

感潮河段枯水期盐度模型构建与咸潮上溯影响研究

黄雅丽¹, 盛 晟¹, 胡朝阳^{2,3}, 刘 阳¹, 葛建忠⁴, 姚佳玲⁴, 付开雄²,
林 斌², 刘炳义¹, 陈 华¹

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 福建省水利水电勘测设计研究院有限公司, 福建 福州 350001; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

4. 河口海岸学国家重点实验室(华东师范大学), 上海 200241)

摘要:基于有限体积方法,结合实测咸水数据及气候模式数据,构建了感潮河段枯水期水动力-盐度模型,并以受咸潮影响严重的闽江水口水库坝下至河口的感潮河段为例,探究了枯水期气候态条件下咸潮上溯特征及规律。结果表明:在枯水期,闽江感潮河段平均流量最小,气候态风场正值东北风向,综合作用下最易发生咸潮上溯;枯水期气候态大潮期间,河口水体混合强烈,闽江南港较北港上溯更强烈,上溯最严重时已危及城门水厂;枯水期气候态小潮期间,咸潮上溯程度整体强于大潮,南港的咸潮上溯界远于北港,落憩时水体分层明显,其余时刻水体混合强烈,上溯严重时马尾、炎山、城门水厂均于取用水高峰时段遭受影响。

关键词:感潮河段;枯水期;咸潮上溯;用水安全;水动力-盐度模型;气候态;闽江

中图分类号:P731. 12 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)01 - 0150 - 10

Construction of salinity model for tidal reaches during dry seasons and study on influence of saltwater intrusion //
HUANG Yali¹, SHENG Sheng¹, HU Zhaoyang^{2,3}, LIU Yang¹, GE Jianzhong⁴, YAO Jialing⁴, FU Kaixiong², LIN Bin²,
LIU Bingyi¹, CHEN Hua¹ (1. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China*; 2. *Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower Co., Ltd., Fuzhou 350001, China*; 3. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 4. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research (East China Normal University), Shanghai 200241, China*)

Abstract: Based on the finite volume method, combined with measured saltwater data and climate model data, a hydrodynamic-salinity model for the dry season of tidal reaches was constructed. Taking the tidal reaches from the dam of the Minjiang Shuikou Reservoir to the estuary, which is severely affected by saltwater, as an example, the upstream characteristics and laws of saltwater intrusion under dry season climate conditions were explored. The results show that during the dry season, the average flow rate of the tidal reaches of the Minjiang River is the smallest, and the climate wind field is in the northeast direction. Under the comprehensive effect, it is most prone to the occurrence of saltwater intrusion. During the dry season climatological spring tide, the mixing of estuary water is strong, and the saltwater intrusion of the South Channel is more intense than the North Channel, which has endangered the Chengmen Waterworks when the saltwater intrusion is the most serious. In the dry season climatological neap tide, the degree of saltwater intrusion is stronger than that of the spring tide, and the South Channel intrusion is much farther than the North Channel. The water stratification is obvious in the tidal fall and the water mixing strongly at the rest of the time. When the saltwater intrusion is severe, the Mawei, Yanshan and Chengmen waterworks are affected during the peak period of water intake.

Key words: tidal reaches; dry season; saltwater intrusion; water security; hydrodynamic-salinity model; climatology; the Min River

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3209101)
作者简介:黄雅丽(1995—),女,博士研究生,主要从事海洋水文学研究。E-mail:ylhuang1995@whu.edu.cn
通信作者:陈华(1977—),男,教授,博士,主要从事智慧水利、流域智能监测与模拟研究。E-mail:chua@whu.edu.cn

海洋高盐水团在潮汐涨潮流作用下逆流入侵河口并向上游推进、扩散,使河口及其上游地区水体盐度增加的现象被称为咸潮上溯,受涨潮波影响的河道范围即为感潮河段。咸潮上溯多发生于枯水季节、干旱期,对河口淡水资源取用、河流生态系统稳定和作物生产安全造成不利影响。尤其是近几十年来,受到人类活动和气候变化的广泛影响,全球感潮河段的咸潮上溯普遍加剧,如湄公河三角洲^[1]、珠江河口^[2]、长江河口^[3]、哈德逊河口^[4]等,导致当地淡水资源供应持续短缺,严重威胁到粮食灌溉与作物安全。

对感潮河段咸潮上溯的研究,以往多基于实测资料的数理统计方法,以获得上溯影响范围、水体混合特征与盐度分布^[5-7]。部分研究采用物理模型试验方法探究潮汐、人为措施、水体分层等因素对咸潮上溯的影响,阐述咸潮上溯与不同因素的相关性^[8-10]。随着计算机技术的发展,数值模拟方法得以广泛应用,其能够揭示模型试验与实地观测难以捕捉的水动力演变过程,进一步揭示河口咸潮上溯规律及其水动力学机制^[11-12]。我国感潮河段咸潮上溯的研究绝大部分集中于长江^[13-14]与珠江^[15],采用模型试验^[16]、资料统计^[17-18]、数值模拟^[19-21]方法揭示河口咸潮上溯规律及其水动力学机制。其中,基于数值模拟的研究发展最为迅速,例如:Wang等^[22-23]构建了感潮河段二维或三维斜压数值模型,进一步解析感潮河段盐度时空分布受径流、风场、降雨等不同影响因素的敏感性;Zhou等^[24-25]采用数值模型与动量、通量分析相结合的方法探究水体分层或水体混合程度成因及其物质输运;栾华龙等^[26-29]模拟了感潮河段地形变化及人为工程措施带来的边界条件演变对咸潮上溯的影响,并提出了应对管理措施。基于数值模型阐明不同感潮河段咸潮上溯的水动力学理论,已成为准确把握河口咸潮上溯机理、预报咸潮上溯灾害、制定压咸措施的可靠依据,为我国咸潮上溯理论与治理实践研究填补了空白。但现有针对感潮河段咸潮上溯的研究,多聚焦于单一极端事件、工程事件或地区季节性分布特征的资料统计分析及模拟后报分析,尚无研究针对枯水期常态性咸潮入侵产生的危害。

闽江地处我国东南沿海,咸潮入侵正日益加剧,对枯水期生产生活造成了严重的日常性危害。因此,本文将闽江感潮河段作为研究对象,基于感潮河段实测资料,融合潮汐、气象等模式数据,构建感潮河段三维水动力-盐度模型,探究感潮河段枯水期气候态咸潮上溯分布特征及规律,以期有感潮河段城市枯水期日常性取水安全提供科学与技术支撑。

