

径流与潮差对钦江河口盐水入侵距离的影响机制

郑华^{1,2}, 刘洁^{1,2*}, 张文武³, 肖毅^{1,2}

(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: 构建三维数学模型, 定量分析不同径流和潮差组合下钦江河口盐水入侵距离。结果表明: 盐水入侵距离随径流的增大而减小, 随潮差的增大而增大; 潮差较小时, 盐水入侵距离与径流之间呈线性关系, 随着潮差增大, 二者之间的非线性关系逐渐增强, 满足幂函数 $y=ax^n$ 关系。基于非线性多元回归, 构建钦江河口盐水入侵距离预测公式。

关键词: 钦江河口; 径流潮差; 数值模拟; 盐水入侵距离

中图分类号: P731.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)01-0056-08

0 引言

盐水入侵是发生在河口地区的普遍现象, 过高的盐度将影响人类生活用水和生物生存。盐水入侵受径流、潮差、地形、风应力等多种因素影响, 其中前两者最为重要。径流决定了盐水入侵的最大距离, 潮汐则是盐水入侵的主要驱动力, 诸多学者对两者进行了研究。罗小峰等^[1]通过分析不同径流和潮位组合下长江口盐度的时空变化规律发现, 随着径流的增加, 盐水入侵距离逐渐减小。王伟^[2]分析了不同流量对长江口盐水入侵的影响, 确定了长江口几个重要水库取水口盐度值为0.5‰时分别对应的临界上游流量, 为长江口水库避咸蓄淡提供参考。赵雪锋等^[3]通过设置一系列稳态数值模型分析不同的径流-潮汐组合对长江口盐水入侵的影响, 研究显示径流对盐水的抬升和入侵起到一定的抑制作用。侯成程等^[4]通过数值试验模拟了枯水期长江口盐水入侵及其对径流变化的响应时间。郑晓琴等^[5]基于大量实测资料, 建立了盐度、径流和潮差的多元回归模型, 实现了对青龙港盐度的预报。刘杰斌等^[6]利用站点数据插值法开展研究, 发现在盐

水入侵过程中潮汐占主导因素, 即小潮期间盐水入侵、大潮期间盐水向下游推移, 他还进一步对比分析了不同年份下不同潮位对磨刀门盐水入侵的影响^[7]。

钦江河口连接着钦江与钦州湾, 是我国南部重要的出海口, 在平陆运河建设完成后, 其将成为西南地区最主要的出海道路, 区位优势更加显著, 将极大促进周边城市发展。钦江河口盐水入侵活动剧烈, 但当前对钦江河口和钦州湾的研究大多关注水域污染^[8-11]与水动力特征^[12-13]等方面, 缺少关于径流与潮差对盐水入侵距离影响机制的探讨。为此, 本文通过设置不同的径流和潮差组合, 定量分析两个因素对盐水入侵距离的影响, 并通过回归分析, 提出钦江河口盐水入侵距离的预测公式, 为当地水资源调度与管理等提供支撑。

1 盐水入侵距离公式

盐水入侵受径流、潮汐、地形地势、风应力、科氏力等多种因素共同作用。盐水入侵距离公式为^[14]:

收稿日期: 2024-01-02。

基金项目: 国家重点研发计划(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, 主要从事水力学与河流动力学研究工作。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

$$\frac{L}{a} = \ln \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (1)$$

式中: L 是盐水入侵距离; a 是截面收敛长度; β 是反映河流流量、潮汐和河口形状影响的无量纲数。

PARSA等^[14]还通过量纲分析确定了盐水入侵距离公式中的无量纲参数,得出盐水入侵长度的函数关系。在盐水入侵的极限下,盐水入侵距离公式为:

$$\frac{L}{a} = f \left(\frac{L_R}{a}, \frac{h_0}{a}, \frac{g}{C^2}, \frac{H_0}{h_0}, \frac{q_r}{h_0 \sqrt{gh_0}}, \frac{\Delta \rho_0}{\rho} \right) \quad (2)$$

