

刘润, 李志强, 朱道恒, 等. 风暴后海陵岛金沙滩恢复期床面高度变化分析[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(8): 22-31.

LIU Run, LI Zhiqiang, ZHU Daocheng, et al. Analysis of bed level elevation during beach recovery after storm on Golden Beach, Hailing Island, Guangdong[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(8): 22-31.

风暴后海陵岛金沙滩恢复期床面高度变化分析

刘润¹, 李志强^{2*}, 朱道恒², 胡鹏鹏³, 孙琰¹, 曾春华⁴

(1 广东海洋大学化学与环境学院, 湛江 524088; 2 广东海洋大学电子与信息工程学院, 湛江 524088;

3 中山大学海洋科学学院, 珠海 519082; 4 广东海洋大学海洋工程学院, 湛江 524088)

摘要: 台风后海滩恢复初期的床面变化是海滩演变机理的重要研究内容。利用 2021 年 8 月 17—22 日现场观测获取的海陵岛金沙滩碎波带床面高度和波浪、潮汐数据, 分析不同潮汐周期和波况下的床面高度变化特征, 并采用连续小波变换分析床面高度的周期变化特征。结果表明: ①风暴后海滩恢复期的波浪以卷破波为主, 在较低潮位与强浪耦合下海滩迅速恢复, 而在较高潮位与弱浪耦合下海滩恢复有限; ②床面高度在“最高潮”时减小, 在“次高潮”时增加, “次高潮”期间床面高度的周期变化更显著; ③床面高程变化受多种水动力参数共同影响, 观测点位置不同对潮位变化和波浪作用力反映不同, 观测点位于外碎波带, 床面高程受深水波高影响较大, 在碎波带内受碎波带的波浪、潮位高低以及破碎类型影响较大。

关键词: 热带风暴; 碎波带; 床面变化; 小波分析; 海滩恢复

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.201

0 引言

碎波带是陆地与海洋之间的高能耗散区, 在时间和空间上都是高度动态的。波浪由深海向浅海传播的过程中, 入射波在碎波带发生变形破碎, 海滩泥沙运动活跃, 导致床面发生变化^[1]。床面变化过程受到诸多海洋动力因子的影响, 这些动力因子通过线性和非线性作用的机制耦合, 使得海滩呈现复杂的变化。床面变化与碎波带波浪、潮汐相互作用的研究一直是海滩地貌动力研究的重点和难点内容。多数关于床面变化的研究是在潮汐周期内进行床面高度 (bed level elevation, BLE) 的高频测量^[2-4], 或在正常波浪条件下进行^[5-9]。风暴过程中, 波浪快速侵蚀海滩, 风暴后, 海滩在涌浪作用下开始恢复。海滩的恢复情况有所差异, 有的海滩在风暴后可以很快恢复^[10], 有的海滩则侵蚀持续一年以上^[11-12]。这种差异与海滩特征、地质背景和水动力

条件等诸多因素有关。YU 等^[13]进一步研究了风暴后 2 种不同波能条件下的海滩剖面 and 沉积物特征, 发现风暴后高能海滩恢复速度较低能海滩更快; GE 等^[14]还发现, 台风“威尔逊”过后, 中国北海银滩的后岸和沙丘在缺乏持续强浪活动时检测到轻微的地貌变化。近年来, 人们对海滩变化的研究非常重视, 但对风暴后海滩恢复过程床面变化的高频测量研究很少。开展海滩风暴恢复期床面高度变化与碎波带水动力要素的观测研究, 可以为揭示海滩恢复机制和恢复能力提供依据。

本研究选取“查帕卡”和“卢碧”台风后的恢复期 (2021 年 8 月 17 日 0 时—22 日 13 时), 在海陵岛东岛金沙滩碎波带, 进行了为期 6 天的现场观测。通过现场观测获取高频、高精度的床面高程和波浪等数据, 分析风暴后海滩恢复期碎波带床面高程的变化特征及影响因子, 为风暴后海滩恢复过程的内在机制研究提供参考。

1 研究区域与现场观测

1.1 研究区域

海陵岛位于广东省阳江市西南沿海。东岛金

收稿日期: 2023-08-11

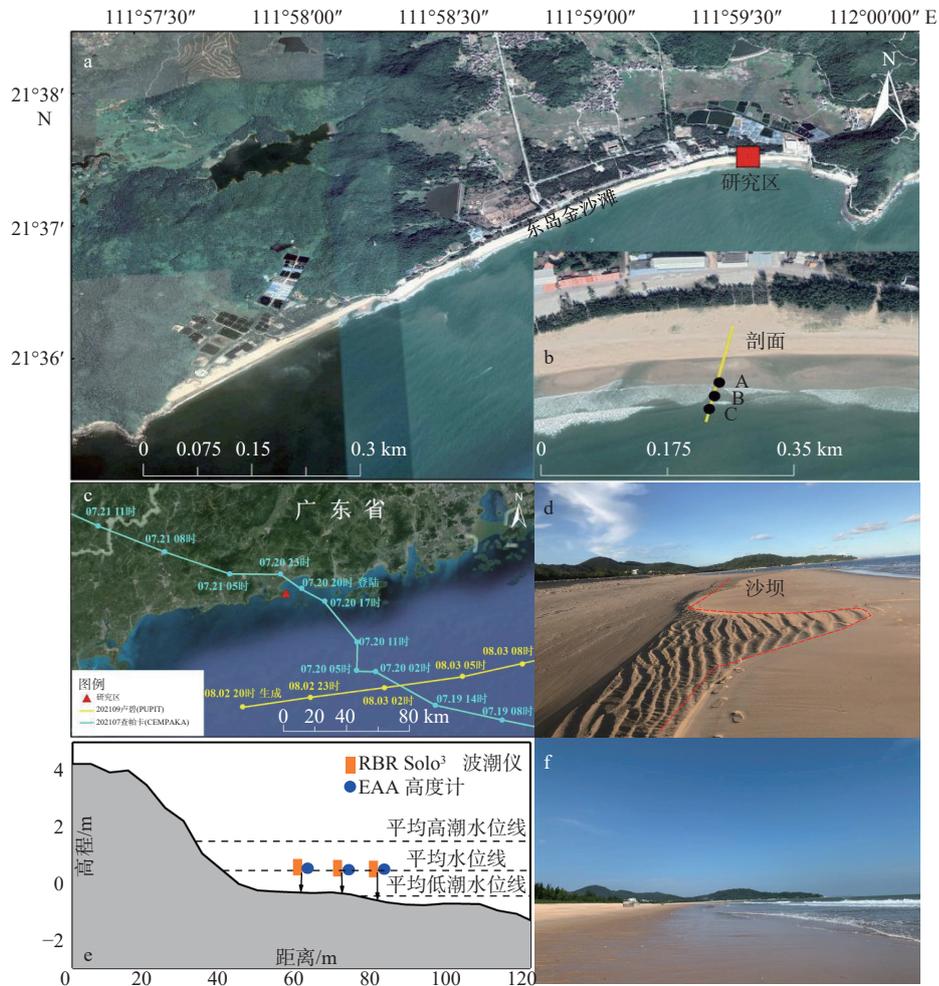
资助项目: 国家自然科学基金 (42176167)