1 研究区概况

闽江全长 541 km,流域面积 60 992 km²,水量丰富、径流量变率大且具有非常显著的年际变化,是我国重要的独流入海水系之一。其下游段起始于水口大坝,终止于入海口,是福州市的重要水源地,生活与工业年取水量占全流域总取水量的 90%。干流下游被南台岛分为南北两港,北港穿过福州市中心,河道窄深;南港具有多处滩槽、沙洲,中部有大樟溪支流汇入;南北港随后于罗星塔汇合,又在入海口附近被琅岐岛分为南北两支分别入海。南北两港设有义序、城门、马尾、炎山 4 个主要水厂水源地,为当地生产、生活取水提供不可或缺的保障。然而自 20 世纪 90 年代以来,因中上游水库建成运行和下游地区经济社会快速发展,河道水沙条件及河势变化剧烈。水口水库下泄冲刷了下游河床,加之河道两岸无序采砂、吹沙造地,导致下游主河床最大下切高达 30 m,河道洲滩大幅度萎缩,径潮动力状态发生改变,使闽江感潮河段从河口向上扩大至水口大坝以下,咸潮上溯进一步加剧。当地水厂采用氯离子浓度阈值 250 mg/L(盐度约为 0.45PSU)作为安全用水控制线,然而监测资料显示,自 2003 年以来,位于感潮河段的马尾、城门等水厂于枯水期监测到多次氯离子浓度超标情况,且超标频次和程度均有加剧趋势。如福州城门水厂于 2003 年枯水期监测到氯离子浓度达 296.5 mg/L,而 2009 年监测值已高达 443 mg/L;2007—2017 年北港鳌峰洲共受到了 3 次咸潮影响^[30-31]。

2 感潮河段水动力-盐度模型构建

采用基于有限体积算法的三维海洋数值模式(finite-volume community ocean mode, FVCOM)构建感潮河段水动力-盐度模型。该开源数值模式首先由 Chen 等^[32]提出,具有模拟河流下泄、陆地干湿交替、近海潮汐往复流以及水体物质迁移等功能,经后续学者完善与验证后,已被成功应用于切萨皮克湾^[33]、达尔文港^[34]、珠江^[35]、长江^[36]等多个河口、海岸与大陆架交界面,对于复杂岸线与地形结构显示出极好的模拟效果。

2.1 模型控制方程

模型构建过程中, FVCOM 以不可压缩流体连续性方程、动量方程为水动力模型基础^[21]。此外, FVCOM 利用温度方程(式(1))、盐度方程(式(2))描述温度、盐度的运移扩散;计算中采用混合密度,即密度表示为温度、盐度和压力的函数,其中压力为总压力,是静水压力、海表面气压与非静水压力之和。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T \quad (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (2)$$

式中: t 为时间; x, y, z 为笛卡尔坐标系的正东、正北及垂直方向; u, v, w 分别为 x, y, z 方向上的速度分量; T 为温度; S 为盐度; K_h 为垂向热涡流动扩散系数; F_T 和 F_S 分别为热量和盐度水平方向扩散项。

FVCOM 通过计算不重叠的水平三角控制体之间的通量,以积分形式求解控制方程,这种方法结合了有限元方法的几何柔度及有限差分方法的简单离散结构和计算效率,可以更好地描述沿海和河口地区的质量、动量、盐度和热量守恒。加上灵活的网格拓扑结构和代码简单性,使得 FVCOM 非常适合沿海区域的盐度计算。

2.2 模型构建

水动力-盐度模型的构建范围为闽江干流水口水库大坝下游至出海口,并包含向外海延伸至离岸线约 100 km 的区域,整个模型计算范围为 24.8°N ~ 27.0°N、118.6°E ~ 120.8°E,计算核心区域为闽江河口及闽江下游的水厂水源地,如图 1 所示。

模型分辨率采取逐次加密模式,建模初期采用 300 m 分辨率进行调试,初步调试合理后加密至 100 m 分辨率进行细节调整,之后再依据需要对个别关键位置及断面加密至 20~50 m。不同网格的分辨率设置见表 1。

模型设置了闽江干流、大樟溪支流作为两处上游边界的输入,干流流量采用水口站实测流量,大樟溪流量采用永泰站实测流量。水深、地形数据采用当地实测水下高程数据与数字化海图资料互补结合的方法得到。东部开边界设置在外海,为辐射开边

表 1 不同网格的分辨率设置

Table 1 Resolution settings of different grids

网格类型	河道 分辨率/m	开边界 分辨率/km	节点 数量	网格 数量	计算时间 步长/s
细网格	约 100	约 3	79 994	152 383	0.1
粗网格	约 300	约 5	20 087	36 313	0.4

界,采用 TPXO 数据集结合东中国海大区域模型插值给出开边界的分潮调和常数(振幅和迟角)。模型所使用的历史风场数据由欧洲中期天气预报中心(<http://apps.ecmwf.int/>)提供,时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 0.25°×0.25°,能够满足模型计算需求。因水位、流速响应较快,模式采用冷启动方式,流速和水位初始场设为 0,温度、盐度初始场取自《渤海、黄海、东海海洋图集》月平均的数字化资料。模型采用垂向 σ 坐标,分为 10 层,使计算能较好适应水下地形变化;水平扩散系数设为 0.1;水平向及垂向普朗特数参考 Chen 等^[31]的研究,分别设为 1.0、0.1。

3 水动力-盐度模型率定与验证

3.1 模型率定

模型率定采用研究区内的主导分潮 M_2 ^[37]调和常数场,将潮汐振幅、迟角的模拟值与实测值对比,其调和分析结果见表 2。当主要站点的振幅误差不超过 10%、迟角误差不超过 10°时,可认为率定结果能够满足要求。研究区主要站点为闽江下游河道及河口附近站点,由表 2 可见,文山里、竹岐、马尾、琯头、川石等主要站点率定均可满足误差限要求。

3.2 潮位验证

使用闽江下游潮位站 2019—2020 年枯水期的潮位数据进行验证,站点分布见图 1。受实测资料限制,各站点潮位数据验证时间存在差异:W208 站的验证时间为 2020 年 5 月 21 日至 6 月 20 日;竹岐站的验证时间为 2020 年 11 月 2 日至 12 月 2 日;马

