

潜坝对闽江感潮河段咸潮入侵的影响

黄雅丽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. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要:基于有限体积算法的 FVCOM, 采用非结构网格下的堤坝处理方法构建了感潮河口三维水力-盐度-潜坝耦合数值模型, 以受咸潮入侵影响显著的闽江河口为研究对象, 探究潜坝对闽江感潮河段咸潮入侵特征及规律的影响。结果表明:潜坝对咸潮入侵具有一定的抑制作用, 且对底层水体盐度的削减程度优于表层, 对大潮期的咸潮入侵削减程度优于小潮期;在大、小潮期, 潜坝对水体分层较明显的宽浅河道抑咸效果明显优于水体充分混合的窄深河道, 北港大潮期的安全用水控制线在峡南、金剛腿两处潜坝的影响下分别消退约 5 km 和 8 km;潜坝改变了底层水体的流速与流向, 使底层水流偏转的同时产生小范围涡流, 进一步抑制了咸潮的继续上溯。

关键词:潜坝; 感潮河口; 咸潮入侵; 盐度; FVCOM; 闽江

中图分类号:P753 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0180-09

Impact of submerged dike on saltwater intrusion in tidal reach of the Minjiang River//HUANG Yali¹, 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 & 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 FVCOM of the finite volume algorithm, a three-dimensional hydrodynamic-salinity-submerged dike coupling numerical model of the tidal river estuary was constructed by using the embankment treatment method under the unstructured grid. Taking the Minjiang River estuary as the research object, which is significantly affected by saltwater intrusion, the characteristics and laws of saltwater intrusion in the tidal reach of the Minjiang River under the influence of submerged dike construction were explored. The results demonstrate that the submerged dikes effectively suppress saltwater intrusion, with a more pronounced reduction in bottom-layer salinity than surface salinity and a stronger inhibitory effect during spring tides compared to neap tides. During spring and neap tides, the salt-suppressing effect of submerged dikes on shallow and wide channels with obvious water stratification is significantly better than that on narrow and deep channels with fully mixed water. During spring tide, the freshwater-saltwater interface in the North Channel retreated approximately 5 km and 8 km downstream due to the influence of Xia'nan and Jin'gangtui submerged dikes, respectively. Further analysis of water velocity and flow direction reveals that submerged dikes alter the flow velocity and direction of bottom water body, causing the bottom water flow to deflect while generating small-scale vortices, further suppressing the continuous upstream movement of saltwater.

Key words: submerged dike; tidal estuary; saltwater intrusion; salinity; FVCOM; the Minjiang River

咸潮入侵是指河口大陆架上的高盐度海水受涨潮流与密度差驱动进入淡水河段, 造成上游河流水体变咸的自然现象, 受涨潮波影响的河段称为感潮河段。经济发展、气候变化、土地利用类型变化等外部因素破坏了原有咸淡水界面的动态平衡, 使咸潮

入侵成为河口地区严重的环境问题^[1], 对沿海地区的生态系统稳定、工农业用水、淡水资源利用等造成极大危害, 制约了沿海地区的经济发展^[2]。因此, 对咸潮入侵的治理日益迫切。

当前对咸潮入侵的治理方法总体遵循监测、预

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, 主要从事海洋水文智能预报研究。E-mail: yluang1995@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

测、预防和控制思路,主要分为非工程措施和工程措施。非工程措施是指通过水资源优化配置与综合管理、建立实时监测与预警系统、实施生态系统修复与保护、改进水处理工艺等技术管理手段,间接调控或适应咸潮入侵影响的策略体系^[3],此类措施具有全面性、灵活性、可持续性的特点,但其效果往往需要较长时间才能显现。工程措施是指通过实地建设物理工程结构改变河口区域的水文条件,控制或减缓咸潮入侵程度,具有快速、直接的特点,并得以广泛应用。自 20 世纪 80 年代以来,中国、日本、印度及部分非洲国家相继修建了地下防渗墙、拍门等各类阻咸工程以抵御咸潮入侵^[4]。目前广泛采用的工程措施为潜坝和丁坝,旨在通过改变水流流向或水位抑制涨潮期间的咸水上溯,从而保护内陆地表水源地的淡水资源。潜坝和丁坝淹没工程施工难度及成本较低,可从源端减少咸潮入侵的影响,且可兼顾上游淡水泄流需求,起到调节河道水位、防止污染物累积、保护上游淡水资源的作用^[5]。目前潜坝和丁坝淹没工程已应用于我国长江、大汶河等流域^[6-7]。

早期对潜坝和丁坝的研究主要通过室内物理模型进行模拟,聚焦于还原咸淡水界面运移,分析过渡带的水动力学特性^[8-10]、潜坝或防渗屏障对缓解咸潮入侵的有效性^[11-12]以及不同类型潜坝或防渗屏障对咸潮入侵的缓解程度^[13-16]等方面,在一定程度上验证了构建潜坝和丁坝等截流措施减缓咸潮入侵的可行性。然而室内物理模型实验受人力、物力限制和模型比尺的影响,在分析过程中存在局限性^[17]。随着计算机技术的发展,数值模拟方法因具有建模速度快、计算效率高、易直观分析水动力特性及分布规律等优点,成为目前首选的研究方法,学者们基于各类数值模拟工具构建了潜坝、截流墙等截流工程模型。MODFLOW (modular finite-difference flow model) 和 SEAWAT (seawater and three-dimensional variable-density groundwater flow model) 被广泛应用于地下含水层中水坝、防渗墙及其流场的模拟,研究截流体类型、位置、高度、水力梯度等多种因素对预防咸潮入侵的抑制效果^[14-20]。MIKE (modelling integrated kinematic environment) 和 FVCOM (unstructured grid finite volume community ocean model) 等模型则多用于河口与岸线区域的模拟计算^[7,12,21],其中,FVCOM 基于非结构化网格的有限体积离散方法建模,对河口海岸区域复杂地形的模拟以及对潮汐往复流、岸线干湿交替、水体物质迁移追踪等海洋动力过程的计算具有良好的适用性和较高的精度。如 Ge 等^[6,22]利用 FVCOM 开发了基于地形追随坐标系的丁坝模块算法,研究沿海地

