

人工岛与海岸整治工程下波流动力响应特征

匡翠萍¹, 江林锋¹, 马悦¹, 邱若峰²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 河北省地矿局第八地质大队, 河北 秦皇岛 066001)

摘要: 针对秦皇岛洋河口至戴河口海岸整治工程, 采用数值模拟方法研究该区域潮流和波浪对人工岛及海岸整治工程的响应特征, 发现人工岛与海岸整治工程共同存在时对潮流的影响并非二者单独作用的线性叠加, 而是存在着非线性的关系, 而常浪对人工岛和海岸整治工程的响应基本上为对二者单独作用响应的线性叠加。同时建立海岸整治工程时预留潮汐通道有助于保证工程海域的水体交换, 减小对周边环境的影响。这些结果对相似海岸动力的海滩整治工程可提供科学参考。

关键词: 人工岛; 海岸整治工程; 潮流; 波浪; 水动力响应
中图分类号: TV148+.5 **文献标志码:** A

Wave-current Coupled Hydrodynamic Responses to Artificial Island and Beach Nourishment Projects

KUANG Cuiping¹, JIANG Linfeng¹, MA Yue¹, QIU Ruofeng²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The Eighth Geological Brigade of Hebei Geological Prospecting Bureau, Qinhuangdao 066001, China)

Abstract: Based on the beach nourishment project between the Yanghe Estuary and the Daihe Estuary, the numerical simulation method is adopted to study wave-current coupled hydrodynamic responses to artificial island and beach nourishment projects. It can be found that changes in tidal current caused by the combination of artificial island and beach nourishment projects are not linear superposition of differences induced by artificial island project and beach nourishment project respectively, however, the changes in wave field have a linear superposition relationship. Reserving tidal channel in beach nourishment project is necessary for good water exchange, which benefits alleviating its influence to surrounding environment. The findings can provide a reference for beach nourishment under similar conditions.

Key words: artificial island; beach nourishment project; tidal current; wave; hydrodynamic responses

随着人类生产活动的不断发展, 沿海地区(特别是沿海发达地区)的土地、岸线资源日益紧张。为保障沿海地区的发展, 人类的应对策略基本为在保护现有资源的基础上开拓新的土地和岸线。

地球上海洋面积约占总面积的 71%, 科学有效地开发海洋资源成为当今研究的一个热点。其中, 为了开拓新的岸线和土地资源, 填海造地工程呈现加快发展的趋势。迪拜的世界群岛(the World Islands)和棕榈岛(Palm Island)受到世界瞩目, 我国厦门双鱼岛^[1]和海南恒大海花岛^[2]也成为度假胜地^[3]。

海岸带不合理的开发和利用, 使得海岸面临海岸侵蚀的问题, 威胁到海岸资源的持续利用。海岸侵蚀的原因经过前人研究已经较为清晰, Van^[4]结合物理模型实验和数学模型实验的结果总结出海岸侵蚀主要是由海岸类型所决定, 主要的影响因素包括海岸是否开敞、波浪、大潮等级、沉积物组分以及海岸坡度。相对于成因, 更多的学者关注的是如何对海岸侵蚀进行治理, Mujabar 和 Chandrasekar^[5]采用遥感和 GIS 技术对印度南部泰米尔纳德邦海岸的侵蚀和易损性做了评估, 强调了对侵蚀岸段实施海岸整治工程的必要性。

海岸整治工程是目前解决海岸侵蚀问题的重要途径和方式^[6]。我国珠江口外伶仃岛由于近岸潮流和波浪动力较强, 造成海岸侵蚀较为严重, 以致海滩仅为小规模零星分布, 地方政府借鉴国外经验, 采取了海滩补沙养护的方法进行整治, 一定程度上提高了该区域的旅游价值^[7]。海岸整治工程更多采用与水工结构物(丁坝、离岸堤及人工岬头等)相结合的方式。20 世纪 90 年代滩肩补沙和水工结构物结合的

收稿日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(41776098); 中央海岛和海域保护资金(国海办字[2016]612号)

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海岸工程和河口海岸动力环境。

E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

整治修复方式已在摩纳哥、以色列和新加坡等国家广泛应用^[8],由于修复效果较好,这种模式逐渐推广开来,例如秦皇岛老虎石海滩的海滩养护工程就采取了滩肩补砂与水下潜堤相结合的模式^[9]。

海岸整治工程会改变海底地形,从而改变工程海域的水动力环境,进而影响工程海域的水环境、水体交换以及海床冲淤演变。王晓纯^[10]从水动力的角度出发,研究了海岸整治工程中的人工岬角对海岸演变的影响,了解到人工岬角的角度会影响海岸演变趋势。张伟等^[11]采用数值模拟的方法预测了威海湾南部杨家湾岸滩整治工程后周边海域的冲淤趋势,肯定了整治工程对减小岸滩侵蚀具有积极作用。

人工岛是在近岸浅海水域建造的出水人工结构物,人工岛的建成会产生新的人工岸线并改变海底地形,可能导致周边海域水动力环境和海床冲淤发生显著的变化^[12]。

海岸整治工程和人工岛共同作用下,海域水动力场会发生更为复杂的变化。近岸波浪和潮流动力是海岸带最主要的动力,也是塑造近岸地形以及岸线的主要动力。为清晰把握人工岛及整治修复工程对海域潮流、波浪的影响,以及二者之间的相互作用和联系,本文在现场实测资料的基础上,采用 MIKE 21 软件^[13-14]的 FM(水流)模块和 SW(波浪)模块建立戴河口-洋河口二维潮流和波浪数学模型,研究人工岛与海岸整治工程下波流动力的响应特征。

