

# 雷州半岛南部海滩对 1720 号台风(卡努)的响应研究

朱士兵, 李志强

广东海洋大学化学与环境学院、海洋工程学院, 广东 湛江, 524088

**摘要:** 海滩风暴响应的观测和研究有助于加深对海滩过程的认识。2017 年 10 月 16 日台风“卡努”在广东徐闻县沿海登陆, 对雷州半岛南部海滩造成了显著影响。文章通过海滩剖面观测和沉积物采样, 探讨了该区域海滩对台风“卡努”的响应特征, 得出以下主要结论。1) 台风浪作用下, 海滩表层沉积物变粗, 分选性变差。海滩状态朝着更加消散的状态转化, 以缓冲和适应高强度波浪的能量。2) 受到岬角和湾口朝向、大小等因素影响, 各海滩及同一海滩的不同岸段剖面变化表现出差异性。台风作用后海滩可能形成水下沙坝, 或者在海滩上部形成滩肩等特征地形。因此, 研究海滩风暴响应时, 要注意到区域地质地貌的影响。3) 水下礁坪、巨型砂质岬角等因素影响了台风过程灯楼角海滩的变化。对这种海滩-珊瑚礁坪系统的风暴效应, 还需要进行进一步探讨和更详细的观测和研究。

**关键词:** 雷州半岛; 台风; 海滩响应; 海滩剖面; 地形动力状态

中图分类号: P736; P737; P732.31 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2019)01-0096-104

## Study on beach response to Typhoon Khanun (No. 1720) along southern Leizhou Peninsula

ZHU Shibing, LI Zhiqiang

College of Chemistry and Environment, College of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

**Abstract:** Observations and research on beach responses to storms help deepen our understanding of beach processes. Typhoon Khanun (No. 1720) made landfall in Xuwen, Guangdong on October 16, 2017. The typhoon caused significant impacts on the beaches along the southern Leizhou Peninsula. Based on the field profile survey and sediment sampling before and after the typhoon landfall, beach response characteristics are investigated in this study. The main results show the following. (1) Under extreme wave conditions, the surface sediment became coarser and the sorting was worse. Beach states transformed toward more dispersed states to buffer and adapt to the high intensity wave energy. (2) Beaches and different segments in the same beach had different responses. These differences were influenced by the headlands, bays' orientations and sizes. Submarine bar or beach berm may occur on the beach profile. Attention should be paid to the roles of geological and geomorphologic factors when studying beach responses to storms. (3) Changes of the Denglujiao Beach were influenced by the reef flat and the huge sandy headland. The beach response of beach-coral reef flat system to storm needs further study. More detailed observations and studies of beach responses to storms are needed in the future.

**Key words:** Leizhou Peninsula; typhoon; beach response; beach profile; morphodynamic state

收稿日期: 2018-03-06; 修订日期: 2018-06-07。孙淑杰编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(41676079); 广东海洋大学创新强校工程项目(Q18307); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA13010103)

作者简介: 朱士兵(1992—), 男, 河南省商丘市人, 硕士研究生, 研究方向为海岸资源与环境。E-mail: 26585759@qq.com

通信作者: 李志强(1974—), 教授, 博士。研究方向为海滩过程、海岸工程环境。E-mail: qiangz1974@163.com

**Received date:** 2018-03-06; **Revised date:** 2018-06-07. Editor: SUN Shujie

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (41676079); Project of Enhancing School With Innovation of Guangdong Ocean University (Q18307); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA13010103)

**Corresponding author:** LI Zhiqiang. E-mail: qiangz1974@163.com

台风引发的增水和大浪会造成海滩地貌发生大尺度的变形以及沉积物结构和分布的显著改变(Coco et al, 2013)。全球变化背景下, 台风频率有逐年增加的趋势(Gornity et al, 1982), 因此海滩风暴响应越来越引起研究者的注意。美国近岸过程研究小组(The Nearshore Processes Community)在总结过去 40 年海滩近岸过程研究进展的基础上, 将风暴前后海滩的侵蚀和恢复过程作为下一个 10 年的重要研究命题之一(The Nearshore Processes Community, 2015; Holman et al, 2015)。

欧美国一直比较注重海滩地貌风暴响应的模式研究(Cooper et al, 2004; Backstorm et al, 2008; Gervais et al 2012; Haerens et al, 2012), 但这些模式在预测风暴导致的海岸响应结果上仍不准确(Forbes et al, 2004; Anthony, 2013)。如 Basco(1996)观测 37 个海滩对风暴的响应时, 发现不同位置的海滩由风暴引起的侵蚀和风暴后的恢复情况均不相同。Costas 等(2005)通过观测伊比利亚半岛西北部的罗达斯海滩, 发现风暴条件下滩面主要表现为平行后退。Coco 等(2014)研究海滩对系列风暴响应后认为, 波高对海滩的侵蚀作用有限, 需要考虑更多因素, 不能放大单个风暴的影响。

国内海岸研究者也越来越重视海滩的风暴响应观测和研究。陈子荣(1995)、童宵岭等(2014)探讨了台风大浪期间弧形海滩不同岸段的侵蚀方式差别; 蔡锋等(2004)、彭俊等(2008)研究了台风前进方向两侧海滩的风暴效应差异性; 陈子荣等(2009)观测到台风增水对海滩剖面变化的影响; 蔡锋等(2002, 2006)研究了台风作用下不同海滩的变形特征和侵蚀状态; 邵超等(2016)讨论了海滩风暴响应特征及其与珊瑚礁发育之间的联系; 龚昊等(2017)对比分析了 2014 年台风“威马逊”和“海鸥”登陆前后 2 个海滩地形和沉积物的动态响应, 认为海滩的不同走向及台风的风向变化是造成海滩响应差异的重要原因; 黎树式等(2017)观测了北海银滩对 2014 年台风“威马逊”的沉积响应过程。

