

崔恩莘, 张永强, 祝琳, 等. 千里岩岛西部人工鱼礁建设对周边海域水动力影响的数值模拟[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(2): 10-20.

千里岩岛西部人工鱼礁建设对周边 海域水动力影响的数值模拟

崔恩莘¹, 张永强^{2*}, 祝琳¹, 马晓歌¹

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

2 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061)

摘要:通过建立 Mike21FM 模型, 对千里岩西部人工鱼礁建设区域及周围海域的水动力情况的数值模拟进行研究, 分别选取工程前后的涨急时刻和落急时刻的潮流流速进行求差, 得出 2 个时刻的潮流流速变化等值线与分布范围。并选取 720 h 进行欧拉余流计算, 对工程前后的余流流速进行求差, 由此得出余流在工程建设后的变化情况。由此研究工程建设对周围海域水动力情况的影响, 进而对鱼礁区选址的合理性, 营养盐的流失或富集区域及水质的研究提供参考。研究表明, 工程建设产生的阻流效果在工程内部区域可达 $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 涨急时刻潮流流速增大的区域位于工程区域南北两侧, $>0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 面积约 4.52 km^2 ; 涨急时刻潮流流速减少的区域分布于工程区域东西两侧, 流速减少超过 $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的面积约 4.28 km^2 ; 工程区域内部余流流速减少均值在 $0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 工程区域外周边海域余流流速整体增大, 最大增值超过 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域出现于工程东部, 面积 0.41 km^2 。

关键词:数值模拟; 千里岩岛; 人工鱼礁; Mike21 模型

中图分类号: P75

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.040

0 引言

千里岩岛位于南黄海, 地理位置为 $36^{\circ}15'57''\text{N}$, $121^{\circ}23'09''\text{E}$ 。长 0.82 km , 宽 0.24 km , 面积为 0.2 km^2 , 距大陆最近点海阳市凤城码头 47.7 km ^[1]。千里岩岛西部海域水质清新, 无污染, 属一类海区, 渔业资源丰富, 地形平坦, 依托千里岩岛的岛屿优势, 是人工鱼礁建设的优良选址地^[2]。千里岩岛西部海域预投礁区域与鱼礁规模如图 1 所示, 预投放的人工鱼礁堆积体积共约 15 万 m^3 , 投放鱼礁区域为 $121^{\circ}13'39''-121^{\circ}13'59''\text{E}$, $36^{\circ}16'46''-36^{\circ}17'03''\text{N}$, 面积 $0.5\times 0.5 \text{ km}^2$, 共堆积 9 个鱼礁堆, 呈“3×3”

式分布, 鱼礁堆之间间隔 190 m , 每个鱼礁堆占地 $40\times 40 \text{ m}^2$, 堆积高度为 10 m 。工程区域地形平坦, 等深线大致与海岸线平行, 水深约为 32 m , 如图 2 所示。

本文基于 Mike21 软件对工程前后周围海域流场的变化进行数值模拟对比研究, 在模型中设置人工构筑物, 以此模拟海底的人工鱼礁堆积, 每个鱼礁堆的 4 个面设置为 4 道堰, 工程区域内共设置 36 道堰, 即可模拟工程完成后周围海域的水动力情况。通过对工程前后的潮流场与余流场作差, 得出工程建设对周围海域水动力的影响。流向影响鱼类的活动, 流速影响鱼礁的增殖效果和稳定性^[3], 进而对鱼礁区选址的合理性, 鱼礁区营养盐的流失或富集区域及水质的研究提供参考。

1 数学模型的建立与验证

1.1 模型简介

Mike21 软件是由丹麦水力研究所开发, 用于

收稿日期: 2020-04-17

资助项目: 国家自然科学基金“南海北部陆坡神狐海域峡谷区黏性土海底滑坡过程及其动力学机制研究”(41876066)

作者简介: 崔恩莘(1996—), 女, 在读硕士, 主要从事数值模拟方面的研究工作.E-mail: 498328362@qq.com

* 通讯作者: 张永强(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋水动力环境数值模拟方面的研究工作.E-mail: zyqiang@fio.org.cn