式中: L_R 为谐振长度($L_R = T \sqrt{gh_0}/4$),对于本研究, h_0 为钦州海洋站水深, g 为重力加速度; C 为谢才系数; H_0 为钦州海洋站潮差; q_r 为径流量; $\Delta \rho_0$ 为钦州海洋站盐水与青年枢纽淡水的密度差; ρ 为盐水密度。方程左侧 L/a 为盐水相对入侵距离,方程右侧的无量纲参数分别为:共振数(L_R/a)、河口形状数(h_0/a)、粗糙度数(g/C^2)、相对潮差数(H_0/h_0)、径流弗劳德数($F_r = q_r/h_0 \sqrt{gh_0}$)、密度数($\Delta \rho_0/\rho$)。

本文不考虑潮周期变化,谐振长度 L_R 与水深 h_0 正相关,因此可将两变量合并为非关键因素。河口的谢才系数 C 一般变化范围不大,且与盐水入侵距离的关联性较弱,也不是关键因素。在不考虑温度影响的情况下,密度与盐度的经验关系为 $\rho = \rho_0 + 0.75S$ (其中 ρ 为盐水密度, ρ_0 为淡水密度, S 为盐度),由于钦州海洋站的盐度变化范围为24‰~

28‰,密度差 $\Delta \rho$ 的变化幅度不大,因此可将其归为非关键因素。盐水入侵距离主要受径流和潮差两个因子的影响,公式可简化为:

$$\frac{L}{a} = f \left(\frac{H_0}{h_0}, \frac{q_r}{h \sqrt{gh}} \right) \quad (3)$$

式中:截面收敛长度 a 用河口沙井处—青年枢纽(见图1)的距离 L_0 表示, $L_0=23.76$ km。

2 数学模型与计算工况设置

2.1 模型建立

本文基于Mike3 FM模块建立三维模型,计算区域为钦江—茅尾海—钦州湾外海,模型南北向长度约为48.8 km,面积约为320 km²,采用非结构三角形网格,钦江河道区域的网格大小为20 m,钦州湾海域为200 m,河口区域网格采取渐变方式进行过渡,垂向坐标划分为5层,陆地边界采用干湿边界辨别法。图1为研究区域与模型计算网格图,以及本研究中涉及的4个测点H2、H3、D4、D6。模型上游入口由实测流量条件控制,下游边界为实测潮位,盐度边界为实测数据。

2.2 模型验证

利用该模型模拟洪水期钦江河口盐水上溯过程,采用实测钦州湾水文资料进行模型验证,测量

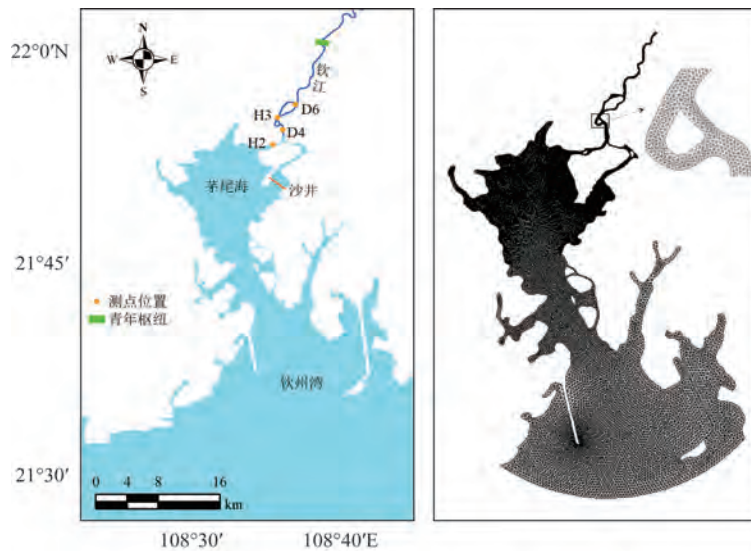


图1 研究区域(a)与模型计算网格(b)

Fig.1 Study area (a) and model grid map (b)

时间为2021年8月20日—9月13日,验证点位见图1a,测站的潮位模拟结果与实测值基本相符(见图2),绝对误差值均在0.1 m以内,不同测点盐度模拟结果与实测值的变化趋势基本一致(见图3),模型验证结果良好。

2.3 工况设置

为节约计算时间,利用实测海区的盐度数据通过线性插值得到模型初始盐度场。模型采用“冷启动”模式,即提前15天开始模拟。径流条件采用青年水闸净下泄流量数据,即上游来流-(灌溉+生活取水量),设计径流保证率分别为10%、20%、30%、40%、50%、60%、75%、80%、90%、97%,分10组工况进行模拟,具体工况见表1。

