



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

龙口湾水动力特征及其对人工岛群建设的响应

费成鹏, 胡日军, 雒敏义, 姜胜辉, 张晓东, 朱龙海, 刘波

Hydrodynamic characteristics of Longkou Bay and its response to artificial island groups

FEI Chengpeng, HU Rijun, LUO Minyi, JIANG Shenghui, ZHANG Xiaodong, ZHU Longhai, and LIU Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021021301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

构造-沉积耦合过程的数值模拟: 以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素

Characteristics and controlling factors of suspended sediment transportation in summer spring tide in Funing Bay

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 53

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

冲绳海槽西部陆坡泥底辟和泥火山特征及其形成动力机制

Characteristics and genetic dynamics of mud diapirs and mud volcanoes on the western slope of Okinawa Trough schematic geographic map of studied area mud diapirs with different morphology in multi-channel seismic section

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 91

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210



关注微信公众号，获得更多资讯信息

费成鹏, 胡日军, 雒敏义, 等. 龙口湾水动力特征及其对人工岛群建设的响应 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 81-95.
FEI Chengpeng, HU Rijun, LUO Minyi, et al. Hydrodynamic characteristics of Longkou Bay and its response to artificial island groups[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(1): 81-95.

龙口湾水动力特征及其对人工岛群建设的响应

费成鹏¹, 胡日军^{1,2}, 雒敏义³, 姜胜辉^{1,2}, 张晓东^{1,2}, 朱龙海^{1,2}, 刘波¹

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

3. 青岛市即墨区自然资源局, 青岛 266200

摘要: 基于龙口湾及附近海域的水文实测资料, 利用 Mike21 数学模型模拟了人工岛建设前后的潮流、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。结果表明, 人工岛建设显著改变了龙口湾潮流场特征及水体运动路径, 湾内受到人工岛的阻挡, 流速普遍减小, 局部区域潮流运动形式由往复流变为旋转流, 流向变化较大, 余流形成多个涡旋; 湾外由于堤头挑流作用导致局部区域流速增大且余流流速增大, 潮流运动形式未发生明显改变。受人工岛的掩蔽作用, 人工岛及附近区域的波浪有效波高普遍减小。龙口湾潮位出现北部最大潮差变小、南部最大潮差增大的格局, 堤水作用导致人工岛内部水道潮差变化明显。人工岛建设直接占据了龙口湾海域面积, 导致其纳潮量明显减小, 水交换率呈现南部和北部增大、人工岛北侧以及内部水道减小的特征, 人工岛造成的水动力环境的改变是影响水交换率变化的主要原因。人工岛群建设导致龙口湾内的潮流、波浪、纳潮量以及水交换等水动力特征减弱, 是引起龙口湾水动力条件变化的根本因素。

关键词: 数值模拟; 水动力; 人工岛群; 龙口湾

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021021301

Hydrodynamic characteristics of Longkou Bay and its response to artificial island groups

FEI Chengpeng¹, HU Rijun^{1,2}, LUO Minyi³, JIANG Shenghui^{1,2}, ZHANG Xiaodong^{1,2}, ZHU Longhai^{1,2}, LIU Bo¹

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3. Natural Resources Bureau of Jimo District, Qingdao 266200, China

Abstract: With the hydrological data from Longkou Bay and adjacent waters, hydrodynamic patterns of current, wave, tidal prism and water exchange rate before and after the construction of artificial island groups are simulated using the numerical model Mike21. On this basis, the impact of the construction of artificial islands onto the hydrodynamic environment of Longkou Bay is discussed. The results show that the construction of artificial islands has significantly changed the characteristics of current field in Longkou Bay in addition to water movement path. Flow velocity within the bay is generally reduced due to the obstruction of artificial islands, and the local tidal current movement has changed from the reciprocating flow to a rotating flow. The flow direction also changed greatly, and the residual flow forms multiple vortices. As the local regional velocity increases, the residual flow velocity also increased outside the bay due to the rippling effect of dike heads, which result in the increase in tidal current. There is no obvious change in the form of flow movement. Due to the masking effect of the artificial islands, the significant wave height at the artificial islands and their surrounding areas generally decreases. In Longkou Bay, the maximum tidal range decreases in the north and increases in the south, and the change of tidal range is most obvious due to backwater. The construction of artificial islands has directly occupied the area of Longkou Bay, resulting in the decrease of tidal capacity, the increase of water exchange rate in the south and north, and the decrease of water channel in the north and in the area inside the artificial islands. The change of hydrodynamic environment caused by artificial islands is the main reason to the change in water exchange rate. The construction of artificial islands has weakened the hydrodynamic characteristics such as tidal current, wave, tidal capacity and water exchange of Longkou Bay, which is fundamental to the change of hydrodynamic conditions in the bay.

Key words: numerical simulation; hydrodynamics; artificial islands; Longkou bay

资助项目: 中国华能集团有限公司科技项目“霞浦核电海岛厂址开发利用研究”(HNKJ20-H18); 山东省自然科学基金资助项目“近 50 年来山东半岛滨海沙滩侵蚀演化的定量评价及其影响因素”(ZR2019MD037); 国家自然科学基金项目“山东半岛海湾对泥沙的捕获机制——以威海湾为例”(41776059)

作者简介: 费成鹏(1995—), 男, 硕士研究生, 地质工程专业, E-mail: fcpgth@163.com

通讯作者: 胡日军(1980—), 男, 副教授, 主要从事海洋沉积动力研究, E-mail: hrj@ouc.edu.cn

收稿日期: 2021-02-13; **改回日期:** 2021-06-03. 文凤英编辑

海湾具有独特的自然环境和优越的地理位置,对人类生存及社会发展具有极其重要的意义^[1],然而海湾是一个相对封闭的海洋环境,其水交换能力较差,生态环境较为脆弱,对人工构筑物建设等人类活动的干扰较为敏感^[2]。人工构筑物的建设可以有效增加自然岸线、提高海洋资源利用效率,但人工构筑物的建设会改变原有海域的地形条件,直接或间接地影响海洋生态环境^[3],导致所在海域潮流、潮位、波浪等水动力条件发生变化^[4-5],甚至经常引起更大程度的极端事件以及海平面上升现象^[6]。因此,为了保护海湾环境实现可持续发展,研究人工岛建设等人类活动对海湾环境的影响尤为重要^[1, 7]。

围填海工程建设等人类活动对水动力环境的影响,一直以来吸引着国内外学者的广泛关注。近岸潮汐的变化与围填海工程的建设密切相关^[8],Byun 等^[9]认为在潮汐占主导地位、壅塞的河口或港湾环境中建造堤坝或海堤等围填海工程,可能导致潮汐振幅显著增加和水流速度下降。围填海工程的建设不会导致潮流特征大范围改变,仅在工程区域附近有较大变化^[10],流向受工程影响会发生偏转,工程防波堤等会引起挑流作用的区域流速增大,其余区域流速普遍减小^[11-12]。法国兰斯河口世界第二大潮汐电站^[13]以及加拿大芬迪湾潮汐动力潟湖工程^[14]对附近潮流也产生了类似的影响。海岸的形态对于波浪能的耗散具有关键作用^[15],围填海工程造成的海岸形态的改变往往会导致与波浪条件相关联的沿岸泥沙输运,同时会破坏海岸抵抗风暴的能力^[16],但设计良好的防波堤会有效减小入港波浪的有效波高,从而达到保护港口的目的^[17-18]。围填海造成的海域面积减小会直接导致纳潮量减少^[19-20],例如马尔代夫国际机场扩建工程^[21]、雅加达湾巨型海堤^[22]以及胶州湾围填海工程^[23]等。水交换也会受到围填海工程的影响^[24],岸线大规模的改变会导致水交换能力减弱,通过修复岸线对水交换能力具有促进作用^[25],岸线变迁引起的水动力环境的改变是影响水交换率的主要因素^[26]。此外,还有学者在水动力环境变化的基础上探讨了冲淤环境以及地貌演变对海岸工程建设的响应^[27-29],同时对于围填海工程造成的水质污染^[30-31]、海洋生物受损^[32-33]等方面的研究也有很多学者涉猎。然而,前人的研究多集中于河口或者较为开阔的海湾或海域中围填海工程的建设,对于小海湾中大规模离岸人工岛建设对海洋环境影响的相关研究却鲜有报道,因此,本文针对龙口湾水动力特征及其对人工岛建设的响应进行较为全面的研究。

龙口湾面积约 84.13 km²,龙口人工岛面积约 35.23 km²,约占龙口湾面积的 41%,因此,在龙口湾这类小海湾中建设大规模的围填海工程,势必对其海洋生态环境造成明显影响。刘星池^[34]等通过建立龙口湾水沙数值模型来预测人工岛建设对海洋环境的影响,人工岛建设会导致龙口湾潮流流速流向均发生不同程度的变化,冲淤特征表现为人工岛北侧和西南侧海域以冲淤为主,西侧海域以侵蚀为主^[35],人工岛外悬浮泥沙浓度和悬沙通量大于岛内水道^[36],同时表层沉积物组合特征也产生了重要变化^[37]。但是,目前对于人工岛群建设对龙口湾水环境的影响研究主要集中在潮流场变化,缺乏其对水动力环境的系统研究;同时,龙口人工岛的实际建设方案与设计方案存在明显差异,导致前人对于该区域的研究存在误差,不能完全反映人工岛群建设对龙口湾水动力特征的影响。因此,本文利用龙口湾以及附近海域的水深地形、潮汐潮流等实测资料,利用 Mike21 数学模型,分析了人工岛建设前后龙口湾的水动力特征,并在此基础上探讨了人工岛群建设对龙口湾潮流、波浪、潮位、纳潮量以及水交换的影响。

1 研究区概况

龙口湾为莱州湾的一个附属海湾,湾廓呈半圆形,是典型的连岛坝成因的次生海湾^[38]。20世纪 90 年代以来龙口湾海岸开发活动不断增多,极大地改变了龙口湾的海岸形态和地形地貌^[39],其中以龙口人工岛规模最大。除航道外,湾内水深不足 10 m,湾外水深一般为 10~20 m(图 1)。屺姆岛以南的连岛海岸以基岩海岸或人工岸线为主,人工岛群以南主要为砂质海岸。表层沉积物主要以粉砂和砂为主,湾外沉积物粒径较粗^[40]。潮汐性质为不规则半日潮,潮流性质以不规则半日潮流为主,潮流运动形式主要为往复流^[41]。波浪以风浪为主,湾内常浪向为 SW 向,强浪向为 WSW 向,湾外常浪和强浪向均为 NE 向^[42]。

2 研究方法

2.1 潮流场数值模拟

本文潮流场模拟采用 Mike21 中的 Flow Model FM HD 模块^[43]进行,模拟采用非结构三角网格剖分计算域,计算域范围如图 2 所示,坐标范围为

