

袁明明, 王华强, 唐杰平, 等. 高位池养殖尾水排放影响下的砂质海岸表层沉积物对 2203 号台风“暹芭”的响应[J]. 海洋学报, 2025, 47(1): 51–62, doi:10.12284/hyxb2025022

Yuan Mingming, Wang Huaqiang, Tang Jieping, et al. Influence of high-level pond aquaculture tailwater discharge on the response characteristics of surface sediment on the beach to Typhoon No. 2203 *Chaba*[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(1): 51–62, doi:10.12284/hyxb2025022

# 高位池养殖尾水排放影响下的砂质海岸表层沉积物 对 2203 号台风“暹芭”的响应

袁明明<sup>1,2</sup>, 王华强<sup>3</sup>, 唐杰平<sup>1,2\*</sup>, 陈德志<sup>2</sup>, 陈洋<sup>1</sup>, 李高聪<sup>1,2\*</sup>

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088; 2. 自然资源部热带海洋生态系统与生物资源重点实验室, 广西北海 536009; 3. 交通运输部南海航海保障中心, 广东 广州, 510320)

**摘要:** 开展高位池养殖尾水排放影响砂质海岸对台风的响应机理研究对于促进海岸资源的可持续利用和增值服务具有重要意义。本文基于沉积物的特征粒径、粒级组分和粒度参数等指标, 对比分析了 2203 号台风“暹芭”事件前后, 粤西东海岛高位池尾水排放影响岸滩和正常岸滩粒度分布特征及其差异原因。研究结果显示: (1) 台风过后, 出现了正常岸滩沉积物的粒径分选变差、近岸侧细化和近海侧粗化的特点; (2) 受影响岸滩沉积物的分选系数在台风后保持稳定, 而其他参数 (特征粒径、粒级组分和粒度参数) 未表现出统一的变化规律; (3) 台风后, 受影响岸滩沉积物的特征粒径 ( $D_{10}$ 、 $D_{50}$  和  $D_{90}$ ) 及平均粒径的均值变化幅度显著高于正常岸滩。台风引发的强烈波浪作用和水位上升是导致正常岸滩沉积响应的关键因素, 而高位池影响岸滩对台风的响应则更为复杂, 它是高位池尾水排放形成的冲沟地形及其沉积物再分配过程与风暴期间的风暴潮过程耦合作用的结果。本研究为高位池影响岸滩沉积物粒度信息对台风事件的响应特征提供了研究案例, 有助于提升对极端事件与海水养殖活动在海滩地貌演化中相互作用机制的理解。

**关键词:** 高位池养殖; 砂质海岸; 沉积物粒度; 台风; 粤西东海岛

中图分类号: P737.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2025)01-0051-12

## 1 引言

高位池养殖模式是华南地区最主要海水养殖方式之一。该模式通过在自然形成的高位海岸沙丘上挖掘池塘, 为养殖活动创造了优越的环境同时还获得了较高的经济效益, 因此深受沿海养殖户的青睐<sup>[1-2]</sup>。然而, 随着养殖规模的不断扩大, 原本生长在海岸沙丘上的沿海防护林被大量砍伐, 以满足养殖的扩张需

求。大量养殖户随意将养殖尾水排入海, 不仅造成了海滩侵蚀沟的形成<sup>[3-4]</sup>, 还使得海岸地区韧性进一步降低, 易受到海岸侵蚀和其他环境问题的困扰<sup>[5-6]</sup>。此外, 台风作为频繁袭击华南地区的极端天气事件, 对沿海生态系统和人类活动带来了巨大的挑战<sup>[7-9]</sup>。

文献综述表明, 尽管前人针对台风等极端事件对砂质海岸的沉积特征和侵蚀机理开展了广泛的研究, 并取得了诸多重要成果, 但针对高位池尾水排放区域

收稿日期: 2024-08-21; 修订日期: 2024-11-26。

基金项目: 自然资源部热带海洋生态系统与生物资源重点实验室开放基金 (2023QN04); 2024 年广东省普通高校毕业生创新人才类项目 (2024KQNCX134); 2024 年省级人才发展战略专项资金项目 (2024R3005); 广东海洋大学科研启动经费项目 (060302112104)。

作者简介: 袁明明 (2000—), 男, 河南省南阳市人, 主要研究方向为海岸沉积环境演变。E-mail: yuanmm1122@163.com

\* 通信作者: 唐杰平, 讲师, 主要从事近海沉积动力过程研究。E-mail: jptang@gdou.edu.cn; 李高聪, 副教授, 主要从事河口海岸环境演变研究。E-mail: gcli@gdou.edu.cn

的海滩沉积特性对台风响应研究仍相对较少。Wang 等<sup>[10]</sup>的研究表明, 风暴事件期间波浪与潮流相互作用会显著增强海滩沉积物的输运与地形变化。Xing 等<sup>[11]</sup>在山东海滩的研究中发现, 台风期间波浪和潮流的共同作用大幅度增加了近岸波浪破碎区的水位, 导致大量沉积物向低潮区或更远的海域转移。在华南区域海滩的研究中, 戚洪帅等<sup>[12]</sup>探讨了海滩地貌动力特征与风暴响应强度之间的关系。束芳芳等<sup>[13]</sup>研究了不同类型沉积物的海滩在台风条件下的响应差异。此外, 曾春华等<sup>[14]</sup>、李志强等<sup>[15]</sup>和朱士兵和李志强<sup>[16]</sup>研究了雷州半岛区域不同海滩对台风的响应及其变化特征。华南沿海地区广泛的高位池养殖尾水排放过程作为一个人为影响因素, 与常规的潮汐、潮流和波浪过程及极端天气等因素相互作用, 正共同影响着华南地区砂质海岸的物质收支格局及地貌演化过程<sup>[17]</sup>。