受风暴过程复杂性和观测条件恶劣性的限制, 目前对风暴状态下海滩演变的详细过程和内在机理研究还处于起步阶段, 还需要大量的现场观测(Forbes et al, 2004; Anthony, 2013; Holman et al, 2015)。2017 年 10 月 16 日, 1720 号台风“卡努”在广东徐闻县沿海登陆, 登陆后台风由东向西穿过雷州半岛。台风造成海面急剧增水, 强烈的风浪直接侵袭海滩后滨, 短时间内对海滩地貌造成显著影响, 为分析研究区海滩对风暴的响应提供了很好的条

件。本文基于现场地形观测和沉积物采样, 探讨台风“卡努”作用下的海滩响应特征。

## 1 区域环境背景与台风“卡努”概况

### 1.1 区域环境背景

研究区域位于雷州半岛南部、琼州海峡北侧(图 1)。该海岸带地质构造上属于琼雷拗陷。受基岩岬角控制, 沿岸岸线呈锯齿状, 岬角、海滩相间, 海岸地貌类型多样。

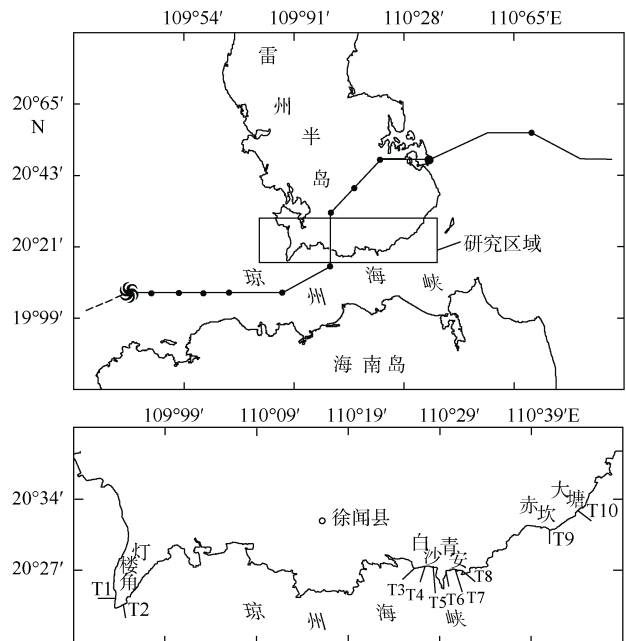


图 1 台风路径及研究区位置图(T1—T10 为剖面位置)

Fig. 1 Typhoon path and study area (T1—T10 are profiles)

研究区的波浪主要由外海经琼州海峡传入, 其次为琼州海峡本身产生的有限风区波浪。受海域开敞性差异影响, 海峡西部平均波高为 0.6m, 中部为 0.4m, 东部为 0.9m(海南省地方志办公室, 2006)。受季风影响, 波浪条件的变化具有显著的季节性。

琼州海峡沿岸自东向西潮汐类型分别为不规则半日潮、不规则全日潮和规则全日潮 3 种。潮差沿程变化大, 东段平均潮差为 0.8—1.1m, 西段平均潮差为 1.5m(王宝灿 等, 2006)。

### 1.2 台风“卡努”概况

2017 年 10 月 12 日台风“卡努”正式形成, 10 月 16 日凌晨在广东徐闻县东部沿海地区登陆, 中心附近最大风力  $28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (10 级)。10 月 14 至 16 日, 南海北部和中部海域、北部湾、琼州海峡海域有 8~10 级大风, 台风中心经过的附近海域风力可达 11~12 级, 阵风 13~15 级。

台风登陆前后气象特征和海区波浪特征分别见表 1 和表 2。

表 1 台风“卡努”经过琼州海峡时气象数据

Tab. 1 Meteorological data during Typhoon Khanun

时刻	中心位置	最大风速/(m·s <sup>-1</sup> )	中心气压/hPa	移动速度/(km·h <sup>-1</sup> )	移动方向	7 级风圈半径/km
2017-10-15T22:00	111.6°E, 20.6°N	38	965	20	W	280
2017-10-15T23:00	111.4°E, 20.6°N	35	970	20	WWS	200
2017-10-16T00:00	111.1°E, 20.6°N	33	975	20	WWS	180
2017-10-16T01:00	110.9°E, 20.7°N	30	980	20	WWS	180
2017-10-16T02:00	110.7°E, 20.7°N	28	985	20	W	180
2017-10-16T03:00	110.5°E, 20.6°N	28	985	20	W	180
2017-10-16T04:00	110.3°E, 20.6°N	25	990	15	WWS	

注: 数据来自中国天气台风网, <http://typhoon.weather.com.cn>。

表 2 台风“卡努”过境期间研究区域附近波高情况(单位: m)

Tab. 2 Wave heights in the Qiongzhou Strait during Typhoon Khanun. Units: m

	北部湾	琼州海峡	雷州半岛东部
2017-10-13	1.8~2.3	1.8~2.3	2.5~3.5
2017-10-14	2.0~2.5	2.0~2.5	3.0~4.0
2017-10-15	2.0~2.8	2.0~2.8	7.0~10.0
2017-10-16	5.0~7.0	5.0~7.0	7.0~10.0
2017-10-17	2.0~3.0	1.8~2.3	1.8~2.3