1 区域概况

秦皇岛市是河北省著名沿海城市,国务院第一批批准的 14 个沿海开放城市之一。为了保护 and 修复秦皇岛的岸线资源、湿地和生态环境,国家海洋局在 2016 年批准实施“秦皇岛市蓝色海湾整治行动”项目,对秦皇岛的侵蚀岸滩进行整治修复、对湿地环境和生态环境进行整治和保护。

秦皇岛市北戴河新区戴河口至洋河口岸段,两河口导堤形成人工岬头,而成为岬湾海岸。为了促进区域旅游业的持续发展,进一步开发和利用这里的海洋旅游资源,区域管委会在戴河口-洋河口海域于 1998 年组织建设了供观光用的人工岛仙螺岛,该岛离岸距离 1 km,平面形状为矩形,长 100 m,宽 70 m,规划面积为 7 000 m²^[15]。

金山嘴岬角附近及其以南海域主要以细砂沉积为主,夹杂少量粉砂沉积。泥沙中值粒径介于 0.022~0.511 mm,分选系数介于 0.67~3.28,平均值为

2.05,属于分选不充分形态^[16]。戴河口至洋河口砂质海岸长期处于侵蚀状态,导致滩面束窄、岸坡变陡、组成物质粗化。

戴河口至洋河口岸线修复长度 3.1 km,以戴河口至仙螺岛 1.4 km 和洋河口至海上自助餐厅 1 km 两岸段为重点修复岸线,兼顾中间约 700 m 岸线,见图 1。整治工程采用滩肩补沙、人工岬头与水下沙坝吹填三者结合的方法对岸线进行整治修复。滩肩补沙使滩肩高程达 1.6 m 以上(本文高程基面为当地平均海平面),两端重点修复岸段沙滩宽度在原有基础上平均增加 40~60 m,中间 700 m 岸线平均增宽 10 m 左右。滩肩由陆向海采用小于 1:100 的缓坡形式,滩肩以下向海坡度为 1:10。滩肩补沙总方量约 3×10^5 m³。在戴河口西侧导流堤以南 100 m 外构建 1 座潜礁式人工岬头(岬头 1),在洋河口东侧导流堤以东 100 m 外构建 1 座潜礁式人工岬头(岬头 2),形成人工岬湾,增加遮蔽段。戴河口附近的人工岬头长 300 m,洋河口附近人工岬头长 280 m,宽度均为 12 m,堤顶高程均为 -1.2 m。工程区离岸 200 m 处吹填 3 座水下人工沙坝,其中东北段设计 2 座(沙坝 1、沙坝 2),起到补充该岸段沙源以及在沿岸流作用下对相邻岸段进行沙源补充,西南段设计 1 座沙坝(沙坝 3),主要起到对此岸段进行补充。每座沙坝长 450 m,3 座沙坝总长度 1.35 km,坝顶宽 50 m,底部宽 80~100 m,坝顶高程为 -0.9 m。沙坝材料选用中值粒径 D_{50} 为 0.5~2 mm 的中粗沙,人工沙坝吹填方量约 1.2×10^5 m³。

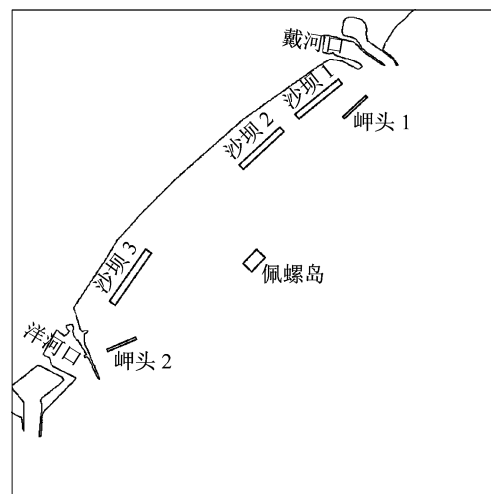


图 1 戴河口-洋河口岸线整治工程

Fig. 1 Beach nourishment project between the Daihe Estuary and the Yanghe Estuary

2 数学模型建立

2.1 模型概述

MIKE21 模型是由丹麦水力学研究所 (Danish Hydraulic Institute, 简称 DHI) 研发的水环境综合模拟软件. 可模拟河流、海岸等二维水动力环境, 主要应用于水利工程^[17]、生态与环境化学^[18-19] 以及与水与环境相关的领域^[20]. MIKE 21 FM 模块为二维潮流数学模型, 基于 Boussinesq 假定、静水压力假定和浅水假定, 采用有限体积法求解浅水方程. MIKE 21 SW 模块为二维波浪谱模型, 基于波作用守恒方程, 采用波作用密度谱来描述波浪, 确保了水流存在条件下波作用密度的守恒性.

2.2 计算范围及空间离散

MIKE21 中的 FM 和 SW 模块均采用无结构三角网格. 本文采用双重网格嵌套技术进行计算, 即建立渤海大模型和戴河口-洋河口海域小模型两套网格, 并由验证好的大模型计算结果为小模型提供潮位和潮流边界条件, 从而确保了小模型计算结果的准确性.

考虑到戴河口往北 6 km 为金山嘴, 而洋河口往南 4.5 km 为葡萄岛, 对涨落潮流的挑流作用显著, 开边界应避免太过靠近金山嘴及葡萄岛. 因此小模型北部边界定于金山嘴以北 5 km 处, 南部边界位于葡萄岛以北 4 km 处, 东部边界距离岸线 10 km 以上. 渤海大模型有 23 419 个三角网格, 14 183 个节点; 小模型有 21 067 个三角网格, 10 988 个节点, 坐标为北京 54 (中央子午线经度 120°E). 为了确保计算精度并提高计算效率, 小模型网格由外海向工程区域逐步加密, 外海网格长度为 800 m, 工程区附近网格长度为 10 m, 见图 2.