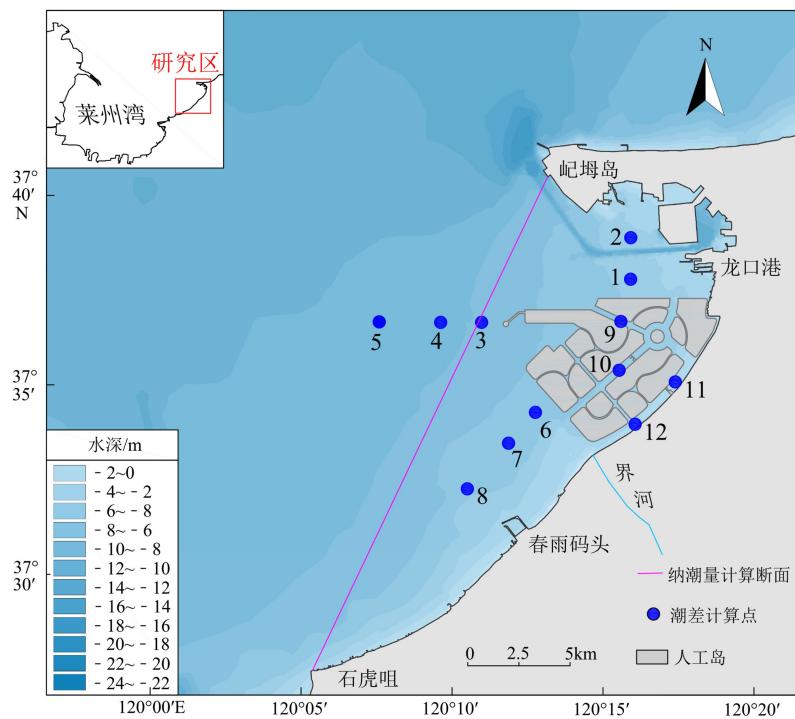


图 1 研究区地理位置
Fig.1 Location of the study area

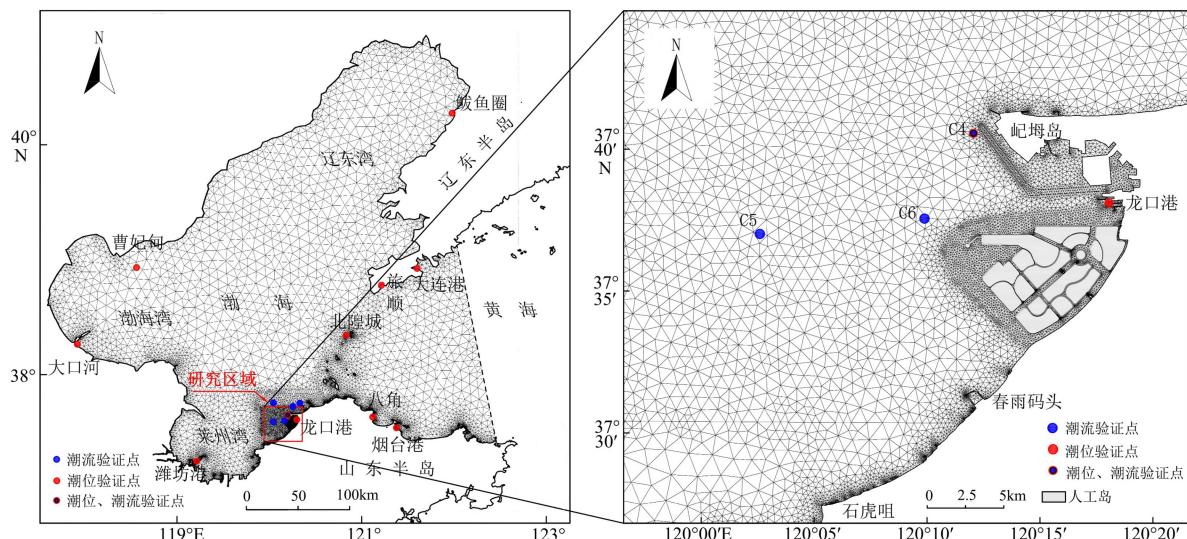


图 2 研究区计算网格图
Fig.2 Gridding of the study area

$36^{\circ}59'15.743'' \sim 40^{\circ}59'21.417''\text{N}$ 、 $117^{\circ}32'22.881'' \sim 122^{\circ}39'30.992''\text{E}$, 覆盖整个渤海海域及部分北黄海海域^[44]。人工岛群建设前后除工程区域外其他位置的网格一致, 增强了前后对比的准确性和可靠性。

对位于潮滩区的干、湿网格采用动边界的方法进行处理。为能清楚了解研究区所在海域潮流场特征, 对该海域网格作局部加密处理。水深资料采用中国人民解放军海军航海保证部制作的海图 1 : 100 万(10011 号)、1 : 15 万(11370 号、11570 号、

11710 号、11840 号、11910 号、11932 号)水深资料及研究区附近海域最新实测水深资料。

2.2 波浪场数值模拟

波浪场模拟采用 Mike21 中的 SW 浅水波浪数值模块, 该模型广泛适用于大范围或者局部区域的波浪预报和分析以及不同历史条件下近海、海岸和港口结构物设计过程中的波浪情况预报^[45]。

波浪数值模拟的计算域及网格、岸界和水深资

料与本文潮流场数值模拟设置一致, 分别模拟了研究区 N 向和 SW 向六级风(12 m/s)作用 24 小时下的波浪场状况, 以此来探讨人工岛群建设对龙口湾波浪场的影响。

2.3 纳潮量计算

纳潮量是一个水域可以接纳潮水的体积, 海湾的纳潮量不仅是衡量海湾开发价值的一个水文指标, 而且也是反映湾内外水交换的一个重要参数^[46], 本文对纳潮量的计算采用叶海桃^[47]等对三沙湾纳潮量的算法, 其公式如下:

$$P = \Delta H A_0 + \sum_{i=1}^n \Delta H'_i A_i \quad (1)$$

式中: P 为纳潮量, 单位: m^3 ;

ΔH 为潮差, 单位: m ;

A_0 为最低潮位下水域面积, 单位: m^2 ;

$\Delta H'_i$ 为潮滩上第 i 个网格高潮位时的水深, 单位: m ;

A_i 为第 i 个网格上最低潮位时的水域面积, 单位: m^2 。

由于龙口人工岛最西侧填海区域超出了龙口湾界线($37^{\circ}32'15.982'' \sim 37^{\circ}40'12.993''\text{N}, 120^{\circ}13'26.819'' \sim 120^{\circ}13'43.580''\text{E}$), 无法采用原龙口湾的界线来计算纳潮量, 因此本文选取从屺坵岛至石虎咀断面和海岸线封闭的区域为本文计算区域(图 1), 以下简称“计算区域”。

2.4 水交换计算

水交换是海洋环境科学研究的一个基本命题, 水交换率的计算是研究海湾自净能力的重要指标和手段^[48]。本文对水交换率的计算采用保守污染物浓度扩散的方法^[49], 在 Mike21 水动力数值模型中, 初始时刻将计算区域内示踪剂浓度设为 1, 外海域设为 0, 其他水动力条件保持不变, 得到水交换率等于 $(1 - \text{浓度值}) \times 100\%$ 。水交换计算区域与纳潮量计算区域一致, 计算时长 30 d。

3 结果

3.1 模型验证

本文收集了大连、旅顺、鲅鱼圈、曹妃甸、大口河、潍坊港、北隍城、八角、烟台港、龙口港等 10 个潮位站历史观测资料并采用傅氏分析方法^[50]进行调和分析, 选用 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 四个分潮的调和常数预报出大潮期的潮位变化, 同时结合中国海洋大学

2017 年 5 月 10—11 日在工程附近进行的 2 个站位的潮位观测资料进行潮位验证; 采用 2017 年 5 月 10—11 日(大潮)6 个站位 27 小时海流同步连续观测资料进行流向流速验证, 验证结果表明, 模拟结果和实测值吻合较好。限于篇幅限制, 本文仅列出研究区周边的潮位验证曲线(C4 站位和龙口港)和潮流验证曲线(C4、C5 和 C6 站位), 见图 3 和图 4。

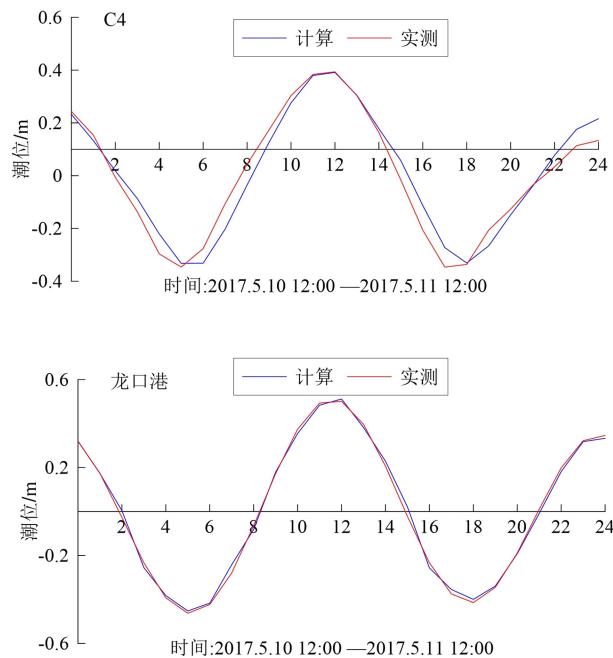


图 3 潮位验证曲线

Fig.3 Tide verification curve

3.2 潮流场特征

3.2.1 人工岛建设前潮流场

潮流场数值模拟结果表明, 在涨急时刻, 湾外潮流流向整体上为西南向, 受地形影响较小, 流向变化较小, 湾内潮流方向主要为西南向和南向, 在屺坵岛西南侧潮流转为东南向, 进入湾内则变为东向, 向南逐渐转为西南向; 流速在屺坵岛西侧最大, 可达 0.68 m/s, 龙口湾内流速较小, 整体小于 0.2 m/s, 且越靠近岸线流速越小。落急时刻的整体规律与涨急时刻相反, 潮流带为明显的往复流形式, 湾外潮流流向整体上为东北向, 湾内潮流流向在龙口湾内受地形影响发生逆时针旋转, 转为西北向至屺坵岛流向湾外; 流速在屺坵岛西北侧最大, 可达 0.8 m/s, 龙口湾内流速分布与涨急时刻类似(图 5)。

