 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$,青草沙水库最长不易取水时间显著缩短;侯成程^[22]通过在不同潮型下增加大通站的流量,研究了青草沙水库取水口盐度对上游径流的响应时间,结果表明当大通站的径流量提升时,河口区域的盐度变化反应时间介于 4.0 d 至 6.2 d 之间。然而在小潮期间,盐度对径流量变化的反应时间显著地比其他潮汐类型的反应时间要长;朱建荣等^[23]通过分析 2006 年 9 月份长江河口强烈的盐水入侵事件,结果表明是干旱导致径流量大幅下降,其中 9 月月平均径流量比相应多年月平均径流量下降了 52.5% ; Dai 等^[24]通过数据资料分析得到长江口枯季与洪季盐水入侵频发相对应大通水文站径流量分别为 $12\,000\sim 14\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $16\,000\sim 18\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。针对径流量的研究可知干旱导致的低径流量加剧盐水入侵,以及特定径流阈值与盐水入侵频发相关。Chen 等^[25]通过长江口三维水动力及盐度数值模型,利用 2007 年和 2017 年实测地貌数据,分析了 2007-2017 这十年间地形变化对长江口盐水入侵的影响,结果表明地形变化导致北支盐水入侵减弱,北港与南北槽盐水入侵加剧。海平面上升以及风应力等因素对长江口盐水入侵的影响也有诸多研究^[26-28]。陈维等^[29]模

拟了枯季情形下海平面上升对盐水入侵的影响,结果表明随着海平面的上升,北支下段由于南支低盐度水体进入导致其盐度较小,长江口口门其余地方盐度均呈增大趋势。王绍祥和朱建荣^[30]利用青草沙水库取水口盐度实测资料,在一般径流与风况下,分析了青草沙水库取水口盐水入侵的来源。对于地形变化与海平面上升等因素,其对盐水入侵的影响主要体现在长时间尺度上。基于以上研究结论分析可知,影响河口盐水入侵最重要的因素仍然是径流条件。

针对长江河口上游径流量对盐水入侵的影响问题,以往基于径流响应的研究主要集中于青草沙等水库取水口的盐度变化、盐通量变化以及长江口南支的压咸流量,但对于上游径流量对盐水上溯距离的影响研究并不充分,因此本文基于长江河口 2016 年实测地形数据,利用 MIKE 3 水动力数学模型建立长江口三维水动力及盐度数学模型,针对上游不同流量,研究上游径流量对长江口盐水上溯距离的影响。

2 模型建立与验证

2.1 控制方程

本文使用 MIKE 3 水动力学模型。该模型已广泛应用于海洋、沿海和河口环境等水动力数值模拟。通过求解不可压雷诺平均 Navier-Stokes 方程组,包含连续性方程、动量方程、温度输运方程、盐度输运方程以及状态方程,采用布辛涅斯克近似和静水压力条件,利用湍流模型闭合整个数学模型。在处理三维模拟时,采用西格玛坐标转换技术,可以准确追踪自由水面的变化情况,确保了模型在复杂水动力学过程中

的精确性和可靠性^[31]。

动量方程、连续方程和温度盐度输运方程如下:

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = S_i, \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_i, \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (S u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_S \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) + S_i, \quad (4)$$

式中: ρ 为水的密度; c_s 为海水中声的传播速度; u_i 为 x_i 方向的速度分量; Ω_{ij} 为克氏张量; p 为压力; g_i 为重力矢量; V_T 为紊动黏性系数; δ 为克罗奈克函数; k 为紊动动能; T 与 S 分别指温度与盐度; D_T 与 D_S 分别指相关

的温度与盐度扩散系数; t 指时间; S_i 为各自的源汇项。

2.2 计算区域与网格

研究区域包括长江口、杭州湾以及舟山群岛在内, 为了避免外海潮汐对上游径流的影响, 模型的上游取在大通水文站附近, 外海取在-50 m 等深线附近。模型范围东西方向从 117.5°E 到 123.5°E, 南北方向由 29.5°N 到 33.5°N, 如图 2 所示。模型的计算网格采用非结构化三角形网格, 能够更好地适应岸线的变化。外海开边界的网格分辨率取为 10 km, 上游河道与河口区域的网格分辨率取为 400 m, 并对长江口北槽深水航道进行了局部加密, 其网格空间分辨率可达到 50 m; 模型的垂直方向采用 δ 坐标, 均匀分为 10 层。为了满足精度要求, 经过多次试验, 模型的时间步长取 5 s。模型网格节点数为 64 447, 网格单元数为 123 677。

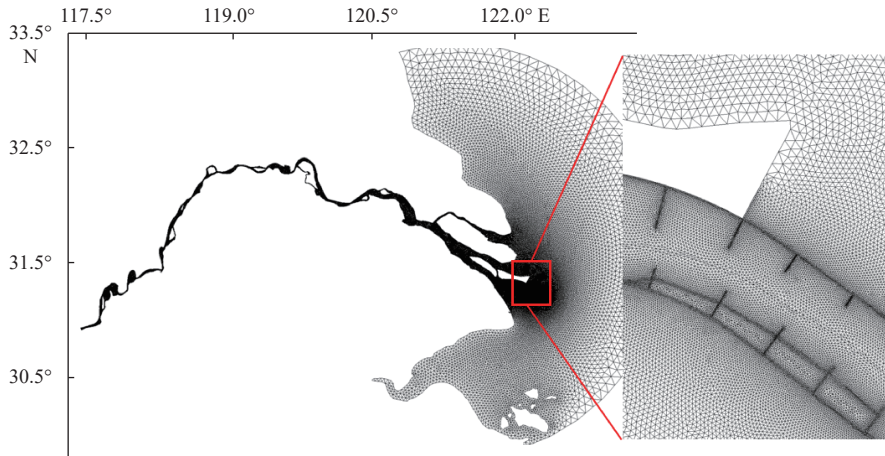


图2 模型计算区域与网格

Fig. 2 Modeling domain and grid

2.3 模型参数的设置

模型上游边界条件采用大通站实测径流数据, 外海潮位边界考虑八大分潮 (M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1), 由 TPX08 全球潮位系统进行提取。河床底摩擦采用河床粗糙度高度, 并对模型计算区域进行分块赋值。模型的水平涡流黏度采用 Samagorinsky 公式。盐度扩散系数选取比例涡黏公式, 其中水平扩散比例因子为 0.28, 垂向扩散比例因子为 0.1。湍流模块选择标准的 $k-\epsilon$ 模式。由于长江河口区域潮滩较多, 模型采用干湿动边界处理技术, 临界水深取 0.2 m。由于外海盐度场均匀, 外海盐度边界取为定值。采用模型计算稳定后(冷启动, 40 d 后)的场值作为初始条件。模型参数设置汇总如表 1。