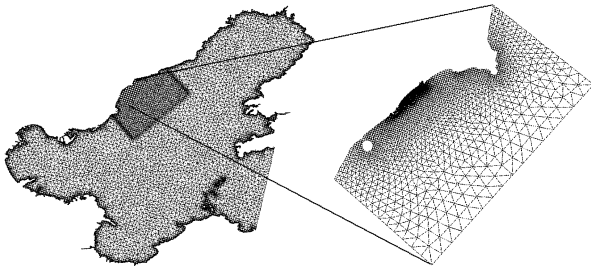


图 2 大、小模型计算网格

Fig.2 Computational mesh of big and small model

2.3 参数设定

潮流模型中渤海大模型仅有大连-烟台一条开边界, 由潮位过程驱动. 小模型共有 3 个开边界, 边

界条件采用结合了潮位过程和流速过程的混合边界条件, 其潮位及流速过程由渤海大模型提供. 固边界采用不可滑移条件, 即流速为零. 模型初始水位给定为零. 涡黏性系数采用 Samagorinsky 亚网格尺度模型来计算, 其中常数 C_s 取为 0.28, 涡黏系数 A 上、下限分别取为 $1.0 \times 10^{10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 曼宁数根据底部泥沙粒径分布, 均值为 $74 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, 时间步长取 0.01~60 s.

海岸边界区域采用动边界处理潮间带和滩肩的干湿交换过程. 动边界处理技术会在每个单元格计算时加入判断: 当 $h < h_{\text{dry}}$ 时, 区域无水而不参与计算; 当 $h_{\text{dry}} < h < h_{\text{wet}}$ 时, 只计算连续性方程, 动量方程不参与计算; 当 $h > h_{\text{wet}}$ 时, 连续性方程和动量方程都参与计算. 其中: h_{dry} 和 h_{wet} 分别为干水深和湿水深. 湿水深应大于干水深, 即: $h_{\text{dry}} < h_{\text{wet}}$. 计算中取 $h_{\text{dry}} = 0.005 \text{ m}$, $h_{\text{wet}} = 0.1 \text{ m}$.

波浪模型控制方程为方向性解耦参数方程. 开边界条件为定常波浪边界. 秦皇岛海域自然底质中值粒径为 0.29~0.35 mm. 波浪破碎采用 Battjes 和 Janssen 模型, 破碎指标为 0.8. 初始波浪谱为零谱, 计算步长采用变步长, 为 0.01~60 s.

3 模型验证

采用河北省地矿局第八地质大队实测水文和波浪资料对模型进行验证. 实测水文资料包括秦皇岛站 (39°55'E 119°37') 2016 年潮位站资料, 5 个潮流站点 (T1~T5 点) 2011 年 5 月垂向平均流速、流向资料, 1 个潮流站点 (T6 点) 2016 年 10 月垂向平均流速、流向资料, 以及一个波浪站点 (W 点) 2016 年的实测有效波高、波周期、波向数据. 潮流站点及波浪实测站点位置见图 3.

3.1 潮流模型验证

根据 2011 年 5 月及 2016 年 10 月研究区域内站点的实测资料对潮流模型进行验证, 其中秦皇岛站潮位和 T6 站点的流速流向验证见图 4 和图 5. 从计算结果可以看出潮位、流速与流向过程的计算值在相位和数值上都与实测值吻合较好.

3.2 潮流模型计算效率评价

为了定量地评价数学模型模拟结果的优劣, 需要寻求一个评价标准来衡量. 本文采用 Wilmott 所提出的效率评价模型^[21] 对潮流模型进行评估. 评价模型公式如下:

$$s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |M - D|^2}{\sum_{i=1}^N (|M - \bar{D}| + |D - \bar{D}|)^2}$$

式中: M 为模型计算结果; D 为实测值; \bar{D} 表示实测平均值; 计算所得到的 s 值代表了实测值与实测平均值的偏差、模型计算值和实测平均值的偏差这两

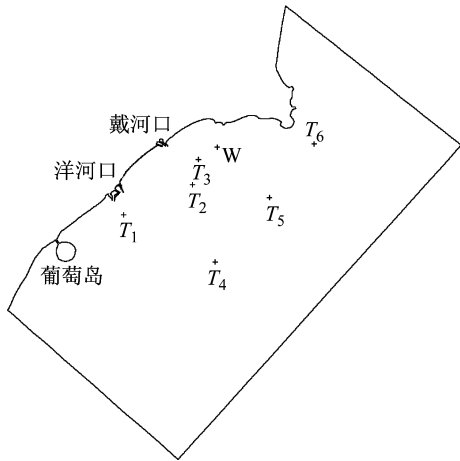


图 3 水文波浪测站位置

Fig. 3 Positions of hydrologic and wave measurement points

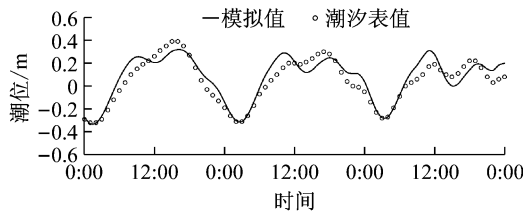


图 4 秦皇岛潮位站 2016 年 10 月 12—14 日潮位验证
Fig. 4 Validation of tide level of Qinhuangdao tide gauge station on Oct. 12—14, 2016