3.2.2 人工岛建设后潮流场

人工岛建设后, 龙口湾潮流场特征发生了明显的改变。涨急时刻, 湾外潮流流向整体上为西南向, 流向变化较小, 湾内潮流流向较为复杂, 整体上

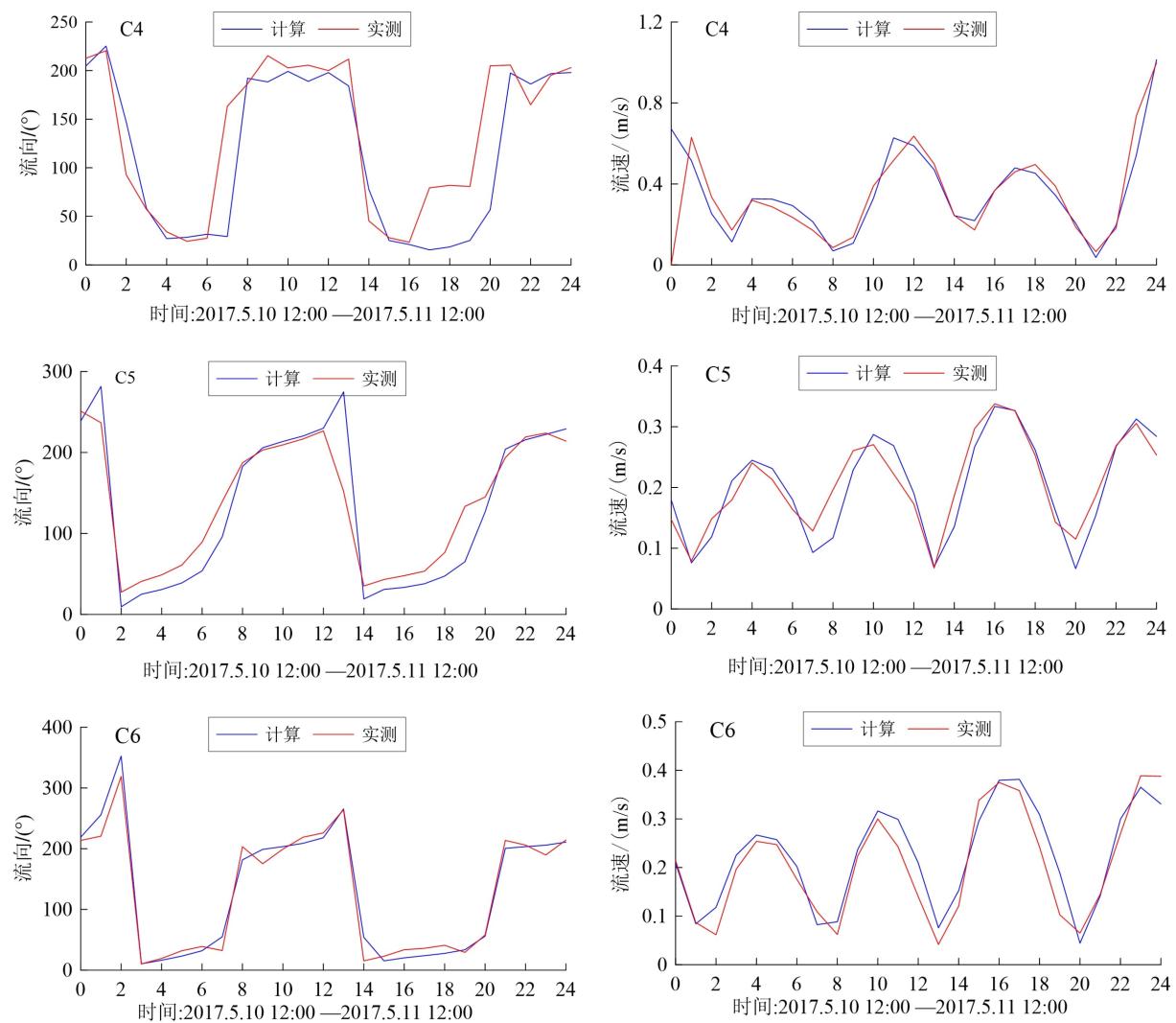


图 4 流速流向验证曲线

Fig.4 Current velocity and direction validation curve

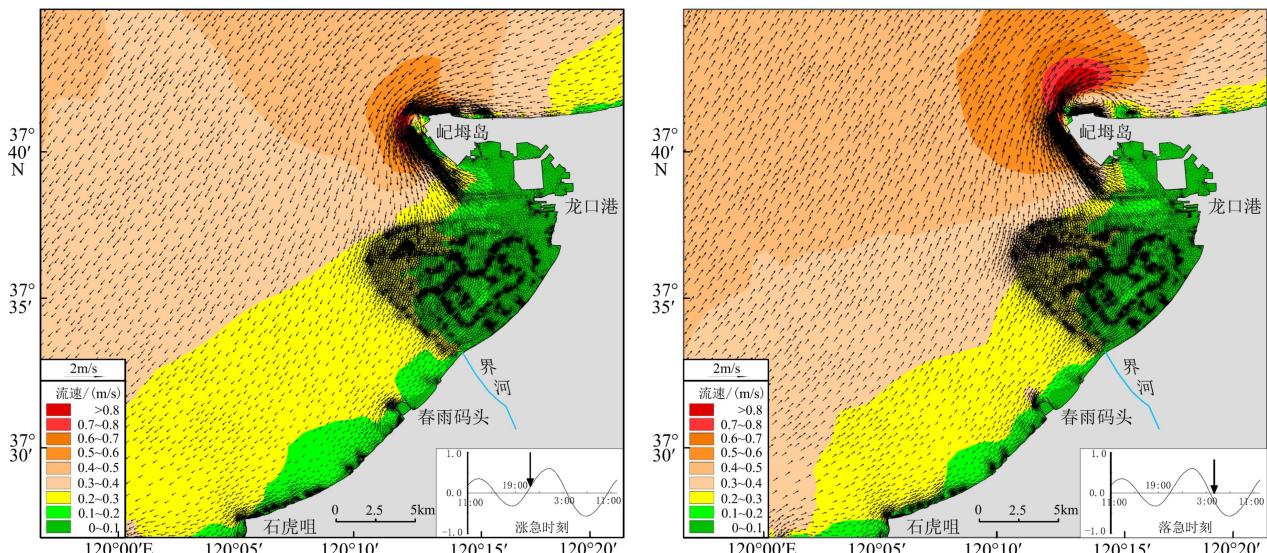


图 5 人工岛建设前涨急和落急时刻潮流场分布图 (大潮期)

Fig.5 Current fields during flood and ebb of tide before construction of artificial island (spring tide)

围绕人工岛外侧流出湾内,小部分进入岛内水道,在人工岛防波堤内存在一个漩涡;湾外流速较大,为0.2~0.8 m/s,流速由北向南逐渐减小,湾内流速整体小于0.1 m/s。落急时刻潮流流向整体上与涨急时刻相反,湾外潮流流向整体上为东北向,湾内潮流在人工岛南部逆时针转为西北向,在人工岛防波堤处一部分向北流出湾内,一部分转为东方向进入龙口港围绕岸线流向湾外;湾外流速为0.2~0.8 m/s,湾内流速整体上小于0.1 m/s(图6)。

3.3 波浪场特征

3.3.1 SW向6级风作用下波浪场特征

人工岛建设前,SW向6级风(风速12 m/s)作

用12小时情况下,湾外有效波高较大,大部分区域有效波高大于1.2 m,受SW向风和地形的影响,波高等值线形态向南凸出。湾内有效波高整体小于1.2 m,近岸人工构筑物的掩蔽作用^[5]较为明显,在龙口港内以及屺姆岛南侧部分半封闭区域形成波影区,有效波高小于0.4 m;受湾内水深影响,波高等值线变化率较快,且逐渐趋于与岸线平行(图7)。

人工岛建设后,SW向6级风作用12小时情况下,湾外的波浪特征并未发生明显的变化,有效波高整体上大于1.2 m,波高等值线形态向南凸出。湾内有效波高整体减小,屺姆岛南侧局部区域有效波高能达到1.3 m左右,其他区域有效波高小于

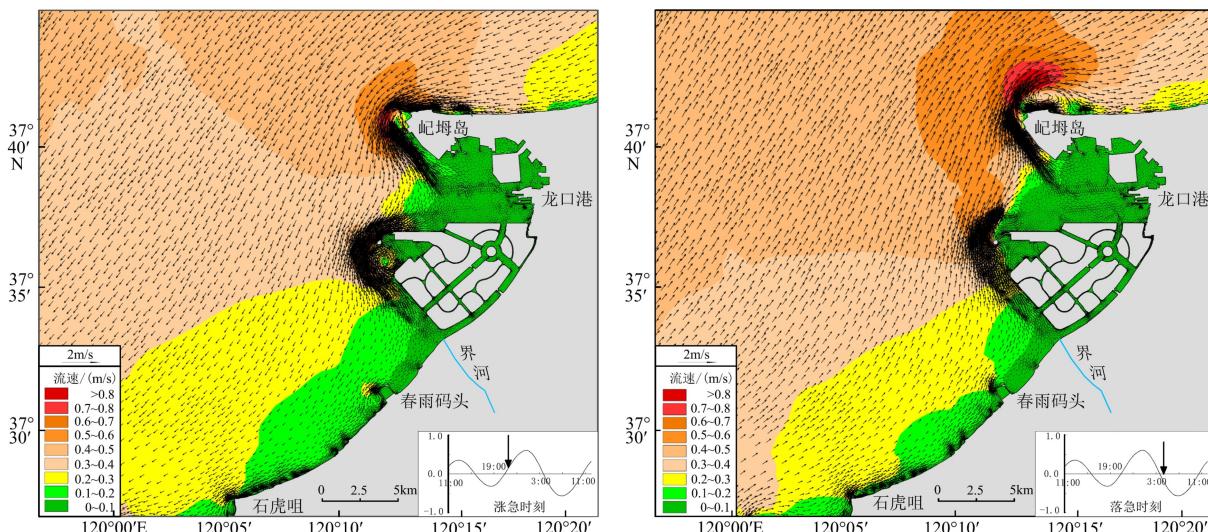


图6 人工岛建设后涨急和落急时刻潮流场分布图(大潮期)

Fig.6 Current fields during flood and ebb of tide after construction of artificial island (spring tide)