潮差反应了潮汐力的大小,为使潮差具有一定代表性,根据2014—2018年钦州海洋站的潮位资料,选取极端最大潮差潮汛(15 d)作为模型边界潮位条件(见图4),潮汛包含8个潮差,分别为0.91 m、1.52 m、2.32 m、3.03 m、3.70 m、4.29 m、4.39 m、4.93 m,具体工况见表2。

3 径流与潮汐对钦江河口盐水入侵距离的影响

盐水入侵距离统计基于三维数学模型底层盐度数据,以盐度0.5‰的位置作为盐水入侵距离统计标准。对模拟结果采用无量纲参数进行分析,径流 q_r 对应径流弗劳德数 F_r ,潮差 H_0 对应相对潮差

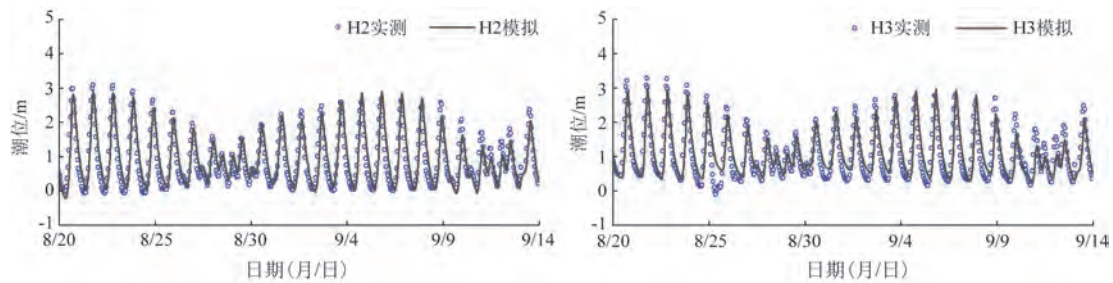


图2 潮位验证

Fig.2 Tide level verification chart

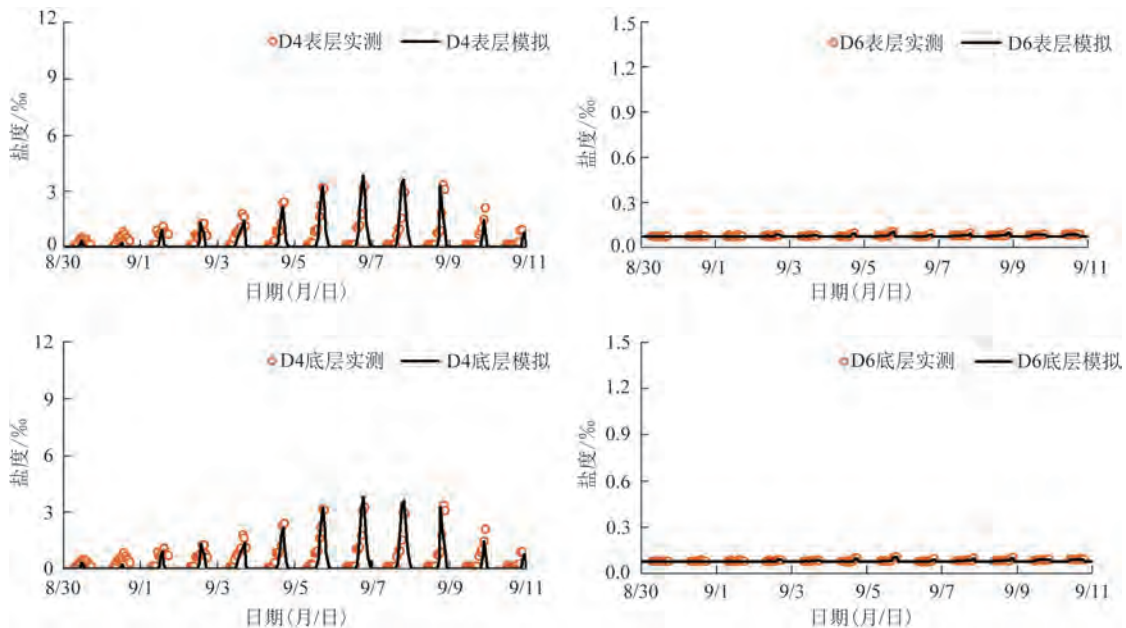


图3 盐度验证

Fig.3 Salinity verification chart

表1 径流设置方案

Tab.1 Runoff design options

方案编号	保证率/%	青年水闸流量 $q_r/(m^3/s)$	径流弗劳德数 F_r	钦州海洋站潮差 H_0/m	盐度场	边界盐度/‰
1	10	104	0.0093	实测潮差	初始盐度	27.43
2	20	60.7	0.0054	实测潮差	初始盐度	27.43
3	30	42.2	0.0038	实测潮差	初始盐度	27.43
4	40	30.7	0.0027	实测潮差	初始盐度	27.43
5	50	23.4	0.0021	实测潮差	初始盐度	27.43
6	60	18.2	0.0016	实测潮差	初始盐度	27.43
7	75	13.3	0.0012	实测潮差	初始盐度	27.43
8	80	11.9	0.0011	实测潮差	初始盐度	27.43
9	90	7.95	0.0007	实测潮差	初始盐度	27.43
10	97	3.24	0.0003	实测潮差	初始盐度	27.43

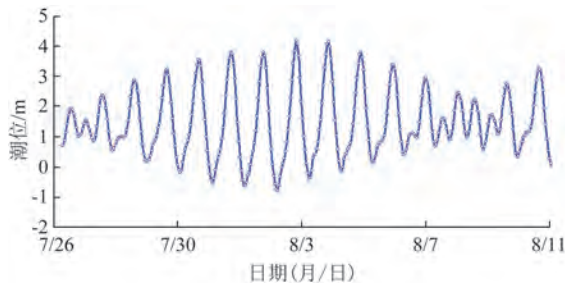


图4 潮位过程线

Fig.4 Tidal range line

H_0/h_0 , 盐水入侵距离 L 对应相对入侵距离 $\exp(L/L_0) - 1$, 拟合效果用决定系数 (Coefficient of Determination, R^2) 来评价, R^2 越接近 1 说明实际观测点离样本线越近, 拟合优度越高。