2.4 数值模型的验证

本文采用 2016 年份长江口实测潮位、流速、流

向和盐度资料对长江口三维水动力和盐度模型进行验证。其中洪季潮位实测数据时间为 2016 年 7 月 19-22 日, 流速、流向和盐度实测数据时间为 2016

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

模型参数	配置
流量边界	逐日实测时间序列文件
潮位边界	TPX08 获取
粗糙度高度	0.003~0.005 m
水平涡流黏度	0.28
水平扩散比例因子	0.28
垂向扩散比例因子	0.1
盐度边界(上游/下游)	0 / 32

年 7 月 21-22 日; 枯季潮位实测数据时间为 2016 年 1 月 10-12 日, 流速、流向和盐度实测数据时间为 2016 年 1 月 11-12 日。长江口三维模型的潮位验证站点洪季枯季各选取 4 个, 枯季测站点为徐六泾、崇头、六激和高桥, 洪季测站点为崇头、杨林、共青圩和横沙, 测站点分别位于南支、南港、北港与北槽位置, 验证结果如图 3 所示; 洪季枯季各选取南港 1 个测站进行流速流向的验证, 分别为 NGN4S 和 Y11 测站点, 验证结果如图 4 和图 5 所示; 盐度测站点选取了洪季两个测站点进行验证, 分别为 CS3S 和 NCH9 测站, 验证结果如图 6 所示, 具体测站位置如图 1 所示。

对于模型的验证结果, 采用数理统计中技术分数 Skill Score (SS) 对验证数据进行评价与分析^[32]。相关计算公式如下:

$$SS = 1 - \frac{\sum (X_{obs} - X_{mod})^2}{\sum (X_{obs} - \bar{X}_{obs})^2}, \quad (5)$$

式中: X_{obs} 和 X_{mod} 分别为实测值和模拟值, \bar{X}_{obs} 为实测均值。当 SS 值等于 1 时, 认为模式模拟结果完美; SS 值大于 0.65 时, 认为模拟结果极好; SS 值大于 0.5 时, 认为模拟结果很好; SS 的值大于 0.2 时, 认为

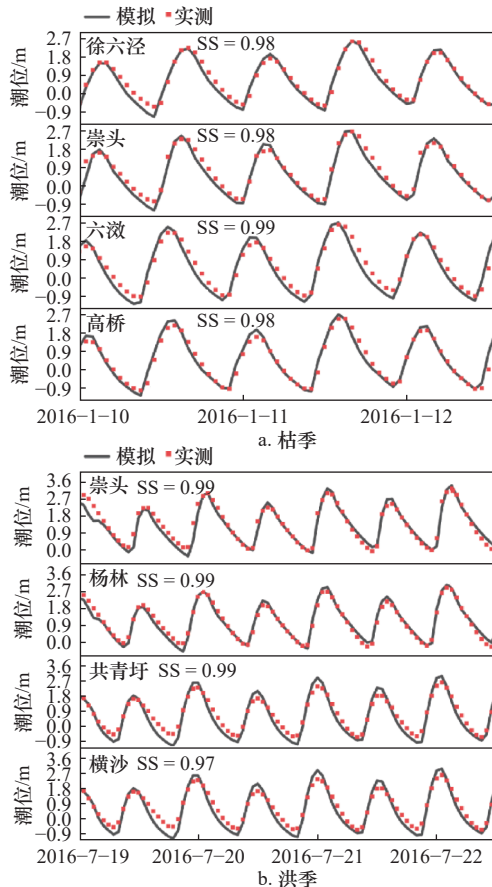


图 3 潮位验证图

Fig. 3 Tidal level validation figures

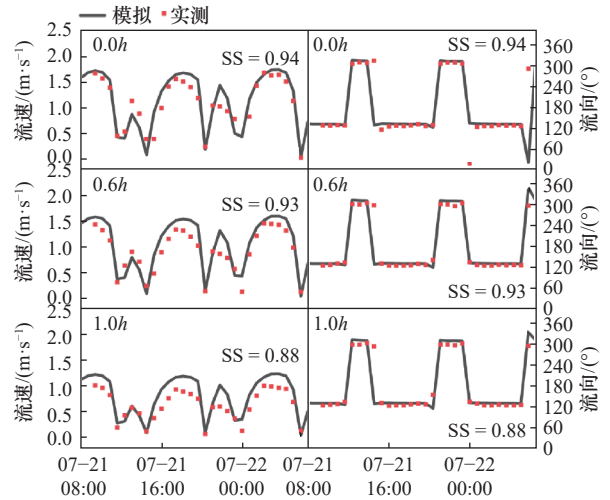


图 4 NGN4S 测站流速流向验证图

Fig. 4 NGN4S Station flow velocity and direction validation figure

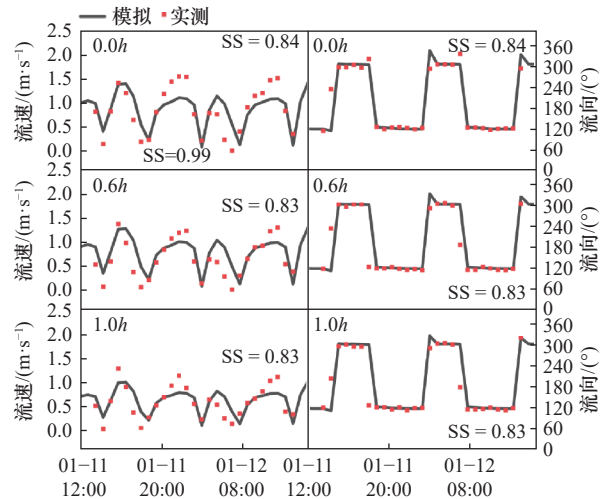


图 5 Y11 测站流速流向验证图

Fig. 5 Y11 Station flow velocity and direction validation figure

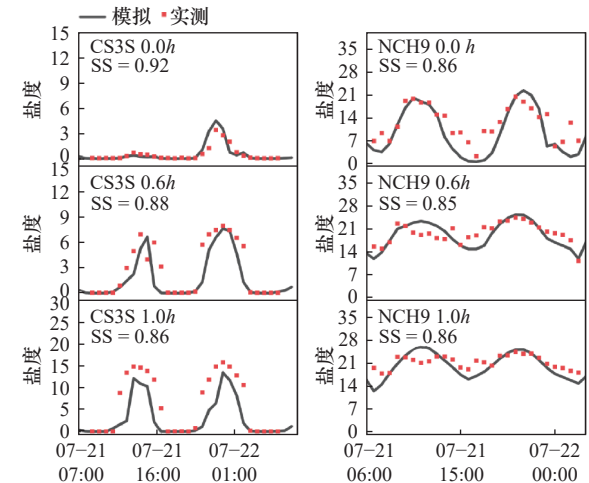


图 6 盐度验证图

Fig. 6 Salinity station validation figure

模拟验证结果良好;SS的值低于0.2时,表明验证结果较差。各测站潮位验证、流速、流向和盐度的验证结果SS数附在图3至图6中。可以看出,潮位SS评估系数全部接近于1,流速、流向和盐度SS评估系数均大于0.65,模型模拟结果较好。

