

郭俊丽, 陈沈良, 叶清华, 等. 海滩剖面对风暴事件的响应: 现场观测和数值模拟[J]. 海洋学报, 2025, 47(2): 69–84, doi:10.12284/hyxb2025015

Guo Junli, Chen Shenliang, Ye Qinghua, et al. Profile response to storm events of sandy beach: observation and modelling[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(2): 69–84, doi:10.12284/hyxb2025015

海滩剖面对风暴事件的响应: 现场观测和数值模拟

郭俊丽^{1,2}, 陈沈良³, 叶清华⁴, 常洋⁵, 时连强^{1,2*}

(1. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 2. 自然资源部海洋空间资源管理技术重点实验室, 浙江 杭州 310012; 3. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 4. 荷兰三角洲研究院, 代尔夫特 2614HV; 5. 浙江水利水电学院水利工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 频繁且严重的风暴事件影响下海滩侵蚀呈现普遍加剧的趋势, 理解风暴事件影响下的海滩剖面变化过程对于砂质海岸侵蚀防护至关重要。为厘清海滩剖面对风暴的响应特征, 本研究结合台风期间的现场观测和 XBeach 数值模型, 揭示了台风“塔巴”影响下的浙江舟山朱家尖岛东沙海滩剖面形态变化, 探讨了不同因素对于海滩风暴响应的影响。东沙海滩剖面在台风“塔巴”影响下展示出了显著的剖面上部冲刷、下部淤积的规律, 且在位于离岸 400 m 的砂-泥分界线向海一侧, 地形几乎无变化。对不同风暴情景计算发现, 有效波高控制剖面的冲淤幅度, 潮位控制冲淤的位置, 风暴波高较大时细到中砂粒径范围的不同设置造成的剖面变化差异较小, 有海滩养护时剖面变化停止点的离岸距离更远。本研究结果可为砂质海岸风暴侵蚀防护提供科学参考。

关键词: 海滩风暴响应; 剖面变化过程; 台风“塔巴”; XBeach 数值模型

中图分类号: P737.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2025)02-0069-16

1 引言

受频繁的风暴事件影响, 我国多处旅游海滩侵蚀现象凸显^[1-4], 掌握风暴作用下海滩动力地貌演变特征对海滩资源保护至关重要。海滩剖面变化过程可以反映海滩动力地貌的演化模式。风暴事件带来的水动力突然变化是短时间尺度海滩剖面变化的主要驱动力^[5-8], 风暴期间波浪、潮汐等多种海岸动力因素均可能作用于海滩, 且它们会频繁地相互作用, 进而改造海滩极端高潮位和低潮位之间的地貌形态^[9]。海滩剖面形态取决于不同波浪强度和潮汐、潮流结合作用下沉积物的沉积、保存和运输^[10]。除了上述近岸动力作用, 为弥补风暴侵蚀进行的海滩养护也可瞬间改变海滩剖面的形态, 进而影响其变化过程和近岸动

力^[11-12]。海滩对风暴的响应是多种因素共同作用的结果, 很难甄别或剥离某一种因素的影响^[8]。

海滩动力地貌演变研究需要考虑海滩及近岸沉积物运输的连通性^[13], 最近的研究也表明风暴条件下海滩及近岸沉积物横向运输可以超出岬角范围^[14], 这使得近岸稳定的剖面部分变得活跃, 在分析风暴影响下的海滩剖面变化时也需要考虑近岸水下部分。而风暴条件下现场测量困难, 尤其是近岸水下地形的获取。XBeach 数值模型是研究风暴作用下海滩动力地貌演变的最常用手段^[15-16], 不仅可以对多种影响因素进行分析, 还可以弥补部分现场观测数据的缺失。

为应对风暴侵蚀, 部分侵蚀海滩有海滩养护工程实施^[17-18]。多重因素影响下, 海滩地貌形态对风暴事件的响应更为复杂。因此, 本文以常受不同季节风暴

收稿日期: 2024-08-21; 修订日期: 2024-12-28。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3106201); 浙江省自然科学基金资助项目(ZCLQN25D0601); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(JG2315, XRJH2309); 浙江省自然科学基金联合基金重点项目(LHZ22D060001)。

作者简介: 郭俊丽(1994—), 女, 河南省开封市人, 博士, 从事海滩动力地貌研究。E-mail: guojl@sio.org.cn

* **通信作者:** 时连强, 教授级高级工程师, 主要从事海岸动力地貌过程研究。Email: lqshi@sio.org.cn

影响且有海滩养护实施的浙江舟山东沙海滩为例,结合现场观测和数值模拟研究海滩剖面对风暴事件的复杂响应,探讨海滩剖面形态变化的控制因素,进而为砂质海岸侵蚀防护提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区域

东沙海滩位于浙江省舟山市朱家尖岛东部海岸,全长约 1 500 m,岬角长度约 1 350 m(图 1b)。该海滩坡度介于 2.90% 至 3.50% 之间,北部剖面坡度较陡,而南部则较平坦。海滩沉积物中值粒径 (D_{50}) 在 0.15 mm 至 0.38 mm(细砂到中砂)之间,海滩离岸向海延伸约 400 m 处存在砂-泥分界线^[19]。东沙海滩近岸波浪属于低到中等波能,年平均有效波高约 0.82 m,主波向主要为 E 向,波高较大的波浪主要介于 E 和 SE 之间^[17]。朱家尖岛近岸海域潮汐属于不正规浅海半日潮类型,并且有显著的日不等现象^[20],年平均潮差 2.60 m^[21]。2012 年以前海滩后滨存在沙丘,而 2012 年海堤的全线建成打破了海滩上沉积物横向运输的平衡,进而导致沙丘消失^[22],海堤的建设和频繁的风暴使得东沙海滩长期处于侵蚀状态^[3]。为弥补风暴侵蚀和扩大海滩干滩面积,2016 年 9 月管理部门开始在东沙海滩实施养护项目。时间间隔短、规模小以及投放位置局限是东沙海滩实施海滩养护的主要特点。海滩管理部门在 2016 年和 2017 年之间共开展

了 10 次海滩养护,补砂总量约 52 000 m³^[17]。养护砂主要投放在海滩中部和南部方便运输的位置,所有的养护项目都采用相同的操作方式和沉积物(与该海滩沉积物具有相似的特征)。

2.2 数据获取与处理

2.2.1 台风“塔巴”移动特征

在研究时间段内,东沙海滩受到了台风“塔巴”的影响(移动路径如图 1a 所示)。2019 年第 17 号台风“塔巴”,9 月 18 日 23 时在西北太平洋(22.20°N, 130°E)生成,生成时中心最大风速为 15 m/s,向西移动,升级至热带风暴后向北西北方向移动,9 月 20 日 14 时升级为强热带风暴(风速 25~30 m/s)以 25 km/h 的速度向北西北方向移动,期间强度保持不变。9 月 21 日 8 时,强度升格为台风且风速增长至 33 m/s 持续至 9 月 22 日 9 时,9 月 21 日 11 时至 9 月 22 日 5 时对该研究区域产生影响,9 月 23 日 8 时消亡(台风信息获取自: <http://typhoon.nmc.cn/web.html>)。

2.2.2 海滩实测剖面地形

本研究使用 RTK GPS(中海达)进行剖面地形测量,测量日期为自 2019 年 9 月 17 日至 9 月 25 日(9 月 21 日台风影响极值期无法观测),每天测量 30 条剖面,共计 240 条剖面。Shi 等^[23]已基于 30 条剖面分析了台风“塔巴”对东沙海滩的总体冲淤影响,因此本文选取足以代表东沙海滩对风暴的响应特征的代表性剖面 DS05、DS11、DS17、DS22、DS26 和 DS30^[23-24](图 1b),

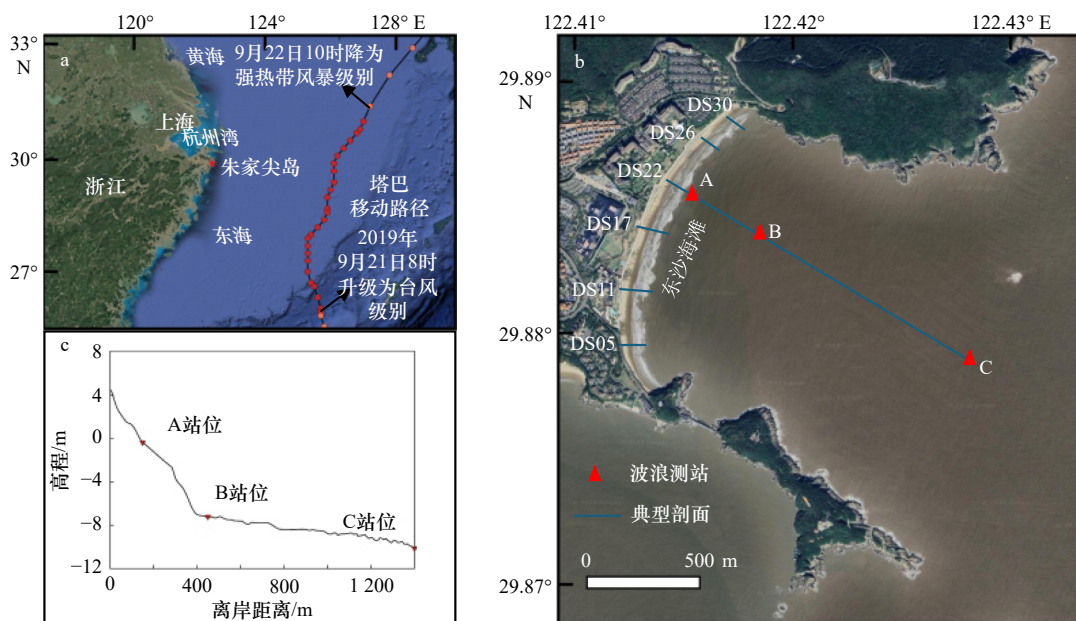


图 1 研究区域及台风“塔巴”移动路径(a)、典型剖面设置和波浪观测站位(b)及模型地形输入(c)

Fig. 1 Study area and the sketch of the route of typhoon Tapah (a), the typical profile settings and the wave observation station (b), and the model topo-bathymetry input (c)