2022 年 7 月, 2203 号台风“暹芭”掀起剧烈的风暴潮, 对华南沿岸造成较大影响<sup>[18]</sup>。本文针对 2203 号台风“暹芭”对高位池养殖尾水排放下的岸滩沉积物粒度分布信息产生何种影响的问题, 以雷州半岛东部海岸受高位池尾水排放影响的岸滩(后简称“影响岸滩”)和邻近未影响的岸滩(后简称“正常岸滩”)在台风登陆前后的表层沉积物为研究对象, 系统探讨了两类岸滩在台风前后沉积信息的差异及背后的影响机制。本文探讨了台风与高位池尾水排放耦合过程对海滩的影响过程, 结果有助于理解砂质海岸对极端事件和典型人类活动的响应机理, 可为沿海地区的生态与环境管理提供关键数据支撑和科学决策依据。

## 2 研究区和台风“暹芭”

### 2.1 研究区概括

研究区位于广东省湛江市东海岛龙海天景区北侧受高位池养殖尾水排放影响的砂质海岸区域(图 1)。所在海区的潮汐属不规则半日潮, 最大潮差为 5.13 m, 平均潮差 2.16 m; 海浪以风浪为主, 常浪向为 ENE, 强浪向为 ENE 和 ESE<sup>[19]</sup>。该区域深受热带气旋和台风活动的影响。在 1960–2017 年间, 登陆或影响的热带气旋有 236 个, 平均每年 4.37 个。1945–2015 年登陆湛江的台风 66 个, 是排名第二的汕尾市的 2.6 倍, 是广州市的 22 倍<sup>[20]</sup>。期间, 登陆的强台风有 5 个(1954 年“Ida”14 级、1966 年“Ora”14 级、1991 年“Fred”14 级、1996 年“Sally”15 级、2014 年“海鸥”14 级), 超强台风有 2 个(2014 年“威马逊”17+级、

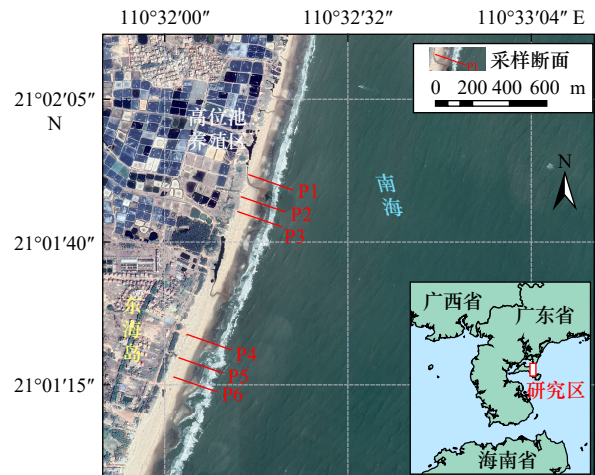


图 1 研究区及采样断面分布

Fig. 1 Distributions of the sampling profiles and sites  
遥感底图来源于 Google Earth 2021 年 12 月 10 日影像  
Remote sensing base map sourced from Google Earth image  
on December 10, 2021

2015 年“彩虹”16 级)。2015 年 10 月登陆湛江的超强台风“彩虹”(Mujigae)是 1949 年以来 10 月份登陆我国的最强台风, 共造成了海南、广东和广西的 42 个县市区 353.43 万人受灾, 经济损失达 232.4 亿元。

### 2.2 2203 号台风“暹芭”概况

本文研究的台风事件为 2203 号台风“暹芭”(图 2)。该台风是 2022 年首个登陆我国的台风, 6 月 29 日生成至 7 月 4 日结束, 历时约 5 d。其强度从生成时的热带低压逐步增强, 风速由 15 m/s 增至登陆时的 35 m/s, 中心气压从 1 000 hPa 降至 965 hPa, 达到

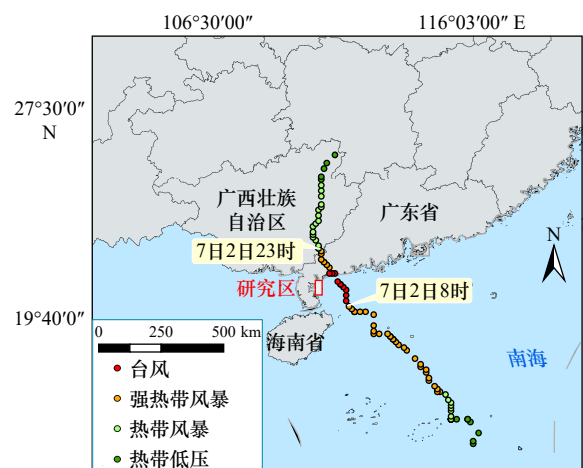


图 2 台风“暹芭”路径

Fig. 2 The track of Typhoon Chaba

底图修改自中华人民共和国民政部 <https://www.mca.gov.cn/>

审图号: GS (2022) 1873 号

The base map was modified from the Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China <https://www.mca.gov.cn/>

Drawing review number: GS (2022) No. 1873

12级台风的强度。台风的风圈半径超过300 km,影响范围广泛,广东、广西和海南等地均受其影响,其中,湛江地区的24 h降水量达到560 mm,多个地区出现严重的洪涝灾害。南海部分海域的浪高达到8 m,台风影响持续时间长,对粤西沿海地区的农渔业及基础设施造成了显著损害。

### 3 材料与方法

#### 3.1 数据来源与预处理

沉积物样品于2022年7月1日(台风登陆前)和7月3日(台风登陆后)低潮位时段在龙海天海滩采集。采样时,设置6条固定采样断面,从北至南依次编号为P1~P6。其中,断面P1~P3的岸基为高位池养殖区,其样品用以表征受高位池尾水排放影响岸滩;P4~P6的岸基为居民区,用于表征常规岸滩(图1)。每条断面均从后滨无植被覆盖处向海至水边线附近以10~15 m的间隔取10个样品,由岸向海依次编号为1~10。具体而言,在后滨无植被处到滩肩取3个样品,滩面取7个样品。在取样时首先去掉覆盖的腐殖质和垃圾,然后取表层3~5 cm的沉积物于PE自封袋内保存。需指出的是,7月1日的样品P3-3和P5-4在搬运过程中丢失。所获得的沉积物样品均送至华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,使用多功能粒径和粒形分析仪(Camsizer X2)开展粒度测试工作。