第一作者: 刘润 (1997—), 女, 在读硕士, 主要从事海岸动力地貌学方面的研究工作。E-mail: Run10411@163.com

* 通讯作者: 李志强 (1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事海滩过程、海岸工程环境方面的研究工作。E-mail: qiangz1974@163.com

沙滩是海陵岛南岸段上的一岬间弧形海湾, 向南开敞, 宽度为 80~100 m (图 1a), 滩面沉积物为细一中砂, 滩肩和陡坎是海滩地形的主要特征。根据闸坡站 (21°35'N、111°50'E) 长期的潮位资料, 东岛金沙沙滩的潮汐类型为混合型半日潮, 多年平均潮差

为 1.54 m, 最大潮差达 3.76 m, 平均大潮潮差为 2.08 m。根据阳江波浪站的观测资料, 研究区以风浪和涌浪的混合浪为主, 强浪向为 S 向, 波高 > 1 m 的波浪出现频率为 35.8%, 波周期介于 2~6 s。海滩的东侧有一个长约 550 m 的天然岬角。



(a) 海陵岛东岛金沙沙滩卫星影像; (b) 低潮下研究区域俯视图 (实心黑点表示观测点, 黄色实线表示跨岸海滩剖面); (c) 台风“查帕卡”及“卢碧”移动路径; (d) 2021 年 7 月 15 日, 研究区台风来袭前拍摄的沙坝地貌; (e) 2021 年 7 月 22 日, 海滩跨岸剖面及仪器部署; (f) 2021 年 7 月 23 日, 台风后海滩恢复期, 沙坝消失

图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 现场观测

现场观测前期, 研究区海滩先后收到 2 次台风侵袭。台风“查帕卡”是 2021 年第 7 号热带风暴, 形成于广东省阳江市东南方向约 175 km 的海面上, 于 7 月 20 日 21 时 50 分在广东阳江登陆, 登陆时强度达到台风级别, 中心附近最大风力达到 12 级 (33 m/s), 距离研究区约 13.15 km (图 1c)。8 月 8 日, 台风“卢碧”形成于广东雷州半岛东部海面, 自西向东缓慢移动, 距离海陵岛东岛金沙沙滩最近约 77 km

(图 1c)。在双台风的影响下, 东岛金沙沙滩受到强烈侵蚀, 台风前沙坝地貌显现 (图 1d), 而台风后沙坝消失 (图 1f), 原因是在风暴期间, 海滩表层最先受到侵蚀, 沉积物逐渐被带到近岸区域并积聚^[15]。

为观测台风后海滩恢复的详细过程, 于 2021 年 8 月 17—22 日进行了为期 6 天的现场观测, 历经 9 个潮周期。在海滩碎波带垂岸线方向布设 3 个观测点 (A、B、C), A 离岸 25 m, A 和 B、B 和 C 之间分别相距 14.4 和 15.2 m (图 1b)。各点分别同时布置波潮仪和海床高度观测仪, 仪器采用钢柱固定

(图 1e)。海床高度变化采用 3 台 Echologger AA 400 自记式高度计观测(记为 EAA-A、EAA-B、EAA-C),仪器距离海床高度 30 cm。高度计每次采样频率为 10 Hz,记录海床到高度计探头的距离(DSP)。波潮观测采用 RBR Solo³ 波潮仪,采样频率为 4 Hz。

1.3 数据处理方法

1.3.1 水动力数据

利用 RBR Solo³ 采集的波面数据,计算了碎波带波浪要素和水位。数据采集时间为 2021 年 8 月 17 日 00:00:00—8 月 22 日 23:59:59。在计算前,将仪器在低潮时暴露在空气中记录的无效数据删除,采用上跨零法计算有效波高和波周期。研究区深水波资料为欧洲中期天气预报中心(ECMWF, <https://climate.copernicus.eu/>)提供的 ERA5 逐时单层资料,资料时间分辨率为 1 h。

海滩上波浪破碎的形态主要取决于波浪在深水中的波陡和近岸水底的坡度,因此,不同破波类型对滩面上的沉积物输运和海滩剖面的塑造有重要影响^[16]。波陡(ε)代表破波波高(H_b)与深水波长(L_0)之比,海滩冲淤变化趋势与入射波强度关系由入射波的波陡大小所决定^[17-18]。

破波类型可由破波相似参数(ξ_b)区分:崩破波($\xi_b < 0.4$)、卷破波($0.4 < \xi_b < 2$)和激破波($\xi_b > 2$)^[16,19]。 ξ_b 定义如下:

$$\xi_b = \tan\beta \left(\frac{H_b}{L_0} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中: $\tan\beta$ 为碎波带坡度;

L_0 为深水波长, $L_0 = gT^2/2T$, 来源于 ECMWF。

破波波高 H_b 估算如下^[20]:

$$H_b = 0.39g^{1/5} (T \times H_s^2)^{2/5} \quad (2)$$

式中: g 为标准重力加速度(9.81 m/s^2);

T 为波周期, s;

H_s 为有效波高, m。

1.3.2 床面高程数据

碎波带床面高程数据因仪器电池故障,存在一定的数据丢失。EAA-A 和 EAA-B 在 8 月 17—22 日采集了完整数据,而 EAA-C 在 8 月 17—19 日没有采集数据。与波浪数据处理情况类似,当床面暴露时,从床面数据中剔除无效数据。

1.3.3 连续小波分析

小波分析是用一簇小波函数系来表示或逼近

某一信号或函数,通过伸缩、平移,对信号进行多尺度细化,最终使得特定尺度的信号与特定的时间(位置)相对应,从而可聚焦到信号的任意细节。本文采用连续小波变换来描述床面高程变化的周期特征。一段具有固定步长 Dt 的时间序列 $x_n (n=1, 2, \dots, N)$ 的连续小波变换(Continue Wavelet Transform, CWT)定义为 x_n , 与经过伸缩和归一化之后的小波的卷积^[21],公式如下:

$$W_n^x(S) = \sqrt{\frac{dt}{S}} \sum_{n=1}^N x'_n \psi_0 \left[(n' - n) \frac{dt}{S} \right] \quad (3)$$

式中: x 为时间序列;

n 为局部时间指数;