3 数值模拟结果与讨论

根据文献资料可知,当长江口上游径流量低于30 000 m³/s时,长江河口地区可能发生盐度超标现象^[33]。当大通径流量低于13 000 m³/s时且遇到大潮期间时,长江口会出现严重的盐水入侵现象^[23]。因此本文将上游径流量设置为不同的定值来研究上游径流量对盐水入侵距离的影响,选取8组数值试验,上游径流量分别设置为15 000 m³/s, 20 000 m³/s, 22 500 m³/s, 25 000 m³/s, 27 500 m³/s, 30 000 m³/s, 40 000 m³/s, 50 000 m³/s。为了研究径流量单一因素的影响,这8组数值试验除了上游径流量不同外,其他控制条件完全一样。模型的模拟时间为2016年3月3-19日,模型以热启动的方式运行。为了避免上游流量的滞后性,选取3月10日后的数据进行结果分析。以北港上端六淤水位过程线为基准,分别选取大小潮期间落急、落憩、涨急和涨憩4个时刻,研究南支-北港主航道(靠近南支北岸)、南支-南港-北槽(靠近南支南岸)以及南支-南港-南槽盐水入侵距离的变化。其中大潮时间为3月12日16:00-3月13日16:00,潮差为3.6 m;小潮时间为3月17日8:00-3月18日8:00,潮差为2.1 m。其中3条航道盐水入侵的上溯距离分别以X、Y和Z点为基准点,上端以0.45等盐度线为标准。以此来研究不同径流量对3条航道盐水入侵上溯距离的影响,3条航道与基准点位置如图1所示。

3.1 大潮期间3条航道盐度垂向分布特征

图7为大潮期间数值试验不同径流条件下不同时刻南支-北港、南支-南港-北槽和南支-南港-南槽盐度垂向分布图,基准点X、Y和Z在图7中黄色实线位置,盐水上溯距离以X、Y和Z为基准点(0 km)。其中图7a和图7b为大潮期间15 000 m³/s和50 000 m³/s流量时南支-北港的盐度垂向分布图;同样的图7c、图7d和图7e、图7f分别为南支-南港-北槽和南支-南港-南槽盐度垂向分布图。由于处于低径流情况下,从图7可以看出15 000 m³/s数值试验下,整个南支绝大部分区域盐度高于0.45。由于北支的盐水倒灌,南支原本的低盐水团被倒灌水体挤压到下游位置,呈现出“两端高,中间低”的盐度趋势^[34],北

支盐水倒灌与北港外海盐水入侵的叠加加剧了盐水上溯距离。从图7a中可以看出,东风西沙水库附近出现了盐度锋面,表层盐度小于底层盐度,表层盐度在1左右,底层盐度在2左右,北港到外海整体盐度分布较为均匀,没有出现明显的分层现象。从落急到落憩时刻,等盐度线向下游移动,南支上部出现了较大范围的淡水区域,1等盐度线向下游移动了11 km左右。可以看出落憩与涨急时刻,由于北支倒灌的累积效应,距离南北支分叉口15 km处底部出现了高盐水团,盐度值达到5;从落憩到涨急时刻,南支上部水体仍处于落潮期间,南支上部淡水区域进一步扩大;从涨急到涨憩时刻,南支淡水区域被盐水压缩减小。在落急时刻,数值试验15 000 m³/s是遭受盐水入侵最严重的时刻,整个南支基本没有淡水区域,盐水上溯距离为140 km左右。

图7只分别展示了15 000 m³/s和50 000 m³/s两个径流量级的盐度分布,其他径流量的情况较为近似。图7b为大潮期间数值试验50 000 m³/s条件下不同时刻南支-北港盐度垂向分布图,从图7b可以看出盐度的整体变化不大。由于径流的主导作用,此时的盐水入侵只发生在北港口门附近,南支与北港中上段基本不发生盐水入侵,且在涨憩时刻盐水上溯距离最远,上溯距离为33 km。

图7c为大潮期间数值试验15 000 m³/s条件下不同时刻南支-南港-北槽盐度垂向分布图。从图7c可以看出15 000 m³/s数值试验下,南支存在较大部分的淡水区域,此时杨林水文站附近出现盐度锋面,底层盐度为1,整个南支(靠近南岸)的盐度小于同条件下的南支-北港情况,此时盐水上溯距离为136 km左右。图7d为大潮期间数值试验50 000 m³/s条件下不同时刻南支-南港-北槽盐度垂向分布图,从图7d可以看出盐度的整体变化不大。由于径流的主导作用,此时的盐水入侵只发生在北槽,南支与南港段不发生盐水入侵,且在涨憩时刻盐水上溯距离最远,上溯距离为46 km。

图7e为大潮期间数值试验15 000 m³/s条件下不同时刻南支-南港-南槽盐度垂向分布图。由于南支-南港-北槽与南支-南港-南槽共同包含南支-南港部分,因此本文主要分析南槽与北槽的纵向盐度变化差异。从图7c和图7e可以看出,在低径流的情况下,盐度的纵向差异不大,此时南支-南港-南槽盐水入侵的距离为132 km。图7f为大潮期间数值试验50 000 m³/s条件下不同时刻南支-南港-南槽盐度垂向分布图,从图7d和图7f可以看出,当径流量起主