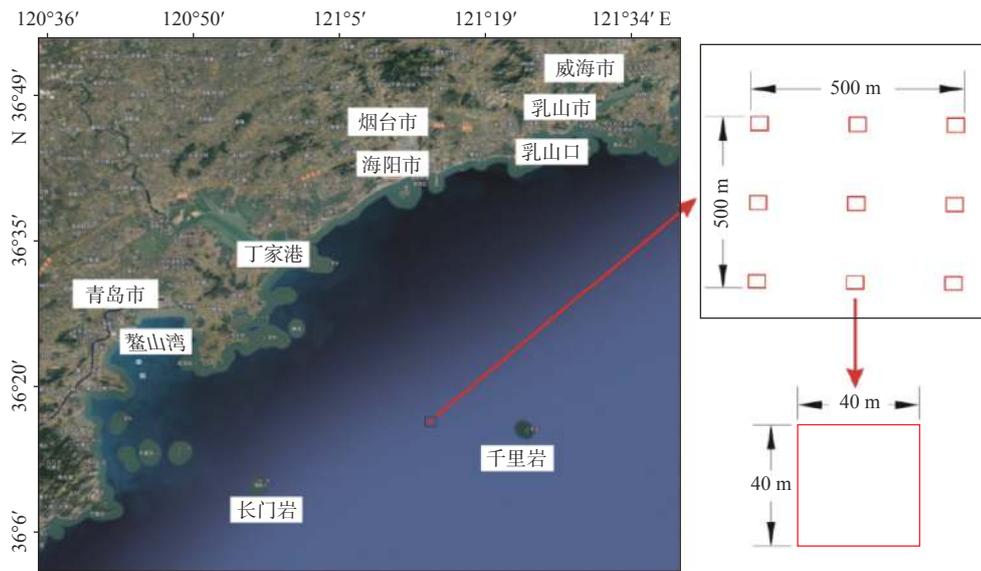


图 1 工程区域位置及规格

Fig.1 Location and specifications of the engineering areas

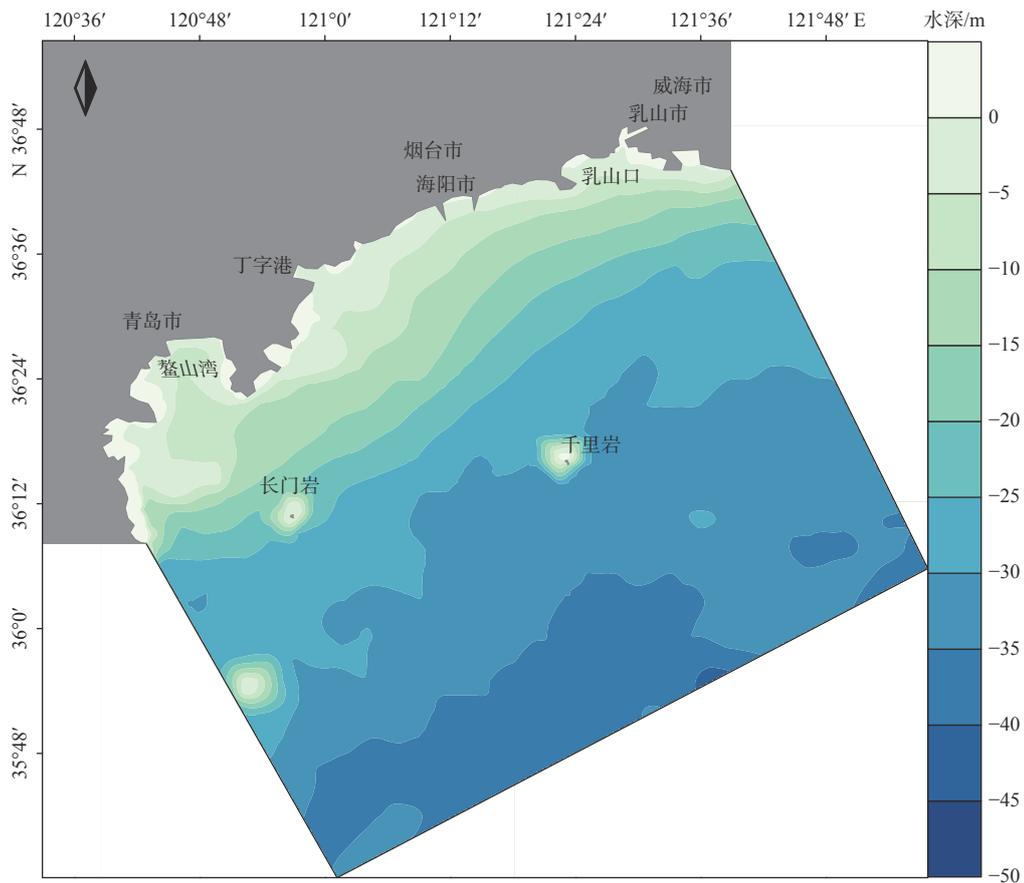


图 2 研究区域地形

Fig.2 Topography of the study area

对河流、湖泊、河口、海湾、海岸及海洋的水流、波浪、泥沙等的模拟, 在国内外都得到了广泛应用^[4-8]。

(1) 控制方程

模型基于三向不可压缩和 Reynolds 值均布的

Navier-Stokes 方程, 并服从 Boussinesq 假定和静水压力假定。

二维非恒定浅水方程组为:

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

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

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

式中: t 为时间, s;

x, y 为 Cartesian 坐标系;

η 为水位, m;

d 为静水深, m;

h 为总水深, m;

\bar{u}, \bar{v} 分别为沿水深平均的 x 和 y 方向上速度分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

f 为科氏参数, $f=2\omega\sin\varphi$, ω 为地球自转角速度, φ 为地理纬度;

g 为地球重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$;

ρ 为水密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

ρ_0 为水的参考密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

τ_{sx}, τ_{sy} 为风应力分量, Pa;

τ_{bx}, τ_{by} 为底部应力分量, Pa;

$s_{xx}, s_{xy}, s_{yx}, s_{yy}$ 为辐射应力分量, Pa;

p_a 为当地大气压, Pa;

S 为源汇项;

u_s, v_s 为源汇项的水流速度分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

$T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$ 为横向应力分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(2) 边界条件

本次模型使用水位边界作为开边界。模型开边界调和常数由 MIKE21 全球潮汐模型得到, 然后根据得到的调和常数对开边界水位进行预报, 预报公式如下:

$$\zeta = A_0 + \sum_{i=1}^{11} H_i F_i \cos[\sigma_i t - (v_0 + u)_i + g_i] \quad (4)$$

式中: A_0 为平均海面;

$F_i, (v_0 + u)_i$ 为天文要素;

σ_i 为角频率;

H_i, g_i 为某分潮的调和常数, 即振幅与迟角。

(3) 时间设置

模型起始时间 0, 主时间步长 3600 s, 时间步

数 750。时间步长根据 CFL 条件动态调整, 模型运行稳定, 最短时间步长 0.01 s, 最长时步长 30 s。

(4) 计算范围与网格划分

计算域东起 $120^\circ 38' \text{E}$, 西到 $121^\circ 58' \text{E}$, 北起 $35^\circ 36' \text{N}$, 南至 $36^\circ 48' \text{N}$, 东西宽约 112 km, 南北方向跨度约 133 km, 计算面积约 $8\,898.66 \text{ km}^2$ 。模型采用三角形网格计算, 网格多层嵌套, 向着工程区域为中心逐级加密, 网格数量共 23 107 个, 节点共 11 697 个, 存在于工程区域内最小空间步长为 46 m, 最大空间步长为 4 788 m, 计算时间步长为 3 600 s。计算区域与网格划分如图 3 所示。

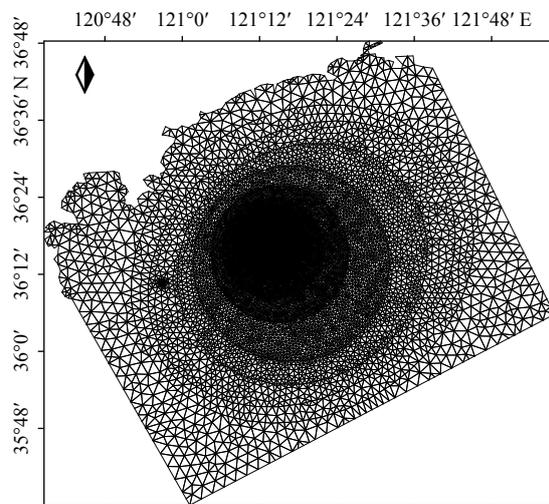


图 3 模型网格划分

Fig.3 Model grid division

1.2 模型率定

模型采用千里岩附近的 2 个站位所得的海流实测资料进行流速、流向的验证, 测流站位位置见图 4。1 号站位的实测数据时间为 2019 年 4 月 27 日 11 时—2019 年 4 月 28 日 12 时, 为小潮期; 2 号站位的数据测量时间为 2019 年 5 月 6 日 11 时—2019 年 5 月 7 日 12 时, 为大潮期。验证结果显示 (图 5), 流速除个别时段外, 实测量值与模拟量值相差不大, 其发生最大流时刻吻合, 相位对应良好; 流向的实测值和模拟值验证结果各方面均良好。由此可知, 所建模型基本正确, 能够反映研究海域的水动力情况。