S 为小波尺度;

ψ_0 为 Morlet 小波;

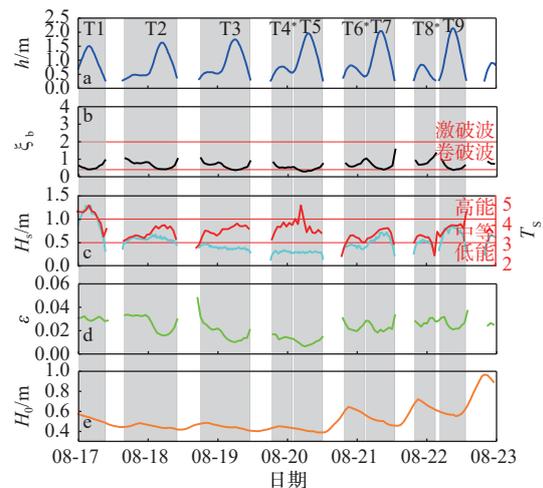
小波功率定义为 $|W_n^x(S)|^2$ 。

2 结果与分析

2.1 水动力特征

现场观测期间经历了 9 个潮汐周期,每个潮汐周期的水深(h)值介于 0.59~1.29 m(图 2、表 1)。观测期间东岛金沙滩经历了 3 种不同的波浪状况,即低能波况($H_s < 0.5 \text{ m}$, T4*—T5)、中等波况($0.5 \text{ m} < H_s < 1 \text{ m}$, T2—T3 和 T6*—T8*)和高能波况($H_s > 1 \text{ m}$, T1 和 T9)^[22-23],具体可分为 5 个阶段:

(1) 第 1 阶段 高能波况 I 期(17 日 00:00—9:00,



(a) 水深(h); (b) 破波相似参数(ξ_b); (c) 红色实线代表有效波周期(T_s), 青绿实线代表有效波高(H_s); (d) 波陡(ε); (e) 深水波长(H_0); 图中阴影区域对应观测期间的 9 个潮汐周期 T1—T9, “*” 为次高潮

图 2 观测期间波浪与潮汐情况

Fig. 2 Waves and tides during the observation period

表 1 不同潮汐周期平均 DSP 的变化

Table 1 Changes in average DSP for different tidal periods

潮汐条件	潮汐周期	平均水深/m	平均有效波高/m	平均DSP-A/mm	平均DSP-B/mm	平均DSP-C/mm
小潮	T1	1.03	1.37	215.3	225.3	-
	T2	0.79	0.82	492.8	267.1	-
	T3	0.91	0.59	312.7	302.6	-
中潮	T4*	0.63	0.45	322.9	306.5	192.5
	T5	1.20	0.46	329.1	308.1	193.4
	T6*	0.66	0.58	202.7	296.7	188.9
	T7	1.21	0.86	339.5	296.4	199.8
大潮	T8*	0.59	0.65	192.2	257.4	180.0
	T9	1.29	1.04	331.5	278.3	188.6

注：“*”表示次最高潮；“-”表示无数据。

T1), 碎波带有效波高和波周期随潮汐变化显著(图 2), 在最高潮位时有效波高均 > 1 m(表 1)。

(2) 第 2 阶段 中等波况 I 期(18 日 15:00—19 日 11:00, T2—T3), T2 和 T3 潮汐周期, 深水波高降低, 基本维持在 0.4~0.6 m。碎波带波高逐时变化程度相比前一阶段明显减小, 此时碎波带内的波高变化受潮汐变化影响很小, 与深水波高变化的趋势相同(图 2)。

(3) 第 3 阶段 低能波况期(19 日 18:00—20 日 12:00, T4—T5), 深水波高下降, 碎波带内的波高变化受潮汐变化影响很小, 与深水波高变化的趋势相同(图 2)。这一潮周期内 H_s 日变化大, 20 日 15 时波高有 1 次小幅度升高, 随后快速下降至 0.6 m 以下, H_s 降低至约 4 s, 这一阶段 $\varepsilon < 0.02$, 较第 2 阶段减小, 非线性作用减弱, 整体变化与第 2 阶段变化基本一致。

(4) 第 4 阶段 中等波况 II 期(20 日 19:00—22 日 04:00, T6—T8), 这一阶段不同于中等波况 I 期间, H_0 开始波动升高, H_s 日变化幅度较大, 碎波带波高变化受潮汐影响显著, 与 T1 潮周期变化趋势一致(图 2)。在中潮转为大潮期间, $\varepsilon > 0.03$, 较第 1 阶段波陡大, 非线性作用增强(表 1)。

(5) 第 5 阶段 高能波况 II 期(22 日 00:00—12:00, T9), 整体变化与第 1 阶段(高能 I 期)一致, 但这一阶段中碎波带波高小于第 1 阶段(表 1), 而 T_s 变化较第 1 阶段大, 22 日 04:00 时 T_s 值最小为 2.5 s, 随后不断增大至 4.66 s, T_s 最大值处于水位最低处。

T1—T9 潮汐周期, $0.4 < \zeta_b < 2$, 波浪类型为卷破波(图 2b)。卷破波可以深入碎波带床面, 将底部沉积物悬浮到整个水深范围, 从而影响碎波带的泥