区人造建筑物周围的水动力演变过程,并在长江口得到了较好的验证,成为当前河口海岸建筑物模拟应用最广泛的方法之一。基于数值模拟方法分析感潮河段截流工程对咸潮上溯的水动力学影响,已成为探究咸潮上溯规律、制定压咸措施的主要技术手段。

闽江是我国福建省内最大的河流,发源于武夷山脉,全长 541 km,流域面积 60 992 km²,流经南平、三明、福州等多个城市,最终注入东海,在沿岸地区水资源供应、航道运输、防洪排涝、生态保护等多方面发挥着重要的作用。近年来,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,其下游地区在枯水季节频繁受到咸潮入侵的影响。2003 年以来已多次监测到下游感潮河段氯离子浓度严重超过当地水厂氯离子浓度阈值的情况,且入侵的频率和强度逐年增加^[23]。咸潮入侵导致闽江沿岸农作物减产、工业设备腐蚀和饮用水源污染,对农业灌溉、工业发展和居民生活造成了严重影响。为了应对咸潮入侵问题,福州市政府及相关部门采取了一系列综合治理措施,包括建设拦潮闸、调节上游水库枯水期下泄流量、河道填砂及生态修复等^[24-25],取得了一定的效果。近年来随着气候变化、海平面上升和极端天气事件的持续影响,咸潮入侵程度仍在加剧。如 2022 年夏季降雨径流量的急剧减少使得闽江下游自 7 月起进入枯水期,且长达半年之久,大、小潮期的马尾、炎山等水源地附近多次监测到氯离子浓度超标,严重影响了当地的生产和生活。

针对闽江感潮河段咸潮入侵的危害,本文基于数值模拟方法,探究潜坝工程影响下感潮河段咸潮上溯的分布规律,论证其初步效果、可行性和制约因素,为推动感潮河段阻咸工程的建设 and 实施提供科学依据。

1 研究方法

本文基于 FVCOM 构建感潮河段三维水动力-盐度-潜坝耦合数值模型,以准确模拟河口水动力演变与潜坝对咸潮入侵的影响。FVCOM 由 Chen 等^[26]提出并经众多学者后续开发与验证,对潮汐往复流、岸线干湿交替、沿海水工建筑物等具有较好的模拟效果,被成功应用于长江^[27]、连江等^[28]多个河口与海岸。

1.1 水动力-盐度模型基本理论

FVCOM 采用基于地形追随的 σ 坐标变换方法,将笛卡尔坐标系下的不可压缩流体连续性方程和动量方程变换为 σ 坐标系下的连续性方程和动量方程,变换后的方程能够有效贴合具有较大起伏或突变的

河底地形,以提高模拟精度^[26]。此外,模型分别采用温度、盐度方程描述了温度、盐度的运移扩散过程,用MY-2.5 湍流闭合方案使方程闭合^[26],精确模拟潮汐往复流、盐度输移与密度分层等物理过程,有效刻画闽江河口复杂底部地形与潜坝结构的相互作用。

1.2 潜坝控制原理

本文采用FVCOM 基于地形追随坐标系的丁坝模块算法^[6]分析潜坝产生的影响。该丁坝模块算法可用于计算河口海岸系统中堤坝淹没工程的流体状态和示踪剂浓度,并在具有解析解或试验结果的理想堤坝结构情况下得到了验证,已应用于多个真实河口。潜坝宽度一般为2~5 m,对于水平分辨率大于20~100 m 的网格模型,可将潜坝处理为线状结构,将上层网格视为一个完整的控制体单元,而潜坝结构本身则分为两个单独的控制体单元。潜坝位于河底,全程淹没,潜坝顶部上方的流体可自由流过潜坝结构,而下层流体则被阻挡。本文基于水动力-盐度基本方程量化潜坝对垂向流速剪切和盐度扩散的阻滞效应。通过对比有无潜坝工况下咸潮界位置、垂向分层强度及流速矢量变化,揭示潜坝布设位置对咸潮上溯位置分布、上溯距离的响应关系,为闽江口咸潮防控提供理论依据和工程优化方案。

2 模型构建与验证

2.1 模型构建

闽江流域感潮河段建模范围为闽江干流水口大坝下游至出海口向外海延伸约100 km 的区域,其中核心计算区域为闽江下游河口区域,如图1所示。南台岛将干流下游分为南北两港,北港穿过福州市中心,南港中部有大樟溪支流汇入;南北港随后于马尾汇合,又在入海口附近被琅岐岛分为南北两支分别入海。建模初始采用粗分辨率网格开展模型运行调试,完成调试后采用加密的网格进行细节调整,针对部分关键断面及关键位置,进一步采用20~50 m

的网格分辨率以更准确地捕捉水动力-盐度演变过程。网格分辨率设置如表1所示。

表1 网格分辨率设置

Table 1 Grid resolution setting

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	100	3	79 994	152 383	0.1
粗网格	300	5	20 087	36 313	0.4

模型采用水口站实测流量作为闽江干流的上游边界输入条件,采用永泰站实测流量作为大樟溪支流的上游边界输入条件。开边界呈辐射状,设置在东部外海,采用TPXO (TOPEX/poseidon global inverse solution tidal model)数据集结合东中国海大区域模型插值给出其分潮调和常数。水口站至马尾站附近水深地形采用2020年实测水深地形数据,马尾站至入海口采用2022年实测水深地形数据,外海部分采用海图资料,将三者水深地形进行拼接得到模型的整体水深地形数据。模型使用的历史风场数据由欧洲中期天气预报中心提供,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,模型采取冷启动,流速及水位初始值设为零,温度、盐度初始值取自《渤海、黄海、东海海洋图集》月平均数字化资料。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。水平扩散系数设为常数0.1,水平和垂向Prandtl数分别设为1.0和0.1^[26]。