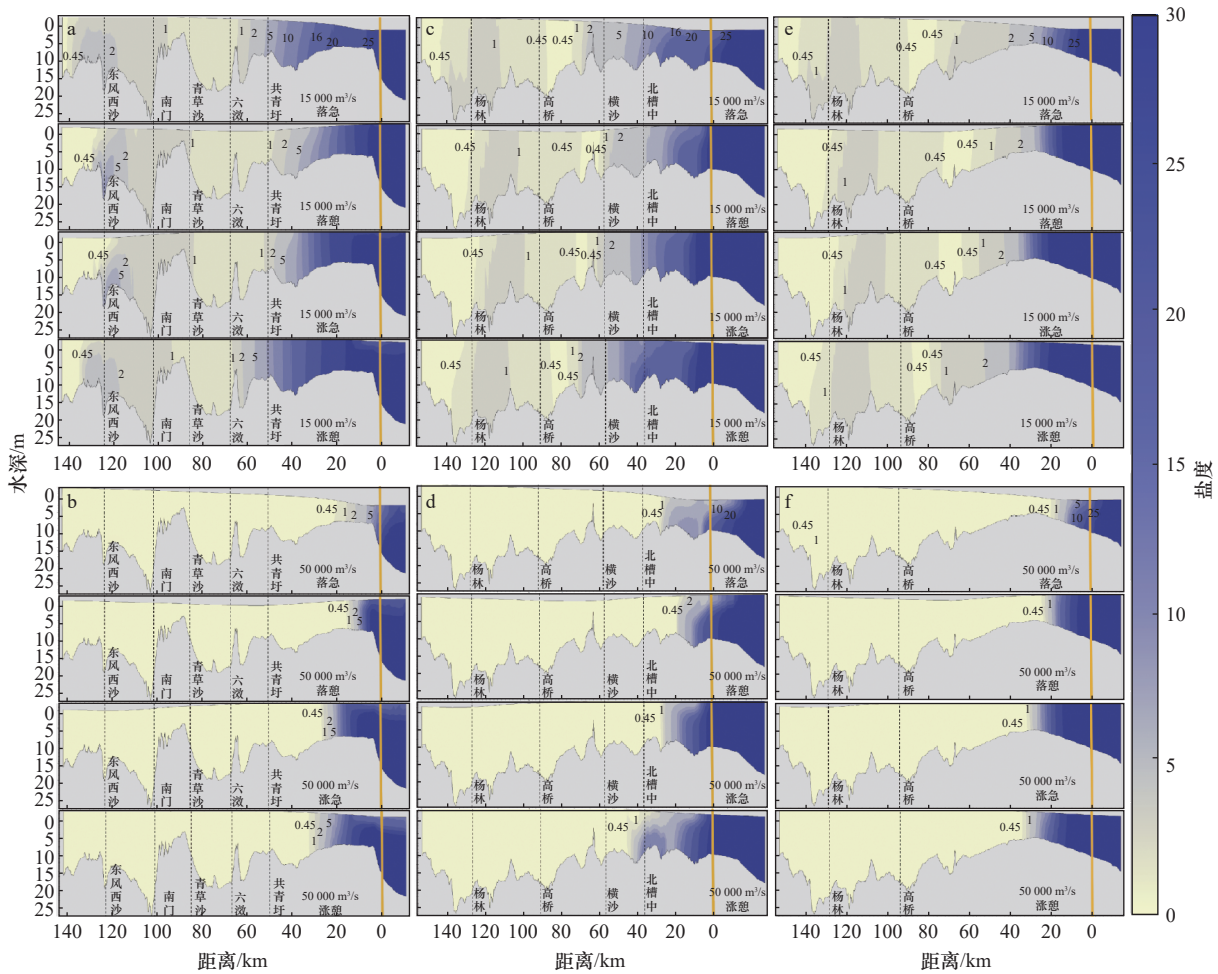


图7 不同径流量条件下大潮期间不同时刻3条航道盐度垂向分布 [南支-北港: 15 000 m³/s(a), 50 000 m³/s(b); 南支-南港-北槽: 15 000 m³/s(c), 50 000 m³/s(d); 南支-南港-南槽: 15 000 m³/s(e), 50 000 m³/s(f)]

Fig. 7 Vertical salinity distribution at different times during spring tides under various discharge conditions in three channels [the South Branch-North Port: 15 000 m³/s (a), 50 000 m³/s (b); the South Branch-South Port-North Channel: 15 000 m³/s (c), 50 000 m³/s (d); the South Branch-South Port-South Channel: 15 000 m³/s (e), 50 000 m³/s (f)]

导作用时,南槽的盐水入侵弱于北槽,北槽的盐水入侵距离在涨憩时达到46 km,而南槽的盐水入侵距离为34 km。

整个大潮期间,盐水都没出现明显的分层现象。从落憩到涨憩4个时刻中,等盐度线由疏变密,最后在涨憩时刻又变疏。

3.2 小潮期间3条航道盐度垂向分布特性

如图8为小潮期间流量为15 000 m³/s和50 000 m³/s时3条航道盐度垂向分布图,图8a为数值试验15 000 m³/s条件下不同时刻南支-北港盐度垂向分布图。东风西沙附近底层盐度为1,相比于大潮期间,盐度整体减小。其他两个航道的情况也较为一致。

小潮期间盐度变化和大潮期间较为近似,文中不再重复叙述,其中小潮期间盐水上溯距离如表2所示。

与大潮期间盐度分布不同,从小潮期间盐度的垂

向分布可以看出,盐度出现了明显的分层现象^[35-36],其原因主要是大潮期间,潮动力强,盐淡水混合相对均匀,没有出现明显的盐度分层现象。小潮期间,动力条件较弱,盐淡水混合减弱,出现了盐度层化现象。

3.3 北槽中测站CS3S盐度潮周期变化特性

如图9为北槽中测站CS3S分别在流量为15 000 m³/s和50 000 m³/s时大小潮潮周期内盐度变化,测点位置如图1所示。鉴于测站CS3S位于北槽偏下位置,因此在洪水季节,无论是大潮还是小潮期间,该站点均受到盐水楔的影响。图9a和图9b分别展示了在15 000 m³/s径流条件下,大潮和小潮期间的盐度变化情况。从图9可以观察到,小潮期间的层化现象比大潮期间更为显著。在15 000 m³/s的径流条件下,大部分时间内盐度分布较为均匀,仅在涨潮流后期出现局部的盐度分层现象;而在50 000 m³/s的径