(a)和(b)中底图获取自谷歌遥感影像

The background maps in (a) and (b) are from Google satellite images

对台风“塔巴”前后的变化进行分析。岸滩地形每次在低潮时利用 RTK GPS 连接基站 (Continuously Operating Reference Stations, CORS) 对剖面位置追踪固定测量 (水平和垂向精度分别为 ± 8 mm 和 ± 15 mm), 获得原始数据后均校正至 1985 黄海高程基准。根据 Burvintg 等^[25] 提出的方法计算海滩剖面单宽体积, 计算时以台风前 2019 年 9 月 17 日的第一次测量为基准。除了岸滩地形, 近岸水下地形于 2019 年 8 月 31 日用双频测深仪 (Echo, 美国) 测得, 双频测深仪数据获得后利用收集到的 2019 年海图数据进行验证, 通过验证后将所有地形数据校正至 1985 黄海高程。融合 2019 年 8 月 31 日校正后的水下地形与 2019 年 9 月 17 日的岸滩地形, 用于 XBeach 模型的地形输入条件。

2.2.3 近岸水动力

本研究在 2019 年 9 月 12 日至 25 日在东沙海滩近岸进行了连续座底水文观测, 共获取包括大、小潮在内约 12 个潮周期的数据, 站位布设如图 1b 所示。获取的数据主要用于台风前、台风影响期间以及台风后东沙海滩近岸波浪的阐述以及 XBeach 模型的波浪输入与验证。A、B 和 C 站位位于地形剖面 DS22 的水下延伸剖面上, 离岸距离分别为 150 m、450 m 和 1 400 m, 所对应的 1985 黄海基准高程分别为 -0.50 m、 -7 m 和 -10.30 m (图 1c)。测量仪器主要包括浪潮仪 (RBR, RBR Ltd.) 和波浪浮球。A 站位为棱锥形四脚架搭载 1 台 RBR-2050, 仪器探头设置在距底 0.50 m 处。RBR-2050 用来测量波高、周期以及水深, 以 4 Hz 的采样频率每 20 min 连续工作 256 s。B 站位为砂-泥分界线 (SMT) 所在位置附近, 三脚架搭载有 1 台 RBR, 距地 0.50 m, 测量设置与 A 站位一致。C 站位采用波浪浮球测量波浪参数, 与 A 和 B 站位不同的是, C 站位可测得波向要素。为保证测量同步, 所有仪器均在投放前进行调试设置。此外, A 站位因所处位置高程为 -0.50 m, 且仪器高度为距底 0.50 m, 在大潮低潮时因仪器出露水面而出现数据间断。

2.2.4 XBeach 模型输入及验证

鉴于 XBeach 的非静水模式下的“Surfbeat”模式用于消散型海滩激浪带形态变化研究时非常有效, 因此在本研究中采用该模式进行计算。虽然在 XBeach-1D 设置中沿岸梯度会被忽略, 计算范围也仅为一条剖面, 但已有研究显示波浪直接入射对海滩造成的侵蚀最大, 因此本文以 XBeach-1D 进行模拟可以很好地反映海滩在风暴影响下的海滩地形地貌变化。同时, 当模拟不同因素对海滩剖面形态变化的影响时, XBeach-1D 中的剖面计算可以更精细地模拟离岸方

向上不同位置的变化。本研究以水文观测站点所在的东沙海滩 DS22 剖面地形为输入条件, 以海堤脚为起始点向海延伸至离岸 1 400 m (图 1b 和 c, 水文观测站位 C 所处位置)。XBeach-1D 模式采用一维网格, 所输入的网格分辨率为 1 m, 模型的波浪边界条件以 C 站位的波浪实测数据输入, 潮边界以海洋站获得的实测潮位时间序列数据输入。

利用模型结果分析海滩变化之前, 首先要验证模型的准确性。Warner 等^[26] 提出利用 Skill 指标来判断:

$$\text{Skill} = 1 - \frac{\sum (|X_{\text{model}} - X_{\text{obs}}|)^2}{\sum (|X_{\text{model}} - \bar{X}_{\text{obs}}| + |X_{\text{obs}} - \bar{X}_{\text{obs}}|)^2}, \quad (1)$$

同时, 本研究还计算数值模拟结果相对于实测数据的均方根误差:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (X_{\text{model}} - X_{\text{obs}})^2}{N}}. \quad (2)$$

在上述公式中, X_{model} 和 X_{obs} 分别为模拟时间范围内的模型结果和实测数据, N 为数据统计个数。Skill 值 1 为代表模拟结果与实测完全吻合, 该值为 0 则代表完全不符。

因 XBeach-1D 以剖面 DS22 为基础进行, 所得有效波高结果仅涵盖 DS22 剖面及水下延长部分 (测站 A、B 及 C 所在剖面), 因此在对 XBeach-1D 模拟结果进行验证时用 A 站和 B 站实测数据进行验证。将 XBeach-1D 数值模拟结果与 A 和 B 站有效波高的实测数据对比 (图 2), 可以看出模型对于台风“塔巴”造

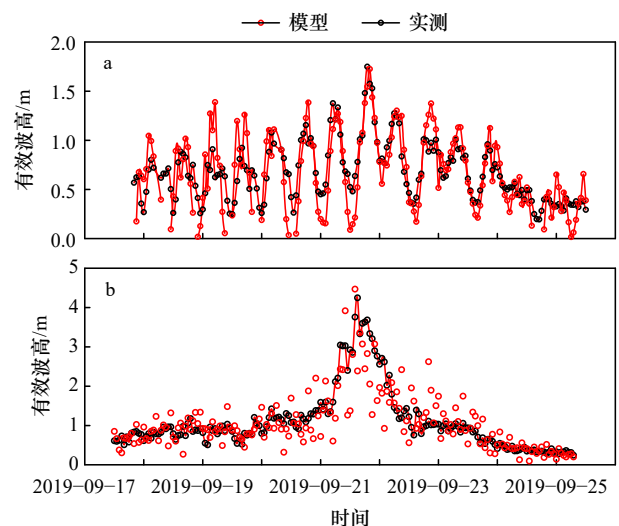


图 2 XBeach-1D 模拟的东沙海滩近岸有效波高在台风“塔巴”影响期间及前后的验证

Fig. 2 Comparison of significant wave heights from XBeach-1D model outputs and the observed data

A 站位 (a) 和 B 站位 (b)
Station A (a) and Station B (b)

成的风暴波高的模拟与真实情况基本相符,可以将模拟结果用于分析台风“塔巴”影响期间的东沙海滩剖面地形变化。同时,根据公式(1)和(2)可计算本研究数值模拟的 Skill 值和均方根误差,结果表明 A 站和 B 站有效波高模拟的 Skill 值为 0.85 和 0.88,均方根误差分别为 0.25 m 和 0.49 m。

图 3 展示了 XBeach-1D 模拟的 DS22 剖面地形与

实测数据对比验证。因 2019 年 9 月 21 日东沙海滩所在景区因台风天气关闭故未获得当日地形数据。通过计算可得模拟的剖面地形 Skill 平均值为 0.99(表 1),之后又计算了模拟的地形均方根误差平均在 0.03 m,相对误差为 11.67%,结果表明 XBeach-1D 模拟所得地形结果较好,因此可以用来进行台风“塔巴”对东沙海滩的影响及不同情景下的模拟计算。

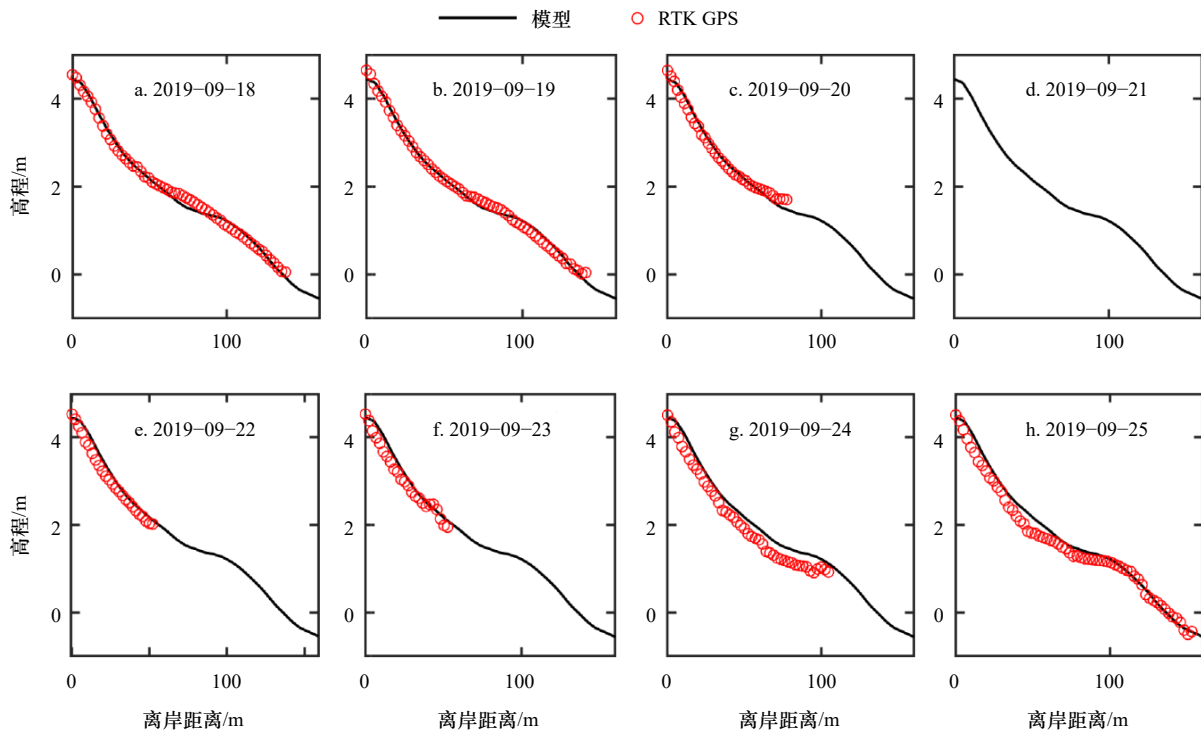


图 3 XBeach-1D 模拟的东沙海滩 DS22 剖面在台风“塔巴”影响期间及前后的地形验证

Fig. 3 Validation of DS22 profile morphology on Dongsha beach calculated by XBeach-1D before, during, and after typhoon Tapah

