

东山八尺门海堤开口水动力及冲淤影响数值研究

万艳

(福建省水产设计院, 福建 福州 350003)

摘 要: 使用区域海洋模式建立了东山湾—诏安湾海域三维水动力-泥沙耦合模式,通过比较实测数据和模式计算的潮流场数据,验证了模式的模拟效果。在此基础上,用数值模式模拟了八尺门海堤开口前后的水动力特征、泥沙冲淤分布特征及变化情况。结果表明:海堤开口后,八尺门东侧水道流速增大,西侧水道流速减小,汇潮线西移,从而使八尺门东侧水道从淤积区域转化为冲刷区域,西侧水道从冲刷区域转化为淤积区域。海堤开口后八尺门水道的余流从东山湾流向诏安湾,使东山湾和诏安湾的海水半交换周期减少,八尺门附近的水动力环境有改善。

关键词: 数值模式;水动力;泥沙;东山湾

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)06-0013-12

1 引言

由于半封闭海湾的水体滞留时间较长,水交换和净化能力较弱,人类活动频繁,大部分海湾出现了严重的富营养化、水质恶化和生态系统退化等问题。尽管许多国家和地方政府已经开展了相应的环保行动,但评估其对水环境变化的有效性需要长期的监测技术和数据支持^[1]。

从不同角度可以对海水交换率进行不同定义。PARKER等^[2]定义了涨潮时流入湾内的海水中含第一次进入湾内的外海水的比率为海水交换率。柏井诚^[3]则从流出考虑,即落潮时流出水含第一次流出湾外的湾内水的比率为海水交换率。早期人们通过实测数据计算海水交换率。近年来由于数值计算的兴起,带动国内外学者对一些海湾作了潮流和污染物扩散过程的数值模拟,研究方法主要包括箱式模型、标识质点数值跟踪法、对流-扩散水交换模型和三维潮流场及物质输送模型等。潘伟然^[4]利用现场观测数据,采用单箱模型和二维数值模型分别计算了湄洲湾海水的平均交换率、平均半更换期和各区段海水的半更换期;LIN等^[5]利用二维浅水动

力有限元模式(Shallow water Hydrodynamic Finite Element Model, SHYFEM)计算了三沙湾的海水交换率;YUAN等^[6]利用有限体积海岸海洋模式(Finite-Volume Coastal Ocean Model, FVCOM)计算了土地复垦和跨湾大桥建设等人为干预行为如何影响胶州湾的水交换能力,结果表明土地复垦会显著增加湾内水的停留时间,而跨湾大桥建设对水交换能力的影响十分有限。

不同海域的流场、地形和边界条件的差异,导致不同海域水交换能力不同。福建东山八尺门海堤的建成,切断了东山湾和诏安湾之间的水体交换,使海湾水体交换受阻,淤积严重,加上各类污染物的排放,使八尺门及其两侧水域的水环境恶化,严重影响了当地人民的生产和生活。八尺门海堤的打通,能否使东山湾和诏安湾的海水互相畅通,加快东山湾的水体交换频率?使用数值模拟评估八尺门海堤开口后对周围海域水动力和冲淤的影响是评判八尺门海堤是否应开口的前期研究工作之一。

东山湾是我国东南沿海一个典型的亚热带潮汐河口湾,水域面积为230 km²,大部分海域的水深小于5 m,湾口处东门屿附近海域的水深达到或超

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-07-01。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1407502); 国家自然科学基金(41876004)。

作者简介: 万艳(1979-),女,高级工程师,硕士,主要从事海洋观测、评价和防灾减灾工作。E-mail:wanyanfy@163.com

过 15 m^[7]。湾内入海河流主要为漳江,流域面积为 820 km²,是东山湾泥沙的主要来源^[8]。东山历年平均风速为 7.1 m/s,冬季以东北风为主,夏季以西南风为主,最大风速达 40 m/s。诏安湾水域面积为 153 km²,与东山湾仅隔一座八尺门海堤,2/3 海域的水深小于 5 m,湾口水深为 5~10 m^[9]。前人通过数据统计分析和数值模拟等方式对东山湾进行了研究。郑斌鑫等^[10]获得了东山湾深槽潮流和余流特征,涨潮流速最大可达 0.83 m/s,落潮流速最大可达 1.52 m/s,表层余流朝向湾口,底层余流朝向湾顶。李振云等^[11]利用位于东山湾及附近海域 5 个潮位观测站的实测数据,分析了东山湾的潮汐性质,结果表明,东山湾为正规半日潮,最大潮差为 4.32 m。秦晓等^[12]通过数值模拟计算了东山湾的自净能力,结果表明,东山湾大潮和小潮的半交换周期分别为 8.13 d 和 13.0 d,湾口水交换能力最强且向湾顶逐渐变弱。梁群峰等^[8]结合东山湾的海图和实测水深资料,分析了东山湾内近 50 a 的海底冲淤变化特征。

区域海洋模式 (Regional Ocean Modeling System, ROMS)^[13]近年来被广泛应用于海湾、近岸及大洋等区域的研究。此前,郭民权等^[14]通过 ROMS 建立了九龙江河口的泥沙输运模型,很好地模拟了洪水期间九龙江河口的泥沙冲淤变化;张世民等^[15]利用 ROMS 模拟并预测了东碇倾倒区疏浚悬沙输移规律及海床冲淤变化;邢传玺等^[16]利用 ROMS 建立了普兰店湾的潮流模型,并计算了普兰店湾的水交换时间。

本文通过 ROMS 模式分析了八尺门开口前后的水动力环境和泥沙冲淤变化情况,模式方案选择海堤开口 423 m 且在海堤附近疏浚 1.39 km²。本文主要对水域的流速、流态、余流、海水半交换周期和泥沙冲淤的变化进行对比分析,探究八尺门海堤对东山湾和诏安湾的水动力和泥沙冲淤的影响。

2 模型配置和验证

2.1 模型简介

本文采用的 ROMS 模型由美国罗格斯大学海洋与海岸科学研究所和加利福尼亚大学洛杉矶分校共同研发。该模型使用海洋原始方程模型进行并行计算,在近年的海洋科学研究中得到广泛应

用。模型在水平方向上采用曲线正交的坐标系,垂向上采用地形跟随的 S 坐标^[17],在浅海和复杂地形区域有更密集的垂直分层,能较好地模拟不规则的大陆架地形。此外,ROMS 内含生态、海冰、泥沙和波浪等模块,可将多模块结合用于海洋的预报^[18]。

