

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202007015



有限体积海岸海洋模型模拟泉州湾 人工岛建设对水交换的影响

谢毅晖, 卢毅敏

(福州大学 数字中国研究院(福建), 福建 福州 350003)

摘要: 以泉州湾秀涂人工岛的建设为例, 基于有限体积海岸海洋模型, 建立泉州湾三维数值模型, 模拟分析建岛前、后水动力特征、潮致余流和纳潮量的变化. 采用欧拉弥散方法模拟污染物浓度的对流扩散, 对泉州湾的水交换能力进行分析. 结果表明: 建岛后, 大部分海域的海潮流速约减小 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 石湖港区人工岛连线以西大部分区域的潮致余流变化不显著, 但湾口的潮致余流出现较为明显的减少; 纳潮量的变化较为明显, 小潮期间纳潮量的变化率为 10.09% , 使小潮期间湾内水体与外海的交换能力变弱, 更易遭受污染威胁; 洛阳江流域和金屿的污染物浓度差变化较大, 导致湾内水体的半交换时间约增加 3 d.

关键词: 有限体积海岸海洋模型; 水交换; 数值模拟; 人工岛; 泉州湾

中图分类号: P 731.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2021)03-0369-09

Impact of Artificial Island Construction in Quanzhou Bay on Water Exchange Using Simulation of Finite-Volume Coastal Ocean Model

XIE Yihui, LU Yimin

(Digital China Research Institute (Fujian), Fuzhou University, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Taking the construction of the Xiutu artificial island in Quanzhou Bay as an example, a three-dimensional numerical model of Quanzhou Bay was established based on the finite-volume coastal ocean model, and the changes of hydrodynamic characteristics, tidal residual current and tidal capacity before and after the construction of the island were simulated and analyzed. Euler dispersion method was used to simulate the convection and diffusion of pollutant concentration, and the water exchange capacity of Quanzhou Bay was analyzed. The results showed that after the construction of the island, the tidal velocity in most of the sea area was decreased about $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The tidal residual current in most areas of the west of the artificial island line in Shihu Port area did not change significantly, but decreased markedly in the bay mouth. The change of tidal capacity was obvious, and the change rate of tidal capacity was 10.09% during neap tide, which weakened the exchange capacity between the water in the bay and the open sea during neap tide and made it more vulnerable to pollution. The difference of pollutant concentration between Luoyang River basin and Jinyu was large, which led to the increase of half exchange time of water in the bay by about 3 days.

Keywords: finite-volume coastal ocean model; water exchange; numerical simulation; artificial island; Quanzhou Bay

收稿日期: 2020-07-09

通信作者: 卢毅敏(1973-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事资源环境模型与系统模拟的研究. E-mail: luym@reis.ac.cn.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503500)

位于福建省泉州市的泉州湾是晋江、洛阳江汇合入海的半封闭海湾,北与莆田市湄洲湾相接,南与厦门市围头湾相邻,东濒台湾海峡.泉州湾具有丰富的渔业资源及独特的港口区位优势,对泉州及其周边地区的发展起到不可或缺的重要作用.为了提高泉州湾的对外交通能力及大宗货物集散的中心效应,承接泉州湾后渚港区的功能转换,替代泉州中心城区及其周边的货物集散运输功能,促进海上丝绸之路出海通道的形成^[1],经多方论证,泉州市政府决定建设秀涂人工岛^[2],秀涂人工岛工程位于泉州湾中部,石湖作业港区以北,通过围海回填形成,人工岛长 4 480 m,宽 800 m,工程用海 3.4 km²,可形成陆域 0.227 km².

目前,泉州湾海域的数值模拟研究多停留于水动力层次,关于泉州湾水交换能力的研究较少.林作梁等^[3]基于有限体积海岸海洋模型(FVCOM)分析泉州湾三维潮汐及潮流特性.杨晨等^[4]采用二维数学模型,对泉州湾潮流运动进行数值模拟.秀涂人工岛的建立不可避免地影响海域的水动力特征,进而影响水交换能力.水交换能力是描述海洋动力过程的参数,它直接影响湾内水体与外海的交换强度,进而影响海湾水质.不同海域的对流输运及稀释扩散能力导致其自我净化能力各不相同.对于自净能力较弱的海域,海湾内的污染物长期不能与外海水体进行交换,导致污染物在海湾内持续积累,造成富营养化等问题.

由于单一概念无法准确地描述海域的水交换能力.因此,学者定义了不同概念定量描述水交换能力.Bolin 等^[5]提出“寿命”的概念,用于描述水质点与研究区域经历的时间.Zimmerman^[6]在此基础上引入“滞留时间”,即水质点离开研究区域所需的时间.Luff 等^[7]定义了“半交换时间”,即污染物浓度变为初始浓度的一半所需的时间.欧拉弥散方法可定量分析海域的水交换能力,相较于其他方法,欧拉弥散方法在考虑对流的同时,还考虑了浓度的扩散过程,能够更加合理、准确地反映海湾水体污染物的扩散情况^[8-14].本文采用有限体积海岸海洋模型对泉州湾的潮汐、潮流进行模拟,定量分析泉州湾秀涂人工岛的建设对该海域水交换能力的影响.

1 有限体积海岸海洋模型及其应用

有限体积海岸海洋模型是基于不规则三角形网格、有限体积的三维数值模型^[15].该模型兼具有限元法和有限差分法的优点,可充分保证模型的动量、能量和质量,具有更好的守恒性.