3.1 径流对盐水入侵距离的影响

图5为不同潮差范围下径流弗劳德数 F_r 与相对

盐水入侵距离 $\exp(L/L_0) - 1$ 的关系图, 随着弗劳德数的增大, 相对入侵距离逐渐减小, 当 F_r 超过 0.003 8 (流量超过 $42.2 m^3/s$), 径流的抑制效果明显减弱。采用线性拟合与非线性拟合两种方法对结果进行分析。小潮差 (0.91~3.70 m) 时潮动力较弱, 盐水入侵距离主要由径流控制, 线性拟合的效果更好, 当潮差为 2.32 m 时, 相对入侵距离与径流弗劳德数满足 $\exp(L/L_0) - 1 = -45.19F_r + 0.79$, 决定系数 $R^2 = 0.97$, 非线性拟合满足 $\exp(L/L_0) - 1 = 0.34F_r^{-0.11}$, 决定系数 $R^2 = 0.89$ (见图 5c)。大潮差 (4.29~4.93 m) 时, 潮动力增强, 盐水可上溯到河道内部并与上游淡水发生剧烈交换, 此时盐水入侵距离受多因素共同影响, 非线性拟合效果更好, 相对入侵距离与径流弗劳德数拟合曲线满足幂函数 $y = ax^n$ 关系, 表达式中指数系数值 n 随着潮差的增大而减小。当潮差为 4.93 m 时, 满足 $\exp(L/L_0) - 1 = 0.28F_r^{-0.19}$, 决定系数 $R^2 = 0.97$,

表2 潮差设置方案

Tab.2 Tidal range design options

方案编号	流量 $Q/(m^3/s)$	实测潮差 H_0/m	钦州海洋站水深 h_0/m	相对潮差 H_0/h_0	盐度场	边界盐度/‰
1	青年水闸	0.91	6.31	0.14	初始盐度	27.43
2	青年水闸	1.52	6.76	0.22	初始盐度	27.43
3	青年水闸	2.32	7.30	0.32	初始盐度	27.43
4	青年水闸	3.03	7.65	0.40	初始盐度	27.43
5	青年水闸	3.70	7.97	0.46	初始盐度	27.43
6	青年水闸	4.29	8.20	0.52	初始盐度	27.43
7	青年水闸	4.39	8.21	0.53	初始盐度	27.43
8	青年水闸	4.93	8.49	0.58	初始盐度	27.43

