

韩慧慧, 高飞, 丁咚, 等. 围填海工程对三门湾纳潮量和水交换的影响[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(5): 40-50.

HAN Huihui, GAO Fei, DING Dong, et al. Influence of reclamation project on tidal volume and water exchange in Sanmen Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(5): 40-50.

围填海工程对三门湾纳潮量和水交换的影响

韩慧慧¹, 高飞^{2*}, 丁咚¹, 马乐¹

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237)

摘要:以浙江省三门湾为研究区域, 基于 MIKE21 水动力模型模拟了三门湾及附近海域 2000、2009 和 2019 年的水动力特征, 分析探讨围填海工程对三门湾纳潮量及水交换能力的影响, 计算结果表明: 2000、2009 和 2019 年的最大纳潮量分别为 5.06×10^9 、 4.95×10^9 和 4.85×10^9 m^3 , 最小纳潮量分别为 1.92×10^9 、 1.90×10^9 和 1.80×10^9 m^3 , 平均纳潮量分别为 3.55×10^9 、 3.39×10^9 和 3.21×10^9 m^3 。围填海工程致使 2000—2009、2009—2019 年平均纳潮量分别减小了 4.51% 和 5.31%; 通过保守物质浓度扩散来定量分析三门湾的水交换能力, 得到 2000 年半交换周期介于 21~27 d, 2009 年半交换周期介于 23~29 d, 2019 年半交换周期介于 23~30 d。湾内保守物质浓度减少 90% 的时间周期分别为 2000 年 58 d, 2009 年延长了 7 d 达到 65 d, 2019 年继续延长至 69 d。三门湾的围填海工程削弱了湾内的水动力条件和水交换能力, 可进一步影响泥沙输运和水质环境。

关键词:数值模拟; 水动力; 三门湾; 纳潮量; 水交换能力

中图分类号: P736; P731.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.237

0 引言

近年来, 为了解决因经济发展和人口增长造成的土地资源短缺问题, 围海造地活动愈加频繁。围填海工程会改变海洋的自然几何属性及水动力环境, 从而影响海域水动力运输, 且这种影响是深远的、不可逆的。因此, 运用海洋环境数值模拟手段呈现三门湾的潮流、余流场、纳潮量与物质输运情况的现状, 对相关海域的生态保护与修复、污染防治及用海方式有重要借鉴意义。

目前, 关于围填海工程对水动力环境的影响已经有很多研究成果。吕赫等^[1]在 MIKE21 FM 模型

基础上, 研究了钦州湾近 15 年来围填海工程的累积效应对水动力环境的影响; WANG 等^[2]发现钦州湾区域围填海后局部流场变化较大, 外湾冲淤环境显著改变; FEI 等^[3]基于 MIKE21 数学模型模拟了龙口湾人工岛围填建设前后的潮流、波浪、纳潮量及水交换率等水动力特征, 探讨了人工岛群建设对龙口湾水动力环境的影响; 朱婷等^[4]基于 Mike Flood 平台, 建立了广海湾一、二维耦合水动力数学模型, 通过模拟对比围填工程实施前后的广海湾海域潮流场潮流特征, 分析了香港惰性拆建物料台山处置区建设对广海湾海域的影响范围及程度。前人研究多集中在工程实施前后相关区域的变化, 较少涉及规模大且持续时间长的围填海活动对潮流场、纳潮量及水交换影响的定量模拟研究。

本文在前人研究的基础上, 通过遥感解译提取三门湾大规模围填工程前后的岸线数据(2000、2009、2019 年), 利用三维数值模拟软件 MIKE21 建立 3 期水动力模型, 并进行验证, 分析三门湾纳潮量及水交换能力由于长期、大型的围填海工程而产生的变化和响应, 为三门湾的合理开发与利用提供科学依据。

收稿日期: 2022-08-30

资助项目: 国家重点研发计划“河口三角洲生态环境地球观测应用研究”(2019YFE0127200)、海岸带生态地质调查工程“重要河口及湿地滩区生态地质调查”(DD20221775)

第一作者: 韩慧慧(1997—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋生态动力学方面的研究工作. E-mail: 690408701@qq.com

* 通讯作者: 高飞(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海岸带地质灾害和沉积动力学方面的研究工作. E-mail: gfl98712@126.com

1 研究区概况

三门湾坐落于浙江省沿海中部, 位于中国“黄金海岸线”中段, 分别属于三门县、象山县和宁海县, 相关海域总体面积达到 775 km², 其北、西、南 3 面被陆地环绕, 东南面向海, 是一个典型的半封闭式强潮多汊道海湾(图 1)。截至目前, 三门湾潮滩总面积为 295 km², 占三门湾海域总面积的 38%。2000—2009 年, 围涂面积超过 66.6 km², 约占三门湾围涂总面积的 30%, 是围涂面积增加较快的时期, 尤其在湾顶部。2009—2019 年, 浙江省实施和规划了一批大规模、大面积的填海造地工程, 主要有下洋涂工程、蛇蟠涂工程、晏站涂工程、洋市涂区域农业围垦用海规划填海工程和牛山火电厂填海造地工程, 填海造地面积超过 1 500 hm²[5]。到 2018 年, 包括堵港中的水面面积, 三门湾已围涂面积达到 221.6 km², 占海域总面积的 28.6%, 总潮滩面积的 75.1%^[6-7]。2020 年, 大规模填海造地项目主要分布在湾顶东部的双盘三山涂, 其次分布在外湾两侧沿岸, 围填面积达 13.85 km²[8-9]。

2 研究方法与模型构建

2.1 数值模拟方法

潮流场模拟采用丹麦水力学研究所研发的二维数值模拟软件 Mike21 中的 Flow Model HD 模块^[10-11]进行, 该模块的控制方程主要包括连续方程

和动量方程, 利用水深公式 $h = \eta + d$ 可得到二维浅水方程^[12-14]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \\ \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \\ \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中: η 为潮面高程, m;

d 为静水深度, m;

S 为点源引起的流量大小;

u_s, v_s 是源项的水流流速, m/s;

\bar{u}, \bar{v} 分别为 x, y 方向的深度平均流速, m/s;

f 为科氏力系数 ($f = 2\Omega \sin \phi$, Ω 为地球自转角速度, ϕ 为地理纬度);

g 为重力加速度, m²/s;

ρ 为密度, ρ_0 为参考水密度, g/m³;

P_a 为大气压力;

T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} 为水质点侧向应力, 包括黏滞摩擦力、紊流摩擦力、对流力等, N;

τ_{sx}, τ_{sy} 分别为 x, y 方向的海面风应力, N;