泉州湾区域图,如图 1 所示.模型研究区域为泉州湾周边海域,西起晋江大桥,东至道仕屿与尖峰屿之间的水道,南起深沪湾南侧,北至龙屿水域,包含大、小坠门岛、大山屿等众多岛屿和暗礁.模型研究区域在水平方向划分为不重叠的非结构三角形网格,并在晋江、洛阳江流域及大、小坠门岛附近对网格进行加密,网格的最小分辨率为 110 m,开边界节点共 95 个,平均节点间距约为 1.6 km,区域网格点数为 8 797 个,单元格数量为 16 452 个;模型研究区域在垂直方向采用 σ 坐标系,平均分为 5 层,外模时间步长为 1 s,内模时间步长为 10 s.

泉州湾不规则三角形网格,如图 2 所示.建岛前、后不规则三角形网格只在人工岛附近有所不同,其余区域完全一致.模型采用的海岸线地形数据来自美国国家环境信息中心(NCEI),通过 GEODAS 软件进行提取.湾内水深数据采用中国人民解放军海军海道测量局(NGD)发布的 1 : 35 000 海图,湾外近海开边界附近的水深数据采用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)公布的全球地形水深数据,通过 SMS 软件将岸线数据闭合生成不规则三角形网格,并将水深数据插值到三角形网格节点中.开边界处潮位驱动采用潮汐预测软件 OTPS 预报的实时水位,模型主要考虑 K_1 , O_1 , M_2 , S_2 等 4 个主要分潮的影响,开边界 95 个节点处的时间序列潮位数据由 Matlab 软件的 TMD 程序包生成.外部强迫场数据主要考虑风、蒸发、降水和热通量的影响,数据来自再分析资料 CFSR,其时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 0.2°.模型采用正压模式,整个海域内初始温盐场为常数,不考虑温盐的时空变化.模式运行采用冷启动,即假设初始场流速从 0 开始.

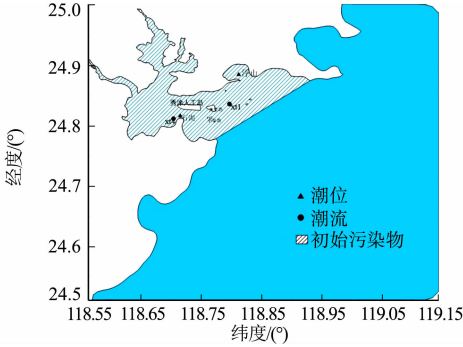
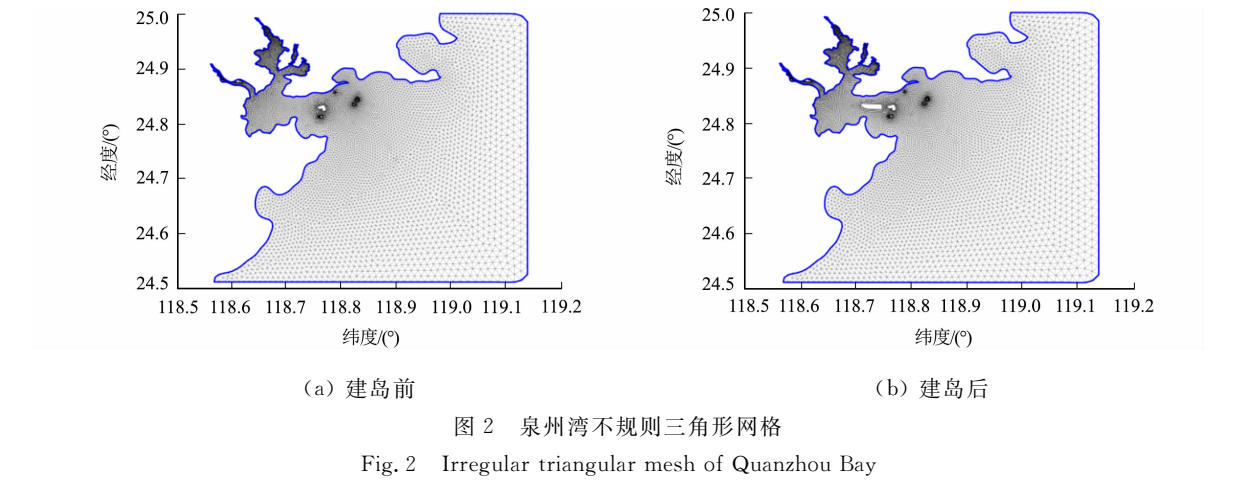


图 1 泉州湾区域图
Fig.1 Quanzhou Bay area map

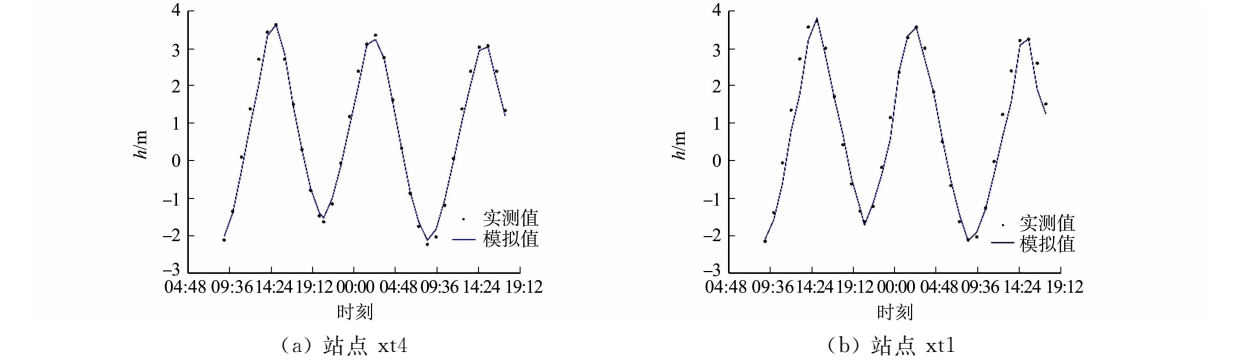


2 有限体积海岸海洋模型的验证

水动力模拟的时间段为 2016 年 9 月 1 日至 2016 年 10 月 30 日,共 60 d.模型从 9 月 4 日 0 时 0 分 0 秒开始输出,10 月 30 日 0 时 0 分 0 秒结束,每隔 1 h 输出 1 个结果,时长为 1 345 h.通过石湖(站点 xt1)和浮山(站点 xt4)两个潮流站点测定潮位、流速和流向实测值^[16],并与模型模拟值进行对比验证.