线性拟合满足 $\exp(L/L_0)-1=-74.2F_r+1.08$, 决定系数 $R^2=0.86$ (见图 5h)。

3.2 潮差对盐水入侵距离的影响

图 6 为不同径流条件下相对潮差 H_0/h_0 与相对

盐水入侵距离 $\exp(L/L_0)-1$ 的关系图。相对入侵距离与相对潮差呈正相关关系, 相较于径流, 潮差对盐水入侵距离产生的影响更小, 线性拟合与非线性拟合都有很好的效果, 二者决定系数 R^2 的差值小于 0.05。在大流量 (42.2~104 m³/s) 条件下, 上游淡水可以对

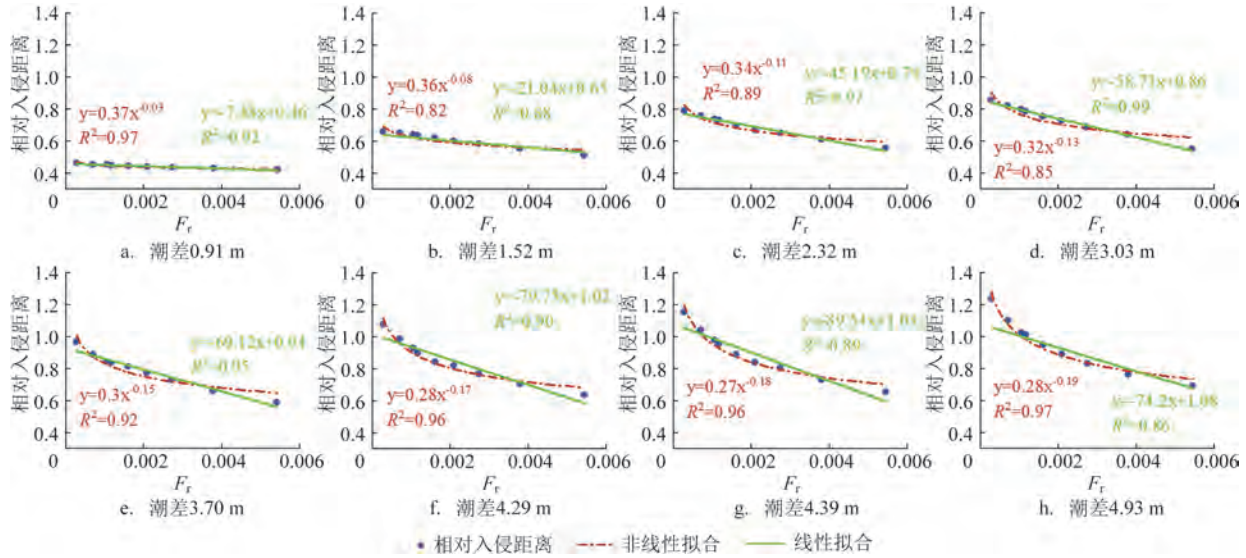


图 5 相对入侵距离与径流弗劳德数拟合关系图

Fig.5 Relative invasion distance plotted against runoff Froude number fit

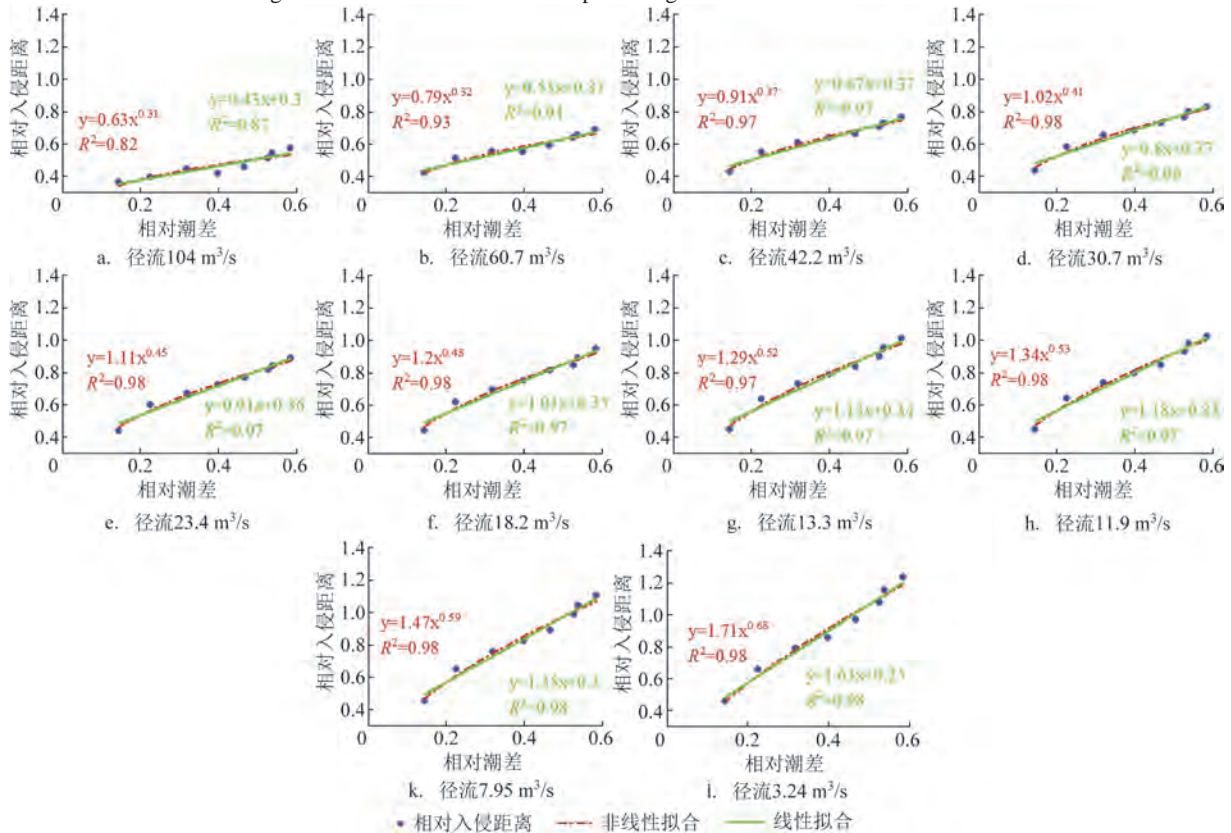


图 6 相对入侵距离与相对潮差拟合关系图

Fig.6 Plot of relative intrusion distance fitted to relative tidal range

