

束芳芳, 蔡锋, 戚洪帅, 等. 不同沉积物养护海滩对台风响应的差异性研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 103–115, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.009

Shu Fangfang, Cai Feng, Qi Hongshuai, et al. Study on various response to typhoon of nourished beaches with different sediments[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 103–115, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.07.009

不同沉积物养护海滩对台风响应的差异性研究

束芳芳^{1,2}, 蔡锋^{2*}, 戚洪帅², 刘建辉³, 雷刚²

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 自然资源部第三海洋研究所 海洋与海岸地质实验室, 福建 厦门 361005; 3. 自然资源部海岛研究中心, 福建 平潭 350400)

摘要: 本文通过对厦门天泉湾人工卵石滩和会展人工沙滩在 1614“莫兰蒂”超强台风影响前后的典型剖面监测, 结合水文动力要素的观测和数值模拟, 计算了台风影响过程的波浪场、总水位, 分析了剖面形态和台风过程的剖面平均变化量。结果表明, 强潮海岸人工卵石滩与人工沙滩对台风响应的特征明显不同, 人工卵石滩横向上大部分卵石向岸输移堆积, 滩面侵蚀, 滩肩堆积形成更高的风暴滩肩, 坡度明显变陡。而人工沙滩则表现为明显的沉积物离岸输运, 上部滩面侵蚀, 下部滩面淤积, 滩面坡度明显变缓, 受台风登陆后的强烈向岸风作用, 滩肩顶有所夷平, 滩肩高度变化很小。海滩滩肩在台风过程中是否侵蚀与台风登陆和影响过程的总水位(天文潮、风暴增水、波浪爬高)密切相关, 两个人工海滩的风暴响应模式均为冲蚀; 台风影响过程中, 波浪能量相对强、滩面坡度相对陡的人工卵石滩比人工沙滩的剖面平均变化量小, 对于台风的响应程度小, 在强侵蚀高能海岸采用砾石等粗粒径沉积物进行海滩养护是减缓砂质海滩侵蚀的一种有效手段。

关键词: 强潮海岸; 人工卵石滩; 人工沙滩; 台风响应

中图分类号: P737.1; P732

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)07-0103-13

1 引言

海岸侵蚀是沿海国家面临的共同问题, 在全球气候变化和人类活动双重影响下, 70% 的砂质海岸处于侵蚀后退状态, 且不断加剧^[1-5], 为此采用了各种硬质和软质的海岸防护措施, 其中海滩养护因其实用性、生态性和经济性等优点, 成为全球沿海国家海岸防护的优先选择, 得到推广和应用^[6-10]。为了抵御更剧烈的海岸侵蚀和更强的极端动力破坏, 已经有不少地区开始尝试在强侵蚀砂质海岸开展粗粒径沉积物(砾石、卵石)海滩养护^[11-14], 此类海滩孔隙率大、渗透性强, 具有很强的消能作用和良好的稳定性^[15-16]。

热带风暴诱发的风暴潮和台风浪是海滩常见的

极端动力事件, 会在短时间内导致海滩形态的剧烈变化和海滩侵蚀^[17-19], 热带风暴对海滩的影响与台风路径、台风强度、登陆时间、海滩类型、海滩走向等多重因素有关^[20-23]。国内外对海滩的风暴响应研究较为丰富, 包括风暴过程的防护效果、海滩沉积物、地形地貌、动力机制、响应类型、破坏与风暴后恢复等方面^[24-28], Sallenger^[29]对典型障壁海滩风暴响应模式进行了总结, 将其分为冲刷、冲蚀、冲越和洪泛 4 种类型; 研究表明, 海滩固有的地貌动力学特性对风暴响应影响明显^[29-31]。粗粒径沉积物海滩的风暴响应研究主要集中在岸线地形变化^[32-35]、砾石输移^[36-37]、破波带的水动力学特性和数值模拟等方面^[38-42], 对其在极端动力事件下的海滩动力地貌响应研究明显不足。

收稿日期: 2018-08-29; 修订日期: 2018-11-27。

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费(20170305, 2011010); 国家公益性行业(海洋)科研专项(201405037)。

作者简介: 束芳芳(1984—), 女, 安徽省安庆市人, 主要从事海岸动力地貌与海洋水动力学研究。E-mail: shufangfang@tio.org.cn

* 通信作者: 蔡锋(1965—), 男, 福建省厦门市人, 教授, 主要从事海岸动力地貌与海滩保护研究。E-mail: fcail800@126.com

极端动力事件在养护海滩演化中扮演着重要的角色,既是适应性调整的必经环节,也是发挥防护功能的体现^[35, 43-45]。本文基于 1614“莫兰蒂”台风过境厦门期间的水文动力观测、模拟与典型剖面跟踪监测,分析强潮海岸不同粒径沉积物养滩工程对于热带风暴响应的差异性,通过比对研究探讨粗粒径沉积物养护海滩对极端动力事件的动力地貌响应特征。

2 区域概况

2.1 研究区域

研究区位于台湾海峡西岸厦门岛南侧和东侧岸段(图 1b)。天泉湾岸段呈东—西走向,海岸修筑有

阶梯型护岸,海滩基岩裸露,是厦门岛东南部海岸侵蚀最严重的岸段,2014年6月在天泉湾海岸修复了人工卵石滩,卵石粒径为 5~10 cm(图 1c)。会展岸段呈南—北走向,修复前为直立式人工护岸堤,2012年11月修复形成人工沙滩,平均粒径 0.5 mm(图 1d),海滩养护工程基本情况见表 1。

研究海域属于正规半日潮海区,多年平均大潮高潮位为 3.81 m,多年平均潮差 3.98 m,属于典型的强潮海岸。福建沿海年平均台风影响 7.6 次,近年来直接登陆厦门的有 9914“丹恩”、0519“龙王”、1614“莫兰蒂”,均为强台风以上级别。根据 2009 年历史波浪观测资料统计,天泉湾岸段常浪向为 SSE 向,出现频率为 43.91%,有效