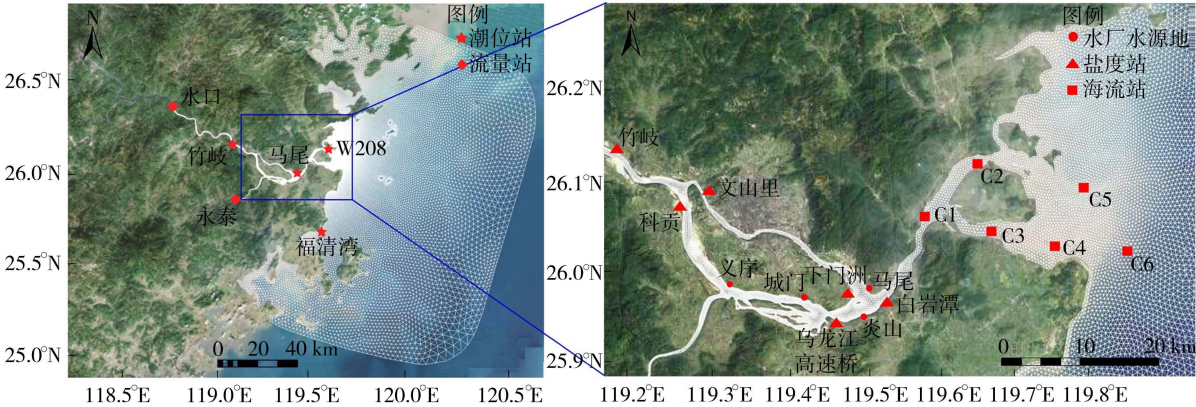


图 1 闽江感潮河段模型构建范围

Fig. 1 Model construction range of tidal reach of the Min River

表 2 M₂ 分潮调和和分析结果

Table 2 Results of harmonic analysis of M₂ tide

潮位站	经度/(°)	纬度/(°)	模拟值		观测值		误差	
			振幅/m	迟角/(°)	振幅/m	迟角/(°)	振幅/%	迟角/(°)
文山里	119.240	26.098	1.34	23.91	1.23	17	8.94	6.91
竹岐	119.098	26.151	0.90	52.65	1.00	50	-10.00	2.65
帮门	119.583	26.750	2.79	310.96	2.67	313	4.49	-2.04
川石	119.667	26.133	2.09	305.43	2.02	307	3.47	-1.57
福清湾	119.583	25.683	2.27	311.04	2.22	307	2.25	4.04
琯头	119.567	26.133	1.85	321.11	1.99	318	-7.04	3.11
黄岐	119.883	26.333	2.12	296.64	2.10	298	0.95	-1.36
郎官	119.300	25.567	2.68	335.11	2.42	330	10.74	5.11
罗源迹头	119.683	26.467	2.50	308.52	2.29	298	9.17	10.52
马尾	119.467	25.967	1.76	343.01	1.72	344	2.33	-0.99
平潭	119.833	25.467	2.01	309.43	2.07	310	-2.90	-0.57
三江口	119.117	25.417	2.67	335.17	2.46	335	8.54	0.17
竹屿	119.733	25.517	2.25	312.68	2.19	315	2.74	-2.32

尾站和福清湾站的验证时间均为 2020 年 12 月 2 日至 2021 年 1 月 1 日。采用均方根误差 RMSE 作为潮位验证误差指标,结果如图 2 所示。

3.3 盐度验证

利用 6 个盐度站(图 1)于一个大潮期间(2019 年 9 月 1 日)和一个小潮期间(2019 年 9 月 8 日)的监测数据进行盐度验证。选取的观测资料时间覆盖大、小潮期间,具有一定的典型性;选取的观测断面覆盖河道分岔口、南北港、汇流口,具有一定的代表性。盐度验证结果如图 3 所示,可见盐度过程线基本符合盐度的变化趋势, RMSE 值较小,拟合效果良好。

3.4 层化验证

利用下游河段各海流站的盐度、流速、流向在不同深度的观测数据与模型模拟值进行层化验证,以证明其垂向分层的有效性。层化验证所用海流站见图 1,站点涵盖口门处琅岐岛附近及其外海,验证时

间覆盖一个大潮期间及一个小潮期间。因篇幅限制,以 C2 站点为例展示层化验证结果,如图 4 所示。由验证结果可知,不论大潮期间或小潮期间,表、中、底层的盐度均符合良好。

4 闽江感潮河段枯水期气候态咸潮上溯分析

气候态指一个区域在长时间尺度上的气候特征,代表区域气候的多年平均状况,对了解区域的气候性变化趋势、制定应对策略具有重要意义。利用构建的闽江感潮河段水动力-盐度模型研究闽江河口枯水期气候态咸潮上溯情况,以充分了解闽江河口枯水期咸潮界及其趋势变化。

4.1 枯水期气候态

利用水口站、永泰站两个流量站反映闽江干流与大樟溪的流量情况,选取 2017—2021 年两站的流量监测数据进行研究。枯水期为 10 月至次年 3 月,将水口站、永泰站多年枯水期流量作平均得到两站