## 2 研究方法

### 2.1 现场观测与沉积物样品分析

2017年10月8日(台风前)和2017年10月22日(台风后)对雷州半岛南部的灯楼角、白沙湾、青安湾、赤坎、大塘等5个海滩的10条剖面进行观测(图1)。其中, 灯楼角东西两侧各1条剖面(T1、T2), 白沙湾3条剖面(T3、T4、T5), 青安湾3条剖面(T6、T7、T8), 赤坎1条剖面(T9), 大塘1条剖面(T10)。剖面测量仪器为南方测绘的NTS-352型全站仪。后滨选取固定点打桩, 垂直于岸向海对海滩剖面进行测量。测量时间选择在最低潮, 向海测量至徒步涉水最深处, 测量点间距约3m, 对剖面地形变化位置加密测量。

台风前后在每个剖面的潮上带、潮间带和潮下带固定点采集表层泥沙样品。沉积物取样过程中首先去除表面腐殖质和垃圾, 将表面5cm左右沉积物进行掺匀采样。对各海滩泥沙样品采用振动筛进行筛分, 筛分粒径范围为 $-2.25\phi$ 至 $4\phi$ ( $\phi = -\log_2 D$ ,  $D$ 为中值粒径), 筛分间隔为 $0.25\phi$ 。筛分后, 采用Collias 矩法来计算沉积物的粒度参数: 平均粒径( $M_d$ )、分选系数( $Q_d$ )、偏态系数( $S_K$ )、峰态系数( $M_o$ )。

### 2.2 海滩状态参数

海滩状态变化是地形与水动力相互作用的三维地形动力问题, 海滩状态特征是海滩地形动力的反映, 本文将探讨台风作用下海滩状态的变化。Wright 等1984年提出通过无量纲沉降速率( $\Omega$ )来划分小潮海滩的类型(Wright et al, 1984, 1985):

$$\Omega = H_b / W_s T \quad (1)$$

式中,  $H_b$  是破波波高(m),  $W_s$  是泥沙沉降速率( $m \cdot s^{-1}$ ),  $T$  是波浪周期(s)。因台风过程中破波波高资料不易得到, 可通过海滩坡度、波浪、粒径等有关的参数间接求得。Sunamura(1984)通过因次分析得出海滩坡度计算:

$$m = 0.12 \times \left[ \frac{\bar{H}_b}{\bar{T} \sqrt{gD}} \right]^{-0.5} \quad (2)$$

式中,  $m$  为海滩坡度,  $\bar{H}_b$  为破波波高日平均值,  $\bar{T}$  为对应的波周期日平均值,  $g$  为重力加速度,  $D$  为中值粒径。可推导出  $\bar{H}_b / \bar{T} = f(m)$ , 根据公式中对波浪要素的定义, 可用  $\bar{H}_b / \bar{T}$  代替  $\bar{H}_b / T$ , 其中,  $T$  是波浪周期(s)。依据1975年我国水电部颁布的《水文测量规范规定》(中华人民共和国水利部, 1975)中的泥沙沉速公式和采集到的沉积物样品的平均粒径大小, 选择  $D=0.15 \sim 1.5mm$ , 冈恰诺夫沉降过渡区经验公式, 即:

$$\omega = 6.77 \times \frac{\rho_s - \rho}{\rho} D + \frac{\rho_s - \rho}{1.92 \times \rho} \left( \frac{T}{26} - 1 \right) \quad (3)$$

式中  $\rho_s=2650kg \cdot m^{-3}$  为沙的密度,  $\rho=1025kg \cdot m^{-3}$  为海水的密度,  $D$  为沉积物中值粒径,  $T$  为温度,  $\omega$  为沉降速率( $cm \cdot s^{-1}$ )。对以上3个公式联立可求得:

$$\Omega = \frac{0.09 \times \sqrt{D}}{m^2 (6.77 \times D + 0.02 \times T - 0.52)} \quad (4)$$

根据  $\Omega$  值定义了2种极端海滩类型和4种中间海滩状态, 6种海滩状态类型和基本特征是(Wright et al, 1984, 1985):