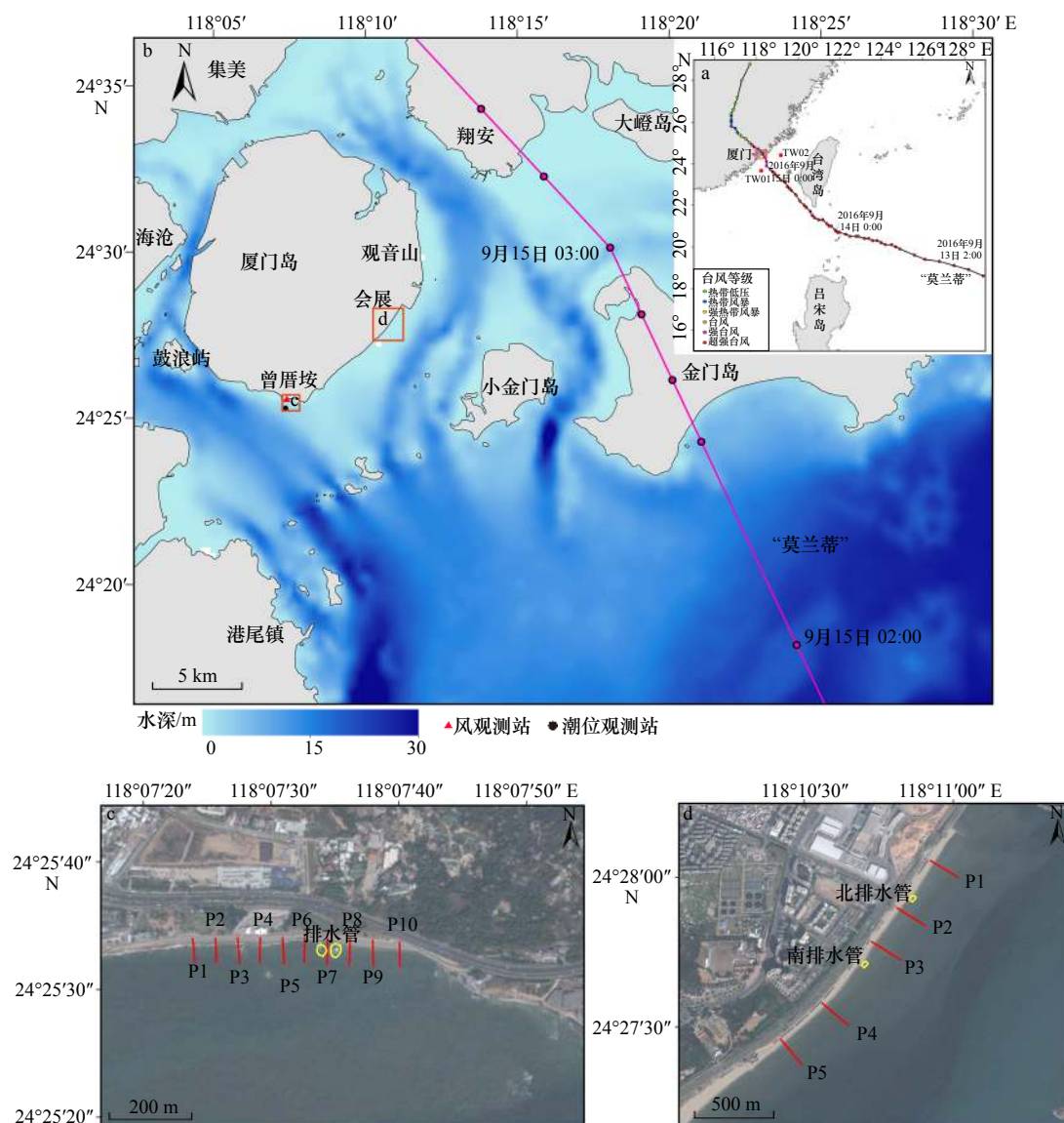


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the location of the research area

a. “莫兰蒂”台风路径; b. 研究岸段区域位置; c. 天泉湾人工卵石滩; d. 会展人工海滩

a. Path of Typhoon Meranti; b. location of the study coast segment; c. Tianquan Bay artificial cobble beach; d. Huizhan artificial sandy beach

表1 海滩养护工程基本情况

Tab. 1 The overview of the beach nourishment project

海滩	岸段长度/m	养护沉积物总量/ 10^4 m^3	养护沉积物粒径/mm	施工滩肩宽度/m	施工滩面宽度/m	滩肩高程/m	初始坡度
天泉湾人工卵石滩	632	5.71	50~100	13~20	35~46.5	4.0	1:5
会展人工沙滩	1 795	74.75	0.5	50	100~150	4.0	1:15

波高(H_s)年平均值为 0.35 m; 会展岸段常浪向也为 SSE 向, 出现频率为 25.83%, H_s 年平均值为 0.30 m。

2.2 “莫兰蒂”台风

“莫兰蒂”台风(图 1a)于 2016 年 9 月 10 日 14 时在西北太平洋生成, 随后向西北方向移动, 13 日夜间中心附近最大风速达到 70 m/s, 中心最低气压 900 hPa, 15 日 3 时以强台风级在厦门翔安附近海域登陆, 登陆

期间中心气压 945 hPa, 中心最大风速 52 m/s, 登陆地点位于研究海滩东北约 20 km(图 1b), 根据研究区实测风数据统计, 天泉湾实测 10 min 平均风速最大值为 33.1 m/s, 瞬时最大风速达到 49 m/s, 登陆时研究区风向为正北向, 台风登陆后, 风向由北向西北、西南向偏转(图 2)。

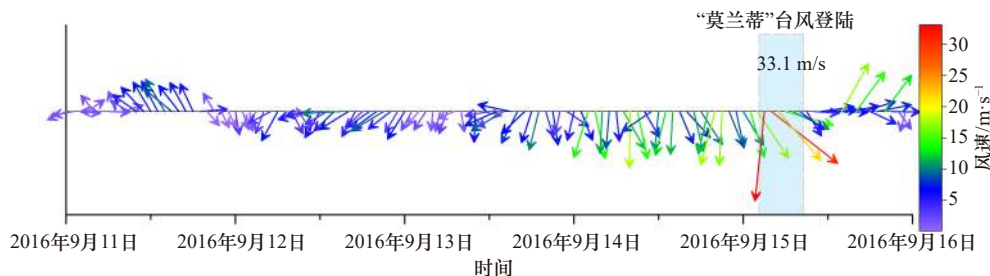


图2 “莫兰蒂”台风期间研究区风速、风向过程曲线图

Fig. 2 Curves of wind processes in the research area during Typhoon Meranti

3 资料与方法

3.1 剖面测量与分析

天泉湾人工卵石滩自西向东设置 P1~P10 共 10 条典型剖面进行测量(图 1c), 会展人工海滩自北向南设置 P1~P5 共 5 条典型剖面, 根据剖面方向采用 Trimble RTK-GPS 进行海滩剖面重复测量, 测量精度误差为 $\pm 1 \text{ cm}$ 。监测时间分别为 2016 年 9 月 3 日和 9 月 21 日(“莫兰蒂”台风前后), 其中会展人工沙滩台风前采用 2016 年 5 月 9 日观测资料。对剖面测量数据进行分析, 滩肩高度为滩肩隆起带的最高点高度, 岸线为多年平均大潮高潮位与海滩剖面相交线, 滩肩宽度为海滩陆侧起始点至海滩岸线间的宽度, 卵石滩砂石分界线为表层沉积物由卵石向砂转变的界线, 人工卵石滩坡度为岸线至砂石分界线之间的坡度值, 人工海滩坡度为岸线至低潮带之间的坡度。本文采用剖面平均变化量作为量化海滩台风响应强度的指标, 它指台风影响前后海滩剖面上各点高程平均变化值, 其无正负值之分, 能够更准确地表示海滩变化^[23]。

3.2 “莫兰蒂”台风浪数值模拟

台风浪数值模拟, 采用 Holland 理论模型风场叠

加 NCEP 再分析海面风场资料(美国国家环境预报中心提供)构造台风合成风场, 应用 SWAN 模型对“莫兰蒂”台风过程的波浪进行模拟, 模型采用加密的非结构三角网格(图 3), 对水深急剧变化、岸线复杂、岛屿众多的厦门湾海域地形进行刻画, 计算区域为 $15^\circ \sim 29^\circ \text{N}$, $115^\circ \sim 129^\circ \text{E}$, 计算区域共有 95 806 个单元, 最大网格边长约 6', 最小网格边长约 100 m。根据“莫兰蒂”台风的移行路径和时间, 模拟时间为 2016 年 9 月 11 日 0 时至 16 日 0 时, 计算时间步长取 300 s, 结果 30 min 输出一次。模型开边界条件采用本地风速 JONSWAP 谱计算值, 陆地边界认为波浪完全耗散, 采用全吸收条件。模型验证资料采用台湾海峡海域 2 个浮标站台风过程的实测风、波浪数据, TW01 ($23.629 7^\circ \text{N}$, $118.200 3^\circ \text{E}$)、TW02 ($24.480 0^\circ \text{N}$, $119.290 0^\circ \text{E}$), 浮标站位置见图 1a, 风速、波浪验证见图 4。

4 结果

4.1 “莫兰蒂”台风浪场分析

“莫兰蒂”台风过境期间, 登陆前, 研究区受偏 NE 向风控制(图 2), 湾内海域以 NE 向波浪为主(图 5a), 天泉湾岸段主要受 ENE-ESE 向浪影响, 会展岸段受