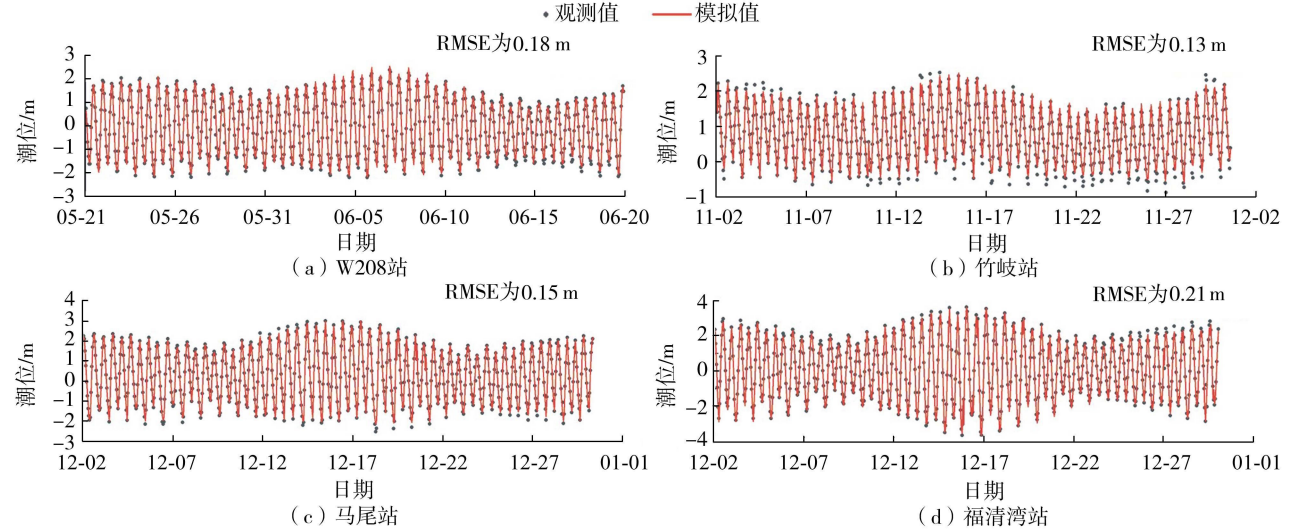


图 2 闽江下游潮位验证结果

Fig. 2 Results of tidal level verification in lower reaches of the Min River

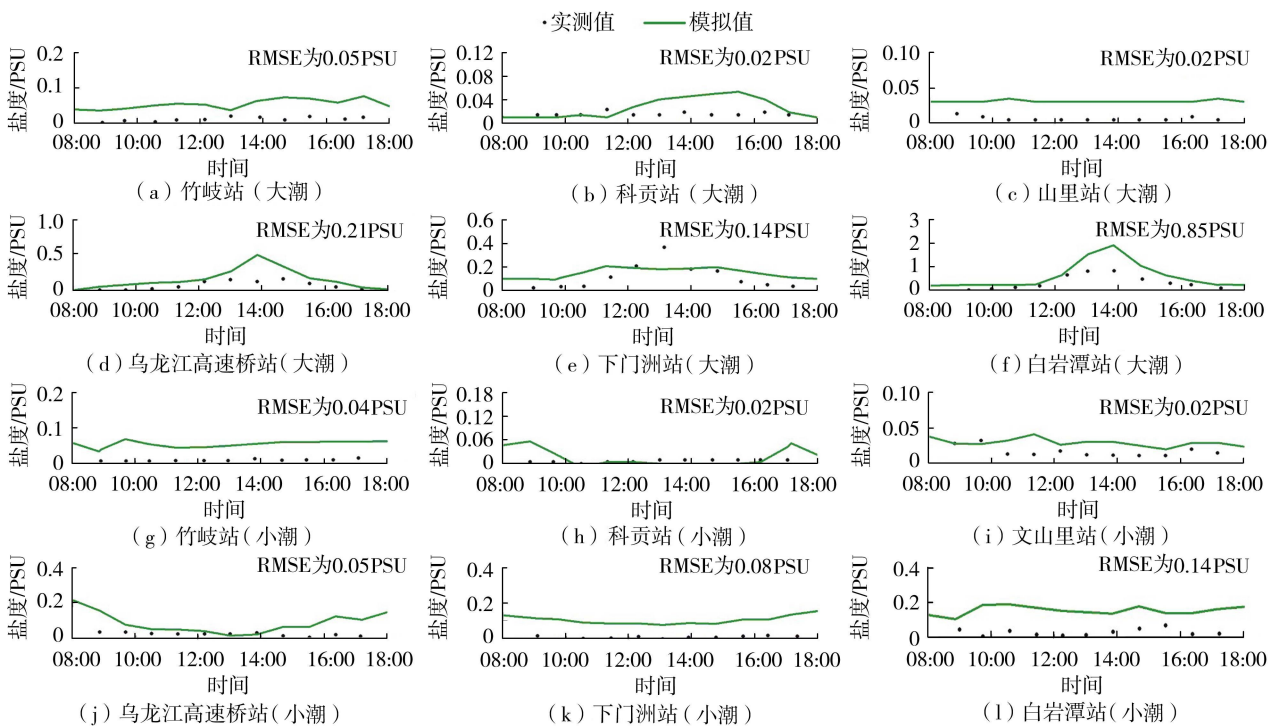


图3 闽江下游盐度验证结果

Fig. 3 Results of salinity verification in lower reaches of the Min River

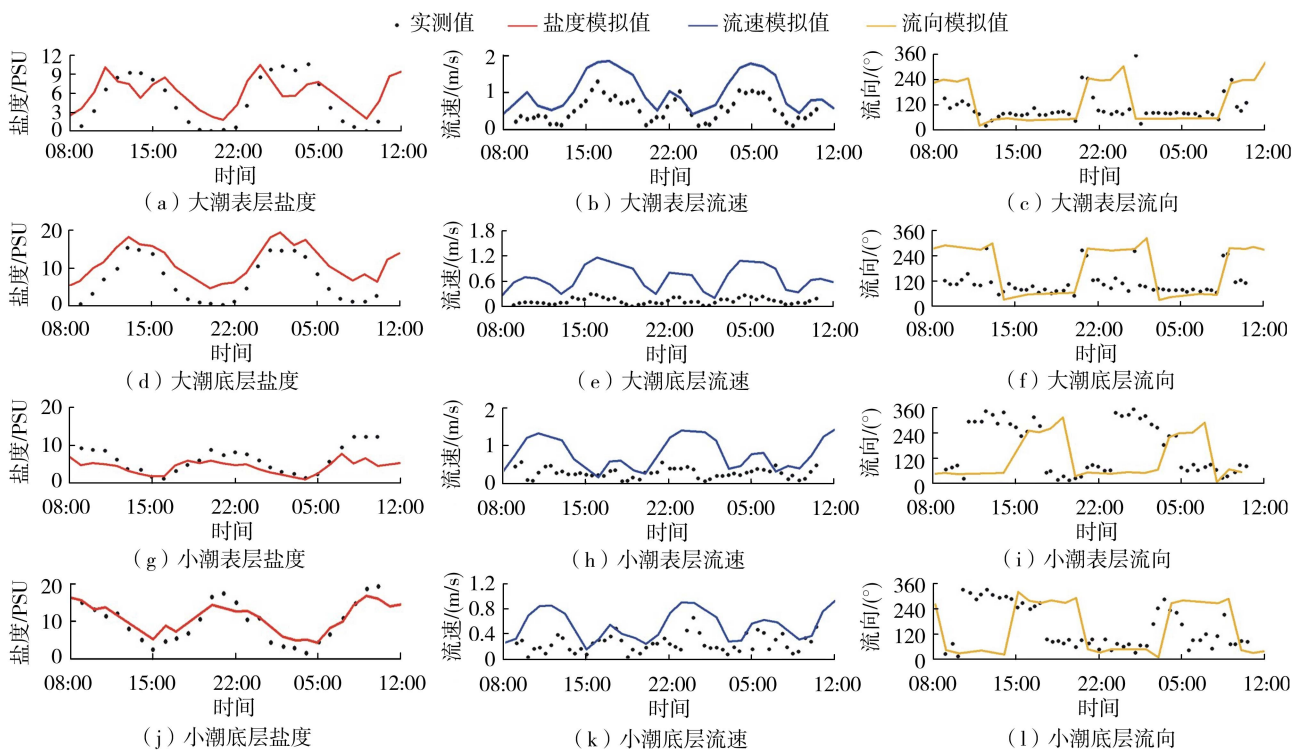


图4 C2站层化验证结果

Fig. 4 Results of stratification verification of C2 Station

枯水期流量过程,结果见图5。由图5可见,两站流量从秋季到冬季逐渐减小,2月之后的流量逐渐回升,1月平均流量最低,冬季流量最低值出现在12月25日8时,此时河口处较易发生咸潮上溯。

采用欧洲中期天气预报中心提供的ERA5再分

析数据,对研究区1992—2021年的风场数据作平均,得到如图6所示的气候态风场。由图6可见,在闽江流域枯水期平均流量最低时,气候态风场呈现长时间的东北风,12月风速普遍大于1月。由于闽江河口东向入海,处于低流量条件时,潮汐沿西向进

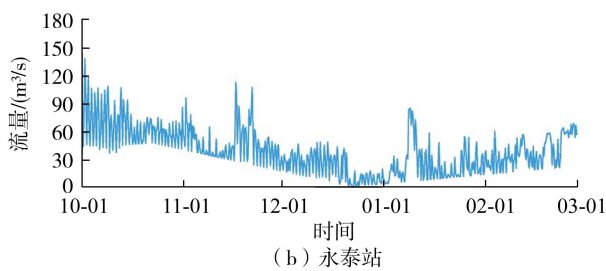
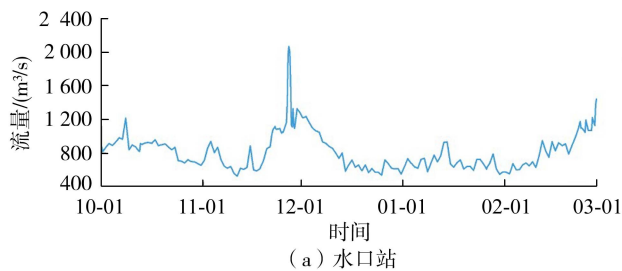


图 5 水口站和永泰站流量序列

Fig. 5 Flow sequence of Shuikou and Yongtai stations

入河口,加之东北风与潮汐侵入方向具有一定的重合,对潮汐入侵具有一定的加剧作用,推动了河口的咸潮上溯。采用枯水期气候态数据作为边界条件进行模型模拟,以气候态流量最低值时间点为中心,分析该时间点前后的大潮、小潮周期气候态平均盐度及咸潮上溯界情况。

