

# 龙凤头海滩修复工程与波流动力响应特性

匡翠萍<sup>1</sup>, 王彬谕<sup>2</sup>, 顾杰<sup>3</sup>, 雷刚<sup>4</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 广西交通职业技术学院, 广西 南宁 530216;  
3. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 4. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 基于 MIKE 21 软件建立平潭龙凤头海滩修复工程海域双重嵌套二维潮流和波浪耦合数学模型, 并将验证后的模型运用到工程设计方案实施前后潮流场及波浪场的模拟, 比较分析水动力的变化。研究结果表明: 平潭海域潮汐类型属于正规半日潮, 8 月大潮潮差约为 5 m, 潮汐强; 海坛湾内潮流总体表现为往复流特征, 湾口流速最大, 湾内流速较小, 湾顶流速最小; 北端防波堤大大减少了南北水体交换, 内侧落潮流调整为沿堤流; 堤头处挑流作用明显, 流速增加, 形成明显的旋转流; 南北端防波堤对其内侧一定范围海域有掩护作用, 波高削减显著, 受掩护岸线长度略大于防波堤长度; 堤头处受波浪折射作用影响, 波能辐聚, 波高增大。工程后海滩中部岸段波高及流速削减不明显, 建议增设离岸堤加强海滩保护。

**关键词:** 龙凤头海滩; 潮流; 波浪; 防波堤; MIKE 21 软件  
**中图分类号:** TV148<sup>+</sup>. 5 **文献标志码:** A

## Study of Wave-Current Coupled Hydrodynamic Responses to a Beach Nourishment Project at Longfengtou Beach

KUANG Cuiping<sup>1</sup>, WANG Binyu<sup>2</sup>, GU Jie<sup>3</sup>, LEI Gang<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Guangxi Vocational and Technical College of Communications, Nanning 530216, China; 3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A 2D wave-current coupled model for a beach nourishment project sea area at Longfengtou Beach was set up based on MIKE 21 by using a two-level nested grid. The calibrated model was then adopted to simulate the flow fields and wave fields before and after the project, and the hydrodynamic responses to the nourishment project were analyzed. The simulation results show that the tide in Pingtan sea area is regular semidiurnal and the average tidal range at

spring tide in August is about 5 m; the tidal current in Haitan Bay is of typical reversing current with a large flow velocity in the mouth of the bay, and a small and the smallest flow velocity in the middle and top of the bay respectively; the northern breakwater, which greatly reduces the north-south water exchange, adjusts the ebb current along the breakwater; the flow velocity at the tip of the breakwaters increases due to the deflecting flow, and an anticlockwise circulation generates obviously; the northern and southern breakwaters only have a limited effect on the area behind the breakwaters where the wave height significantly decreases, and the influenced length of shoreline is slightly greater than that of breakwater; the wave height at the tip of breakwaters increases due to the energy convergence caused by wave refraction. Overall, the reduction of wave height and flow velocity in the middle part of the beach is negligible, thus the construction of offshore breakwater is suggested to strengthen the protection of Longfengtou Beach.

**Key words:** Longfengtou Beach; tidal current; wave; breakwater; MIKE 21

福建平潭东部海域有大小海滩 215 处, 多处为具有海滨浴场的优质海滩<sup>[1]</sup>。上世纪末, 海坛湾(图 1)滨海沙滩中部修建的人工海堤, 造成海堤前海滩迅速下蚀。2007 年海滩基本不存在干滩, 大潮时滩面出露约 300 m, 不利于游客全天候利用海滩<sup>[2]</sup>。为了将其打造为国内一流的高质量旅游、休闲娱乐海滩, 亟需开展滨海沙滩修复工程。

海坛湾位于台湾海峡西北侧, 是一个半封闭海湾, 湾口朝向正东方向, 其东部为强潮强浪区。湾内岛屿众多, 水深较浅(20 m 以内), 受冬季大风和夏季台风影响, 波浪、潮流动力强劲, 波流相互作用显著。Fang 等<sup>[3]</sup>指出台湾海峡西北部潮汐振幅明显大于南部海域, 相差可达一个数量级, 最大潮差出现在

收稿日期: 2015-02-07

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 教授, 工学博士, 主要研究方向为海岸工程。E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通讯作者: 顾杰(1961—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为海洋环境。E-mail: jgu@shou.edu.cn