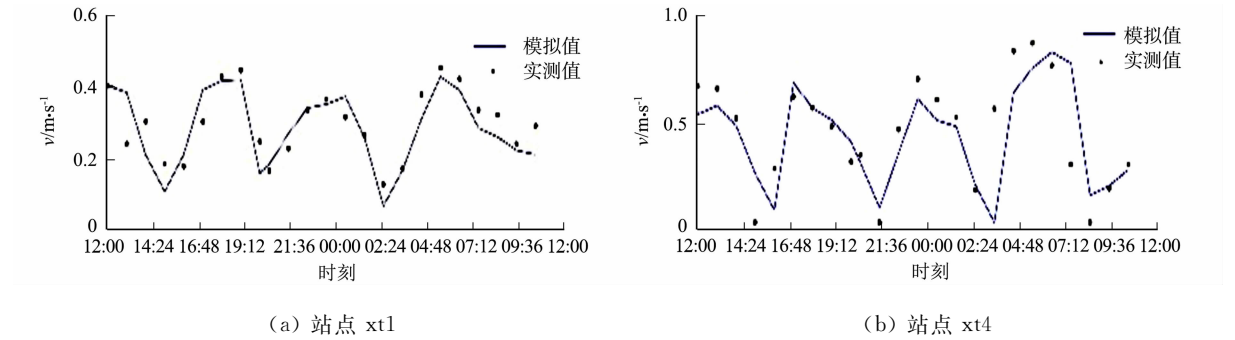
2.1 潮位的验证

泉州湾潮位(h)验证图,如图 3 所示.由图 3 可知:在潮位涨落趋势上,潮位模拟值与实测值基本吻合;24 h 内出现两次高潮和两次低潮,最高潮位接近 4 m,充分体现了泉州湾海域半日潮的特性;除个别点和时刻外,潮位过程、高潮位和低潮位的模拟值与实测值较为一致,模拟结果能够较好地反映潮位的变化特征.



2.2 流速、流向的验证

泉州湾潮流流速(v)验证图,如图 4 所示.泉州湾潮流流向(θ)验证图,如图 5 所示.



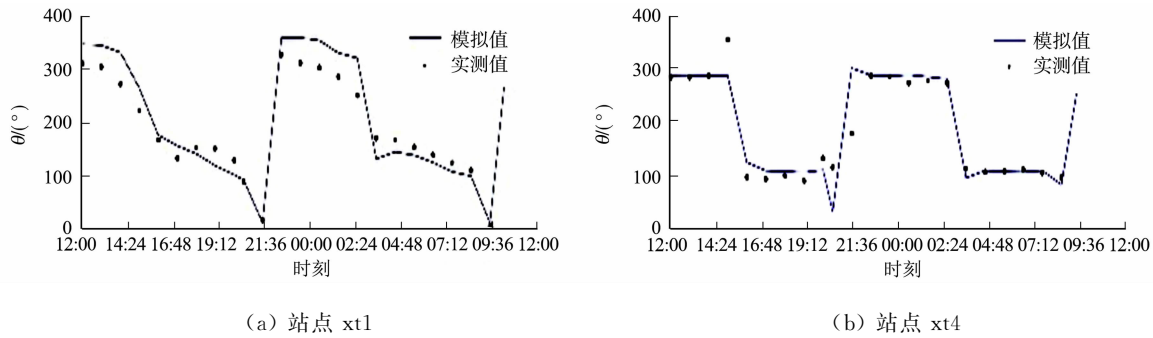


图 5 泉州湾潮流流向验证图

Fig. 5 Tidal current direction verification map of Quanzhou Bay

由图 4,5 可知:流速和流向的模拟值与实测值基本吻合,转流时刻基本一致,总体变化趋势一致,潮流场模拟的重现度较好;最大流速和流向的模拟值与实测值略有偏差,这是由于流速、流向等数据在三角形网格的中心原点位置,划分三角形网格时未能足够缩小网格步长,造成模拟值与实际值略有偏差。由此可知,泉州湾海域潮流场的计算结果具有可靠性,模型能够较好地模拟泉州湾海域的潮流特征。

3 水环境的变化

3.1 水动力特征的变化

泉州湾潮流流速的分布情况,如图 6 所示。由图 6 可知:建岛前、后流速的差异主要体现在湾口处,湾内流速差异不明显;涨急时,潮流由东南部外海涌入泉州湾,湾内整体流向为西向和北向^[3];涨憩时,潮流大致以大、小坠门岛及大山屿形成分界线,分界线左侧的潮流流向与涨急时相似,以西向和北向为主,分界线右侧的潮流沿东朝湾外流出;落急时,湾内潮流呈现朝湾外东北部流动的态势,湾内整体流向为东向和南向,与涨急时相反;落憩时,潮流大致以大、小坠门岛及大山屿形成分界线,分界线左侧的潮流流向与落急时相似,以东向和南向为主,分界线右侧的湾外潮流沿东南朝北涌入。