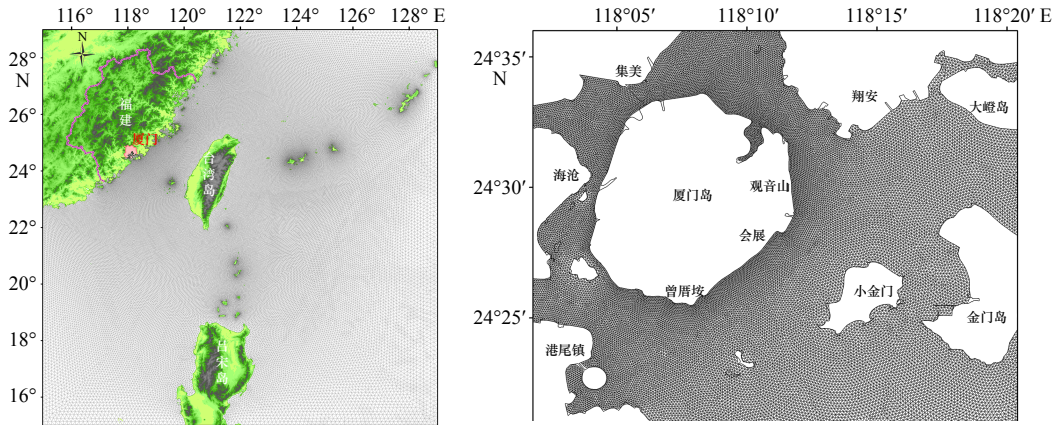


图3 台风浪模型计算网格

Fig. 3 Computing grid of the typhoon wave model

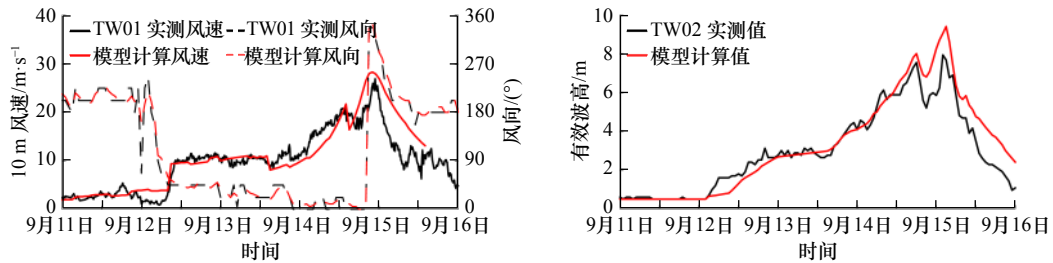


图4 计算风、波浪过程与浮标站观测值时间序列验证

Fig. 4 The verification of wind and wave processes at buoy stations

NE-ENE 向浪影响；台风登陆后，厦门湾转为偏 W-SW 风，湾内转为 SW 向波浪为主 (图 5b)，天泉湾岸段台风登陆时转为偏 W-SW 向浪，会展岸段转为偏 S 向浪影响；随着台风的逐渐远离，两个岸段均受偏 S-SE 向外海涌浪影响。“莫兰蒂”台风影响过程中，天泉湾人工卵石滩近岸最大波浪出现在台风登陆后， H_s 达 2.65 m，对应波向为 SW 向，会展人工沙滩近岸最大波浪出现在台风登陆前， H_s 为 2.12 m，对应波向为 ENE 向 (图 5c)。

4.2 台风过程最高总水位

台风过程的总水位包含天文潮、风暴增水、波浪和波浪爬高，其中波浪爬高可以根据下式计算^[46]：

$$R_2 = 1.1 \left(0.35\beta_f(H_0L_0)^{1/2} + \frac{[H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right), \quad (1)$$

式中， R_2 为超越概率 2% 的波浪爬高； β_f 为前滨滩面坡度； H_0 为深水波高； L_0 为深水波长。

图 6 为“莫兰蒂”台风过程人工海滩的实测潮位、有效波高、波浪爬高和海滩总水位，人工卵石滩和人工沙滩台风过程总水位最大值分别为 4.48 m 和 4.59 m，发生在台风登陆前的 14 日 23 时，台风登陆后两个海滩的总水位最高值为 4.35 m 和 3.55 m。

4.3 剖面形态变化

“莫兰蒂”台风影响前，两个人工海滩均已经过养护后的初始调整，趋于稳定 (图 7a, 图 7c)，台风过境后，天泉湾人工卵石滩和会展人工沙滩的现场照片见图 7b 和图 7d。人工海滩的典型剖面形态见图 8。从海滩剖面整体响应特征来看，天泉湾人工卵石滩剖面形态变化较为显著，滩肩高度明显增加，剖面坡度变陡，上凹幅度增大。会展人工沙滩的剖面形态从上陡下缓有较为明显坡折点转变为坡度较缓、坡折点不明显。对典型剖面台风前后的滩肩宽度、滩肩高度和滩面坡度进行统计，结果见图 9，沿岸方向上，分别定义天泉湾 P10 剖面为 0 点，向西为正，会展 P1 剖面位置为 0 点，向南为正。台风影响后，人工海滩的滩肩宽度整体表现为变窄，人工卵石滩比人工沙滩的变窄幅度小。天泉湾人工卵石滩平均滩肩宽度从 11.93 m 蚀退到 11.29 m，其中 P6 蚀退程度最大，滩肩宽度变窄达 2.76 m，P8、P9 剖面有一定程度淤宽。会展人工沙滩平均滩肩宽度从 33.94 m 蚀退至 31.58 m，除北排水管邻近南侧的 P2 淤宽 4.51 m 以外，其他剖面均有 2 m 以上的蚀退，南侧 P5 蚀退最多，达到 8.32 m；两个海滩的滩肩高度变化特征明显不同，天泉湾人工卵石滩滩肩高度明显增加，而会展人工沙滩的滩肩高度变

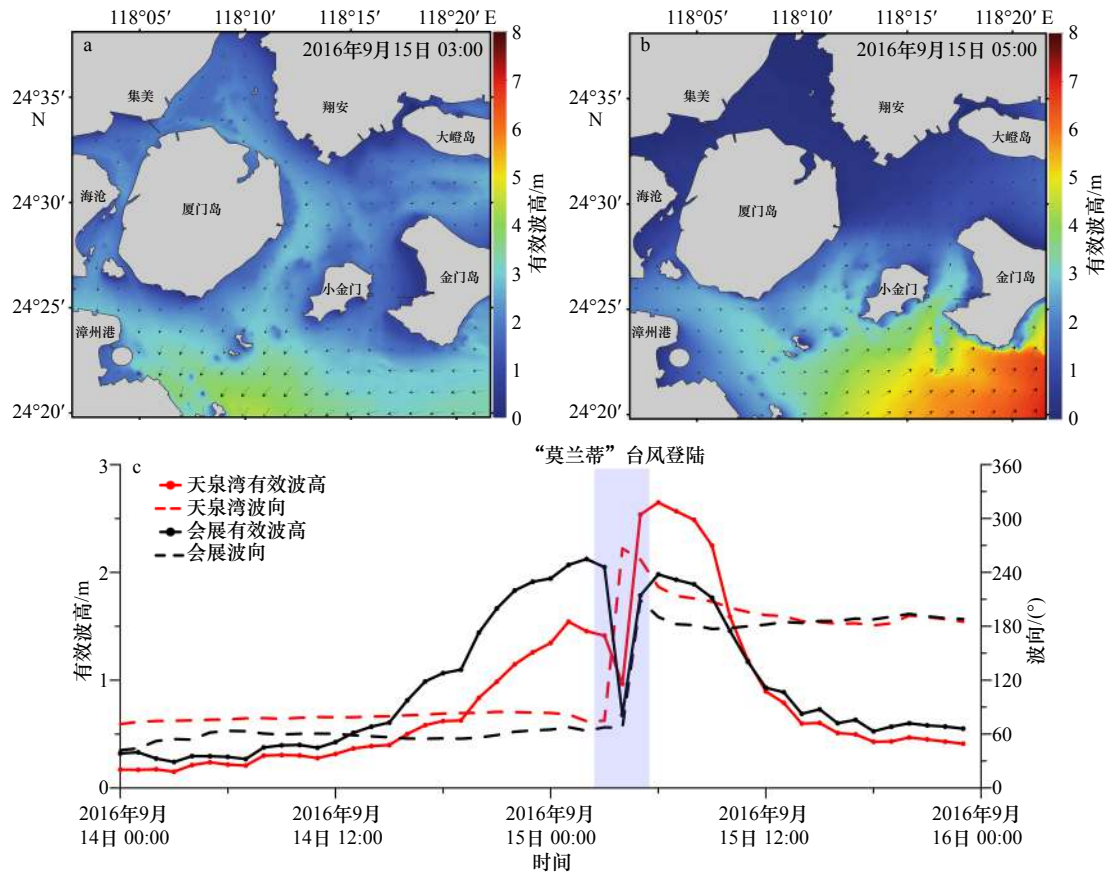


图5 “莫兰蒂”台风过境前后波浪场模拟结果

Fig. 5 Wave results before and after Typhoon Meranti

a. 9月15日3时波浪场; b. 9月15日5时波浪场; c. 研究区台风波浪过程曲线

a. Wave results on 3 September 15th; b. wave results on 5 September 15th; c. wave process