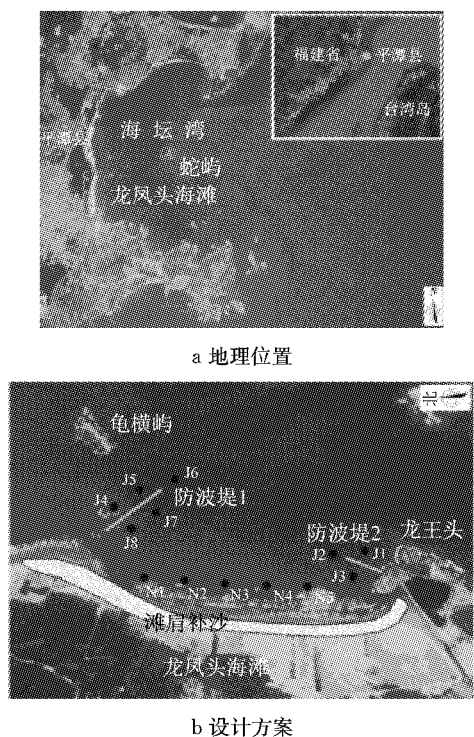


图1 龙凤头海滩地理位置及设计方案示意图

Fig.1 Location of Longfengtou Beach and design of beach nourishment project

平潭附近海域. Wang等<sup>[4]</sup>通过2012年7月22至29日ADV(acoustic doppler velocimetry)和ADCP(acoustic doppler current profiler)测流数据得到,台湾海峡西侧主要受 $M_2$ 分潮主导. Zhang等<sup>[5]</sup>通过建立台湾海峡潮流和风暴潮耦合数学模型成功模拟了1999年台风Dan作用下福建沿岸风暴潮的潮位变化过程. Zhang等<sup>[6]</sup>分析了台湾海峡5次台风作用下的水体输运特性,海峡内水体呈明显的向北输运特征. Zeng等<sup>[7]</sup>基于COHERENS模型模拟得到台湾海峡 $M_2$ 分潮的潮汐动态,潮波系统主要由开尔文潮波和驻波两个潮波系统共同控制. 田永青等<sup>[8]</sup>基于统计方法和潮汐调和分析方法得出台湾海峡西部近海最大潮差从平潭岛北部到泉州变化不大,厦门东南到惠来呈线性递减. Zheng等<sup>[9]</sup>利用WAVEWATCH-III模型计算得到1988~2011年台湾岛周围海域波能密度及其增长速率均较大. 刘涛等<sup>[10]</sup>通过建立波浪数学模型计算得到了福建兴化湾深水区域以及工程区域的设计波浪要素. 叶雨颖等<sup>[11]</sup>对实测1个月的风浪资料进行了统计和频谱分析,给出了福建省南部特征波要素与频谱关系. 本文在分析实测资料的基础上,利用MIKE 21软件建立和验证平潭海域双重嵌套的潮流和波浪耦合数学模型,研究分析潮流和波浪对平潭海坛湾龙凤头海滩修复工程的响应特性.

## 1 数学模型及计算区域

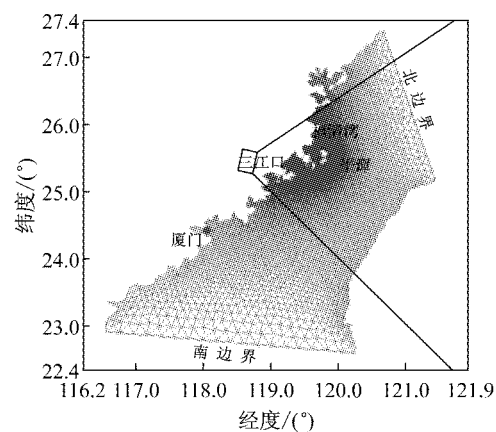
MIKE 21模型是丹麦水力研究所开发的平面二维数学模型,可用于模拟河口、海岸、海湾、河流、湖泊及海洋的水流、波浪、泥沙及环境. MIKE 21 FM(flow model)基于Boussinesq假设、静水压力假设、浅水条件和边界条件,通过控制体积法求解由不可压缩雷诺平均Navier-Stokes方程概化的浅水方程<sup>[12-13]</sup>. 在空间上采用有限体积法进行离散,在时间上采用显性欧拉法进行离散. MIKE 21 SW(spectral wave)基于波浪作用平衡方程,可以求解准定常和非定常波浪作用平衡方程的全谱公式和方向解耦参数公式,并可与潮流模型耦合<sup>[14]</sup>. 应力模型是波浪模型和潮流模型实现耦合的关键部分. 本文将潮流模型中计算得到的水位和流速输入到波浪模型,比较波浪耦合作用下工程前后近岸波浪场分布.

### 1.1 计算区域及网格

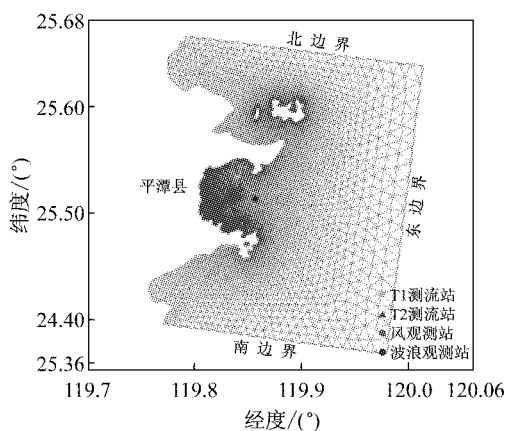
为精准模拟工程布置和复杂地形(岛屿众多,且岸线极不规则),采用大、小双重嵌套模型进行计算. 大、小模型布置如图2所示. 大模型大陆沿岸南起广东石碑山,北至浙江五溪村,台湾岛沿岸南起淡水,北至高雄. 网格剖分采用三角形网格,节点数为15 115,网格单元数为27 713;两条开边界网格较为稀疏,空间步长可达1 000 m;两条闭边界网格空间步长约为200 m. 地形资料大部分来源于美国国家海洋与大气管理局(national geophysical data center, NOAA)官方网站,分辨率为2'. 小模型计算范围覆盖平潭东部海域,共划分为三个开边界,计算区域共布有8 701个计算节点和16 593个三角形单元,为研究海坛湾内的潮流情况,对其进行了网格加密,网格空间步长约20 m. 海坛湾内地形采用由国家海洋局第三海洋研究所提供的2011年实测地形.