τ_{bx}, τ_{by} 分别为 x, y 方向的海底应力, N。

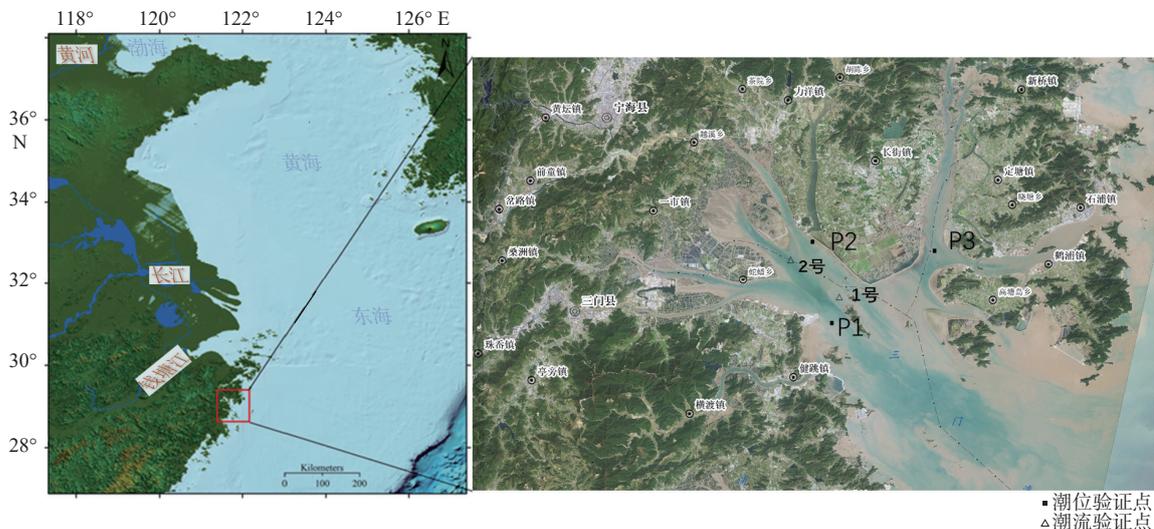


图 1 三门湾地理位置及潮流潮位测站分布

Fig.1 The geographical location of Sanmen Bay and the distribution of tidal level stations

模型所用岸线数据提取自2000—2019年的部分Landsat7 ETM+和Landsat8 OLI数据遥感影像,空间分辨率为30 m。水深数据来自中国航海图书出版社出版发行的《三门湾1:200 000海图》和中国地质调查局青岛海洋地质研究所实测水深地形数据。在综合考虑研究区现状、已有数据及模型精度、计算时间等因素的基础上,确定研究区域坐标范围

为28.33°—29.46°N、121.13°—122.39°E。

模拟采用非结构三角网格剖分计算域,将模型的开边界设置在距离较远的外海,减少开边界对研究区的影响。开边界处网格边长控制在4 km以内,对区域进行多级加密,主要研究区域网格边长控制在260 m以内,最终网格单位61 652块,网格节点33 509个。计算区域具体范围及网格化见图2。

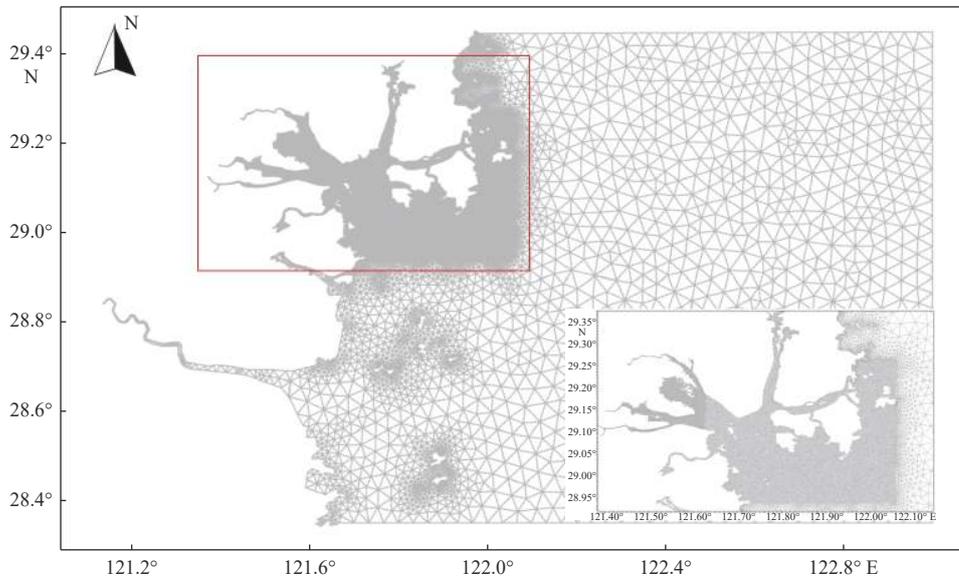


图2 计算模型网格及重点研究范围

Fig.2 Computational model grid and key research areas

网格剖分后进行平滑处理、优化网格夹角以提高计算速度。糙率设置由曼宁系数确定,设置 $M=78$ 。涡黏系数采用Smagorinsky常系数,取 $C_s=0.28$ 。由于研究区为半封闭海湾,水深较浅,大面积分布滩涂,周边溪流常年流量 $1\text{ m}^3/\text{s}$,模型不考虑温度、盐度变化以及风和径流的影响。开边界采用潮位驱动,潮位数据源于全球潮汐模型预测(TPX09),模型稳定后,设置热启动,模拟时间为2000、2009、2019年中每年的5月31日—8月31日,时间步长均为60 s。

2.2 模拟验证

为了验证潮流数学模型的准确性,收集了2003年4—5月获取的P1(29.10°N、121.65°E)、P2(29.19°N、121.62°E)、P3(29.16°N、121.80°E)3个临时潮位站^[11]进行潮位验证,流速流向数据来自于2003年国家海洋局第二海洋研究所的测流数据1号(29.11°N、121.66°E)、2号(29.17°N、121.59°E)站位^[15],潮位、潮流站分布见图1。潮位、潮流的模拟结果与实测数据对比验证见图3、4。如图所示,

潮位、潮流、流向验证结果良好,模型计算值与实测值基本吻合,最大误差 $<10\%$,模拟结果能够较为准确地重现三门湾水动力特征,可应用于后期的预测和研究工作。

3 结果与讨论

2000—2019年,三门湾进行了大规模围填海工程活动,岸线变化巨大,海岸线减少了8.226 km,主要体现在湾顶的蛇盘岛、晏站涂、双盘三山涂以及湾顶东部的下洋涂^[16],主要围填海域见图5。通过对2000、2009、2019年3个年份数值模拟结果对比分析,研究三门湾纳潮量和水交换能力的变化。

3.1 潮流场的变化

利用已构建模型模拟三门湾海域流场变化(图6),对比3个年份涨急、落急潮时刻的流场分布可知:围填海工程对2000—2009年、2009—2019年2个阶段三门湾内大范围的潮流流路、流态影响不大,三门湾外海涨潮流基本为SE—NW向,在湾中