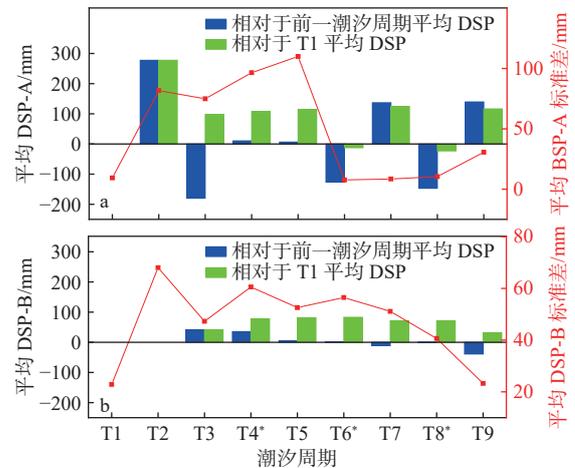
沙运动和岸滩演变^[19-20]。

2.2 床面变化特征

2.2.1 不同潮周期内床面变化特征

观测期间, 历经小潮、中潮和大潮, 滩面呈现先侵蚀后轻微淤积, 整体呈现侵蚀的趋势(图 3)。T2—T7 期间, 平均 A 点 DSP 值(DSP-A)、B 点 DSP 值(DSP-B)和 C 点 DSP 值(DSP-C)分别为 337.5、291.9 和 194.7 mm, 相比小潮期间, A 和 B 点的 BLE 分别下降了 122.2、66.6 mm, 表明小潮至中潮, 滩面受到了侵蚀; T8*—T9 期间, 相比中潮期间 A、B 和 C 点的 BLE 分别增加了 58.01、22.5 和 10.1 mm(表 2), 表明中潮转大潮期间, 滩面出现轻微淤积, 展现了风暴后海滩恢复过程。其中, C 点处于相对稳定状态(图 4a)。根据波况, 潮周期内 DSP 变化分为 3 个阶段, 分别为高能波况(T1 和 T9)、中等波况(T2—T3 和 T6*—T8*)和低能波况(T4*—T5)(表 2)。高能波况期间, 大潮期间 A 点和 B 点的 DSP 变化比 T1 小潮期间小, 说明相同波况下 DSP 受潮位影响大, 较小潮差下 BLE 变化显著(图 3、表 2)。T4*—T5 滩面相对于 T2—T3 无明显变化, T6*—T8*滩面相对于 T4*—T5 表现为淤积(A 增加 109.7 mm, B 增加 22.7 mm), 说明低能波况向中等波况转变有利于滩面淤积, 而较小波能下的 BLE 变化则有限。

DSP-A 的变化范围为 -188.0~277.4 mm, 从平均 DSP-A 标准差可知, 滩面变化最小值出现在中潮($0.5 \text{ m} < H_s < 1 \text{ m}$), 滩面变化最大值出现在小潮



(a) A 点平均床面高程(DSP)的相对变化;
(b) B 点平均床面高程(DSP)的相对变化

图 3 潮汐周期内平均床面高程的相对变化

Fig.3 Relative changes of mean bed elevation during tidal cycles

表2 不同潮情和波况下3个观测点(A、B、C)平均DSP变化

Table 2 Changes of average DSP at 3 observation points (A, B, C) under different tide and wave conditions

潮汐状态/波况	潮汐周期	平均DSP-A /mm	平均DSP-A的标准差/mm	平均DSP-B /mm	平均DSP-B的标准差/mm	平均DSP-C /mm	平均DSP-C的标准差/mm	平均 H_s /m
小潮	T1	215.3	9.37	225.3	22.86	-	-	0.37
中潮	T2—T7	337.5	62.46	291.9	29.31	194.7	26.00	0.66
大潮	T8—T9	279.5	33.25	269.4	45.71	184.6	2.51	0.87
高能 I	T1	215.3	9.37	225.3	22.86	-	-	1.37
中等 I	T2—T3	375.0	9.53	284.3	66.17	-	-	0.71
低能	T4*—T5	372.4	13.42	307.5	7.41	193.1	3.19	0.45
中等 II	T6*—T8*	262.7	6.12	284.8	12.42	189.2	8.19	0.72
高能 II	T9	331.5	30.61	278.3	23.26	188.6	2.15	1.04

注：“-”表示无数据。

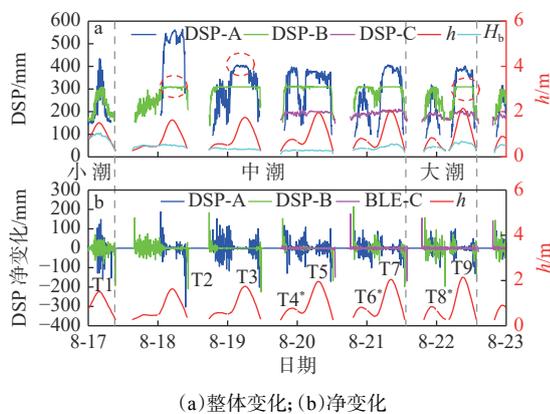


图4 2021年8月17—22日DSP变化

Fig. 4 Changes in DSP from 17 to 22 August 2021

($H_s > 1$ m)(图 3a、表 2); DSP-B 的变化范围介于 $-39.0 \sim +41.8$ mm, 滩面变化最小值出现在大潮 ($0.5 < H_s < 1$), 滩面变化最大值出现在小潮 ($H_s > 1$ m)(图 3b、表 2); C 点变化的最大值出现在小潮和高能波况下。DSP-A、DSP-B 和 DSP-C 的变化结果表明, 较高潮位与弱浪 ($H_s < 1$ m) 耦合导致滩面床位变化有限, 较低潮位与强浪 ($H_s > 1$ m) 耦合导致滩面高程变化更明显。次高潮和最高潮对 BLE 变化影响也不同, T6* 和 T8* 相对于前一潮汐周期的平均 DSP-A 为负, 可见次高潮时期 BLE 增大, 最高潮时期 BLE 减小(图 3a)。

2.2.2 不同观测点床面变化特征

潮汐周期内平均 DSP 变化幅度整体表现为 $DSP-A > DSP-B > DSP-C$, BLE 在涨潮时降低, 退潮时升高(图 4a)。不同的是, 在 T2—T7 和 T9 的高水位处, DSP 的净变化接近于 0(图 4b), 说明高潮位时 BLE 相对稳定(图 4a 红色虚线圈)。T1—T9 中, DSP-B 在涨潮时增大, 在退潮时减小(图 4a), 但 DSP 的净变化幅度不同, DSP-B 净变化小于 DSP-A 净变化(图 4b)。T4*—T9 的 DSP-C 趋于稳