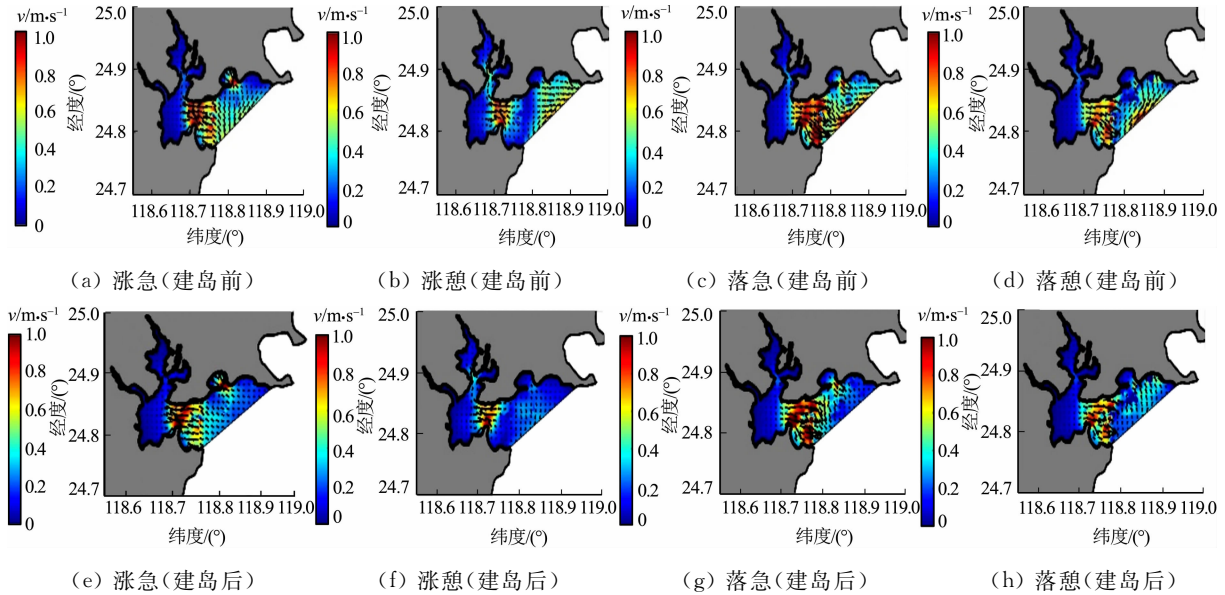


图 6 泉州湾潮流流速的分布情况

Fig. 6 Tidal current velocity distribution of Quanzhou Bay

建岛前、后的潮流流速差(Δv),如图 7 所示。由图 7 可知:秀涂人工岛建成后,泉州湾内秀涂通港引桥以东区域涨急、涨憩、落急、落憩 4 个时刻的流速差约为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,秀涂人工岛的北侧北乌礁水道一带及南侧石湖港区的流速差达到 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这是因为人工岛建立后,原本直接通过泉州湾中部的潮流在秀涂岛附近分为南、北两支分流,导致流速差明显;由于秀涂人工岛对潮流的阻拦,崇武附近海域及泉州湾口的流速差明显。

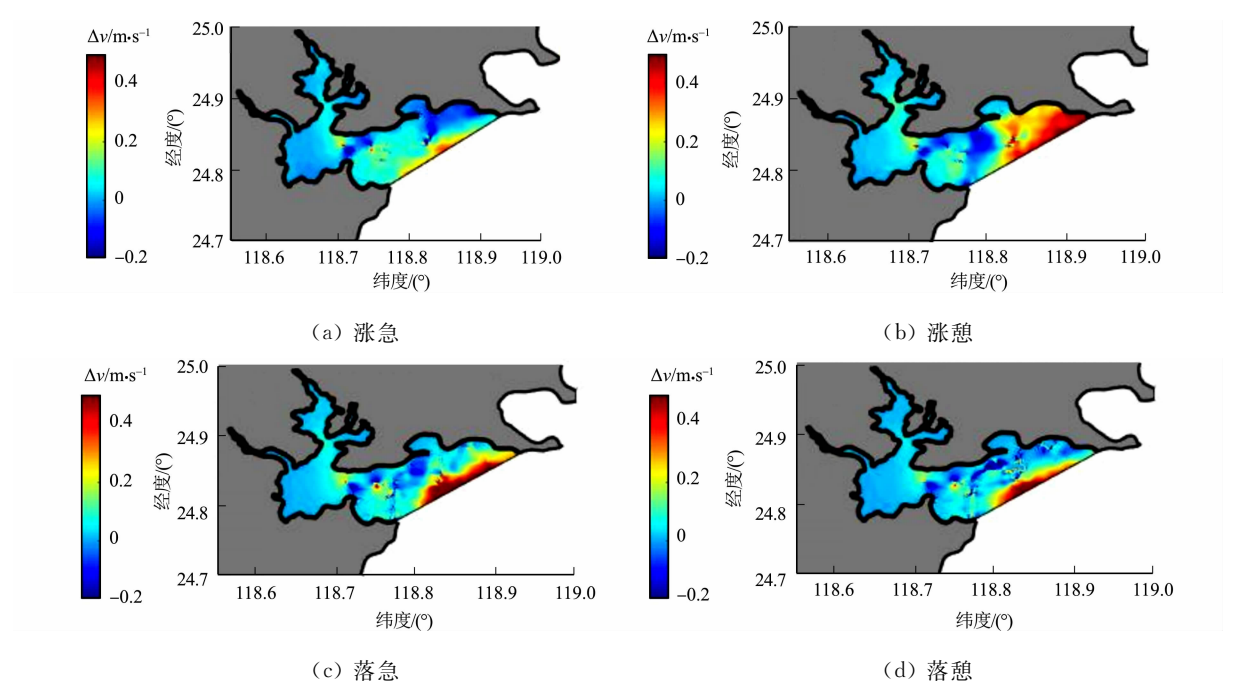


图 7 建岛前、后潮流流速差的对比

Fig. 7 Tidal current velocity difference before and after island construction

3.2 潮致余流的变化

潮致余流是指在潮汐运动周期中,海域空间中某点的潮流速度的平均值,它表明该点在潮周期过程中的平均迁移趋势,其强弱往往受到复杂多变的地形和蜿蜒盘旋的岸线的影响^[17].因此,虽然相较于潮流而言,潮致余流极小,但它对物质输运至关重要.