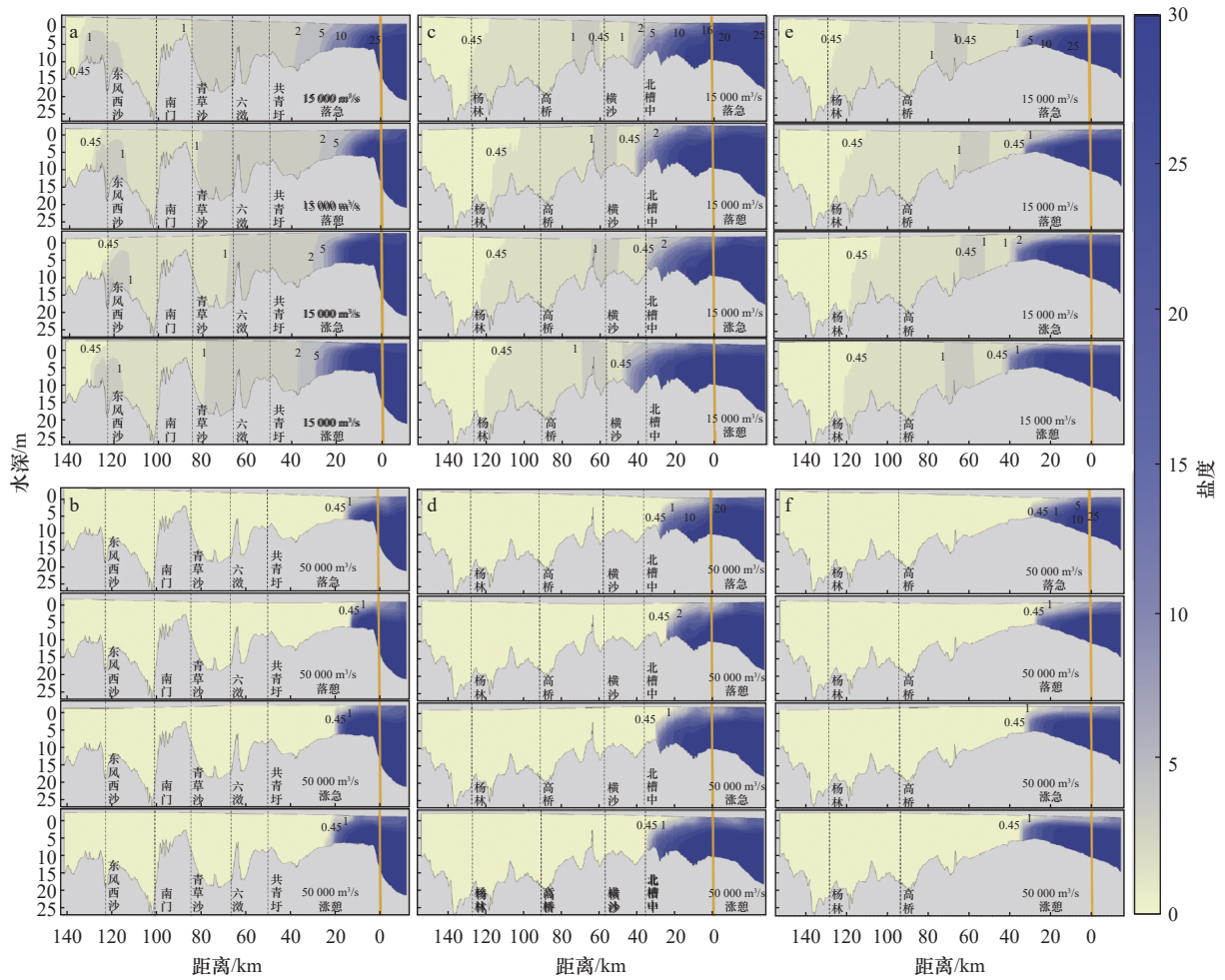


图 8 不同径流量条件下小潮期间不同时刻 3 条航道盐度垂向分布 [南支-北港: 15 000 m³/s(a), 50 000 m³/s(b); 南支-南港-北槽: 15 000 m³/s(c), 50 000 m³/s(d); 南支-南港-南槽: 15 000 m³/s(e), 50 000 m³/s(f)]

Fig. 8 Vertical salinity distribution at different times during neap tides under various discharge conditions in three channels [the South Branch-North Port: 15 000 m³/s (a), 50 000 m³/s (b); the South Branch-South Port-North Channel: 15 000 m³/s (c), 50 000 m³/s (d); the South Branch-South Port-South Channel: 15 000 m³/s (e), 50 000 m³/s (f)]

表 2 大潮和小潮期间径流量和盐水上溯距离对应关系

Table 2 Relationship between discharge and salt water intrusion distance during spring and neap tides

流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	大潮期间盐水上溯距离 L/km			小潮期间盐水上溯距离 L/km		
	南支-北港	南支-南港-北槽	南支-南港-南槽	南支-北港	南支-南港-北槽	南支-南港-南槽
15 000	140(69 + 71)	136(66 + 70)	132(66 + 66)	134(69 + 65)	129(67 + 62)	128(67 + 61)
20 000	137(57 + 80)	115(50 + 65)	112(50 + 62)	104(41 + 63)	73	78
22 500	102(44 + 58)	73(18 + 55)	69(18 + 51)	70(13 + 57)	49	42
25 000	89(33 + 56)	53	45	41	39	40
27 500	72(20 + 52)	51	43	29	39	39
30 000	44	49	41	28	38	39
40 000	35	46	38	26	35	38
50 000	33	46	34	24	32	36

注: 括号内分别为北支盐水倒灌距离与外海盐水入侵距离, 括号外为两者距离之和。

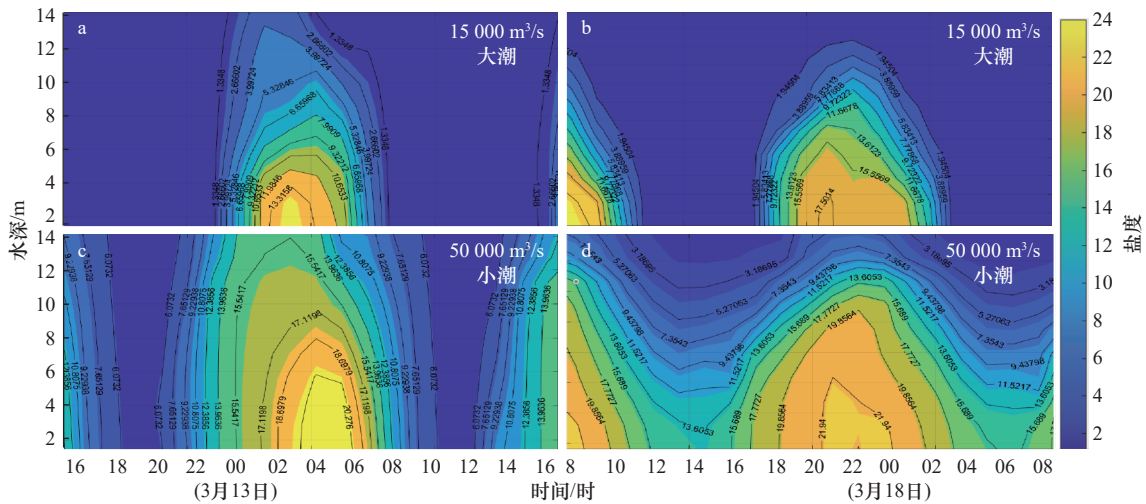


图9 不同径流量条件下测站CS3S潮周期盐度变化

Fig. 9 Salinity variations during tidal cycles at Station CS3S under various discharge conditions