表 1 XBeach-1D 模拟东沙海滩剖面与实测剖面地形结果
计算所得 Skill 值和均方根误差

Table 1 Skill and RMSE of the calculated results from XBeach-1D compared with the observed profile topography

模型计算日期	Skill 值	均方根误差/m
2019-09-18	0.998	0.009
2019-09-19	0.999	0.007
2019-09-20	0.996	0.013
2019-09-22	0.985	0.042
2019-09-23	0.981	0.035
2019-09-24	0.982	0.080
2019-09-25	0.994	0.040
平均	0.991	0.032

注: Skill 值指示了模型结果和实测数据的吻合程度。Skill 值为 1 代表模拟结果与实测完全吻合,值为 0 则代表完全不符。

2.2.5 不同风暴情景模拟设置及分析

前人针对东沙海滩的研究中发现风暴期间的波高、潮位、沉积物粒径、海滩养护实施等因素均可对海滩风暴响应特征产生影响^[3, 17, 23],基于此,本研究通过多种情景设置探讨这些因素对风暴条件下海滩剖面形态变化的影响,具体见表 2。根据 Bocotti 提出的海洋风暴事件定义,当有效波高持续超过 1.5 倍年平均有效波高 12 h 以上则可判定为风暴事件^[27],因此本研究风暴情景模拟时长均设置为 12 h(43 200 s)。不考虑海滩养护的所有剖面均采用 2019 年 9 月 17 日测得的实测剖面为初始地形,不考虑粒径影响的案例沉积物中值粒径均设为 0.20 mm。

对照组一为有效波高组,根据前人统计的对东沙有影响的台风引起的风暴有效波高情况,本研究中设置 2 m、3 m、4 m 和 5 m(更极端)这几种情况。此外,考虑到不同潮位结合台风影响使得海滩滩面高程展

表 2 基于 XBeach-1D 的海滩动力地貌过程数值模拟的不同情景设置

Table 2 Case settings of the XBeach-1D beach morphodynamic simulation

对照组	案例	有效波高/m	潮位/m	D_{50} /mm	养护沉积物投放离岸距离/m	养护沉积物增加高程/m
一、有效波高组	1	2	2.50	0.20	/	/
	2	3	2.50	0.20	/	/
	3	4	2.50	0.20	/	/
	4	5	2.50	0.20	/	/
	5	2	0.50	0.20	/	/
	6	3	0.50	0.20	/	/
	7	4	0.50	0.20	/	/
	8	5	0.50	0.20	/	/
二、潮位组	9	4	0.50	0.20	/	/
	10	4	1.50	0.20	/	/
	11	4	2.50	0.20	/	/
	12	4	3.50	0.20	/	/
	13	2	0.50	0.20	/	/
	14	2	1.50	0.20	/	/
	15	2	2.50	0.20	/	/
	16	2	3.50	0.20	/	/
三、沉积物粒径组	17	4	2.50	0.10	/	/
	18	4	2.50	0.20	/	/
	19	4	2.50	0.30	/	/
	20	4	2.50	0.40	/	/
	21	4	0.50	0.10	/	/
	22	4	0.50	0.20	/	/
	23	4	0.50	0.30	/	/
	24	4	0.50	0.40	/	/
四、海滩养护组	25	4	2.50	0.20	/	/
	26	4	2.50	0.20	50	1
	27	4	2.50	0.20	100	1
	28	4	2.50	0.20	150	1
	29	4	2.50	0.20	/	/
	30	4	2.50	0.40	50	1
	31	4	2.50	0.40	100	1
	32	4	2.50	0.40	150	1

注: D_{50} 是沉积物中值粒径。

现出了变化差异^[23],在波高对照组中又分为不同有效波高的风暴结合较高潮位(2.50 m)的情况和不同有效波高的风暴结合较低潮位(0.50 m)的情况。对照组二主要针对潮位对海滩剖面变化的影响进行分析,共设置 8 个案例。基于东沙海滩已有研究^[3, 17, 23]及本文的实测结果,0.50 m 为干滩部分的最低高程值,2.50 m 为台风“塔巴”期间潮位的最高值。这里对不同潮位、相同有效波高的风暴作用下海滩剖面地形的变化进行分析,潮位的情况分为 0.50 m、1.50 m、2.50 m 和 3.50 m。在潮位对照组中又分为 4 m 有效波高和 2 m 有效波高的风暴情况。对照组三针对不同沉积物粒径的影响,通过控制潮位的高低来分析其对不同粒径(细砂到中砂范围)海滩剖面的影响,以应对有效波高 4 m 的强风暴事件为例进行探讨。对照组四则考虑海滩养护对风暴作用下剖面形态变化的影响,由于东沙海滩养护沉积物投放仅涉及滩面补砂,沉积物投放空间位置局限且集中^[17],故本研究根据东沙海滩的实际情况设定无补砂以及在离岸 50 m、100 m 和 150 m 处补砂这几种情况,养护具体设置分别为在初始剖面上离岸 50~60 m、100~110 m 和 150~160 m 范围高程增加 1 m。东沙海滩养护时使用的是与海滩固有沉积物特征相同的沉积物,而养护沉积物粒径也可能对海滩剖面形态产生影响,故在此组中又分为养护沉积物粒径设为 $D_{50}=0.20$ mm 和稍粗的 $D_{50}=0.40$ mm。海滩养护组中所有案例风暴条件均设定为 4 m 有效波高结合 2.50 m 潮位。未提及的参数设定均采用模型默认设定。

获得模拟结果后,以初始剖面为基准计算不同案例剖面的最大淤积厚度、最大侵蚀厚度、高程平均变化量^[4]以及剖面变化停止点离岸距离(高程开始无变化的点距离剖面起始点的距离),单位均为 m,之后根据上述参数分析剖面形态变化。

3 结果

3.1 台风“塔巴”影响期间近岸水深与波高变化

在约 12 个潮周期内,东沙海滩近岸经历了大潮到小潮的完整过程。B 站位观测到的水深(图 4)平均值在 8.11 m,最大值为 9.61 m(2019-09-14 21:00,大潮高潮时),最小值为 6.14 m(2019-09-15 16:00,大潮低潮时)。大潮时的平均水深为 8.14 m,小潮时的平均水深为 8.35 m。通常情况下,大潮时的高潮位会高于小潮时的高潮位,而在台风“塔巴”影响下,2019 年 9 月 21 日之后水位有明显抬升,随后小潮的高潮位整体增高,水深最大值为 9.60 m,甚至接近大潮时的高

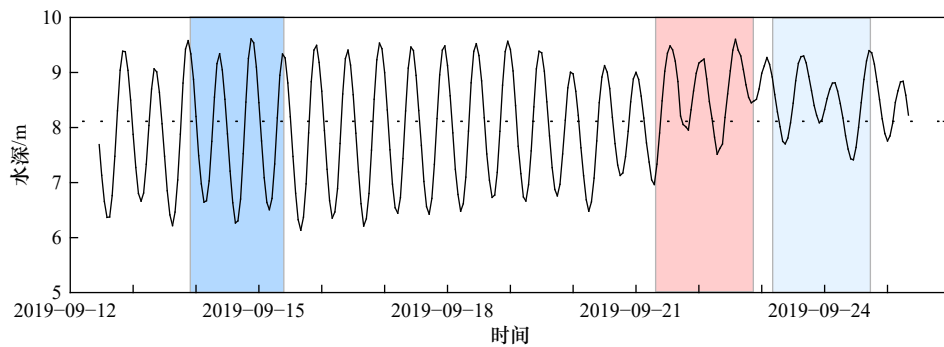


图 4 东沙海滩近岸 B 站位测得的水深随时间的变化

Fig. 4 Temporal variation of depth in the nearshore of Dongsha beach obtained from Station B

图中深蓝色和浅蓝色阴影分别为大潮和小潮时间范围, 红色阴影区为台风影响时间范围

The dark blue and light blue shadow areas show the time span of spring tide and the neap tide, respectively. The red shadow area shows the time span when typhoon affected the study area

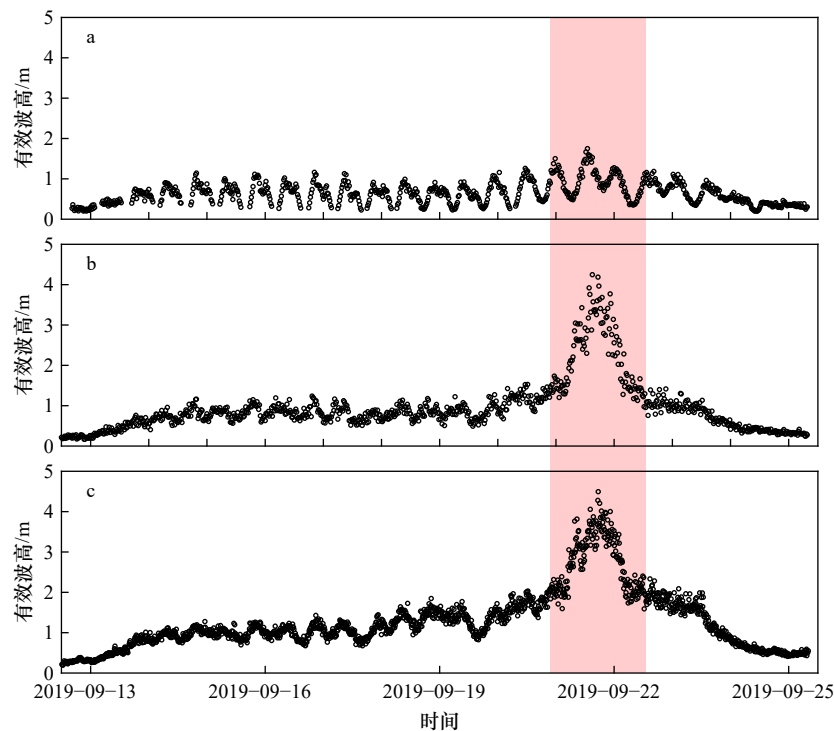


图 5 大-小潮周期内东沙海滩近岸有效波高随时间的变化

Fig. 5 The temporal variation of the significant wave heights in the nearshore of Dongsha beach during a spring-neap cycle obtained from different stations