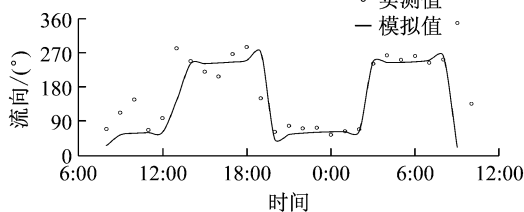
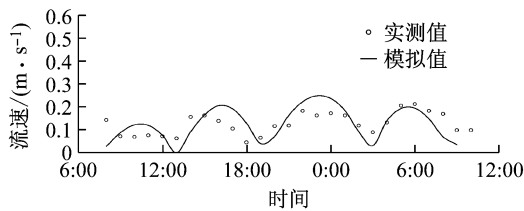


图 5 T6 站 2016 年 10 月 12—13 日垂向平均流速、流向验证
Fig. 5 Validation of vertical average flow velocity and direction at station T6 on Oct. 12—13, 2016

者的相关程度, s 值的范围在 0~1 之间. s 值为 1 时, 代表模型计算值和实测值之间完全相符; s 值大于 0.65 时, 表示模型计算结果为极好; s 值在 0.65~0.5 之间时, 表示模型计算结果为非常好; s 值在 0.5~0.2 之间时, 表示模型计算结果为好; s 值小于 0.2 时, 表示模型计算结果为差; s 值为 0 时, 代表模型计算值和实测值之间完全不相符.

表 1 为各潮流站点计算得到的 s 系数值. 总体来说, 数学模型在计算流速、流向方面表现好; 大部分测站点 s 系数都大于 0.65, 属于极好; 只有 T6 站流速验证稍弱, 属于好.

表 1 模型的效率系数 s

Tab. 1 The efficiency coefficient s of the model		
站点	模拟项目	s
T1	流速	0.87
	流向	0.88
T2	流速	0.90
	流向	0.87
T3	流速	0.91
	流向	0.84
T4	流速	0.85
	流向	0.97
T5	流速	0.87
	流向	0.79
T6	流速	0.60
	流向	0.79

3.3 波浪模型验证

根据 2016 年秦皇岛波浪站实测波浪资料统计得到研究区域常浪和强浪下的波周期、有效波高和平均波向. 波浪模型计算值与实测资料统计特征值对比见表 2. 通过对比可以看出: 常浪和强浪工况模拟结果与统计值拟合较好.

表 2 波浪模型验证

工况	统计特征值			计算值		
	周期/s	波高/s	波向/(°)	周期/s	波高/m	波向/(°)
常浪	4.45	0.62	144.4	4.41	0.62	142.6
强浪	7.25	2.00	106.5	7.29	2.00	119.2

4 波流动力特征

图 6 为戴河口-洋河口海域涨落急时刻的流场. 秦皇岛海域涨潮流向基本为 SW 向, 落潮流基本为 NE 向, 主流向与岸线或等深线基本平行, 潮流为典型的往复流. 涨落潮流流速大潮大于小潮, 涨落急时刻最大流速出现在金山嘴附近, 其中涨急时刻最大流速在金山嘴东侧, 落急时刻最大流速在金山嘴西侧. 由于秦皇岛海域位于渤海潮波系统中两个主要

半日分潮 M2 和 S2 的无潮点附近,其流速整体较小,近岸海域基本小于 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 外海流速较大,金山嘴头水域由于水深相对较大,在金山嘴的挑流作用下,流速较大,可达 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

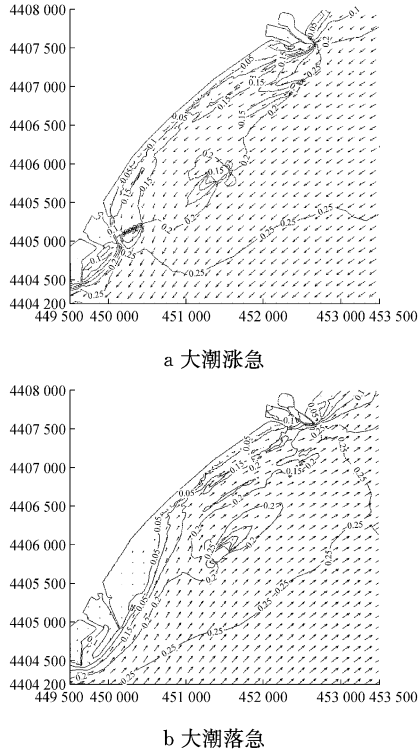


图 6 大潮潮流场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig.6 Tidal current fields (Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 7 为戴河口-洋河口海域常浪下的有效波高场. 秦皇岛海域常浪向为 SE 向,与岸线大致垂直. 入射波在外海传播过程中波向基本保持不变,进入近岸区域后,波浪发生浅水变形,产生波浪折射,波向发生变化,逐渐往垂直等深线的方向靠近. 波高则由外海往近岸区逐渐减小,波高在水深较深的外海衰减速度较近岸区要缓慢很多,10 m 等深线位置波高约为 0.84 m ,到 6 m 等深线处才衰减至 0.7 m .

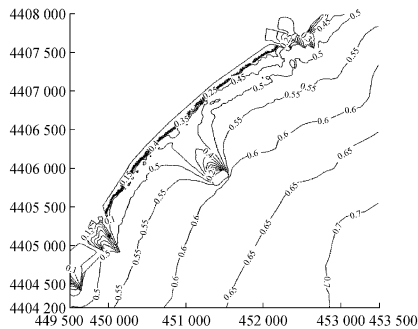


图 7 常浪下的有效波高场(单位: m)
Fig.7 Significant wave height field under a normal wave condition(Unit: m)

到近岸区,波高和波向则受到地形的变化以及沿岸岬头的影响,发生了较为明显的变化. 金山嘴位置突出岸线,引起波浪辐聚,波能集中,波高较大,达 0.65 m ,其两侧波浪迅速向近岸区衰减. 戴河口-洋河口海域地形变化较为平缓,波浪由 5 m 等深线处 0.6 m 波高向岸逐渐衰减. 仙螺岛作为海中孤岛,起到了类似出水离岸堤的作用,波浪发生绕射,岛体后方形成波影区,波高衰减剧烈,有效波高由岛前的 0.54 m 锐减至接近于零;岛后海域与相邻海域相比波高至少减少 14%.