2 工程建设对周边海域潮流场的影响

2.1 工程建设前潮流场

研究海域潮流类型为规则半日潮^[9], 潮流运动形式在外海开阔海区多为旋转流, 近岸海区多为往

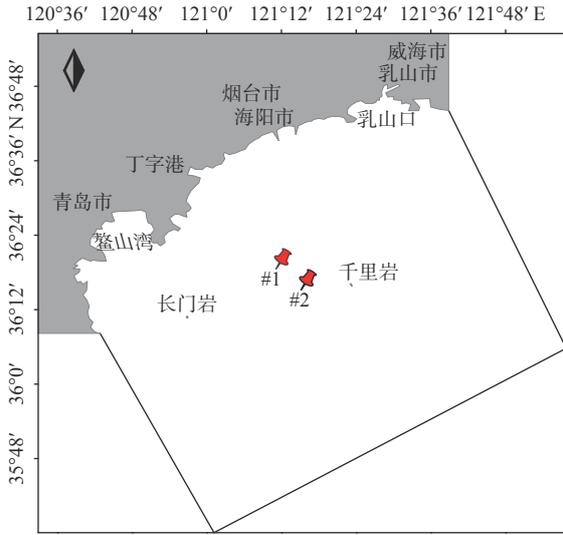


图 4 测流站位

Fig.4 Current survey stations

复流。选取中潮时期同一时间对工程前后潮流场进行对比分析,可代表工程区域大部分时间的潮流场情况。

经模拟得到的潮流场如图 6(涨急时刻)、图 7(落急时刻)所示,本文的涨落急时刻以工程区域为标准而定。整体来看,流速由近岸向海逐渐变大,涨急时刻流速大于落急时刻流速。由北向南可见,乳山口外附近海域潮流沿 NW-SE 方向流动,涨潮流偏 NW 向流动,落潮流流向则相反,此结果与刘涛等^[10]研究结果相似。乳山口内流速 $< 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,向外海逐渐变大。往南至海阳港及以东的外海和以南至丁字港的海区潮流主流向为 E-W 向,涨潮流流向为 E 向,落潮流流向相反,与汪守东等^[11]研究结果近一致。丁字港以南至长门岩岛,以东至千里岩岛北,潮流流向呈 NE-SW 向,涨急时刻偏

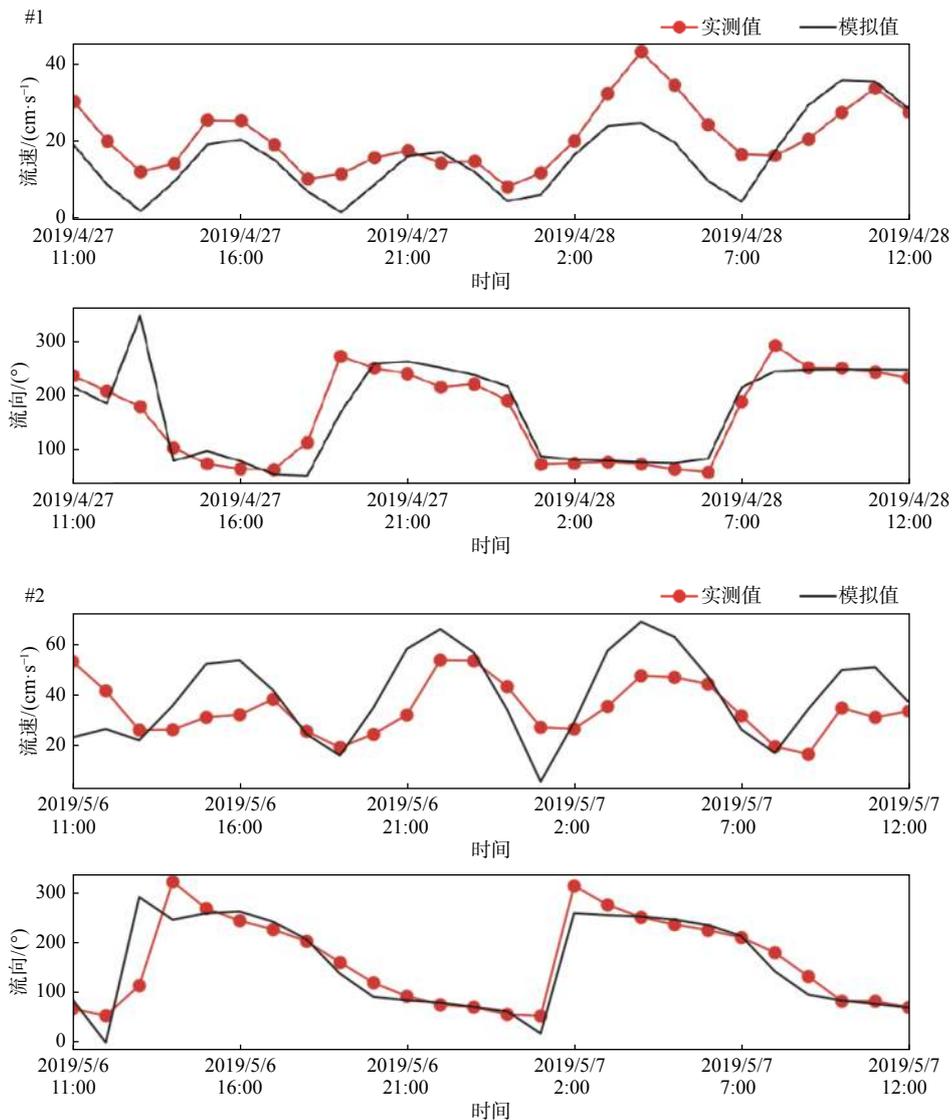


图 5 #1-小潮期间、#2-大潮期间站位流速、流向验证图

Fig.5 Verification diagram of flow velocity and flow direction of #1-neap tide period and #2-spring tide period