2.2 悬沙输运模块

ROMS 模式可以定义粘性和非粘性两种类型的泥沙,通过泥沙的中值粒径、密度和沉降速率等参数可以区分砂、粉砂和粘土等多种泥沙种类。模式还需要初始化河床底沙的特性,包括底沙的层数、每层的厚度、空隙度以及各种泥沙的分配比例^[19]。

ROMS 中的悬沙输运模块可以表示为:

$$\frac{\partial(H_z C)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z C)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z C)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega H_z C)}{\partial s} = -\frac{\partial}{\partial s} \left(\overline{c'w'} - \frac{v_\theta}{H_z} \frac{\partial C}{\partial s} \right) + C_{\text{source}} \quad (1)$$

式中: u 、 v 和 Ω 分别表示水平方向 (x 和 y) 和垂直方向 (s) 某一层的流速, x 、 y 是水平坐标系, s 是垂向地形拟合坐标; H_z 是计算层的厚度; $\overline{c'w'}$ 表示湍流扩散引起的泥沙在垂向上的平均通量; v_θ 表示背景泥沙垂向扩散系数,取 $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; C 代表泥沙浓度, $C_{\text{source},m}$ 表示泥沙的源汇项。对于悬沙,需要考虑悬沙的沉降过程 (汇) 以及河床泥沙的再悬浮过程 (源),源汇项表示为:

$$C_{\text{source},m} = -\frac{\partial w_{s,m} C_m}{\partial s} + E_{s,m} \quad (2)$$

式中: $w_{s,m}$ 表示泥沙的沉降速度; $E_{s,m}$ 表示底部的侵蚀通量; m 表示不同的泥沙种类。侵蚀通量通过 ARIATHURAI 等^[20]的参数化方法实现,即:

$$\text{当 } \tau_{sf} > \tau_{ce,m} \text{ 时, } E_{s,m} = E_{0,m} (1 - \varphi) \frac{\tau_{sf} - \tau_{ce,m}}{\tau_{ce,m}} \quad (3)$$

式中: $E_{0,m}$ 是河床侵蚀强度 (单位: $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); φ 是表层泥沙的孔隙度; τ_{sf} 和 $\tau_{ce,m}$ 分别表示床面剪切应力和临界侵蚀应力。模型同时考虑了泥沙浓度对水动力的影响,考虑泥沙浓度后的水体密度为:

$$\rho = \rho_{\text{water}} + \sum_{m=1}^{N_{\text{sed}}} \frac{C_m}{\rho_{s,m}} (\rho_{s,m} - \rho_{\text{water}}) \quad (4)$$

式中: ρ_{water} 表示水体的密度,它是温度、盐度和压强的函数; N_{sed} 表示所定义的泥沙种类; $\rho_{s,m}$ 和 C_m 分别

表示第 m 种泥沙的密度和浓度。

2.3 模型基本配置

本文的计算区域为福建省诏安湾、东山湾及相邻海域 ($23.39^{\circ} \sim 24.03^{\circ} \text{N}$, $117.09^{\circ} \sim 117.83^{\circ} \text{E}$, 见图1), 网格数为 $1\,200 \times 1\,200$ 。本次计算采用曲线正并网格, 模型在各海域的水平分辨率不一, 八尺门海堤附近约为 30 m , 东山湾和诏安湾海域约为 60 m , 外海约为 80 m 。模型垂向分20层。表层风应力、短波辐射和蒸发降雨等驱动场由欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF) 大气再分析产品的 6 h 间隔数据插值得到, 初始场和开边界的水位、温度、盐度和流速采用法国墨卡托海洋中心 (Mercator Ocean) 的业务化产品插值得到。在漳江河口地区需考虑相应月份漳江的流量以及含沙量, 漳江流量取5月的多年平均值, 约为 $40\text{ m}^3/\text{s}$ 。边界条件的水平混合采用 SMAGORINSKY^[21] 的混合方案, 垂向混合采用 MELLOR 等^[22] 提出的湍流封闭模型。开边界由业务化运行的台湾海峡三维数值模型^[17-18] 所产生的环流水位叠加波赛冬全球潮汐模型 (TOPEX/Poseidon global tidal model, TPXO7)^[23] 的16个分潮 ($2N_2$ 、 J_1 、 K_1 、 K_2 、 L_2 、 M_1 、 M_2 、 MU_2 、 N_2 、 NU_2 、 O_1 、 OO_1 、 P_1 、 Q_1 、 S_2 和 T_2) 的潮汐调和常数计算得出。模型考

虑了干湿网格, 临界水深设置为 0.2 m 。泥沙模块的参数配置方法见文献[14]。

根据福建省水产研究所提供的《福建省东山八尺门海堤工程水文动力测验报告》粒度分析所得的粒径谱分布特征, 本文将实际泥沙看作是由两种特征粒径的泥沙组份构成。这两种组份分别为: 特征粒径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的组份, 代表粒径小于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的粘土, 体积占比约为 40% ; 特征粒径为 $8\text{ }\mu\text{m}$ 的组份, 代表粒径在 $4 \sim 16\text{ }\mu\text{m}$ 之间的粉沙, 体积占比约为 60% 。无论是泥沙浓度分布还是底质冲淤变化, 模型最终的输出结果都是对上述两种粒径组份进行加和运算后的结果。

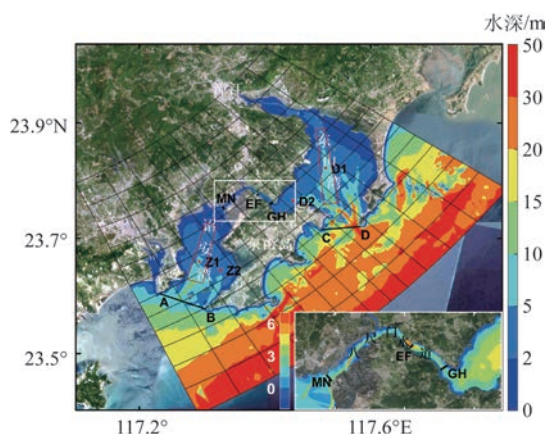
模型初始化于2020年5月1日00时(世界时, 下同), 计算至2020年6月1日00时, 分别计算了八尺门海堤开口前后情景。

2.4 潮流与泥沙验证

为了验证模式的准确性, 选取了2020年5月24—25日东山湾和诏安湾不同站点的潮流数据以及含沙量数据, 将其与模式结果进行验证, 结果见图2—5。D1和D2位于东山湾, Z1和Z2位于诏安湾(见图1), 图中表层、中层和底层分别为 0.2 、 0.6 和 0.8 倍的当地水深。