流条件下,尽管大潮期间仍有一段时间内混合较为均匀,但小潮期间的盐度分层现象不仅明显而且呈现出较强的周期性。

具体而言,在 $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的径流条件下,大潮期间潮周期内表底层盐度平均差异为 3.9,而小潮期间平均差异为 15.9;在 $50\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的径流条件下,大潮和小潮期间潮周期内表底层盐度平均差异分别为 4.3 和 9.8。可以看出,不同的径流条件对各航道的盐度垂直分布有着显著的影响。

4 上游径流对盐水上溯距离的影响

本文对大潮期间和小潮期间各 8 组数值试验进行分析,探讨上游径流量对盐水上溯距离的影响。根据上节的分析,大小潮期间盐水上溯距离与上游径流量之间的关系如表 2 所示。盐水上溯距离与上游径流量的相关关系如图 10 所示,其中大潮期间,南支-北港的盐水上溯距离用 L_{x_1} 表示,南支-南港-北槽用 L_{y_1} 表示,南支-南港-南槽用 L_{z_1} 表示;小潮期间,分别用 L_{x_2} 、 L_{y_2} 和 L_{z_2} 表示。分别建立大小潮期间上游径流量与盐水上溯距离的相关关系,如图 10 所示,上游径流量与盐水上溯距离的相关关系较好,3 条航道盐水上溯距离与上游径流量的拟合关系如式 (6)~(11) 所示。

如图 10 所示,大潮期间盐水上溯距离整体大于小潮,主要是由于大潮期间潮动力强,盐水上溯距离远。在流量低于 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,盐水入侵距离变化比较明显,这是因为在低流量条件下,径流对盐水入侵的影响较小,潮动力是主要影响因素。随着径流量的增加,盐水入侵距离逐渐减小,直至径流和潮动力达

到平衡,盐水无法继续上溯。南支-北港航道当径流量达到 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,大潮和小潮期间盐水上溯距离相关曲线出现拐点,随后趋于平缓。南支-南港-北槽,南支-南港-南槽 2 条航道当径流量达到 $25\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,大潮和小潮期间盐水上溯距离相关曲线出现拐点。3 条航道总体的变化规律较为一致。从表 2 也可以看出,拐点处所在的流量基本对应北支盐水倒灌消失时的流量,在大潮期间,当流量低于 $27\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时北支盐水倒灌南支,在小潮期间,当流量高于 $22\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时北支盐水倒灌现象消失。总体而言,随着径流量的增大,径流产生的盐分向海输运会越来越强,潮汐产生的盐分向陆输运会越来越弱,综合导致盐水上溯距离越来越小,但因为北支倒灌的消失,导致上溯距离随径流量减小的速率降低,导致了图 10 中拐点的出现,这与沈焕庭等^[37]和顾玉亮等^[38]的结论也较为一致。

盐水入侵距离主要是由于外海盐水随潮动力上溯所致。但当流量较低时,北支存在盐水倒灌现象,也会增加盐水入侵距离。如图 7 和图 8 所示,从外海到上游,盐度呈现高-低-高的分布特征,上游高盐度区是由于北支盐水倒灌导致的。在北支盐水倒灌的影响下,盐水入侵距离为北支盐水倒灌影响距离与外海盐水入侵距离之和,两者叠加影响距离分别列出,如表 2 所示。可以看出,南支-北港航道更易受到北支盐水倒灌的影响,其受影响程度超过南支-南港-北槽,南支-南港-南槽 2 条航道。同样大潮条件下, $27\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时南支-北港航道依然存在北支盐水倒灌并且倒灌距离达到 20 km,而南支-南港-北槽与南支-南港-南槽两条航道在 $22\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 的流量时北支盐水倒灌距离为 18 km。同样小潮条件下, $22\,500\text{ m}^3/\text{s}$

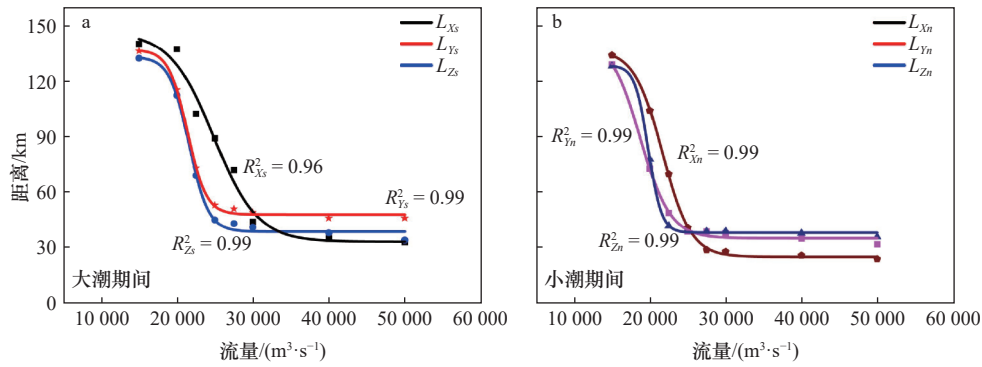


图 10 盐水上溯距离与上游径流量的相关关系 [大潮期间(a),小潮期间(b)]

Fig. 10 Correlation diagram illustrating the relationship between saltwater intrusion distance and upstream discharge volume [spring tides (a), neap tides (b)]

流量时南支-北港航道依然存在北支盐水倒灌且倒灌距离达到 13 km, 而南支-南港-北槽与南支-南港-南槽两条航道仅在 15 000 m³/s 的流量时存在北支盐水倒灌。当流量较高时, 北支不再出现盐水倒灌现象, 此时盐水上溯距离主要由外海盐水入侵决定。

$$L_{Xs} = 30.8 + 112.1 / (1 + e^{(Q_s - 24\,525) / 2\,500}), \quad (6)$$

$$L_{Xn} = 25.5 + 112.2 / (1 + e^{(Q_n - 21\,736) / 1\,920}), \quad (7)$$

$$L_{Ys} = 47.8 + 88.9 / (1 + e^{(Q_s - 21\,380) / 1\,280}), \quad (8)$$

$$L_{Yn} = 36.2 + 109.6 / (1 + e^{(Q_n - 19\,100) / 2\,150}), \quad (9)$$

$$L_{Zs} = 38.7 + 94.1 / (1 + e^{(Q_s - 21\,600) / 1\,315}), \quad (10)$$

$$L_{Zn} = 30.5 + 90.4 / (1 + e^{(Q_n - 19\,810) / 930}), \quad (11)$$

式中: Q 为上游径流量, Q_s 和 Q_n 分别为大潮期间和小潮期间上游径流量。本文中的取值范围为: 15 000~50 000 m³/s, L 单位为 km。