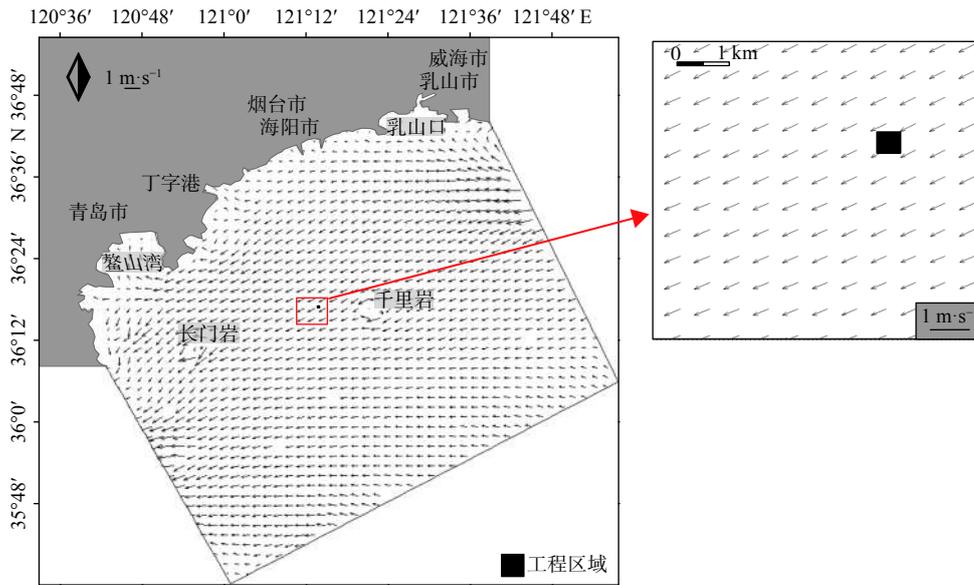


图6 工程前涨急潮流场

Fig.6 The tidal current field at maximum flood before the project

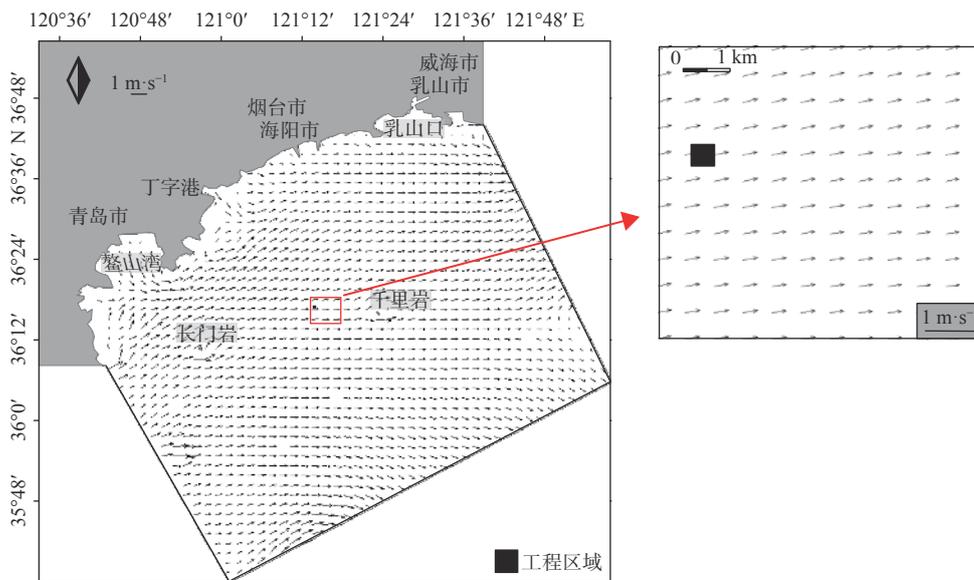


图7 工程前落急潮流场

Fig.7 The tidal current field at minimum flood before the project

SW向,落急时刻流向相反,该区域涨急时刻流速主要在 $0.40\sim 0.62\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,落急时刻流速值在 $0.34\sim 0.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,均是由北向南增大,近岸处与千里岩岛、长门岩岛东西两侧偏小,两岛屿南北两侧偏大。鳌山湾的潮流流向由湾内向外海呈N-S向至NW-SE向过渡,涨潮时偏N-NW向,落潮时流向相反,湾内流速最大值在湾口中央处,涨急时刻为 $0.31\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,落急时刻为 $0.35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与赵俊等^[12]、李淑玲等^[13]的研究成果相似,此处落潮流速大于涨潮流速,推测是由于该区域的涨落急时刻点与测流站的涨落急时刻点有差异。以上结论也佐证了本次模拟结果的正确性。工程区域位于千

里岩岛西部,所在海域涨急时刻潮流流向偏SW向,流速平稳,均在 $0.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右;落急时刻潮流流向近E向,流速在 $0.43\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。长门岩岛东南海域潮流流向呈E-W向,涨急时刻流向近W向,落急时刻近E向,流速从西到东减小。

2.2 工程建设后潮流场

工程建设后的潮流场如图8、9所示,除工程区域附近海域外,其余海域的潮流场与工程建设前并无二致。而工程区域附近海域,潮流的流速流向被明显改变,图中可见潮流异常区,工程区域内及东西两侧流速减小,而工程区域南北两侧流