### 1.2 工程方案

2011年7月对海坛湾龙凤头海滩实施滩肩补沙的海滩修复工程(一期工程),于2011年8月底竣工,海滩实际施工岸线总长度1 359 m,其中最北段龟模屿附近岸段干滩宽度120 m,中北部100 m为过渡段,中南部及南部岸段干滩宽度60 m. 工程后沙滩宽度由0扩大到20~30 m,至2011年12月,剖面测量结果表明海滩侵蚀严重,岸线平均后退11.1 m,最大后退量达31.0 m,需要对沙滩进行进一步修复. 设计修复方案为滩肩补沙和防波堤相结合<sup>[15]</sup>,布置如图1所示. 防波堤1离岸距离为300 m,长度为



a 大模型网格及测站位置



b 小模型网格及测站位置

图2 大、小嵌套模型网格及测站位置

Fig.2 Large and small nested model grids and observation stations

260 m, 方向为东偏南  $60^\circ$ ; 防波堤 2 离岸距离为 190 m, 长度为 110 m, 方向为北偏东  $20^\circ$ , 防波堤 1 和防波堤 2 顶宽均为 4 m.

## 2 模型验证

### 2.1 边界条件和初始条件

大区域潮流模型的开边界条件为 MIKE 21 软件包自带的全球潮汐模型导出的潮位过程, 该潮汐模型是在 1992~2002 年共计 10 年的 TOPEX/POSEIDON 卫星高度计资料基础上建立的, 其分辨率为  $0.125^\circ$ , 模型考虑的分潮包含  $M_2, S_2, K_2, N_2, S_1, K_1, O_1, P_1, Q_1$  和  $M_4$ , 共计 10 个分潮. 小区域潮流模型开边界条件为大模型提供的潮位过程, 模拟时间为 2011 年 8 月 14 日 0:00 时至 8 月 17 日 18:00 时. 初始潮位选取计算开始时刻的平均潮位, 初始流速为 0.

入射波浪来源于平潭波浪观测站(图 2)实测波

浪的统计分析数据. 考虑潮流作用时, 将潮流模型中计算得到的水位和流速输入到波浪模型, 为了保证潮流和波浪耦合, 本文选取 8 月份的实测波浪资料进行模型验证, 8 月平均波周期为 4.1 s, 有效波高和波向的变化过程如图 3 所示, 统计得到平均有效波高为 1.04 m, 波向全部集中在 ENE, E, SE 和 ESE 方向, 其中以 ENE 向最多, 因此将北边界和南边界设为侧边界, 设置从东边界入射的有效波高  $H_s = 1.04$  m, 波周期  $T = 4.1$  s, ENE 向的入射波.

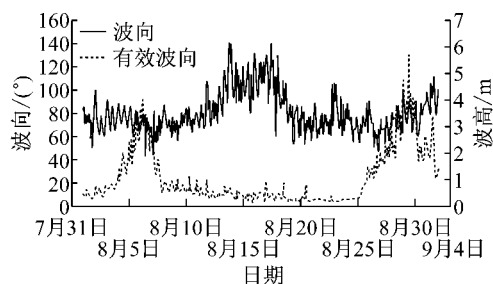


图3 有效波高和波向变化过程

Fig.3 Time history of significant wave height and direction

### 2.2 参数选取

由于潮滩落潮干出、涨潮被淹, 因此采用动边界模拟. 干水深  $h_{dry}$ 、淹没水深  $h_{flood}$  和湿水深  $h_{wet}$  分别取 0.005, 0.05 和 0.1 m. 大区域潮流模型曼宁数为  $25 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ , 小区域潮流模型曼宁数变化范围为  $30 \sim 50 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ . 大小模型计算时间步长均采用变步长, 根据流态自动调整, 下、上限值分别为 0.000 1 s 和 30 s. 波浪破碎采用 Battjes 和 Janssen 模型, 破碎指标选择 0.8. 根据龙凤头海域表层泥沙中值粒径, 粗糙高度取 0.1 mm.

龙凤头近岸海域风向季节性变化明显, 一年中秋、冬、春三季以偏北风为主, 夏季以偏南风为主. 根据平潭风观测站(图 2)统计得到的历史各月最多风向和平均风速统计可知, 8 月份主要风向为 SSW 向, 平均风速为  $5.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [2]. 图 4 为对应潮流模拟时间内的风向和风速变化过程, 数据来源于 NOAA 平潭东部海域东经  $120^\circ$ , 北纬  $25.71^\circ$  测点的 6 h 一次的风观测数据, 统计 8 月 14 日 0:00 时至 17 日 18:00 时风速和风向平均值可知与历史各月最多风向和平均风速相一致, 因此潮流模型和波浪模型中风驱动力均采用定常风( $5.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , SSW 向).