潮致余流(v_E)取模型稳定后 25 h 的结果进行计算,计算公式^[11]为

$$v_E = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T v.$$

(1)

式(1)中: T 为时间; i 为网格数.

建岛前、后潮致余流的对比,如图 8 所示.

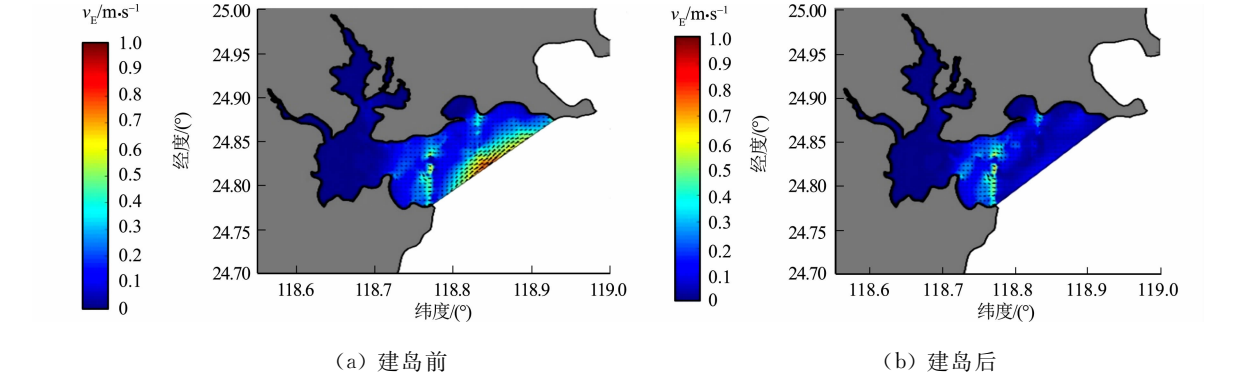


图 8 建岛前、后潮致余流的对比

Fig. 8 Comparison of tidal residual currents before and after island construction

由图 8 可得以下 3 点结论.

- 1) 建岛前,潮致余流一般为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,建岛后,泉州湾潮致余流减小较为明显,尤其是湾口海域;建岛前,最大潮致余流普遍超过 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而建岛后最大潮致余流不到 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 2) 受地形、水深、岸线等因素的影响,建岛前、后潮致余流的强流区主要分布在石湖港区北侧、大、小坠门岛等附近水道,在崇武沿岸、浮山周边形成较强的岬角涡旋,在小坠门岛附近,形成封闭的反气旋式余流涡旋,这与文献[3]的实验结果相符.
- 3) 泉州湾的潮致余流场呈一定程度的分叉趋势,即一股余流沿着浮山南侧、崇武沿岸及赤星礁一

侧经过北乌礁水道向西流进泉州湾;另一股余流主要沿着石湖北侧、北乌礁、大、小坠门岛水道内朝东流出泉州湾. 两股余流呈现不同的运动特征,在小坠门岛的西南侧及围头东北侧海域各形成封闭的反气旋式环流. 余流场与潮流场强流区的分布基本一致,证明了潮致余流与潮流速度具有密切的关系^[18].

3.3 纳潮量的变化

纳潮量是指一个海湾容纳潮水的最大体积,用于表征一个半封闭海湾的生存能力^[19-20]. 纳潮量的变化对海湾水动力特性的影响不可忽视,对维持海湾的生态环境平衡具有重要作用. 一般而言,纳潮量越大,表明湾内水体与湾外水体的交换越快,自净能力越强,水交换能力越强;反之则相反. 通常纳潮量 W 的计算公式^[20]为

$$W=\frac{1}{2}(S_1+S_2)\Delta h. \tag{2}$$

式(2)中: S_1, S_2 分别为高水位和低水位时的水域面积; Δh 为高、低潮位之间的差值.

然而,式(2)一般将海湾当成一个理想的立方体,而泉州湾岛屿众多、岸线蜿蜒曲折,不能简单地视作理想立方体. 因此,采用纳潮量的实际计算公式^[21],即

$$W=\sum_{i=1}^n S_i(h_{1,i}-h_{2,i}). \tag{3}$$

式(3)中: n 为网格总数; S_i 为第 i 个网格的面积; $h_{1,i}, h_{2,i}$ 分别为第 i 个网格的高潮位和低潮位.

为了研究建岛前、后潮流强度对纳潮量的影响,采用大、小潮期间的潮流动力驱动建岛前、后的模型,并计算相应的纳潮量. 建岛前、后大潮期间纳潮量分别为 $2.789\ 7\times 10^9, 2.656\ 0\times 10^9\ \text{m}^3$,建岛后大潮期间纳潮量比建岛前减少了 $0.133\ 7\times 10^9\ \text{m}^3$,变化率为 4.79% ;建岛前、后小潮期间纳潮量分别为 $1.526\ 4\times 10^9, 1.372\ 3\times 10^9\ \text{m}^3$,建岛后小潮期间纳潮量比建岛前减少了 $0.154\ 1\times 10^9\ \text{m}^3$,变化率为 10.09% . 由此可得以下 3 点结论.

1) 建岛前、后大潮期间的纳潮量都约为小潮期间纳潮量的两倍,这可能是由于大、小潮期间的潮位差异造成的,大潮期间的潮位差异约为小潮期间的两倍,在总面积保持不变的情况下,纳潮量的差异就等同于潮位差异,秀涂人工岛的建立后并未改变两者之间的倍数关系.

2) 建岛后,随着海域面积减少了 $3.22\ \text{km}^2$,纳潮量也呈现减少趋势. 纳潮量的减少会削弱泉州湾内水体与湾外水体的交换能力,继而弱化湾内水体的自净能力,使污染物在湾内堆积,无法及时、有效地与外海水体混合,这将增大湾内水体遭受污染的可能性,影响湾内的生态平衡.