定, 最大净 DSP-C 仅能达到 32 mm(图 4b), 明显小于 A 和 B 点, 说明 C 点无明显变化。

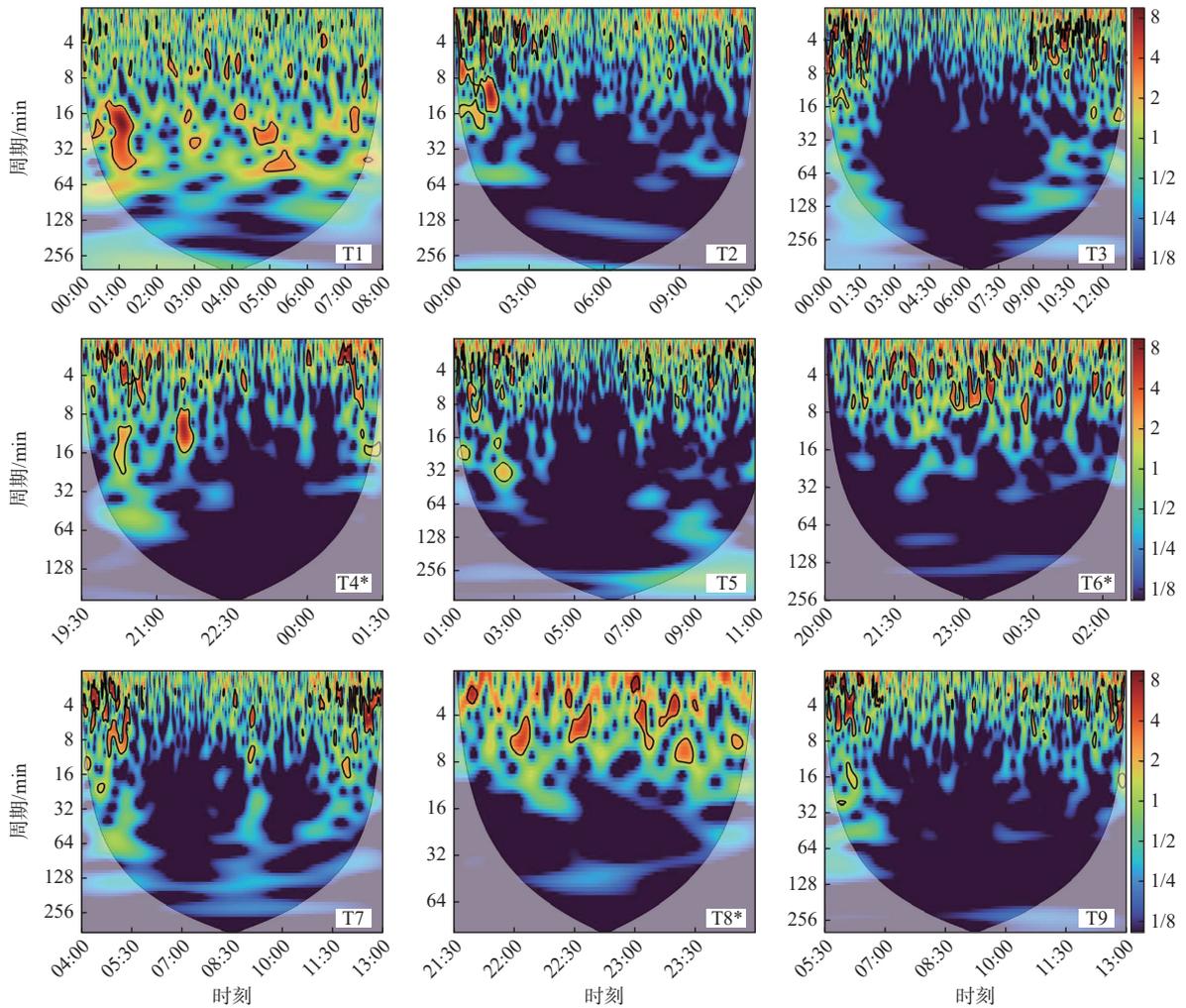
2.2.3 不同潮周期床面高程振荡特征

对潮周期内变化最大的 A 点 BLE 进行小波分析(图 5), 分析结果表明: ①小潮期, 16~32 min 内能量均匀分布, 在 17 日 00:00—08:00, 每间隔 2 h 出现 1 次高能量事件, 而 T9 中 BLE 呈现 2~6 min 周期性变化, 仅在 22 日 05:30—06:00 出现高能量事件。②中潮期, 除去“次高潮”期 T4* 和 T6*, BLE 周期性振荡较为相似, 均呈现 2~16 min 周期性变化, 且振荡持续时间基本一致。③“次高潮”期, BLE 振荡持续时间更长, T4* 期间 12 min 波段在 20 日 20:30、21:30 和 21 日 01:30 均有高能事件发生, T6* 呈现 4~6 min 连续性周期振荡。④大潮期, T8* 期间 2~8 min 内能量均匀分布, 在 21 日 21:30~23:30 每间隔 0.5 h 出现 1 次高能量事件, T9 期间 BLE 变化特征与中潮期间相似。较小潮差时, BLE 周期振荡持续时间更长, 呈现 16~32 min 周期性变化, “次高潮”期间 BLE 的变化比“高潮”期间更强烈, 高能事件出现次数更多。

3 讨论

3.1 床面高程与影响因子的相关性

采用 Spearman 秩次相关系数^[24]分析 DSP-A、DSP-B、DSP-C 与波陡(ε)、最大波高(H_{max})、有效波高(H_s)、有效波周期(T_s)、破波相似参数(ζ_b)、破波波高(H_b)、水深(h)和深水波高(H_0)的相关性(表 3)。DSP-A、DSP-B 与 ε 、 ζ_b 、 h 呈极显著相关(表 3), 与 T_s 相关性不大($p > 0.05$, 表 2)。DSP-A 与 H_0 、DSP-B 与 H_b 均呈极显著相关($p < 0.001$,



阴影灰色锥线表示影响锥, 黑线表示 5% 的红色噪声显著性水平线, 黄红区域代表 BLE 高能量事件

图 5 不同潮周期内 BLE 的周期振荡变化

Fig.5 Periodic oscillation of BLE in different tidal periods

表 3 床面变化与水动力因子斯皮尔曼相关系数 (p) 分析

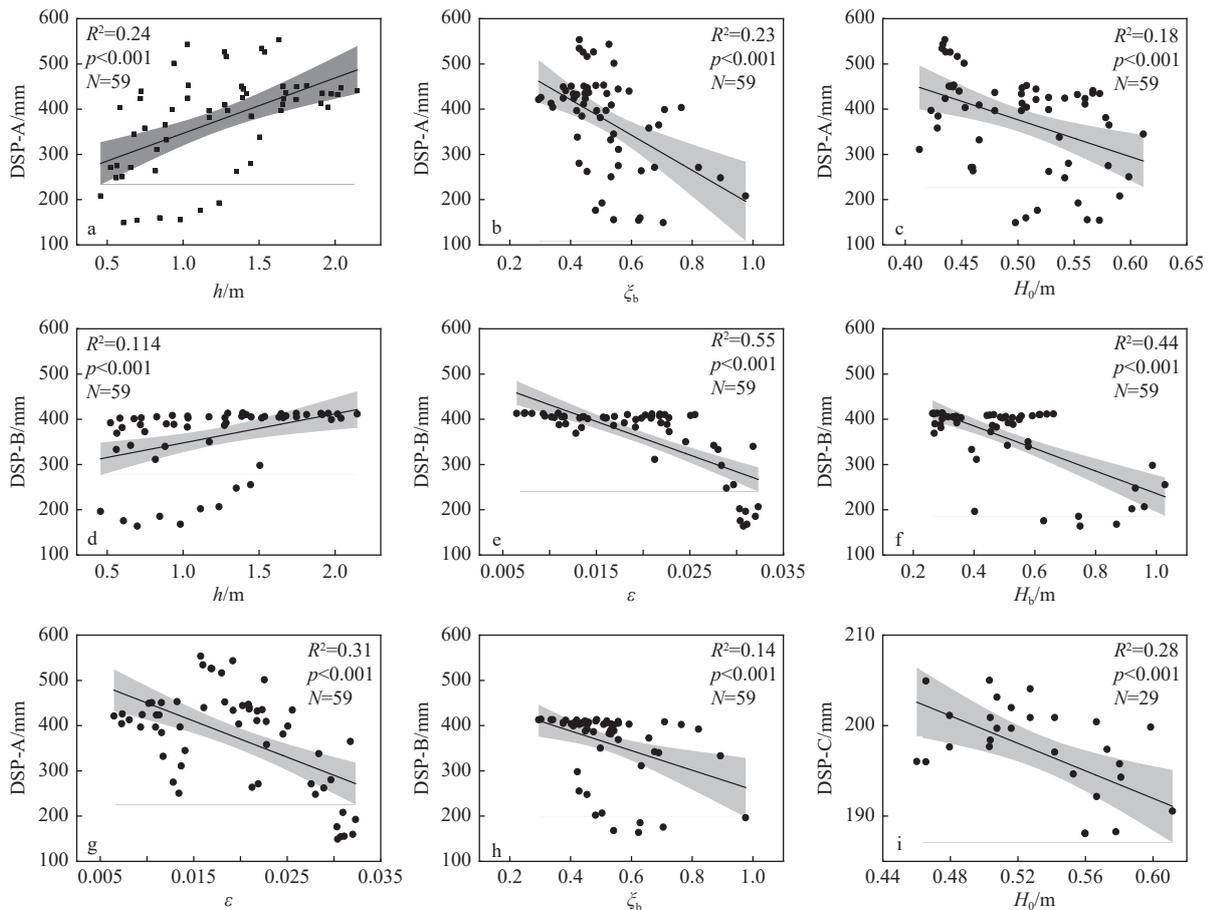
Table 3 Spearman correlation coefficient between bed level changes and hydrodynamic factors