### 2.3 潮流模型验证

平潭海域潮汐属于正规半日潮, 平均涨、落潮历时相当, 8 月大潮潮差约为 5 m, 潮汐强. 大模型潮位验证资料采用 2011 年潮汐表上平潭、福清湾、三江

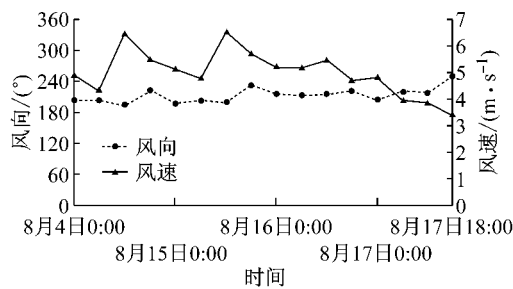
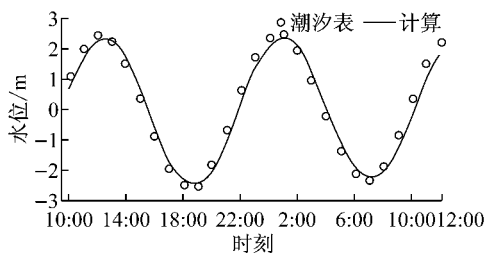


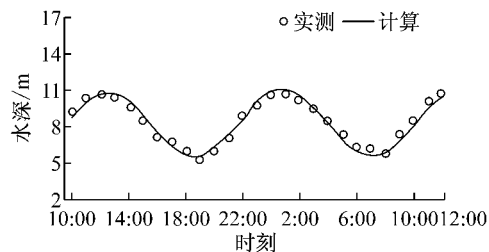
图4 风速和风向过程

Fig.4 Time history of wind speed and direction

口和厦门4个测点(图2)8月16日10:00时至8月17日12:00时的潮位过程. 平潭测点的计算潮位值与潮汐预报值的比较如图5所示. 潮位验证结果表明:台湾海峡大模型的潮位计算值与潮汐预报值吻合较好,能较为有效地反映台湾海峡的潮位变化过程.



a 大模型(平潭)水位验证



b 小模型(T1)水深验证

图5 大模型(平潭)水位及小模型(T1)水深验证

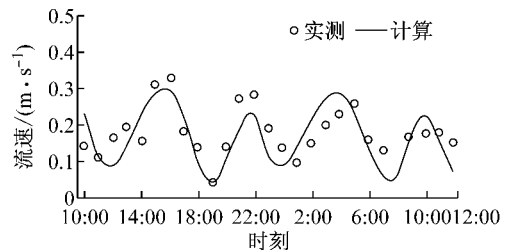
Fig.5 Verification of water level in large scale model and water depth in small scale model

平潭东部海域小模型基于T1和T2测流站(图2)一次天文大潮(2011年8月16日10:00时至8月17日12:00时)的实测垂向平均流速、流向及水深数据进行验证. T1测流站的水深验证如图5所示,流速与流向的验证如图6所示. 本文选择 Wilmott<sup>[16]</sup>提出的统计学方法来评价数学模型,其计算方法为

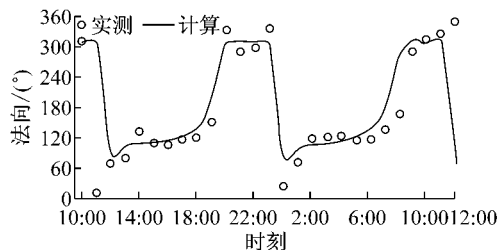
$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |M - D|^2}{\sum_{i=1}^N (|M - \bar{D}| + |D - \bar{D}|)^2} \quad (1)$$

式中: $D$ 表示实测值; $M$ 表示模拟值; $\bar{D}$ 表示实测平均值; $S$ 代表实测值与实测平均值的偏差、模型计算

值与实测平均值的偏差这两者的相关程度,其结果范围在0~1之间. 当值大于0.65时,结果为极好;0.50~0.65为非常好;0.2~0.5为好;小于0.2为差. 结果表明,除T2点平均流向的 $S$ 在0.50~0.65之间,其余各项 $S$ 均大于0.65,说明建立的潮流模型是合理的,能较准确地反映出研究区域潮流运动特征.



a 流速验证



b 流向验证

图6 小模型(T1)流速和流向验证

Fig.6 Verification of flow velocity and direction using small scale model

图7中矢量表示海坛湾涨、落急时刻的潮流场,等值线为有效波高分布. 潮流总体表现为往复流特征,湾口流速最大,湾内流速较小,湾顶流速最小. 涨潮时水流由湾口北部进入,以湾内中部蛇屿为界,分为南北两支,北支呈顺时针旋转流进入海坛湾北部,南支呈逆时针旋转流从东南角流出;落潮时湾内落潮流和湾外由南向北的落潮流在湾口北侧汇合流出.

## 2.4 波浪模型验证

根据统计风场资料,对波流耦合作用下海坛湾内波浪场进行了模拟,潮流历时对应于2011年8月16日10:00时至8月17日12:00时的验证潮流过程,其中涨急时刻为2011年8月16日23:00时,落急时刻为2011年8月17日5:00时. 模拟结果与观测波浪数据统计结果均显示主波向为ENE向,观测站实测波高和波周期分别为1.04 m和4.1 s,计算波高和波周期分别为1 m和4.2 s,二者一致. 图7中有效波高分布显示波浪在近岸区发生折射,逐渐垂直于岸线方向. 由于波浪绕射作用,岛屿后侧波高削减显著,且落急时刻波掩区范围明显大于涨急时