3) 相较于大潮期间纳潮量,小潮期间纳潮量的减小程度更大,这说明秀涂人工岛的建立对小潮的影响大于大潮,小潮期间湾内水体与湾外水体的交换能力较弱,更容易遭受污染.

3.4 水交换能力的变化

采用 Luff 等^[7]定义的“半交换时间”进行泉州湾水交换能力的定量研究,相关计算公式^[22]为

$$t=\int_0^\infty \frac{C(t)}{C_0}dt. \tag{4}$$

式(4)中: t 表示平均滞留时间; $C(t)$ 表示当前时刻海域内的污染物浓度; C_0 表示 t_0 初始时刻的污染物浓度;当 $C(t)$ 为初始污染物浓度的 50% 时,半交换时间 $t_h=t-t_0$.

海域污染物浓度 C_a 的计算公式^[23]为

$$C_a=\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^5 C_{i,j}S_ih_j}{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^5 S_ih_j}. \tag{5}$$

式(5)中: $C_{i,j}$ 表示第 i 个网格,第 j 层的污染物浓度; h_j 为第 j 层的高度.

在进行污染物扩散计算时,采用欧拉弥散方法计算湾内污染物浓度,将湾内污染物浓度设置为 1 (以此为参照值,无单位),湾外水体污染物初始浓度设置为 0. 采用文中模型提供的水动力特征条件进行污染物扩散的数值模拟,当模型的水动力场数值稳定时,进行 56 d 的污染物释放和扩散模拟.

水交换率 $\delta=(1-C_a)\times 100\%$,由此计算湾内水体的水交换率(以第 15, 35, 55 天数据为例),结果如表 1 所示.

表 1 建岛前、后湾内水体水交换率的变化
Tab. 1 Changes of water exchange rate in bay before and after island construction

模拟时间	C_a		$\delta/\%$	
	建岛前	建岛后	建岛前	建岛后
第 15 天	0.364 0	0.444 4	63.60	55.56
第 35 天	0.225 6	0.289 9	77.44	71.01
第 55 天	0.201 5	0.275 7	79.85	72.43

建岛前、后污染物浓度的变化,如图 9 所示.

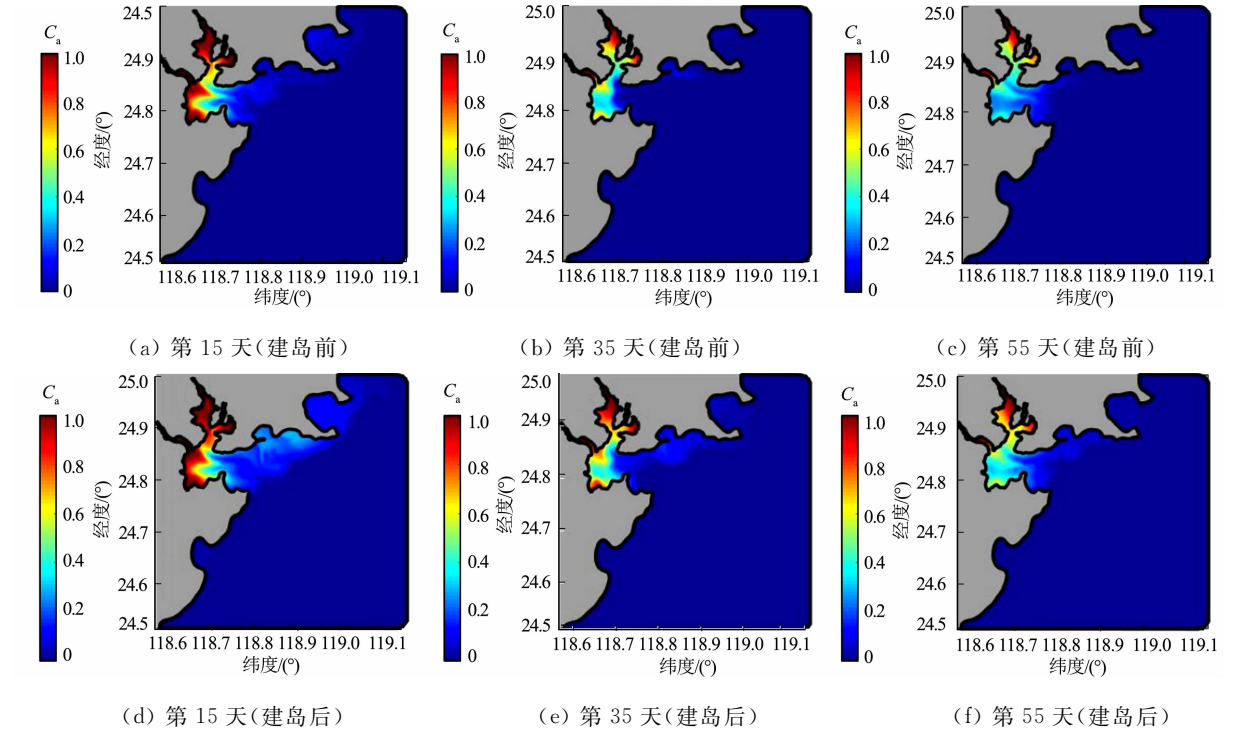


图 9 建岛前、后污染物浓度的变化

Fig. 9 Changes of pollutant concentration before and after island construction

由表 1 和图 9 可得以下 4 点结论.