#### 3.2 数据分析方法

基于仪器Camsizer X2的测试结果,获得了沉积物样品的粒度信息,本文使用特征粒径、粒级组分含量和粒度参数3类信息进行分析。特征粒径是指 $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 和 $D_{90}$ ,它们能够代表不同的粒径分布特征并指示沉积环境的动力学特性。其中 $D_{10}$ 表示细颗粒含量,反映了低能环境; $D_{50}$ 表示样品的中值粒径,与平均动力条件相关; $D_{90}$ 表示粗颗粒含量,常用于指示高能环境。粒径组成为砾石、极粗砂、粗砂、中砂、细砂、极细砂和粉砂7类,遵循伍登-温特沃斯粒度分级标准<sup>[21]</sup>进行分级。粒度参数包含平均粒径、分选系数、偏态和峰态,本文采用Folk和Ward(1957)提出的图解法计算其数值和确定其定性术语<sup>[21-22]</sup>,计算公式所需的特征粒径数据均可从Camsizer X2的测试结果中直接读取或通过简单计算获得。

风速和波浪数据为欧洲中期天气预报中心(ECMWF, <https://cds.climate.copernicus.eu/>)提供的ERA5逐时再分析数据,分辨率为均1 h。具体站点采

用了距离研究区邻近海域最近点位(21°N, 110.5°E)的数据。此外,水位数据来源于广州海事测绘中心湛江东海岛水文站的观测记录,其分辨率为15 min。需指出的是,7月1日样品的特征值数据引用自李高聪等<sup>[17]</sup>的相关研究。

## 4 结果

#### 4.1 水动力特征

台风前风速较小;台风期间风速逐渐增大至14 m/s,主风向为N;台风过后风速逐渐减小,主风向转为S(图3a)。台风前的6月29-30日,有效波高基本维持在约0.4 m;自6月30日开始,随着台风逐渐逼近,波高迅速上升,并于7月2日有效波高达到峰值1.37 m;台风过后,有效波高逐渐下降至约0.3 m(图3b)。台风前,波向从东南向(地理坐标系:120°)逐渐转为北向(地理坐标系:0°);台风期间,波向变化剧烈,最大波动幅度达到360°;台风过后,波向再次从北向逆时针旋转至东南向(地理坐标系:120°)。波周期的变化与有效波高趋势相符,台风期间的平均波周期(5.6 s)约为正常天气期间(3.9 s)的1.4倍(图3c)。水位结果显示(图3d),7月1日恰逢大潮,最高水位超过了4 m;7月1日晚上至7月2日,台风影响使次高潮水位上升至3 m左右;7月3日,水位略有下降,但仍保持在相对较高水平;至7月5日,水位逐渐降低至1~3 m。

#### 4.2 特征粒径

台风后影响岸滩特征粒径的均值变化较正常岸滩更为显著:P1的 $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 和 $D_{90}$ 的 $\phi$ 均值分别变化了0.47、0.35和0.36。而P2和P3各项特征值均数值减小,其中P2的 $D_{50}$ 的 $\phi$ 值减小了0.39,最为显著。P4至P6断面的变化较小(表1)。台风后,影响岸滩断面 $\phi$ 值无一致的由岸向海规律:P1的1至3号采样点增大,4至10号先减小后增大,在7号点与台风前交叉;P2除4号为一个低谷,整体呈与台风前相反的增大趋势;P3除5号为低谷,其余点保持台风前的上升趋势。相较之下,正常岸滩的变化趋势与台风前相反,呈由岸向海逐渐减小的趋势,且靠岸侧粒径增大,靠海侧减小(图4)。

#### 4.3 粒级组成

影响岸滩的P1细砂组分的均值增加了14.54%,P2和P3则分别减少了14.08%和2.84%;3条断面的中砂组分均有所减少,分别减少了15.05%、1.07%和6.94%;而粗砂组分变化不大。P4至P6细砂组分增加了0.98%至6.30%,中砂和粗砂组分则分别减少了