5 人工岛与海岸整治工程下波流动力响应特征

为研究人工岛与海岸整治工程作用下波流动力响应特征,根据人工岛和整治修复工程加入与否共设置 4 种工况进行计算分析,见表 3.

表 3 工况设置

Tab.3 The settings of four scenarios		
工况序号	人工岛	海岸整治工程
1	×	×
2	√	×
3	×	√
4	√	√

5.1 波流动力对人工岛的响应特征

用工况 2 减去工况 1 的计算结果,可以得到人工岛建设前后洋河口-戴河口海域涨落急时刻潮流流速差等值线图及常浪下有效波高差等值线图. 以下分别基于处理结果分析波流动力对人工岛的响应特征.

5.1.1 潮流

图 8 为人工岛建设前后涨落急时刻潮流流速差等值线图. 仙螺岛位于开敞海域,走向与涨落潮流方向一致,其对水流的作用类似于方柱绕流. 仙螺岛的建设,导致海底地形突变,岛屿四周的潮流均受到直接影响;由于仙螺岛的阻挡,迎流侧和背流侧形成两个低速区,迎流侧流速等值线近似为圆弧形,背流侧则为纺锤形,流速减小 $0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的等值线在迎流侧距岛体约 500 m,而在背流侧距岛体达 1 200 m,背流侧影响区长度约为迎流侧的 3 倍. 这主要是因为水流绕过岛屿后分为两股,在背流侧汇合时横向流速相互抵消,形成一段流速相对较小的区域. 向岸侧和外海侧的流速则由于岛屿挑流作用的影响而有所增加,且由于岛屿布置角度并不与流向完全平行,使得两侧流速变化不对称.

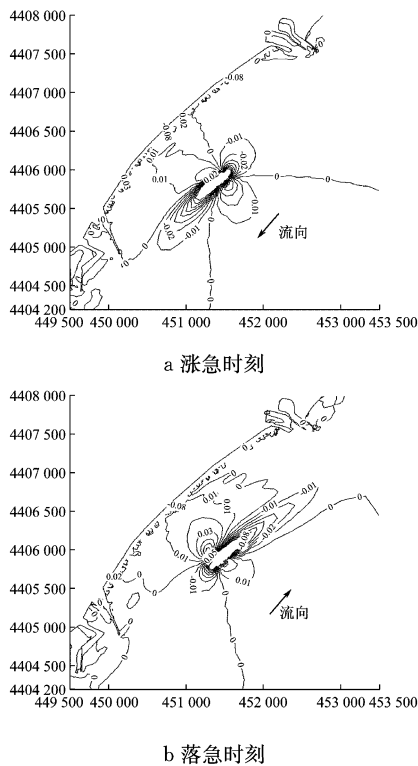


图 8 涨急和落急时刻人工岛建设前后潮流流速差等值线 (工程后减工程前)(单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 8 Tidal current velocity differences at maximum flood and maximum ebb between Case 2 and Case 1 (Unit: $m \cdot s^{-1}$)

5.1.2 波浪

图 9 为工况 2 常浪下的有效波高场和人工岛建设前后常浪有效波高差等值线图. 在常浪作用下, 仙螺岛类似离岸堤, 在岛屿与海岸之间的水域形成波影区, 波高由岛前的 0.6 m 衰减到岛体向岸侧为 0, 之后由于绕射作用和地形的折射作用, 波影区波高向岸有所增加, 最后由于浅水作用, 波高向岸逐步衰减.

5.2 波流动力对海岸整治工程的响应特征

用工况 3 减去工况 1 的计算结果, 可以得到海岸整治工程建设前后洋河口-戴河口海域涨落急时刻潮流流速差等值线图和常浪下有效波高差等值线图.

5.2.1 潮流

整治修复工程中分别位于洋河口和戴河口的两个人工岬头将原有岸线进一步遮蔽, 使得洋河口-戴河口岸线成为典型的岬湾海岸, 相对于工程前, 研究海域的大部分区域的流速都有所下降.

图 10 为海岸整治工程前后涨落急时刻潮流流速差等值线图. 涨急流向基本为 SW 向, 潮流由戴河

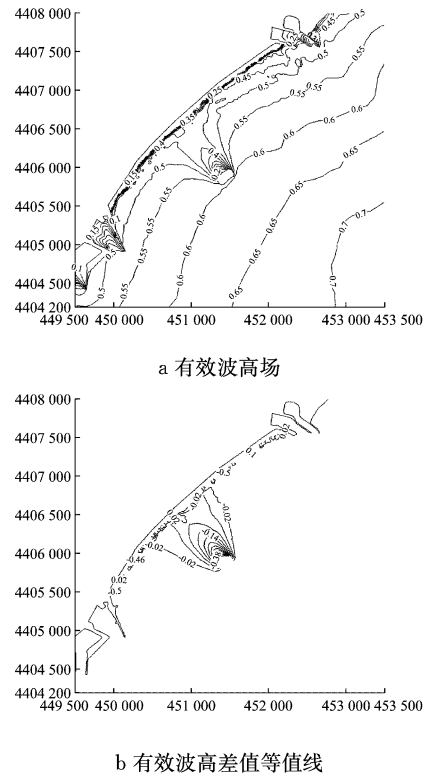


图 9 常浪下工况 2 的有效波高场及人工岛建设前后有效波高差等值线(工程后减工程前)(单位: m)

Fig. 9 Significant wave height field of Case 2 and significant wave height difference between Case 2 and Case 1 under the normal wave condition (Unit: m)