- 1) 污染物浓度从湾口到湾顶呈递减趋势,湾口处水动力较强,污染物浓度下降较快;湾顶处水深较浅,区域的半封闭使水动力较弱,污染物浓度下降较慢.
- 2) 当污染物释放第 15 天时,建岛前泉州湾内以石湖港区为界,右侧大、小坠门岛附近的污染物浓度基本降至 0.2 以下,分界线左侧污染物浓度分别朝晋江和洛阳江两侧递减,水交换率达 63.60%;随着秀涂人工岛建立,石湖港区分界线右侧的污染物浓度普遍约为 0.3,浮山一侧的污染物浓度最大达到 0.4,在石湖与人工岛分界线上,由于人工岛的存在,两侧航道为湾内与湾外水交换的必经之道,污染物浓度约为 0.2,并以此朝晋江和洛阳江两个湾顶水域逐渐递减,湾内水交换率达 55.56%.
- 3) 当污染物释放第 35 天时,建岛前、后泉州湾口部分海域的污染物浓度基本都在 0.2 以下,并大致沿着沙帽礁—南乌礁—北乌礁连接成的分界线向左侧逐渐递减,湾内大部分海域的污染物浓度降至初始浓度的 50% 以下,仅在一些滩涂、港区内部因水动力较弱,污染物浓度仍旧较高,建岛前湾内水交换率为 77.44%,建岛后水交换率为 71.01%.
- 4) 当污染物释放第 55 天时,湾内污染物浓度变化放缓,建岛前湾内水交换率为 79.85%,建岛后湾内水交换率为 72.43%,之后的浓度基本可视为定常.

将建岛后第 56 天的污染物扩散结果减去建岛前第 56 天的结果,得到污染物的浓度差(ΔC),如图 10 所示.由图 10 可知:相较于建岛前,建岛后泉州湾海域的污染物浓度呈现增大趋势,即扩散减慢,水交换率降低;泉州湾北部及西南海域,特别是洛阳江流域和金屿的污染物浓度差较大,前后变化量差值超过 0.15,在临近泉州湾湾口处,污染物浓度差略微出现递减态势,北乌礁附近海域达到最小值.

泉州湾建岛前、后的半交换时间及其差值(Δt_h), 如图 11 所示.

由图 11(a),(b)可知:泉州湾水体半交换时间与污染物浓度差分布大体类似,泉州湾海域水体的半交换时间从湾口向湾顶逐渐增加;北部和西南部的半交换时间较长,大部分海域的半交换时间长达 30 d 以上;中部和东部的半交换周期较短,多为 10 d 以下. 由图 11(c)可知:建岛后,泉州湾北部洛阳江流域和西部金屿靠近陆地部分区域的水体半交换时间出现了不同程度的增加,普遍增加了 10~15 d,部分海域的半交换时间增加较多,增加了 25 d 以上.

泉州湾污染物浓度变化曲线,如图 12 所示. 由图

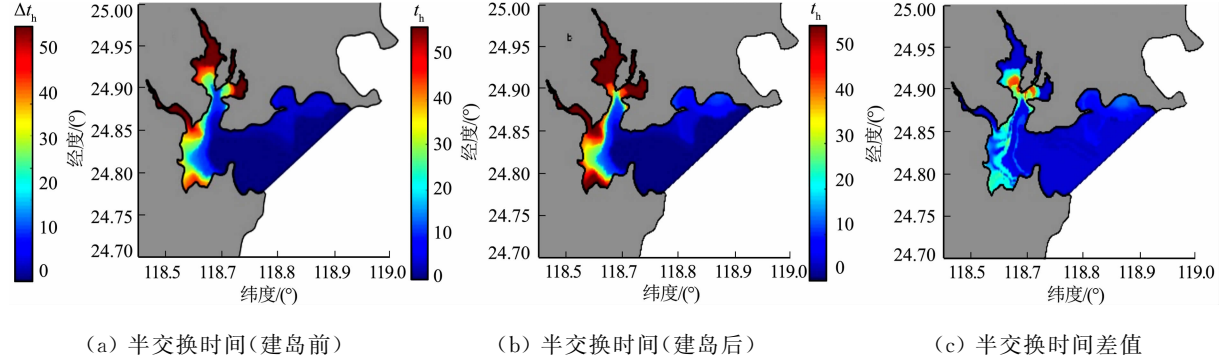


图 11 建岛前、后的半交换时间及其差值

Fig. 11 Half exchange time and its difference value before and after island construction

12 可知:建岛前,泉州湾内污染物浓度约 7 d 后即可降至初始浓度的 50%;建岛后,污染物浓度降至初始浓度的 50%大约需 10 d,较建岛前约增加了 3 d.

因此,秀涂人工岛的建立在一定程度上影响了泉州湾污染物的对流和扩散,湾内水体与湾外水体的水交换时间变长.

4 结论

1) 秀涂人工岛的建设主要对潮流流速产生影响. 泉州湾大部分海域的流速约减小 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;在秀涂人工岛的北侧北乌礁水道一带及南侧石湖港区之间,流速差达到 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;由于人工岛对潮流的阻拦,使湾口及崇武附近海域的流速差较为明显.

2) 秀涂人工岛对泉州湾石湖港区人工岛连线以西大部分区域的余流结构及大小影响并不显著,强流区主要分布在石湖港区北侧、大、小坠门岛等附近水道内,在泉州湾湾口的余流减少最为明显. 此外,在小坠门岛附近,还形成了封闭的反气旋式余流涡旋.

3) 建岛前、后大潮期间纳潮量均约为小潮期间纳潮量的两倍,建岛后的海域面积减少 3.22 km^2 ,由此导致纳潮量呈减少趋势,大潮期间纳潮量减少 $0.1337 \times 10^9 \text{ m}^3$,小潮期间纳潮量减少 $0.1541 \times 10^9 \text{ m}^3$. 小潮期间纳潮量减少程度较大,变化率为 10.09%,表明小潮期间更容易遭受污染威胁.