当  $\Omega > 6$  时, 海滩为消散型。主要特征是滩面比较平缓, 沉积物多为细砂, 高波能, 常出现短周期波浪。

当  $\Omega < 1$  时, 海滩为反射型。滩面坡度较陡, 沉积物多为中到粗砂, 发射性海滩一般为低波能的涌浪剖面。

当  $\Omega$  介于 1~6 之间时, 海滩为过渡型海滩。根据  $\Omega$  的增加, 过渡型海滩可分为低潮台地、横向

沙坝和裂流、韵律沙坝和海滩、沿岸沙坝槽谷四种类型。

### 3 结果

#### 3.1 海滩剖面形态的变化

研究区海滩剖面的变化, 可以直观地反映台风“卡努”对研究区岸滩造成的影响。图 2 为台风前后研究区 5 个海滩 10 条剖面的形态变化图。

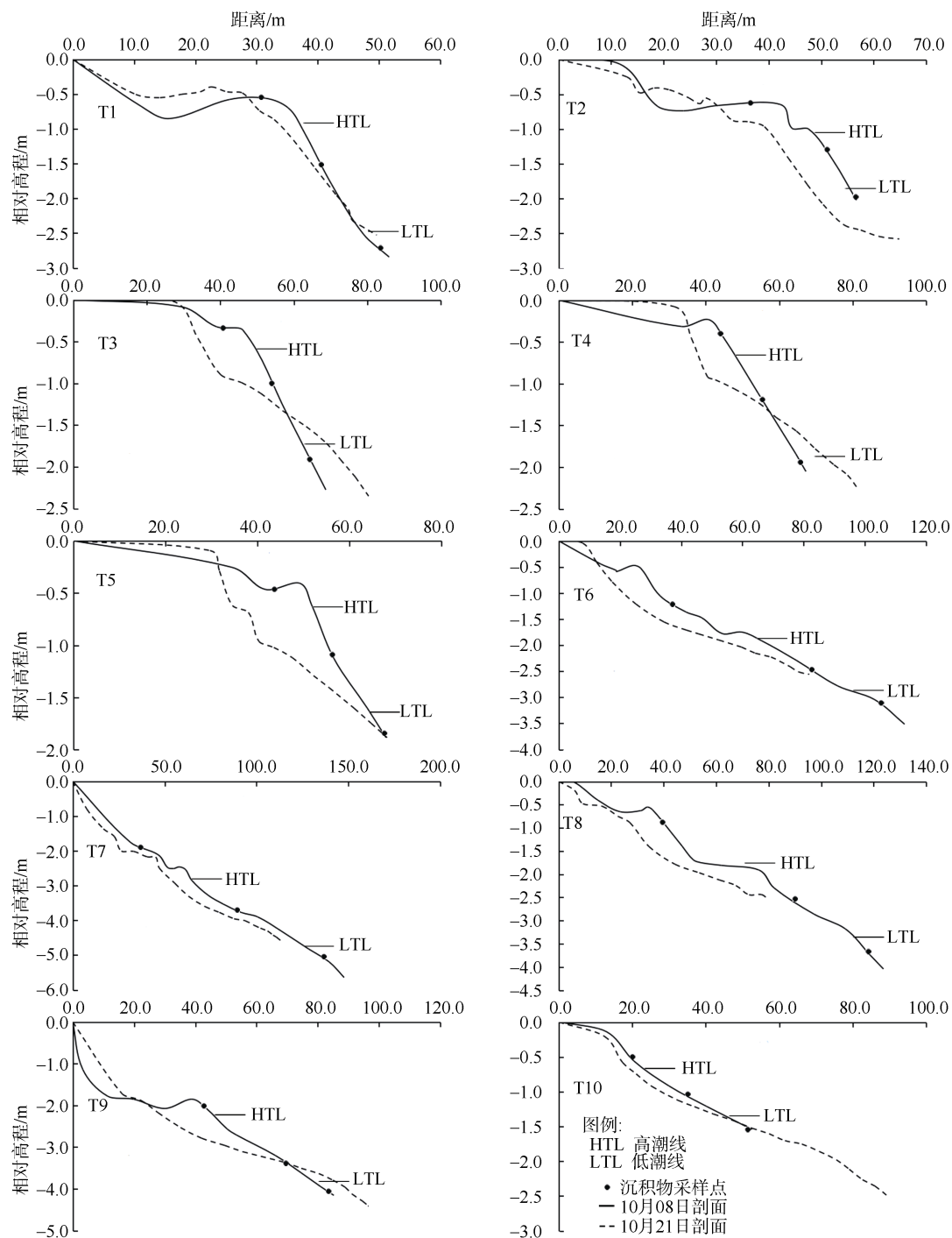


图 2 台风前后各海滩剖面变化

Fig. 2 Beach profiles before and after Typhoon Khanun. HTL: High tidal level; LTL: low tidal level

### 3.1.1 灯楼角西剖面

受 1720 号台风“卡努”的影响, 灯楼角西剖面(图 2 T1)剖面的响应表现为: 海滩的坡度变小, 滩面部分侵蚀, 水下部分略微堆积, 滩肩稍微后移, 海滩上部发生较大淤积, 海滩后滨有堆积沙丘形成。其中滩面的合计侵蚀单宽体积为  $6\text{m}^3$ , 滩肩和后滨沙丘的合计淤积单宽体积约为  $10\text{m}^3$ 。

### 3.1.2 灯楼角东剖面

灯楼角东剖面(图 2 T2)形态发生了较大的变化, 主要变为后滨沙丘侵蚀、滩肩部分堆积、前滨滩面部分严重侵蚀。其中后滨沙丘的合计单宽侵蚀量为  $2\text{m}^3$ , 滩肩合计单宽淤积量为  $2.5\text{m}^3$ , 前滨滩面合计单宽侵蚀量为  $13\text{m}^3$ 。滩肩基本消失, 海滩形态发生了由滩肩剖面向沙坝剖面的转换。

### 3.1.3 白沙剖面

白沙所选的 3 个海滩剖面(图 2 T3、T4、T5)坡度均变小。东剖面(T5)从后滨的向海一部分开始发生侵蚀, 侵蚀单宽体积为  $13\text{m}^3$ , 向岸一侧发生淤积, 淤积单宽体积约为  $8\text{m}^3$ 。侵蚀的泥沙一部分被波浪冲向后滨作为后滨淤积的供给, 一部分被带回海内。滩肩遭受强烈侵蚀, 后退 10m, 长度缩小 5m。西侧剖面(T3)发生堆积和侵蚀分界点的位置和东侧剖面基本一致。中间岸段海滩处在弧形海岸的开敞区, 在台风经过时遭受的波浪强度更大。从图 2 中的 T4 剖面可以看出, 高能量的波浪直接将滩肩侵蚀掉, 并且越浪到达后滨更远的地方, 侵蚀了部分后滨沙丘, 其中后滨部分合计淤积单宽体积约为  $7\text{m}^3$ , 前滨滩面合计侵蚀单宽体积约为  $7\text{m}^3$ 。

### 3.1.4 青安剖面

青安湾 3 个剖面(图 2 T6、T7、T8)对台风“卡努”做出了急剧的地貌响应, 除了西侧岸滩后滨略有淤积, 3 个剖面整体发生了严重的侵蚀, 合计单宽冲蚀量  $20\text{m}^3$ 。从台风前后剖面变化曲线可以看出, 东侧剖面(T8)靠近前滨滩面的滩肩被冲蚀, 靠近后滨的滩肩侵蚀后退达 20m, 中间剖面(T7)滩肩后退 40m, 西侧剖面(T6)滩肩被完全侵蚀并在后滨有所堆积。