口导堤与岬头之间进入海湾区域. 其中, 由于岬头与沙坝 1 对水流的束水作用, A 区流速上升 ($1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右). 位于沙坝 1 东北端的 B 区则由于沙坝的挑流作用, 流速上升 ($2 \sim 3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). 此外除了沙坝 1 的坝顶流速有增加之外, 近岸海域流速基本都降低了 (小于 $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). 落急流向为 NE 向, D 区域 (洋河口东北区域) 由于导堤和岬头引起了转流, 形成了涡流. 涡流消耗大量动能, 流速明显减小, D 区域流速减小最大为 $8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 由于人工岬头的挑流作用, 位于洋河口岬头东北部的 C 区域流速增加了 $1 \sim 1.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 由于沙坝的挑流作用, 图中 E 和 F 区域流速增加了 $1 \sim 2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 其他区域流速减小了 $0 \sim 4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

5.2.2 波浪

图 11 为工况 3 常浪下的有效波高场和整治修复工程前后常浪下有效波高差等值线图. 在常浪作用下, 岬头及沙坝对其后的水域具有一定保护作用, 阻碍了波浪向岸的传播, 在每座岬头和沙坝后均形成了有效波高较小的波影区, 其中, 人工岬头的透射系数约为 0.9, 沙坝的透射系数约为 0.7~0.9.

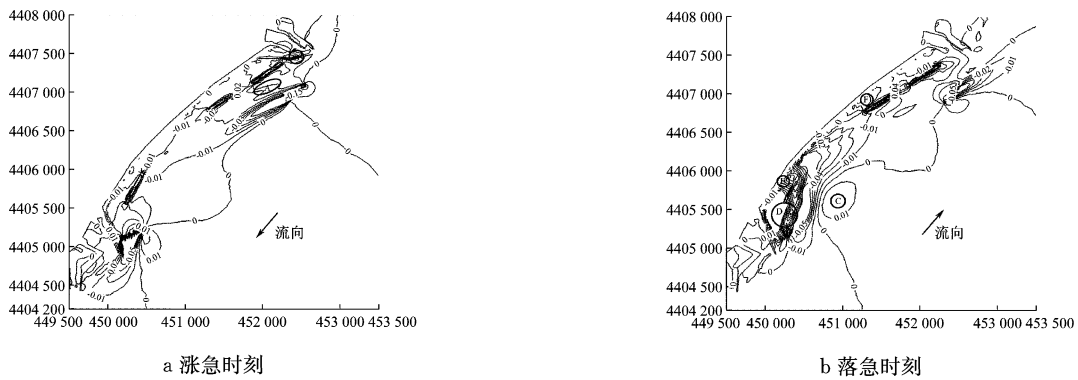


图 10 涨急和落急时刻海岸整治工程建设前后潮流流速差等值线图(工程后-工程前)(单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 10 Tidal current velocity differences at maximum flood and maximum ebb between case 3 and case 1 (unit: $m \cdot s^{-1}$)

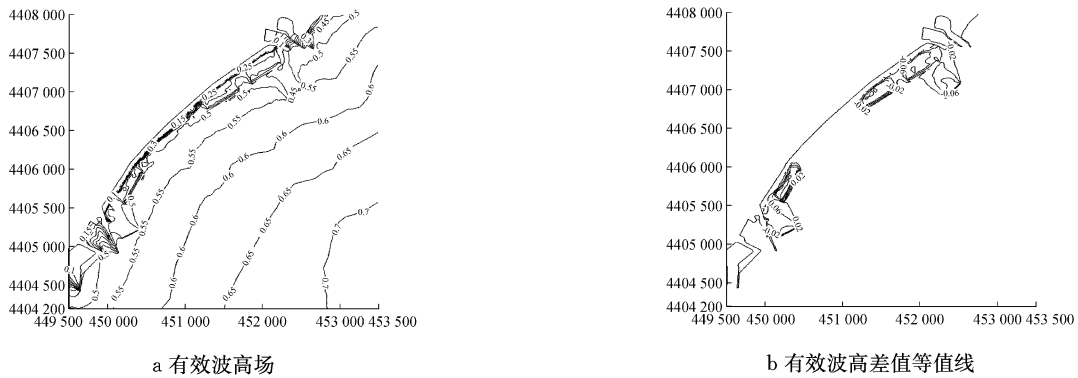


图 11 常浪下工况 3 的有效波高场及整治工程前后有效波高差等值线(工程后减工程前)(单位:m)

Fig. 11 Significant wave height field of Case 3 and significant wave height difference between Case 3 and Case 1 under the normal wave condition (unit: m)

5.3 人工岛与海岸整治工程结合下波流动力响应特征

用工况 4 减去工况 1 的计算结果,可以得到人工岛及海岸整治工程建设前后洋河口-戴河口海域涨落急时刻潮流流速差的等值线图和常浪下有效波高差等值线图。

5.3.1 潮流

图 12 为人工岛及海岸整治工程建设前后涨落急时刻潮流流速差等值线图. 人工岛及海岸整治工程共同作用时对潮流的影响并非线性叠加关系,这在图 10 的 G 和 H 区域表现明显。

针对 G 区域,仅有人工岛时(工况 2),由图 8 可看出 G 区域由于人工岛的挑流作用,涨急时刻流速整体增加了 $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,落急时刻则增加了 $1 \sim 3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;而在海岸整治工程的单独作用下,通过图 10 可看出 G 区域涨急时刻流速整体减小 $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,落急时刻减小 $1 \sim 4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 人工岛和海岸整治工程共同作用下,G 区域涨急时刻流速主要受人工岛挑流作用影响,潮流流速整体增大,增大的量值