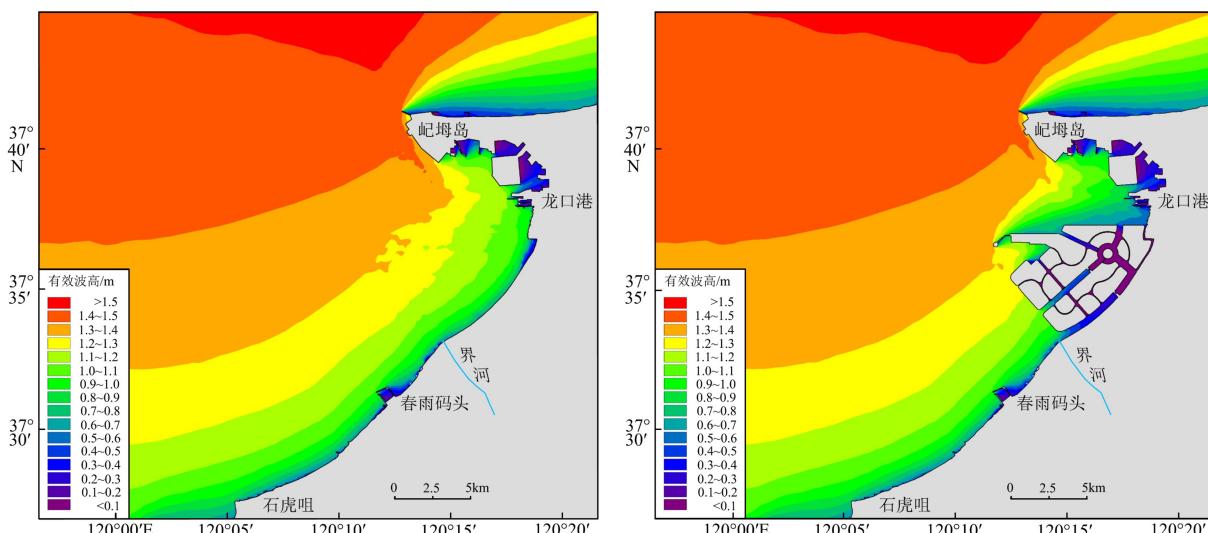


图7 SW向6级风下人工岛建设前后波浪场分布图

Fig.7 Wave fields before and after construction of artificial island under southwest wind

1.1 m。人工岛的建设使得龙口湾的地形变得更为复杂, 除龙口港内和屺姆岛附近形成波影区外, 人工岛水道内也形成波影区, 波影区有效波高小于0.4 m。

3.3.2 N 向 6 级风作用下波浪场特征

人工岛建设前, N 向 6 级风(12 m/s)作用 12 小时情况下, 湾外有效波高整体较大, 大部分区域有效波高大于 1.65 m, 受 N 向风和地形的影响, 波高等值线形态向南凸出。湾内有效波高整体小于 1.2 m, 波高等值线形态向东凸出, 受湾内水深影响, 波高等值线变化率较快, 且逐渐趋于与岸线平行(图 8)。

人工岛建设后, N 向 6 级风作用 12 小时情况下, 湾外的波浪特征并未发生明显的变化, 有效波高整体上大于 1.65 m。湾内有效波高整体减小, 在人工岛防波堤处波高骤减, 形成波影区, 湾内有效波高整体小于 1.35 m, 人工岛建设区域有效波高形态变化较大, 人工岛北侧区域有效波高形态变化较小。

3.4 纳潮量

本文分别计算了人工岛建设前后大潮期和小

潮期的纳潮量, 结果如表 1 所示, 人工岛建设前大潮期纳潮量 $1.3620 \times 10^8 \text{ m}^3$, 小潮期纳潮量 $9.1227 \times 10^7 \text{ m}^3$, 平均纳潮量 $1.1371 \times 10^8 \text{ m}^3$; 人工岛建设后大潮期纳潮量 $1.1749 \times 10^8 \text{ m}^3$, 小潮期纳潮量 $7.8660 \times 10^7 \text{ m}^3$, 平均纳潮量 $9.8075 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。相比工程建设前后, 大潮期纳潮量减小了 13.74%, 小潮期纳潮量减小了 13.78%, 平均减小了 13.75%, 可见人工岛的建设对计算区域纳潮量的影响很大。

3.5 水交换

根据计算区域 30 d 的水交换率计算结果(图 9), 人工岛建设前, 30 d 平均水交换率为 62.58%, 在计算边界附近水交换能力最强, 水交换率为 80%~90%, 水交换率由边界处向湾内依次递减, 越靠近岸线减小速率越快, 在龙口港附近最弱, 水交换率小于 20%。人工岛建设后, 30 d 平均水交换率 59.82%, 在计算边界附近水交换率在 80% 左右, 在龙口港附近及人工岛内部水域水交换率迅速减小, 龙口湾内水交换率小于 20%, 局部区域小于 5%, 人工岛内部水道水交换率为 0~80%, 南部和西部区域可达 80%, 中间水道局部区域水交换率小于 5%。

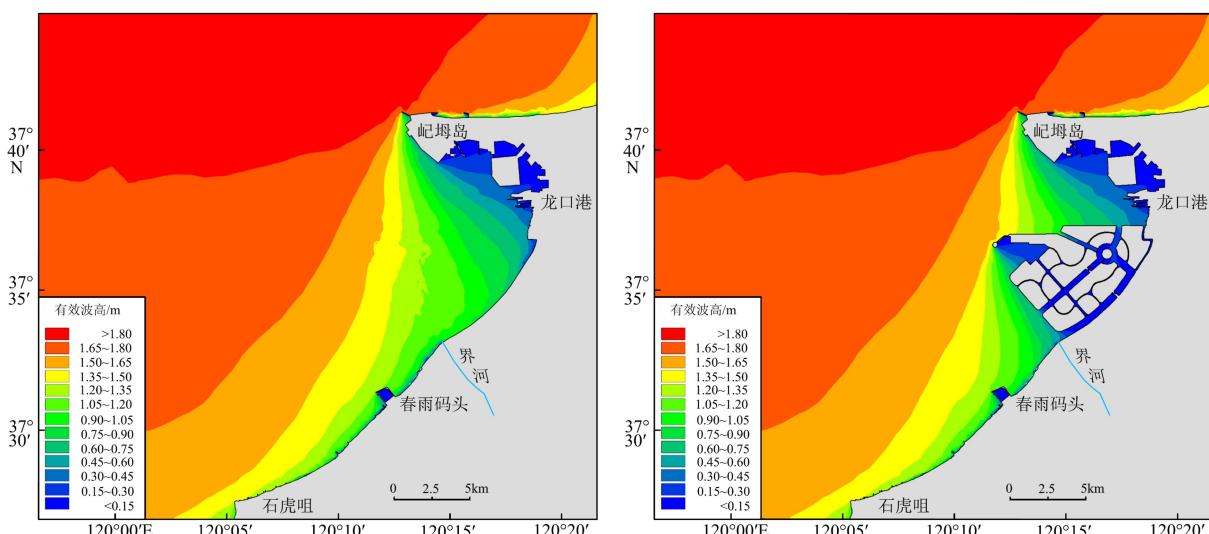


图 8 N 向 6 级风下人工岛建设前后波浪场分布图

Fig.8 Wave fields before and after construction of artificial island under north wind

表 1 人工岛建设前后纳潮量

Table 1 Tidal prism before and after construction of artificial island

潮况	建设前纳潮量/ m^3	建设后纳潮量/ m^3	变化量/ m^3	变化率/%
大潮	1.3620×10^8	1.1749×10^8	-1.8710×10^7	-13.74
小潮	9.1227×10^7	7.8660×10^7	-1.2567×10^7	-13.78
平均	1.1371×10^8	9.8075×10^7	-1.5635×10^7	-13.75

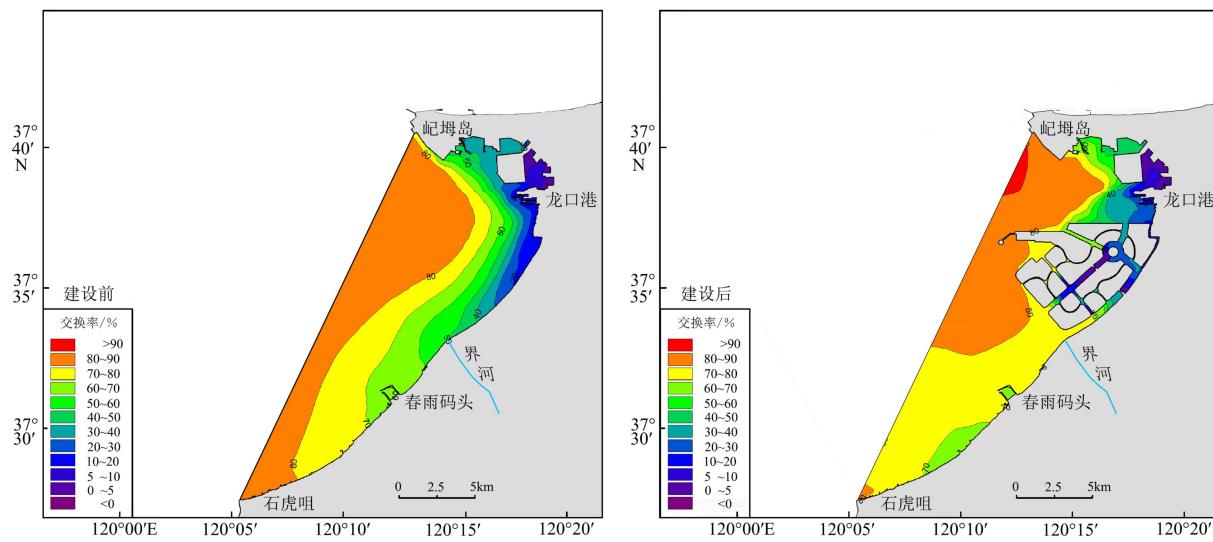


图 9 人工岛建设前后 30 d 水交换率分布图

Fig.9 30 days water exchange rate before and after construction of artificial island

4 讨论

4.1 人工岛的建设对潮流场的影响

(1) 潮流流向变化

人工构筑物的建设会引起潮流流向的偏转^[52], 本文中将人工岛建设前后的流场进行了叠加并将变化明显的区域进行了局部放大(图 10、图 11)。可见人工岛建设后, 在涨急时刻人工岛西北侧(A 区域)流向顺时针偏转, 人工岛北侧区域(B 区域)由原来的开放海域变成半封闭海域, 潮流流向在此变化较为复杂, 整体上顺时针偏转, 人工岛西侧

(C 区域)由于人工岛防波堤的挑流作用形成了一个逆时针旋转的漩涡, 人工岛南侧(D 区域)潮流流向逆时针偏转(图 10)。在落急时刻人工岛西北侧(A 区域)流向顺时针偏转, 人工岛北侧(B 区域)流向整体上逆时针偏转, 人工岛西侧(C 区域)和人工岛南侧(D 区域)流向逆时针偏转(图 11)。

(2) 潮流流速变化

本文分别选取了工程建设前后大潮期涨急时刻和落急时刻的潮流场进行了流速对比(图 12)。通过对分析, 龙口人工岛建设前后, 研究区的潮流场特征发生了较为明显的变化, 尤其是在人工岛附近区域变化更为明显, 具体表现在: 人工岛西部