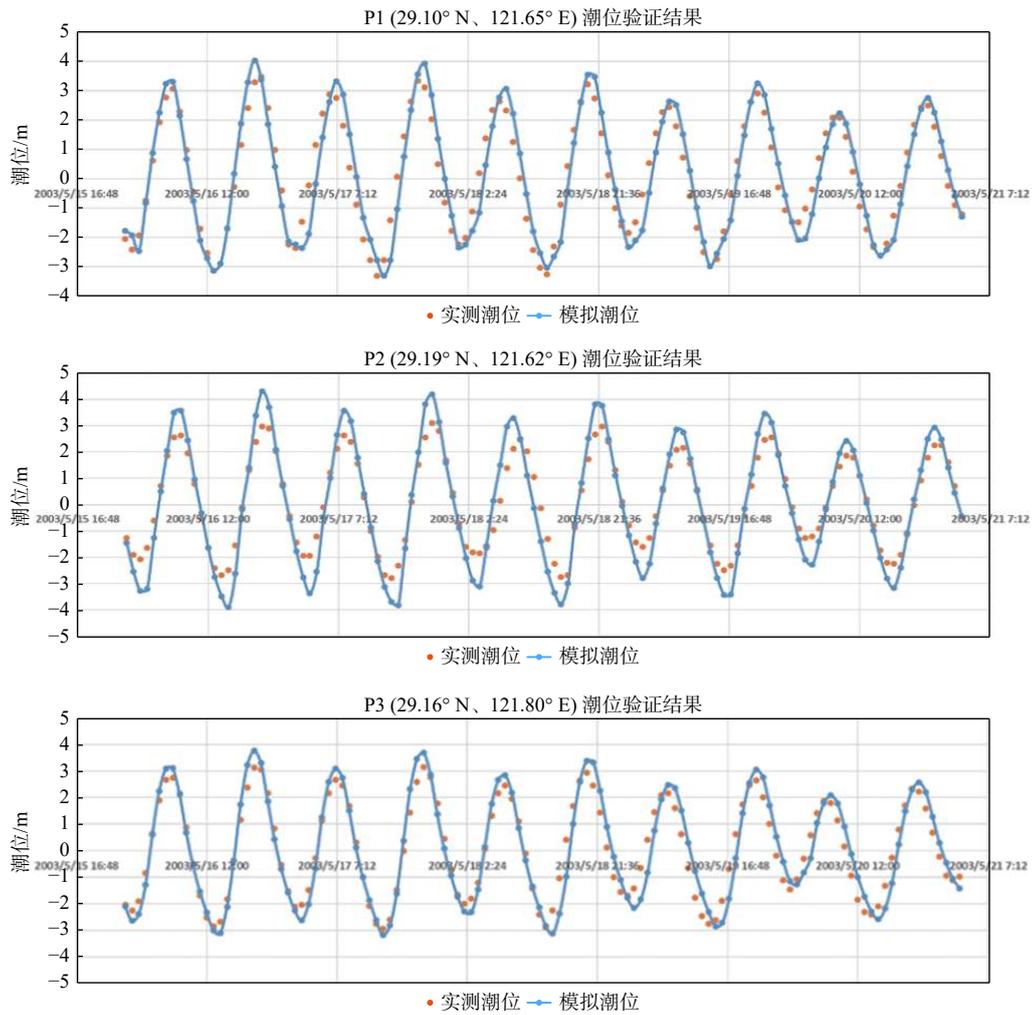


图 3 潮位验证对比图

Fig.3 Comparison of tide level verification

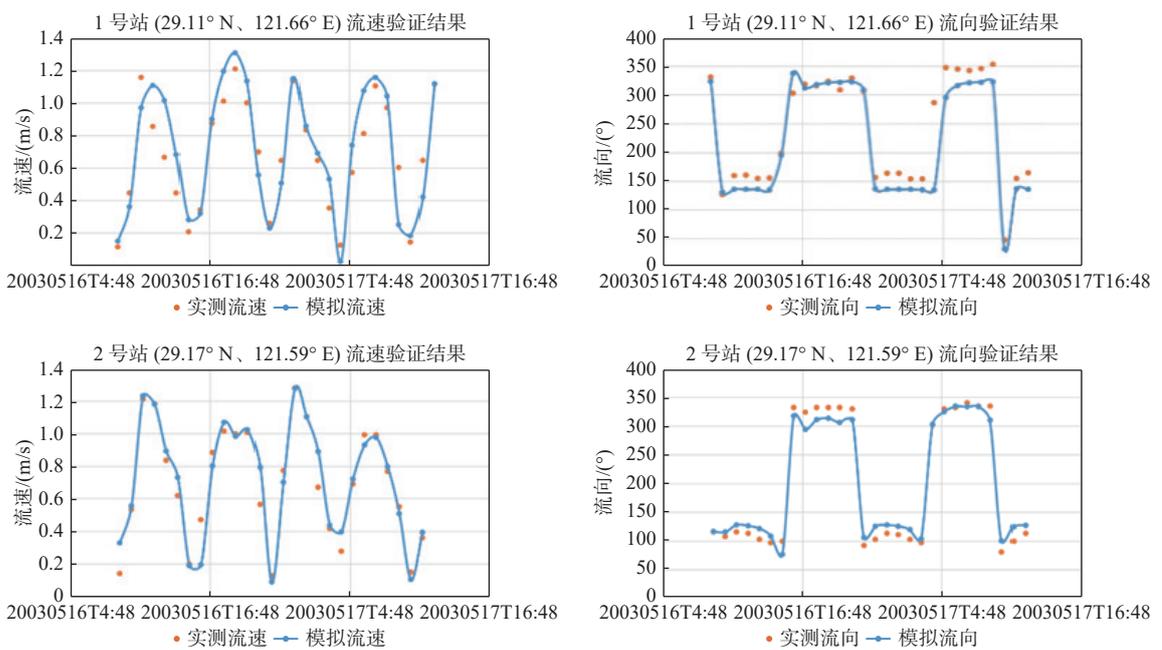
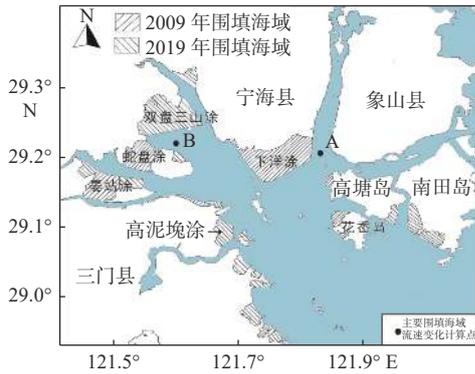