与图 8 相近;而落急时刻的流速则由于洋河口处新建人工岬头的作用,部分区域流速减小,而靠近人工岛的部分区域流速则有所增加。

针对 H 区域,仅有人工岛时,H 区域涨落急时刻流速变化较小;仅有海岸整治工程时,H 区域涨落急时刻流速降低了 $0 \sim 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 在人工岛和海岸整治工程共同作用下,H 区域流速变化值仍约为 $0 \sim 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,但与仅有海岸整治工程时相比,等值线往东北方向偏移,这与人工岛的挑流作用有关。

5.3.2 波浪

图 13 为工况 4 常浪下及人工岛和海岸整治工程建设前后常浪下有效波高差等值线图. 对比图 9 和图 11,可以发现常浪场对人工岛和海岸整治工程的响应基本上为对二者单独响应之和,这是因为常浪场波向基本到近岸之后由于地形折射,波向趋向垂直于等深线的方向,而研究区域内的仙螺岛和下水沙坝及人工岬头又与等深线基本平行,这使得人工岛和整治修复工程都只影响了其后水域的波浪,而相互之间影响较小。

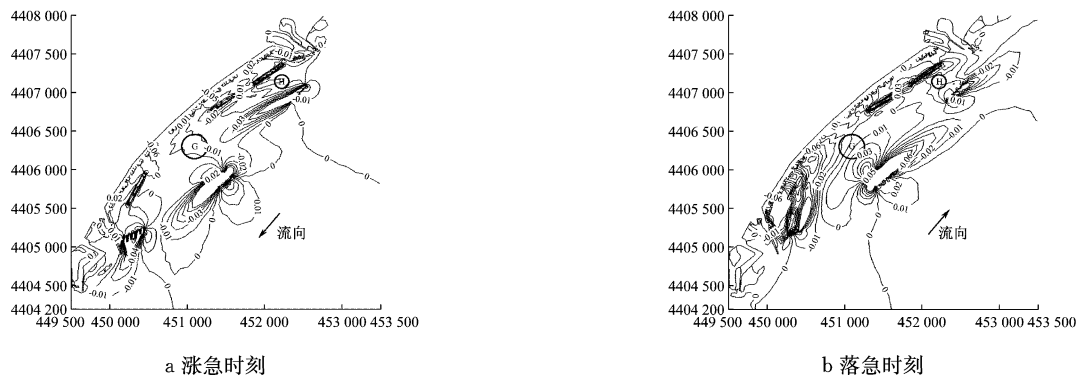


图 12 人工岛及海岸整治工程建设前后涨急和落急时刻潮流流速差等值线图(工程后-工程前)(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 12 Tidal current velocity difference at maximum flood and maximum ebb between case 4 and case 1 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

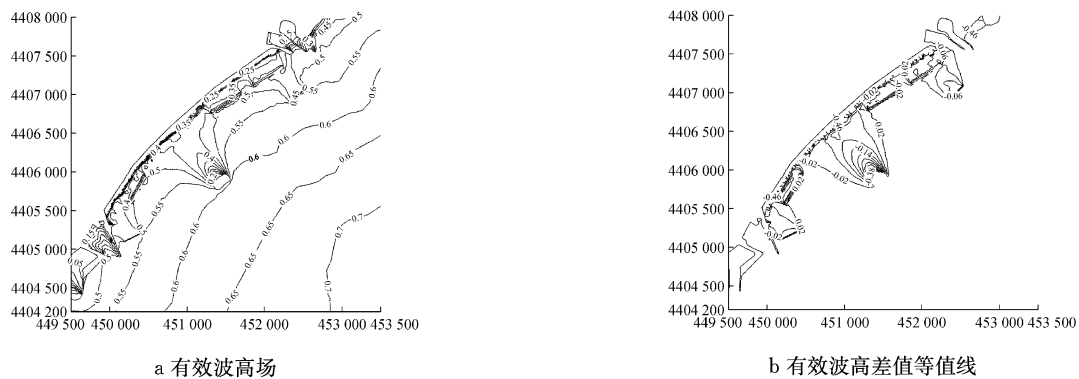


图 13 常浪下工况 4 有效波高及人工岛和海岸整治工程建设前后常浪下有效波高差等值线(工程后减工程前)(单位:m)

Fig. 13 Significant wave height field of case 4 and significant wave height difference between case 4 and case 1 under the normal wave condition (unit: m)

6 结论

采用验证好的双重嵌套潮流和波浪数学模型模拟了人工岛和海岸整治修复工程下周围海域的潮流场和常浪场,通过对比不同工况的计算结果,分析了潮流和波浪对人工岛和海岸整治修复工程的响应特征,得出了如下结论:

(1) 人工岛对水流的作用类似方柱绕流,迎流侧和背流侧由于岛屿的阻挡,形成两个低速区,向岸侧和外海侧的流速则由于岛屿挑流作用的影响而有所增加,且由于岛屿布置角度并不与流向完全平行,使得两侧流速变化不对称.常浪作用下,人工岛类似出水离岸堤,在岛屿与海岸之间的水域形成波高较小的波影区.

(2) 洋河口至戴河口海岸整治修复工程的建设使得工程海域大部分区域的流速降低,而常浪作用下,岬头及沙坝对其后的水域具有明显保护作用,阻碍了波浪向岸的传播,在每座岬头和沙坝后均形成

了有效波高较小的波影区,其中,人工岬头的透射系数约为 0.9,沙坝的透射系数约为 0.7~0.9.

(3) 人工岛及海岸整治工程结合时对潮流的影响并非简单的数值叠加,相互之间存在着非线性的关系.常浪场对人工岛和海岸整治工程的响应基本上为对二者单独响应的叠加.