测站 A(a), 测站 B(b) 和测站 C(c); 红色阴影区域为台风影响时间范围

Station A (a), Station B (b), Station C (c). The red shadow area shows the time span when typhoon affected the study area

潮位, 东沙海滩近岸出现显著增水。

图 5 展示了 A、B 和 C 站位获得的有效波高随时间的变化, 台风“塔巴”造成显著风暴浪, 平均水深 11 m 的 C 站位在台风极值期的有效波高达 4.49 m, 平均水深 8.11 m 的 B 站位测得的有效波高也达到 4.25 m。平均水深 1.78 m 的 A 站有效波高最大也达到 1.75 m。由此可见, 有效波高的突然增大与水深的数值增大同步, 具有较好的关联。台风“塔巴”期间的主波向为 E 向 (占比 26%), 其次是 ESE 向 (占比 21%), 主要入

射波均可对海滩产生正面冲击, 势必对海滩地形造成较大影响。在没有台风影响的情况下, B 站位获得的大潮时海滩近岸有效波高平均值为 0.74 m, 台风后的小潮时有效波高平均值为 0.40 m。台风极值过后虽然近岸水位显著抬升, 但有效波高随着台风影响的消失在 2019 年 9 月 25 日就降至常年平均有效波高^[21] 左右。

3.2 台风“塔巴”影响下的海滩剖面变化

3.2.1 实测剖面形态变化

台风“塔巴”影响东沙海滩时已处于 2019 年台风

表3 台风“塔巴”影响下东沙海滩剖面体积变化 (m^3/m)Table 3 Profile volumetric changes of Dongsha beach under the impact of typhoon Tapah (m^3/m)

典型剖面	剖面单宽体积总变化	2.50 m高程以上的单宽体积变化	2.50 m高程以下的单宽体积变化
DS05	-27.56	-3.66	-23.90
DS11	-36.48	-4.39	-32.09
DS17	-21.15	-2.25	-18.90
DS22	-13.30	-2.59	-10.71
DS26	-1.51	-6.10	4.59
DS30	-11.47	-2.88	-8.59
平均	-18.58	-3.65	-14.93

注: 2.50 m高程为通常情况下潮位能达到的最高位置。

季晚期, 海滩剖面形态经过台风季强水动力的作用形

态表现为单一的平缓斜坡形式。在台风“塔巴”的影响下, 东沙海滩平均单宽体积变化 $-18.58 \text{ m}^3/\text{m}$ (表3), 出露滩面整体表现为侵蚀。图6展示了台风“塔巴”影响前后6个典型剖面的形态变化: 海滩南部剖面(DS05、DS11)和中部剖面(DS17、DS22)主要表现为在离岸0~20 m范围内(2.50 m高程以上部分, 表3)略微侵蚀或保持不变, 离岸20~140 m之间(2.5 m高程以下)主要表现为侵蚀; 海滩北部出露剖面(DS26、DS30)在台风“塔巴”影响下未表现出显著侵蚀, 剖面变化小。6个典型剖面在台风影响下的单宽体积变化由南至北依次为: $-27.56 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-36.48 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-21.15 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-13.3 \text{ m}^3/\text{m}$ 、 $-1.51 \text{ m}^3/\text{m}$ 和 $-11.47 \text{ m}^3/\text{m}$ 。从沿岸冲淤特征来看, 海滩南部与中部剖面侵蚀显著, 北部仅略微侵蚀。现场实测数据只能监测到离岸0~150 m范围内的剖面形态变化, 因此未能观测

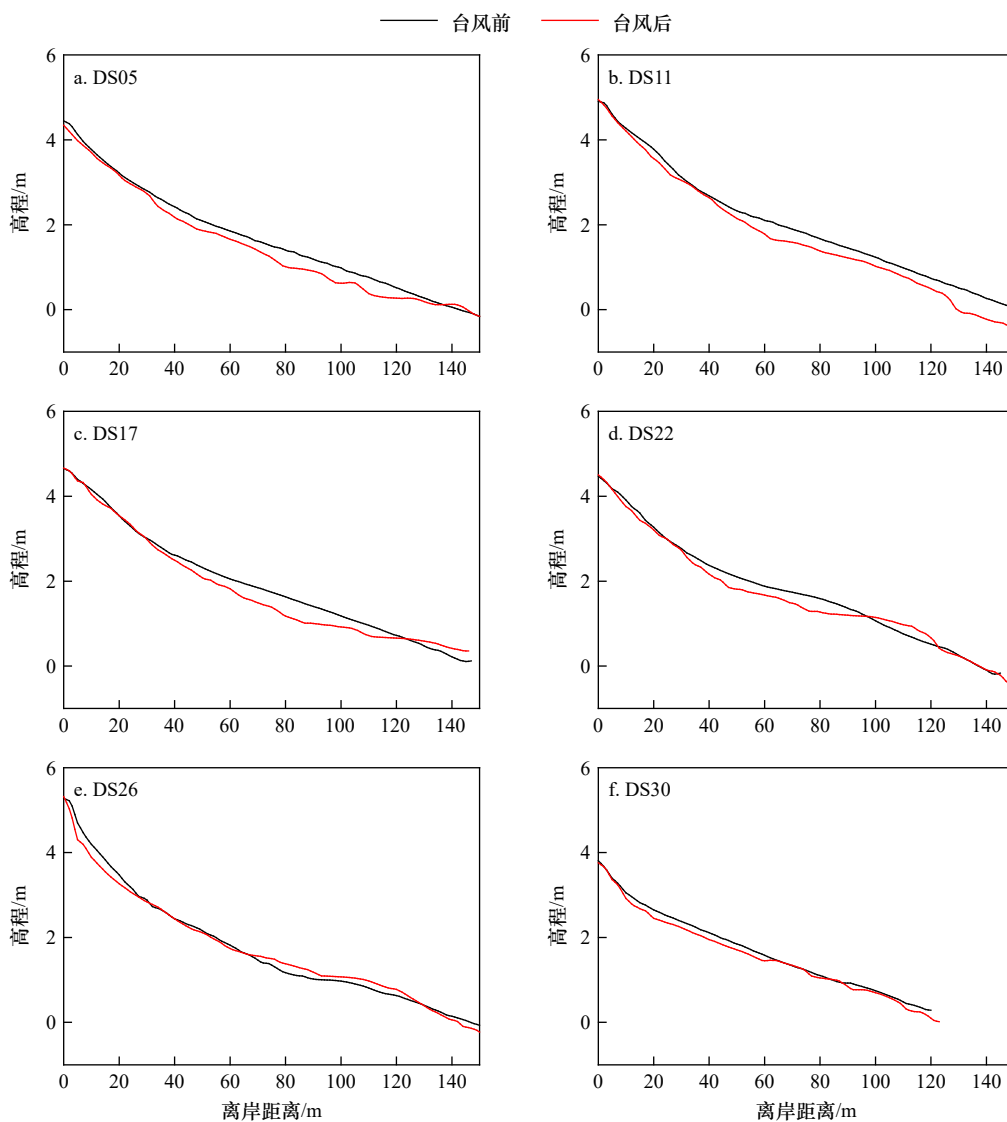


图6 台风“塔巴”影响下的东沙海滩典型剖面变化

Fig. 6 Typical profile changes of Dongsha beach under the impact of typhoon Tapah

到海滩剖面的完整上冲下淤特征,但大部分剖面都表现出在120~150 m之后淤积的趋势。

3.2.2 XBeach-1D 模拟剖面形态变化

台风“塔巴”影响下的东沙海滩剖面变化模拟以2019年9月17日的地形为输入,共进行了为期193 h (694 800 s)的模拟计算,结果如图7所示。在离岸0~20 m范围内,剖面形态几乎无变化。在离岸21~120 m之间,剖面变化主要表现为侵蚀,其中台风极值过后(2019年9月22日)的剖面形态变化最为显著。剖面在离岸121~260 m表现为淤积,坡度更大的

的261~400 m段则出现似为顺坡趋势的侵蚀-淤积波动,在400~1 400 m之间则基本保持不变。剖面侵蚀在2019年9月25日达到最大值(-0.90 m),剖面上部呈现随时间增加不断下蚀的累积趋势。实测数据仅覆盖出露的剖面,而XBeach-1D模拟结果可计算至离岸1 400 m。由图7可知,在台风“塔巴”影响下,东沙海滩剖面在高潮位和低潮位之间的部分最为活跃,以平均海平面为界上部冲刷、下部淤积,剖面地形变化在砂-泥分界线处停止。

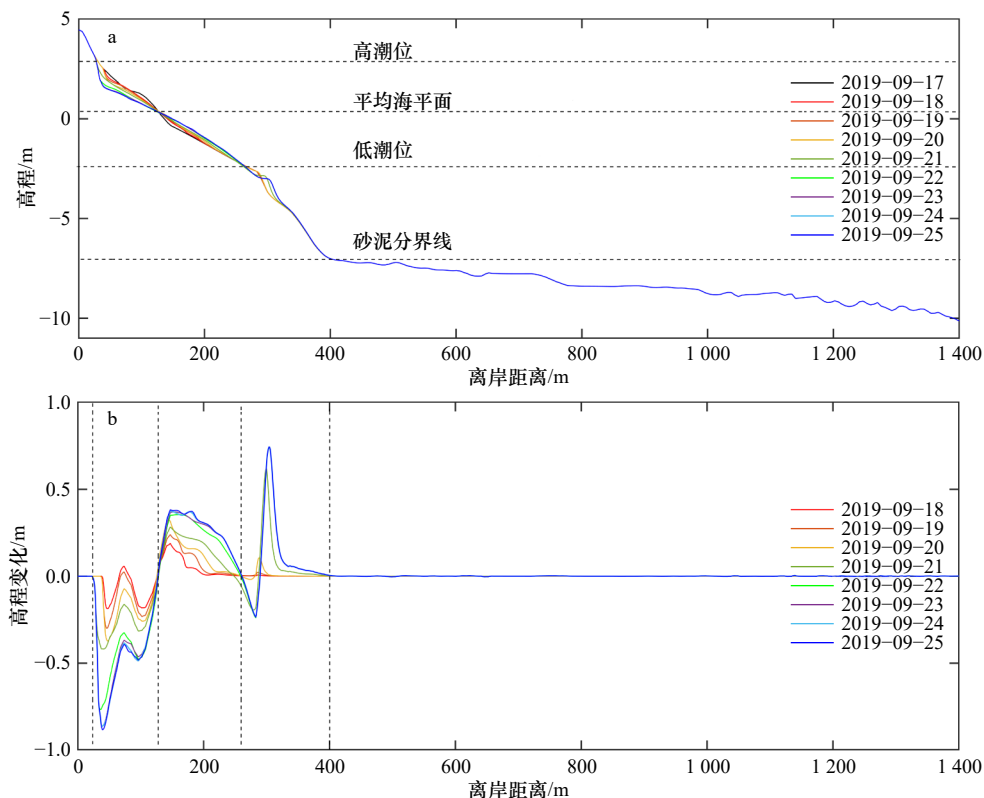


图7 XBeach-1D 模拟所得台风“塔巴”影响下的DS22剖面形态变化(a)及以2019年9月17日初始剖面为起算基准的剖面在离岸方向上的高程变化(b)