盐水起到很好的顶冲作用,盐水入侵距离主要受径流控制,在流量日保证率为10%(104 m³/s)的条件下,线性拟合后满足 $\exp(L/L_0)-1=0.43(H_0/h_0)+0.3$,决定系数 $R^2=0.87$,非线性拟合满足 $\exp(L/L_0)-1=0.63(H_0/h_0)^{0.31}$,决定系数 $R^2=0.82$ (见图6a),线性拟合效果更好。当上游径流较小(3.24~30.7 m³/s)时,入侵距离对潮差的响应变强,在流量日保证率为97%(3.24 m³/s)的条件下,满足幂函数 $\exp(L/L_0)-1=1.71(H_0/h_0)^{0.68}$,决定系数 $R^2=0.98$,线性拟合后满足 $\exp(L/L_0)-1=1.63(H_0/h_0)+0.25$,决定系数 $R^2=0.98$ (见图6l)。

3.3 钦江河口盐水入侵距离预测公式

同时采用线性与非线性拟合对模型结果进行分析,误差统计见表3。在小潮差(0.91~3.70 m)和大流量(42.2~104 m³/s)条件下,潮动力较弱,盐水入侵距离主要由径流控制,线性拟合效果更好;在大潮差(4.29~4.93 m)和小流量(3.24~30.7 m³/s)条件下,潮动力增强,盐水可上溯到河道内部并与上游淡水发生剧烈交换,此时盐水入侵距离受多因素共同影响,非线性拟合效果更好。考虑到盐水入侵是由潮汐携带高盐度海水进入河口引起的自然现象,大潮时盐水入侵现象更加明显,影响更加显著,大流量条件并不常见,所以本文最终运用大潮差和小流量时拟合效果更好的非线性拟合对结果进行分析。