变量	DSP-C		DSP-B		DSP-A	
	r_s	p	r_s	p	r_s	p
ε	-0.204	0.289	-0.658**	<0.001	-0.475**	<0.001
H_{\max}	0.095	0.626	-0.336**	0.010	-0.083	0.536
H_s	-0.048	0.804	-0.425**	0.001	-0.145	0.278
T_s	-0.158	0.414	-0.231	0.081	-0.190	0.154
ζ_b	-0.195	0.312	-0.547**	<0.001	-0.478**	<0.001
H_b	-0.021	0.915	-0.447**	<0.001	-0.127	0.344
h	0.350	0.063	0.624**	<0.001	0.560**	<0.001
H_0	-0.529**	<0.001	-0.164	0.220	-0.428**	<0.001

注: **相关性显著水平0.01(双尾), 粗体表示极显著相关性($p < 0.001$)。

表 2), DSP-C 与 H_0 呈极显著相关, 而与其他 7 个参数 (ε , H_{\max} , H_s , T_s , ζ_b , H_b , h) 无相关关系 (表 2)。这是因为 C 点位于外碎波带, 受深水波高影响较大, 而 A 点和 B 点在内碎波带, 受到碎波带的波浪、潮

位高低以及破碎类型影响较大。图 6 表明, DSP-A 随着潮位升高而增加, 随波陡变大、波和波非线性相互作用增强, 随着 ζ_b 减小、 H_0 增加而降低; DSP-B 与 DSP-A 变化趋势基本一致, 与潮位变化呈正相



灰色条带表示 95% 置信区间, R^2 为相关系数, N 为样本数量

图 6 床面高程与水动力因子的相关性 ($p<0.001$)

Fig.6 Correlation between bed level elevation and hydrodynamic factors ($p<0.001$)

关系,与 ζ_b 、 H_b 呈负相关关系; DSP-C 随深水波高增加而降低。

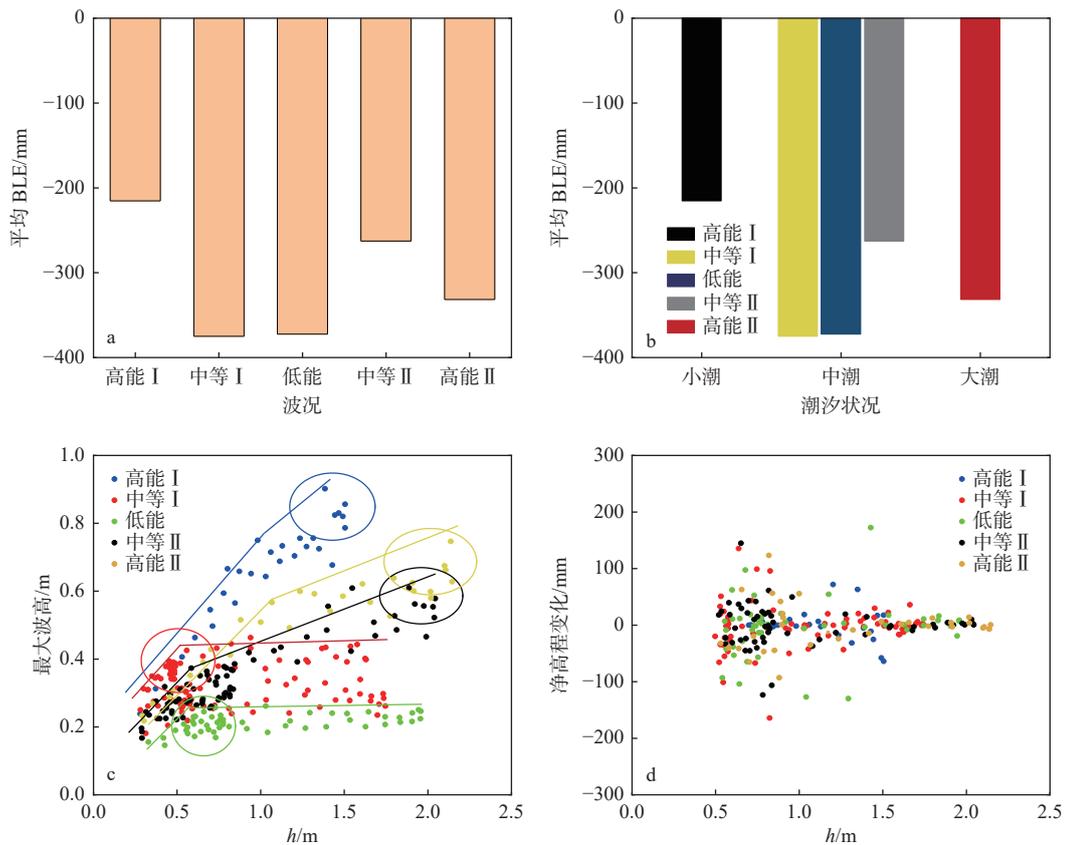
3.2 碎波带波潮耦合与海滩恢复

3.2.1 波潮耦合对床面高程的调制作用

不同潮汐状况下床面变化特征显著,这是潮汐、波浪过程和滩面坡度等耦合作用的结果。研究发现,在较小潮差和较强入射波的耦合作用下,床面高程变化显著,而较小波能下的 BLE 变化则有限(表 2)。为探究波潮耦合对 BLE 的调制作用,分析了不同波能和潮汐状况对 BLE 变化的影响(图 6a、f),发现 BLE 与 h 呈负相关,与 H_b 呈正相关关系,这一结果验证了图 7a 中低能波况向高能波况 I 转变时平均 BLE 增大。这与正常波浪条件下波浪能条件对海滩的影响相反,后者是相对高能波条件下床面侵蚀^[25]。在海滩恢复过程中,较高的波浪能促进淤积,加速海滩的恢复,这一结果与 YU 等^[13]对台风后海滩剖面的调查结果一致。