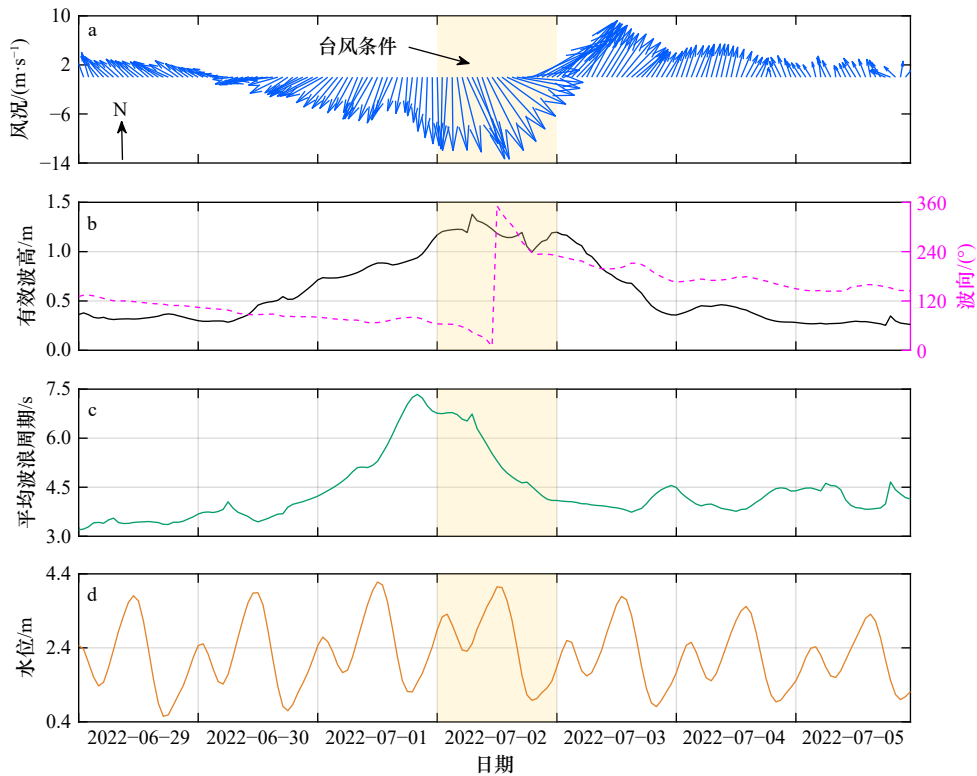


图 3 台风前后风速、水位和有效波高变化

Fig. 3 Variations in wind speed, water levels, and significant wave height before and after the typhoon

表 1 不同断面特征粒径的特征值统计表 ( $\phi$ )

Table 1 Characteristic value statistics of characteristic grain-size of different profiles ( $\phi$ )

岸滩类型	断面	采样日期	$D_{10}$				$D_{50}$				$D_{90}$			
			Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD
影响岸滩	P1	2022-07-01	-1.57	0.69	-0.44	0.82	-0.39	1.32	0.73	0.58	1.33	2.17	1.79	0.28
		2022-07-03	-1.54	1.93	0.03	1.22	-0.17	2.77	1.18	1.07	0.86	3.28	2.15	0.85
	P2	2022-07-01	0.20	1.84	1.20	0.57	1.13	2.62	2.15	0.52	1.77	3.14	2.80	0.44
		2022-07-03	-1.21	2.06	0.88	1.04	-0.43	2.81	1.76	1.04	0.37	3.34	2.47	0.90
	P3	2022-07-01	-0.51	1.67	0.72	0.71	0.77	2.65	1.77	0.67	1.70	3.22	2.54	0.60
		2022-07-03	-1.33	1.96	0.51	1.01	-0.67	2.77	1.54	1.03	0.70	3.27	2.32	0.84
正常岸滩	P4	2022-07-01	-0.87	1.76	0.41	0.77	0.65	2.65	1.31	0.68	1.52	3.21	2.13	0.63
		2022-07-03	-0.97	1.56	0.17	0.68	0.53	2.75	1.26	0.73	1.57	3.28	2.31	0.62
	P5	2022-07-01	-0.75	1.79	0.14	0.71	0.22	2.77	1.11	0.76	1.27	3.27	2.02	0.75
		2022-07-03	-1.67	1.85	0.06	1.10	-0.77	2.81	1.21	1.23	0.79	3.30	2.15	0.97
	P6	2022-07-01	-0.80	1.81	0.24	0.84	0.10	2.75	1.26	0.89	1.31	3.25	2.18	0.73
		2022-07-03	-1.21	1.27	0.22	0.80	-0.18	2.63	1.53	0.94	1.57	3.23	2.57	0.64

1.24%至12.21%和0.65%至9.36%(表2)。由岸向海方向上P1的1至3号采样点极细砂/细砂增加,4至7号极粗砂/粗砂增加,8至10号采样点中砂/粗砂增加;P2和P3除4号或5号采样点极粗砂含量显著增加外,其余点位均呈现出靠岸侧呈中砂/粗砂占优、靠