Fig. 7 Changes of Profile DS22 of Dongsha beach under the impact of typhoon Tapah calculated by XBeach-1D (a) and the cross-shore elevation change compared with the profile on 17 September, 2019 (b)

3.3 基于数值模拟的不同风暴情景下海滩剖面形态变化

对不同风暴有效波高的情景分析发现,有效波高的大小影响海滩剖面的变化幅度,有效波高越大,剖面高程的冲、淤幅度越大。不同有效波高的风暴与较高潮位(2.50 m)结合时(图8),4个案例所有剖面变化均表现为离岸0~120 m范围内侵蚀,离岸120~400 m范围内淤积,地形的变化几乎都在离岸400 m左右停止。当不同有效波高的风暴与较低潮位(0.50 m)结合时,4个案例剖面的冲淤位置发生变化,均表现

为离岸21~150 m范围内侵蚀,离岸151~400 m范围内淤积,地形的变化表现为在离岸398~416 m之间停止。最大侵蚀、最大淤积厚度、平均剖面变化以及地形变化停止点距离均随着风暴有效波高的增加而增加。

不同潮位结合同等级风暴的模拟结果显示,潮位的高低控制海滩剖面上冲、淤的位置,同等风暴波高条件下潮位低时海滩剖面的冲刷位置出现在剖面上较低的位置,且冲刷程度较大。不同潮位结合较强风暴的案例9~12所有剖面均表现为离岸0~150 m范

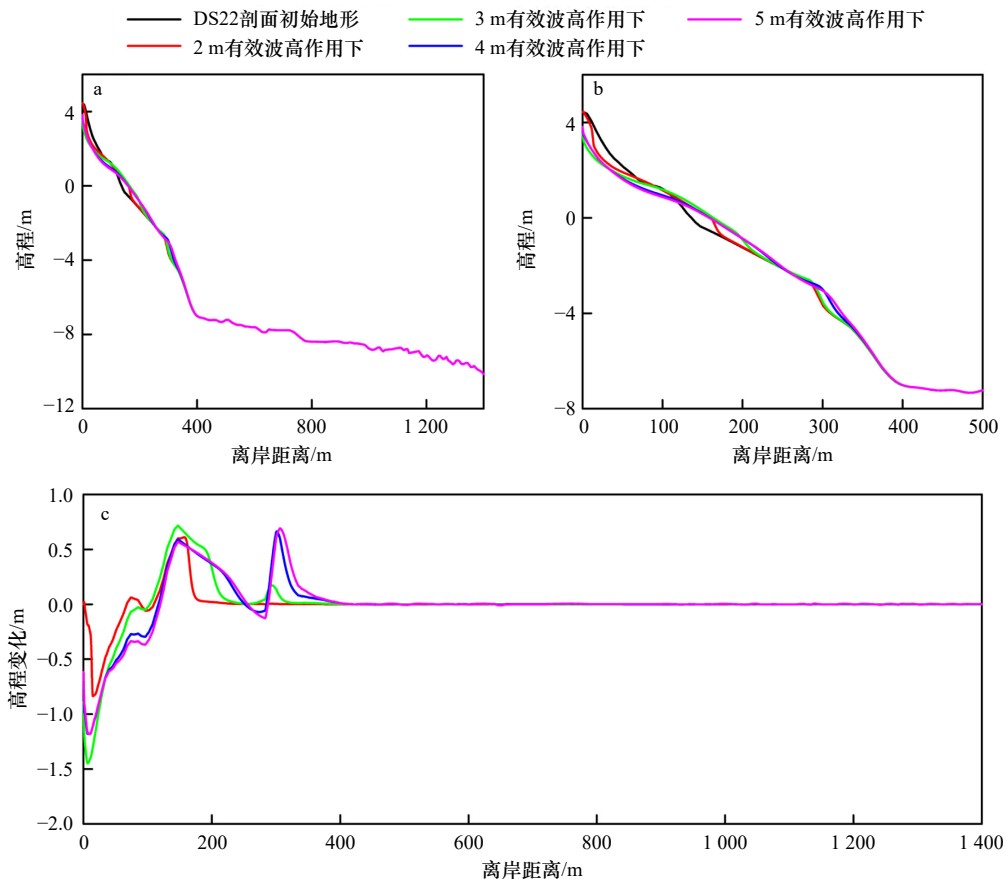


图8 XBeach-1D模拟所得2.50 m潮位结合不同有效波高的风暴作用下的海滩剖面形态

Fig. 8 The beach profile morphology obtained by XBeach-1D simulation at 2.50 m tide level combined with storm action of different significant wave heights

整个剖面的形态变化(a), 0~500 m范围内的剖面形态(b)以及剖面高程变化(c)
The whole profile (a), the profile in the range of 0~500 m (b) and the profile elevation change (c)

围内侵蚀, 离岸150~400 m淤积, 地形的变化几乎都在离岸400 m左右停止(图9)。不同潮位结合较弱风暴情况下(案例13~16)剖面变化结果各异且规律与同一对照组中的案例9~12不同, 但地形变化也基本都在离岸400 m之内停止。潮位越低, 强风暴对海滩剖面的作用更显著, 剖面变化越剧烈, 剖面地形变化停止点离岸距离越远; 潮位越高, 风暴后的剖面坡度越平缓。

不同沉积物粒径的模拟结果表明, 沉积物粒径越粗, 海滩剖面变化越缓和, 剖面变化停止点的离岸距离也越小。与波高组和潮位组模拟结果比较发现, 沉积物粒径组的不同案例剖面形态变化规律更为一致, 说明在应对风暴事件时, 沉积物粒径在细到中砂范围内的变化并没有波高和潮位对剖面形态变化的影响显著。具体地, 不同沉积物粒径在4 m有效波高结合2.5 m潮位的情况下(图10), 剖面在0~120 m离岸范围内均表现为侵蚀, 在121~400 m之间表现为淤积。不同沉积物粒径在4 m有效波高结合0.50 m潮

位情况下, 剖面在离岸0~20 m无地形变化, 21~145 m显著侵蚀, 地形变化停止在离岸408~415 m之间。除了高程略微不同(高程变化差异小于0.10 m)外, 不同沉积物粒径设置情况下剖面总体形态及变化相似。

不同海滩养护模拟结果表明, 沉积物投放的空间位置会对养护后海滩剖面对风暴的响应产生显著影响, 利用稍粗颗粒的养护沉积物可使海滩抵御风暴效果更佳。养护沉积物 $D_{50}=0.20$ mm时, 风暴后海滩剖面均表现为在离岸0~120 m范围内侵蚀, 在120~400 m之间为淤积, 剖面坡度均变缓(图11)。在不实施养护的情况下, 剖面最大侵蚀厚度为-1.18 m, 最大淤积厚度为0.66 m, 剖面高程变化停止点在离岸420 m; 有养护的情况下海滩最大侵蚀厚度并未发生显著变化, 而剖面高程变化停止点最远可达到离岸453 m, 在这4个案例中养护沉积物投放在离岸100 m效果最佳, 沉积物投放位置的不同对海滩养护效果有显著影响。当养护沉积物 $D_{50}=0.40$ mm时, 海滩剖面侵蚀和淤积范围与采用0.20 mm养护沉积物粒径一致, 不同

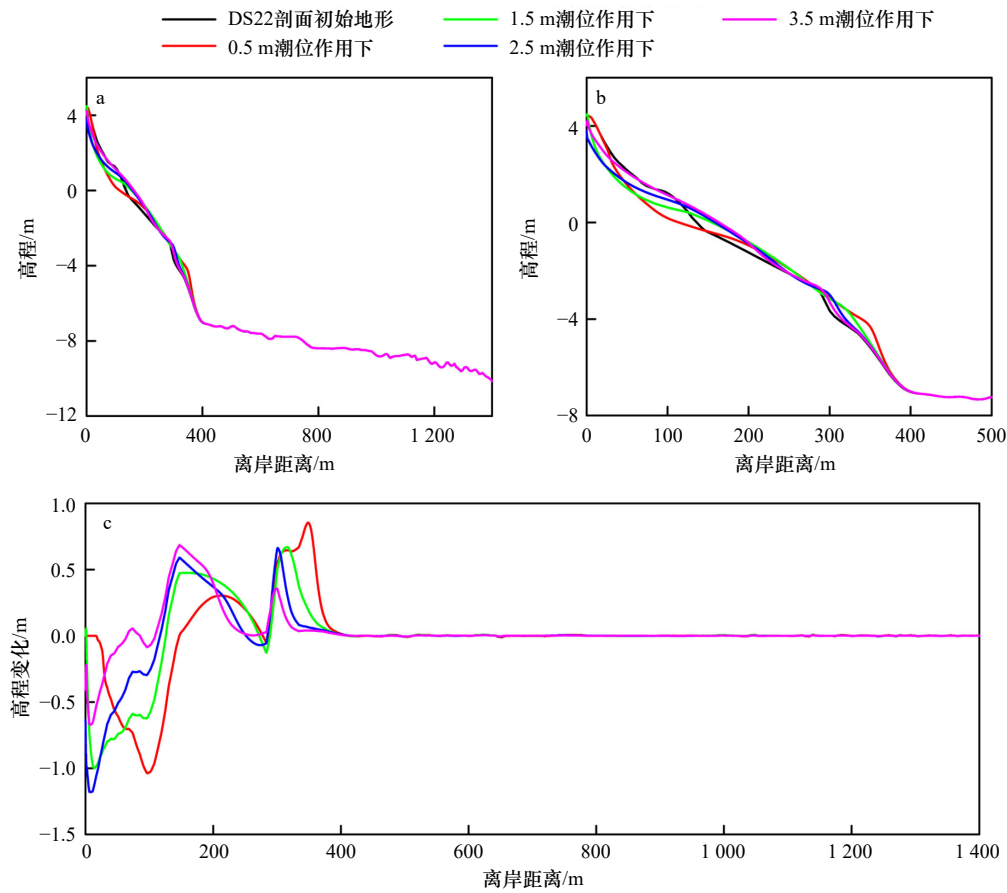


图9 XBeach-1D 模拟所得 4 m 有效波高风暴结合不同潮位对海滩剖面地形的影响

Fig. 9 4 m significant wave height storm simulated by XBeach-1D combined with different tidal levels affects the beach profile topography