### 3.1.5 赤坎剖面

从赤坎海滩台风前后的剖面形态(图 2 T9)可以看出: 经过台风作用后, 海滩坡度总体变小, 滩肩被完全侵蚀, 水下部分淤积, 海滩由滩肩剖面转化为沙坝剖面。岸滩后滨岸堤附近的沙丘被侵蚀掉堆积在滩肩部分。前滨水下部分合计单宽淤积量为  $5\text{m}^3$ , 前滨水上部分至滩肩合计单宽侵蚀量为  $11\text{m}^3$ , 滩肩后半部分至后滨沙丘前段合计单宽淤积量为  $5\text{m}^3$ , 后滨沙丘合计单宽侵蚀量为  $1\text{m}^3$ 。

### 3.1.6 大塘剖面

大塘剖面(图 2 T10)在“卡努”影响下形态变化不大, 主要表现为台风过后滩面坡度变小, 自平均低潮线以上至后滨沙丘被部分冲蚀, 向海运动的泥沙在水下部分堆积, 整个海滩呈现略微侵蚀状态。

## 3.2 表层沉积物粒度特征值及对台风响应情况

粒度参数蕴含了丰富的沉积运移、沉积环境、沉积动力条件等方面的信息, 沉积物粒度特征及其分布规律是分析沉积动力的关键。表 3 为在台风前后的各剖面潮间带沉积物平均粒度参数值。

表 3 台风前后表层沉积物特征参数

Tab. 3 Characteristic parameters of surface sediments before and after Typhoon Khanun

剖面	$M_d$			$Q_D$			$S_K$			$M_O$		
	前	后	$\Delta M_d$	前	后	$\Delta Q_D$	前	后	$\Delta S_K$	前	后	$\Delta M_O$
T1	2.11	1.96	-0.15	3.84	5.03	+1.19	-0.04	-0.15	-0.11	0.07	0.08	+0.01
T2	1.99	2.18	+0.19	2.55	6.30	+3.75	-0.12	-0.37	-0.25	0.08	0.25	+0.17
T3	2.50	2.52	+0.02	2.69	2.55	-0.13	-0.28	-0.12	+0.16	0.25	0.17	-0.07
T4	2.51	2.52	+0.01	2.37	2.41	+0.04	-0.14	-0.06	+0.08	0.21	0.12	-0.09
T5	2.46	2.51	+0.05	1.98	2.40	+0.42	-0.18	-0.19	-0.01	0.15	0.22	+0.07
T6	2.52	2.57	+0.05	4.30	2.39	-1.91	-0.34	-0.20	+0.13	0.26	0.17	-0.09
T7	2.51	2.54	+0.03	3.20	2.74	-0.46	-0.15	-0.21	-0.06	0.13	0.21	+0.08
T8	2.58	2.50	-0.07	3.44	3.00	-0.44	-0.18	-0.09	+0.09	0.18	0.11	-0.07
T9	2.31	2.98	+0.68	3.98	6.20	+2.22	-0.03	-0.16	-0.13	0.09	0.04	-0.05
T10	2.71	3.02	+0.31	3.31	7.25	+3.94	-0.24	-0.15	+0.09	0.19	0.06	-0.12

台风前, 除 T1、T2 剖面外各个剖面在海滩潮上带和潮下带泥砂类型均为细砂; 台风过后, 泥砂普遍变粗, 平均粒径  $M_d$  值减小。潮下带尤为明显,

$M_d$  范围从原来的  $2.49\phi\sim 3.28\phi$  变为  $2.44\phi\sim 2.73\phi$ , 且变化差异较大。在台风前, 各个泥沙样品的分选系数集中在 1.41~4.35 之间, 以分选性较差

( $1 < Q_D < 2.0$ )到差( $2.0 < Q_D < 4.0$ )为主,而潮上带沉积物分选均比潮间带要好。经过台风作用,分选系数  $Q_D$  都有不同程度增大,分布范围为 1.98~6.52,说明沉积物分选性变差。 $Q_D$  变化不均且潮下带表现差异较大,其中 T10 和 T9 分选系数均超过 6,这主要与台风作用时的水动力条件相关。沉积物的偏度是反映海滩环境的一个灵敏指标,其数值体现了沉积过程中能量变异的情况。台风前,各个剖面不同位置泥沙偏度均为负偏, $S_K$  分布范围潮上带为-0.221~-0.071,潮间带为-0.120~0.396,粒级主要集中在细

粒部分;台风后  $S_K$  潮上带为-0.31~0.24,潮间带为-0.3~0.24,泥沙粒级组成中粗砂比例增加,说明极端波况下,高能量的波浪将更粗粒的泥沙搬运到滩面,而研究区各个剖面  $S_K$  变化的差异性主要是泥沙在沉积过程中能量的变异造成的。

3.3 海滩地形动力状态变化

海滩地形动力状态的改变是海滩响应极端波况的结果,剖面形态的变化是最直观的表现。在 1720 号台风“卡努”的影响下,各个剖面台风前后海滩地形动力状态特征值见表 4。

表 4 台风前后海滩状态类型  
Tab. 4 Beach states before and after Typhoon Khanun

		剖 面									
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
台风前	$\Omega$	1.53	0.39	3.78	4.78	6.24	25.41	25.42	20.26	11.76	22.38
	海滩状态	过渡	反射	过渡	过渡	消散	消散	消散	消散	消散	消散
台风后	$\Omega$	2.3	3.43	19.46	20.68	20.36	34.93	27.24	27.04	28.64	32.69
	海滩状态	过渡	过渡	消散	消散	消散	消散	消散	消散	消散	消散