图 4 流速流向验证图

Fig.4 Verification of velocity and direction



据文献 [8] 修改

图 5 主要围填海域及流速变化计算点

Fig.5 The main reclamation area and calculation point of flow rate change

分别流向健跳港、猫头水道、满山水道和白礁水道，在石浦港流向为 NE—SW 向流入湾内与白礁水道汇合；落潮时，流向基本与涨潮流相反。围填海前后，涨、落潮沿支流分叉汇合基本不变，在健跳港、蛇蟠水道港汊流速明显降低。退潮速度对填海的相应幅度略大于涨潮幅度。在主要围填区域下洋涂、蛇蟠水道与双盘三山涂附近(图 5A、B 点)，2 个阶段全潮平均流速分别减少为 0.146 和 0.162 m/s，2000—2019 年，A、B 点周边区域涨潮流速减小了 0.075 m/s，落潮减小了 0.190 m/s，这一变化将进一步弱化三门湾的落潮流优势，影响湾内物质交换和泥沙输送。

3.2 余流分析

余流一般指海流扣除周期性潮流后的剩余部分，包括风海流、径流、地转流、密度梯度流等^[17]，是研究海岸带泥沙运动来源和环境保护工程的一种有效手段。欧拉余流速度是指海域内某一空间点在一个潮周期内潮流速度的平均值，它表示在特定位置上流体周期平均的迁移趋势，计算公式为：

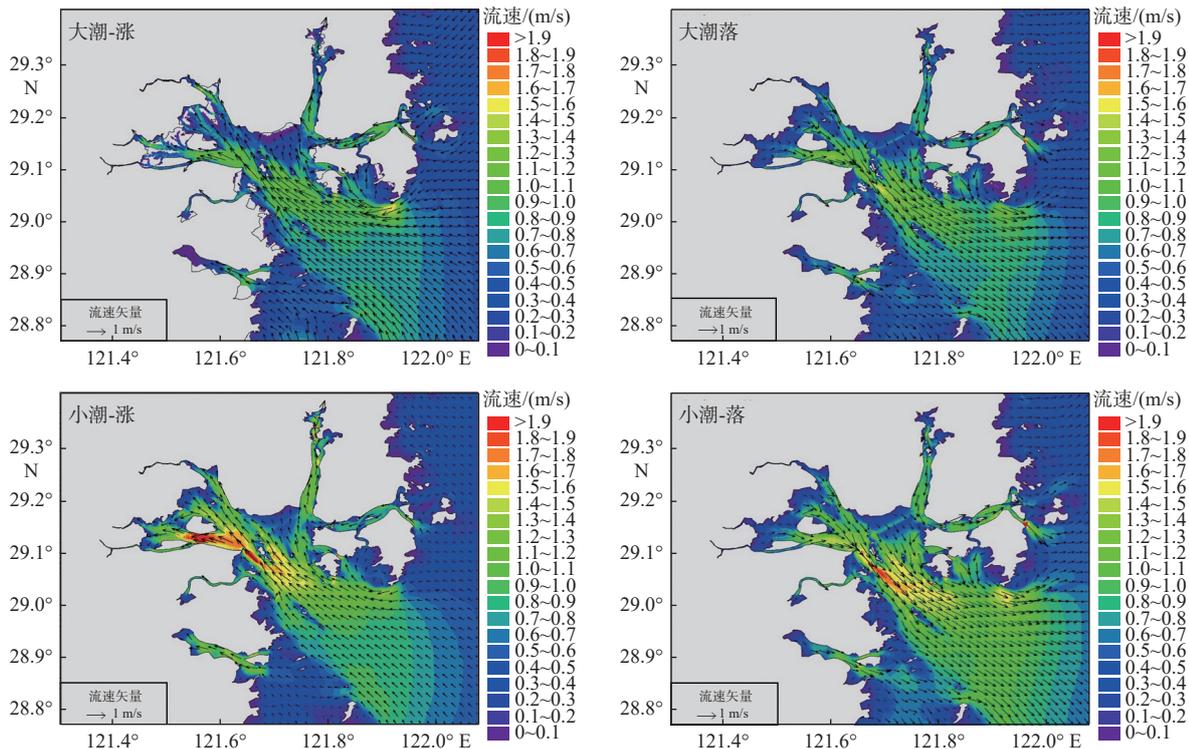
$$V_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V \tag{4}$$

式中： V_E 为流速，m/s；

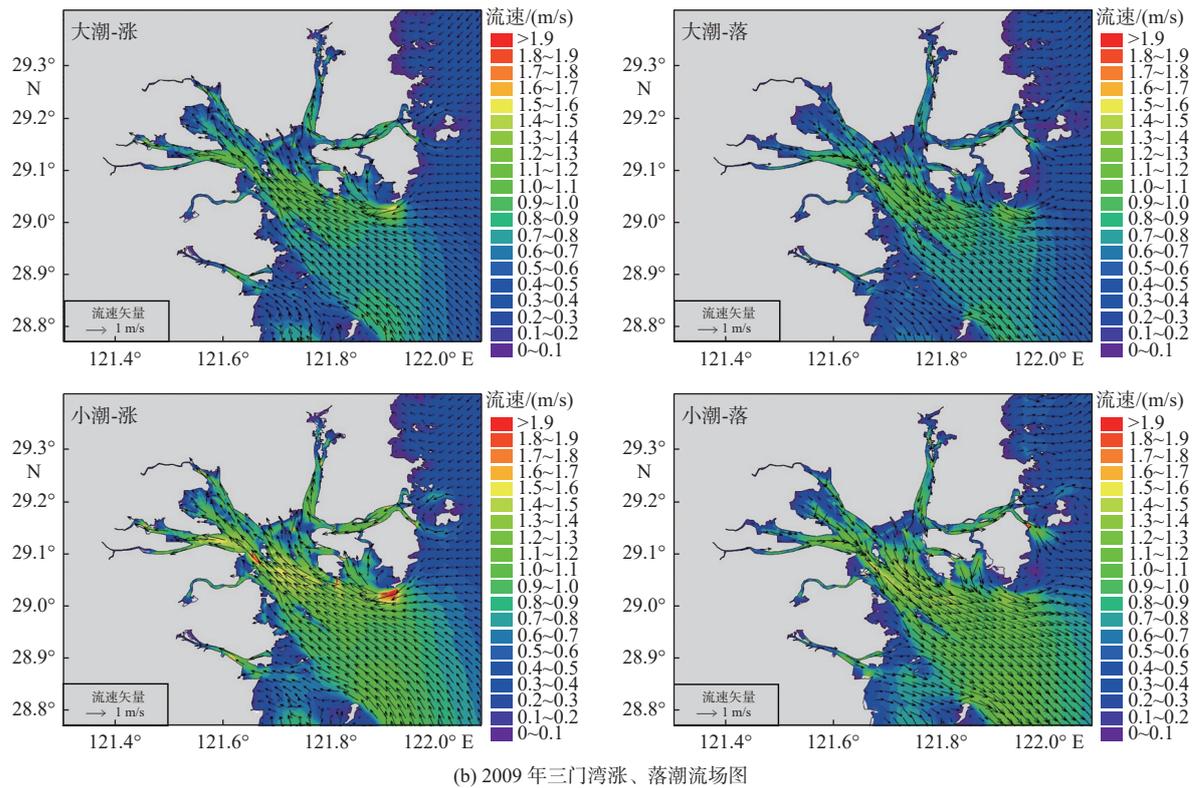
N 为所取计算周期的个数。

余流的大小与地形和岸线有密切的联系^[18-19]。经计算，得到三门湾 2000 年与 2019 年的余流情况，如图 7 所示，余流的量值虽然明显小于潮流，但对物质运输却起到十分重要的作用。