海侧细砂占优。P4至P6呈现出靠岸侧细颗粒组分增加、靠海侧粗颗粒组分增加的趋势(图5)。

#### 4.4 粒度参数

影响岸滩的平均粒径 $\phi$ 均值相比正常岸滩变化显著: P1增加了0.46, P2和P3减小了0.36和0.23; P4

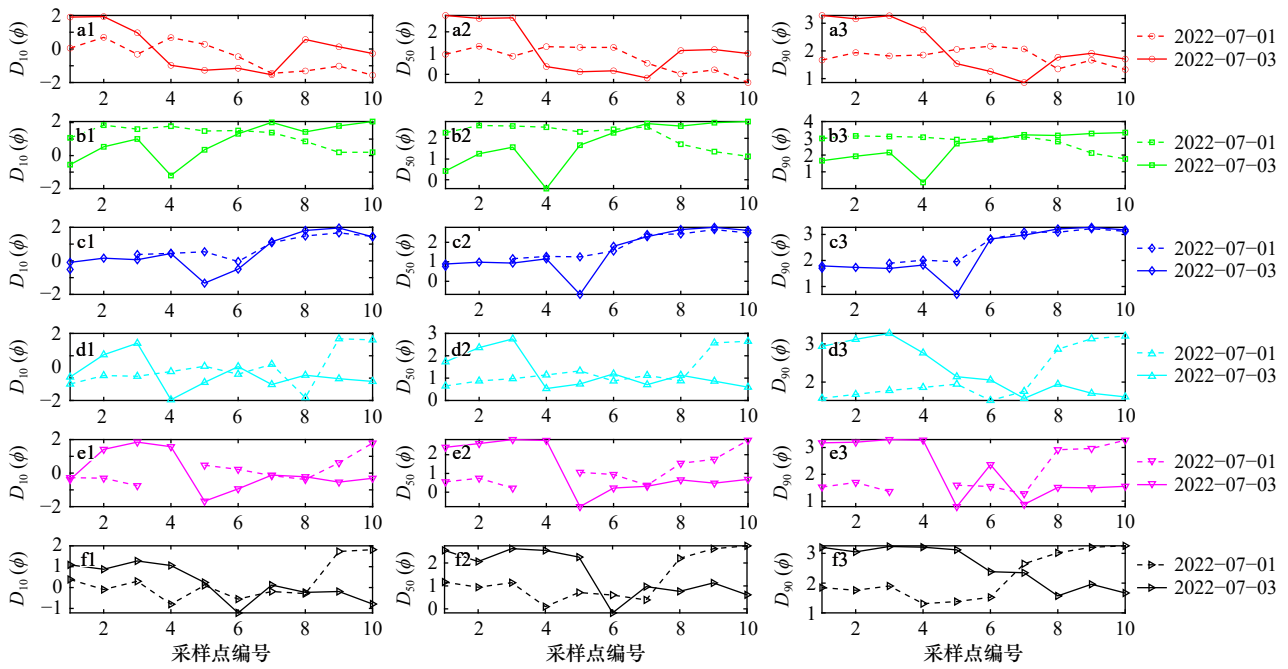


图4 不同断面特征粒径特征值的分布 [P1(a1~a3), P2(b1~b3), P3(c1~c3), P4(d1~d3), P5(e1~e3)和P6(f1~f3)]  
 Fig. 4 Characteristic value distribution of the characteristic grain-size of different profiles [P1 (a1~a3), P2 (b1~b3), P3 (c1~c3), P4 (d1~d3), P5 (e1~e3) and P6 (f1~f3)]

表2 不同断面主要粒级组分特征值统计表 (%)

Table 2 Characteristic value statistics of main grain size fraction of different profiles (%)

岸滩类型	断面	采样日期	细砂				中砂				粗砂			
			Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD
影响岸滩	P1	2022-07-01	2.62	14.18	6.95	3.65	9.88	69.87	38.89	20.55	21.47	44.97	28.95	7.77
		2022-07-03	0.52	68.83	21.49	25.83	6.74	55.59	23.84	18.13	0.23	41.05	25.66	15.38
	P2	2022-07-01	4.27	69.91	50.31	23.01	13.33	56.08	29.09	16.19	0.89	33.62	9.35	10.26
		2022-07-03	0.61	67.36	36.23	25.41	3.24	73.50	28.02	22.59	0.61	38.33	12.46	12.39
	P3	2022-07-01	4.16	59.31	32.00	23.42	14.85	60.08	35.95	16.02	2.18	38.88	18.87	14.53
		2022-07-03	1.03	60.39	29.16	25.87	5.88	56.07	28.71	15.46	0.14	45.77	20.49	18.63
正常岸滩	P4	2022-07-01	1.45	64.53	17.91	23.13	15.25	63.71	37.73	16.17	0.54	54.49	31.69	18.24
		2022-07-03	2.52	50.92	18.89	17.38	16.90	51.51	32.27	10.77	0.65	53.37	31.04	17.59
	P5	2022-07-01	1.38	57.02	14.71	18.98	12.15	53.77	29.39	14.00	1.35	65.65	36.25	18.92
		2022-07-03	0.80	55.96	22.84	23.66	4.33	31.72	17.18	8.83	0.91	75.46	27.40	24.66
	P6	2022-07-01	0.79	59.21	20.24	23.43	11.46	55.74	28.81	15.28	0.57	64.22	31.10	20.47
		2022-07-03	2.28	50.30	26.54	18.95	6.83	47.97	27.57	10.47	4.68	47.13	21.74	15.17

至 P6 的变化较小,  $\phi$  值分别变化了 0.04、0.06 和 0.19。P1 至 P3 的分选系数均值基本保持不变, P4 至 P6 分别增加了 0.16、0.07 和 0.15。两类岸滩的峰态和偏态变化较小, 6 条断面的峰态和偏态的均值变化在 0.02~0.1 和 0.01~0.13 的之间(表 3)。平均粒径由岸向海方向上变化趋势与特征粒径基本一致(图 4,

图 6)。P1 至 P3 除 P1 断面 4 号和 5 号采样点分选系数增加, 7 至 10 号采样点分选减小外, 其余点位分选系数变化较小; P4 和 P6 的 7 号或 8 号采样点分选变好, 其余点位呈现分选性不同程度变差, P5 约 1/2 采样点分选变差。台风后偏态和峰态无明显的一致变化趋势(图 7)。