化很小。人工卵石滩平均滩肩高度从台风前的4.17 m增高至4.46 m, P5剖面滩肩高度最高, 达到4.65 m。会展人工沙滩台风前、后剖面平均滩肩高度分别为4.74 m和4.72 m, 基本没有变化; 海滩坡度对台风响应特征迥异, 天泉湾人工卵石滩表现为滩面坡度整体变陡, 平均坡度从0.188变陡至0.225。而会展人工沙滩则表现为整体变缓, 平均坡度从0.114减缓至0.097。

4.4 剖面侵蚀堆积特征和平均变化量

天泉湾人工卵石滩和会展人工沙滩典型剖面高程变化量见图10, 人工卵石滩多数典型剖面最大堆积高度出现在平均大潮高潮位附近位置, 最大侵蚀深度出现在平均海面与平均大潮高潮位之间, 人工排水管邻近西侧的P6剖面表现有所不同, 其最大堆积高度出现在平均大潮高潮位和台风过程最高总水位之间位置, 最大侵蚀深度出现在平均大潮高潮位附近。人工卵石滩剖面最大堆积高度为0.67 m, 出现在东段P9剖面, P8剖面的最大堆积高度也达到0.60 m, 出现在剖面高程+3.70 m位置处, 位于平均大潮高潮位附

近; 最大侵蚀深度为0.70 m, 出现在P10剖面高程+1.60 m位置处, 介于平均海面和平均大潮高潮位之间。人工沙滩除北排水管邻近南侧的P2剖面以外, 剖面最大侵蚀深度均出现在平均大潮高潮位偏下的上部滩面, 最大堆积高度则多发生在平均海平面以下。最大堆积高度为1.08 m, 出现在P2剖面高程-0.07 m位置处, 平均海平面以下; 最大侵蚀深度为1.40 m, 出现在南侧P5剖面高程+3.26 m位置处, 从图10可以看到, 人工沙滩除北排水管邻近的P2剖面外, 其他剖面侵蚀程度最大的位置均出现在平均大潮高潮位下0.60 m附近。

“莫兰蒂”台风影响后, 天泉湾人工卵石滩的剖面平均变化量小于会展人工沙滩。人工卵石滩的剖面平均变化量为0.20 m, 其中东侧P10剖面平均变化量0.30 m为区域最大, 西侧P3剖面平均变化量0.16 m为区域最小。人工沙滩在台风影响过程的剖面平均变化量为0.28 m, 南侧P5剖面平均变化量0.46 m最大, 北侧P1最小, 为0.15 m。

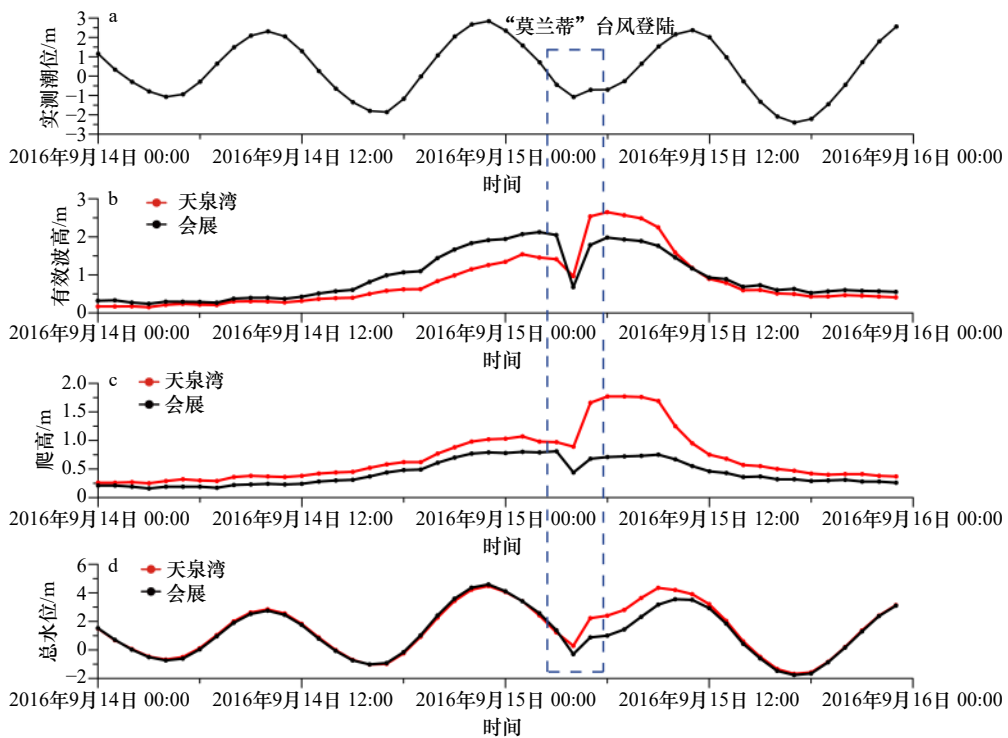


图 6 人工海滩“莫兰蒂”台风过程总水位

Fig. 6 Total water level of the artificial beach during Typhoon Meranti



图 7 “莫兰蒂”台风前后照片

Fig. 7 Photos before and after Typhoon Meranti

a, b 分别为天泉湾人工卵石滩经历台风前、后; c, d 分别为会展人工海滩经历台风前、后

a, b are photos of Tianquan Bay artificial cobble beach before and after typhoon; c, d are photos of Huizhan artificial sandy beach before and after typhoon

5 讨论

5.1 水位对海滩剖面变化的控制性作用

台风过程的大浪和增水是海滩发育和演化的重

要动力因素,可在短时间内对海滩地形地貌产生灾难性破坏^[21, 29, 47],这在弱潮和中潮海滩表现尤为明显,对于强潮海滩则不完全适用,原因是强潮海滩的大潮差限制了潮汐加浪涌高度超过阈值水平的时