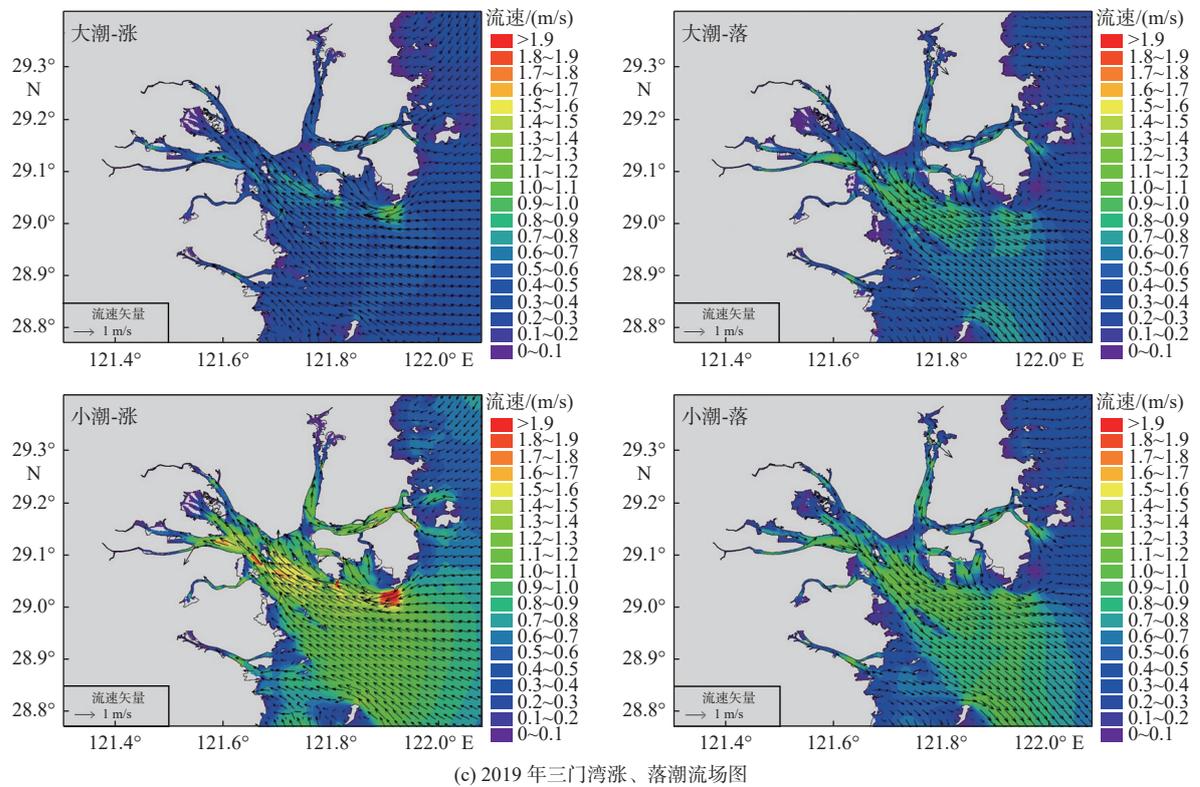
三门湾在 2000—2019 年进行围填海以后，湾内空间发生了变化，但余流总体方向基本无明显变化，余流指示着海洋水体的运动和交换情况，对悬浮物质和可溶性物质的运输、稀释及扩散等起着非常重要的作用^[20]，三门湾周围没有大径流量河流注入，仅有小山溪性河流，因此，正常天气情况下三门湾的泥沙主要来自于潮流输沙^[8-9]。围填海后，在各



(a) 2000 年三门湾涨、落潮流场图



(b) 2009 年三门湾涨、落潮流场图



(c) 2019 年三门湾涨、落潮流场图

图 6 2000、2009、2019 年三门湾涨、落潮流场图

Fig.6 The rise and fall tidal fields of Sanmen Bay in 2000, 2009, and 2019

港汊以及靠近外湾处可见,余流流速减小,以石浦港和蛇蟠岛附近变化最明显,这将影响湾内泥沙及其他物质的向外运输,造成湾内泥沙淤积,海湾水

交换能力降低。参考 2013 年洪枯季三门湾海域 12 个测站潮流和含沙量同步观测资料,运用机制分解法研究三门湾悬沙输移变化特征,得出三门湾的

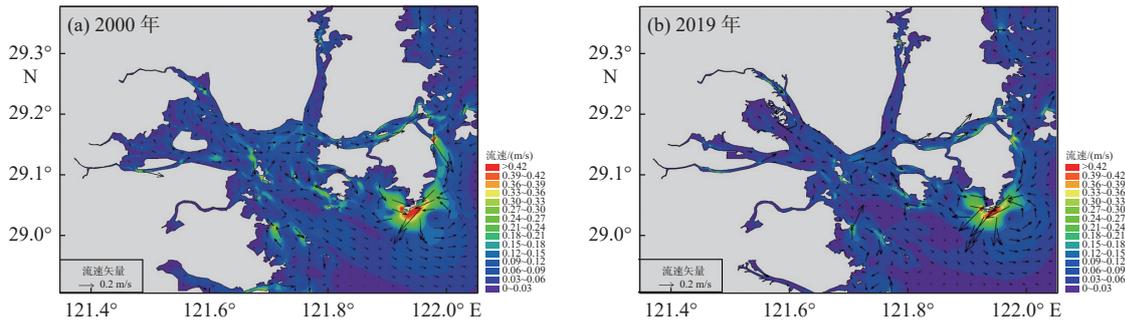


图7 2000和2019年三门湾欧拉余流对比

Fig.7 Comparison of in the Euler remnants of Sanmen Bay between 2000 and 2019

欧拉余流从小潮至大潮逐渐增大,方向基本向海,主要决定单宽输水量的大小和方向,在枯季,平流输沙对单宽输沙量绝对值的贡献率最高,潮泵输沙项的贡献率在湾中区域最大;洪季时,则潮泵输沙贡献率增大^[21]。