从整体来看, 东山湾和诏安湾潮流流速和流向的观测值和计算值有良好的一致性(见图2和图3)。计算流速和观测流速总体的均方根误差不超过 0.36 m/s , 表层、中层和底层误差最小的都是D1, 误差分别为 0.14 m/s 、 0.14 m/s 和 0.19 m/s , 误差最大的都是Z2, 误差分别为 0.36 m/s 、 0.30 m/s 和 0.32 m/s 。D1和Z1表现较优, 究其原因是D1和Z1处于深槽航道中, 流速较大。尽管在潮流验证结果上, 个别站点还存在一定的偏差, 但从整体来看, 流速和流向的观测值和计算值的幅值相差很小, 形态也基本吻合, 模型能较为准确地模拟出东山湾和诏安湾的潮流场特征, 具有较高的模拟精度。

图4为D1和D2的悬沙浓度验证效果, 模型计算值整体比观测值低, 但基本能反映东山湾悬沙浓度随时间的变化以及表层浓度低的趋势。尤其在D1的中层和底层, 模型能较好地模拟出悬沙浓度的峰值时刻。



注: 红点D1、D2、Z1和Z2分别代表东山湾和诏安湾的潮流验证点, 两个红框分别为东山湾深槽和诏安湾深槽; AB、CD、EF、GH和MN为计算海水半交换周期所用到的边界; 模型实际网格分辨率为图中网格分辨率的 $1/100$