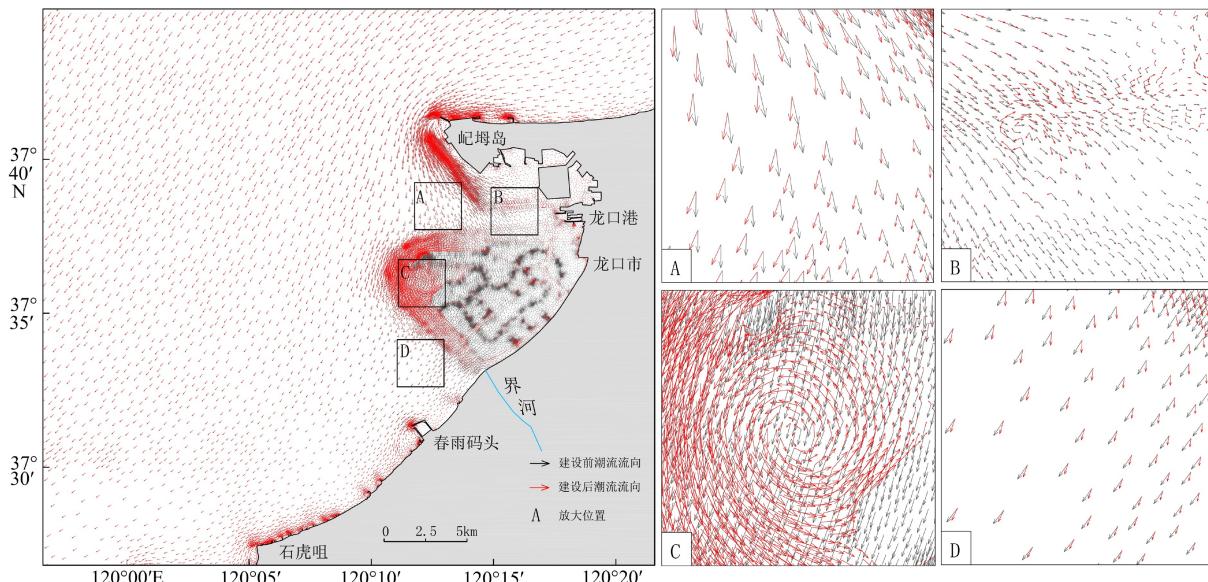


图 10 人工岛建设前后涨急时刻流向对比图(大潮期)

Fig.10 Current direction during flood of tide before and after construction of artificial island (spring tide)

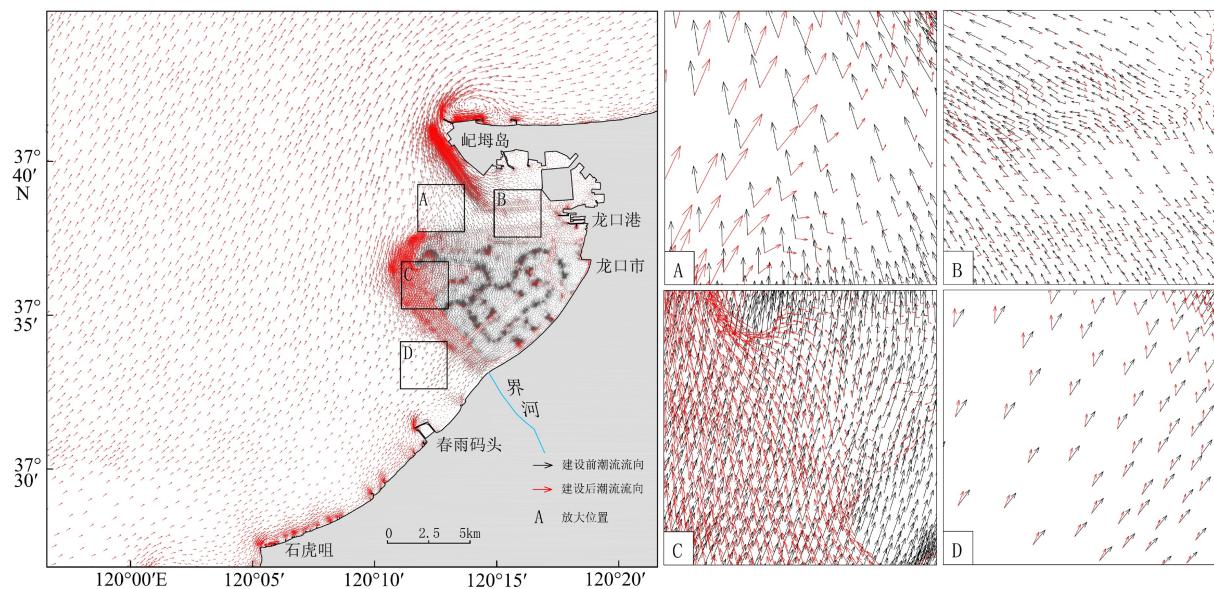


图 11 人工岛建设前后落急时刻流向对比图(大潮期)

Fig.11 Current direction during ebb of tide before and after construction of artificial island (spring tide)

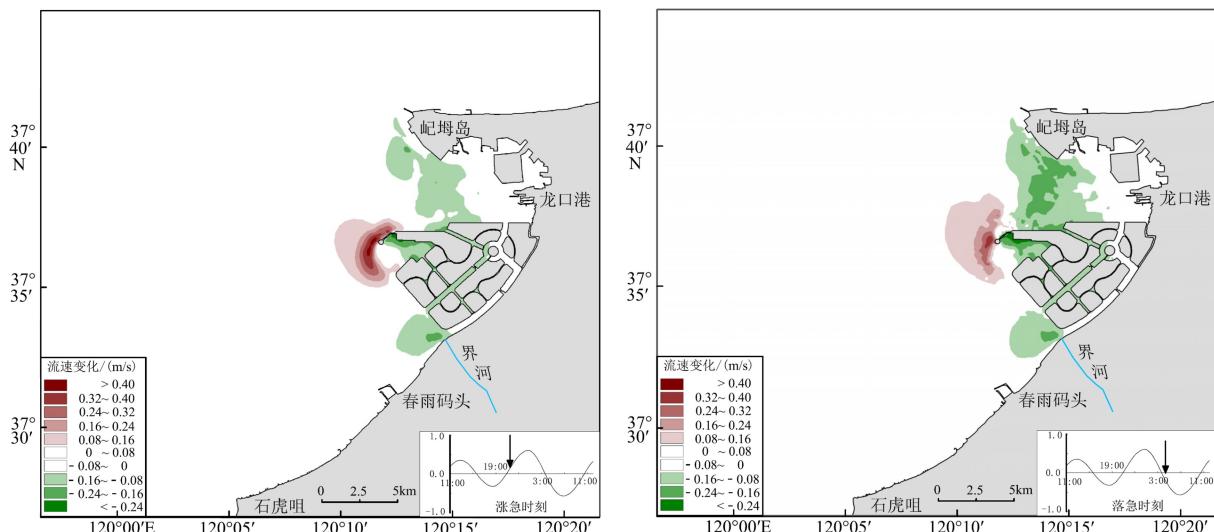


图 12 人工岛建设前后涨急和落急时刻流速对比图(大潮期)

Fig.12 Current velocity during flood and ebb of tide before and after construction of artificial island (spring tide)

靠近防波堤的区域由于挑流作用^[33]流速增大, 最大流速变化超过 0.4 m/s, 变化率可达 60%, 涨急时刻流速变化相比落急时刻变化较大, 距离防波堤越远, 流速变化越小。李池鸿^[34]等基于 Mike21 模型对新建的洋浦神头港区南港区码头工程进行了研究, 结果表明工程后防波堤口门附近涨、落潮都会因挑流的影响局部流速会变大。人工岛的建设阻挡了部分区域原有潮流的流动, 致使潮流流速减小, 在人工岛北部, 流速整体减小, 涨急时刻减小范围大多为 0.08~0.16 m/s(变化率 30%~70%), 极少数区域超过 0.16 m/s; 落急时刻流速变化较大, 流速减小超过 0.16 m/s(变化率约 70%)的区域大幅增

加; 在人工岛内部水道以及人工岛南部区域, 流速减小, 涨落急时刻变化较为相似, 流速减小范围整体上为 0.08~0.16 m/s(变化率 30%~70%), 在界河口的一小部分区域流速减小范围超过 0.16 m/s。潮流流速的变化可能是引起人工岛北侧、西南侧和内部水道产生淤积以及人工岛西侧发生冲刷^[35]的主要原因。

(3)余流场变化

为了分析人工岛建设对龙口湾余流场的影响, 本文选取了潮流数模结果中一个完整大小潮周期(15 天)的流速流向计算了人工岛建设前后研究区的欧拉余流(图 13), 并进行了差值对比(图 14)。人

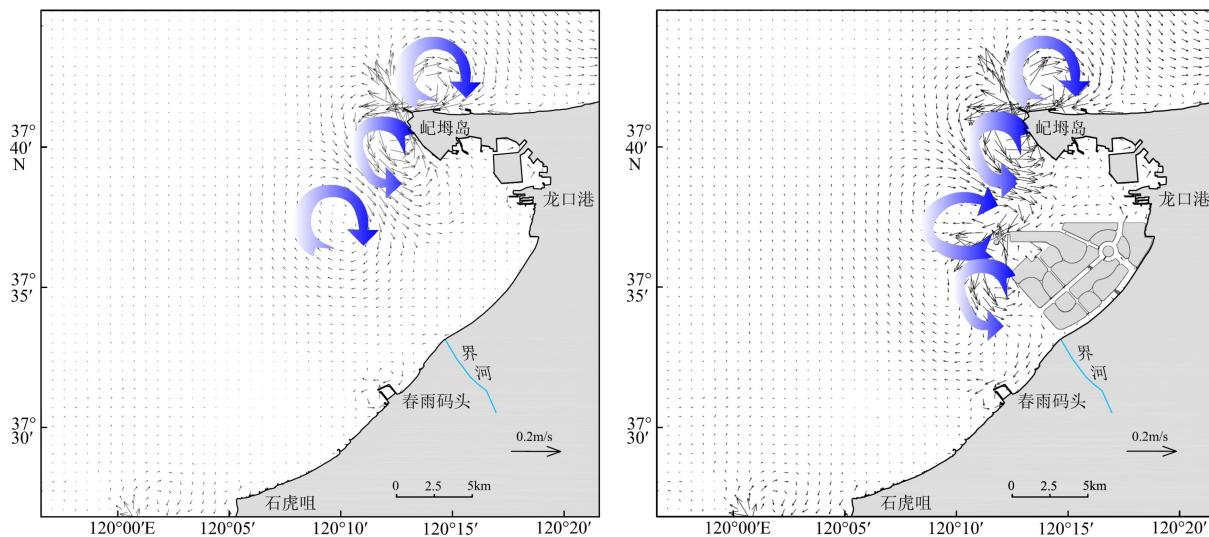


图 13 人工岛建设前后余流特征

Fig.13 Residual current characteristics before and after the construction of artificial island