2.2 模型率定

模型率定采用区域内主导分潮M₂调和常数场,将主要率定位置的潮汐振幅、迟角的模拟值与真实值进行对比,调和和分析结果见表2。从表2可以看出,振幅误差不超过10%,迟角误差不超过5°,模型能够满足率定的精度要求^[29-30]。

2.3 层化验证

基于不同深度的盐度、流速和流向实测数据,对

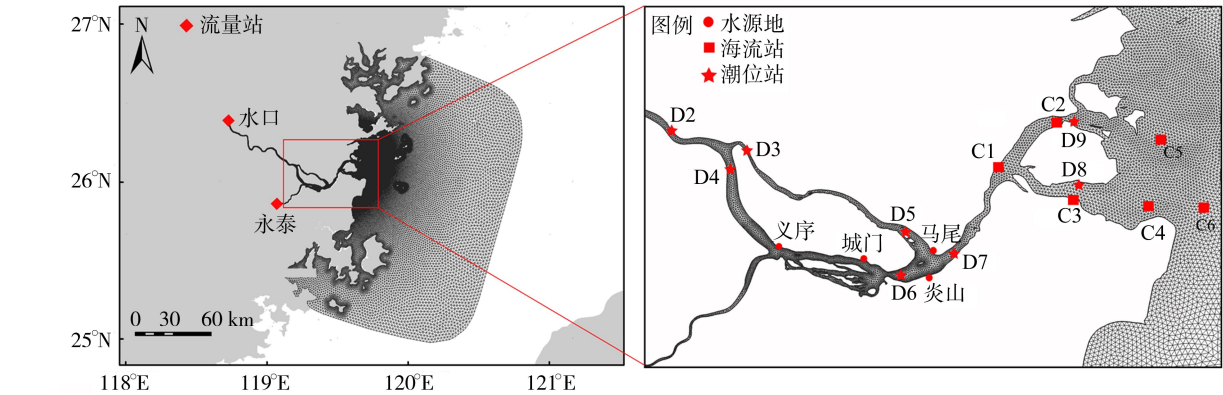


图1 模型构建范围及其核心区域

Fig. 1 Construction range of model and its core area

表 2 调和和分析结果
Table 2 Results of harmonic analysis

率定位置	经度/(°)	纬度/(°)	振幅/m			迟角/(°)		
			模拟值	实测值	误差	模拟值	实测值	误差
竹岐	119.098	26.151	0.90	1.00	-0.1	52.65	50	2.65
帮门	119.583	26.750	2.79	2.67	0.12	310.96	313	-2.04
福清湾	119.583	25.683	2.27	2.22	0.05	311.04	307	4.04
马尾	119.467	25.967	1.76	1.72	0.04	343.01	344	-0.99

模型进行层化验证,以测试 σ 坐标垂向分层模拟的准确性。范围涵盖口门及其外海区域,验证时间为2020年4月25日大潮期和2020年4月17日小潮期。以C2海流站为例,层化验证结果见图2。在大、小潮期,表层到底层的盐度范围逐渐增大,流速范围逐渐减小,流向则呈现出明显的周期性。表、

中、底层盐度、流速和流向模拟结果与实测数据变化趋势较为一致,表明模型模拟的可靠性。盐度、流速的中、底层模拟效果逊于表层,原因是海流站位于河口与海洋交汇处,河道纵向地形变化较快。由于缺乏全河道实测地形资料,本文将最近的2022年实测水深地形数据与海图资料拼接,海流站处于拼接处,