本研究发现较小潮差有利于滩面发育,小潮时

的床面变化比大潮时的床面变化更明显(图 4a),这也很好验证了图 7b 中高能波况下的小潮平均 BLE 大于大潮。潮差较小的情况下, BLE 周期性振荡时间范围广(图 5-T1),此时碎波带波浪输沙时间长,有利于沉积物向岸运输。而潮差较大的情况下,床面振荡变化不显著(图 5-T9)。不同潮情下,波浪随潮汐变化不同, T1 和 T6*—T9 潮周期内,波浪随波浪变化明显, T2—T5 潮周期波浪受潮汐影响小(图 4a)。潮汐调制深度通过能量耗散和破波波高来影响入射波高,进而对滩面产生影响^[6]。由图 7c 可知,高能波况 I 时,当 $h<0.98$ m,最大波高可能达到波陡极限而发生破碎,同时,最大波高与 h 呈正相关关系,波浪随潮汐变化显著,这与小潮时期的波浪与潮位的关系一致(图 2a、c),说明小潮时期在破碎波作用下滩面变化更显著,也验证了图 7d 净高程变化最大值对应 h 值与图 7c 实心圆对应的 h 值基本一致。中等波况 I、低能波况、中等波况 II 和高能波况 II 分别在 $h<0.56$ m、 $h<0.60$ m、 $h<0.59$ m 和 $h<1.07$ m 处出现同样的情况。在低能波



(a)不同波况下的床面高度变化; (b)同一波况不同潮汐状况下的床面高度变化; (c)最大波高随水深的变化, 实线表示水深对最大波高的限制; (d)不同波况下净床面高程变化和潮位的散点图

图 7 波潮耦合下的床面高程变化

Fig.7 The bed level changes under the combination of wave and tidal

况和中等波况 I 中, h 对最大波高调制作用随 h 增大到一定值后消失。

3.2.2 海滩恢复与波潮耦合

波浪和潮汐循环是海滩形态动力学的驱动因素, 也受到当地地质环境的强烈控制(包括岬角海滩范围)^[25-27], 这方面体现在 CASTELLE 等^[26]和 COCO 等^[28]提出的海滩分类中, 该分类基于海湾长度与碎波带的宽度之比 δ 。当 $\delta < 6$, 地质因素占主导地位。本文研究区域为岬间海滩, 观测期间波浪方向 S 接近垂直于海滩, 研究区域受岬角影响小。VOUSDOKAS 等^[29]认为, 风暴过程中, 海滩初始形态是海滩响应的主要控制因素, 而风暴后期主要受水动力控制, 特别是潮位和涌浪高度。具体而言, 海滩恢复过程是风暴过程中形成的海滩形态随地形变化重新适应常规的动力条件^[14], 水动力条件在这一过程中起着重要作用。风暴过后, 在波浪能相对较低的条件下, 海滩倾向于淤积, 这是一个比侵蚀慢得多的过程^[30]。YU 等^[13]研究了台风后 2 种不同波浪能条件下 2 个岬角海滩的滩面和沉积特征, 发现高波能下海滩恢复迅速, 风暴后细砂至

中砂明显增加, 而低波浪能海滩在台风过后 4 个月内几乎没有沙子堆积或恢复的迹象, 海滩轮廓只有微小的变化。EGENSE^[31]将美国南加州岬角海滩的恢复分为 2 个阶段。在第 1 阶段, 海滩可以在风暴后的几天到几十天内恢复近一半的侵蚀沙子; 而第 2 阶段的恢复速度放缓并持续的时间比第一阶段更长^[32], 说明海滩恢复需要更长的时间。研究发现, 较低潮位与强浪耦合下海滩迅速恢复, 而较高潮位与弱浪耦合下海滩恢复有限, 这与前者研究一致。在现场观测中, 研究区床面高程变化显著, 沿岸沙坝正在形成(图 1e), 这与 EGENSE^[31]提出的海滩恢复第 1 阶段相对应, 而这一阶段将会持续一段时间。因此, 研究风暴后海滩水动力特征有助于揭示海滩恢复能力, 而风暴后海滩恢复的第 1 阶段更应得到海滩管理者的关注。

4 结论

本研究选取海陵岛东岛金沙滩碎波带在台风后恢复期进行为期 6 天的现场观测, 通过现场获取

高频、高精度的床面高度、波浪等数据,分析风暴后海滩恢复期碎波带床面高度变化特征及影响因子。金沙滩海滩恢复过程具有以下特征:

(1) 风暴后海滩恢复期间,波浪以卷破波为主,较低潮位与强浪耦合下海滩迅速恢复,而较高潮位与弱浪耦合下海滩恢复有限。

(2) 风暴后,较小潮差下 BLE 周期性振荡时间更长,有利于海滩恢复;在混合半日潮中,床面高度在“最高潮”时减小,在“次高潮”时增加,“次高潮”期间 BLE 周期性振荡变化比“高潮”期间更显著。

(3) 床面高程变化受多种水动力参数共同影响,测点位置不同对潮位变化和波浪作用力反映不同。内碎波带受到碎波带的波浪、潮位高低以及破碎类型影响较大,而外碎波带受到深水波高的影响较大。

参考文献:

- [1] PEREGRINE D H. Surf zone currents[J]. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 1998, 10(1): 295-309.
- [2] PANG W H, ZHOU X Y, DAI Z J, et al. ADV-based investigation on bed level changes over a meso-macro tidal beach[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 733923.
- [3] PULEO J A, LANCKRIET T, BLENKINSOPP C. Bed level fluctuations in the inner surf and swash zone of a dissipative beach[J]. *Marine geology*, 2014, 349: 99-112.
- [4] 曾春华, 胡泰桓, 张会领, 等. 徐闻青安湾海滩冲流带对台风“韦帕”的波动响应特征 [J]. *广东海洋大学学报*, 2021, 41(5): 74-83.
- [5] BIAUSQUE M, SENECHAL N. Seasonal morphological response of an open sandy beach to winter wave conditions: the example of Biscarosse Beach, SW France[J]. *Geomorphology*, 2019, 332: 157-169.
- [6] KROON A, MASSELINK G. Morphodynamics of intertidal bar morphology on a macrotidal beach under low-energy wave conditions, North Lincolnshire, England[J]. *Marine geology*, 2002, 190(3/4): 591-608.
- [7] MASSELINK G, AUSTIN M, TINKER J, et al. Cross-shore sediment transport and morphological response on a macrotidal beach with intertidal bar morphology, Truc Vert, France[J]. *Marine Geology*, 2008, 251(3/4): 141-155.
- [8] 陈子燊, 李志强, 李志龙, 等. 海滩碎波带波性质的统计对比分析 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2002, 41(6): 86-90.
- [9] HU T H, LI Z Q, ZENG C H, et al. Applications of EMD to analyses of high-frequency beachface responses to Storm Bebinca in the Qing'an Bay, Guangdong Province, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 41(5): 147-162.
- [10] SCOTT T, MASSELINK G, O'HARE T, et al. The extreme 2013/2014 winter storms: beach recovery along the southwest coast of England[J]. *Marine Geology*, 2016, 382: 224-241.
- [11] HOUSER C, WERNETTE P, RENTSCHLAR E, et al. Post-storm beach and dune recovery: implications for barrier island resilience[J]. *Geomorphology*, 2015, 234: 54-63.
- [12] CASTELLE B, BUJAN S, FERREIRA S, et al. Foredune morphological changes and beach recovery from the extreme 2013/2014 winter at a high-energy sandy coast[J]. *Marine Geology*, 2017, 385: 41-55.
- [13] YU F, SWITZER A D, LAU A Y A, et al. A comparison of the post-storm recovery of two sandy beaches on Hong Kong Island, southern China[J]. *Quaternary international*, 2013, 304: 163-175.
- [14] GE Z P, DAI Z J, PANG W H, et al. LIDAR-based detection of the post-typhoon recovery of a meso-macro-tidal beach in the Beibu Gulf, China[J]. *Marine Geology*, 2017, 391: 127-143
- [15] BRUUN P. Coast erosion and the development of beach profiles[M]. America: Beach Erosion Board, 1954.
- [16] GALVIN J C J. Breaker type classification on three laboratory beaches[J]. *Journal of geophysical research*, 1968, 73(12): 3651-3659.
- [17] 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.
- [18] BRAND E, MONTREUIL A L, DAN S, et al. Macro-tidal beach morphology in relation to nearshore wave conditions and suspended sediment concentrations at Mariakerke, Belgium[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2018, 24: 97-106.
- [19] BATTJES J A. Surf similarity[M] Copenhagen: Coastal Engineering, 1974: 466-480.
- [20] KOMAR P D, GAUGHAN M K. Airy wave theory and breaker height prediction[M] Vancouver: Coastal Engineering Proceedings, 1972: 405-418.
- [21] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [22] MASSELINK G, RUSSELL P. Flow velocities, sediment transport and morphological change in the swash zone of two contrasting beaches[J]. *Marine Geology*, 2006, 227(3/4): 227-240.
- [23] DELGADO R, MONTREUIL A L, DAN S, et al. Contribution of waves and currents to observed suspended sediment distribution patterns in a macro-tidal beach[C]// Leuven: The 13 International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes, 2015.
- [24] KENDALL M, GIBBONS J D. Rank Correlation Methods[M]. New York: Oxford University Press, 1990.
- [25] SHORT A D. Handbook of beach and shoreface morphodynamics[M]. Chichester: John Wiley, 1999.
- [26] CASTELLE B, COCO G. The morphodynamics of rip channels on embayed beaches[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 43: 10-23.
- [27] DALY C J, BRYAN K R, WINTER C. Wave energy distribution and morphological development in and around the shadow zone of an embayed beach[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 93: 40-

- 54.
- [28] COCO G, BRYAN K R, GREEN M O, et al. Video observations of shoreline and sandbar coupled dynamics[C]//Coasts and Ports 2005: Coastal Living-Living Coast; Australasian Conference; Proceedings, Barton ACT: Institution of Engineers, 2005: 471-476.
- [29] VOUSDOKAS M I, ALMEIDA L P M, FERREIRA Ó. Beach erosion and recovery during consecutive storms at a steep-sloping, meso-tidal beach[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(6): 583-593.
- [30] THOM B G, HALL W. Behaviours of beach profiles during accretion and erosion dominated periods[J]. *Earth surface processes and landforms*, 1991, 16(2): 113-127.
- [31] EGENSE A K. Southern California beach changes in response to extraordinary storm[J]. *Shore and Beach*, 1989, 57(4): 14-17.
- [32] WANG P, KIRBY J H, HABER J D, et al. Morphological and sedimentological impacts of Hurricane Ivan and immediate post-storm beach recovery along the northwestern Florida barrier-island coasts[J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 22(6): 1382-1402.

Analysis of bed level elevation during beach recovery after storm on Golden Beach, Hailing Island, Guangdong

LIU Run¹, LI Zhiqiang^{2*}, ZHU Daoheng², HU Pengpeng³, SUN Yan¹, ZENG Chunhua⁴

(1 College of Chemistry and Environment, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2 College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3 School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 4 College of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: The bed surface changes during the initial stage of beach recovery after a typhoon are an important research content for the mechanism of beach evolution. We analyzed the characteristics of the bed level elevation (BLE) change under various tidal cycles and wave conditions using the BLE and wave and tidal data of the surf zone of Golden Beach (Jinshatan, Hailing Island (Yangjiang, Guangdong, South China), which were obtained from field observation from August 17 to 22, 2021. We then used continuous wavelet transform to analyze the characteristics of the cycle change of the BLE. The findings are ① during the beach's storm-related recovery phase, the majority of the waves are breaking waves, and the beach recovers quickly at low tide when there are powerful waves, while the beach recovers to a limited extent at high tide coupled with weak waves. ② The BLE decreases during the "highest tide" and raises during the "sub-highest tide", and the periodic change of BLE during the "sub-highest tide" is more substantial. The beach recovers to a limited extent during high tide combined with weak waves. ③ Various hydrodynamic factors affect the change in BLE, and the different observation point have different responses to tidal level changes and wave forces. The BLE is more affected by deep-water wave height when observation site is beyond the surf zone, while the wave, the tidal level, and the type of broken waves inside the surf zone are main impact factors on the BLE.

Key words: tropical storm; surf zones; bed level changes; wavelet analysis; beach restoration