(4) 戴河口-洋河口海岸整治工程在传统的沙坝和人工岬头建设的基础上,注重了在新建工程与海岸之间预留潮汐通道^[22],有效地加强了工程海域水体交换能力,这样能够在保证一定工程效果的同时减小工程对环境的影响.

参考文献:

- [1] 金晖,柯学. 双鱼岛工程设计关键技术研究[J]. 水运工程, 2013(10): 1.
JIN Hui, KE Xue. Key design technology of Shuangyu artificial island[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(10): 1.
- [2] 英晓明,贾后磊,曹玲珑,等. 海南儋州人工岛建设对海床冲淤影响数值模拟[J]. 海洋通报, 2014, 16(2): 37.

- YING Xiaoming, JIA Houlei, CAO Linglong, *et al.* Numerical modeling of seabed morphological effects from the construction of artificial islands in Danzhou, Hainan[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 16(2): 37.
- [3] 张志明,刘连生,钱立明,等. 海上大型人工岛设计关键技术研究[J]. *水运工程*, 2011(9): 1.
ZHANG Zhiming, LIU Liansheng, QIAN Liming, *et al.* On key design technology for large offshore man-made island[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2011(9): 1.
- [4] VAN RIJN LC. Coastal erosion and control [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2011, 54(12): 867.
- [5] MUJABAR P S, CHANDRASEKAR N. Coastal erosion hazard and vulnerability assessment for southern coastal Tamil Nadu of India by using remote sensing and GIS[J]. *Natural Hazards*, 2013, 69(3): 1295.
- [6] 张明慧,孙昭晨,梁书秀,等. 海岸整治修复国内外研究进展与展望[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(4): 635.
ZHANG Minghui, SUN Zhaochen, LIANG Shuxiu, *et al.* Progress of coastal environment repairing and cleaning engineering research and its prospect [J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(4): 635.
- [7] 朱嘉,刘建辉,蔡晓琼. 珠江口伶仃岛海滩修复研究[J]. *海洋开发与管理*, 2014(11): 36.
ZHU Jia, LIU Jianhui, CAI Xiaoqiong. Study on the beach renovation on the Nei Lingding Island in Zhujiang Estuary[J]. *Ocean Development and Management*, 2014(11): 36.
- [8] CHARLIER R H, De MEYER C P. Coastal defense and beach renovation[J]. *Ocean and Shoreline Management*, 1989, 12(5): 525.
- [9] 匡翠萍,冒小丹,顾杰,等. 海域水动力对老虎石海滩养护响应关系分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(5): 689.
KUANG Cuiping, MAO Xiaodan, GU Jie, *et al.* Analysis of hydrodynamic response to beach nourishment at Tiger-Rock Beach[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42(5): 689.
- [10] 王晓纯. 数值模拟人工岬角对海岸演变的控制作用[D]. 大连:大连理工大学, 2004.
WANG Xiaochun. Numerical simulation of man-made headland on shore evolution control[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [11] 张伟,吴建政,朱龙海,等. 威海湾岸滩整治工程冲淤趋势[J]. *海洋湖沼通报*, 2009(2): 137.
ZHANG Wei, WU Jianzheng, ZHU Longhai, *et al.* The erosion and deposition trend for the sand beach regulation projects in the south area of Weihai Bay[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2009(2): 137.
- [12] 季荣耀,徐群,莫思平,等. 港珠澳大桥人工岛对水沙动力环境的影响[J]. *水科学进展*, 2012, 23(6): 829.
JI Rongyao, XU Qun, MO Siping, *et al.* Effects on the hydrodynamics and sediment environment by artificial islands of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 829.
- [13] Danish Hydraulic Institute. MIKE 21 & MIKE 3 flow model hydrodynamics and transport module science documentation [M]. [S.l.]; DHI Water & Environment, 2014.
- [14] Danish Hydraulic Institute. MIKE 21 spectral wave module scientific documentation [M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2014.
- [15] 刘浩. 仙螺岛建设可行性及其对环境影响的研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2000.
LIU Hao. Research on the feasibility of an artificial island construction and its influences on environments[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2000.
- [16] 王中起,韩志远,严冰. 秦皇岛海域水文泥沙特征分析[J]. *水道港口*, 2010, 31(4): 247.
WANG Zhongqi, HAN Zhiyuan, YAN Bing. Hydrographic and sediment characteristics in Qinhuangdao sea area[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2010, 31(4): 247.
- [17] 安永宁,杨鲲,王莹,等. MIKE21 模型在海洋工程研究中的应用[J]. *海岸工程*, 2013, 32(3): 1.
AN Yongning, YANG Kun, WANG Ying, *et al.* Application of MIKE21 model into marine engineering research[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 32(3): 1.
- [18] ISLAM M M, IQBAL M S, LEEMANS R, *et al.* Modelling the impact of future socio-economic and climate change scenarios on river microbial water quality[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2018, 221(2): 283.
- [19] ZHANG Shenming, XU Zhenghe, KE Kong. Simulation and analysis on flow and pollutant of Jinan Queshan Reservoir[C]// *Advances in Computer Science, Intelligent System and Environment*. Guangzhou: Springer Publishing Company, 2011: 693-699.
- [20] 白莹. 黄河突发性水污染事故预警及生态风险评估模型研究[D]. 南京:南京大学, 2013.
BAI Ying. Water pollution accident warning model development and ecological risk assessment research along Yellow River Basin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [21] WILLMOTT C J. On the validation of models[J]. *Physical Geography*, 1981, 2(2): 184.
- [22] PAN Y, KUANG C, GU J, *et al.* Assessment of a measure for water exchange strengthening of artificial headland bays based on shoreline change and flushing time[J]. *Journal of Coastal Research*, 2014, 30(3): 615.