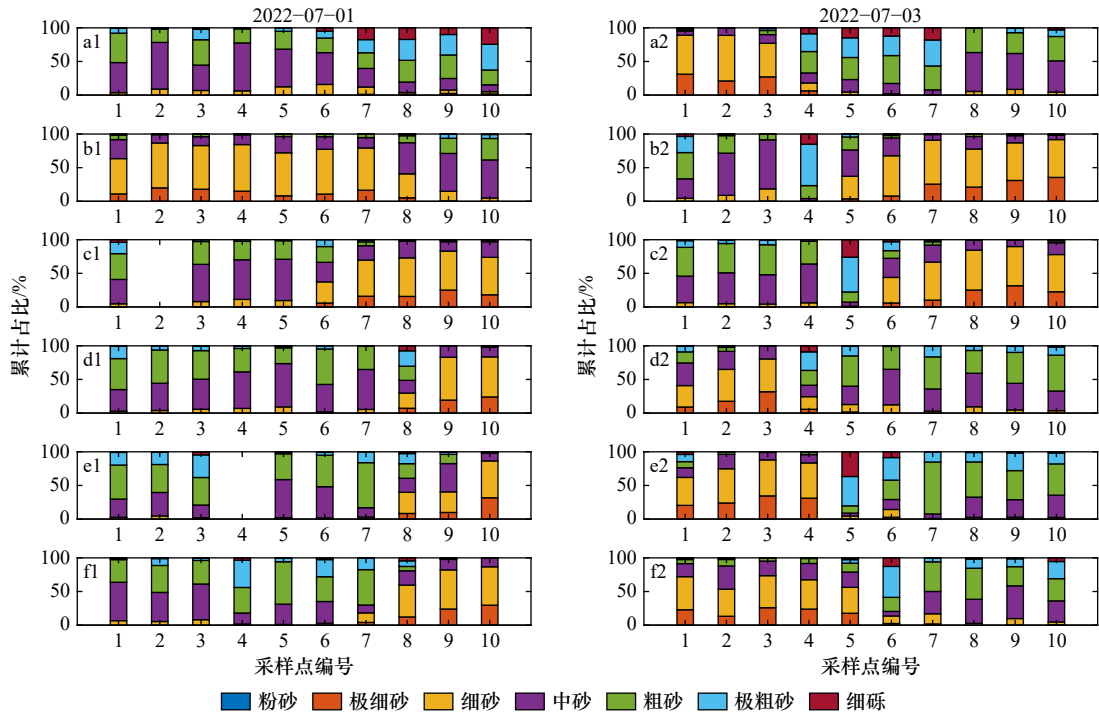


图 5 不同断面的粒度组成 [P1 (a1 和 a2), P2 (b1 和 b2), P3 (c1 和 c2), P4 (d1 和 d2), P5 (e1 和 e2) 和 P6 (f1 和 f2)]  
 Fig. 5 Grain size fraction content of different profiles [P1 (a1 and a2), P2 (b1 and b2), P3 (c1 and c2), P4 (d1 and d2), P5 (e1 and e2) and P6 (f1 and f2)]

表 3 不同断面粒度参数的特征值统计表

Table 3 Characteristic values of the grain-size parameters of different profiles

断面	采样日期	平均粒径 ( $\phi$ )				分选系数				偏态				峰态			
		Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD
P1	2022-07-01	-0.26	1.32	0.70	0.54	0.46	1.37	0.88	0.29	-0.30	0.19	-0.05	0.13	0.84	1.18	1.04	0.13
	2022-07-03	-0.23	2.71	1.16	1.02	0.47	1.38	0.82	0.27	-0.46	0.28	-0.11	0.20	0.94	1.58	1.17	0.20
P2	2022-07-01	1.07	2.57	2.09	0.51	0.50	0.78	0.63	0.10	-0.36	0.09	-0.2	0.11	0.86	1.28	1.11	0.12
	2022-07-03	-0.43	2.77	1.73	1.00	0.45	0.89	0.63	0.14	-0.33	0.12	-0.12	0.14	0.90	1.27	1.12	0.12
P3	2022-07-01	0.69	2.56	1.71	0.65	0.55	1.10	0.71	0.17	-0.33	-0.01	-0.15	0.1	0.76	1.21	1.02	0.13
	2022-07-03	-0.53	2.70	1.48	0.97	0.51	1.26	0.70	0.21	-0.37	0.34	-0.12	0.2	0.92	1.22	1.04	0.09
P4	2022-07-01	0.65	2.56	1.30	0.64	0.45	1.45	0.67	0.27	-0.25	0.12	-0.05	0.11	0.72	1.09	0.97	0.11
	2022-07-03	0.67	2.58	1.26	0.64	0.6	1.45	0.83	0.25	-0.37	0.2	-0.03	0.19	0.74	1.03	0.95	0.08
P5	2022-07-01	0.26	2.67	1.09	0.72	0.44	1.29	0.73	0.25	-0.31	0.27	-0.03	0.16	0.70	1.25	1.01	0.16
	2022-07-03	-0.71	2.72	1.15	1.11	0.39	1.38	0.81	0.29	-0.56	0.26	-0.10	0.26	0.89	1.47	1.09	0.19
P6	2022-07-01	0.16	2.66	1.25	0.79	0.50	1.24	0.75	0.23	-0.49	0.57	-0.05	0.27	0.82	1.29	1.03	0.13
	2022-07-03	0.19	2.42	1.46	0.81	0.70	1.29	0.90	0.17	-0.40	0.39	-0.15	0.26	0.81	1.68	1.01	0.24

## 5 讨论

### 5.1 正常岸滩台风事件前后沉积物粒度分布特征差异原因分析

本研究分析了粤西东海岛高位池尾水排放影响

砂质表层沉积物在台风前后的粒度变化特征。结果显示,正常岸滩在台风前呈现由岸向海逐渐变细的沉积特征,而在台风后,靠岸侧和靠海侧沉积物分别出现变细和变粗的趋势,且大部分样品的分选性变差(图 5,图 6)。正常天气条件下沉积物的平均粒径由