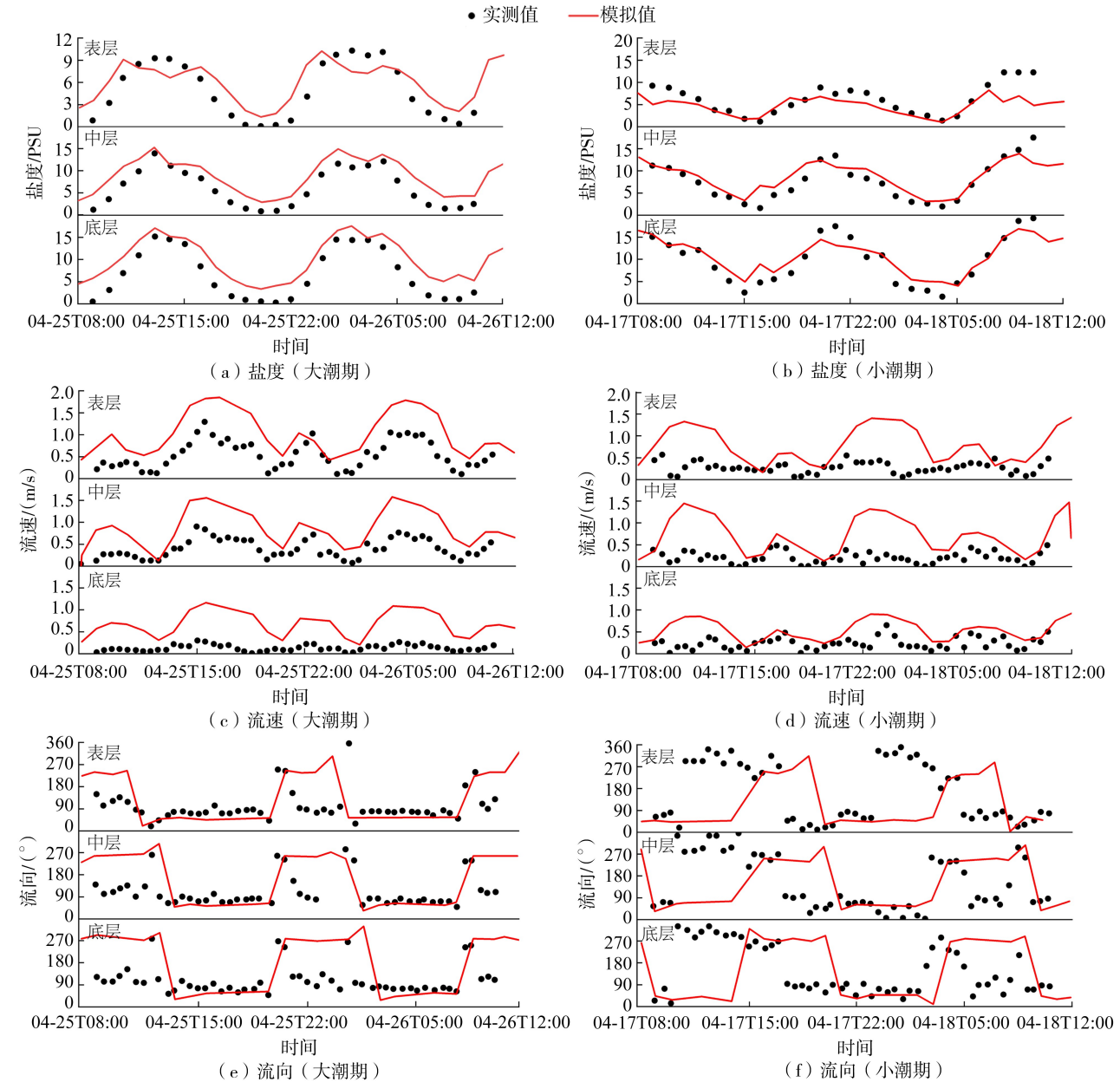


图 2 层化验证结果
Fig. 2 Results of stratification verification

对验证结果产生一定的影响,此误差可以通过增加对实际地形的观测得到一定程度的缓解。

2.4 潮位验证

采用图 1 中 D2~D9 潮位站对潮位进行验证,验证时间为 2020 年枯水期的 12 月 25 日大潮期及 12 月 17 日小潮期。采用均方根误差(RMSE)对验证结果进行评价,结果如图 3 所示。从图 3 可以看

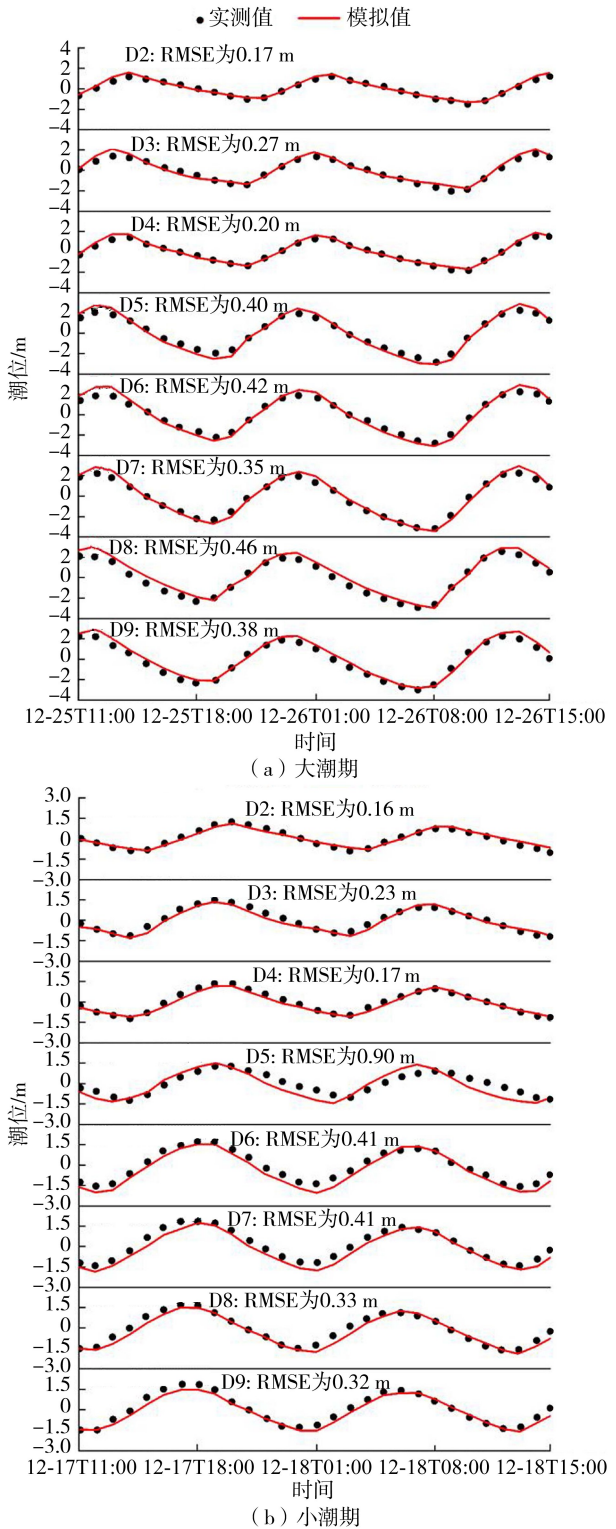


图 3 潮位验证结果

Fig. 3 Results of tidal level verification

出,各潮位站模拟值与实测值结果基本一致。

3 结果与分析

基于研究区感潮河段实地需求设计潜坝工程位置及尺寸,通过对潜坝设置前后咸潮入侵界、入侵距离分析得到潜坝影响程度及规律,结合潜坝处流速矢量分布图进一步揭示潜坝对咸潮入侵的影响机理。

3.1 计算条件

图 4 为 2022 年闽江下游水口站和永泰站流量过程。从图 4 可以看出,2022 年下半年处于严重的枯水期,河道流量自 7 月起因降雨骤减而遭锐减,枯水期持续时间长达半年之久,主河道流量最小值仅为 302 m³/s。长期的低流量严重影响了感潮河段咸淡水界面的动态平衡,造成咸潮入侵界不断向上游延伸,危害了下游生产和生活的取用水安全。因此,本文针对 2022 年枯水期 11 月中下旬大、小潮期开展潜坝工况设计对感潮河段咸潮入侵的影响分析。