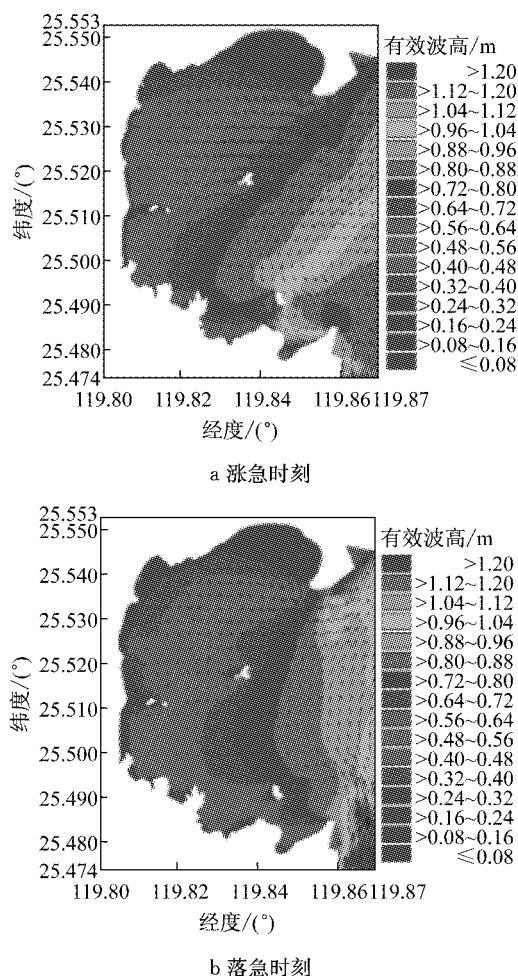


图7 海坛湾涨、落急时刻潮流场和波高分布

Fig. 7 Tidal current fields and distribution of wave height at maximum flood and maximum ebb in Haitan Bay

刻,波高削减更为明显.由于潮流对波浪折射、波浪自身在海坛湾南、北岬头折射和水深不均匀引起的折射等综合作用,海坛湾湾口中北部及其内侧海域涨急波高明显弱于落急波高,而南部岬头及其内侧海域涨急波高强于落急波高.

### 3 波流动力对工程的响应模拟

#### 3.1 潮流对工程的响应特性分析

通过对工程区及近岸海域的潮流场进行模拟,得到涨、落急时刻工程实施前后流场分布,分别如图8和图9所示.图10和图11分别为涨、落急时刻工程前后流速等值线分布.龙凤头海域涨潮流受海坛湾南支涨潮流控制,该由北向南的水流进入龙凤头海域,受北部龟模屿及其东侧岛屿和南部龙王头岬头影响,形成一个大的顺时针环流.工程后龙凤头海

滩北部及中部岸段近岸流速略有减少,流速等值线向岸推进.北端防波堤1的阻水作用,使其近岸侧的流速减小,减幅约为  $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其东侧区域存在一个逆时针环流.位于南端的防波堤2阻挡了一部分西北向来流,由于堤头挑流作用,改变了水流结构,内侧形成较明显的逆时针旋转流,堤头流速增加至  $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,进而可能导致该处冲刷.近岸海域落潮流向主要为东北向.由于龙凤头海滩北端存在一个水深极浅区域,落潮时滩地露出,大量落潮流从滩地与龟模屿之间的深槽流出,流速可达  $0.28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,工程后防波堤1东侧海域最大流速约为  $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,相较于工程前有所减小.北端防波堤1大大减少了南北水体交换,改变了水流方向,内侧落潮流

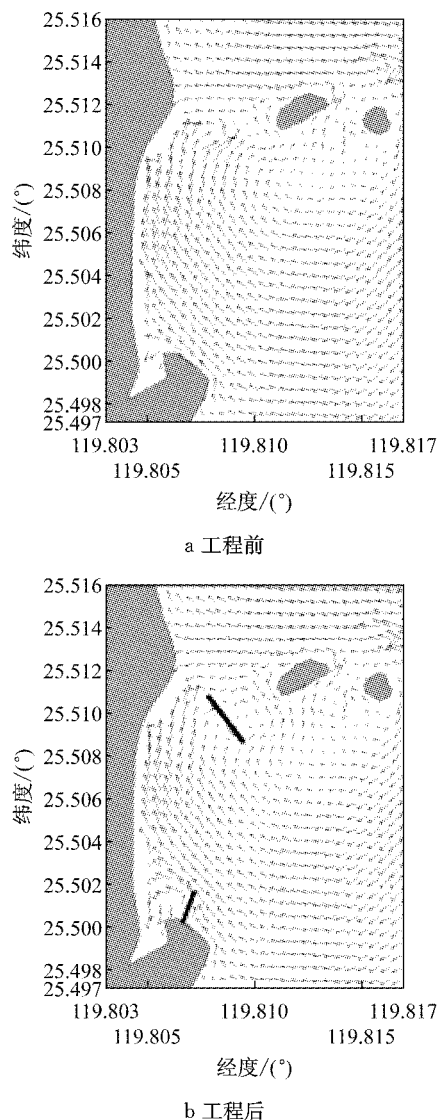


图8 龙凤头海域涨急时刻工程前后流场

Fig. 8 Maximum flood current fields before and after the project at Longfengtou Beach