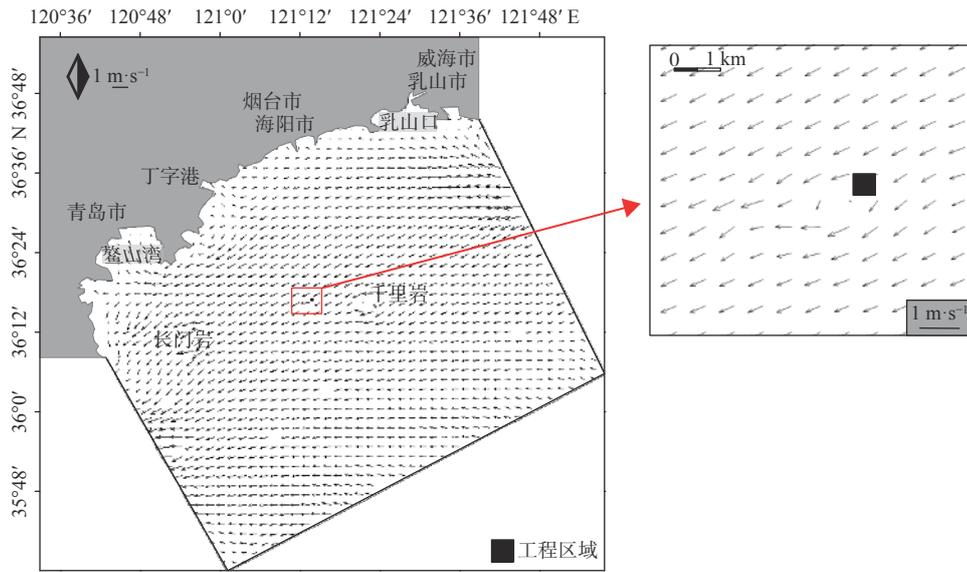


图 8 工程后涨急潮流场

Fig.8 The tidal current field at maximum flood after the project

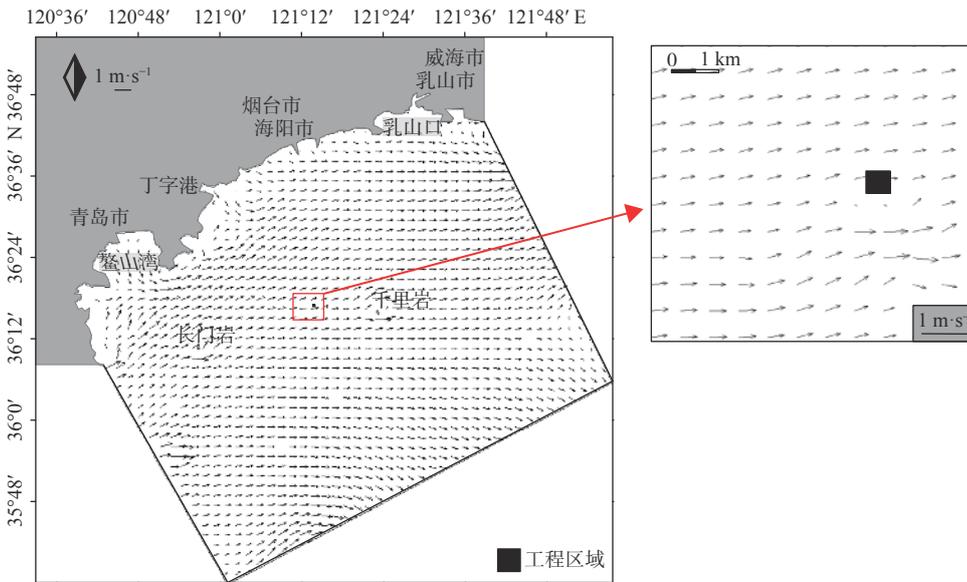


图 9 工程后落急潮流场

Fig.9 The tidal current field at minimum flood after the project

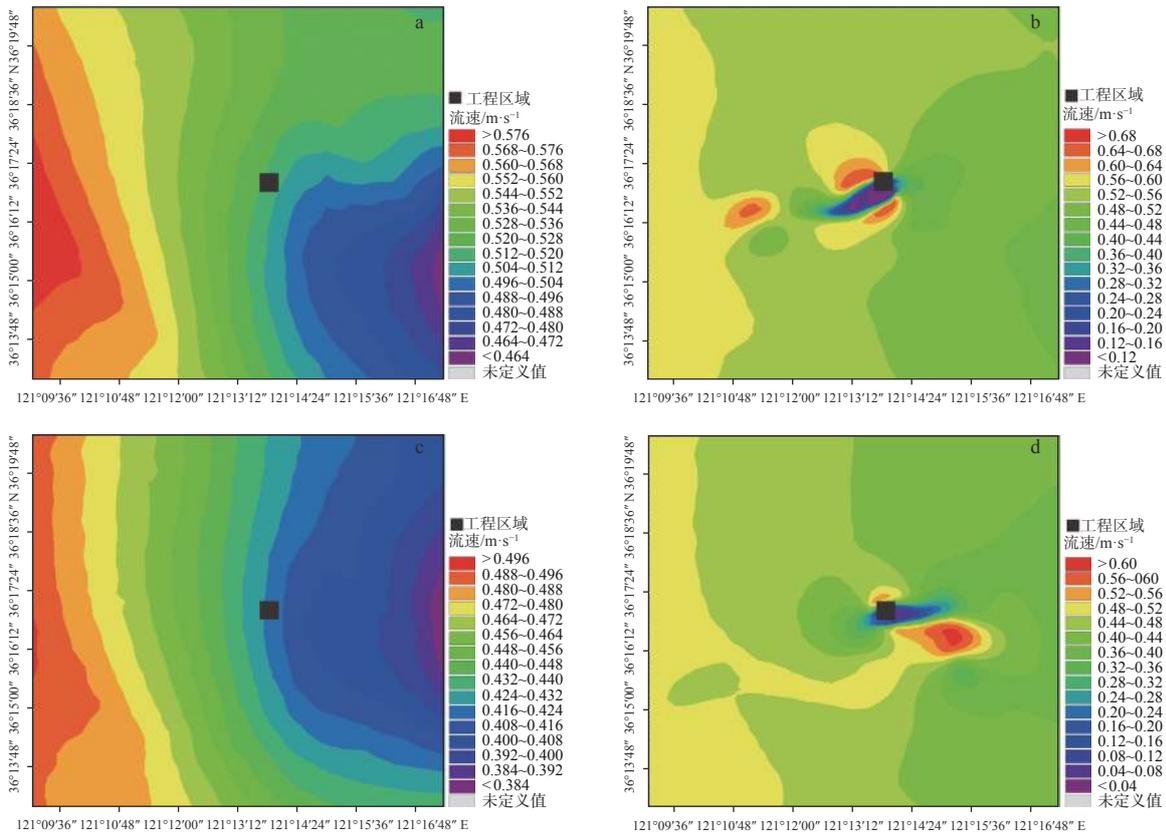
速增大。工程区域附近的潮流流向也受到工程影响发生一定的偏转。

2.3 工程建设前后涨急与落急流速对比

工程前后的流速变化范围和大小可以直观地反映工程建设对周围海域的影响情况。流速变化概况如图 10 所示, 涨急时刻的流速增大的区域出现在工程区域西北部和南部, 流速减小区域在工程区域内部, 东部和西南部; 落急时刻流速增大的区域出现在工程区域北部和西南部, 流速减小的区域出现在工程区域内部、东部和西部。

涨急时刻的流速变化等值线与具体影响范围

如表 1、图 11 所示, 以工程区域中心为距离测量基点, $0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速变化范围向北 $0.33\sim 3.80 \text{ km}$, 流速增大值 $>0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的面积约 11.6 km^2 ; 向南 $0.56\sim 2.93 \text{ km}$, 面积约 5.7 km^2 。 $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速变化向北影响最远距离 1.41 km , 流速增值 $>0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的面积约 2.2 km^2 ; 向南影响最远距离 1.65 km , 面积约 1.4 km^2 。 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速变化等值线影响最远距离向北为 0.78 km , 流速增值 $>0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围为 0.7 km^2 ; 向南最远距离为 1.1 km , 面积约 0.3 km^2 。 $-0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速变化影响距离东至 4.35 km , 西至 5.73 km , 流速减少 $>0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的面积约 19.1 km^2 。 $-0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速变化影响距离东至 1.86 km , 西至



(a) 工程前涨急时流速; (b) 工程后涨急时流速; (c) 工程前落急时流速; (d) 工程后落急时流速

图 10 工程前后流速对比图

Fig.10 Comparison of flow velocities before and after the project

表 1 涨急时刻流速变化情况

Table 1 Changes in velocity at maximum flood

等值线/(m·s ⁻¹)	向东/km	向西/km	向南/km	向北/km	影响面积/km ²
0.01	2.00	5.90	2.93	3.80	17.29
0.05	0.63	5.21	1.65	1.41	4.52
0.1	0.49	4.62	1.10	0.78	1.12
-0.01	4.35	5.73	3.88	2.55	19.08
-0.05	1.86	3.02	1.01	0.64	4.28
-0.1	0.88	2.67	0.98	0.54	2.23
-0.2	0.51	2.20	0.91	0.29	1.43
-0.3	0.04	1.60	0.77	—	1.02
-0.4	—	1.25	—	—	0.42

注:①所测量的距离均是以工程区域中心为基点,分别向正东、正西、正南、正北方向测量的最大距离;②“—”表示在工程区域内;③“影响面积”指大于正等值线值或小于负等值线值的范围。

3.02 km, 流速减少 >0.05 m·s⁻¹ 的面积约 4.3 km²。
 -0.1 m·s⁻¹ 流速变化等值线东至 0.88 km, 西至 2.67 km, 流速减少 >0.1 m·s⁻¹ 的面积约 2.2 km²。
 -0.2 m·s⁻¹ 流速变化等值线东至 0.51 km, 西至 2.2 km, 流速减少 >0.2 m·s⁻¹ 的面积约 1.4 km²。
 -0.3 m·s⁻¹ 流速变化等值线东至 0.04 km, 西至 1.6 km, 流速减少 >0.3 m·s⁻¹ 的面积约 1 km²。
 -0.4 m·s⁻¹ 流速变化

主要发生在工程区域内至偏西 1.25 km 处, 范围较小。

在工程区域西部约 3.45 km 处的流速变化 -0.01 m·s⁻¹ 等值线以西, 有一流速增大区域, 流速增大值 >0.01 m·s⁻¹ 的范围面积约 2.5 km², 东西宽为 2.4 km, 南北长约 1.5 km; 流速增大值 >0.05 m·s⁻¹ 的范围面积约 1 km², 东西宽为 1.45 km, 南北长约 0.90 km; 流速增大值超过 0.1 m·s⁻¹ 的范围面积约 0.1 km², 东西宽为 0.5 km, 南北长约 0.3 km。