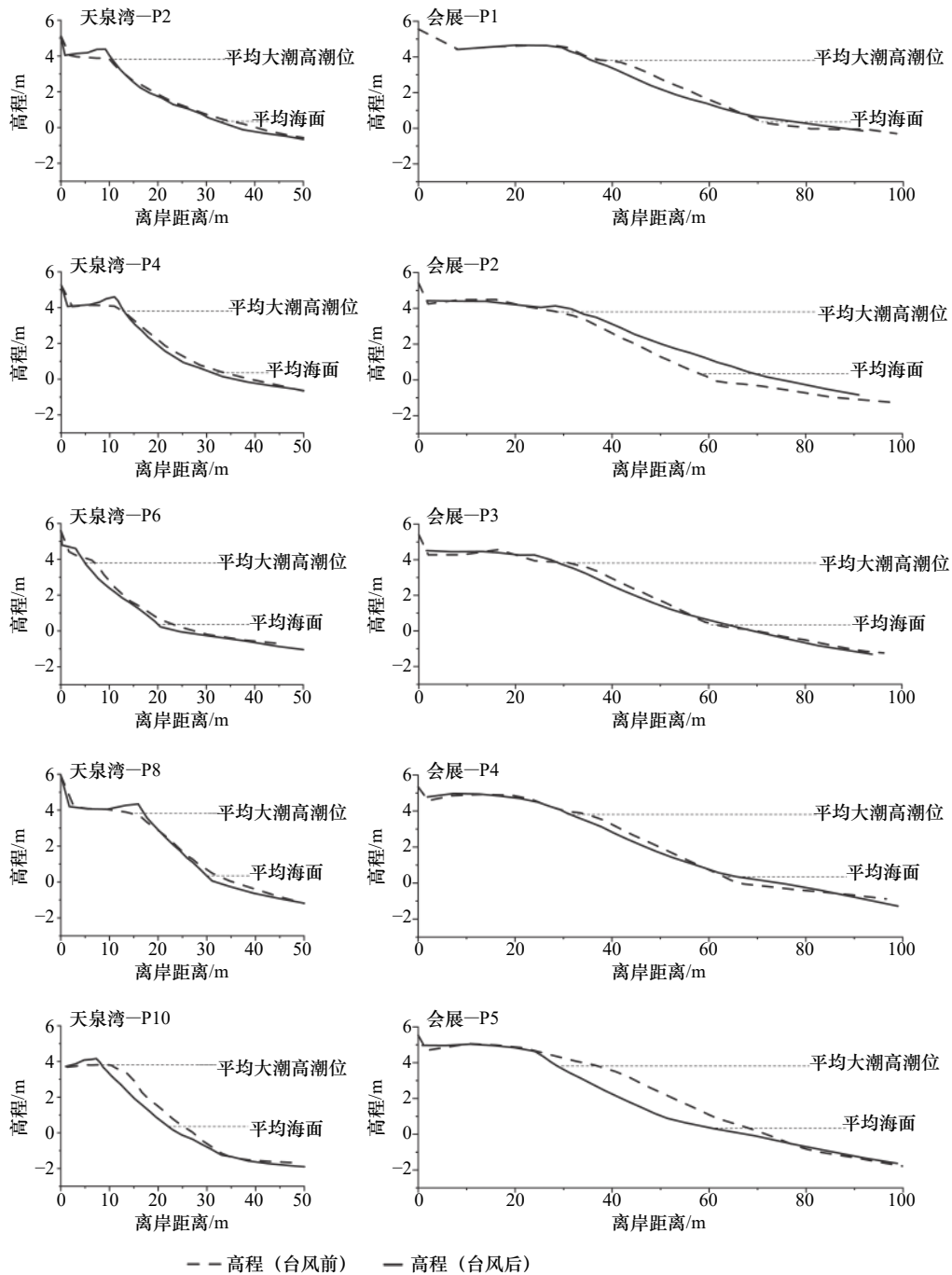


图8 典型剖面形态变化

Fig. 8 Typical profiles of the artificial cobble and sandy beach

限制了海滩侵蚀的时间,高水位的持续时间与海滩侵蚀强度有直接影响^[48-49]。厦门岛沿岸属于典型的强潮海岸,普遍发育低潮阶地型海滩^[50]。与波高相比,风暴期间的总水位更能准确地区分海滩侵蚀和淤积状态^[41,51],滩肩在台风过程中是否侵蚀与台风登陆和影响过程的总水位密切相关。“莫兰蒂”台风登陆时处于落潮近低潮时段,台风影响过程的总水位未超过人工沙滩台风前平均滩肩高度(4.74 m),没有发生冲越,滩肩高度变化很小,仅滩肩脊部受台风登陆后的

强烈向岸风影响,滩肩顶有所夷平。台风影响过程中人工卵石滩的总水位最高值虽超过台风前平均滩肩高度(4.17 m),但由于卵石向岸输移,形成更高的风暴滩肩,因此也没有产生冲越现象,两个海滩的风暴响应类型均表现为冲蚀。Qi等^[30]研究了9914台风对华南沿海低潮阶地型海滩的风暴响应特征,认为低潮阶地型海滩对风暴的响应总体表现为强烈的上部剖面改造,海滩上部发生强烈侵蚀,滩肩可能在一次风暴中侵蚀殆尽,风暴作用引起强烈的离岸输沙,海

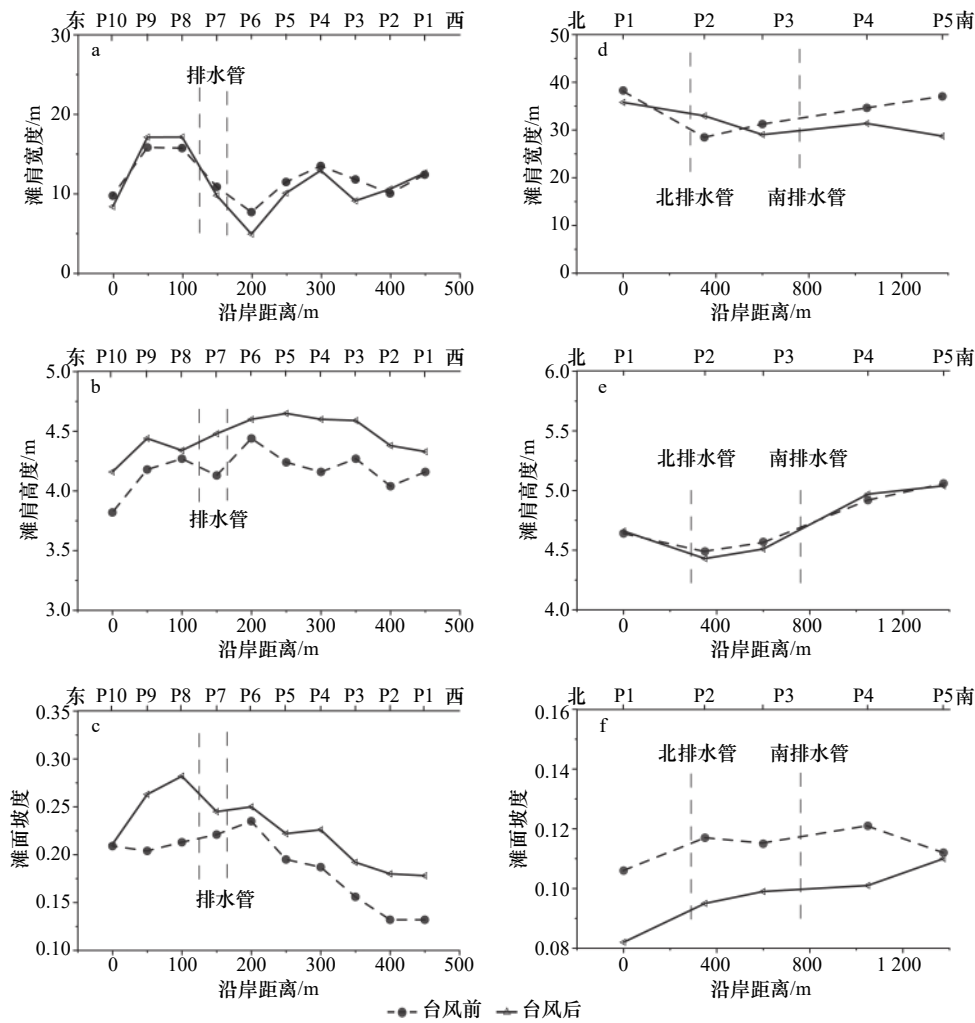


图 9 典型剖面滩肩宽度、滩肩高度、滩面坡度变化

Fig. 9 Variations of the beach berm height, width and beach slope

a, b, c. 天泉湾人工卵石滩; d, e, f. 会展人工沙滩

a, b, c. Tianquan Bay artificial cobble beach; d, e, f. Huizhan artificial sandy beach