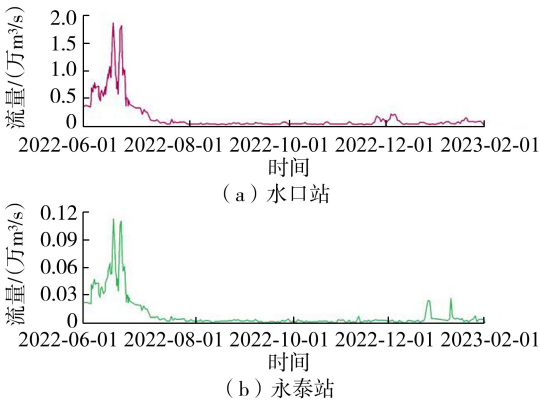


图 4 2022 年闽江下游水口站和永泰站流量过程

Fig. 4 Flow sequence at Shuikou Station and Yongtai Station in the lower Minjiang River in 2022

3.2 潜坝工况设计

潜坝的设计主要依据研究区河流特性、潮汐情况、地理条件和具体工程需求,目前尚未有固定的设计标准。本文中潜坝的作用主要为通过阻隔涨潮流咸水保护水源地水质,减轻其受咸水污染的程度,因此,选址应位于水源地上游,且考虑到工程效益与经济因素,选址断面的宽度不宜过大。综上,潜坝选址于义序、城门水厂上游的峡南和主河道上最靠近出海口的金刚腿,位置如图 5 所示。对于潜坝高度的选择,多视河道地形而定,以枯水期河道水面为标准。若潜坝设置过低,会影响其阻咸效果,若潜坝设置过高,则有可能阻碍河道通航、过鱼及上游来水效果,造成壅水。本文在考虑坝高不超过最大地形高度的同时,兼顾当地管理单位建议,选定潜坝高度为 10 m 进行模拟试验。

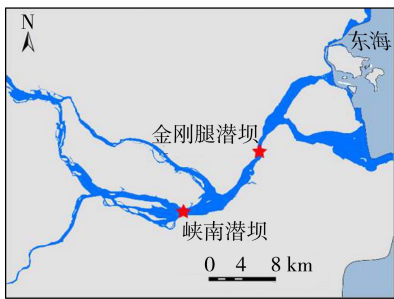


图 5 潜坝设计位置

Fig. 5 Design position of submerged dikes

3.3 潜坝对咸潮入侵界分布的影响

在 2022 年枯水期 11 月中下旬大、小潮期对比了无潜坝、峡南潜坝及金刚腿潜坝工况下的咸潮入侵分布情况,分析大、小潮期咸潮入侵最严重时刻表、底层盐度分布的变化,结果如图 6 所示。取生活用水中氯离子质量浓度阈值 250 mg/L (盐度约为 0.45 PSU) 作为安全用水控制线。在无潜坝工况下,北港大潮已深入文山里附近,南港大潮已超过大樟溪支流口并向上延伸,影响马尾、炎山、城门、义序 4 个重要水源地;设置峡南潜坝后,咸潮入侵界有所消退,入侵情况得到缓解,北港魁岐、南港义序水源

地盐度均降低;而设置更下游处的金刚腿潜坝,对抑制咸潮入侵的效果更为显著,尤其是北港咸潮入侵界消退明显,南港义序、城门、炎山水源地盐度明显降低,对表、底层盐度均表现出较好的控制效果。整个大潮期水体混合较为强烈,表、底层咸潮入侵程度差别较小。小潮期北港咸潮入侵达到魁岐,呈现出表、底盐度分层;南港咸潮入侵达到义序水源地下游处。潜坝的设置对底层盐度表现出一定的控制效果,底层咸潮入侵界略有消退,而对表层咸潮入侵抑制效果不明显。

3.4 潜坝对咸潮入侵距离的影响

为进一步分析咸潮入侵距离及断面盐度的垂向混合特征,选取闽江下游南北港沿程纵断面进行分析。沿程纵断面如图 7 所示(图中 A 为起点,B 为终点),北港、南港纵断面长度分别约为 31.5 km 和 34 km。

图 8 为闽江下游南港、北港纵断面在大、小潮期咸潮入侵最严重时刻的盐度等值线分布及盐度为 0.45 PSU 的安全用水控制线。由图 8 可知,大潮期等盐度线近乎垂直,表明此时水体混合强烈;对于北