极端波况作用下,原本属于消散型的 T6、T7、T8、T9、T10 剖面  $\Omega$  值都变大,海滩变得更加消散,其中 T9、T10 变化幅度最大;过渡型的 T3、T4、T5 剖面转变为消散型海滩;T2 剖面由反射型转变为过渡型海滩;T1 剖面海滩类型不变,均为过渡型,但  $\Omega$  有所增加。

台风当天雷州半岛东部海域浪高 7~10m,琼州海峡浪高 5~7m(表 2)。大塘和赤坎海滩处于雷州半岛东南部,琼州海峡东侧口门附近。台风经过时,两地剖面波浪强度最强,沙滩迅速响应,导致了  $\Omega$  值增量最大,海滩呈现出更加消散的状态。台风期间,海面急剧增水,白沙湾海滩剖面做出的响应是滩肩被侵蚀,海滩坡度减小,原来过渡型的沙滩在台风侵蚀下变得消散以缓冲大浪携带的能量。青安湾海滩的  $\Omega$  值在台风前后都最大,T6、T7、T8 剖面侵蚀也最加严重。台风经过时,赤坎、大塘地区波浪作用强度最大,但是由于剖面分布方向和台风前进方向夹角很小,导致入射波垂向分量很小,赤坎、大塘岸滩剖面侵淤强度最小。

4 讨论

4.1 海滩位置与环境对剖面形态变化的影响

角尾剖面 T1 和 T2 位于巨型沙质岬角上(赵焕庭等, 2007),海滩剖面下部为珊瑚礁和火山碎屑组成的礁坪,上部为砂质海滩(王丽荣 等, 2002; 赵焕庭

等, 2002),这导致了该处海滩两侧有不同的地貌特征。角尾的 T1、T2 剖面测量时使用的是同一个木桩起点,方向相差约 90°,而两个海滩剖面对台风作用的响应差异很大。T1 剖面没有岬角的遮蔽,直接深入琼州海峡,比其他海滩更直接受到琼州海峡传入波浪的作用。台风经过时,T2 剖面正面接受东向传入的台风浪侵袭,滩面发生严重侵蚀。T1 剖面对台风响应并没有那么强烈,一是因为在 T1 剖面背靠沙质岬角,遮蔽效应大大削减了波浪的强度;二是 T1 剖面除了遭受来自东向来自琼州海峡传入的波浪,还受到来自北部湾的西向波浪顶托作用,削弱了波浪强度。

青安湾和白沙湾海滩在地理位置上属于两个相邻的岬湾弧形海岸,中间以排尾角分隔。在台风“卡努”的作用下,两个弧形海滩做出了完全不同的响应。造成这种差异现象的主要原因是由于台风气旋作用方向和岬湾湾口的朝向所致。台风经过时,青安湾湾口向琼州海峡东口开敞,根据台风“卡努”的前进方向,由台风形成的东向大浪作用正面作用青安湾海滩,而白沙湾受到岬角的遮蔽效应,大部分波浪被阻挡不能直接传递至湾口剖面,波浪经过绕射能量被耗散,导致剖面响应不如青安湾剧烈。

大塘和赤坎海滩所处地理位置和台风前进方向基本平行,台风大浪自东向西穿过琼州海峡,波浪经过折射、绕射后斜向作用于海滩,垂向作用于岸



滩的波浪能量被大大消减;加上大塘海滩位于雷州半岛东南方向,受到琼州海峡自身的波浪作用较研究区其他岸滩较小。受两者综合因素影响,造成了台风期间两个海滩的侵淤变化量并不是很大。

#### 4.2 水下礁坪对海滩风暴响应的影响

珊瑚礁海底与一般的礁石或泥沙海底结构相差很大,波浪衰减特性也相差较大(黎满球等, 2003),不少现场观测和实验研究表明珊瑚礁对波浪传播过程会产生显著的影响(Lugo-Feránhdez et al, 1994; 黎满球等, 2003; 姚宇等, 2015)。灯楼角水下礁坪宽度约为 500~1000 m(王丽荣等, 2002; 赵焕庭等, 2002), T1 和 T2 剖面对风暴的响应也会受到礁坪的显著影响。姚宇等(2015)通过实验发现,珊瑚礁坪上的增水随着入射波高和周期的增加而增加。黎满球等(2003)通过观测发现,波浪在礁坪上传播过程中,高频损失的能量多于低频,谱能量向低频转移。台风“卡努”登陆时,雷州半岛东岸沿海出现约 2m 的风暴增水。台风影响下,入射波高加大,波周期变大,礁坪上增水加大;同时,高能风暴浪作用期间,低频波占据控制作用,导致了大量泥沙垂向输运到近岸海区,造成海岸严重侵蚀(Russell, 1993; Ruessink, 2000)。因此, T2 剖面的严重侵蚀除与上述的地貌背景有关外,还与台风期间增水导致的水下礁坪消浪作用显著减小、低频长重力波引起泥沙垂向输运到近岸海区有关。但这种海滩-珊瑚礁坪系统的风暴效应,还需要将海滩特征和珊瑚礁耗能作用相结合做进一步探讨。

#### 4.3 未来研究

本次调查和研究仅对一次台风过程前后雷州半岛南部若干海滩进行了观测,主要方法是通过海滩剖面 and 沉积物粒度参数变化来研究海滩的风暴响应。观测的结果虽然可以探究部分海滩对风暴响应的现象,增加对海滩风暴响应的认识,但由于风暴

期间各岸段的详细波浪、潮汐、增水等水动力过程和动力参数难以获得,使得对海滩对风暴影响的研究还不是很全面。下一步的工作需要进行更多次的海滩对风暴响应详细观测和研究。