3.3 围填海对纳潮量的影响

纳潮量即海湾所能接纳的海水体积,可以表示为海湾高潮水量与低潮水量之差,是衡量海湾生态环境质量的重要因素^[22]。为获得精确的计算结果,参考陈红霞等^[23]对不同纳潮量计算公式的比较,选择在有限体积方法中将纳潮量概念应用在每个

网格单元内,具体见公式(5)。

$$P = \sum_{i=1}^n S_i(H_{1i} - H_{2i}) \quad (5)$$

式中: P 为纳潮量, m^3 ;

S_i 为第 i 个网格的面积, m^2 ;

H_{1i} 、 H_{2i} 分别为第 i 个网格的高、低潮水位, m ;

n 为所选取海域的网格总数。

通过计算 2000、2009 和 2019 年三门湾 8 月 1—31 日 3 个时期的纳潮量的变化过程,结果表明,三门湾的在一个月内的纳潮量差别较大,经过一个全潮,纳潮量基本介于 $1.9 \times 10^9 \sim 5.1 \times 10^9 m^3$ (图 8)。

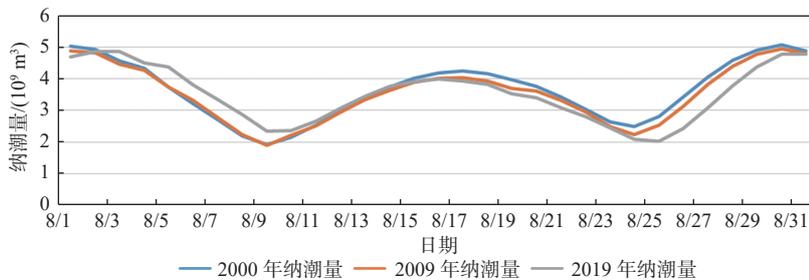


图8 三门湾纳潮量变化过程

Fig.8 Variation process of tidal volume in Sanmen Bay

2000、2009 和 2019 年的最大纳潮量分别为 5.06×10^9 、 4.95×10^9 和 $4.85 \times 10^9 m^3$, 最小纳潮量分别为 1.92×10^9 、 1.90×10^9 和 $2.03 \times 10^9 m^3$, 平均纳潮量分别为 3.55×10^9 、 3.39×10^9 和 $3.21 \times 10^9 m^3$ (见图 9)。对比发现,围填海工程的进行使湾内面积减小,海湾纳潮空间减小,纳潮量也减小,从月平均纳潮量来看,2000—2009 年减小了 4.51%, 2009—2019 年减小了 5.31%, 对比可知,2000—2019 年三门湾大量围填海工程的建设导致了三门湾纳潮量减小了 9.58%。围填海工程占用了海域,减小了海湾能够容纳潮水的空间,减小了三门湾的涨、落潮流速,湾

内大、小潮的潮差也发生变化,导致了纳潮量变小,减弱了三门湾水动力的同时也将引起港内泥沙淤积。

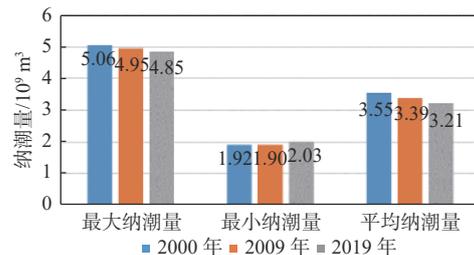


图9 三门湾纳潮量特征值统计

Fig.9 Statistics of eigenvalues in tidal volume in Sanmen Bay

3.4 三门湾水交换能力

水交换能力反映了海湾接受外来水的能力,是衡量海湾自净能力大小的重要指标。一般通过交换周期的长短、快慢或强弱来描述水体的交换情况,进而评价三门湾水交换能力。水交换时间通过 MIKE21 软件中的对流扩散模块(Transport Module)计算投放保守物质扩散输移的运动过程,物质的输移和扩散采用二维对流扩散方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hC) + \frac{\partial}{\partial x}(uhC) + \frac{\partial}{\partial y}(vhC) = \frac{\partial}{\partial x}\left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + FhC + S \quad (6)$$

式中: D_x 、 D_y 分别为 x 与 y 方向上的扩散系数, m^2/s ; C 为复合浓度(常量), g/m^3 ;

F 为线性衰减系数, s^{-1} ;

t 为时间;

h 为水深, m ;

u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速, m/s ;

S 为源汇处物质浓度, $g/(m^2 \cdot s)$ 。

以水体的半交换周期^[14,24-25](湾内保守物质交换出 50% 到湾外所经历的时间)为计算标准,计算物质扩散的快慢得出三门湾海的水交换能力,定量研究围填海工程对海域环境自净能力的影响程度。

以溶解态的保守物质为示踪剂,假定研究区内示踪剂浓度均匀分布。给定研究区域保守物质初始浓度 C_0 为 1 mg/L (图 10 中红色区域),研究区域外污染物浓度 C_1 为 0 (图 10 中蓝色区域),网格分布与水动力模型相同,计算时间的步长设为 1 min ,在水动力作用下,分析研究区域水体交换能力。