图1 模型网格区域及地形图

Fig.1 Model grid domain and topography

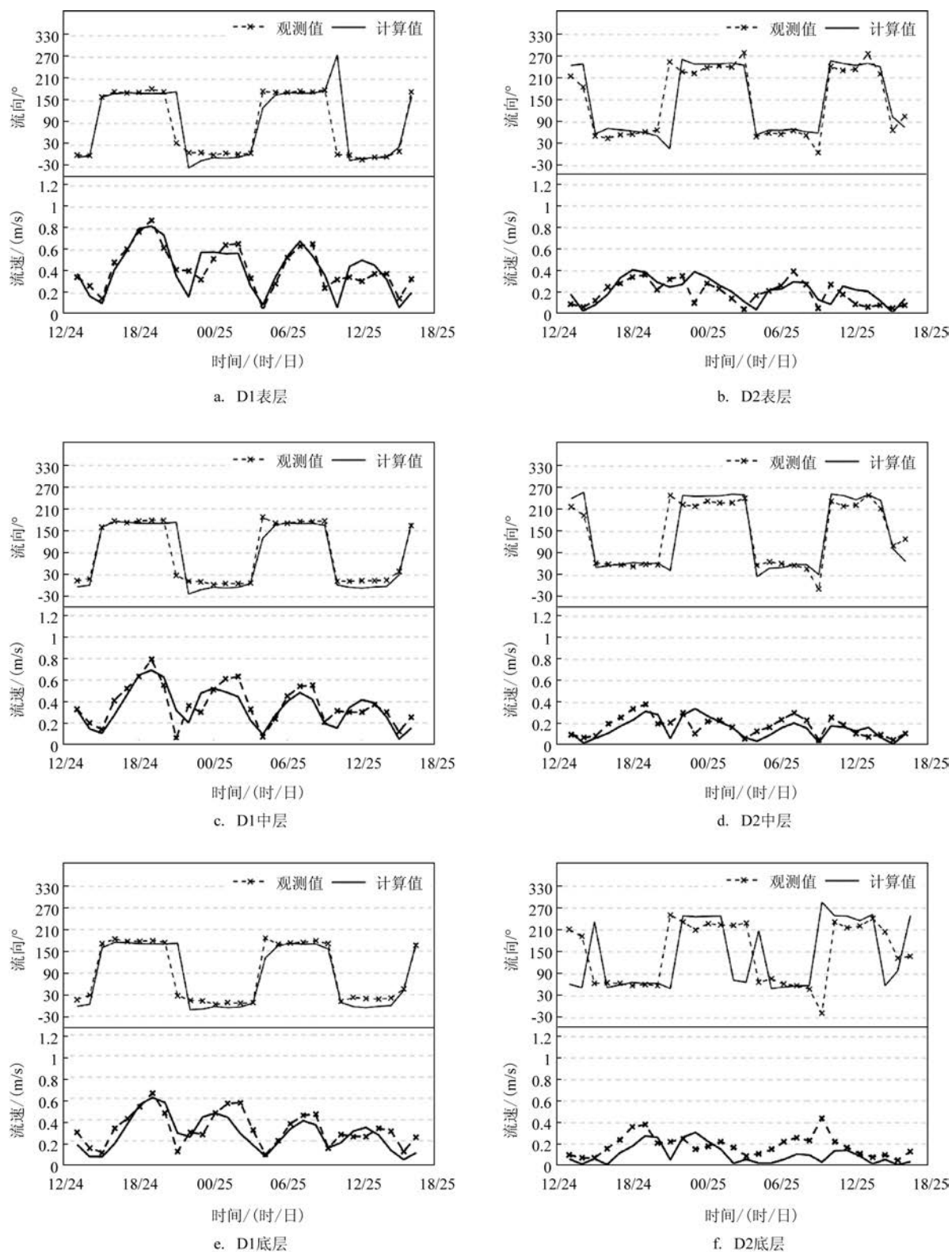


图2 东山湾潮流验证图

Fig.2 Tidal current verification of Dongsan Bay

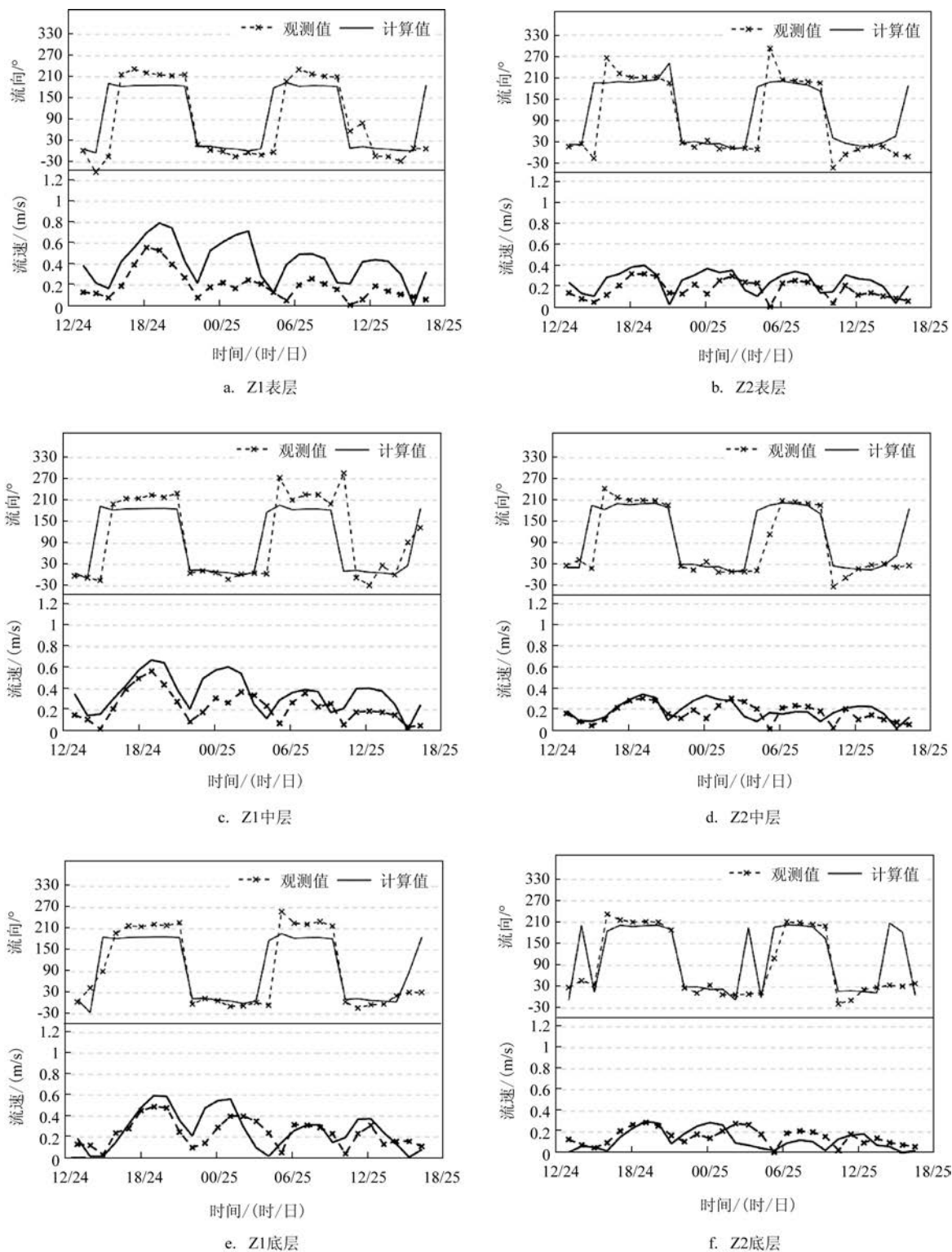


图3 诏安湾潮流验证图

Fig.3 Tidal current verification of Zhao'an Bay

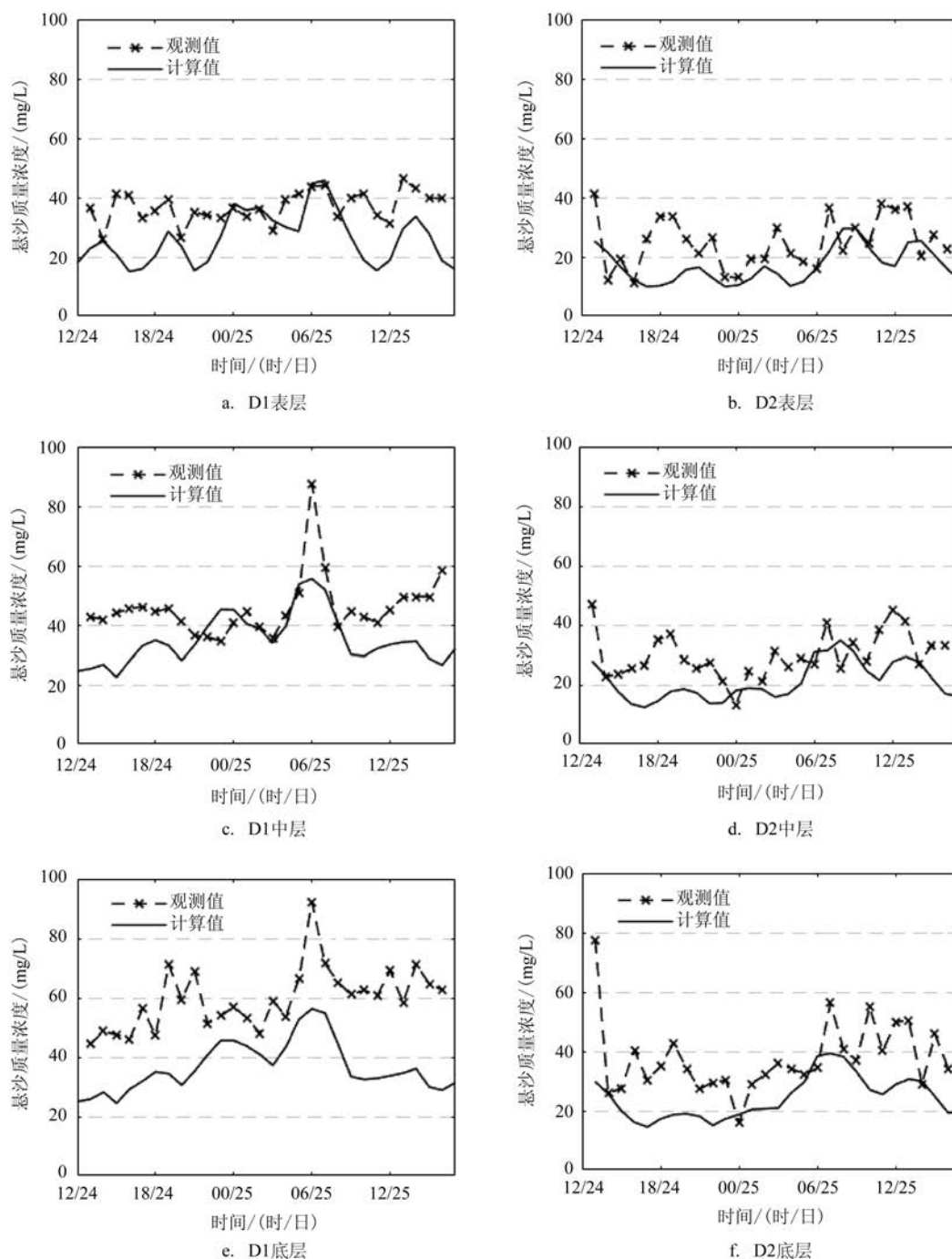


图4 东山湾悬沙浓度验证图

Fig.4 The suspended sediment concentration verification of Dongshan Bay

3 结果分析

3.1 流速百分比与流态变化

根据模型计算结果,以5月24日13—18时作为

落潮过程,以5月24日18时—25日01时作为涨潮过程,分别将海堤开口前后在落潮过程和涨潮过程时间内的平均流速进行对比,得到涨落潮流速变化百分比(见图5)。

落潮时(见图5a、c),东山湾流速增加,深槽处

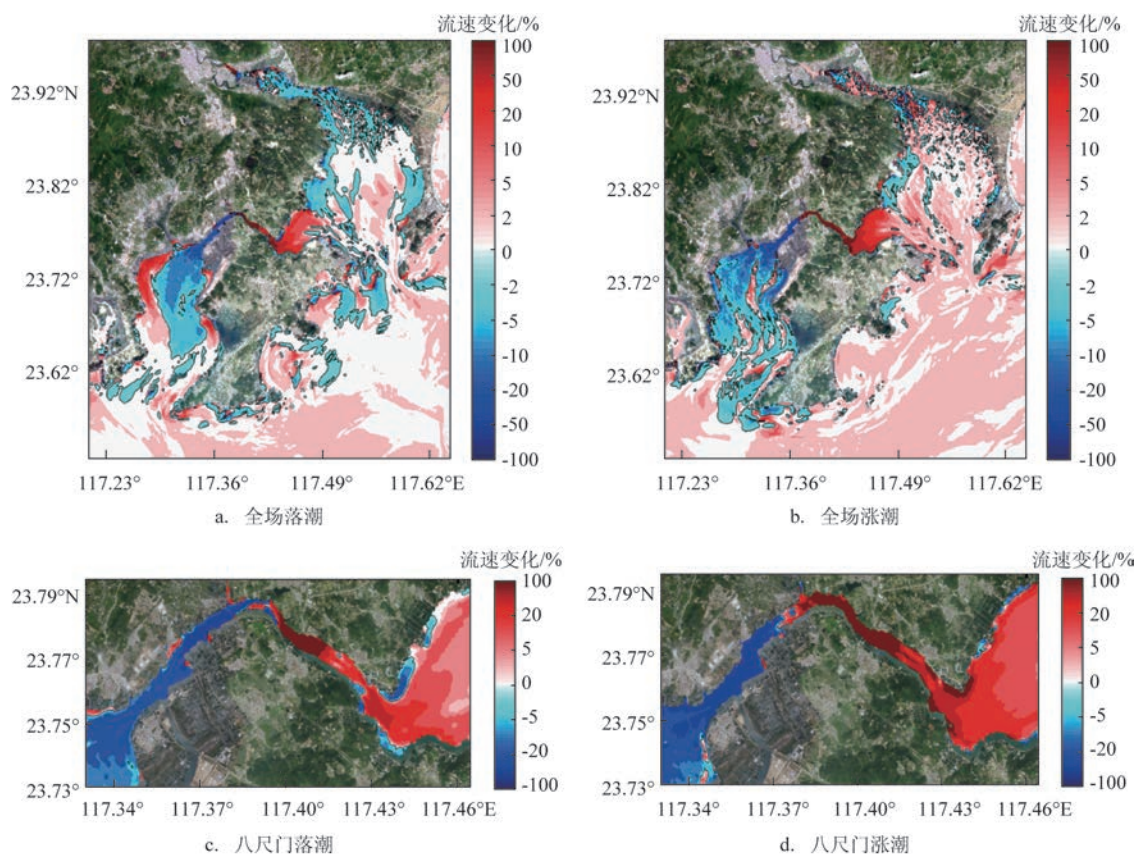


图5 涨落潮平均流速变化百分比图

Fig.5 Percentage change of average velocity of high tide and low tide