## 5 结论

本文通过对 1720 号台风“卡努”登陆前后雷州半岛南部 5 个海滩 10 条剖面观测和表层沉积物采样,探讨该区域海滩的风暴响应特征,得出以下主要结论。

1) 总体来看,台风浪作用下雷州半岛南部海滩表层沉积物变粗,潮下带尤为明显,平均粒径范围由原来的  $2.49 \sim 3.28\phi$  变为  $2.44\phi \sim 2.73\phi$ 。泥沙分选系数由 1.41~4.35 变为 1.98~6.52,各样品分选系数都有增加,分选性变差。各海滩剖面的无量纲沉降速率( $\Omega$ )值都增加,表明海滩状态会朝着更加消散状态转化,以缓冲和适应高强度波浪的能量。

2) 受到岬角和湾口朝向、大小等因素影响,雷州半岛南部各海滩及同一海滩的不同岸段剖面变化表现出差异性。台风作用下海滩可能形成水下沙坝,或者在海滩上部形成滩肩等特征地形。研究海滩对风暴作用的响应时,要注意到海滩地质地貌背景的影响。

3) 灯楼角海滩的变化受到了水下礁坪、巨型砂质岬角等因素的影响。分析后认为,台风影响下,入射波高、周期和礁坪上增水加大,低频波占据控制作用,导致了大量泥沙垂向输运到近岸海区,造成海岸严重侵蚀。海滩-珊瑚礁坪系统的风暴效应,还需要进一步探讨。

4) 虽然可以通过海滩剖面 and 沉积物粒度参数变化来研究海滩的风暴响应,但将来还需要对海滩风暴响应做更详细的水动力、地形和泥沙要素观测和深入研究。

## 参考文献 References

- 蔡锋, 苏贤泽, 杨顺良, 等, 2002. 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, 20(2): 85–90. CAI FENG, SU XIANZE, YANG SHUNLIANG, et al, 2002. A rapid response to 9914 typhoon-induced storm wave force made by the beach profiles of Xiamen Island[J]. The Ocean Engineering, 20(2): 85–90 (in Chinese with English abstract).
- 蔡锋, 苏贤泽, 夏东兴, 2004. 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, 2004. 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 (in Chinese with English abstract).

- 蔡锋, 雷刚, 苏贤泽, 等, 2006. 台风“艾利”对福建沙质海滩影响过程研究[J]. 海洋工程, 24(1): 98–109. CAI FENG, LEI GANG, SU XIANZE, et al, 2006. Study on process response of Fujian beach geomorphology to typhoon Aere[J]. The Ocean Engineering, 24(1): 98–109 (in Chinese with English

abstract).

- 陈子荣, 1995. 弧形海岸海滩地貌对台风大浪的响应特征[J]. 科学通报, 40(23): 2168–2170. CHEN ZISHEN, 1995. Response characteristics of beach morphologies in an arc-shaped coast to typhoon waves[J]. Chinese Science Bulletin, 41(12): 1015.
- 陈子荣, 王扬圣, 黄德全, 等, 2009. 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, 28(6): 1–6. CHEN ZISHEN, WANG YANGSHENG, HUANG DEQUAN, et al, 2009. Analysis on temporal change of foreshore profile under tropical storms[J]. Journal of Tropical Oceanography, 28(6): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- 龚昊, 陈沈良, 钟小菁, 等, 2017. 海南岛东北部海滩侵蚀与恢复对连续台风的复杂响应[J]. 海洋学报, 39(5): 68–77. GONG HAO, CHEN SHENLIANG, ZHONG XIAOJING, et al, 2017. Complicated responses of beach erosion and restoration to consecutive typhoons along northeastern Hainan Island, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 39(5): 68–77 (in Chinese with English abstract).
- 海南省地方志办公室, 2006. 海南省志: 海洋志, 革命根据地志[M]. 海口: 南海出版公司: 14–17 (in Chinese)
- 黎满球, 朱良生, 隋世峰, 2003. 珊瑚礁坪波浪的衰减特性分析[J]. 海洋工程, 21(2): 71–75. LI MANQIU, ZHU LIANGSHENG, SUI SHUFENG, 2003. Characteristics of wave attenuation on the coral reef[J]. The Ocean Engineering, 21(2): 71–75 (in Chinese with English abstract).
- 黎树式, 戴志军, 葛振鹏, 等, 2017. 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, 35(3): 89–98. LI SHUSHI, DAI ZHIJUN, GE ZHENPENG, et al, 2017. Sediment dynamic processes of macro-tidal beach in response to Typhoon Rammasun action—A case study of Yintan, Beihai[J]. The Ocean Engineering, 35(3): 89–98 (in Chinese with English abstract).
- 彭俊, 蔡锋, 李谷祺, 等, 2008. 福建岬湾岸型沙质海滩对台风的响应特征[J]. 台湾海峡, 27(1): 87–91. PENG JUN, CAI FENG, LI GUQI, et al, 2008. Response characteristic to the typhoon of sandy beach on the inshore between capes in Fujian[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 27(1): 87–91 (in Chinese with English abstract).
- 邵超, 戚洪帅, 蔡锋, 等, 2016. 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, 38(2): 121–130. SHAO CHAO, QI HONGSHUAI, CAI FENG, et al, 2016. Study on storm-effects on beach-coral reef system-Taking the response of Qinglangang Coast on No. 1409 Typhoon Rammasun as an example[J]. Acta Oceanologica Sinica, 38(2): 121–130 (in Chinese with English abstract).
- 童宵岭, 时连强, 夏小明, 等, 2014. 1211 号台风对浙江象山皇城海滩剖面的影响分析[J]. 海洋工程, 32(1): 84–90. TONG XIAOLING, SHI LIANQIANG, XIA XIAOMING, et al, 2014. Response of sedimentary and geomorphic characteristics to 1211 typhoon on Zhejiang Huangcheng beach[J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(1): 84–90 (in Chinese with English abstract).
- 王宝灿, 陈沈良, 龚文平, 等, 2006. 海南岛港湾海岸的形成与演变[M]. 北京: 海洋出版社: 17–24 (in Chinese).
- 王丽荣, 赵焕庭, 宋朝景, 等, 2002. 雷州半岛灯楼角海岸地貌演变[J]. 海洋学报, 24(6): 135–144. WANG LIRONG, ZHAO HUANTING, SONG CHAOJING, et al, 2002. Coastal geomorphic evolution at the Denglou Cape Leizhou Peninsula of China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 24(6): 135–144 (in Chinese with English abstract).
- 姚宇, 袁万成, 杜睿超, 等, 2015. 岸礁礁冠对波浪传播变形及增水影响的实验研究[J]. 热带海洋学报, 34(6): 19–25. YAO YU, YUAN WANCHENG, DU RUICHAO, et al, 2015. Experimental study of reef crest's effects on wave transformation and wave-induced setup over fringing reefs[J]. Journal of Tropical Oceanography, 34(6): 19–25 (in Chinese with English abstract).
- 赵焕庭, 王丽荣, 宋朝景, 等, 2002. 雷州半岛灯楼角珊瑚岸礁的特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 22(2): 35–40. ZHAO HUANTING, WANG LIRONG, SONG CHAOJING, et al, 2002. Features of fringing reef at Dengloujiao, Leizhou Peninsula[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 22(2): 35–40 (in Chinese with English abstract).
- 赵焕庭, 王丽荣, 宋朝景, 2007. 雷州半岛灯楼角沙岬的形成[J]. 热带地理, 27(5): 405–410. ZHAO HUANTING, WANG LIRONG, SONG CHAOJING, 2007. Formation of the sand spit at Dengloujiao Cape, Leizhou Peninsula[J]. Tropical Geography, 27(5): 405–410 (in Chinese with English abstract).
- 中华人民共和国水利水电部, 1975. 水文测量规范规定[S]. 北京: 水利水电出版社: 43–60 (in Chinese).
- ANTHONY E J, 2013. Storms, shoreface morphodynamics, sand supply, and the accretion and erosion of coastal dune barriers in the southern North Sea[J]. Geomorphology, 199: 8–21.
- BACKSTORM J T, JACKSON D W T, COOPER J A G, et al, 2008. Storm-driven shoreface morphodynamics on a low-wave energy delta: the role of nearshore topography and shoreline orientation[J]. Journal of Coastal Research, 24(6): 1379–1387.
- BASCO D R, 1996. Erosion of beaches on St. Martin Island during Hurricanes LUIS and MARILYN, September 1995 (Lessons for communities with beach-driven tourist economies)[J]. Shore & Beach, 64(4): 15–20.