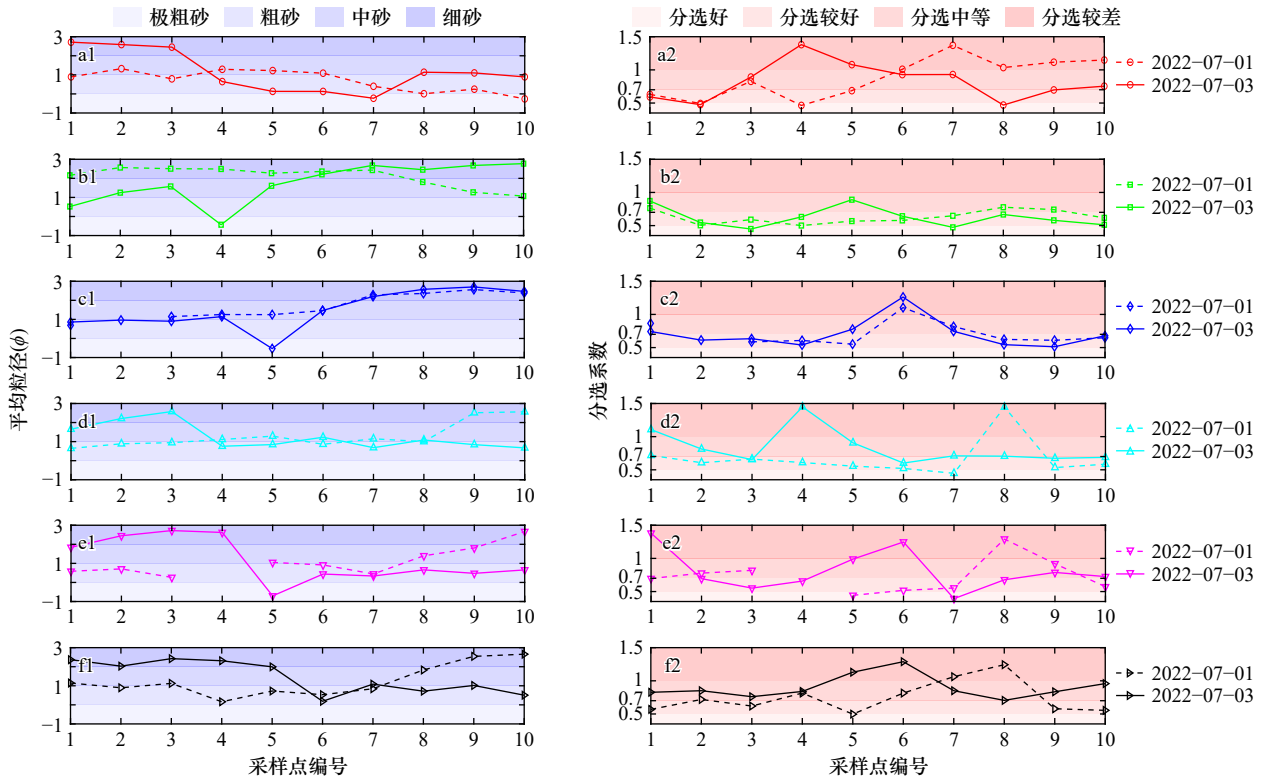


图6 不同断面粒度参数(平均粒径和分选系数)分布 [P1(a1 和 a2), P2(b1 和 b2), P3(c1 和 c2), P4(d1 和 d2), P5(e1 和 e2) 和 P6(f1 和 f2)]

Fig. 6 Mean size and sorting values of different profiles [P1 (a1 and a2), P2 (b1 and b2), P3 (c1 and c2), P4 (d1 and d2), P5 (e1 and e2) and P6 (f1 and f2)]

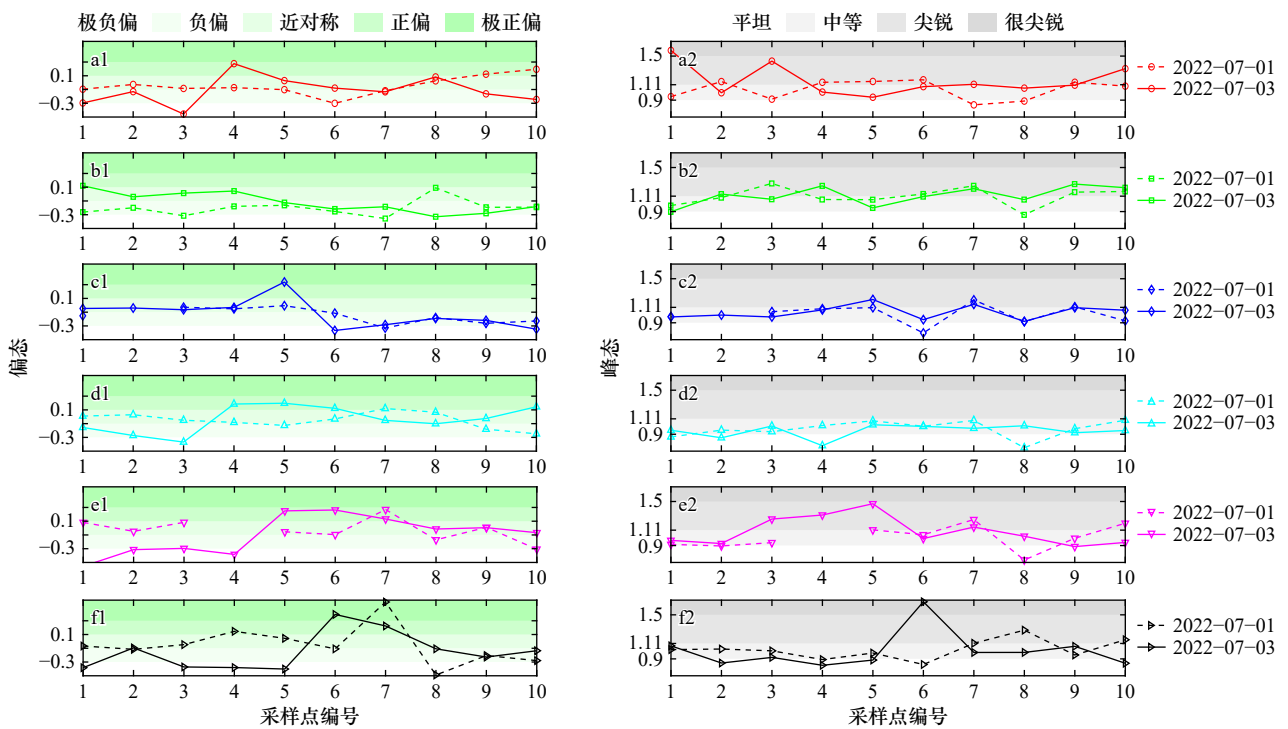


图7 不同断面粒度参数(偏态和峰态)分布 [P1(a1 和 a2), P2(b1 和 b2), P3(c1 和 c2), P4(d1 和 d2), P5(e1 和 e2) 和 P6(f1 和 f2)]

Fig. 7 Skewness and kurtosis values of different profiles [P1 (a1 and a2), P2 (b1 and b2), P3 (c1 and c2), P4 (d1 and d2), P5 (e1 and e2) and P6 (f1 and f2)]