流速小幅增加 0.37%~1.92%; 诏安湾流速减少, 深槽处流速小幅减小 1%~20%, 两岸部分流速增大了 10%~20%; 八尺门水道变化较大, 西侧水道流速大幅减小约 53%, 东侧水道流速大幅增加 100% 以上。涨潮时(见图 5b、d)与落潮时总体相似, 东山湾流速增加, 但深槽处流速小幅减少 1%~7%; 诏安湾流速减小, 深槽处流速小幅增加 1%~17%; 八尺门西侧水道流速大幅减小约 87%, 东侧水道大幅增加 100% 以上, 流速增大区域相比落潮时更加西移。以上变化主要是八尺门海堤开口后, 原在海堤处的汇潮线向西移动所致。

从八尺门水道的涨落急流态来看, 落急时(见图 6a), 水道内的分潮线从原来的海堤处移至东山岛西北侧处, 水道东侧潮流强度变大, 西侧潮流强度变小; 涨急时(见图 6b), 水道的东西侧潮流汇合处从原来的海堤处西移约 4~5 km 至东山岛西北侧, 水道东侧的潮流强度变大, 西侧潮流强度变小。

总体来说, 开口前后八尺门水道流速的变化非常剧烈, 东侧流速大幅度增加而西侧流速大幅度减小, 这是由于开口后原本位于八尺门海堤的汇潮线和分潮线西移约 4~5 km。

3.2 余流场变化

余流场是采用模型计算出的 5 月 11—31 日的平均余流。由图 7 可以看出, 八尺门海堤对诏安湾和东山湾的余流场基本没有影响, 两湾均表现出河口余流的主要特征, 即表层流向湾外(见图 7a、b), 底层流向湾顶(见图 7c、d), 这和陈金泉等^[24]的观测结果一致。两湾湾口及东山湾顶的漳江口区域的余流较强, 达 30 cm/s, 分别由外海环流和河口径流造成。两湾深槽区域的余流强度可达 10 cm/s, 有利于深槽维持, 有助于船舶航行。东山湾其余区域和诏安湾湾内的余流较弱。湾外外海环流的主要方向为从西到东, 这与东山湾外海的北向环流一致,