滩坡度明显变缓。9914“丹恩”台风登陆厦门时为涨潮近高潮时段，总水位超过警戒水位，厦门岛东侧海滩滩肩侵蚀殆尽^[21, 30, 52]。

5.2 沉积物粒径对海滩风暴响应差异性的影响

此前很少有关于砾石滩的调查强调沉积物粒径是控制风暴响应的关键因素，因此，研究混合和粗粒径海滩的风暴响应更为关键，因为这些海滩的沉积物粒径变化很大，从而使分析变得复杂。研究发现，砂质海滩受到高能风暴浪作用时，一般的结果是导致大部分细粒径沉积物离岸输移，滩肩侵蚀和近岸沙坝形成，而砾石海滩则会继续保持其陡峭的剖面形态和反射型状态^[53-54]。图 11 总结了研究区不同类型人工海滩对“莫兰蒂”台风响应的特征，可以发现，粒径 5~10 cm 的人工卵石滩与平均粒径 0.5 mm 的人工沙滩对台风响应明显不同。“莫兰蒂”台风过程人工卵石

滩的总水位最高值虽然超过了台风前平均滩肩高度，但由于卵石海滩的沉积物粒径粗，孔隙率大、具有很强的渗透性和较大的摩擦阻力，卵石滩斜坡带的向岸上冲流明显大于向海回流^[15, 48]。横向上滩面大部分卵石受到高能卷破波产生的上冲流影响，不断向岸输移，滩面侵蚀，滩肩堆积，形成更高的风暴滩肩。只有少部分卵石和细粒径泥沙被回流输移向海，卵石滩坡度明显变陡，这种更高的滩肩和更陡的剖面反过来又更有效的耗散入射高能波浪。人工卵石滩的最大侵蚀深度介于平均海平面与平均大潮高潮位之间的滩面中部位置，而最大堆积高度则出现在平均大潮高潮位附近的滩肩顶外缘。而人工沙滩沉积物粒径细，风暴期间横向上出现强烈的向海输移，上部滩面侵蚀严重，下部滩面淤积，海滩坡度变缓。人工沙滩的侵蚀堆积特征与卵石滩相反，最大侵蚀深度出现在平均大

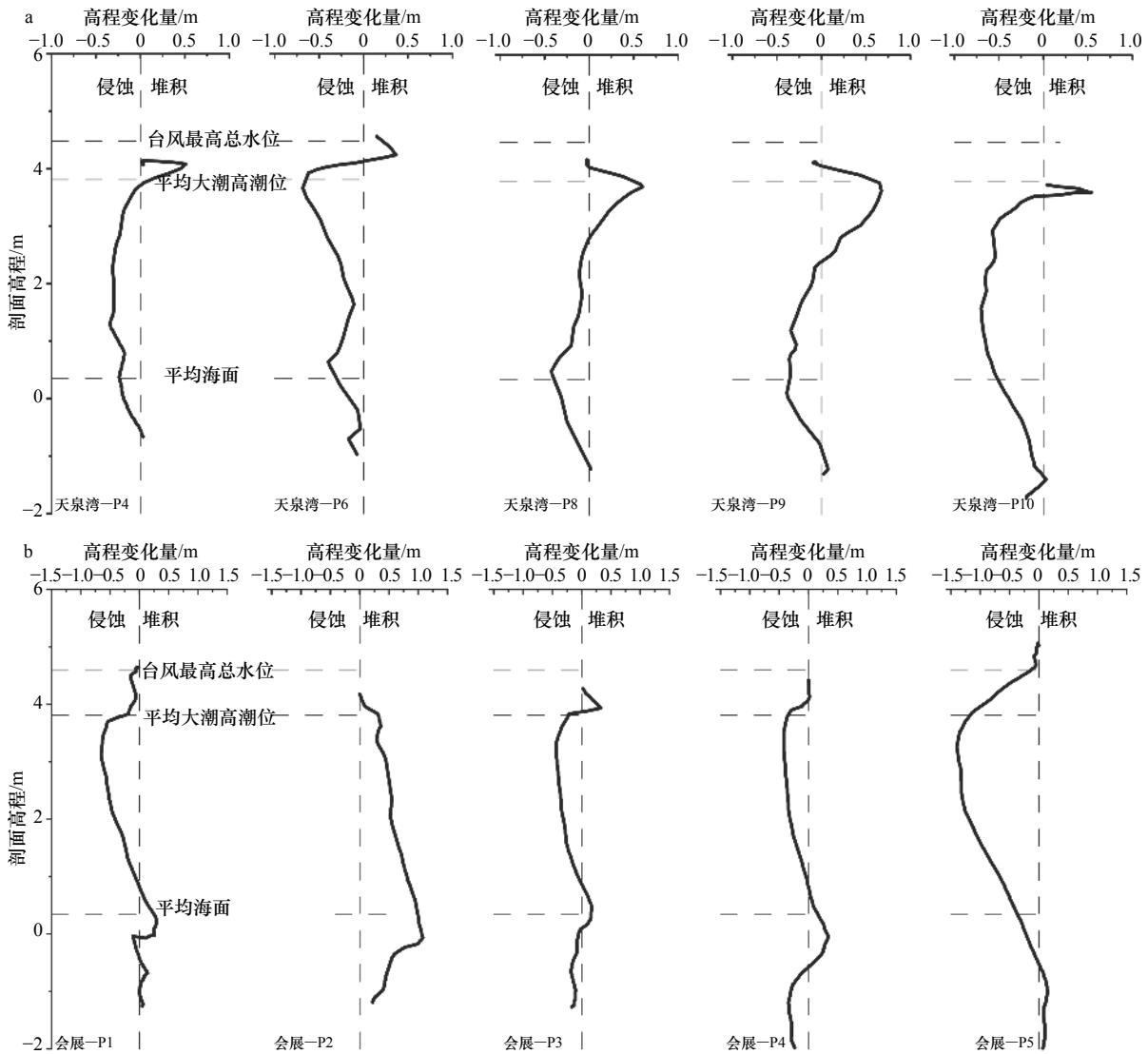


图 10 “莫兰蒂”台风过程典型剖面高程变化量
Fig. 10 Variations of typical profiles elevation during Typhoon Meranti

a. 天泉湾人工卵石滩; b. 会展人工沙滩
a. Tianquan Bay artificial cobble beach; b. Huizhan artificial sandy beach

潮高潮位偏下的上部滩面,最大堆积高度出现在平均海平面以下。这与台风过程中人工卵石滩横向上卵石向岸输移,而人工沙滩强烈的离岸输沙规律一致。

除海滩剖面横向的风暴响应特征以外,人工海滩对风暴响应的程度也与沉积物粒径密切相关。对砂质海滩而言,沉积物粒径越粗,坡度越陡,波浪反射性越强,海滩风暴响应越强烈,而坡度缓的耗散性越强,海滩在风暴作用中表现更为迟钝^[23, 55]。表 2 统计了台风过程中人工卵石滩和人工沙滩波浪能量-沉积物粒径和剖面平均变化量,结果发现人工卵石滩的剖面平均变化量小于人工沙滩。近岸波浪能量相对更强,海滩坡度相对更陡、波浪反射性更强的人工卵石滩比人工沙滩对于台风的响应程度小,这也说明卵石滩

相对于沙滩来说稳定性更好,消能作用更好,在强潮强侵蚀高能海岸采用卵、砾石等粗粒径沉积物进行海滩养护是减缓砂质海滩侵蚀的一种有效手段^[11-12, 34]。

6 结论

本文通过对强潮海岸人工卵石滩和人工沙滩台风前后的典型剖面要素特征结合台风影响过程中的水动力观测、模拟结果进行分析,得到了以下结论:

(1)人工卵石滩和人工沙滩对“莫兰蒂”台风响应的特征明显不同。天泉湾人工卵石滩滩肩高度明显增加,滩肩宽度整体变窄,滩面坡度明显变陡,剖面上凹幅度增大,剖面最大堆积高度发生在滩肩,最大侵蚀深度出现在滩面中部,海滩剖面平均变化量为 0.20 m;