整个剖面的形态变化(a), 0~500 m 范围内的剖面形态(b)以及剖面高程变化(c)
The whole profile (a), the profile in the range of 0~500 m (b) and the profile elevation change (c)

的是, 剖面变化的幅度有所降低, 最大侵蚀厚度均有减少, 而海滩剖面变化停止点离岸距离变化仅数米。

4 讨论

4.1 不同因素对海滩剖面风暴响应的影响

海滩对风暴的响应是多种因素共同作用的结果, 很难甄别或剥离某一种因素的影响^[8]。本研究在实测分析基础上利用数值模型, 尝试剥离单个影响因素对海滩剖面的控制作用, 主要探讨有效波高、潮位、海滩沉积物粒径以及海滩养护等重要因素的影响。

在本研究对照组一中, 不同案例总体表现为有效波高越大、剖面侵蚀越多、剖面高程平均变化量越大(图 12), 这与前人的研究一致^[1, 28]。除了针对波高单个因素的考虑, 对照组一还考虑了不同风暴有效波高与高潮位和低潮位的结合, 发现风暴有效波高的大小和潮位的高低不同组合会对剖面形态变化产生显著影响, 这可能与风暴发生时波浪和潮汐的相位关系有关^[6]。有效波高的不同控制剖面上的冲淤幅度, 但剖

面冲淤位置分布受潮位高低影响(图 8、图 9 和图 12)。

潮位的变化也影响风暴对海滩地形的作用^[29], 前人对于风暴事件期间潮位的探讨主要集中于台风这一强风暴事件与天文大潮的结合, 认为台风对海滩的剧烈影响需要耦合高潮位才能使得高潮带的沉积物发生离岸输运进而造成后滨的侵蚀^[6], 这一点在本研究也得到了证实。虽然更高潮位结合风暴事件可以作用于包括后滨在内的更多海滩范围, 但潮位越低时风暴对海滩剖面的冲淤作用越显著(图 12)。庞文鸿^[30]关于海滩在低、中等强度波况下的研究也发现小中潮期间的潮周期内滩面高程变化幅度要比中大潮期间的更加显著, 这与本研究中发现的风暴结合低潮位产生的海滩剖面变化更大相似。除了对不同潮位案例的分析, 本研究将不同的潮位结合 2 m 有效波高与 4 m 有效波高的情况作比较, 可发现两种情况下剖面变化的形态相似, 但结合 4 m 有效波高时剖面的高程变化更为显著(图 12), 这进一步说明波高控制剖面高程变化的幅度。

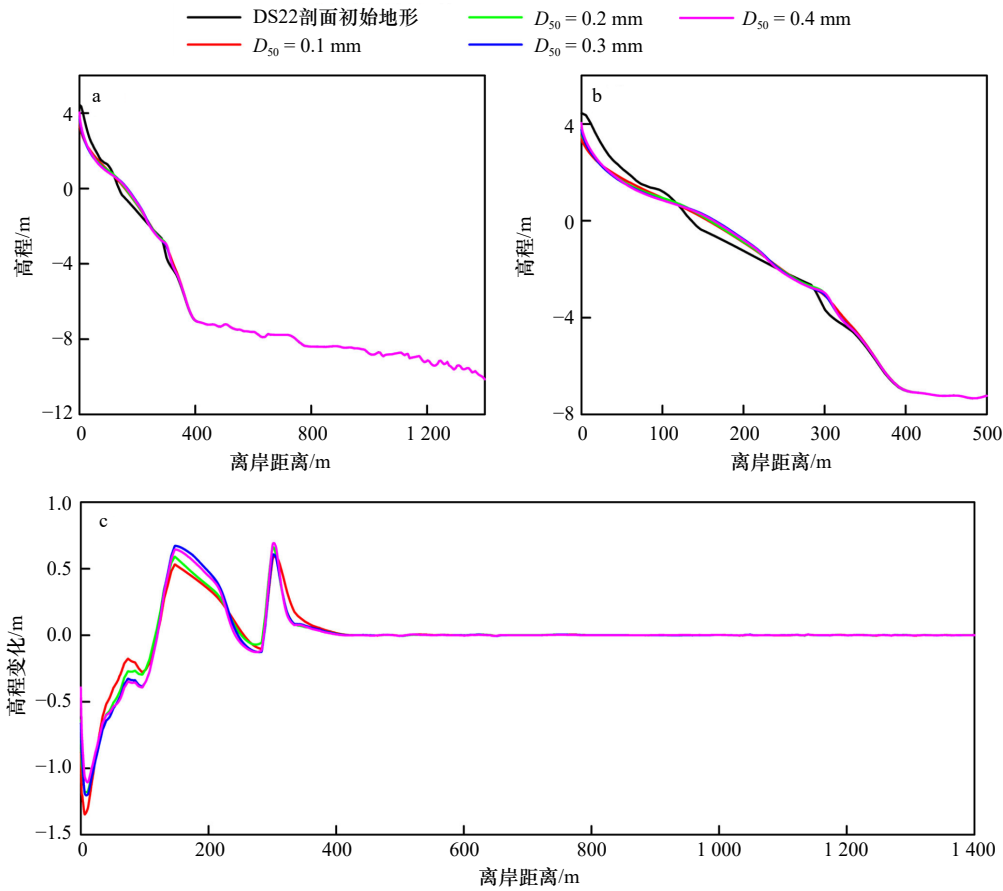


图 10 XBeach-1D 模拟所得不同沉积物粒径在 4 m 有效波高风暴结合 2.50 m 潮位情况下的海滩剖面变化

Fig. 10 Changes of beach profile with different sediment grain sizes obtained by XBeach-1D simulation under the condition of storm with significant wave height of 4 m and the tide level of 2.50 m

整个剖面的形态变化(a), 0~500 m 范围内的剖面形态(b)以及剖面高程变化(c)
The whole profile (a), the profile in the range of 0~500 m (b) and the profile elevation change (c)

沉积物颗粒的粗细反映了底部地形以及湍流和波浪能量的局部强度^[31]。不同沉积物粒径的海滩对强水动力的响应各异, 颗粒粗的海滩表现更为稳定^[24, 32], 这与本研究得到的结果一致。与同在对照组三中潮位为 2.50 m 的案例相比, 潮位为 0.50 m 时不同 D_{50} 的设置造成的不同海滩剖面变化规律并没有那么显著, 且受低潮位的影响, 剖面在离岸 0~20 m 范围内未表现出地形变化。从剖面高程变化的对比上看, 控制风暴期间的潮位大小和 D_{50} 这两个变量时, 潮位的高低相对于在细砂到中砂范围的沉积物不同设置而言, 对剖面的影响更为显著。但由于本研究 XBeach-1D 模拟剖面采用的是统一粒径, 仅探讨粒径粗细程度对海滩风暴响应的影响, 沉积物的不同组分对于风暴响应具有差异性, 未来研究也应考虑对沉积物组分的不同设定。

除了上述探讨较多的影响因素, 本研究还考虑了近年来对海滩影响越来越多的海滩养护这一因素。对照组四中不同案例结果显示, 有养护项目实施的情况下海滩遭受风暴的侵蚀得到了不同程度的缓和, 这

与 Guo 等^[17] 基于视频图像数据得到的研究结果一致。与案例 26 至 28 相比, 案例 30 至 32 的海滩剖面在平均高程变化上均有减小, 这说明使用更粗颗粒的沉积物养护功效更佳, 与束芳芳等^[32] 针对不同沉积物类型海滩的养护研究结果相似。同时, 案例 26 至 28 虽然也在一定程度上弥补了海滩剖面上离岸 0~120 m 的侵蚀, 但这 3 个案例中剖面变化停止点均在离岸 450 m 左右, 比相同或不同对照组的案例都离岸更远。且与程林等^[22] 和 Guo 等^[19] 得到的砂-泥分界线离岸距离相比也更远, 这可能是因为养护沉积物不如固有沉积物稳定^[33]。此外, 梁丙臣等^[12] 基于 XBeach-1D 和水槽试验的研究表明补砂量的多少与投放位置共同决定了海滩养护的效率, 对于海滩剖面形态变化及达到平衡的时间也会产生影响。因本文主要讨论风暴对海滩剖面的作用且 Guo 等^[17] 已经阐明了补砂量对海滩抵御风暴的影响, 故本研究未考虑不同的补砂量设定。