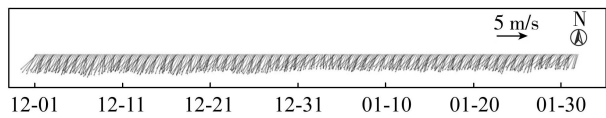


图 6 闽江河口枯水期气候态风场

Fig. 6 Climatic wind field in dry season of the Min River estuary

4.2 大潮期间咸潮上溯情况

图 7 为枯水期气候态大潮期间涨憩、落憩及上溯最远时刻的盐度分布,图中红线表示日常生活取水盐度控制线(0.45PSU),图框内的点与线表示图中情况具体处于涨落潮周期的准确时刻。根据图 7 分析大潮期间闽江下游咸潮上溯过程及影响范围,在大潮涨憩时刻,表、底层咸潮上溯界均达到罗星塔以上的南北港汇流处,表、底层盐度分布差异较

小,可见水体混合较为强烈。此处有马尾、炎山两座水厂,大潮涨憩时刻可能对其取水产生影响。在大潮落憩时刻,咸潮界退至金刚腿附近,表层咸潮界后退速度略快于底层,这是由于退潮的同时受到上游河流冲淡表层的影响。大潮期间咸潮上溯最严重时刻发生于大潮涨憩后的 3 h 左右,此时表层水体逐渐回落,底层水体回落较慢,产生的密度梯度引发强烈的水体混合。水体表、底层的咸潮上溯界均深入至北港、南港,超过马尾、炎山水厂取水口位置,对安全取水产生明显的影响。

4.3 小潮期间咸潮上溯情况

图 8 为枯水期气候态小潮期间涨憩、落憩及上溯最远时刻的盐度分布。根据图 8 分析小潮期间闽江下游咸潮上溯过程及影响范围,在小潮涨憩时,表、底层咸潮上溯界均已延伸至北港与南港,底层盐度整体稍高于表层,尤其是入海口北支部分。在小潮落憩时刻,咸潮界仅退至南北港汇合处附近,相较于大潮落憩期间的咸潮界,小潮落憩时刻的咸潮上溯更为严重,且落憩时刻的水体发生了较为明显的分层。小潮期间咸潮上溯最严重时刻发生于涨憩后

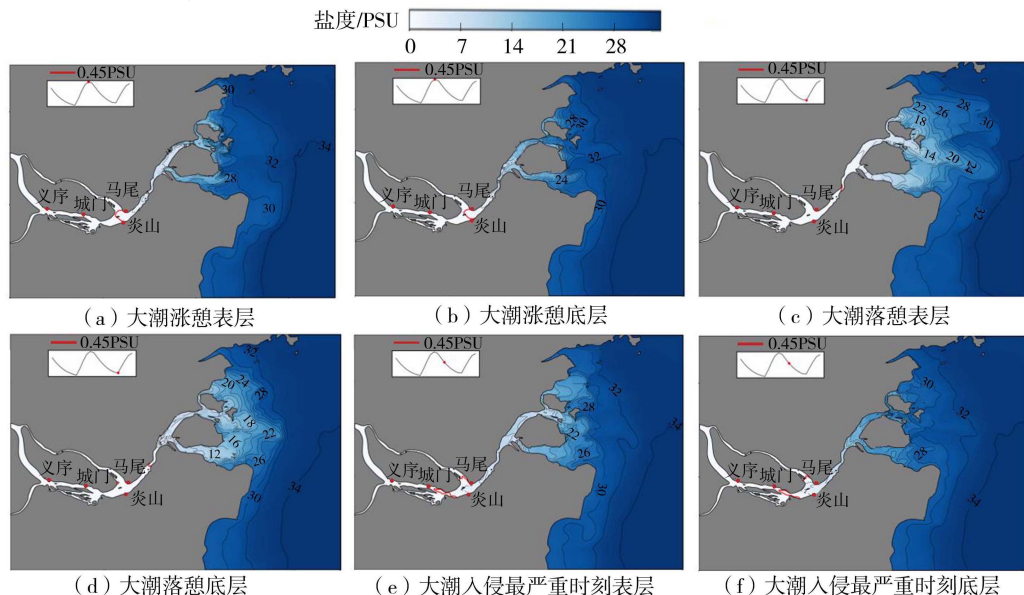


图 7 大潮期间咸潮上溯情况

Fig. 7 Situation of saltwater intrusion during spring tide

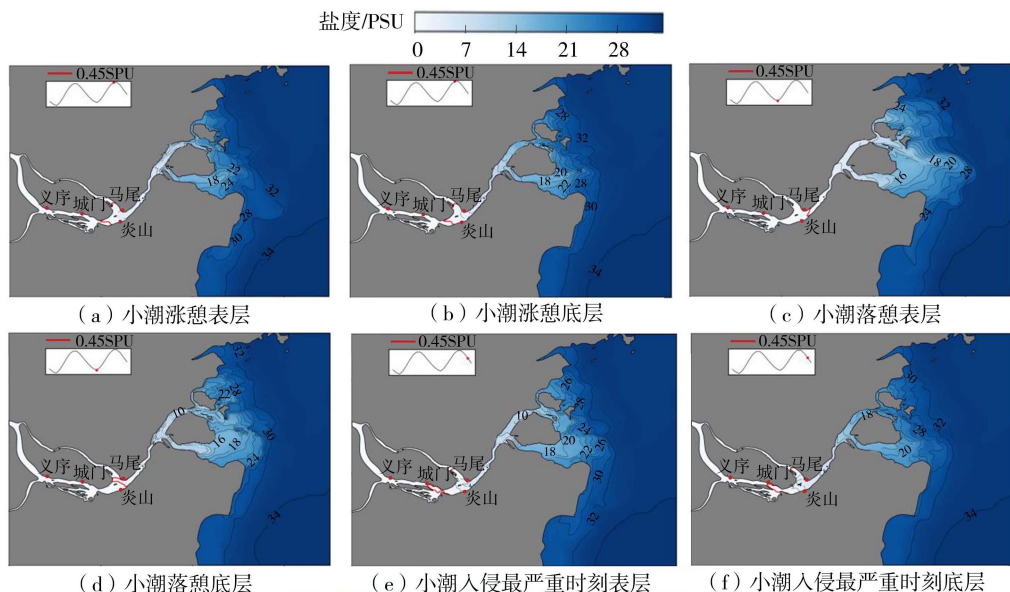


图 8 小潮期间咸潮上溯情况

Fig. 8 Situation of saltwater intrusion during neap tide

的 3 h 左右,此时水体混合程度依然强烈,北港入侵已超过马尾水厂,南港入侵已超过炎山水厂,达到城门水厂,严重威胁了闽江下游水厂的取用水安全。

4.4 盐度垂向上溯特征及取水安全分析

选取南、北港沿程纵断面进行盐度垂向特征和上溯距离分析,纵断面示意图见图 9,其中 A—C 为北港纵断面、B—C 为南港纵断面,纵断面长度均约 30 km,将 A、B 起点记为 0,终点 C 记为 30 km。