盐水入侵是多因素共同作用的结果,入侵距离

表3 线性拟合与非线性拟合误差统计

Tab.3 Error statistics for linear and nonlinear fitting

潮差/m	R^2		径流/ (m ³ /s)	R^2	
	线性 拟合	非线性 拟合		线性 拟合	非线性 拟合
0.91	0.92	0.97	104	0.87	0.82
1.52	0.88	0.82	60.7	0.94	0.93
2.32	0.97	0.89	42.2	0.97	0.97
3.03	0.99	0.85	30.7	0.96	0.98
3.7	0.95	0.92	23.4	0.97	0.98
4.29	0.90	0.96	18.2	0.97	0.98
4.39	0.89	0.96	13.3	0.97	0.97
4.93	0.86	0.97	11.9	0.97	0.98
			7.95	0.98	0.98
			3.24	0.98	0.98

受多个参数控制,为便于对入侵距离进行预测,在此主要基于径流与潮差两个因素提出经验公式。绘制径流弗劳德数 F_r 、相对潮差 H_0/h_0 与相对入侵距离 $\exp(L/L_0)-1$ 的关系图(见图7)。盐水入侵距离变化与上游径流变化成反比,与潮差变化成正比,即径流抑制盐水入侵,潮汐促进盐水入侵。通过非线性多元回归分析,联合考虑径流弗劳德数 F_r 、相对潮差 H_0/h_0 可以得出:

$$\frac{L}{23.76} = \ln \left(1 + 0.393 \left(\frac{H_0}{h_0} \right)^{0.498} F_r^{-0.169} \right) \quad (4)$$

采用相关性分析得出决定系数 R^2 达到0.76,验证效果良好(见图8),该公式适用于径流在3.24~

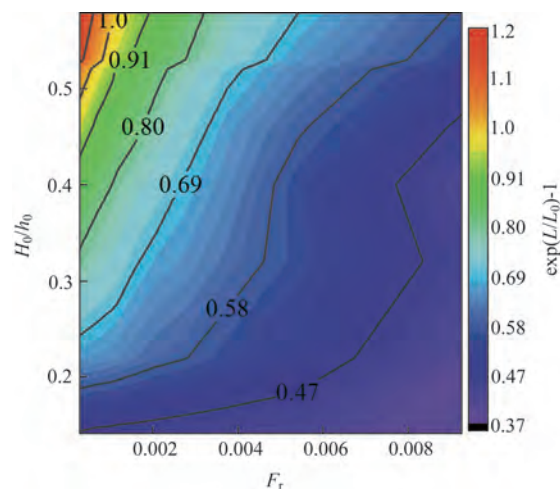


图7 相对潮差、径流弗劳德数与相对入侵距离关系曲面图

Fig.7 Surface plot of relative tidal range, runoff Froude number versus relative invasion distance

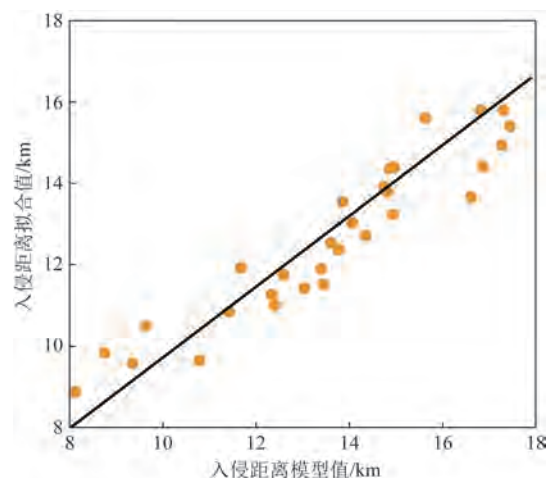


图8 盐水上溯距离公式验证

Fig.8 Validation of the salt water upstream distance formula

104 m³/s, 潮差在 0.91~4.93 m 范围内的盐水入侵距离预测。

4 结论

径流和潮差是影响钦江河口盐水入侵的两大重要因素, 通过设置不同工况, 探究两者对钦江盐水入侵距离的影响机制。主要结论如下:

①盐水入侵距离与径流成反比, 与潮差成正比, 径流影响更大。在大流量、小潮差条件下, 盐水入侵距离主要受径流控制, 线性拟合的效果更好; 在小流量、大潮差条件下, 盐水入侵距离受径流、潮差共同控制, 非线性拟合效果更好, 径流、潮差与盐水入侵距离之间满足幂函数 $y=ax^n$ 关系。