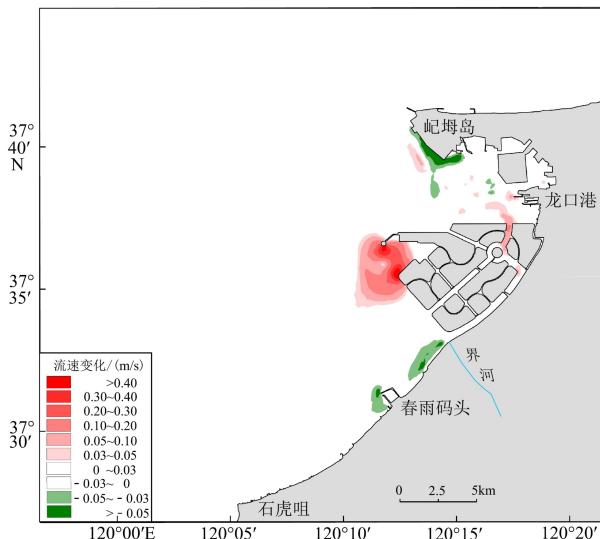


图 14 人工岛建设前后余流流速对比图

Fig.14 Comparison of residual flow velocity before and after the construction of artificial island

工岛建设前,龙口湾湾外除屺姆岛附近区域外余流流向整体上为北向,流速普遍在0.05 m/s左右,在屺姆岛西北侧和西南侧分别形成一个顺时针漩涡和逆时针漩涡,流速为0.05~0.15 m/s,龙口湾西侧存在一个顺时针漩涡,其流速在0.05 m/s左右;湾内余流流向较为复杂,余流从龙口湾西北侧进入后分为两支,一支整体呈逆时针运移在龙口湾北侧流出,另一支呈顺时针运移在龙口湾南侧流出。

人工岛建设后,湾外余流场未发生明显变化,湾内余流场变化较为明显,具体表现在人工岛西侧形成一个逆时针旋转的新漩涡,且流速增大,增大范围为0.03~0.4 m/s,人工岛北部余流整体上分为

两支,一支逆时针运移在屺姆岛附近流出龙口湾,流速较人工岛建设前减小,另一支顺时针运移在人工岛防波堤处流出,流速略有增大,人工岛西南侧区域余流整体上向西南方向运移,流速较人工岛建设前减小。

4.2 人工岛建设对波浪场的影响

海域波浪场的分布特征与水深、地形和风速风向等要素密切相关,在岸线走向、海底地形、风速风向的影响下,波浪在传播过程中会发生一定的折减、绕射等衰减现象^[55-56]。本文为了更好地分析人工岛的建设对波浪场的影响,将人工岛建设前后的有效波高做了差值对比(图15),在SW向6级风作用下,湾外有效波高未发生明显变化;湾内变化主要集中在人工岛北部及内部水道区域,其中人工岛内部区域有效波高变化最为明显,人工岛对该区域的掩蔽作用较强,导致有效波高在此明显减小,有效波高减小范围为0.3~1.2 m(变化率24%~96%);人工岛北部海域人工岛的掩蔽作用较小,该区域有效波高减小,减小范围为0.15~0.6 m(变换率12%~48%)。在N向6级风作用下,湾外有效波高未发生明显变化,湾内变化主要集中在人工岛水道及人工岛西南侧区域,人工岛的掩蔽作用导致该区域的有效波高相对人工岛建设前整体减小,在人工岛防波堤处有效波高减小可达1.2 m,变化率可达96%。

波浪对比结果表明,龙口人工岛的建设导致工程附近区域的波浪有效波高整体减小,其影响范围主要集中在人工岛周边。顾杰^[57]等研究结果也表明工程实施前后的波高变化仅集中在工程区域附

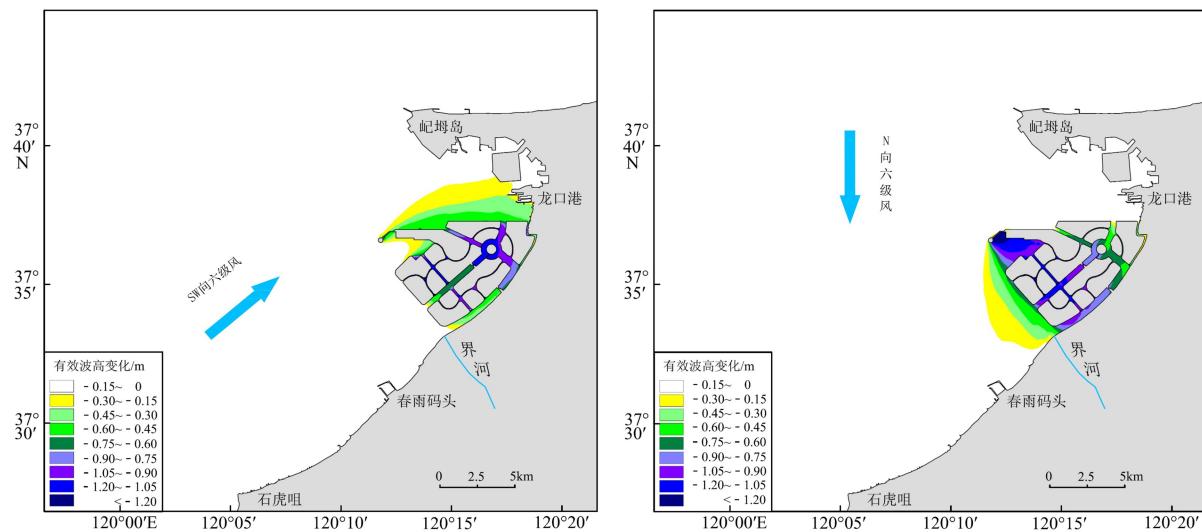


图 15 人工岛建设前后波浪场对比图

Fig.15 Comparison of wave field before and after the construction of artificial island

近, 工程的建设使该区域波高显著减小。

4.3 人工岛的建设对潮位的影响

围填海的建设会导致潮位产生一定的变化^[58], 为此, 我们在人工岛北部、西部、南部以及人工岛内部共选取了 12 个代表点(图 1)分别计算了大潮期一个潮周期内的最大潮差变化, 计算结果如表 2 所示。通过对比分析发现, 在人工岛北部潮差减小, 最大潮差变化在-0.017 m 左右, 这主要是由于人工岛的建设使得该区域的潮汐动力减弱, 致使潮差变小^[59]; 在人工岛西侧潮差变化较小, 呈现出离人工岛越远变化越小的趋势; 人工岛南部潮差增大, 距人工岛 1000 m 的位置潮差增大约 0.014 m, 远离人工岛变化逐渐变小; 人工岛内部水道由于壅水作用^[60]潮差变化最为明显, 最大潮差变化可达 0.047 m。胶州湾跨海大桥的建设对胶州湾潮差的影响普遍小于 0.01 m^[61], 相比龙口人工岛建设引起的潮差变化较小, 其主要原因是龙口人工岛占据的过水面积比例更大, 对水流特征的影响更明显。

4.4 人工岛的建设对纳潮量的影响

人工岛群的建设直接占用了计算区域的海域面积, 改变了原有水动力环境, 龙口人工岛建设后, 本文计算区域的海域面积减少 20.68%, 大潮期纳潮量减少 13.74%, 小潮期纳潮量减少 13.78%, 平均纳潮量减少 13.75%。本文整理了前人对于不同海湾纳潮量的研究成果(表 3), 通过对比发现, 莱州湾和罗源湾围填海造成的海域面积减少对纳潮量的影

表 2 人工岛建设前后代表点潮位变化

Table 2 Tide changes before and after construction of artificial island (spring tide)

位置	站号	工程前最大潮差/m	工程后最大潮差/m	最大潮差变化/m
人工岛北	1	1.080	1.063	-0.017
	2	1.076	1.063	-0.013
人工岛西	3	1.095	1.087	-0.008
	4	1.100	1.094	-0.006
人工岛南	5	1.109	1.104	-0.005
	6	1.107	1.121	0.014
人工岛内	7	1.118	1.126	0.008
	8	1.138	1.139	0.001
人工岛内	9	1.085	1.066	-0.019
	10	1.092	1.139	0.046
	11	1.091	1.070	-0.021
	12	1.097	1.144	0.047

响相对较小^[62-63](纳潮量变化率小于海域面积变化率), 锦州湾、芝罘湾、湛江湾以及象山港海域面积减小引起的纳潮量变化较大^[64-67](纳潮量变化率大于海域面积变化率), 可见, 本文计算区域纳潮量的变化与莱州湾和罗源湾较为相似。总体而言, 人工岛群的建设是造成计算区域纳潮量减少的主要原因, 这与诸多海湾受围填海影响导致纳潮量减小的结果是相符的。

4.5 人工岛的建设对水交换的影响

人工岛群建设后, 本文研究区域的地形岸线变

表 3 不同海湾纳潮量变化对比
Table 3 Variation of tide prism in different bays

区域	海域面积变化率/%	大潮期变化率/%	小潮期变化率/%	平均变化率/%
计算区域	-20.68	-13.74	-13.78	-13.75
莱州湾 ^[62]	-7.38	-6.05	-4.90	-5.57
锦州湾 ^[63]	-22.87	-29.76	-29.72	-29.74
芝罘湾 ^[64]	-19.69	-19.66	-19.86	-19.75
罗源湾 ^[65]	-31.74	-22.94	-21.13	-28.38
湛江湾 ^[66]	-3.2	-3.4	-	-
象山港 ^[67]	-7.5	-8.9	-8.0	-8.6

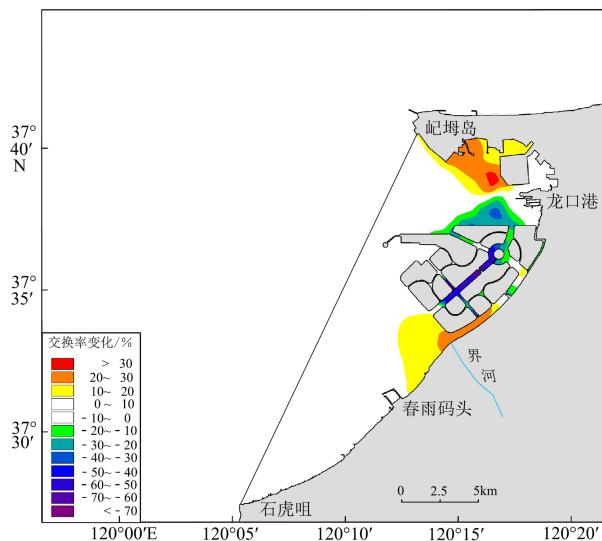


图 16 人工岛建设前后 30 d 水交换率对比图

Fig.16 Variation of 30 days water exchange rate before and after construction of artificial island