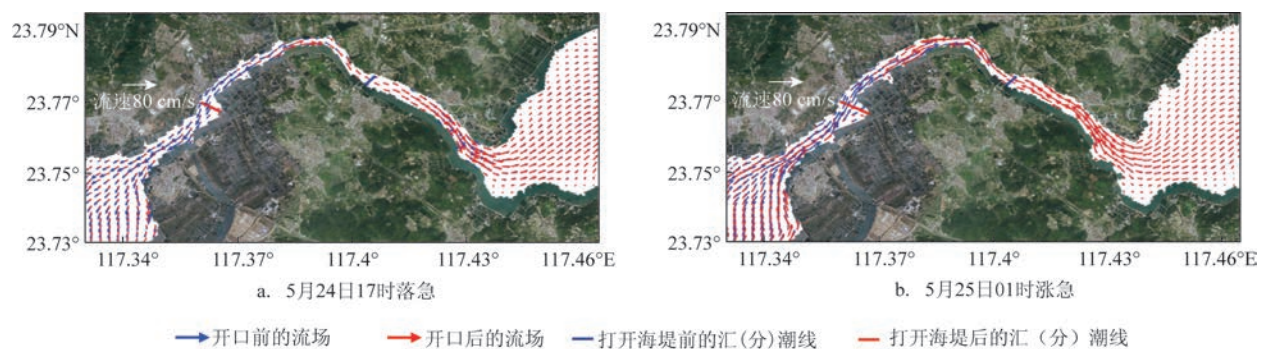


图6 八尺门水道涨落急垂向平均流态

Fig.6 Vertical average flow pattern at high and low tide in Bachimen channel

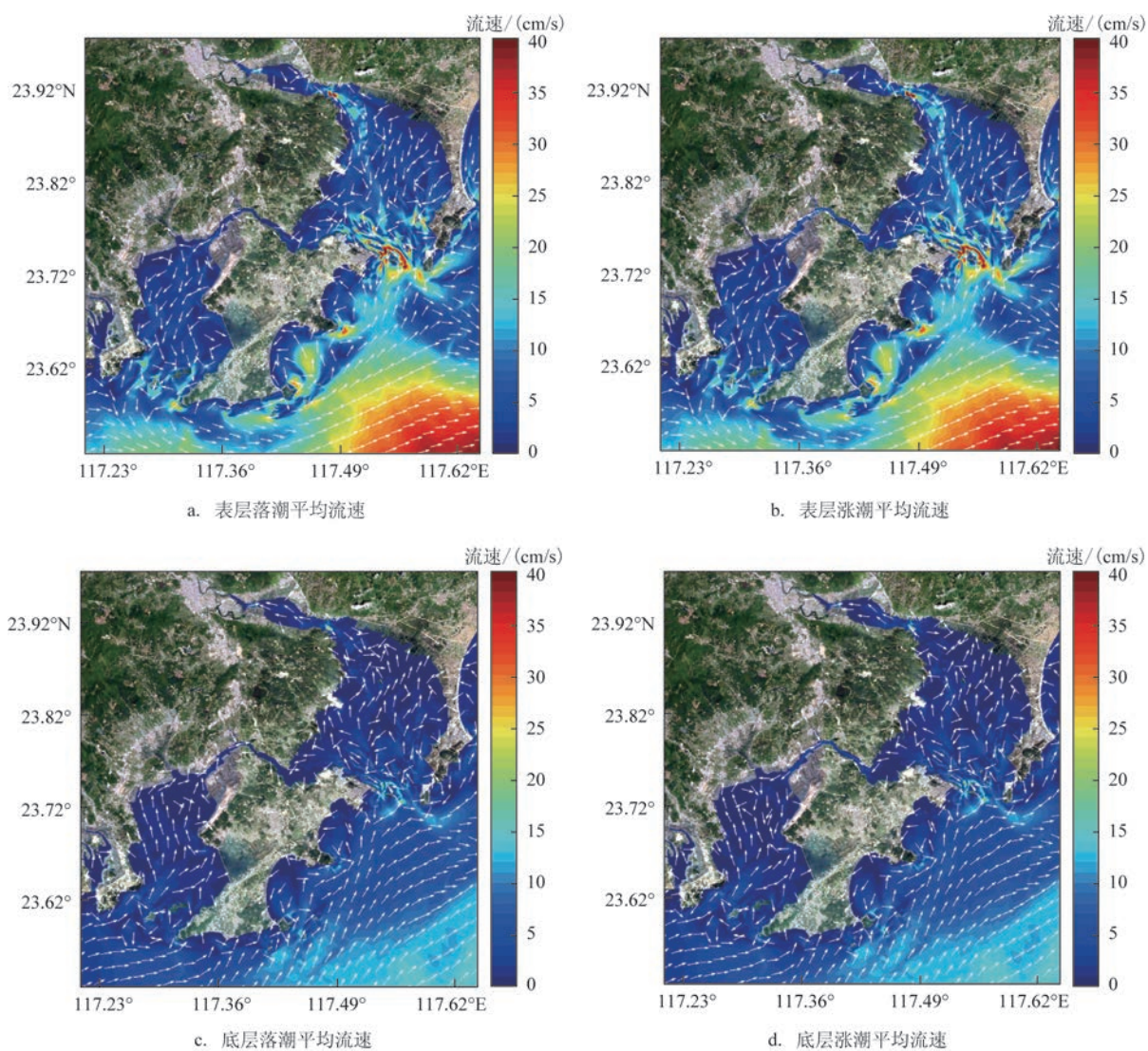


图7 开口前后余流场(白色箭头表示流向)

Fig.7 Residual flow field before and after the opening of channel (white arrow represents the flow direction)

余流流速可达 30 cm/s; 底层海流略偏左(见图 7c、d), 这与底部艾克曼层理论一致^[25]。

在八尺门水道内, 开口后在原海堤处出现明显的从水道东侧到西侧的余流(图略), 说明水道贯通后, 水流总体从东山湾进入诏安湾, 表层余流流速可达 10 cm/s。该海域夏季盛行西南风, 冬、秋季盛行东北风, 5 月为春末季风转换期。余流的动力机制及其他因素(如风和外海环流)对余流的影响是我们未来要进一步研究的内容。

3.3 海水半交换周期

使用 ROMS 的被动示踪物模块计算海水的半交换周期, 以 AB、CD 和 EF 为界定义东山湾和诏安湾的边界, 以 GH 和 MN 为界定义八尺门水道的边界。2020 年 5 月 12 日在各湾内设置被动示踪物, 初始浓度为 1, 计算时间超过 7 d, 经历了中潮和小

潮的过程。本文将各湾示踪物平均浓度经过 12 h 滑动平均后变为 0.5 所耗费的时间定义为海水半交换周期。

模式分别计算了东山湾、诏安湾、八尺门水道以及将东山湾和诏安湾当作一个整体的水体半交换周期。由表 1 可知, 开口前, 东山湾半交换周期为 1.54 d, 诏安湾半交换周期为 9.60 d, 东山湾和诏安湾总体半交换周期为 3.00 d, 八尺门水道半交换周期为 1.92 d; 开口后, 东山湾半交换周期为 1.50 d, 诏安湾半交换周期为 7.50 d, 东山湾和诏安湾总体半交换周期为 2.96 d, 八尺门水道半交换周期为 1.25 d。

开口后, 由于两个湾内的海水均多了一个交换口, 两个湾的半交换周期有不同程度的缩短, 东山湾的半交换周期缩短了 0.04 d, 诏安湾的半交换周期缩短了 2.1 d。东山湾的半交换周期较诏安湾明显减小, 是由于东山湾湾口的水深较深, 且受外海环流以及漳江径流影响, 从东山湾内交换出去的海水更易被外海水以及径流稀释。八尺门水道的半交换周期缩短了 0.67 d, 说明两个湾的海水可通过开口的八尺门水道进行水交换, 从而改善八尺门附近的水动力环境。