②通过非线性多元回归分析, 联合考虑相对潮差 H_0/h_0 、径流弗劳德数 F_r 得出钦江河口盐水入侵距离预测公式, 验证结果良好, 该公式可用于径流在 3.24~104 m³/s, 潮差在 0.91~4.93 m 范围内的盐水入侵距离预测。

参考文献:

- [1] 罗小峰, 陈志昌. 径流和潮汐对长江口盐水入侵影响数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2005, 24(3): 1-6.
LUO X F, CHEN Z C. Numerical simulation study of effect of runoff and tide on the Changjiang River mouth saltwater intrusion[J]. Coastal Engineering, 2005, 24(3): 1-6.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 侯成程, 朱建荣. 长江河口盐水入侵对大通枯季径流量变化的响应时间[J]. 海洋学报, 2013, 35(4): 29-35.
HOU C C, ZHU J R. The response time of saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary to the change of river discharge in dry season[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(4): 29-35.
- [5] 郑晓琴, 肖文军, 于芸, 等. 基于径流和潮汐的长江口盐水入侵统计预测研究[J]. 海洋预报, 2014, 31(4): 18-23.
ZHENG X Q, XIAO W J, YU Y, et al. Statistical prediction study of runoff and tide on Changjiang River saltwater intrusion[J]. Marine Forecasts, 2014, 31(4): 18-23.
- [6] 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.
- [7] 刘杰斌, 包芸, 黄宇铭. 丰、枯水年磨刀门水道盐水上溯运动规律对比[J]. 力学学报, 2010, 42(6): 1098-1103.
LIU J B, BAO Y, HUANG Y M. Contrast of movement law of saline intrusion in Modaomen waterway in the wet year and the dry year[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(6): 1098-1103.
- [8] 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. Impacts of mariculture pollution in Maowei Sea, Qinzhou Bay, Guangxi and countermeasures against it[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2022, 42(11): 57-60.
- [9] 阎琨, 庞国涛, 邢新丽, 等. 广西钦州湾表层沉积物中重金属的分布、来源及污染评价[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(2): 237-245.
YAN K, PANG G T, XING X L, et al. Distribution, source and pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Qinzhou bay, Guangxi[J]. Marine Environmental Science, 2023, 42(2): 237-245.
- [10] 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 Science, 2023, 30(2): 291-298.
- [11] 钟木凤, 冯国禄, 杨斌. 钦州湾三墩采砂区水质时空变化特征及污染评价[J]. 北部湾大学学报, 2023, 38(4): 1-6.
ZHONG M F, FENG G L, YANG B. Spatial and temporal variation of water quality and pollution assessment in Sandun Sand-mining Area of Qinzhou Bay[J]. Journal of Beibu Gulf University, 2023, 38(4): 1-6.
- [12] 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.
- [13] 李少朗, 崔力维, 马欣. 基于实测资料的钦州湾外海海域潮流特征分析[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(6): 33-40.
LI S L, CUI L W, MA X. Characterization of the tidal current off Qinzhou Bay based on observation data[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(6): 33-40.
- [14] PARS A J, ETAMAD-SHAHIDI A. An empirical model for salinity intrusion in alluvial estuaries[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(10): 1619-1628.

Mechanisms of the runoff and tidal impacting on the distance of saltwater intrusion in the Qinjiang River Estuary

ZHENG Hua^{1,2}, LIU Jie^{1,2*}, ZHANG Wenwu³, XIAO Yi^{1,2}

(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: In this paper, a three-dimensional mathematical model was constructed to quantitatively analyze the saltwater intrusion distance in the Qinjiang River Estuary under different combinations of runoff and tidal range. The results show that the change in saltwater intrusion distance was inversely proportional to the change in river runoff and positively proportional to the change in tidal range. Specifically, under conditions of minimal tidal range, a linear correlation is observed between the saltwater intrusion distance and river discharge. Conversely, as the tidal range intensifies, the relationship becomes increasingly nonlinear, conforming to a power function ($y = ax^n$). Furthermore, this investigation has yielded a predictive equation for saltwater intrusion distance, derived from nonlinear multiple regression analysis, which has been substantiated through rigorous validation. This formula is poised to aid in the optimization of local water resource allocation and management strategies.

Key words: Qinjiang River Estuary; runoff and tidal range; numerical simulation; saltwater intrusion distance