- COCO G, SENECHAL N, REJAS A, BRYAN K R, et al, 2013. Beach response to a sequence of extreme storms[J]. *Geomorphology*, 204(1): 493–501.
- COCO G, SENECHAL N, REJAS A, et al, 2014. Beach response to a sequence of extreme storms[J]. *Geomorphology*, 204: 493–501.
- COOPER J A G, JACKSON D W T, NAVAS F, et al, 2004. Identifying storm impacts on an embayed, high-energy coastline: examples from western Ireland[J]. *Marine Geology*, 210(1–4): 261–280.
- COSTAS S, ALEJO I, VILA-CONCEJO A, et al, 2005. Persistence of storm-induced morphology on a modal low-energy beach: A case study from NW-Iberian Peninsula[J]. *Marine Geology*, 224(1–4): 43–56.
- FORBES D L, PARKES G S, Manson G K, et al, 2004. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence[J]. *Marine Geology*, 210(1–4): 169–204.
- GERVAIS M, BALOUIN Y, BELON R, 2012. Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions coastline, France[J]. *Geomorphology*, 143–144: 69–80.
- GORNITZ V, LEBEDEFF S, HANSEN J., 1982. Global sea level trend in the past century[J]. *Science*, 135(4540): 1611–1614.
- HAERENS P, BOLLE A, TROUW K, et al, 2012. Definition of storm thresholds for significant morphological change of the sandy beaches along the Belgian coastline[J]. *Geomorphology*, 143–144: 107–117.
- HOLMAN R A, HALLER M C, LIPPMANN T C, et al, 2015. Advances in nearshore processes research: four decades of progress[J]. *Shore & Beach*, 83(1): 39–52.
- LUGO-FERÁNHDEZ A, HERÁNHDEZ-ÁVILA M L, ROBERTS H H, 1994. Wave-energy distribution and hurricane effects on margarita reef southwestern Puerto Rico[J]. *Coral Reefs*, 13(1): 21–32.
- RUESSINK B G, 2000. An empirical energetics-based formulation for the cross-shore suspended sediment transport by bound infragravity waves[J]. *Journal of Coastal Research*, 16(2): 482–493.
- RUSSELL P E, 1993. Mechanisms for beach erosion during storms[J]. *Continental Shelf Research*, 13(11): 1243–1265.
- SUNAMURA T, 1984. Quantitative predictions of beach-face slopes[J]. *GSA Bulletin*, 95(2): 242–245.
- The Nearshore Processes Community (TNPC), 2015. The future of nearshore processes research[J]. *Shore & Beach*, 83(1): 13–38.
- WRIGHT L D, SHORT A D, 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis[J]. *Marine Geology*, 56(1–4): 93–118.
- WRIGHT L D, SHORT A D, GREEN M O, 1985. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical predictive model[J]. *Marine Geology*, 62(3–4): 339–364.