落急时刻的流速变化等值线与具体影响范围如表 2、图 12 所示, 以工程区域中心为距离测量基点, 0.01 m·s⁻¹ 流速变化范围向北 0.45~2.22 km, 流速增大值 >0.01 m·s⁻¹ 的面积约 3 km²; 向南 0.44~4.47 km, 东至 5.53 km, 西至 4.5 km, 面积约 21.1 km²。
 0.05 m·s⁻¹ 流速变化向北影响最远距离 1.16 km, 流速增值 >0.05 m·s⁻¹ 的面积约 0.66 km²; 向南影响最远距离 2.95 km, 东至 5.54 km, 西至 1.15 km, 面积约 7.1 km²。
 0.1 m·s⁻¹ 流速变化等值线影响最远距离向北为 0.77 km, 流速增值 >0.1 m·s⁻¹ 的范围为 0.12 km²; 向南最远距离为 1.43 km, 东至 3.45 km, 面积约 2.69 km²。
 -0.01 m·s⁻¹ 流速变化影响距离东至 3.43 km, 西至 3.31 km, 流速减少 >0.01 m·s⁻¹ 的

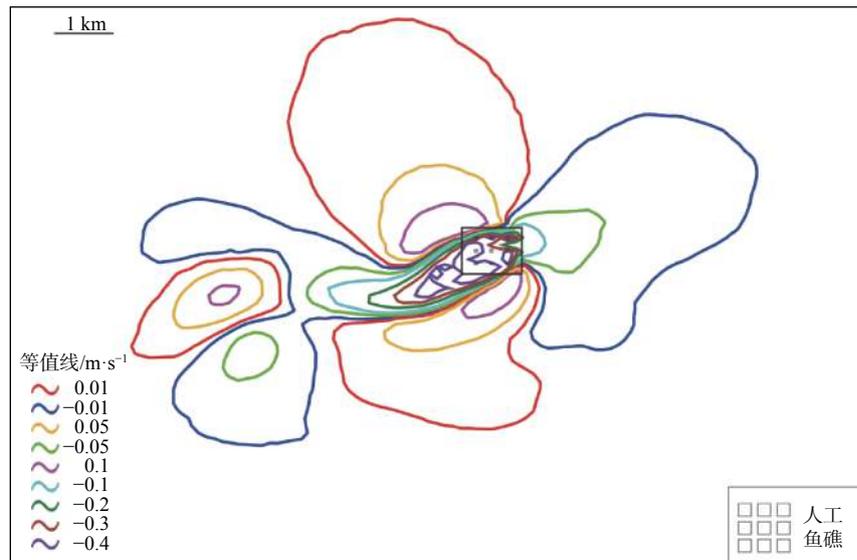


图 11 涨急时工程前后流速变化等值线

Fig.11 Contours showing the change of flow velocity before and after the project during the maximum flood

表 2 落急时刻流速变化情况

Table 2 Changes in flow velocity at the minimum flood

等值线/(m·s ⁻¹)	向东/km	向西/km	向南/km	向北/km	影响面积/km ²
0.01	5.53	4.50	4.47	2.22	14.12
0.0	5.54	1.15	2.95	1.16	7.75
0.1	3.45	0.42	1.43	0.77	2.81
-0.0	3.43	3.31	3.78	2.14	14.27
-0.0	2.79	1.72	2.43	0.93	4.25
-0.1	2.42	1.08	0.55	0.63	2.07
-0.2	1.71	0.49	0.30	0.38	0.95
-0.3	1.22	—	—	—	0.44
-0.4	—	—	—	—	0.01

注: ①所测量的距离均是以工程区域中心为基点, 分别向正东、正西、正南、正北方向测量的最大距离; ②“—”表示在工程区域内; ③“影响面积”指大于正等值线值或小于负等值线值的范围。

面积约 10.5 km²。-0.05 m·s⁻¹ 流速变化影响距离东至 2.79 km, 西至 1.72 km, 流速减少 > 0.05 m·s⁻¹ 的面积约 3.7 km²。-0.1 m·s⁻¹ 流速变化等值线东至 2.42 km, 西至 1.08 km, 流速减少 > 0.1 m·s⁻¹ 的面积约 2.1 km²。-0.2 m·s⁻¹ 流速变化等值线东至 1.71 km, 西至 0.49 km, 流速减少 > 0.2 m·s⁻¹ 的面积约 0.9 km²。-0.3 m·s⁻¹ 流速变化主要发生在工程区域内至偏东 1.22 km, 流速减少 > 0.3 m·s⁻¹ 的面积约 0.4 km²。-0.4 m·s⁻¹ 流速变化主要发生在工程区域内, 范围较小。

在工程区域东南方向上, 0.01 m·s⁻¹ 等值线外, 距工程区域中心偏南 1.51 km, 偏东 1.89 km 处有一

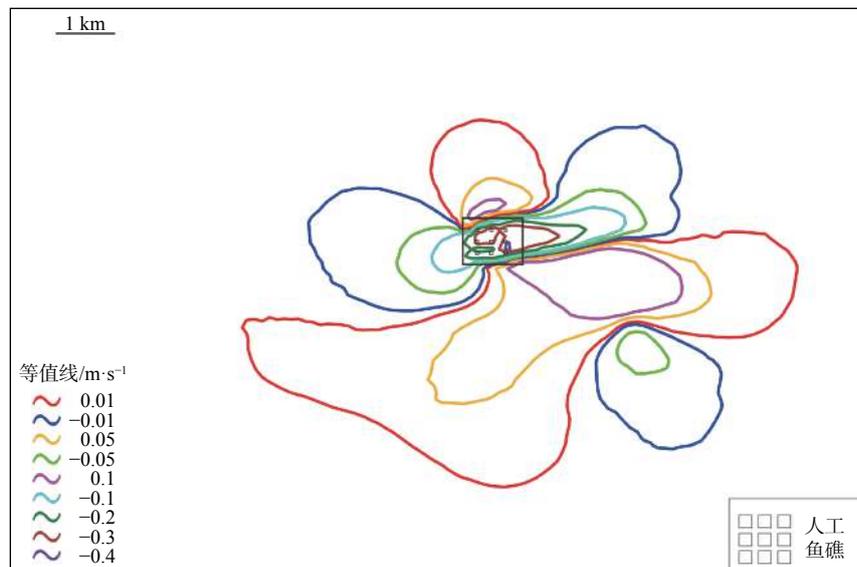


图 12 落急时工程前后流速变化等值线

Fig.12 Contours showing the change of flow velocity before and after the project during the minimum flood

流速较小区域,流速减小值 $>0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围面积约 3.8 km^2 ,东西宽为 2.26 km ,南北长约 2.23 km ;流速减小值 $>0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围面积约 0.5 km^2 ,东西宽为 0.95 km ,南北长约 0.77 km 。

3 工程建设对周边海域余流场的影响

3.1 工程前后的潮余流场

潮流的非线性作用产生了潮汐余流。本文主要讨论的欧拉余流可定义为所有经过某一空间点上的质点的速度矢量和在某一时间段内的平均,反映的是通过某一空间点的所有物质所表现出来的整体净输移趋势^[14]。

$$u_{Euler} = \frac{1}{T} \int_T u dt \quad (5)$$

式中: u_{Euler} 为欧拉余流的速度;