表 4 不同海湾水交换率变化对比
Table 4 Variation of water exchange rate in different bays

区域	交换时间/d	海域面积变化/%	平均水交换率变化/%
本文计算区域	30	-20.68	-2.76
锦州湾 ^[63]	-	-10.61 (2000—2005)	-17.51
	-	-22.87 (2005—2010)	-9.28
湛江湾 ^[66]	7	-1.22 (2007—2012)	-17.45
	7	-1.93 (2012—2015)	-4.83
象山港 ^[67]	30	-7.50	-3.20
罗源湾 ^[68]	30	-31.74	-21.42

得更为复杂,对原有的水交换能力产生了一定的影响,尤其是在人工岛群附近及其内部水道,水交换率有了明显的改变,我们将人工岛建设后的 30 d 水交换率做了差值对比(图 16),在人工岛建设后,计

算区域 30 d 平均水交换率减小 2.76%,具体表现在人工岛北部靠近屺姆岛的区域和人工岛南部界河附近区域水交换率明显变大,在人工岛内部水道及北部附近区域水交换率明显减小。本文收集了其他海湾水交换率的变化情况^[62, 66-68](表 4),通过对比发现,水交换率的变化与海域面积的变化并无明显相关关系,尤其是湛江湾和锦州湾,在减少更多面积的情况下,平均水交换率变化幅度反而减小。因此,围填海造成的海域面积减小对水交换率的直接影响不大,其引起的水动力环境的改变是影响水交换率变化的主要原因^[66]。

5 结论

(1) 人工岛建设显著改变了龙口湾潮流场特征,湾内受到人工岛的阻挡,流速普遍减小,局部区域潮流运动形式由往复流变为旋转流,流向变化较大,余流形成多个涡旋;湾外由于堤头挑流作用导致局部区域流速增大和余流流速增大的特征,潮流运动形式未发生明显改变。

(2) 受人工岛的掩蔽作用,人工岛及附近区域的波浪有效波高普遍减小,减小幅度主要为 0.3~1.2 m,其中在西南向 6 级风作用下,人工岛北部有效波高减小明显,在北向 6 级风作用下,人工岛西南部有效波高减小明显。

(3) 龙口湾潮位出现北部最大潮差变小、南部最大潮差增大的格局,壅水作用导致人工岛内部水道潮差变化最为明显,最大潮差变化可达 0.047 m。

(4) 人工岛建设直接占据了龙口湾海域面积,导致其纳潮量明显减小。人工岛建设导致龙口湾水交换率整体减小,呈现出南部和北部增大、人工岛北侧以及内部水道减小的特征,人工岛造成的水动力环境的改变是影响水交换率变化的主要原因。

(5) 人工岛建设显著改变了龙口湾水深地形及海湾形态,导致龙口湾内纳潮量减小、潮流、波浪以及水交换等水动力条件普遍减弱,是引起龙口湾水动力条件变化的根本因素。

参考文献 (References)

- [1] 史经昊, 李广雪, 周春艳. 海湾沉积环境对人类活动的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 11-18. [SHI Jinghao, LI Guangxue, ZHOU Chunyan. Preliminary study on human influence on sedimentary environment of a bay [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(4): 11-18.]
- [2] 张盼. 莱州湾西南部现代沉积环境研究[D]. 中国海洋大学硕士学

- 位论文, 2014. [ZHANG Pan. A study on modern sedimentary environment in Southwestern Laizhou Bay[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2014.]
- [3] Barnes B B, Hu C M. Island building in the South China Sea: detection of turbidity plumes and artificial islands using Landsat and MODIS data [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 33194.
- [4] 林元军, 吴家鸣. 人工岛建设对海洋环境影响的数值分析方法探讨 [J]. *广东造船*, 2008(4): 35-37. [LIN Yuanjun, WU Jiaming. Numerical methods for analyzing influence of artificial island project on marine environment [J]. *Guangdong Shipbuilding*, 2008(4): 35-37.]
- [5] Kassas M. Coastal processes with engineering applications [J]. *The Environmentalist*, 2004, 24(1): 60-61.
- [6] Neumann B, Vafeidis A T, Zimmermann J, et al. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding-a global assessment [J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0131375.
- [7] Jiang S H, Hu R J, Feng X L, et al. Influence of the construction of the Yantai West Port on the dynamic sedimentary environment [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2018, 36(1): 43-51.
- [8] Hu S L, Kot S C. Numerical model of tides in pearl river estuary with moving boundary [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123(1): 21-29.
- [9] Byun D S, Wang X H, Holloway P E. Tidal characteristic adjustment due to dyke and seawall construction in the Mokpo Coastal Zone, Korea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 59(2): 185-196.
- [10] 丁若雪, 顾介康. 基于MIKE21的瓯江口水动力特征与水流数值模拟研究 [J]. *中国水运*, 2017, 17(9): 200-203. [DING Ruoxue, GU Jiekang. Hydrodynamic characteristics and flow numerical simulation of Oujiang Estuary based on MIKE21 [J]. *China Water Transport*, 2017, 17(9): 200-203.]
- [11] 李雨. 潮流数值模拟在斯里兰卡汉班托塔港人工岛设计中的研究应用 [J]. *中国水运*, 2018, 18(5): 70-72, 94. [LI Yu. Research and application of tidal flow numerical simulation in artificial island design of Hambantota port, Sri Lanka [J]. *China Water Transport*, 2018, 18(5): 70-72, 94.]
- [12] 谭晓煜, 高佳. 三亚新机场人工岛工程前后潮流变化模拟研究 [J]. *海洋通报*, 2019, 21(2): 1-15. [TAN Xiaoyu, GAO Jia. Impact of the Sanya new airport artificial islands project on tidal dynamics of the Hongtang Bay [J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 21(2): 1-15.]
- [13] Rtimi R, Sottolichio A, Tassi P. Hydrodynamics of a hyper-tidal estuary influenced by the world's second largest tidal power station (Rance estuary, France) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 250: 107143.
- [14] Cornett A, Cousineau J, Nistor I. Assessment of hydrodynamic impacts from tidal power lagoons in the Bay of Fundy [J]. *International Journal of Marine Energy*, 2013, 1: 33-54.
- [15] Hoefel F, Elgar S. Wave-induced sediment transport and sandbar migration [J]. *Science*, 2003, 299(5614): 1885-1887.
- [16] Torres-Freyermuth A, Medellin G, Salles P. Human impact on the spatiotemporal evolution of beach resilience on the Northwestern Yucatan Coast [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 111.
- [17] Hendriyono W, Wibowo M, Subarkah A, et al. Wave model for the design of sustainable coastal infrastructures at an industrial site in Tuban, East Java [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1625(1): 012049.
- [18] Gou H, Luo F, Li R J, et al. Modeling study on the hydrodynamic environmental impact caused by the sea for regional construction near the Yanwo Island in Zhoushan, China [J]. *Water*, 2019, 11(8): 1674.
- [19] 陈静, 王永学. 岸线变迁对大连湾内湾海域纳潮量的影响 [J]. *海洋通报*, 2016, 35(4): 390-395. [CHEN Jing, WANG Yongxue. Effect of the coastline changes on the tidal prism water quality of Dalian inner bays [J]. *Marine Science Bulletin*, 2016, 35(4): 390-395.]
- [20] 孙永根, 高俊国, 朱晓明. 钦州保税港区填海造地工程对海洋环境的影响 [J]. *海洋科学*, 2012, 36(12): 84-89. [SUN Yonggen, GAO Junguo, ZHU Xiaoming. Effect of reclamation engineering in Qinzhou Bond Harbor on marine environment of Qinzhou Bay [J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(12): 84-89.]
- [21] 王金华, 夏云峰, 杜峰, 等. 马尔代夫国际机场改扩建工程对泻湖水动力影响研究 [J]. *施工技术*, 2019, 48(4): 28-31. [WANG Jinhua, XIA Yunfeng, DU Feng, et al. Impact research of reconstruction and extension project of maldives international airport on the hydrodynamics of the lagoon [J]. *Construction Technology*, 2019, 48(4): 28-31.]
- [22] Rusdiansyah A, Tang Y L, He Z G, et al. The impacts of the large-scale hydraulic structures on tidal dynamics in open-type bay: numerical study in Jakarta Bay [J]. *Ocean Dynamics*, 2018, 68(9): 1141-1154.
- [23] Xiao K, Li H L, Song D H, et al. Field measurements for investigating the dynamics of the tidal prism during a spring-neap tidal cycle in Jiaozhou Bay, China [J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 35(2): 335-347.
- [24] Wang C, Zhang X Q, Sun Y L. Numerical simulation of water exchange characteristics of the Jiaozhou bay based on a three-dimensional Lagrangian model [J]. *China Ocean Engineering*, 2009, 23(2): 277-290.
- [25] 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.
- [26] 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. [YUAN Dekui, LI Guang, WANG Daosheng, et al. Numerical simulation of effects of land reclamation on water exchange capability of Bohai Bay [J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2015, 48(7): 605-613.]
- [27] Ranasinghe R, Larson M, Savioli J. Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater [J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(11-12): 1006-1017.
- [28] 王春玲, 武雅洁, 董启涛, 等. 日照豪迈码头港池布局对泥沙输移影响研究 [J]. *中国海洋大学学报*, 2019, 49(7): 110-117. [WANG Chunling, WU Yajie, DONG Qitao, et al. Study on the impacts of the sediment transport on the Rizhao Haomai Harbor's Layout [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(7): 110-117.]
- [29] 匡翠萍, 钱从锐, 姚凯华, 等. 潮流与泥沙输运对黄骅港工程的响应