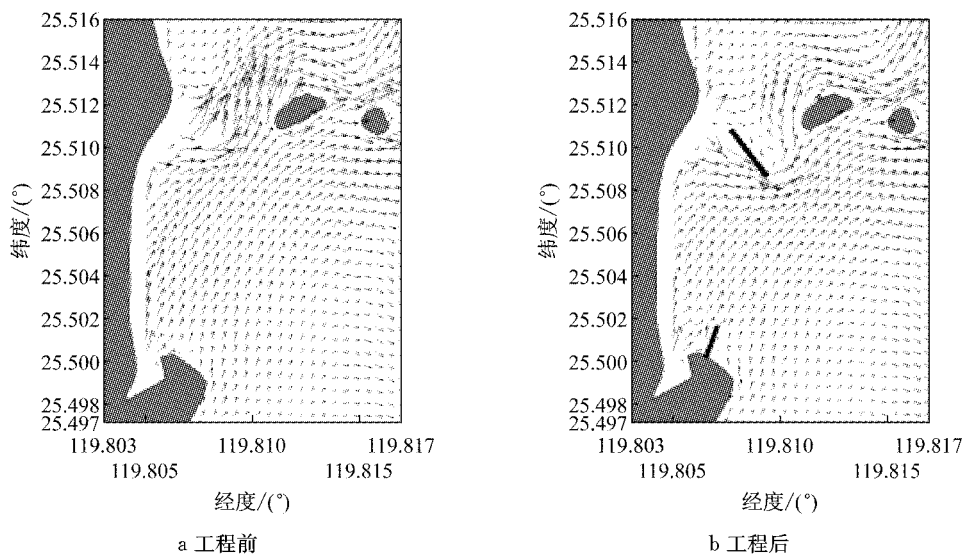


图9 龙凤头海域落急时刻工程前后流场

Fig.9 Maximum ebb current fields before and after the project at Longfengtou Beach

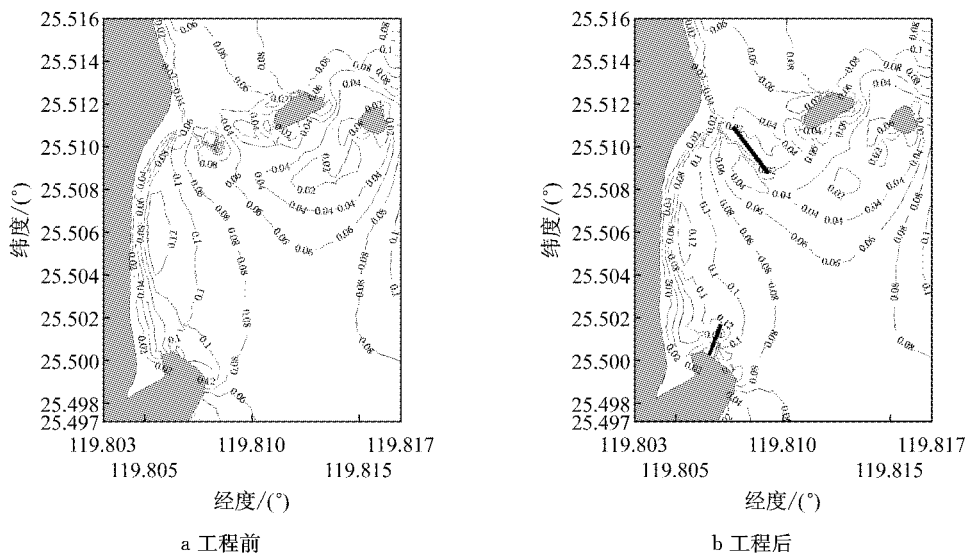


图10 龙凤头海域涨急时刻工程前后流速等值线分布

Fig.10 Isolines of maximum flood current velocity magnitude before and after the project at Longfengtou Beach

多为沿堤流,堤头处流速增加至  $0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 整个离岸区和近岸区的流速都有所减小,最大减幅小于  $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 3.2 波浪对工程的响应特性分析

通过波流耦合作用下波浪模拟,得到涨、落急时刻工程实施前后波高分布如图12和图13所示. 涨急时刻工程区及近岸海域波高明显大于落急时刻,由于落潮时滩地出露,龙凤头海滩近岸区域波高极小,约为  $0.04 \text{ m}$ . 从图12可知,涨急时刻北端防波堤1仅对其内侧海域有掩护作用,沿岸距北端约  $350 \text{ m}$  范围内波高有所削减,南端防波堤2也仅对其内侧海域有掩护作用,沿岸距南端约  $130 \text{ m}$  范围内波高有所削减. 通过对工程区及近岸海域13个监测点

(图1中J1~J8和N1~N5)工程实施前后的波高及波向进行对比得到:工程后堤头位置的测点波高略有增大,涨落急时刻J2和J6测点波高增加在  $0.1 \text{ m}$  以内,是由于堤头处波浪发生折射,导致波能辐聚,波高增大. 由于堤头绕射作用,波能辐散,防波堤内侧为波掩区,波高下降显著,因此掩护区内测点的波高得到有效削减,J3,J7和J8测点波高减幅均接近或超过  $50\%$ ,受掩护岸线长度略大于防波堤长度. 中部岸段近岸各测点波高均只有小幅减小,涨急时刻N2~N4测点波高减幅均小于  $1.5\%$ ,且越靠近岬湾顶部,测点波高削减幅度越小,可以看出南北端防波堤对湾顶近岸海域波浪削减效果不明显,建议增设离岸堤加强海滩保护.