3.4 泥沙冲淤

泥沙冲淤采用 2.2 节的悬沙输运模块进行计算。东山湾和诏安湾的冲淤程度大体相似(见图 8), 两湾

表 1 八尺门海堤开口前后海水半交换周期(单位: d)
Tab.1 Seawater semi-exchange cycle before and after the opening of Bachimen seawall (unit: d)

时段	东山湾 (CD 和 EF 为界)	诏安湾 (AB 和 EF 为界)	东山湾和 诏安湾	八尺门 水道
开口前	1.54	9.60	3.00	1.92
开口后	1.50	7.50	2.96	1.25

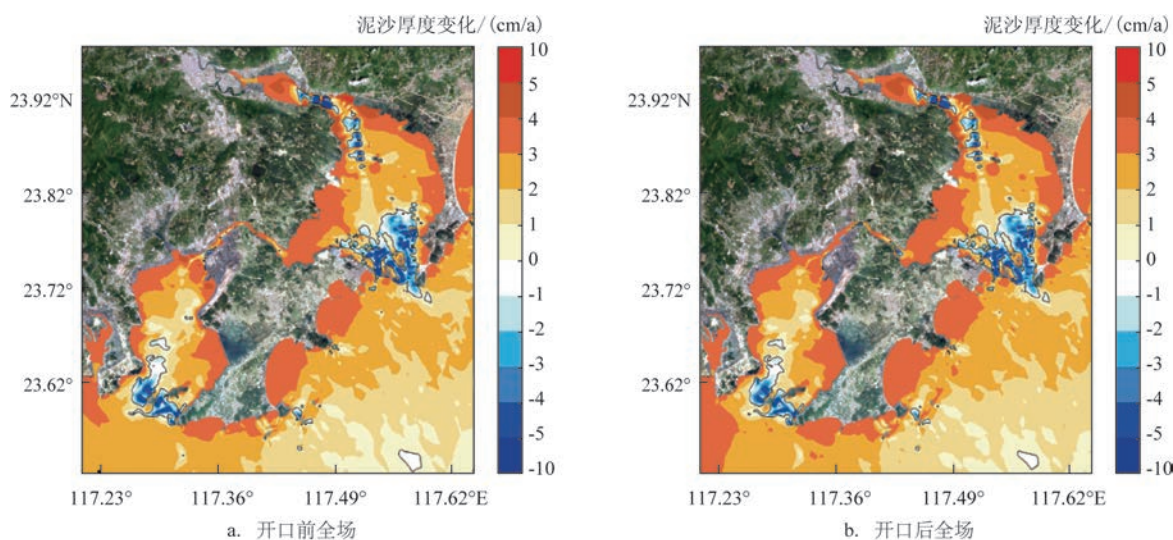


图 8 冲淤厚度分布图

Fig.8 Souring and silting thickness distribution

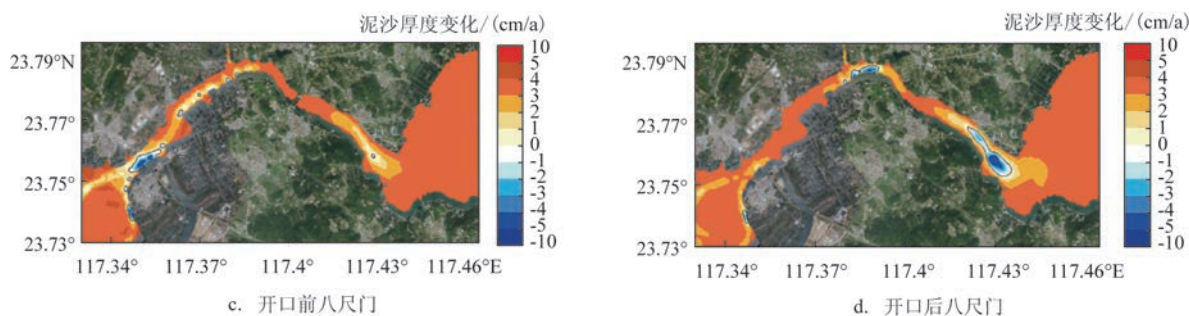


图8 (续)

Fig.8 (Continued)

主要为淤积区域,淤积量为 $1\sim 4\text{ cm/a}$;两湾的湾口以及漳江口深槽的冲刷程度较强,冲刷量为 $3\sim 10\text{ cm/a}$ 。开口前后冲淤程度的区别主要体现在八尺门水道内。开口前(见图8c),越靠近八尺门堤坝的区域淤积量越大,东侧水道和西侧水道的大部分区域为淤积区域,淤积量为 $1\sim 4\text{ cm/a}$,在接近诏安湾顶的区域有一定的冲刷程度,冲刷量为 $1\sim 5\text{ cm/a}$ 。开口后(见图8d),八尺门东侧水道由淤积区域转变为冲刷区域,冲刷量约为 $2\sim 10\text{ cm/a}$,西侧水道由冲刷区域转变为淤积区,淤积程度为 $1\sim 3\text{ cm/a}$ 。这是因为八尺门水道贯通后,水道东侧的流速增大,冲刷变强,该处的泥沙被带走,而水道西侧流速减小,泥沙沉降于此。

4 结论

本文通过ROMS模式建立了东山湾—诏安湾海域三维水动力-泥沙耦合模式,研究了八尺门海堤开口前后水动力环境和泥沙冲淤的变化。结果表明:当拆除八尺门海堤后,八尺门水道成为连通东山湾和诏安湾的水道,但因该水道比较窄,拆除后对水动力的影响主要在八尺门水道及邻近海区,水道附近的水动力有明显改善,而对东山湾和诏安湾整体的影响较小。海堤开口后,原本处于海堤位置的汇潮线西移,且有稳定的西向余流存在,两个湾的海水可通过八尺门水道进行交换,海水自净能力提高,但量值均较小。局部清淤对东山湾及诏安湾的改变影响较小。

总之,八尺门海堤已经建成60多年,其附近地形及岸线均有较大变动,但水动力已与地形达到了

新的平衡。单纯的局部清淤和海堤开口虽然会对海堤两侧水域的水动力条件有较大改善,但对东山湾和诏安湾水动力的改进有限。

致谢:厦门大学东山太古海洋观测与实验站提供研究数据,林文欣、张思明帮助调试模型及画图。

参考文献:

- [1] ZHU B Z, BAI Y, ZHANG Z, et al. Satellite remote sensing of water quality variation in a semi-enclosed bay (Yueqing Bay) under strong anthropogenic impact[J]. Remote Sensing, 2022, 14 (3): 550.
- [2] PARKER D S, NORRIS D P, NELSON A W. Tidal exchange at golden gate[J]. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1972, 98(2): 305-323.
- [3] 柏井诚. 海水交换概念和海水交换率[J]. 日本海洋学会志, 1984, 40(2): 135-147.
KASHIWAI M. The concept of tidal exchange and the tidal exchange ratio[J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1984, 40(2): 135-147.
- [4] 潘伟然. 湄洲湾海水交换率和半更替期的计算[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1992, 31(1): 65-68.
PAN W R. Computation of the turn-over rate and the half exchange period of seawater in Meizhou Bay[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 1992, 31(1): 65-68.
- [5] LIN H Y, CHEN Z Z, HU J Y, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics and water exchange in Sansha Bay[J]. Ocean Engineering, 2017, 139: 85-94.
- [6] YUAN Y, JALÓN-ROJAS I, WANG X H. Response of water-exchange capacity to human interventions in Jiaozhou Bay, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2021, 249: 107088.
- [7] 蔡月娥, 蔡爱智. 东山湾的现代沉积[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1987, 26(5): 609-614.
CAI Y E, CAI A Z. Recent Sedimentation of Dongshan Bay[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 1987, 26(5): 609-

- 614.
- [8] 梁群峰, 汪卫国, 赵蒙维, 等. 福建东山湾 1954~2008 年间的海底冲淤变化[J]. 应用海洋学学报, 2016, 35(1): 95-101.
- LIANG Q F, WANG W G, ZHAO M W, et al. Change of scouring and silting during 1954 to 2008 in the sea bed of Dongshan Bay, Fujian[J]. Journal of Applied Oceanography, 2016, 35(1): 95-101.
- [9] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第八分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- The Editorial Committee for Records of Bays in China. Records of bays in China: Volume 8[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.
- [10] 郑斌鑫, 李九发, 廖康明, 等. 福建东山湾潮流和余流特征研究[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(2): 188-195.
- ZHENG B X, LI J F, LIAO K M, et al. Study on the characteristics of tidal and residual currents in the Dongshan bay of Fujian[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(2): 188-195.
- [11] 李振云, 熊伟, 刘杰. 漳州东山湾附近海域潮汐特性分析[J]. 水道港口, 2021, 42(3): 334-338.
- LI Z Y, XIONG W, LIU J. Analysis on tidal characteristics near the Dongshan Bay of Zhangzhou[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2021, 42(3): 334-338.
- [12] 秦晓, 纪平, 赵懿珺. 东山湾水动力数值模拟及其纳潮量和水交换周期计算[J]. 水利水电技术, 2020, 51(6): 93-99.
- QIN X, JI P, ZHAO Y J. Hydrodynamic numerical simulation on Dongshan Bay and calculation of its tidal prism and water exchange cycle[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(6): 93-99.
- [13] SHCHEPETKIN A F, MCWILLIAMS J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. Ocean Modelling, 2005, 9(4): 347-404.
- [14] 郭民权, 江毓武. 九龙江河口洪水期悬沙及冲淤变化的数值模拟[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2010, 49(5): 688-693.
- GUO M Q, JIANG Y W. Distribution of suspended sediment and erosion simulation of the Jiulong river estuary during a flood process[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2010, 49(5): 688-693.
- [15] 张世民, 陈德文, 邓兆青. 东碇倾倒区疏浚泥悬沙输移和海床冲淤数值模拟[J]. 海洋通报, 2014, 33(5): 541-551.
- ZHANG S M, CHEN D W, DENG Z Q. Numerical simulation of dredged sediment transport and erosion in Dongding ocean dumping area outside the Xiamen Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(5): 541-551.
- [16] 邢传玺, 刘永青, 史文奇, 等. 普兰店湾水交换能力及排污布局合理性分析[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(6): 914-921.
- XING C X, LIU Y Q, SHI W Q, et al. Analysis on the water exchange capacity and effectiveness of present pollutants outlets layout around the Pulandian bay[J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(6): 914-921.
- [17] SONG Y H, HAIDVOGEL D. A Semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system[J]. Journal of Computational Physics, 1994, 115(1): 228-244.
- [18] HAIDVOGEL D B, ARANGO H, BUDGELL W P, et al. Ocean forecasting in terrain-following coordinates: formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System[J]. Journal of Computational Physics, 2008, 227(7): 3595-3624.
- [19] WARNER J C, SHERWOOD C R, SIGNELL R P, et al. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model[J]. Computers & Geosciences, 2008, 34(10): 1284-1306.
- [20] ARIATHURAI R, ARULANANDAN K. Erosion rates of cohesive soils[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1978, 104(2): 279-283.
- [21] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.
- [22] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4): 851-875.
- [23] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of Barotropic ocean tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2): 183-204.
- [24] 陈金泉, 傅子琅, 何发祥, 等. 厦门湾潮、余流及其对泥沙、污染物迁移的影响[J]. 台湾海峡, 1985, 4(1): 16-20.
- CHEN J Q, FU Z L, HE F X, et al. Tidal and residual currents in the Xiamen bay and their effects on the movement of silt and polluting substances[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1985, 4(1): 16-20.
- [25] 张云翼, 江毓武. 汕尾外侧冷水跨陆架输送的形成机制[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2012, 51(4): 746-752.
- ZHANG Y Y, JIANG Y W. The mechanism of cold water cross-shelf transport in the continental shelf off Shanwei[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2012, 51(4): 746-752.

Numerical study of the hydrodynamic and scouring and silting effects of the opening of the Bachimen seawall in Dongshan Bay

WAN Yan

(Fujian Fishery Engineering Construction and Design Institute, Fuzhou 350003, China)

Abstract: A three-dimensional hydrodynamic-sediment coupled model is established for the Dongshan Bay and Zhao'an Bay area using a regional ocean model, which is validated by the in-situ observation in the tidal field. Furthermore, the coupled numerical model is used to simulate the characteristics of hydrodynamics, sediment scouring and silting before and after the opening of the Bachimen seawall. The results show that the flow velocity of the eastern channel of the Bachimen increases after the opening of the seawall, while the flow velocity of the western channel decreases. In addition, the tidal convergent line moves westward, which makes the eastern channel turning from silting area to scouring area and the western channel turning from scouring area to silting area. After the opening of the seawall, the residual flow of the Bachimen channel flows from Dongshan Bay to Zhao'an Bay, which reduces the seawater semi-exchange cycle and improves the hydrodynamic environment near the Bachimen area.

Key words: numerical model; hydrodynamics; sediment; Dongshan Bay