- 分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(10): 1516-1522.
- [KUANG Cuiping, QIAN Congrui, YAO Kaihua, et al. Responses of tidal current and sediment transport to Huanghua Port [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(10): 1516-1522.]
- [30] Chen J Y, Chen S L. Estuarine and coastal challenges in China [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2002, 20(2): 174-181.
- [31] Li T H, Han P, Zhao Z J. Impact analysis of coastal engineering projects on mangrove wetland area change with remote sensing [J]. *China Ocean Engineering*, 2008, 22(2): 347-358.
- [32] Chen Y P, Wei Y Q, Peng L H. Ecological technology model and path of seaport reclamation construction [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 165: 244-257.
- [33] Li K Y, Liu X B, Zhao X G, et al. Effects of reclamation projects on marine ecological environment in Tianjin harbor industrial zone [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 792-799.
- [34] 刘星池, 王永学, 陈静. 人工岛群分阶段建设对附近水沙环境影响的数值研究[J]. *海洋通报*, 2017, 36(3): 302-310. [LIU Xingchi, WANG Yongxue, CHEN Jing. Study on the water-sediment environment of artificial islands constructed in stages by numerical simulation [J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(3): 302-310.]
- [35] 安永宁, 吴建政, 朱龙海, 等. 龙口湾冲淤特性对人工岛群建设的响应[J]. *海洋地质前沿*, 2010, 26(10): 24-30. [AN Yongning, WU Jianzheng, ZHU Longhai, et al. Response of erosion-deposition pattern to artificial islands construction in Longkou Bay [J]. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(10): 24-30.]
- [36] 刘波, 胡日军, 李毅, 等. 夏季潮流作用下龙口湾海域悬浮泥沙时空变化特征及其输运机制[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(3): 20-30. [LIU Bo, HU Rijun, LI Yi, et al. Spatio-temporal variation characteristics and transport mechanism of suspended sediments in Longkou bay under the influence of summer tidal current [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(3): 20-30.]
- [37] 任鹏, 孙志高, 赵全升, 等. 龙口湾表层沉积物碎屑矿物分布特征及影响因素[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(2): 279-284. [REN Peng, SUN Zhigao, ZHAO Quansheng, et al. Distribution characteristics and influencing factors of detrital minerals in surficial sediments of the Longkou Bay [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(2): 279-284.]
- [38] 韩彬, 宋转玲, 曹磊, 等. 龙口湾近岸海域水质状况调查与评价[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(2): 186-192. [HAN Bin, SONG Zhanling, CAO Lei, et al. Survey and assessment of coastal seawater quality in Longkou Bay [J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(2): 186-192.]
- [39] Li D, Tang C, Hou X Y, et al. Rapid morphological changes caused by intensive coastal development in Longkou Bay, China [J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 35(3): 615-624.
- [40] 任鹏, 孙志高, 王传远, 等. 人工岛建设对龙口湾表层沉积物粒度及黏土矿物组成特征的影响[J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(4): 578-587. [REN Peng, SUN Zhigao, WANG Chuanyuan, et al. Impacts of construction of artificial islands on the flow-sediment regulation scheme on grain and clay compositions in the Longkou Bay [J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(4): 578-587.]
- [41] 冯兴如, 杨德周, 尹宝树. FVCOM在龙口海域潮汐潮流模拟中的应用研究[J]. *海洋科学*, 2010, 34(6): 94-99. [FENG Xingru, YANG Dezhou, YIN Baoshu. Application of FVCOM in tidal modeling of the seas adjacent to Longkou City [J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(6): 94-99.]
- [42] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第三分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1991. [China Bay Record Committee. The Bay Chorography in China: Bays in the South Shandong Peninsula and Jiangsu Province [M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 73-94.]
- [43] 许婷. 丹麦MIKE21模型概述及应用实例[J]. *水利科技与经济*, 2010, 16(8): 867-869. [XU Ting. Calculation principle and application example of a two-dimensional flow model-MIKE21 HD [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010, 16(8): 867-869.]
- [44] 赵博. 莱州三山岛: 刁龙嘴近岸海域冲淤特征及影响因素研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2014. [ZHAO Bo. Study on characteristic and influence factors of erosion and deposition in Sanshan Island: Diaolongzui Area, Laizhou [D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2014.]
- [45] 邱桔斐, 马越, 徐新华. 长江口外海域波浪场数值模拟[J]. *水运工程*, 2011(10): 11-14. [QIU Jufei, MA Yue, XU Xinhua. Numerical simulation of wave field around the Yangtze River estuary [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2011(10): 11-14.]
- [46] 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 Xiao, JI Ping, ZHAO Yijun. 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.]
- [47] 叶海桃, 王义刚, 曹兵. 三沙湾纳潮量及湾内外的水交换[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(1): 96-98. [YE Haitao, WANG Yigang, CAO Bing. Tidal prism of Sansha Bay and its water exchange with the open sea [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2007, 35(1): 96-98.]
- [48] 王宏, 陈丕茂, 贾晓平, 等. 海水交换能力的研究进展[J]. *南方水产*, 2008, 4(2): 75-80. [WANG Hong, CHEN Peimao, JIA Xiaoping, et al. Advance in the research on water exchange in the sea area [J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(2): 75-80.]
- [49] 董礼先, 苏纪兰. 象山港水交换数值研究 I. 对流-扩散型的水交换模式[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(4): 410-415. [DONG Lixian, SU Jilan. Numerical study of the water exchange in the Xiangshan Bay I. Advection-diffusion water exchange model [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(4): 410-415.]
- [50] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005. [HUANG Zuke, HUANG Lei. Tidal Principle and Calculation [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005.]
- [51] 陆志妹. 近岸水域波浪与结构物相互作用的数值模拟[D]. 上海交通大学硕士学位论文, 2007. [LU Zhimei. Numerical simulation of wave interaction with structures in the coastal zone [D]. Master Dissertation of Shanghai Jiaotong University, 2007.]
- [52] 李文丹, 李孟国, 韩西军, 等. 港珠澳大桥珠澳口岸人工岛工程二维潮流泥沙数学模型研究[J]. *中国港湾建设*, 2011(5): 27-30, 39. [LI Wendan, LI Mengguo, HAN Xijun, et al. 2-D tidal current and sediment modeling of Zhuhai-Macao artificial island of Hongkong-

- Zhuhai-Macao Bridge [J]. *China Harbour Engineering*, 2011(5): 27-30, 39.]
- [53] 朱雅琴, 张法星, 许唯临. 舌形挑流鼻坎水力特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2004(5): 397-402, 408. [ZHU Yaqin, ZHANG faxing, XU Welin. Research on hydraulic characteristics of flip bucket with Tongue-type [J]. *Science Technology and Engineering*, 2004(5): 397-402, 408.]
- [54] 李池鸿, 顾晨, 杨之彦, 等. 基于MIKE 21的码头潮流数学模型研究[J]. 港工技术, 2019, 56(S1): 1-6. [LI Chihong, GU Chen, YANG Zhiyan, et al. Study on the mathematical model of wharf tidal based on MIKE 21 [J]. *Port Engineering Technology*, 2019, 56(S1): 1-6.]
- [55] 李瑞杰, 江森汇, 郑俊, 等. 日照港码头结构消浪的数值模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 190-194. [LI Ruijie, JIANG Senhui, ZHENG Jun, et al. Numerical simulation of wave dissipation on dock structure of Rizhao Port [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2011, 39(2): 190-194.]
- [56] 刘功鹏. 山东莱州湾海域波浪数值模拟研究[J]. 水利水电快报, 2020, 41(4): 57-60. [LIU Gongpeng. Numerical simulation of waves in Shandong Laizhou Bay [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2020, 41(4): 57-60.]
- [57] 顾杰, 马悦, 王佳元, 等. 洋河-葡萄岛岸段养滩工程波浪响应特征研究[J]. 水动力学研究与进展, 2017, 32(1): 18-24. [GU Jie, MA Yue, WANG Jiayuan, et al. Wave responses to beach nourishment at coast between Yang River and Putao Island [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32(1): 18-24.]
- [58] 张蔚, 严以新, 郑金海, 等. 珠江三角洲年际潮差长期变化趋势[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 77-83. [ZHANG Wei, YAN Yixin, ZHENG Jinhai, et al. Interannual tidal range trend in Pearl River Delta [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1): 77-83.]
- [59] 蒋陈娟, 周佳楠, 杨清书. 珠江磨刀门河口潮汐动力变化对人类活动的响应[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(6): 66-76. [JIANG Chenjuan, ZHOU Jianan, YANG Qingshu. Effects of human intervention on tidal dynamics in the Modaomen Estuary, Pearl River [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2020, 39(6): 66-76.]
- [60] 金中武, 卢金友, 吴华莉. 铜锣峡壅水作用机理研究[J]. 水动力学研究与进展, 2014, 29(5): 552-564. [JIN Zhongwu, LU Jinyou, WU Huali. Study on the mechanism of backwater effect in Tongluoxia Gorge [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2014, 29(5): 552-564.]
- [61] 张莞君, 迟万清, 胡泽建, 等. 青岛胶州湾大桥建设对周边海域水动力环境影响的数值研究[J]. *海岸工程*, 2015, 34(2): 40-50. [ZHANG Wanjun, CHI Wanqing, HU Zejian, et al. Numerical study on the effect of the Jiaozhou bay bridge construction on the hydrodynamic conditions in the surrounding sea area [J]. *Coastal Engineering*, 2015, 34(2): 40-50.]
- [62] 姜胜辉, 朱龙海, 胡日军, 等. 围填海工程对莱州湾水动力条件的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(10): 74-80. [JIANG Shenghui, ZHU Longhai, HU Rijun, et al. The hydrodynamic response to reclamation in Laizhou Bay [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(10): 74-80.]
- [63] 王勇智, 孙惠凤, 谷东起, 等. 罗源湾多年围填海工程对水动力环境的累积影响研究[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(3): 16-24. [WANG Yongzhi, SUN Huifeng, GU Dongqi, et al. Research on Cumulative effects of coastal reclamation on hydrodynamic environment in Luoyuan Bay [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(3): 16-24.]
- [64] 刘明, 席小慧, 雷利元, 等. 锦州湾围填海工程对海湾水交换能力的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(1): 110-114. [LIU Ming, XI Xiaohui, LEI Liyuan, et al. The effects of coastal reclamation on hydrodynamics in Jinzhou Bay [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2013, 28(1): 110-114.]
- [65] 朱金龙, 朱淑香, 魏潇, 等. 围填海影响下的芝罘湾水动力变化的数值研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020(6): 61-71. [ZHU Jinlong, ZHU Shuxiang, WEI Xiao, et al. Numerical simulation study on hydrodynamic changes of Zhifu Bay under the influence of reclamation [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(6): 61-71.]
- [66] 张志飞, 诸裕良, 何杰. 多年围填海工程对湛江湾水动力环境的影响[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 96-104. [ZHANG Zhifei, ZHU Yuliang, HE Jie. Influences of long term reclamation works on hydrodynamic environment in Zhanjiang bay [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(3): 96-104.]
- [67] 曾相明, 管卫兵, 潘冲. 象山港多年围填海工程对水动力影响的累积效应[J]. 海洋学研究, 2011, 29(1): 73-83. [ZENG Xiangming, GUAN Weibing, PAN Chong. Cumulative influence of long term reclamation on hydrodynamics in the Xiangshangang Bay [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(1): 73-83.]
- [68] 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. [HU Jianyu. Study on the sea water exchange between the open sea and Luoyuan Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 1998, 17(3): 51-54.]