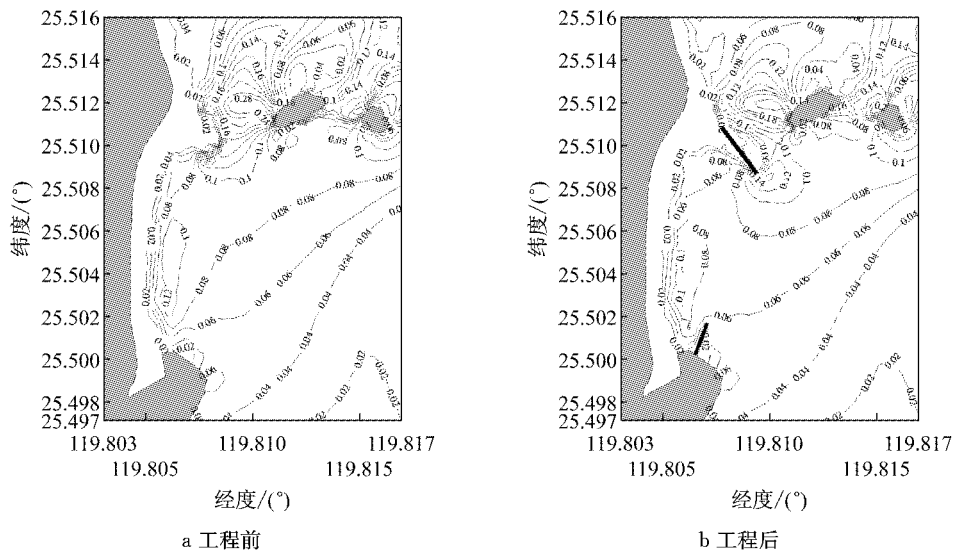


图 11 龙凤头海域落急时刻工程前后流速等值线分布

Fig. 11 Isolines of maximum ebb current velocity magnitude before and after the project at Longfengtou Beach

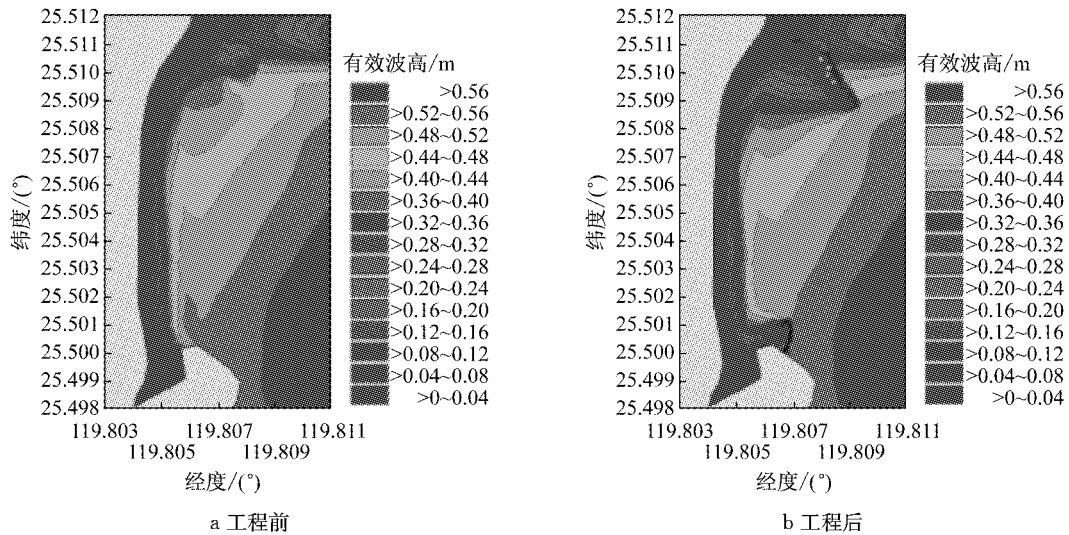


图 12 龙凤头海域涨急时刻工程前后波高分布

Fig. 12 Distribution of wave height at maximum flood before and after the project at Longfengtou Beach

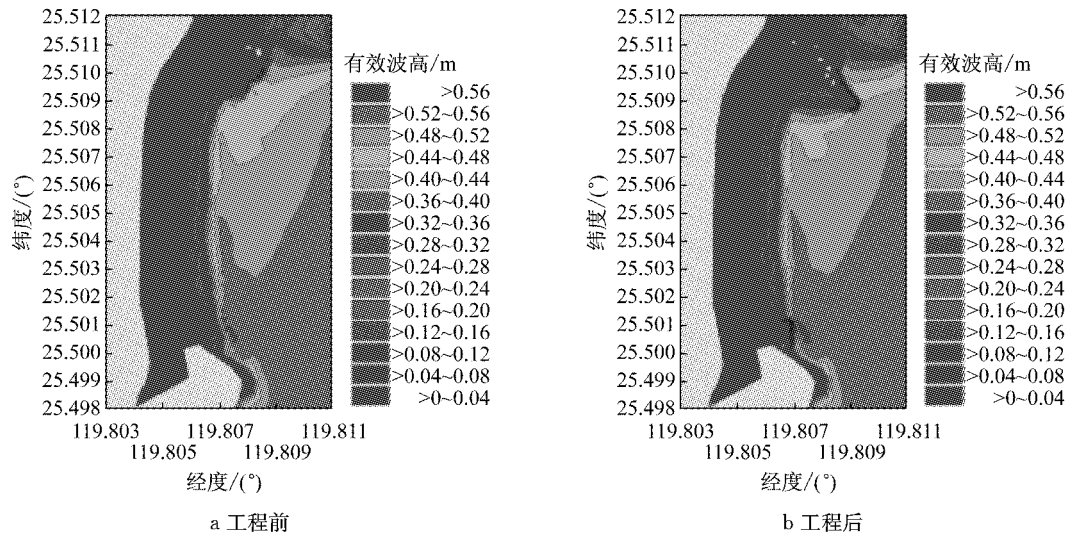


图 13 龙凤头海域落急时刻工程前后波高分布

Fig. 13 Distribution of wave height at maximum ebb before and after the project at Longfengtou Beach