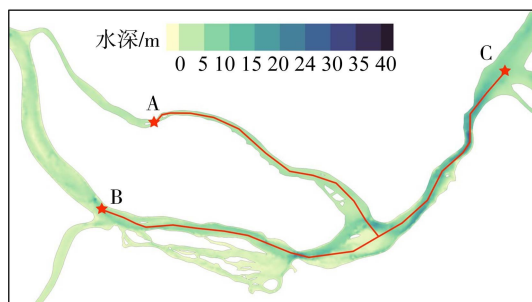


图 9 南、北港纵断面位置示意图

Fig. 9 Sketch of longitudinal section position of South and North Channel

为进一步了解咸潮上溯对水厂水源地的影响程度及影响范围,分析闽江南、北港纵断面在大、小潮期间的咸潮上溯时变过程,如图 10、图 11 所示,图中等值线的盐度等值线。对于闽江北港,大潮期间的水体混合强烈程度均强于小潮,小潮落憩时刻或涨潮起始时刻具有较明显的表、底层分层;在入侵最严重时刻,大小潮的水体均已达到充分混合状态,小潮的上溯界远于大潮约 1 km;此时马尾水源地遭受咸潮上溯影响,大潮水质轻微超标,小潮水质超标已达控制指标阈值的两倍,较为严重。对于闽江南港,小潮的起始、落憩分层比大潮更为明显;大小潮入侵

最严重时刻均对城门、炎山水源地造成了影响,其中炎山水源地遭受的咸潮入侵时间更长、程度更大。两种潮位下,南港的咸潮界均远于北港约 4 km。对于南北港而言,小潮的咸潮上溯影响范围整体大于大潮,可能是由于小潮发生期间正处于气候态枯期流量的最小值,潮汐作用受上游来流影响相对较小,因此上溯距离相对大潮更远。由以上现象可知,闽江下游于枯水期极易受到咸潮上溯的不利影响,下游主要水源地中,除义序水源地外,其余 3 个水源地水质均遭受咸潮灾害。

闽江河口潮流属半日潮,一日之内存在两次潮起潮落过程。以气候态流量最低值时间点(12 月 25 日)为中心时间,以该时间点最近的一次大潮期(12 月 15 日 8:00—20:00)和一次小潮期(12 月 25 日 16:00 至 12 月 26 日 4:00)为例,分析咸潮上溯对闽江下游主要水源地的影响。表 3 为下游主要水源地在枯水期气候态大、小潮期间的受影响持续时间的统计结果。由表 3 可见,炎山、马尾、城门水厂均明显遭受咸潮上溯影响,小潮期间影响范围与时长明显超过大潮,影响时段均位于午间和晚间用水高峰期。枯水期气候态小潮期间咸潮强度高于大潮,原因是咸潮上溯强度受潮汐流与上游来流相互作用,而小潮期间正处于上游平均来流最小的时间点,这对咸潮上溯强度产生较大影响。由上述分析可知,在枯水期大、小潮的涨憩及涨憩后 3~4 h 内,咸潮上溯水体混合强烈,上溯距离长,闽江下游水源地淡水水质将受到明显影响,应注意避咸取淡,或采取上游压咸调度等措施对咸潮上溯影响进行人为干预。

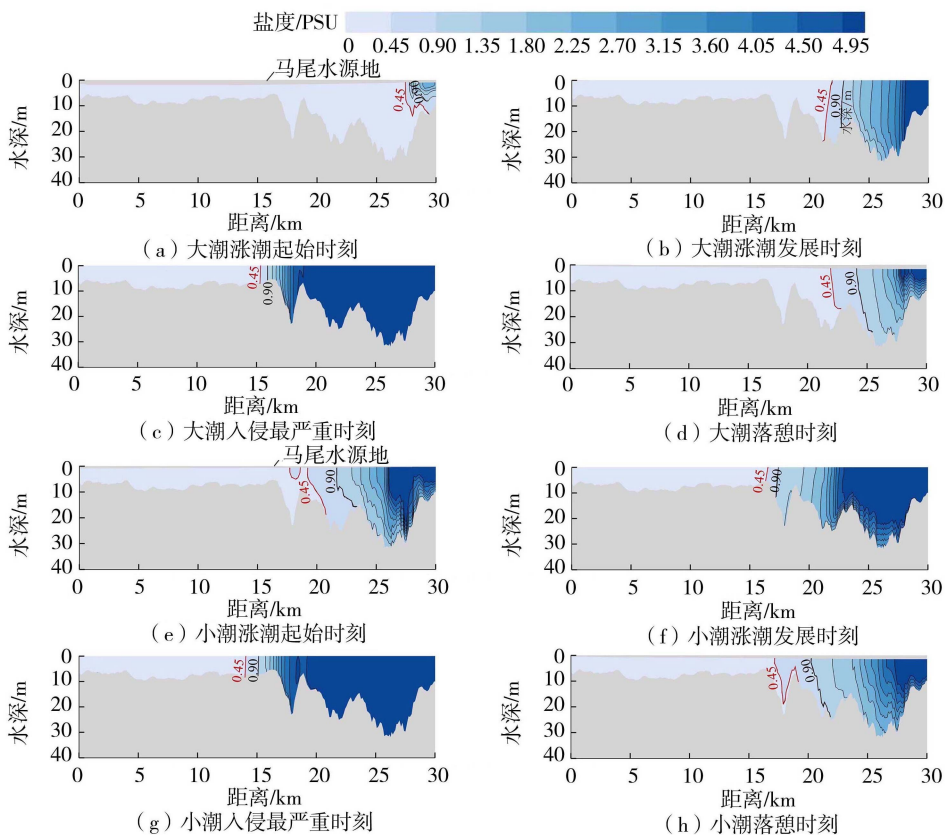


图 10 闽江北港咸潮上溯时变过程

Fig. 10 Time-varying process of saltwater intrusion in North Channel of the Min River

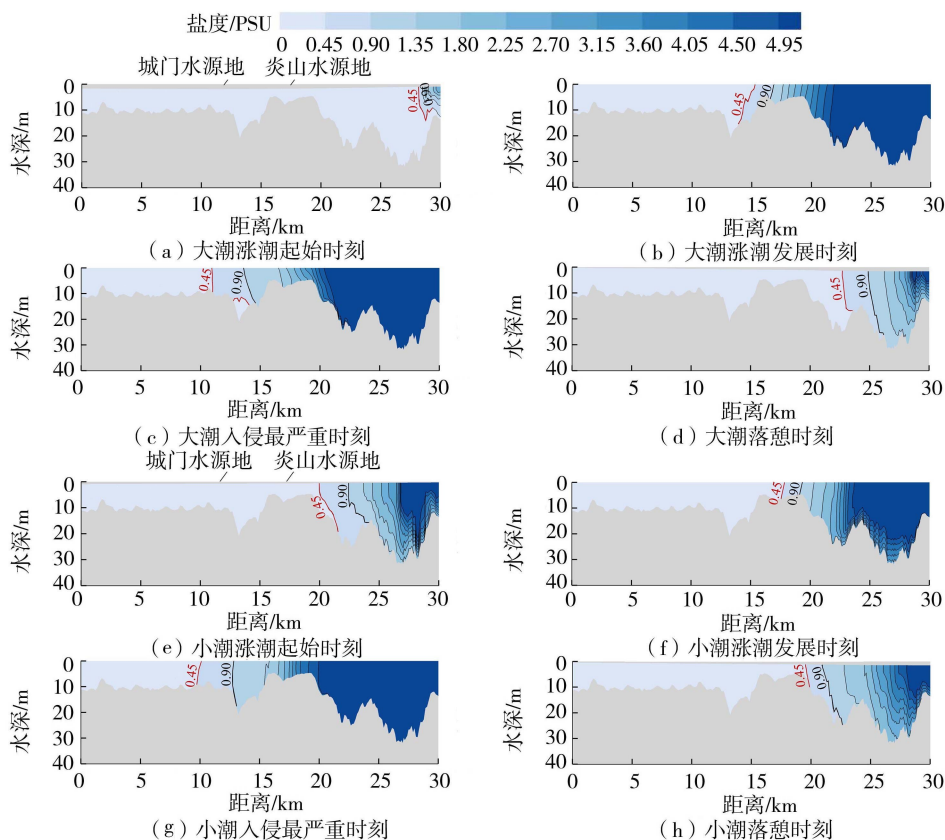


图 11 闽江南港咸潮上溯时变过程

Fig. 11 Time-varying process of saltwater intrusion in South Channel of the Min River