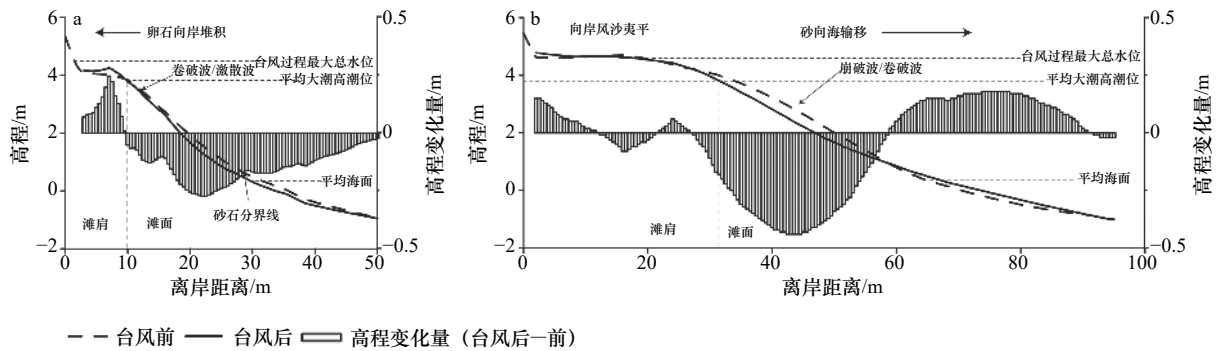


图 11 人工海滩风暴响应特征(典型剖面平均值)

Fig. 11 Storm response characteristics of artificial beaches (mean profile)

a. 人工卵石滩; b. 人工沙滩

a. Artificial cobble beach; b. artificial sandy beach

表 2 “莫兰蒂”台风过程人工海滩波浪能量-剖面变化

Tab. 2 Wave energy and variations of artificial beach profile during Typhoon Meranti

海滩	中值粒径/mm	最大波浪能量/ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$	平均波浪能量/ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$	最大剖面平均变化量/m	剖面平均变化量/m
天泉湾人工卵石滩	70	12 259	1 937	0.30	0.20
会展人工沙滩	0.5	7 097	1 820	0.46	0.28

而会展人工沙滩的滩肩高度基本没有变化,滩肩宽度平均后退 2.36 m,海滩坡度变缓,剖面形态从上陡下缓有较为明显坡折点转变为坡度较缓,剖面最大侵蚀深度发生在上部滩面,最大堆积高度出现在平均海平面以下的下部滩面,海滩剖面平均变化量为 0.28 m。

(2)强潮海岸人工海滩对风暴的响应特征、响应程度与沉积物粒径及台风过程中的总水位密切相关。人工卵石滩总水位最高值虽超过台风前平均滩肩高度,但卵石粒径粗、孔隙率大、渗透性强,向岸上冲流大于向海回流,风暴期间卵石向岸输移形成更高

的风暴滩肩,海滩坡度整体变陡,未发生冲越。而人工沙滩粒径细,总水位最高值未超过台风前平均滩肩高度,仅滩肩脊部受台风期间的强烈向岸风作用,滩肩顶有所夷平;横向上表现为强烈的沉积物离岸输运,上部滩面侵蚀严重,下部滩面淤积,海滩坡度整体变缓。台风影响过程中,波浪能量相对更强,海滩坡度相对更陡的人工卵石滩比人工沙滩在台风影响过程的剖面平均变化量小,对于风暴的响应程度更小,沉积物粒径更粗的人工卵石滩相对于粒径细的人工沙滩来说更稳定。

参考文献:

- [1] Bruun P. The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages[J]. *Journal of Coastal Research*, 1988, 4(4): 627-648.
- [2] Cai Feng, Su Xianze, Liu Jianhui, et al. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(4): 415-426.
- [3] van Rijn L C. Coastal erosion and control[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2011, 54(12): 867-887.
- [4] 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): e0118571.
- [5] Steers J A. Coastline changes: a global review by Eric C. F. Bird[J]. *Geographical Journal*, 1986, 152(1): 108.
- [6] Dixon K L, Pilkey Jr O H. Summary of beach replenishment on the U.S. Gulf of Mexico shoreline[J]. *Journal of Coastal Research*, 1991, 7(1): 249-256.
- [7] Hanson H, Brampton A, Capobianco M, et al. Beach nourishment projects, practices, and objectives—a European overview[J]. *Coastal Engineering*, 2002, 47(2): 81-111.
- [8] 迪安R G. 海滩养护: 理论与实践[M]. 蔡锋, 曹惠美, 刘建辉, 译. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [9] Dean R G. Beach Nourishment: Theory and Practice[M]. Cai Feng, Cao Huimei, Liu Jianhui, trans. Beijing: China Ocean Press, 2010.
- [10] Cai F, Dean R G, Liu J. Beach nourishment: theory and practice[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 2011, 1(32): 31.
- [10] 蔡锋, 刘建辉. 中国海滩养护技术手册[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.

- Cai Feng, Liu Jianhui. Chinese Beach Nourishment Manual[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015.
- [11] Aminti P, Cipriani L E, Pranzini E. "Back to the beach": converting seawalls into gravel beaches[M]//Goudas C, Katsiaris G, May V, et al. Soft Shore Protection. Dordrecht: Springer, 2003, 7: 261–274.
- [12] Cammelli C, Jackson N L, Nordstrom K F, et al. Assessment of a gravel nourishment project fronting a seawall at Marina di Pisa, Italy[J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 39(39): 770–775.
- [13] Bergillos R J, Rodríguez-Delgado C, Ortega-Sánchez M. Advances in management tools for modeling artificial nourishments in mixed beaches[J]. *Journal of Marine Systems*, 2017, 172: 1–13.
- [14] 于跃, 蔡锋, 张挺, 等. 人工砾石海滩变化及输移率研究[J]. *海洋工程*, 2017, 35(5): 79–87.
Yu Yue, Cai Feng, Zhang Ting, et al. Study on evolution and transport rate of artificial gravel beach[J]. *The Ocean Engineering*, 2017, 35(5): 79–87.
- [15] Austin M J, Masselink G. Infiltration and exfiltration on a steep gravel beach: implications for sediment transport[C]//Fifth International Conference on Coastal Dynamics. Barcelona, Spain: ASCE, 2005.
- [16] Pedrozo-Acuña A, Simmonds D J, Reeve D E. Wave-impact characteristics of plunging breakers acting on gravel beaches[J]. *Marine Geology*, 2008, 253(1/2): 26–35.
- [17] Haerens P, Bolle A, Trouw K, et al. Definition of storm thresholds for significant morphological change of the sandy beaches along the Belgian coastline[J]. *Geomorphology*, 2012, 143–144: 104–117.
- [18] Castelle B, Mariou V, Bujan S, et al. Impact of the winter 2013–2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: beach and dune erosion and megacusp embayments[J]. *Geomorphology*, 2015, 238: 135–148.
- [19] Masselink G, Scott T, Poate T, et al. The extreme 2013/2014 winter storms: hydrodynamic forcing and coastal response along the south-west coast of England[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(3): 378–391.
- [20] 陈子燊. 弧形海岸海滩地貌对台风大浪的响应特征[J]. *科学通报*, 1995, 40(23): 2168–2170.
Chen Zishen. The response of beach geomorphology of the arc-shaped coast to typhoon waves[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(23): 2168–2170.
- [21] 蔡锋, 苏贤泽, 杨顺良, 等. 厦门岛海滩剖面对9914号台风大浪波动力的快速响应[J]. *海洋工程*, 2002, 20(2): 85–90.
Cai Feng, Su Xianze, Yang Shunliang, et al. A rapid response to 9914 typhoon-induced storm wave force made by the beach profiles of Xiamen Island[J]. *The Ocean Engineering*, 2002, 20(2): 85–90.
- [22] 蔡锋, 苏贤泽, 夏东兴. 热带气旋前进方向两侧海滩风暴效应差异研究——以海滩对0307号台风“伊布都”的响应为例[J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(4): 436–445.
Cai Feng, Su Xianze, Xia Dongxing. Study on the difference between storm effects of beaches on two sides of the tropical cyclone track—taking the responses of beaches to No.0307 Typhoon Imbudo as an example[J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(4): 436–445.
- [23] 戚洪帅, 蔡锋, 雷刚, 等. 华南海滩风暴响应特征研究[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(9): 975–985.
Qi Hongshuai, Cai Feng, Lei Gang, et al. The response characteristics of beaches to tropical storms in South China[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(9): 975–985.
- [24] Morton R A, Sallenger Jr A H. Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 19(3): 560–573.
- [25] Houser C, Wernette P, Rentschler E, et al. Post-storm beach and dune recovery: Implications for barrier island resilience[J]. *Geomorphology*, 2015, 234: 54–63.
- [26] 邵超, 戚洪帅, 蔡锋, 等. 海滩-珊瑚礁系统风暴响应特征研究——以1409号台风“威马逊”对清澜港海岸影响为例[J]. *海洋学报*, 2016, 38(2): 121–130.
Shao Chao, Qi Hongshuai, Cai Feng, et al. Study on storm-effects on beach-coral reef system—Taking the response of Qinglangang Coast on No.1409 Typhoon Rammasun as an example[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(2): 121–130.
- [27] Burvint O, Masselink G, Russell P, et al. Classification of beach response to extreme storms[J]. *Geomorphology*, 2017, 295: 722–737.
- [28] Splinter K D, Kearney E T, Turner I L. Drivers of alongshore variable dune erosion during a storm event: observations and modelling[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 131: 31–41.
- [29] Sallenger Jr A H. Storm impact scale for barrier islands[J]. *Journal of Coastal Research*, 2000, 16(3): 890–895.
- [30] Qi Hongshuai, Cai Feng, Lei Gang, et al. The response of three main beach types to tropical storms in South China[J]. *Marine Geology*, 2010, 275(1/4): 244–254.
- [31] Masselink G, van Heteren S. Response of wave-dominated and mixed-energy barriers to storms[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 321–347.
- [32] de Alegria-Arzaburu A R, Masselink G. Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K.[J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1/4): 77–99.
- [33] Turki I, Medina R, Gonzalez M, et al. Natural variability of shoreline position: observations at three pocket beaches[J]. *Marine Geology*, 2013, 338: 76–89.
- [34] Harley M D, Andriolo U, Armaroli C, et al. Shoreline rotation and response to nourishment of a gravel embayed beach using a low-cost video monitoring technique: San Michele-Sassi Neri, Central Italy[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2014, 18(5): 551–565.