## 4 结论

基于 MIKE 21 软件建立了平潭龙凤头海滩及其邻近海域的双重嵌套二维潮流和波浪耦合的水动力数学模型,通过实测资料对数学模型进行了验证,并将验证后的数学模型运用到工程设计方案下潮流场和波浪场的预测,比较分析波流动力对海滩修复工程的响应关系,得到以下主要结论:

(1) 平潭海域潮汐属于正规半日潮,平均涨、落潮历时相当,8月大潮潮差约为5m,潮汐强.海坛湾内潮流总体表现为往复流特征,湾口流速最大,湾内流速较小,湾顶流速最小.

(2) 近岸流速受南北防波堤影响较小,离岸区域流速分布几乎不受影响;北端防波堤大大减少了南北水体交换,改变了水流方向,内侧落潮流多为沿堤流;堤头处挑流作用明显,流速增加,形成较明显的旋转流,进而可能导致堤头冲刷.

(3) 南北侧防波堤只对其内侧一定范围海域有掩护作用,受掩护岸线长度略大于防波堤长度,掩护区域波高削减幅度接近50%;堤头处受波浪折射作用影响,波能辐聚,波高增大.

(4) 工程后中部岸段波高及流速削减不明显,建议增设离岸堤加强海滩保护.

## 参考文献:

- [1] 林军,施文耀.福建平潭岛旅游地质资源特征浅析[J].福建地质,2000,19(2):111.  
LIN Jun, SHI Wenyao. Discussion on the characteristics of geological tourist resources in Pingtan Island, Fujian Province [J]. Geology of Fujian, 2000, 19(2): 111.
- [2] 国家海洋局第三海洋研究所.平潭龙凤头海滩养护实验工程演变监测报告[R].北京:国家海洋局第三海洋研究所,2012.  
Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. Report of the bed evolution after the nourishment project in Longfengtou Beach, Pingtan County [R]. Beijing: Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2012.
- [3] FANG Guohong, YANG Jingfei, Thao Yucai. A two-dimensional numerical model for tidal motion in the Taiwan Strait[J]. Marine Geophysical Researches, 1984, 7(1/2): 267.
- [4] WANG Aijun, YE Xiang, DU Xiaoqin, *et al.* Observations of cohesive sediment behaviors in the muddy area of the northern Taiwan Strait, China[J]. Continental Shelf Research, 2014, 90: 60.
- [5] ZHANG Wenzhou, HONG Huasheng, SHANG Shaoping, *et al.* A two-way nested coupled tide-surge model for the Taiwan Strait[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27:1548.
- [6] ZHANG Wenzhou, HONG Huasheng, YAN Xiaohai. Typhoons enhancing northward transport through the Taiwan Strait[J]. Continental Shelf Research, 2013, 56:13.
- [7] ZENG Ganning, HU Jianyu, HONG Huasheng, *et al.* Numerical study on  $M_2$  tidal system in the Taiwan Strait[J]. Procedia Environmental Science, 2012, 12: 702.
- [8] 田永青,潘爱军.台湾海峡西部近海潮汐特征[J].台湾海峡,2011,30(4):483.  
TIAN Yongqing, PAN Aijun. Tidal characteristics in offshore sea of western Taiwan Strait[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(4): 483.
- [9] ZHENG Chongwei, LI Chongyin. Variation of the wave energy and significant wave height in the China Sea and adjacent waters[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 381.
- [10] 刘涛,陈汉宝,刘海源.福建兴化湾波浪条件数值模拟研究[J].水运工程,2007(3):400.  
LIU Tao, CHEN Hanbao, LIU Haiyuan. Numerical simulation research on wave condition of Xinghuawan Bay, Fujian[J]. Port & Waterway Engineering, 2007(3): 400.
- [11] 叶雨颖,潘伟然,张国荣,等.福建东山湾海浪现场观测的统计特征[J].厦门大学学报:自然科学版,2007,46(3):386.  
YE Yuying, PAN Weiran, ZHANG Guorong, *et al.* The field observations and statistical characteristics of waves in Dongshan Bay [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2007, 46(3): 386.
- [12] 冯静. MIKE21 数值模型在海洋工程环境影响评价中的应用研究[D].青岛:中国海洋大学,2011.  
FENG Jing. Application of MIKE21FM numerical model in environmental impact assessment of ocean engineering [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [13] DHI Hydraulics. MIKE21 & MIKE3 flow model hydrodynamic and transport module science documentation[M]. Denmark: DHI Water & Environment, 2009.
- [14] DHI Water & Environment & Health. MIKE21 spectral wave module scientific documentation[M]. Denmark: DHI, 2009.
- [15] 匡翠萍,单云驰,王彬谕,等.海坛湾龙凤头海滩养护工程方案研究[J].同济大学学报:自然科学版,2015,43(5):714.  
KUANG Cuiping, SHAN Yunchi, WANG Binyu, *et al.* Study on beach nourishment in Longfengtou Beach of Haitan Bay[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(5): 714.
- [16] Wilmott C J. On the validation of models [J]. Physical Geography, 1981, 2(2): 184.