4) 建岛后,泉州湾整体水交换能力减弱. 建岛前,湾内水体半交换时间约为 7 d,建岛后,湾内水体的半交换时间增加约 3 d. 秀涂人工岛在一定程度上降低了泉州湾与外海之间的水交换能力,使污染物在湾顶堆积,浓度稀释速度减缓.

5) 在实施海洋工程前,应将其对水交换能力的影响纳入考虑,以避免因围填海建岛工程造成恶劣的环境影响.

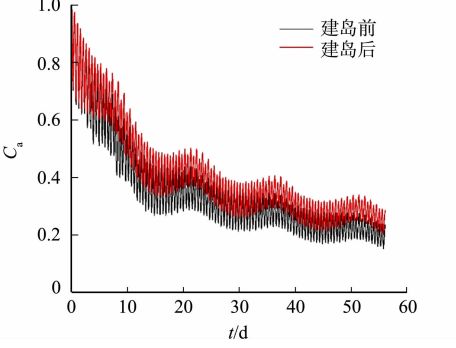


图 12 泉州湾污染物浓度变化曲线
Fig. 12 Variation curves of pollutant concentration of Quanzhou Bay

参考文献:

[1] 陈培焕, 秀涂“人工岛”工程建设初探[J]. 福建交通科技, 2015(3): 95-96.

[2] 黄彬. 泉州湾秀涂人工岛总体设计[J]. 水运工程, 2016(7): 36-39. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-4972. 2016. 07. 008.

[3] 林作梁, 朱学明, 鲍献文, 等. 基于 FVCOM 的泉州湾海域三维潮汐与潮流数值模拟[J]. 海洋学报(中文版), 2013, 35(1): 15-24. DOI:10. 3969/j. issn. 0253-4193. 2013. 01. 003.

[4] 杨晨, 刘颖, 路宽. 泉州湾潮流场的数值模拟研究[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(3): 117-120. DOI:10. 3969/j. issn. 1003-2029. 2017. 03. 022.

[5] BOLIN B, RODHE H. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs[J]. Tellus, 1973, 25(1): 58-62. DOI:10. 1111/j. 2153-3490. 1973. tb01594. x.

[6] ZIMMERMAN J T F. Mixing and flushing of tidal embayments in the western Dutch Wadden Sea, part I: Distribution of salinity and calculation of mixing time scales[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1976, 10(2): 149-191. DOI:10. 1016/0077-7579(76)90013-2.

[7] LUFF R, POHLMANN T. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a eulerian dispersion model using a half-life time approach[J]. Ocean Dynamics, 1995, 47(4): 287-299. DOI:10. 1007/BF02737789.

[8] 朱君, 韩树宗, 郑连远. 影响坦帕湾水交换的三种因素[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 17-26. DOI:10. 11693/hy-hz20140400125.

[9] 王聪, 林军, 陈丕茂, 等. 大亚湾水交换的数值模拟研究[J]. 南方水产, 2008, 4(4): 8-15. DOI:10. 3969/j. issn. 2095-0780. 2008. 04. 002.

[10] 袁德奎, 李广, 王道生, 等. 围填海工程对渤海湾水交换能力影响的数值模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(7): 605-613. DOI:10. 11784/tdxbz201312095.

[11] 王雪, 陈学恩. 胶州湾纳潮量和水交换数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 1-9. DOI:10. 16441/j. cnki. hdxh. 20160069.

[12] 吕新刚, 赵昌, 夏长水, 等. 胶州湾水交换及湾口潮余流特征的数值研究[J]. 海洋学报(中文版), 2010, 32(2): 20-30.

[13] 陈振华, 夏长水, 乔方利. 钦州湾水交换能力数值模拟研究[J]. 海洋学报(中文版), 2017, 39(3): 14-23. DOI:10. 3969/j. issn. 0253-4193. 2017. 03. 002.

[14] 杨青堂, 杨万康, 潘冲, 等. 花场湾水交换能力计算与研究[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(6): 56-60. DOI:10. 3969/j. issn. 1003-2029. 2018. 06. 009.

[15] CHEN Changsheng, BEARDSLEY R C, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume community ocean model FVCOM user manual[J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89. DOI:10. 5670/oceanog. 2006. 92.

[16] 侯庆志, 左利钦, 陆永军, 等. 强潮海湾水动力环境对人类干预的响应: 以泉州湾为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(6): 1124-1138. DOI:10. 16058/j. issn. 1005-0930. 2017. 06. 006.

[17] 陈金瑞, 陈学恩, 于华明, 等. 胶州湾潮汐潮流高分辨率数值模拟研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(增刊 2): 29-35. DOI:10. 16441/j. cnki. hdxh. 2011. z2. 005.

[18] 宋德海, 鲍献文, 朱学明. 基于 FVCOM 的钦州湾三维潮流数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(2): 7-14. DOI:10. 3969/j. issn. 1009-5470. 2009. 02. 002.

[19] 龚旭东, 俞缙, 蓝尹余. 半封闭海湾围填海对水动力环境的影响分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 72-78. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201808015.

[20] 胡建宇. 罗源湾海水与外海水的交换研究[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(3): 51-54.

[21] JIA Han, SHEN Yongming, SU Meirong, *et al.* Numerical simulation of hydrodynamic and water quality effects of shoreline changes in Bohai Bay[J]. Frontiers of Earth Science, 2018, 12(3): 625-639. DOI:10. 1007/s11707-018-0688-x.

[22] 王兴刚, 董敏, 熊伟. 连云港港主体港区水交换三维数值模拟[J]. 水运工程, 2015(4): 92-99. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-4972. 2015. 04. 017.

[23] 陈妍宇, 宋德海, 鲍献文, 等. 胶州湾跨海大桥对海湾水体交换的影响[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(4): 707-718. DOI:10. 11693/hyhz20180900211.

(责任编辑: 钱筠

英文审校: 刘源岗)