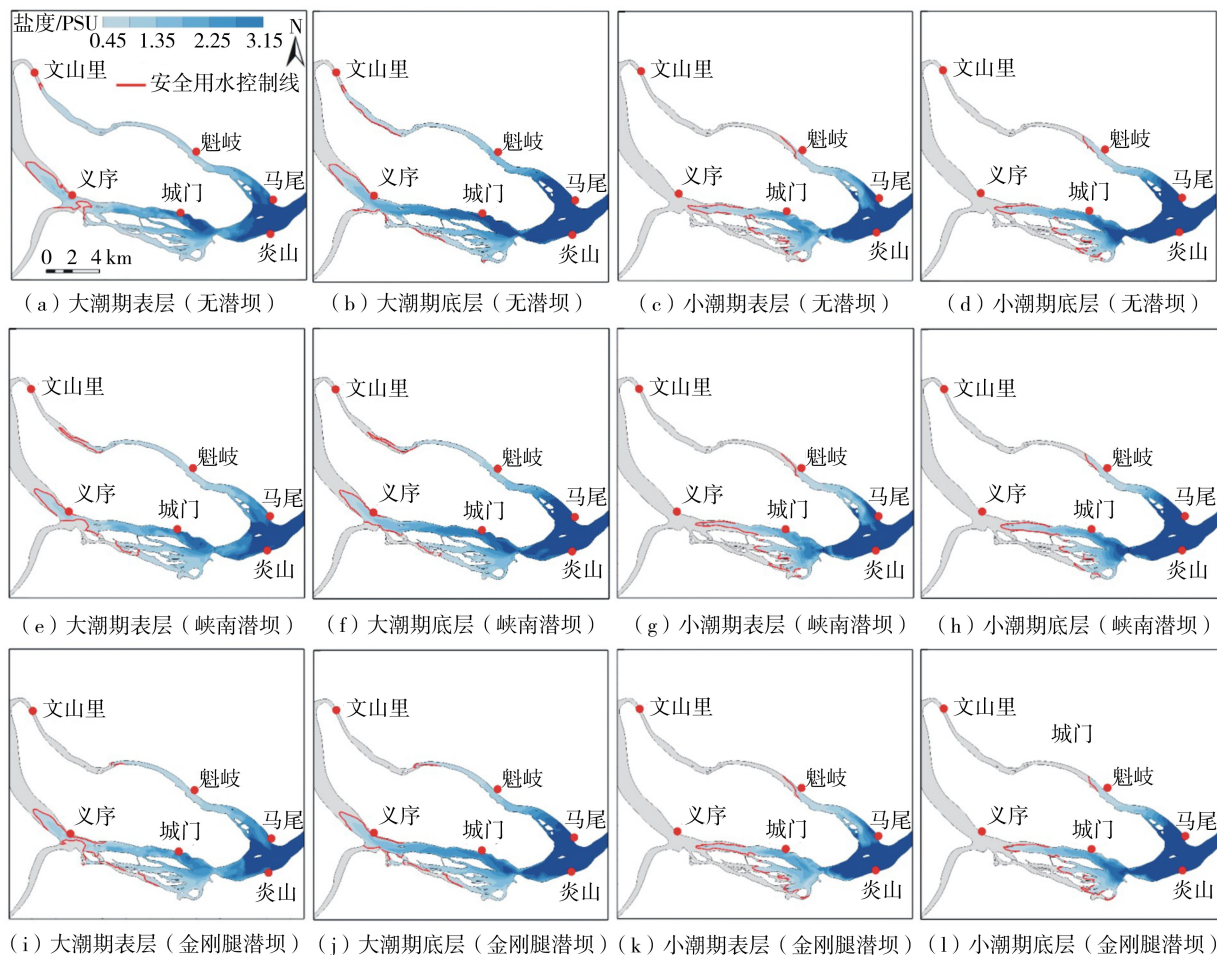


图 6 不同潜坝工况下的咸潮入侵分布

Fig. 6 Distributions of saltwater intrusion under different submerged dike conditions

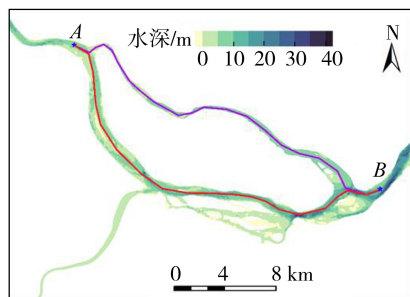


图7 沿程纵断面

Fig. 7 Longitudinal sections along channel

港,峡南潜坝工况下安全用水控制线消退近 5 km,而更下游处的金刚腿潜坝使安全用水控制线消退近 8 km;对于南港,潜坝虽未令咸潮上溯界大幅消退,但使义序、城门水源地盐度降低。小潮期北港文山里、南港义序水源地均未受影响,下游处的金刚腿潜坝对城门水源地附近盐度的调节效果优于上游峡南潜坝,潜坝对咸潮入侵界起到一定的抑制作用,但整体效果不如大潮期。而不论是大潮或小潮期,北港的咸潮入侵界消退距离均大于南港,原因是北港河道较为宽浅,南港河道较为窄深、崎岖,导致南港受涨潮流作用时水体混合程度更为强烈,位于窄深河底的潜坝对强烈混合水体的阻隔作用相对宽浅河道更为有限。综上,潜坝的设置对大潮期咸潮上溯表

现出明显的抑制作用,而在小潮期作用有限,且对咸潮入侵水体分层明显的河道,抑咸作用优于水体充分混合的河道。

3.5 潜坝对咸潮入侵影响的机理

图 9 为大潮期咸潮上溯最严重时刻不同潜坝工况下的流速分布。结合图 5 可知,峡南潜坝处较为窄深,水流经过潜坝后历经地形陡降,尤其是底部易形成涡流,一定程度上阻碍了咸水继续前溯。此处表、中层水体受潜坝影响较小,基本不影响双向通航及上游水库泄洪压咸;底层水体水流方向在潜坝处明显偏转,表明底部咸水上溯受到潜坝阻隔,结合图 8 大潮期咸潮入侵的纵断面分布可看出,峡南潜坝对底层水体产生明显影响。对于金刚腿潜坝,其位于河底陡升处,在涨憩时刻,表、中层水体受潜坝影响发生了部分水流方向偏转,底层水体受潜坝影响发生明显偏转,并于潜坝附近产生小范围涡流,涡流进一步阻碍了咸水的继续上溯。

利用潜坝抑制咸潮入侵是日益加剧的咸潮入侵现状下对人为工程阻咸措施的探索与试验,亦是现有众多压咸方法中的一种,仍需进一步研究感潮河段潜坝高度、厚度、形状、梯级潜坝群等产生的影响。仅靠单一措施难以在兼顾通航、过沙、过鱼等河道重要功能的同时,实现压咸目标,未来可考虑通过上游