通过分析每两个因素对海滩剖面形态变化作用

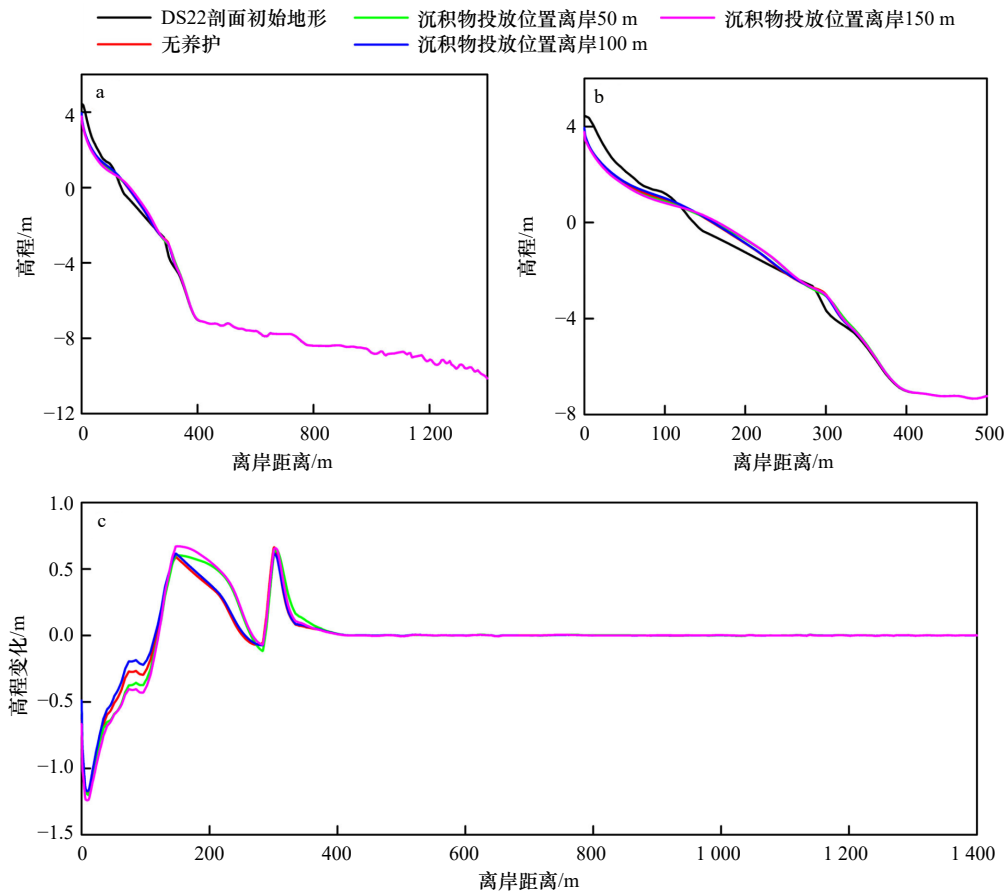


图 11 XBeach-1D 模拟所得养护沉积物 ($D_{50}=0.20\text{ mm}$) 在离岸方向的不同投放位置影响下的海滩剖面变化

Fig. 11 XBeach-1D simulation results of the profile changes under the influence of the different placement in the offshore direction of the borrowed sediment ($D_{50}=0.20\text{ mm}$)

整个剖面的形态变化(a), 0~500 m 范围内的剖面形态(b)以及剖面高程变化(c)
The whole profile (a), the profile in the range of 0~500 m (b) and the profile elevation change (c)

可发现,本研究各因素对海滩剖面变化的相对作用大小表现为:风暴有效波高>潮位>沉积物粒径,可为后续研究提供参考。采用的变化量中,剖面最大侵蚀、最大淤积厚度以及剖面地形变化停止点离岸距离并未呈现随各变量变化的显著规律,而剖面高程平均变化量这一指标在不同因素对海滩剖面形态变化的分析中最具规律性。

4.2 模型的局限性及研究展望

研究风暴强水动力作用下的海滩剖面变化需要考虑海滩与近岸沉积物运输的连通性^[13],基于实测数据仅能分析离岸 0~150 m 范围内出露滩面的剖面形态变化,而利用模型则可以分析出露滩面及近岸水下部分至离岸距离 1400 m 以内的剖面形态。虽然 XBeach-1D 能较好地根据不同情况下海滩的动力地貌过程进行模拟,但本研究中的模型仍存在一定的局限性。在基于 XBeach-1D 的不同情景模拟海滩剖面对风暴及养护项目的响应情况时,因主要探讨前期研究

基于实测数据所提到的影响因素,仅对风暴有效波高、风暴发生时的潮位、沉积物中值粒径以及养护沉积物投放位置和离岸距离进行了不同的理想化设置。海滩动力地貌过程是多种因素共同作用的结果,在本研究中的情景设置受限于实测数据基础,考虑的案例设置有限。波浪和潮位设定的简化使得波浪和潮汐相位关系的探讨也未能进行。岸线的走向与风暴路径对于波浪入射角的影响可通过控制沿岸沉积物运输来影响海滩响应^[34],海滩形态^[23]、海滩类型^[1, 25, 35]和地质条件^[36]等因素也会对海滩风暴剖面响应产生影响。未来研究需考虑更多因素及不同因素之间相互作用影响下的海滩剖面变化,进而为实际问题提供更多参考。

5 结论

本文基于现场实测数据,建立基于 XBeach-1D 的海滩动力地貌数值模型,计算了台风“塔巴”影响下浙

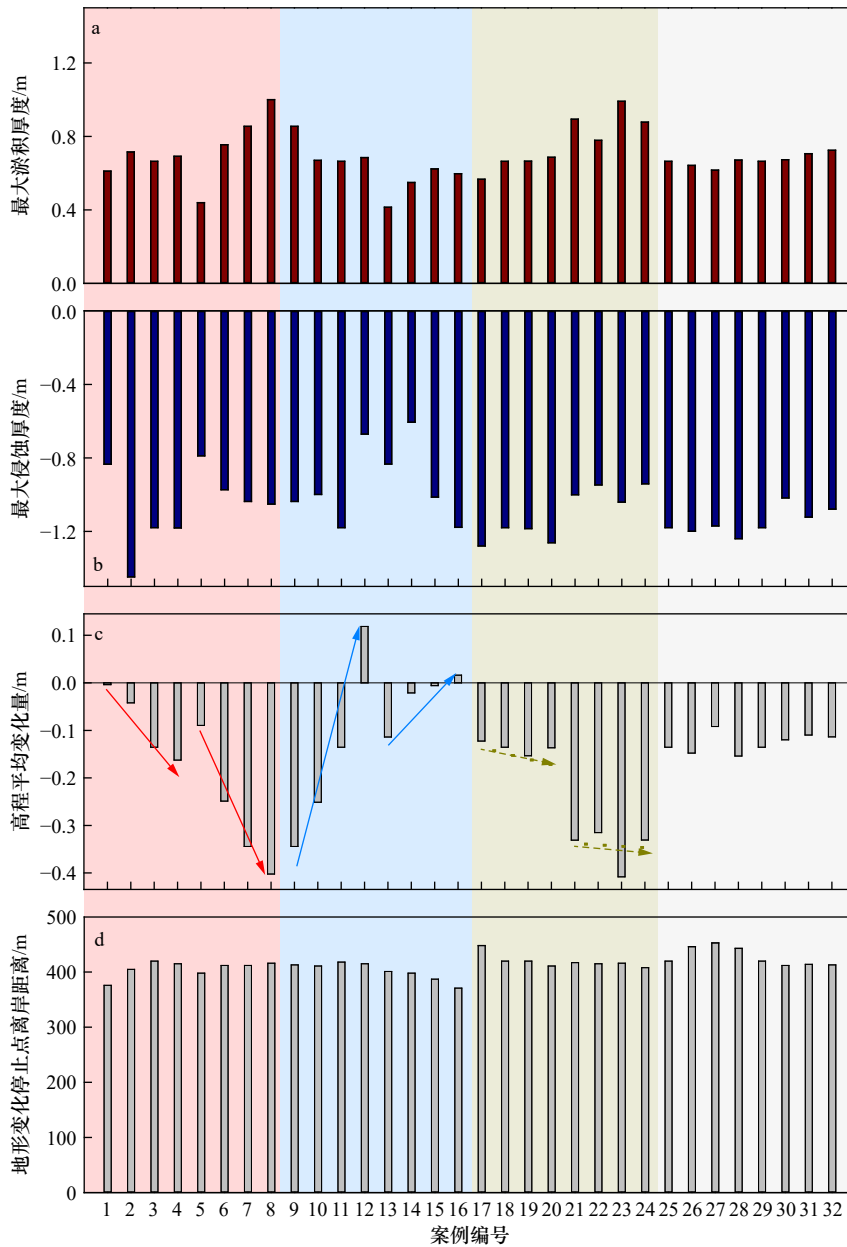


图 12 不同案例设置下 XBeach-1D 模拟所得剖面最大淤积厚度(a), 最大侵蚀厚度(b), 高程平均变化量(c)以及地形变化停止点离岸距离(d)

Fig. 12 Maximum accretion thickness (a), maximum erosion thickness (b), average elevation change (c) and the cross-shore distance of topographical change stopping point (d) obtained from XBeach-1D simulation under different case settings

红色阴影区域为有效波高组案例, 蓝色阴影区域为潮位组, 绿色阴影区域为沉积物粒径组案例, 灰色阴影区域为海滩养护组案例。不同颜色的实线箭头指示了较为显著的变化趋势, 虚线箭头表示变化趋势较弱

Red shaded area is significant wave height group, blue shaded area is tide level group, green shaded area is sediment grain size group, gray shaded area is beach nourishment group. The solid arrows of different colors indicate significant change trend, while dotted arrows show weak change trend

江舟山朱家尖岛东沙海滩的剖面形态变化。而后设置不同情景案例, 探讨了不同因素对于海滩剖面风暴响应的影响, 获得如下主要结果。

XBeach-1D 结合“Surfbeat”模式能很好地模拟东沙海滩在台风影响下的海滩及近岸剖面形态变化。实测数据仅能分析离岸 0~150 m 的海滩剖面形态变化, 而 XBeach 模型可计算至离岸 1 400 m, 东沙海滩

剖面在台风“塔巴”影响下展示出了显著的剖面上部冲刷、下部淤积的规律, 且在砂-泥分界线位置向海一侧的地形几乎无变化。

通过设置不同情景计算发现, 有效波高、潮位、沉积物粒径及海滩养护均会对风暴下海滩剖面形态变化产生影响, 有效波高控制剖面的冲淤幅度, 潮位控制冲淤的位置。在面对有效波高较大的风暴时不

同细到中砂沉积物粒径设置造成的剖面变化差异较小。海滩养护沉积物在离岸方向上的不同投放位置对剖面形态变化影响显著,与无养护的案例相比,有海滩养护的案例中剖面变化停止点的离岸距离更