表 3 大、小潮期间主要水源地受影响情况

Table 3 Affection of main water sources during spring and neap tides

水源地名称	一次大潮期		一次小潮期	
	受影响时段	受影响时长/h	受影响时段	受影响时长/h
炎山	12 月 15 日 12:00—16:00	4	12 月 25 日 18:00 至 12 月 26 日 01:00	7
马尾	12 月 15 日 11:00—15:00	4	12 月 25 日 17:00 至 12 月 26 日 01:00	8
城门	12 月 15 日 13:00—14:00	1	12 月 25 日 20:00—23:00	3
义序	无	0	无	0

注:当水厂盐度超过取用水安全阈值 0.45PSU 时即受影响。

5 结 论

- a. 闽江下游干流在 12 月至次年 1 月平均流量最低,此时气候态风场正值东北风向,对闽江河口咸潮上溯具有推动作用,此时最易发生咸潮上溯。
- b. 大潮期间,涨憩时刻的咸潮上溯界已达到南北港汇合处,水体混合均匀,表底层分布差异较小;上溯最严重时间发生在涨憩与落憩时刻之间,水体混合强烈,上溯界涉入多个水源地。小潮期间,总体上溯程度均高于大潮;落憩时表底层盐度分层更为明显,其余时刻水体表底层混合强烈;上溯最严重时,小潮在南北港的咸潮上溯界均超大潮约 1 km。在两种潮位下,南港的咸潮界均远于北港约 4 km。
- c. 研究区在枯水期气候态条件下,除大、小潮的落憩时刻外,其他时刻均对闽江南北港及其汇合处的马尾、炎山、城门水厂取水水质产生直接影响。其中,最靠近下游的马尾、炎山水厂受影响程度较重,南港城门水厂次之,大樟溪支流口的义序水厂基本不受影响。

参考文献:

[1] SMAJGL A,TOAN T Q,NHAN D K,et al. Responding to rising sea levels in the Mekong Delta[J]. Nature Climate Change,2015,5(2):167-174.

[2] 王艺霖,苏程佳,陈晓宏,等. 磨刀门水道枯水期咸潮变化趋势及成因[J]. 水资源保护,2019,35(2):37-43. (WANG Yilin, SU Chengjia, CHEN Xiaohong, et al. Change trend and cause of salt tide in Modaomen Channel during dry seasons[J]. Water Resources Protection,2019,35(2):37-43. (in Chinese))

[3] 季永兴,李路,高晨晨. 咸潮影响下长江口水源地优化布局及白茆沙水库建设可行性分析[J]. 水资源保护,2024,40(1):25-32. (JI Yongxing, LI Lu, GAO Chenchen. Optimization of water source distribution and feasibility analysis of Baimaoshan Reservoir construction under influences of saltwater intrusion in the Yangtze River Estuary[J]. Water Resources Protection,2024,40(1):25-32. (in Chinese))

[4] RALSTON D K,GEYER W R. Response to channel deepening of the salinity intrusion, estuarine circulation,

and stratification in an urbanized estuary[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124 (7): 4784-4802.

[5] 王文才,李一平,杜薇,等. 长江感潮河段潮汐变化特征[J]. 水资源保护,2017,33(6):121-124. (WANG Wencai, LI Yiping, DU Wei, et al. Tidal variation features of tidal reach of Changjiang River[J]. Water Resources Protection,2017,33(6):121-124. (in Chinese))

[6] 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 Biao, ZHU Jianrong, LYU Aiqin. Salinity statistical model for Modaomen of Pearl River Estuary during dry season[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):42-48. (in Chinese))

[7] JASECHKO S, PERRONE D, SEYBOLD H, et al. Groundwater level observations in 250000 coastal US wells reveal scope of potential seawater intrusion[J]. Nature Communications,2020,11(1):3229.

[8] LUYUN JR R, MOMII K, NAKAGAWA K. Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion[J]. Ground Water,2011,49(2):239-249.

[9] KUAN W K, JIN Guangqiu, XIN Pei, et al. Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers[J]. Water Resources Research,2012,48(2):W02502.

[10] 卢陈,袁丽蓉,高时友,等. 潮汐强度与咸潮上溯距离试验[J]. 水科学进展,2013,24(2):251-257. (LU Chen, YUAN Lirong, GAO Shiyu, et al. Experimental study on the relationship between tide strength and salt intrusion length[J]. Advances in Water Science,2013,24(2):251-257. (in Chinese))

[11] 陈晖,黄广灵,谭超,等. 东江咸潮上溯特征及盐度输运机理浅析[J]. 水资源保护,2023,39(6):195-203. (CHEN Hui, HUANG Guangling, TAN Chao, et al. Analysis of saltwater intrusion characteristics and salinity transport mechanism in the Dongjiang River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6): 195-203. (in Chinese))

[12] PAYO-PAYO M, BRICHENO L M, DIJKSTRA Y M, et al. Multiscale temporal response of salt intrusion to transient river and ocean forcing [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2022, 127 (3): e2021JC017523.