- [35] Grottole E, Bertoni D, Ciavola P. Short- and medium-term response to storms on three Mediterranean coarse-grained beaches[J]. *Geomorphology*, 2017, 295: 738–748.
- [36] Bertoni D, Sarti G, Benelli G, et al. Radio Frequency Identification (RFID) technology applied to the definition of underwater and sub-aerial coarse sediment movement[J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 228(3/4): 140–150.
- [37] Han Min, Yang D Y, Yu J, et al. Typhoon impact on a pure gravel beach as assessed through gravel movement and topographic change at Yeocha Beach, South Coast of Korea[J]. *Journal of Coastal Research*, 2017, 33(4): 889–906.
- [38] Ivamy M C, Kench P S. Hydrodynamics and morphological adjustment of a mixed sand and gravel beach, Torere, Bay of Plenty, New Zealand[J]. *Marine Geology*, 2006, 228(1/4): 137–152.
- [39] McCall R T, Masselink G, Poate T G, et al. Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 91: 231–250.
- [40] McCall R T, Masselink G, Poate T G, et al. Modelling the morphodynamics of gravel beaches during storms with XBeach-G[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 103: 52–66.
- [41] Bergillos R J, Ortega-Sánchez M, Masselink G, et al. Morpho-sedimentary dynamics of a micro-tidal mixed sand and gravel beach, Playa Granada, southern Spain[J]. *Marine Geology*, 2016, 379: 28–38.
- [42] Almeida L P, Masselink G, McCall R, et al. Storm overwash of a gravel barrier: field measurements and XBeach-G modelling[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 120: 22–35.
- [43] Elko N A, Wang Ping. Immediate profile and planform evolution of a beach nourishment project with hurricane influences[J]. *Coastal Engineering*, 2007, 54(1): 49–66.
- [44] Ojeda E, Guillén J, Ribas F. The morphodynamic responses of artificial embayed beaches to storm events[J]. *Advances in Geosciences*, 2010, 26: 99–103.
- [45] Benedet L, Stive M J F, Finkl C W, et al. Morphological impacts of hurricanes Frances and Jeanne (2004) on nourished Florida beaches[C]//Fifth International International Conference on Coastal Dynamics. Barcelona, Spain: ASCE, 2006: 1–14.
- [46] Stockdon H F, Holman R A, Howd P A, et al. Empirical parameterization of setup, swash, and runup[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(7): 573–588.
- [47] Masselink G, Russell P, Blenkinsopp C, et al. Swash zone sediment transport, step dynamics and morphological response on a gravel beach[J]. *Marine Geology*, 2010, 274(1/4): 50–68.
- [48] Austin M J, Buscombe D. Morphological change and sediment dynamics of the beach step on a macrotidal gravel beach[J]. *Marine Geology*, 2008, 249(3/4): 167–183.
- [49] Esteves L S, Brown J M, Williams J J, et al. Quantifying thresholds for significant dune erosion along the Sefton Coast, Northwest England[J]. *Geomorphology*, 2012, 143-144: 52–61.
- [50] Masselink G, Short A D. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model[J]. *Journal of Coastal Research*, 1993, 9(3): 785–800.
- [51] Bertoni D, Sarti G. On the profile evolution of three artificial pebble beaches at Marina di Pisa, Italy[J]. *Geomorphology*, 2011, 130(3/4): 244–254.
- [52] 杨顺良, 欧寿铭. 9914号台风对厦门岛东南部岸滩的环境效应[J]. *台湾海峡*, 2001, 20(1): 115–122.
Yang Shunliang, Ou Shouming. Environmental impact southeastern coast and beach of Xiamen Island during Typhoon No.9914[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2001, 20(1): 115–122.
- [53] Poate T, Masselink G, Davidson M, et al. High frequency in-situ field measurements of morphological response on a fine gravel beach during energetic wave conditions[J]. *Marine Geology*, 2013, 342: 1–13.
- [54] Herbich J B. *Handbook of Coastal Engineering*[M]. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [55] Benavente J, Gracia F J, López-Aguayo F. Empirical model of morphodynamic beachface behaviour for low-energy mesotidal environments[J]. *Marine Geology*, 2000, 167(3/4): 375–390.

Study on various response to typhoon of nourished beaches with different sediments

Shu Fangfang^{1,2}, Cai Feng², Qi Hongshuai², Liu Jianhui³, Lei Gang²

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Lab of Coastal & Marine Geology, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 3. Island Research Center, Ministry of Natural Resources, Pingtan 350400, China)

Abstract: By monitoring the typical profiles of the artificial cobble and sandy beach on Xiamen Tianquan Bay and Huizhan before and after the super Typhoon No.1614 Meranti, combined with the observation and numerical simulation of hydrodynamic factors, we calculate the wave field together with the total water level during the typhoon process, and analyze the morphology and the average variation of the profile. Results show that the characteristics of response to typhoon between artificial cobble and sandy beach on macro-tidal coast are significantly different. The majority of cobbles transported onshore, the beach face eroded while the beach berm accumulated to form a higher beach berm, and the slope of the artificial cobble beach is obviously steepened. In contract, the artificial sandy beach shows obvious sediment transport offshore, the upper beach face eroded and the lower beach face deposited, the slope of the beach face obviously become gentler, moreover the top of the beach berm become flattened due to the strong onshore wind after the typhoon landing, and the height of the beach berm almost remain unchanged. Whether the beach berm eroded during typhoon process is closely related to the total water level including astronomical tide, storm surge and wave run-up. During the process of typhoon, the artificial cobble beach characterized with higher wave energy and steeper beach slope showed less profile variation comparing to that of the artificial sandy beach. The artificial cobble beach performed a small degree of response to typhoon. Taken together, it is an effective approach of slowing sandy beach erosion by using gravels and other coarse-grained sediments for beach nourishment on strong eroded high-energy macro-tidal coasts.

Key words: macro-tidal coast; artificial cobble beach; artificial sandy beach; typhoon response