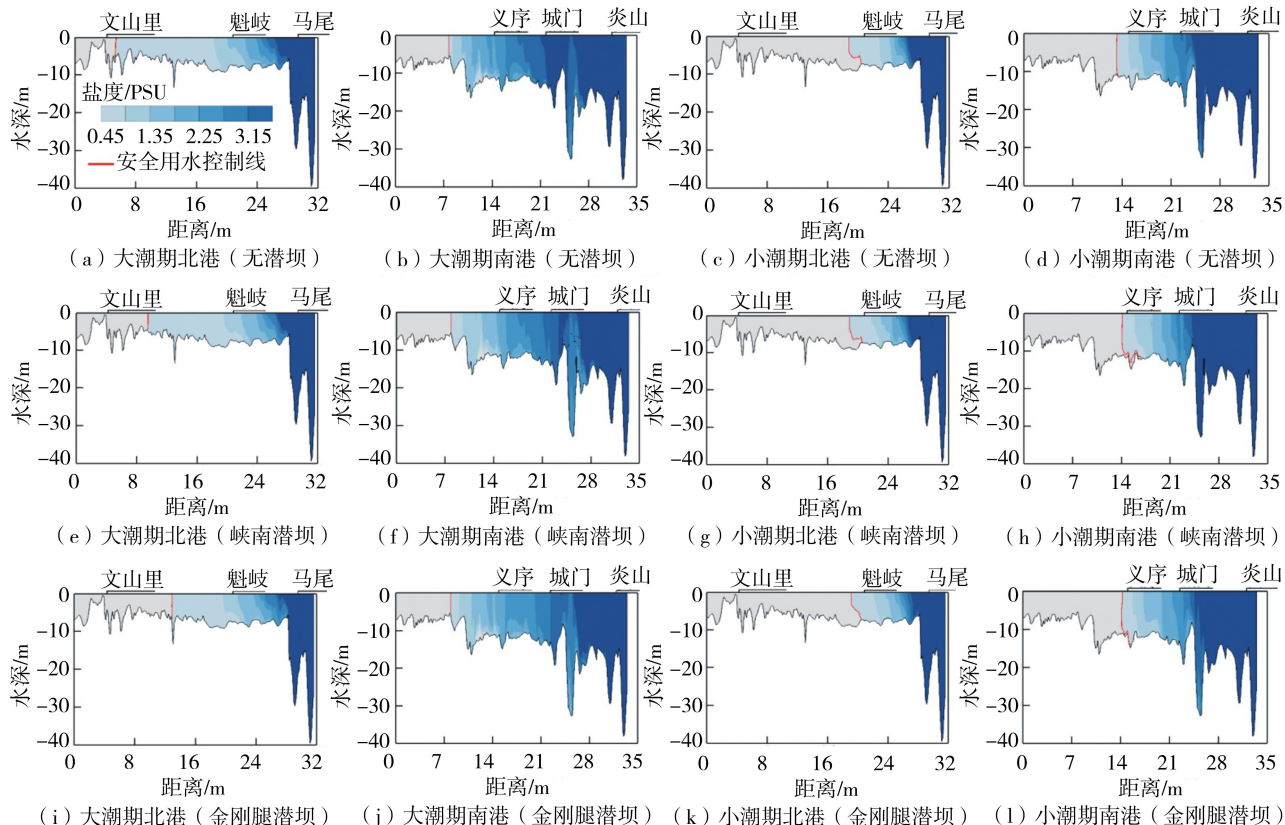


图8 不同潜坝工况下咸潮入侵纵断面盐度分布

Fig. 8 Longitudinal section distributions of saltwater intrusion under different submerged dike conditions

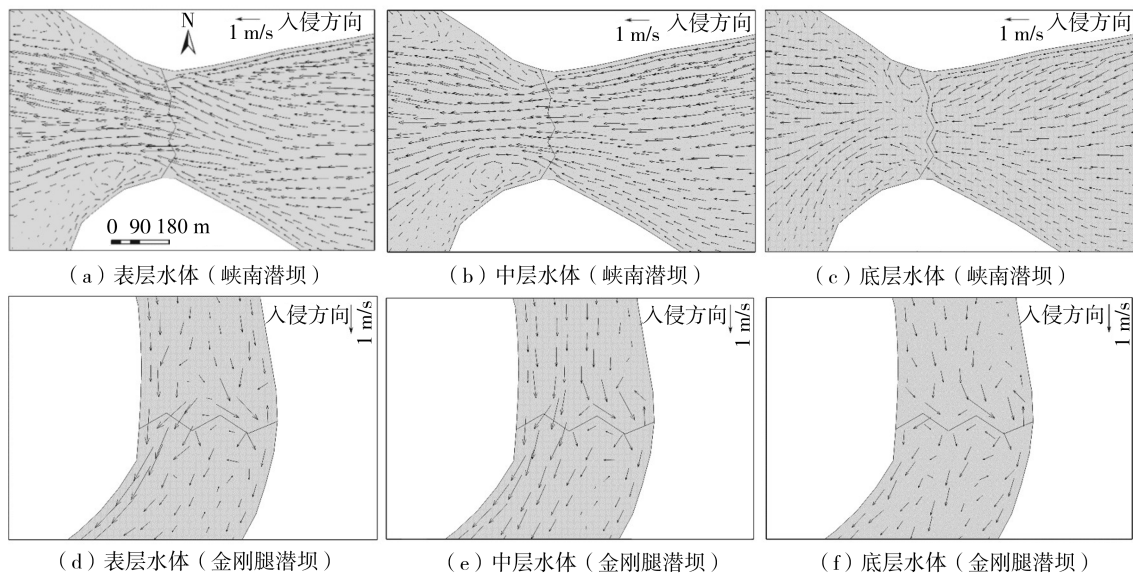


图9 不同潜坝工况下的流速分布

Fig. 9 Velocity distributions under different submerged dike conditions

水库综合配水、河道泥沙治理、河道监测预警等多种工程和非工程措施的组合开展咸潮上溯综合治理。

4 结 论

a. 河底潜坝的设置对咸潮入侵具有一定的抑制效果。潜坝对底层水体盐度的削减程度优于对表层水体盐度的削减程度,下游潜坝的抑咸效果优于上游潜坝。

b. 大、小潮期潜坝对咸潮入侵时水分层较明显的宽浅河道抑咸效果优于水体充分混合的窄深河道。

c. 潜坝改变了底层水体的流速与流向,使底层水流偏转,并产生小范围涡流,进一步抑制了咸潮的继续上溯。

参考文献:

[1] 黄磊,王长科,巢清尘. IPCC《气候变化与土地特别报告》解读[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 1-8. (HUANG Lei, WANG Changke, CHAO Qingchen. Interpretation of IPCC special report on climate change and land[J]. Climate Change Research, 2020, 16(1): 1-8. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 杨芳,何颖清,卢陈,等. 珠江河口咸情变化形势及抑咸对策探讨[J]. 中国水利, 2021(5): 21-23. (YANG

Fang, HE Yingqing, LU Chen, et al. Changes of seawater invention situation in the Pearl River estuary and salinity reduction solutions [J]. China Water Resources, 2021 (5): 21-23. (in Chinese))

[4] CHANG Qinpeng, ZHENG Tianyuan, ZHENG Xilai, et al. Effect of subsurface dams on saltwater intrusion and fresh groundwater discharge [J]. Journal of Hydrology, 2019, 576: 508-519.