- [13] ZHU Jianrong, CHENG Xinyue, LI Linjiang, et al. Dynamic mechanism of an extremely severe saltwater intrusion in the Changjiang estuary in February 2014[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24 (10): 5043-5056.
- [14] 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. (in Chinese))
- [15] 孔兰,陈晓宏.珠江口咸潮影响因素分析[J].水资源保护,2015,31(6):94-97. (KONG Lan, CHEN Xiaohong. Analysis on the influence factors of saltwater in Pearl River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6):94-97. (in Chinese))
- [16] 卢陈,刘晓平,陈荣力,等.径流-潮汐相互作用与咸潮上溯距离试验研究[J].水动力学研究与进展,2014,29(3):282-287. (LU Chen, LIU Xiaoping, CHEN Rongli, et al. Experimental study on the interaction of runoff-tide and salt water intrusion length [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(3):282-287. (in Chinese))
- [17] 郑航,刘悦忆,赵建世,等.极端干旱下河口咸潮上溯对径流过程的响应(I):特征与规律[J].水利水电技术(中英文),2022,53(10):121-131. (ZHENG Hang, LIU Yueyi, ZHAO Jianshi, et al. Response to runoff variations of saltwater intrusion in an estuary (I): characteristics and regularities [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(10):121-131. (in Chinese))
- [18] 李文善,王慧,左常圣,等.长江口咸潮入侵变化特征及成因分析[J].海洋学报,2020,42(7):32-40. (LI Wenshan, WANG Hui, ZUO Changsheng, et al. The variation characteristics and causes analysis of salt tide intrusion in the Changjiang River estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 42(7):32-40. (in Chinese))
- [19] 刘祖发,施宁宁,关帅,等.基于 FVCOM 的磨刀门水道盐水入侵三维数值模拟[J].水动力学研究与进展,2016,31(3):286-294. (LIU Zufa, SHI Ningning, GUAN Shuai, et al. Three-dimensional numerical simulation of saltwater intrusion in Modaomen estuary based on FVCOM [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(3):286-294. (in Chinese))
- [20] HE Wei, JIANG Aili, ZHANG Jian, et al. Comprehensive hydrodynamic fitness of an estuary channel and the effects of a water diversion inflow[J]. Estuaries and Coasts, 2022, 45(2):382-392.
- [21] 王玉琦,李钺,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. (in Chinese))
- [22] WANG Jinhua, ZHANG Debin, ZHANG Weisheng, et al. Impacts of different dynamic factors on the saltwater intrusion in the northern branch of the Yangtze Estuary [J]. China Ocean Engineering, 2019, 33(6):673-684.
- [23] 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 Zhaohui, WEI Xiaoyan, ZHANG Wei. 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. (in Chinese))
- [24] ZHOU Zaiyang, GE Jianzhong, VAN MAREN D S, et al. Study of sediment transport in a tidal channel-shoal system: lateral effects and slack-water dynamics [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(3): e2020JC016334.
- [25] LI Linjiang, WANG Chuning, PAREJA-ROMAN L F, et al. Effects of typhoon on saltwater intrusion in a high discharge estuary [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2022, 127(8): e2021JC018206.
- [26] 栾华龙,柯科腾,葛建忠,等.长江口规划工程影响下的咸潮入侵数值模拟[J].海洋科学进展,2018,36(4):525-539. (LUAN Hualong, KE Keteng, GE Jianzhong, et al. 3D numerical simulation of the impacts of planned estuarine projects on saltwater intrusion in the Yangtze Estuary [J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(4):525-539. (in Chinese))
- [27] CHEN Qing, ZHU Jianrong, LYU Hanghang, et al. Impacts of topography change on saltwater intrusion over the past decade in the Changjiang Estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 231:106469.
- [28] TANG Guoping, YANG Muzhen, CHEN Xiaohong, et al. A new idea for predicting and managing seawater intrusion in coastal channels of the Pearl River, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590:125454.
- [29] ZHANG Qi, FAN Daidu, FENG Tao, et al. Impacts of land reclamation projects on hydrodynamics and morphodynamics in the highly altered North Branch of the Changjiang Estuary [J]. Anthropocene Coasts, 2022, 5(1):6.
- [30] 陈奔月.闽江咸潮上溯与保障供水安全综合措施的现状与思考[J].水利科技,2020(1):5-10. (CHEN Benyue. The present situation and consideration of the comprehensive measures to trace the upstream going of the salt tide on the Min River and ensure the safety of water supply [J]. Hydraulic Science and Technology, 2020(1):5-10. (in Chinese))

(下转第 204 页)

optimization model for water supply network based on risk assessment[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(3):52-59. (in Chinese))

[17] PONTI A, CANDELIERI A, ARCHETTI F. A new evolutionary approach to optimal sensor placement in water distribution networks[J]. Water, 2021, 13(12):1625.

[18] 方国华,李智超,钟华昱,等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3):10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3):10-18. (in Chinese))

[19] 李江云,李瑶,胡子欣. 灰绿耦合雨洪系统多目标优化建模与应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(6):49-55. (LI Jiangyun, LI Yao, HU Zixin. Multi-objective optimization modeling and application of grey-green coupling stormwater system [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6):49-55. (in Chinese))

[20] 罗富敏. 基于 PSO-ACO 融合优化算法的供水管网污染源定位研究[D]. 广州:广东工业大学, 2016.

[21] LIU L, BERGLUND E Z, MAHINTHAKUMAR G, et al. Coupling of logistic regression analysis and local search methods for characterization of water distribution system contaminant source [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25:309-316.

[22] LIU L, SANKARASUBRAMANIAN A, RANJITHAN S R. Logistic regression analysis to estimate contaminant sources in water distribution systems [J]. Journal of Hydroinformatics, 2011, 13:545-557.

[23] RATHI S, AFSHAR A, MARINO M A, et al. S-PLACE GA for optimal water quality sensor locations in water distribution network for dual purpose: regular monitoring and early contamination detection: a software tool for academia and practitioner [J]. Water Supply, 2020, 21(2):615-634.

[24] ELIADES D G, KYRIAKOU M, POLYCARPOU M M. Sensor placement in water distribution systems using the S-PLACE Toolkit [J]. Procedia Engineering, 2014, 70:602-611.

[25] FONSECA C M, FLEMING P J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation discussion and generalization [C]//International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1993: 416-423.

[26] 陆仁强,张宏伟,牛志广,等. 基于非线性映射理论的城市供水管网压力监测点布置方法研究[J]. 水利学报, 2010, 41(1):25-29. (LU Renqiang, ZHANG Hongwei, NIU Zhiguang, et al. Study on an arrangement method for pressure monitoring points in urban water supply network by nonlinear mapping theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1):25-29. (in Chinese))

[27] WALSKI T M, BRILL E D, GESSLER J, et al. Battle of the network models: epilogue [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1987, 113:191-203.

(收稿日期:2024-03-16 编辑:胡新宇)

(上接第 159 页)

[31] 罗毅桦. 闽江下游河道含氯度时空分布特征分析及指示意义[J]. 水利科技, 2020(1):11-14. (LUO Yihua. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of chloride concentration in the lower reaches of the Min River and its indicating significance [J]. Hydraulic Science and Technology, 2020(1):11-14. (in Chinese))

[32] CHEN Changsheng, LIU Hedong, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1):159-186.

[33] TIAN R. Factors controlling saltwater intrusion across multi-time scales in estuaries, Chester River, Chesapeake Bay[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 223:61-73.

[34] LI L, WANG X H, WILLIAMS D, et al. Numerical study of the effects of mangrove areas and tidal flats on tides: a case study of Darwin Harbour, Australia [J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2012, 117(C6):C06011.

[35] SHEN Yongming, JIA Han, LI Changping, et al. Numerical simulation of saltwater intrusion and storm surge effects of reclamation in Pearl River Estuary, China [J]. Applied Ocean Research, 2018, 79:101-112.

[36] GE Jianzhong, LU Jiayu, ZHANG Jingsi, et al. Saltwater intrusion-induced flow reversal in the Changjiang Estuary [J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2022, 127(11):e2021JC018270.

[37] 吴頔,王勇智,孙永根. 台湾海峡 M_2 分潮潮汐潮流特征分布及机制研究[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(4):460-468. (WU Di, WANG Yongzhi, SUN Yonggen. Distribution and mechanism of M_2 tide and tidal current in Taiwan Strait [J]. Journal of Applied Oceanography, 2020, 39(4):460-468. (in Chinese))

(收稿日期:2024-04-24 编辑:王芳)