5 结论

本文基于 MIKE 3 建立了长江口三维水动力和盐度数学模型, 并采用 2016 年实测地形资料对长江口三维水动力和盐度数学模型进行了验证。为了研究上游径流对长江口盐水上溯距离的影响, 设置了长江口上游 15 000~50 000 m³/s 中 8 个径流量, 模拟研究

了上游径流量对南支-北港、南支-南港-北槽和南支-南港-南槽 3 条航道盐水入侵上溯距离的影响。研究结果表明:

(1) 3 条航道的盐水入侵显著依赖于潮汐动力, 大潮期间潮动力强, 3 条航道的盐水入侵都强于小潮期间, 盐水上溯距离大潮期间整体大于小潮期间。

(2) 大潮期间, 盐淡水混合相对均匀, 没有出现明显的盐度分层现象。小潮期间, 动力条件较弱, 盐淡水混合减弱, 出现了盐度层化现象。

(3) 分别建立了大小潮期间南支-北港、南支-南港-北槽、南支-南港-南槽 3 条航道上游径流量和盐水上溯距离的相关关系。当径流量分别小于 25 000 m³/s 和 30 000 m³/s 时, 径流量的变化对小潮和大潮期间盐水上溯距离影响较大, 当径流量分别达到 25 000 m³/s 和 30 000 m³/s 时, 由于径流动力和潮动力作用达到平衡状态, 小潮和大潮期间盐水上溯距离和径流关系曲线出现拐点, 盐水入侵上溯距离随后趋缓。

(4) 盐水入侵距离主要是由于外海盐水随潮动力上溯所致。但当流量较低时, 北支存在盐水倒灌现象, 也会增加盐水入侵距离, 盐水入侵距离为北支盐水倒灌影响距离与外海盐水入侵距离之和。当流量较高时, 北支不再出现盐水倒灌现象, 此时盐水上溯距离主要由外海盐水入侵决定。

参考文献:

- [1] Woodroffe C D, Nicholls R J, Saito Y, et al. Landscape variability and the response of Asian megadeltas to environmental change[M]// Harvey N. Global Change and Integrated Coastal Management: The Asia-Pacific Region. Dordrecht: Springer, 2006: 277-314.
- [2] 王玉琦, 李铖, 刘安琪, 等. 2022 年长江口夏季咸潮入侵及影响机制研究[J]. 人民长江, 2023, 54(4): 7-14.
Wang Yuqi, Li Cheng, Liu Anqi, et al. Dynamic mechanism of saltwater intrusion at Yangtze River Estuary in summer, 2022[J]. Yangtze River, 2023, 54(4): 7-14.
- [3] White I, Falkland T. Management of freshwater lenses on small Pacific islands[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(1): 227-246.
- [4] Neubauer S C, Franklin R B, Berrier D J. Saltwater intrusion into tidal freshwater marshes alters the biogeochemical processing of organic carbon[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(12): 8171-8183.
- [5] Weston N B, Dixon R E, Joye S B. Ramifications of increased salinity in tidal freshwater sediments: geochemistry and microbial path-

- ways of organic matter mineralization[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2006, 111(G1): G01009.
- [6] 黄睿, 张庆河, 张金凤, 等. 双层横向振荡格栅紊流特性的实验研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2022, 37(2): 244–251.
Huang Rui, Zhang Qinghe, Zhang Jinfeng, et al. Experimental research on turbulence characteristics of double layer transverse oscillating grid[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2022, 37(2): 244–251.
- [7] 吴天亮, 戴志军, 王日明, 等. 淹水时长与盐度对桐花树胚胎萌根与生长发育过程的影响研究[J]. *海洋学报*, 2023, 45(11): 101–111.
Wu Tianliang, Dai Zhijun, Wang Riming, et al. The impacts of submergence duration and salinity on the germination and growth process of *Aegiceras corniculatum* radicles[J]. *Haiyang Xuebao*, 2023, 45(11): 101–111.
- [8] Yuan Yirang, Liang Dong, Rui Hongxing. The numerical simulation and analysis of three-dimensional seawater intrusion and protection projects in porous media[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2009, 52(1): 92–107.
- [9] 沈焕庭, 茅志昌, 朱建荣. 长江河口盐水入侵[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
Shen Huanting, Mao Zhichang, Zhu Jianrong. *Saltwater Intrusion in the Changjiang River Estuary*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2003.
- [10] Sun Zhaohua, Fan Jiewei, Yan Xin, et al. Analysis of critical river discharge for saltwater intrusion control in the upper South Branch of the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(5): 823–842.
- [11] 乔红杰, 刘大伟, 闻卫东, 等. 2022 年长江口北支咸水倒灌传播特征分析[J]. *人民长江*, 2023, 54(2): 63–69.
Qiao Hongjie, Liu Dawei, Wen Weidong, et al. Diffusion characteristics of saltwater intrusion in North Branch of Yangtze River Estuary in 2022[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(2): 63–69.
- [12] Eslami S, Hoekstra P, Minderhoud P S J, et al. Projections of salt intrusion in a mega-delta under climatic and anthropogenic stressors[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 142.
- [13] Mahmuduzzaman M, Ahmed Z U, Nuruzzaman A K M, et al. Causes of salinity intrusion in coastal belt of Bangladesh[J]. *International Journal of Plant Research*, 2014, 4(4A): 8–13.
- [14] Rice K C, Hong Bo, Shen Jian. Assessment of salinity intrusion in the James and Chickahominy Rivers as a result of simulated sea-level rise in Chesapeake Bay, East Coast, USA[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 111: 61–69.
- [15] Vijith V, Sundar D, Shetye S R. Time-dependence of salinity in monsoonal estuaries[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(4): 601–608.
- [16] 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 Xuefeng, Yin Xiaoling. Numerical model for effect of tide strength on estuarine salt intrusion[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32(6): 756–763.
- [17] Wang Jie, Kuang Cuiping, Chen Kuo, et al. Wave–current interaction by Typhoon Fongwong on saline water intrusion and vertical stratification in the Yangtze River Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 279: 108138.
- [18] 鲍道阳, 朱建荣. 近 60 年来长江河口河势变化及其对水动力和盐水入侵的影响 III. 盐水入侵[J]. *海洋学报*, 2017, 39(4): 1–15.
Bao Daoyang, Zhu Jianrong. The effects of river regime changes in the Changjiang River Estuary on hydrodynamics and salinity intrusion in the past 60 years III. Saltwater intrusion[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(4): 1–15.
- [19] Xu Zhi, Ma Jing, Wang Hao, et al. River discharge and saltwater intrusion level study of Yangtze River Estuary, China[J]. *Water*, 2018, 10(6): 683.
- [20] 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 Wei, Zhu Jianrong. Responses of saltwater intrusion in the Changjiang River 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.
- [21] 仇威. UnFECOM 模式在长江河口盐水入侵数值模拟中的应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2023.
Qiu Wei. Application of UnFECOM model in numerical simulation of saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2023.
- [22] 侯 Cheng. 长江潮流界和潮区界以及河口盐水入侵对径流变化响应的数值研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
Hou Chengcheng. Numerical study on the tidal current limit and tidal limit in the Changjiang River and the response of saltwater intrusion in the Changjiang Estuary to the river discharge change[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [23] 朱建荣, 吴辉, 李路, 等. 极端干旱水文年(2006)中长江河口的盐水入侵[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2010(4): 1–6, 25.
Zhu Jianrong, Wu Hui, Li Lu, et al. Saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary in the extremely drought hydrological year 2006[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2010(4): 1–6, 25.
- [24] Dai Zhijun, Chu Ao, Stive M, et al. Unusual salinity conditions in the Yangtze River Estuary in 2006: impacts of an extreme drought or of the Three Gorges Dam?[J]. *Ambio*, 2011, 40(5): 496–505.
- [25] Chen Qing, Zhu Jianrong, Lyu Hanghang, et al. Impacts of topography change on saltwater intrusion over the past decade in the Changjiang River Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 231: 106469.
- [26] 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 River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(10): 10–22.
- [27] 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 Zhi, Dai Huichao, Gao Xichao, 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.
- [28] Kuang Cuiping, Chen Kuo, Wang Jie, et al. Responses of hydrodynamics and saline water intrusion to typhoon Fongwong in the North