远。风暴条件下,不考虑养护的各影响因素对海滩剖面变化的相对作用大小表现为:有效波高>潮位>沉积物粒径,剖面高程平均变化量是用于分析剖面变化规律的较好指标。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 黎树式, 戴志军, 葛振鹏, 等. 强潮海滩响应威马逊台风作用动力沉积过程研究——以北海银滩为例[J]. *海洋工程*, 2017, 35(3): 89–98.
Li Shushi, Dai Zhijun, Ge Zhenpeng, et al. Sediment dynamic processes of macro-tidal beach in response to Typhoon Rammasun action: A case study of Yintan, Beihai[J]. *The Ocean Engineering*, 2017, 35(3): 89–98.
- [3] 郭俊丽, 时连强, 童宵岭, 等. 浙江朱家尖岛东沙滩对热带风暴“娜基莉”的响应及风暴后的恢复[J]. *海洋学报*, 2018, 40(9): 137–147.
Guo Junli, Shi Lianqiang, Tong Xiaoling, et al. The response to tropical storm Nakri and the restoration of Dongsha Beach in Zhujiajian Island, Zhejiang Province[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(9): 137–147.
- [4] 朱士兵, 李志强. 雷州半岛南部海滩对 1720 号台风(卡努)的响应研究[J]. *热带海洋学报*, 2019, 38(1): 96–104.
Zhu Shibing, Li Zhiqiang. Study on beach response to Typhoon Khanun (No. 1720) along southern Leizhou Peninsula[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(1): 96–104.
- [5] 戴志军, 陈子燊, 张清凌. 波控岬间海滩剖面短期变化过程分析[J]. *热带地理*, 2001, 21(3): 266–269.
Dai Zhijun, Chen Zishen, Zhang Qingling. An analysis on temporal variation process of a wave-dominated beach profile between headlands[J]. *Tropical Geography*, 2001, 21(3): 266–269.
- [6] 蔡锋, 雷刚, 苏贤泽, 等. 台风“艾利”对福建沙质海滩影响过程研究[J]. *海洋工程*, 2006, 24(1): 98–109.
Cai Feng, Lei Gang, Su Xianze, et al. Study on process response of Fujian beach geomorphology to typhoon Aere[J]. *The Ocean Engineering*, 2006, 24(1): 98–109.
- [7] 陈子燊, 王扬圣, 黄德全, 等. 台风影响下海滩前滨剖面时间变化差异性分析[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(6): 1–6.
Chen Zishen, Wang Yangsheng, Huang Dequan, et al. Analysis on temporal change of foreshore profile under tropical storms[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(6): 1–6.
- [8] Coco G, Sénéchal N, Rejas A, et al. Beach response to a sequence of extreme storms[J]. *Geomorphology*, 2014, 204: 493–501.
- [9] 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.
- [10] Jackson N L, Nordstrom K F, Farrell E J. Longshore sediment transport and foreshore change in the swash zone of an estuarine beach[J]. *Marine Geology*, 2017, 386: 88–97.
- [11] 匡翠萍, 董智超, 顾杰, 等. 岬湾海岸海滩养护工程对水体交换的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6): 769–777.
Kuang Cuiping, Dong Zhichao, Gu Jie, et al. Influence of beach nourishment project on water exchange in headland-bay coast[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(6): 769–777.
- [12] 梁丙臣, 朱梅溪, 屈智鹏, 等. 不同补沙方案对海滩剖面影响的数值模拟对比分析[J]. *海洋学报*, 2021, 43(11): 136–145.
Liang Bingchen, Zhu Meixi, Qu Zhipeng, et al. Comparative analysis on numerical simulation of the impacts of different beach nourishment schemes on beach profile[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(11): 136–145.
- [13] Anthony E J, Aagaard T. The lower shoreface: morphodynamics and sediment connectivity with the upper shoreface and beach[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 210: 103334.
- [14] Valiente N G, Masselink G, Scott T, et al. Role of waves and tides on depth of closure and potential for headland bypassing[J]. *Marine Geology*, 2019, 407: 60–75.
- [15] 朱磊, 杨燕雄, 杨雯, 等. 工程养护海滩对“803”风暴潮的响应过程研究[J]. *海洋通报*, 2019, 38(1): 102–114.
Zhu Lei, Yang Yanxiong, Yang Wen, et al. Study on the response process of nourished beach to “803” storm surge[J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(1): 102–114.
- [16] 周赢涛, 何俊彪, 朱钰, 等. “圆规”台风后海口铺前湾沙滩恢复效率与主控因素研究[J]. *应用海洋学学报*, 2024, 43(3): 554–564.
Zhou Yingtao, He Junbiao, Zhu Yu, et al. Recovery efficiency and leading factor of sandy beach in Puqian Bay after Typhoon Kompasuj. *Journal of Applied Oceanography*, 2024, 43(3): 554–564.
- [17] Guo Junli, Shi Lianqiang, Pan Shunqi, et al. Monitoring and evaluation of sand nourishments on an embayed beach exposed to frequent storms in eastern China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 195: 105284.
- [18] 曹惠美, 蔡锋, 苏贤泽, 等. 海滩养护和修复工程的动态平衡滨线设计研究——以浙江省苍南县炎亭湾海滩修复工程设计为例[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(2): 185–193.
Cao Huimei, Cai Feng, Su Xianze, et al. Study on the plan of dynamic equilibrium shoreline for beach nourishment and restoration: tak-

- ing the plan of the beach nourishment in Yanting Bay, Cangnan County, Zhejiang Province as an example[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(2): 185–193.
- [19] Guo Junli, Shi Lianqiang, Chen Shenliang, et al. Sand-mud transition dynamics at embayed beaches during a typhoon season in eastern China[J]. *Marine Geology*, 2021, 441: 106633.
- [20] 张朝阳. 朱家尖岛近岸海域潮流和泥沙特性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
Zhang Zhaoyang. Study on tidal current and sediment characteristics of Zhujiajian Island offshore area[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [21] 夏小明. 中国海岛志浙江卷(第2册): 舟山群岛南部[M]. 北京: 海洋出版社, 2014: 371–458.
Xia Xiaoming. Records of Chinese Islands (Zhejiang Volume 2th Fascicule)[M]. Beijing: China Ocean Press, 2014: 371–458.
- [22] 程林, 时连强, 夏小明, 等. 浙江朱家尖岛东沙滩沉积与地貌动态变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(1): 37–44.
Cheng Lin, Shi Lianqiang, Xia Xiaoming, et al. Sedimentation and recent morphological changes at Dongsha beach, Zhujiajian Island, Zhejiang Province[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 37–44.
- [23] Shi Lianqiang, Guo Junli, Chen Shenliang, et al. Morphodynamic response of an embayed beach to different typhoon events with varying intensities[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 42(7): 51–63.
- [24] 郭俊丽, 时连强, 陈沈良, 等. 台风季节朱家尖岛砂、砾质岬湾海滩的不同沉积地貌动态变化[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(4): 82–96.
Guo Junli, Shi Lianqiang, Chen Shenliang, et al. Dynamic variations of different sedimentary geomorphology of sandy and gravel embayed beaches on the Zhujiajian Island during typhoon season[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(4): 82–96.
- [25] Burvingt O, Masselink G, Scott T, et al. Climate forcing of regionally-coherent extreme storm impact and recovery on embayed beaches[J]. *Marine Geology*, 2018, 401: 112–128.
- [26] Warner J C, Geyer W R, Lerczak J A. Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assessment[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C5): C05001.
- [27] Paolo B. Wave mechanics for ocean engineering[M]. Elsevier Science, 2000, 183–206.
- [28] Pang Wenhong, Dai Zhijun, Ma Binbin, et al. Linkage between turbulent kinetic energy, waves and suspended sediment concentrations in the nearshore zone[J]. *Marine Geology*, 2020, 425: 106190.
- [29] Jana S. Short-term estimation of beach sedimentation pattern in the mixed-energy environment at Digha coast, India[J]. *Journal of Sedimentary Environments*, 2022, 7(1): 1–19.
- [30] 庞文鸿. 中强潮海滩沉积动力过程研究——以北海银滩为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
Pang Wenhong. Sedimentary dynamic processes in meso-macro tidal beaches: a case study of Yintan Beach in Beihai City[D]. Shanghai: East China Normal University, 2021.
- [31] Komar P D. Beach Processes and Sedimentation[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. , 1976.
- [32] 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.
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.
- [33] Seymour R, Guza R T, O'Reilly W, et al. Rapid erosion of a small southern California beach fill[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52(2): 151–158.
- [34] 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.
- [35] Masselink G, Scott T, Poate T, et al. The extreme 2013/2014 winter storms: hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(3): 378–391.
- [36] Loureiro C, Ferreira Ó, Cooper J A G. Geologically constrained morphological variability and boundary effects on embayed beaches[J]. *Marine Geology*, 2012, 329–331: 1–15.

Profile response to storm events of sandy beach: observation and modelling

Guo Junli^{1,2}, Chen Shenliang³, Ye Qinghua⁴, Chang Yang⁵, Shi Lianqiang^{1,2}

(1. *Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China*; 2. *Key Laboratory of Ocean Space Resource Management Technology, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China*; 3. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China*; 4. *Deltares, Delft 2614HV, the Netherlands*; 5. *School of Hydraulic Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China*)

Abstract: Beach erosion under the influence of frequent and severe storm events is generally increasing. Understanding the process of beach profile change under the influence of storm events is essential for the protection of sandy coast erosion. To clarify the response characteristics of the embayed beach profile to the storm, this study combined field observation during the typhoon and the XBeach model to reveal the profile morphological changes of the Dongsha beach in Zhujiajian Island, Zhejiang Province, under the influence of typhoon Tapah, and the influence of different factors on the beach storm response was discussed. The main results are as follows. Under the influence of typhoon Tapah, the profile of the Dongsha beach showed a significant pattern of erosion in the upper part of the profile and accretion in the lower part, and there was almost no change in the topography on the seaward side of the 400 m offshore (sand-mud transition). The calculation of different storm scenarios shows that the significant wave height controls the erosion and deposition amplitude of the profile, while the tidal level controls the position of erosion and deposition on the profile. When the storm wave height is large, the difference in profile changes caused by different settings of fine to medium sand grain size range is small. The offshore distance of the stop point of profile change is farther when there is beach nourishment. The results of this study can provide a scientific reference for the protection of storm erosion in the sandy coast.

Key words: beach storm response; profile change process; typhoon Tapah; XBeach model