T 为计算潮周期;

u 为某一时刻潮流速度。

本文选取 720 h 进行欧拉余流计算,得出工程前后的余流场如图13和图14所示。除工程区域附近海域,计算域内大部分海区工程前后余流场情况均相同。大部分区域余流较弱,尤其是中央开阔水区,余流流速均在 $0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右;就计算域的整体流向来说,以千里岩岛为界,西、北方略低,流向偏SW,东、南方略高,流向偏S。流速最小值发生在沿岸地区,普遍 $<0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,距岸愈近流速值愈小,其中鳌山湾内余流值最小,与李淑玲等^[13]研究

结果相似。流速较大值区域,除开边界附近较强潮流区域导致的较大余流外,以长门岩岛南部 $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和千里岩岛西南部 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为最大,其余主要分布于长门岩岛北部的2个余环流及东部1个余环流和千里岩岛西部的1个余环流海域。4个余环流流向由西向东依次是逆时针、顺时针、逆时针和逆时针;流速环心小,向外渐大,依次约 $0.03\sim 0.1$ 、 $0.04\sim 0.28$ 、 $0.04\sim 0.15$ 和 $0.05\sim 0.18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

工程前的工程区域流向均一,为偏SW向,余流值均为 $0.06\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,工程后围绕该区域呈一近似逆时针余环流,工程区域位于环流内部流速普遍减小,环流外部最大值处增至 $0.18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。粒子运移路径和距离与欧拉余流的分布有着密切的关系,在欧拉余流场中,流向比较一致的区域,粒子运移路径和余流方向高度一致,而在欧拉余流流向分布比较复杂的区域,如余环流,粒子运移则无固定方向,在一定范围内反复运移^[14]。工程建设后工程区域附近欧拉余流场呈一小型逆时针余环流,推测其物质输运方向发生改变。具体余流流速变化将在下一节进行讨论。

3.2 工程建设前后余流流速对比

余流的流速变化等值线与具体影响范围如表3、图15所示。由图15可见,工程区域内部余流流速减少均值在 $0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,周边海域余流流速整体增大,最大增值超过 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域出现于工程东部,说明工程建设后工程区域内海水的净输运速度减小,周边海域整体的净输运加快,尤其是工程

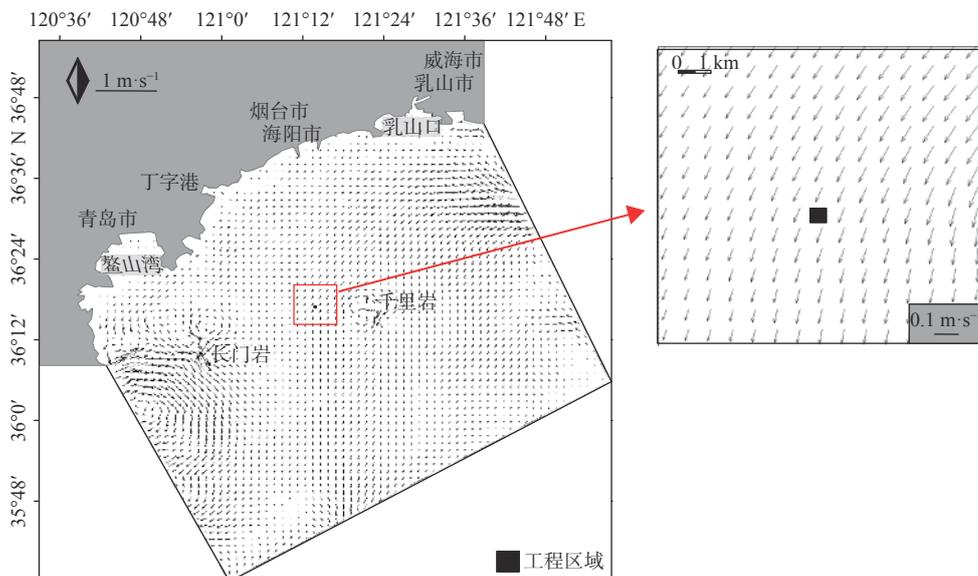


图13 工程前余流场

Fig.13 Residual current field before the project

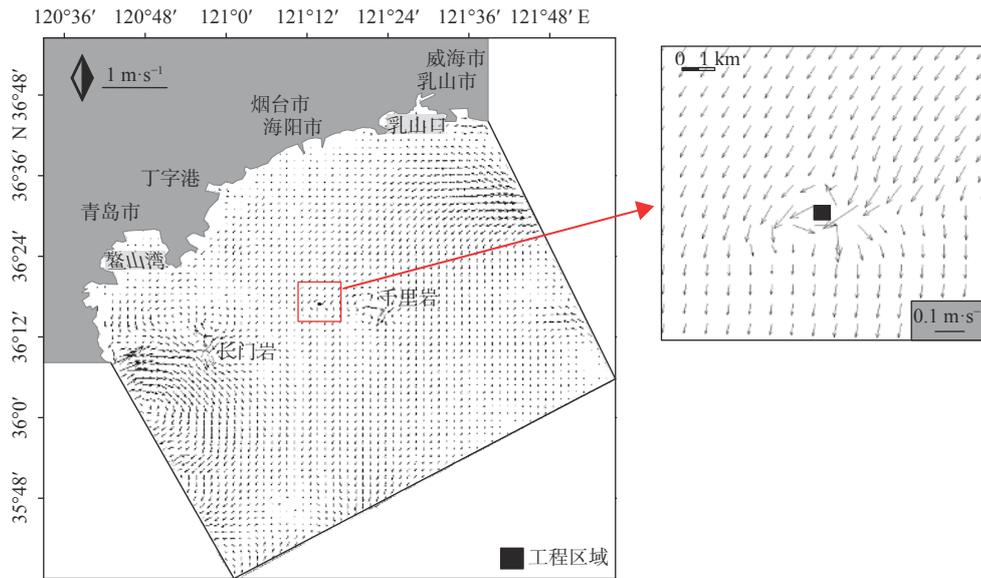


图 14 工程后余流场

Fig.14 Residual current field after the project

表 3 余流流速变化情况

Table 3 Changes in velocity of residual current

等值线/(m·s ⁻¹)	向东/km	向西/km	向南/km	向北/km	影响面积/km ²
0.01	4.16	5.32	1.53	1.73	13.91
0.05	2.26	2.09	0.83	1.46	3.07
0.1	1.52	3.22	0.47	0.48	0.41
-0.01	8.08	3.22	3.35	2.25	15.98

注: ①所测量的距离均是以工程区域中心为基点, 分别向正东、正西、正南、正北方向测量的最大距离; ②“—”表示在工程区域内; ③“影响面积”指大于正等值线值或小于负等值线值的范围。

区域东部。

以工程区域中心点为距离测量基点, 流速 $> 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围向东最远距离 4.16 km, 向西 5.32 km, 向南至 1.53 km, 向北最远至 1.73 km, 流速增大值 $> 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的海域面积约 13.91 km²。流速 $> 0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围向东最远距离 2.26 km, 向西 2.09 km, 向南至 0.83 km, 向北最远至 1.46 km, 流速增大值 $> 0.05 \text{ m/s}$ 的海域面积约 3.07 km²。流速增