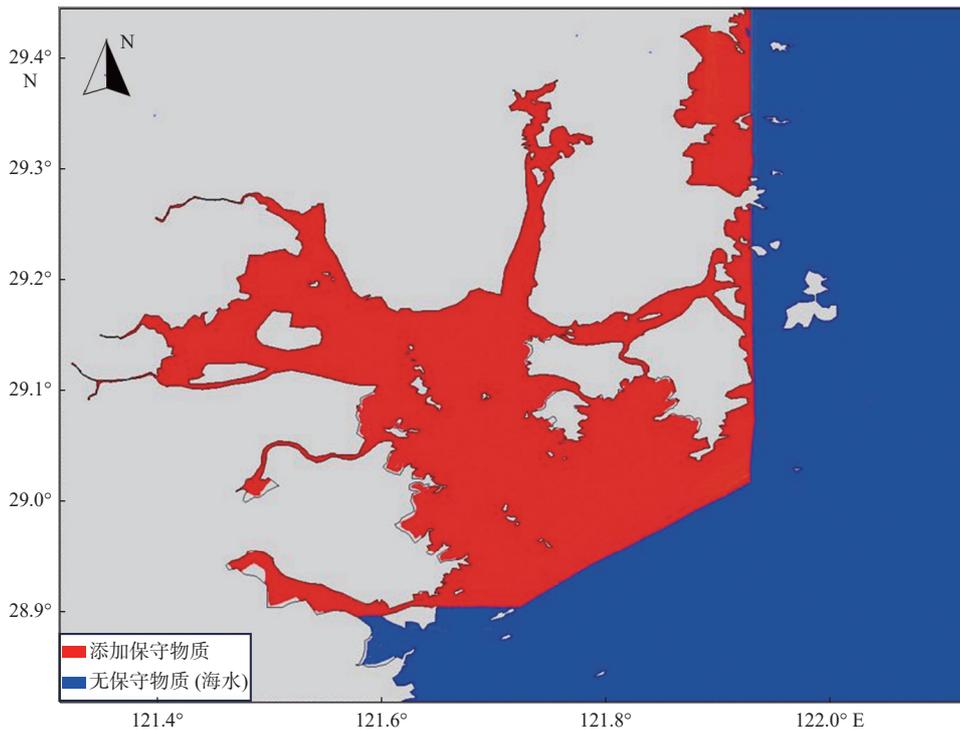


图 10 对流扩散模型初始条件示意图

Fig.10 Schematic diagram of initial conditions of convection-diffusion model

通过计算保守物质的扩散浓度,统计 2000、2009、2019 年 3 期围填海情况下三门湾内平均水交换率达到 50% 的时间。对比三门湾三期的水交换能力,2000—2019 年全湾水体半交换周期如图 11 所示,2000 年半交换周期为 21~27 d,2009 年半交换周期为 23~29 d,2019 年半交换周期为 23~30 d。围填海工程效应累积使得三门湾水体交换能力下降,湾内半交换周期有 1~2 d 的延后。而三期湾内

保守物质浓度减低 90% 的时间分别为 2000 年 58 d,2009 年延长 7d 达到 65 d,2019 年继续延长到 69 d。由此可见,三门湾区域的水交换能力受围填海工程的影响,围填海工程使得三门湾岸线发生变化,减小了海湾面积,减小了涨潮和落潮流速,减弱了外海水体的进入以及湾内水体的向海输送,同时海湾的纳潮量显著减小,幅度可达 9.58%,意味着海湾容纳水体减少,湾内和外海水体半交换周期增大,削

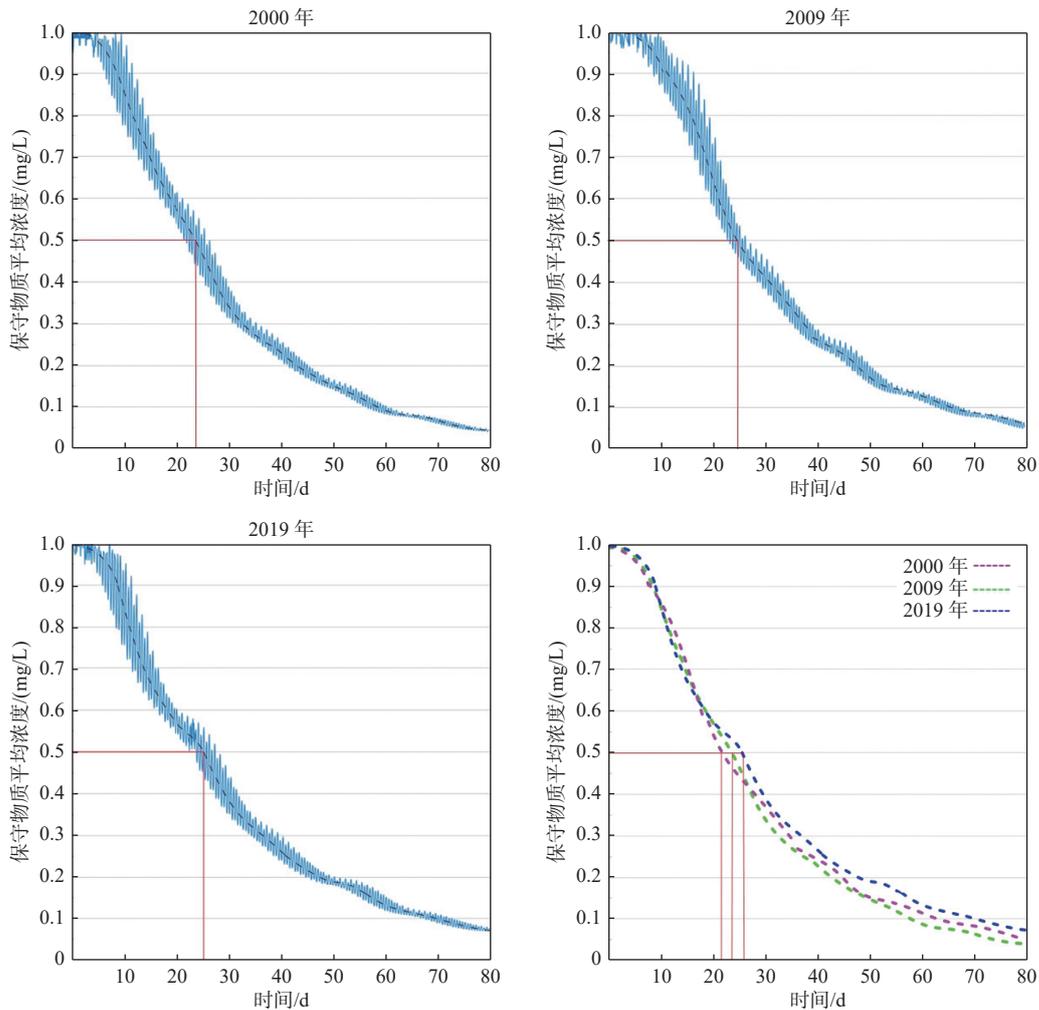


图 11 三门湾内保守物质平均浓度随时间变化情况

Fig.11 Temporal variation in average concentration of conservative substances in Sanmen Bay

弱了湾内的水交换能力。

4 结论

近年来,由于三门湾的围海造地、开发利用等人类活动使水动力和地貌发生了不同程度的变化。通过 MIKE21 水动力软件,创建三门湾海域的二维水动力数值模型,并将实测数据与模型计算结果进行率定验证,验证结果表明,该模型能较好地展现三门湾的水动力特征,在此基础上,计算并分析了三门湾围填海工程前后纳潮量及水交换特征与规律,结论如下:

(1)围填海影响下,三门湾主要水动力要素整体上均有不同程度的降低,流速在 2000—2009 年、2009—2019 年 2 个阶段受到了不同程度影响,第 2 阶段相对显著,涨、落潮流的流向流路基本保持不变,落潮流速对围填海的响应幅度稍大于涨潮流,

这一变化将进一步弱化三门湾的落潮流优势。通过添加保守物质浓度来定量分析三门湾的水交换特征,得到 2000 年半交换时间为 21~27 d,2009 年半交换周期为 23~29 d,2019 年半交换周期为 23~30 d。3 个年份的湾内保守物质浓度达到 90% 的时间在 2000 年是 58 d,2009 年延长到 65 d,2019 年继续延长到 69 d,数据证明,围填海工程确实影响湾内物质向外输运。