- Branch of the Yangtze River Estuary[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(19): 8986.
- [29] 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 Wei, Kuang Cuiping, Gu Jie, 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.
- [30] 王绍祥, 朱建荣. 不同潮型和风况下青草沙水库取水口盐水入侵来源[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015(4): 65–76.
Wang Shaoxiang, Zhu Jianrong. Saltwater intrusion sources at the water intake of Qingcaosha reservoir in different tidal pattern and wind case[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2015(4): 65–76.
- [31] DHI. Mike 21 & Mike 3 flow model FM hydrodynamic and transport module scientific documentation[R]. Denmark: DHI Water & Environment, 2009.
- [32] Murphy A H. Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient[J]. *Monthly Weather Review*, 1988, 116(12): 2417–2424.
- [33] 严鑫, 孙昭华, 谢翠松, 等. 基于经验模型的长江口南支上段压咸临界流量[J]. 地理学报, 2019, 74(5): 935–947.
Yan Xin, Sun Zhaohua, Xie Cuisong, et al. Estimation of critical discharge for saltwater intrusion in the upper south branch of the Yangtze River Estuary using empirical models[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 935–947.
- [34] 周春煦. 长江口盐水入侵特征及规律[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(12): 28–33.
Zhou Chunxu. Characteristic and Law of Saltwater Intrusion in Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(12): 28–33.
- [35] 王雅君. 长江口北槽混合层化特征及其对悬沙输移的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
Wang Yajun. Characteristics of mixing and stratification and its influence on suspended sediment transport in the north passage of the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [36] 熊龙兵, 浦祥, 时钟, 等. 潮汐应变对长江口北槽枯季湍流混合与层化的影响[J]. 海洋工程, 2014, 32(4): 41–57.
Xiong Longbing, Pu Xiang, Shi Zhong, et al. Effect of tidal straining on turbulent mixing and stratification in the dry season within the North Passage of the Changjiang River Estuary[J]. *The Ocean Engineering*, 2014, 32(4): 41–57.
- [37] 沈焕庭, 茅志昌, 顾玉亮. 东线南水北调工程对长江口咸水入侵影响及对策[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(2): 150–154.
Shen Huanting, Mao Zhichang, Gu Yuliang. Impact of south-north water transfer (east route) on saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary with consideration of its countermeasures[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(2): 150–154.
- [38] 顾玉亮, 吴守培, 乐勤. 北支盐水入侵对长江口水源地影响研究[J]. 人民长江, 2003, 34(4): 1–3, 16.
Gu Yuliang, Wu Shoupei, Yue Qin. Impact of intruded saline water via north branch of the Yangtze River on water source areas in the estuary area[J]. *Yangtze River*, 2003, 34(4): 1–3, 16.

Study on the impact of upstream discharge on saltwater intrusion distance in the Changjiang Estuary

Wang Hui^{1,2}, Huang Rui^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Chen Zhong³, Wang Xiaoguang^{1,2}, Li Hao², Zeng Jianfeng³

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China*; 2. *College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China*; 3. *Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China*)

Abstract: Saline water intrusion at the Changjiang (Yangtze) River Estuary severely affects the security of upstream water supply, agricultural irrigation, and ecological environmental health. The distance of saline water intrusion upstream, influenced by the interaction between runoff and tidal forces, has received considerable attention. However, research on the extent of this intrusion under the influence of the runoff-tide interaction remains insufficient. This paper establishes a three-dimensional hydrodynamic and salinity mathematical model of the Changjiang River Estuary using the MIKE 3 hydrodynamic model. The model is validated against field measurements of water levels, flow velocities, flow directions, and salinity from the Changjiang River Estuary in 2016. The validation results show a good agreement between the simulated and measured values, indicating that the three-dimensional hydrodynamic and salinity mathematical model of the Changjiang River Estuary established in this study can effectively simulate the hydrodynamic and salinity characteristics in the vicinity of the estuary. To investigate the impact of upstream runoff on the extent of saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary, this study sets up eight dif-

ferent flow rates ranging from 15 000 m³/s to 50 000 m³/s for the upstream section of the Changjiang River Estuary. The simulations focus on the effects of these varying upstream flow rates on the saltwater intrusion distances in three navigation channels: the South Branch-North Port, the South Branch-South Port-North Channel, and the South Branch-South Port-South Channel. The simulation results indicate that the degree of saltwater intrusion in all three channels is significantly dependent on tidal dynamics. During spring tides, when tidal forces are stronger, both saltwater intrusion from the open sea and saltwater backflow from the North Branch are more pronounced compared to neap tides, resulting in longer saltwater intrusion distances overall during spring tides. When the upstream discharge is low, backflow from the North Branch also contributes to increased saltwater intrusion distances. The vertical distribution of salinity and stratification phenomena in the three channels under different flow conditions were also analyzed, and the relationships between upstream flow rates and the distances of saltwater intrusion in the three channels were established. The findings of this study provide valuable references for research on “salinity control and freshwater supplementation” in the Changjiang River Estuary, as well as studies on material transport.

Key words: Changjiang River Estuary; numerical simulation; saline water intrusion; upstream intrusion distance; runoff