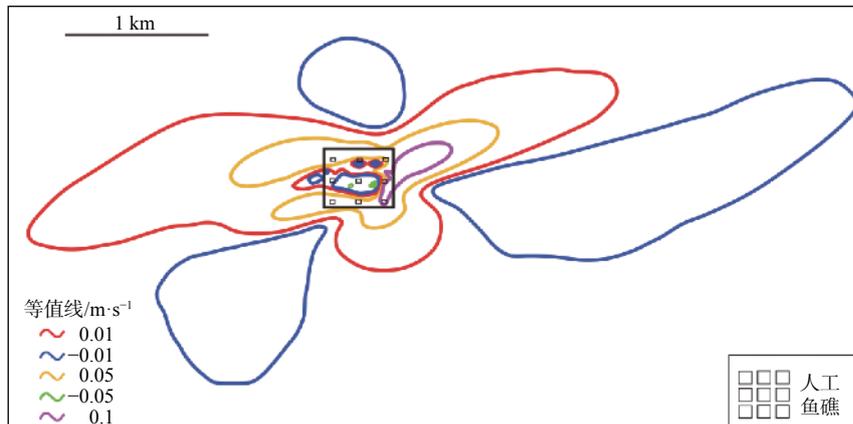


图 15 工程前后余流场流速变化等值线

Fig.15 Contours showing the change of flow velocity of residual current field before and after the project

值 $> 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围主要出现在工程以东, 向东最远影响距离为 1.52 km, 向南至 0.47 km, 向北最远至 0.48 km, 流速增大值 $> 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的海域面积约 0.41 km²。流速减小 $> 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域东向在距基点 1.15~8.08 km 范围内, 面积 9.51 km²; 西南方向的区域距基点 135°直线距离 0.96~4 km 内, 面积 4.41 km²; 向北直线距离 0.79~2.26 km 内, 面积 1.85 km²。流速减小 $> -0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速变化发生在

工程区域内部中心, 影响面积积极小, 仅约 0.004 km²。

4 结论

本文通过建立 Mike21FM 模型, 对比分析千里岩西部人工鱼礁建设前后周围海域的水动力情况, 研究工程建设对周围海域的影响, 得出以下几点结论:

(1) 工程区域在工程建设前的涨急潮流流速均

为 $0.53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 流向偏 SW 向, 流速平稳; 落急潮流流速均在 $0.43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 流向近 E 向; 工程建设后工程区域内部, 潮流速在涨落急时刻减少均值分别在 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 最大值达 $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 阻流效果显著。就水动力环境方面而言, 该人工鱼礁的选址合理。

(2) 工程建设后工程区域附近欧拉余流场呈一小型逆时针余环流, 推测其物质输运方向发生改变, 对人工鱼礁有着重要意义的营养盐的含量也将随扩散速度的改变而改变。工程区域内部余流流速减少均值在 $0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 工程建设后工程区域内海水的净输运速度减小, 有利于营养盐的富集; 工程区域外周边海域余流流速整体增大, 最大增值 $>0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域出现于工程东部, 说明周边海域整体的净输运加快, 以工程区域东部为尤, 有利于水体更新。

(3) 潮流场的流速增大区主要在工程区域南北部, 减少区在工程区域内部及东西部, 并均有一定的影响范围。余流减少 $>0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的面积达 15.98 km^2 , 增大值 $>0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围达 0.41 km^2 。以上数据及定位可对人工鱼礁海域水质监测等提供参考。

参考文献:

- [1] 马鹏飞. 南黄海千里岩石榴辉岩的岩石学、矿物学、年代学特征及其地质意义[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
[2] 张亮, 宋春丽, 纪莹璐. 千里岩岛水产种质资源保护区海域秋季

大型底栖生物群落结构特征[C]//海洋开发与管理第二届学术会议论文集, 北京: 海洋出版社, 2018: 122-128.

- [3] 贾后磊, 谢健, 彭昆仑. 人工鱼礁选址合理性分析[J]. 海洋开发与管理, 2009, 26(4): 72-75.
[4] 刘鑫仓, 刘艳玲, 迟万清, 等. 渤海湾潮致余流数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(3): 224-231.
[5] CHI W Q, ZHANG X D, ZHANG W M, et al. Impact of tidally induced residual circulations on chemical oxygen demand (COD) distribution in Laizhou Bay, China. [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020: 151:110811.
[6] 高亚洲. 基于MIKE21预测不同位置的溢油事故对水厂的影响[J]. 节能, 2020, 39(3): 142-143.
[7] 郭亚男, 韩亚萍, 宋文超. 灌河流域生态需水确定及保障措施分析[J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 63-66.
[8] 周广镇. 莱州湾东岸近岸海域规划用海实施后冲淤演变预测[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
[9] 汤毓祥, 姚兰芳. 南黄海潮流和潮余流的数值计算[J]. 海洋湖沼通报, 1989(2): 1-7.
[10] 刘涛, 侯志强. 威海港乳山港区规划方案波浪潮流泥沙数值模拟研究[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 43-48.
[11] 汪守东, 徐洪磊. 烟台港海阳港区沙滩冲淤稳定性数值模拟分析[J]. 水运工程, 2010(7): 11-17.
[12] 赵俊, 陈聚法. 鳌山湾水动力状况研究[J]. 海洋水产研究, 2001(3): 59-63.
[13] 李淑玲, 宋玉鹏, 边淑华, 等. 鳌山湾水动力环境及泥沙运动特征研究[J]. 海洋开发与管理, 2011, 28(5): 58-62.
[14] 刘鑫仓, 刘艳玲, 迟万清, 等. 胶州湾潮余流和物质输送之间的关系[J]. 海洋湖沼通报, 2019(2): 10-17.

NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF ARTIFICIAL REEFS ON MARINE HYDRODYNAMICS TO THE WEST OF QIANLIYAN ISLAND

CUI Enping¹, ZHANG Yongqiang^{2*}, ZHU Lin¹, MA Xiaoge¹

(1 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on the Mike21FM model, the hydrodynamic conditions of the artificial reef construction area and the surrounding sea area in Qianliyan West are simulated. The Euler residual current is calculated for 720 hours, and the residual flow velocity before and after engineering is calculated. The influence of engineering construction on hydrodynamic condition of surrounding sea area is studied. Furthermore, it provides reference for the study of the rationality of reef site selection, nutrient loss or enrichment area and water quality. The research shows that the resistance effect of engineering construction can reach $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The area where the current velocity increases during the period of surge is located in the north and south sides of the project area, with an area greater than $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ of about 4.52 km^2 ; The area where the current velocity decreases over $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ is about 4.28 km^2 . The mean decrease of euler residual current velocity in the project area was around 0.01 m/s , and the overall increase of euler residual current velocity in the surrounding sea area outside the project area, and the area with the maximum increase of more than $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ appeared in the east of the project with an area of 0.41 km^2 .

Key words: numerical simulation; Qianliyan Island; artificial reef; Mike21