[5] 李磊,宋亚卿. 基于 HEC-RAS 的潜坝工程实施效果影响分析[J]. 人民黄河, 2023, 45(增刊2): 42-44. (LI Lei, SONG Yaqing. Analysis of the influence of the implementation effect of the submerged dam project based on HEC-RAS[J]. Yellow River, 2023, 45(Sup2): 42-44. (in Chinese))

[6] GE Jianzhong, CHEN Changsheng, QI Jianhua, et al. A dike-groyne algorithm in a terrain-following coordinate ocean model (FVCOM): development, validation and application[J]. Ocean Modelling, 2012, 47: 26-40.

[7] 官庆朔,玄鹏,吴先敏,等. 河道丁坝群水流特性及其作用分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 93-96. (GUAN Qingshuo, XUAN Peng, WU Xianmin, et al. Analysis of flow characteristics and effects of spur dike group[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(12): 93-96. (in Chinese))

[8] RUMER R R, HARLEMAN D R F. Intruded salt-water wedge in porous media [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1963, 86(9): 193-220.

[9] 唐杰,吕贤弼,余常昭. 地下水咸淡水混合带动态特性试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(1): 6A3-66. (TANG Jie, LYU Xianbi, YU Changzhao. Experimental investigation the mechanisms of freshwater-saltwater transition zone in groundwater [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1998, 38

- (1):63-66. (in Chinese))
- [10] YOSSEF M F M, DE VRIEND H J. Flow details near river groynes: experimental investigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(5): 504-516.
- [11] 罗丹, 卢陈, 高时友. 潜伏式抑咸活动拍门的研究[J]. 人民珠江, 2011, 32(4): 1-2. (LUO Dan, LU Chen, GAO Shiyu. Study on latent salt suppression activity door[J]. Pearl River, 2011, 32(4): 1-2. (in Chinese))
- [12] 王青, 吕紫君, 孙杰, 等. 基于水幕方法的珠江河口抑咸对策[J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 50-56. (WANG Qing, LYU Zijun, SUN Jie, et al. Study on measures of saline water intrusion control to Pearl River Estuary based on water curtain method[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 50-56. (in Chinese))
- [13] ABDOLHALIK A, AHMED A A. The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers: experimental and numerical study [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 199: 62-73.
- [14] ABDOLHALIK A, AHMED A, HAMILL G A. A new physical barrier system for seawater intrusion control [J]. Journal of Hydrology, 2017, 549: 416-427.
- [15] ABDOLHALIK A, ABDELGAWAD A M, AHMED A A, et al. Assessing the protective effect of cutoff walls on groundwater pumping against saltwater upconing in coastal aquifers [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 323: 116200.
- [16] CHANG Yawen, CHEN Xuequn, LIU Dan, et al. Study on the control of saltwater intrusion using subsurface dams [J]. Water, 2023, 15(22): 3938.
- [17] 程香菊, 詹威. 数值分析磨刀门水道咸潮上溯控制工程措施的效应[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(5): 597-604. (CHENG Xiangju, ZHAN Wei. Modeling approach to assess the effects of controlling engineering measures on saltwater intrusion in Modaoh Estuary [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(5): 597-604. (in Chinese))
- [18] SENTHILKUMAR M, ELANGO L. Modelling the impact of a subsurface barrier on groundwater flow in the lower Palar River basin, Southern India [J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19(4): 917-928.
- [19] 吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 等. 水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 32-40. (LYU Panpan, SONG Jian, WU Jianfeng, et al. A numerical simulation study for controlling seawater intrusion by using hydraulic and physical barriers [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 32-40. (in Chinese))
- [20] EMARA S R, GADOT A, ZEIDAN B A, et al. Evaluating the impact of inclined cutoff-wall to control seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers [J]. Water Resources Management, 2023, 37(15): 6021-6050.
- [21] CHEN Changsheng, BEARDSLEY R C, COWLES G, et al. An unstructured grid, finite-volume community ocean model: FVCOM user manual [R]. New Bedford: University of Massachusetts Dartmouth, 2013.
- [22] ZHOU Zaiyang, GE Jianzhong, VAN MAREN D S, et al. Groyne-induced effects on channel-shoal exchange and saltwater intrusion in estuarine environments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 150(1): 04023056.
- [23] 黄雅丽, 盛晟, 胡朝阳, 等. 感潮河段枯水期盐度模型构建与咸潮上溯影响研究 [J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 150-159. (HUANG Yali, SHENG Sheng, HU Zhaoyang, et al. Construction of salinity model for tidal reaches during dry seasons and study on influence of saltwater intrusion [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 150-159. (in Chinese))
- [24] WANG Ziyuan, GUAN Yiqing, ZHANG Danrong, et al. Research on seawater intrusion suppression scheme of Minjiang River Estuary [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(6): 5211.
- [25] 赵树林. 基于多期河床地形的闽江下游采砂问题分析 [J]. 地下水, 2022, 44(6): 260-262. (ZHAO Shulin. Analysis of sand mining problem in the lower reaches of Min River based on multi-period riverbed topography [J]. Ground Water, 2022, 44(6): 260-262. (in Chinese))
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 于寒, 刘桂梅, 纪棋严, 等. 基于 FVCOM 的福建连江海域潮汐潮流数值模拟 [J]. 海洋预报, 2022, 39(6): 1-12. (YU Han, LIU Guimei, JI Qiyang, et al. Numerical simulation of tide and tidal current in Lianjiang sea area of Fujian Province based on FVCOM [J]. Marine Forecasts, 2022, 39(6): 1-12. (in Chinese))
- [29] 吴自库, 范海梅. 南海东北部海域潮汐模式的模型参数最优估计 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2007, 22(4): 442-449. (WU Ziku, FAN Haimei. Optimal estimation of parameters for a tidal model in the Northeast South China Sea [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(4): 442-449. (in Chinese))
- [30] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程测量规范: JTS 131—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

(收稿日期: 2024-10-16 编辑: 施业)