(2)三门湾在 2000—2019 年进行了围填海工程后,湾内空间发生了变化,但余流总体方向基本无明显变化,且余流量值不大。围填海后,在各港汊以及靠近外湾处可见余流流速减小,这将影响湾内泥沙及其他物质的向外运输,造成湾内泥沙淤积。经计算,2000、2009 和 2019 年的最大纳潮量分别为 5.06×10^9 、 4.95×10^9 和 $4.85 \times 10^9 \text{ m}^3$,最小纳潮量分别为 1.92×10^9 、 1.90×10^9 和 $2.03 \times 10^9 \text{ m}^3$,平均纳潮量分别为 3.55×10^9 、 3.39×10^9 和 $3.21 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

2000—2009 年平均纳潮量减小了 4.51%, 2009—2019 年平均纳潮量减小了 5.31%。围填海工程后海湾水交换能力降低。

(3) 大规模围填海工程的实施对三门湾水环境产生一定影响, 包括湾内的潮流、纳潮量及水体交换能力, 从而影响三门湾海域水体的纳污能力, 减小海域的水环境容量, 进一步影响沿岸区域的社会经济发展潜力。水动力环境对大规模围填海工程的响应范围不仅在围填附近的局部海域, 因时空尺度较大, 围填海面积大的三门湾海域的各项水动力要素响应幅度也最大; 有必要在工程项目规划实施前就区域水动力环境及其影响进行预测分析, 更合理地利用滩涂、海湾资源, 做到对海湾进行最有利开发与保护。

参考文献:

- [1] 吕赫, 张少峰, 宋德海, 等. 围填海累积效应对钦州湾水动力环境的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(4): 823-833.
- [2] WANG Y H, TANG L Q, WANG C H, et al. Combined effects of channel dredging, land reclamation and long-range jetties upon the long-term evolution of channel-shoal system in Qinzhou Bay, SW China[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 91: 340-349
- [3] FEI C P, HU R J, LUO M Y, et al. Hydrodynamic characteristics of Longkou Bay and its response to artificial island groups[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 81-95
- [4] 朱婷, 艾小榆. 围填海工程对广海湾海域水动力环境影响分析 [J]. 水利规划与设计, 2022, 3: 71-75.
- [5] 黄潘阳, 陈培雄, 来向华, 等. 三门湾 2003—2013 年间围涂工程对水动力环境的影响研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(10): 91-98.
- [6] 陈培雄, 张鹤, 周鑫, 等. 三门湾近期围填海工程对海洋环境综合影响分析 [J]. 绿色科技, 2018, 4: 104-109.
- [7] 李竹. 强潮海湾围垦工程对水动力的影响 [J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(11): 169-171.
- [8] 彭婷容. 三门湾水动力环境对围填海的响应 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [9] 姚炎明, 黄秀清. 三门湾海域环境容量及污染物总量控制研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [10] 衣秀勇, 关春曼, 果有娜, 等. DHI MIKE FLOOD 洪水模拟技术应用与研究 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [11] 王领元. 应用对河流一、二维的数值模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [12] DHI Water and Environment. MIKE 21 and MIKE 3 FLOW MODEL FM Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation[M]. Denmark: DHI Water and Environment, 2014.
- [13] 周哲睿, 刘姣, 吴浩力, 等. 基于 MIKE21 模型的水交换数值模拟研究 [J]. 陕西水利, 2021, 4: 17-20.
- [14] 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.
- [15] 许雪峰, 羊天柱. 三门湾多个围垦工程的整体影响数学模型研究 [J]. 海洋学研究, 2006, 24(1): 49-59.
- [16] 林明祥, 蔡廷禄, 王欣凯, 等. 近百年来浙江三门湾海岸线时空演变特征 [J]. 海洋学研究, 2021, 39(1): 47-55.
- [17] 陈士荫, 顾家龙, 吴宋仁. 海岸动力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [18] 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(7/8): 29-35.
- [19] 陈金瑞. 胶州湾及青岛近海岸线变迁对青岛近海海洋动力环境的影响研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [20] 陈倩, 黄大吉, 章本照, 等. 浙江近海潮流和余流的特征 [J]. 海洋学研究, 2003, 21(4): 1-14.
- [21] 吴创收, 黄世昌, 罗向欣. 三门湾海域悬沙输运特征及其影响机制 [J]. 水运工程, 2021, 7: 7-13, 31
- [22] 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.
- [23] CHEN H X, HUA F, LIU N, et al. Comparison among different methods for total prism calculation[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 1: 11-15.
- [24] 蒋昌波, 李媛, 官志鑫, 等. 铁山湾建港前后水体交换能力的数值模拟 [J]. 热带海洋学报, 2013, 32(1): 81-86.
- [25] 曹雪峰, 张宇铭, 张淑芳, 等. 基于数值模拟的大连湾水交换能力研究 [J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 114-120.

Influence of reclamation project on tidal volume and water exchange in Sanmen Bay

HAN Huihui¹, GAO Fei^{2*}, DING Dong¹, MA Le¹

(1 College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

Abstract: Taking Sanmen Bay in Zhejiang Province as the research area, the hydrodynamic characteristics of Sanmen Bay and its surrounding waters in 2000, 2009, and 2019 were simulated based on the Mike21 hydrodynamic model, and the impact of the reclamation project on the tidal volume and water flow in Sanmen Bay was analyzed and discussed. The calculation result of exchange capacity proves that in 2000, 2009, and 2019, the maximum tidal volume was $5.06 \times 10^9 \text{ m}^3$, $4.95 \times 10^9 \text{ m}^3$, and $4.85 \times 10^9 \text{ m}^3$, and the minimum tidal volume was $1.92 \times 10^9 \text{ m}^3$, $1.90 \times 10^9 \text{ m}^3$, and $1.80 \times 10^9 \text{ m}^3$, on average of $3.55 \times 10^9 \text{ m}^3$, $3.39 \times 10^9 \text{ m}^3$, and $3.21 \times 10^9 \text{ m}^3$, respectively. The average tidal volume from 2000 to 2009 decreased by 4.51%, and from 2009 to 2019, decreased by 5.31%. The water exchange capacity was quantitatively analyzed by conservative substance concentration diffusion. The semi-exchange duration in 2000 was 21-27 d, in 2009 was 23-29 d, and in 2019 was 23-30 d. The time for the concentration of conservative substances in the bay reaching 90% in the three stages was 58 days in 2000. In 2009, it extended additional 7 days to 65 days, and continued to increase to 69 days in 2019. The reclamation of Sanmen Bay has weakened the hydrodynamic conditions and water exchange capacity in the bay. The research results provide a scientific basis for the analysis of the impact of the reclamation project on the hydrodynamic environment of Sanmen Bay, and also a basis and reference for the decision-making of the construction and management of Sanmen Bay.

Key words: numerical simulation; hydrodynamics; Sanmen Bay; tidal volume; water exchange capacity