岸向海逐渐变细是一种较为常见的自然现象,通常认为是由波浪和潮流在近岸区域的能量衰减所导致<sup>[23]</sup>。当波浪从深水传播至浅水区域时,随着水深变浅,波浪对海底的作用增强,会导致沉积物被起动,然后在波浪水质点的驱动下向岸运动,随后逐渐在破波带沉降下来。当水深进一步变浅,波浪破碎产生上冲流,推动沉积物向岸输移;当上冲流能量耗尽后开始回流,流速逐渐变小,粗颗粒率先沉降,细颗粒随后沉积,悬浮颗粒可能被回流带向更远的海域。上述原理可用于解释本区域的正常岸滩沉积物在正常天气下表现为由岸向海沉积物变细的分布特征,与前人对东海岛未受高位池尾水排放影响区域的海滩沉积物的研究结果较为一致<sup>[24]</sup>。

近岸水下沙坝的形成是砂质海岸削弱风暴影响的关键机制。沙坝在面对风暴潮时,能有效减缓波浪的侵蚀作用,提供一层自然的防护屏障,进而减少海滩的退缩和破坏。前人研究指出,风暴作用期间沙坝的形成和发育会造成海滩剖面沉积物粒径分布的重新分配<sup>[25-27]</sup>。具体而言,在常浪天气,波浪的上冲和回流会造成沉积物向海侧变细和向岸侧变粗的分异趋势,并逐渐形成滩肩剖面;而在台风天气,波浪作用增强,且水位抬高,会造成滩肩侵蚀,滩面中下部和近岸堆积,并在波浪作用下逐渐形成沙坝剖面,以此抵御和逐渐削弱风暴作用的影响<sup>[28-29]</sup>。与此同时,原本位于滩肩的粗颗粒沉积物被搬运至滩面下部或近岸,细颗粒的物质则在被侵蚀的滩肩附近沉积。在本研究中,正常岸滩中7至10采样点在台风前基本以细砂/极细砂占优,而在台风后则变化为以中砂和粗砂为主(图5),正是对上述理论的有效现场验证。前人亦指出,本区域在6-7月为低潮沙坝/裂流型海滩<sup>[30]</sup>,具有发育沙坝的潜力。

表4是本研究区域两类岸滩以及与东海岛隔湾相望的南三岛台风后整体滩肩和滩面平均粒径和分

选系数的变化情况表。南三岛海滩在1822号台风“山竹”后沉积物变化可与本研究的正常岸滩进行对比。台风过后,南三岛滩肩平均粒径 $\phi$ 均值增大0.19,滩面 $\phi$ 值减小0.08。在本研究中,正常海滩滩肩平均粒径 $\phi$ 均值增加1.45,滩面减小0.52。此外,台风后两处海滩的滩肩与滩面均呈现出分选变差的趋势。另外,北部湾的北海银滩在2016号台风“浪卡”后也呈现高潮位带沉积物变细,低潮位带沉积物变粗现象<sup>[31]</sup>。尽管台风影响的具体强度和沉积物响应在不同区域有所差异,但台风对滩肩和滩面的冲刷与搬运机制具有一定的共性。总体而言,台风期间有效波高的显著增强(图3a2)是导致正常岸滩沉积物变化的主要因素。

## 5.2 高位池尾水排放影响岸滩沉积物对台风作用的响应特征及机制分析

根据李高聪等<sup>[17]</sup>的研究,正常天气下高位池尾水排放间歇性下泄排放及其形成的冲沟地形是导致受影响岸滩沉积物横向分布差异的主要原因。在P1断面,中砂和粗砂组分占主导地位,粒径由岸向海逐渐变粗,且靠海侧区域含有较多的细砾组分(图5a1,图6a1)。本文推测因P1断面处位于冲沟冲扇区靠北侧位置,受高位池养殖尾水排放过程的直接影响。据现场观测可知,在养殖尾水的间歇性排放过程的影响下,位于冲沟上游的粗颗粒沉积物会在下泄流的作用下,逐渐向滩面搬运,并形成了一个类似“河口冲积扇”的滩面粗颗粒物质集聚区。P2以细砂组分为主,也呈现出由岸向海逐渐粗化的趋势(图5b1,图6b1)。与P1相比,P2区域细颗粒组分更多,推测其所在位置位于冲沟的核心区,且与冲沟中细颗粒物质的再分配过程密切相关。冲沟的水流将粗颗粒物质搬运至靠海一侧,而局部区域遗留的较多细颗粒物质主要以悬移质的运动形式存在,在潮流和波浪共同作用下,使得该部分物质易被再次搬运至P2区域,并在靠岸侧滞

表4 台风前后滩肩和滩面沉积物的粒度分布信息

Table 4 Grain size information of beach berm and beach face before and after the typhoon

粒度参数	采样时间	影响岸滩		正常岸滩		南三岛海滩	
		滩肩	滩面	滩肩	滩面	滩肩	滩面
平均粒径( $\phi$ )	台风前	1.44	1.49	0.80	1.40	2.05	2.07
	台风后	1.54	1.42	2.25	0.88	2.24	1.99
分选系数	台风前	0.67	0.77	0.69	0.73	0.67	0.65
	台风后	0.65	0.75	0.85	0.85	0.95	0.71
参考文献		本研究		本研究		李志强等 <sup>[15]</sup>	

留和扩散,形成了靠岸侧细颗粒物堆积环境。P3位于尾水影响范围的南侧边缘,受到的扰动较小,沉积物分布呈现出典型的向海方向变细规律,与正常岸滩的沉积格局类似(图5c1,图6c1)。

前文指出,正常岸滩在强烈的风暴潮和波浪作用下,滩肩沉积物的细颗粒组分增多,而滩面则表现为粗颗粒组分增加。那么,在台风的影响下,影响岸滩是否会与正常岸滩呈现类似趋势?从沉积物粒度结果来看,影响岸滩并未出现上述趋势且展现出更加复杂的沉积模式。具体而言,在P1断面,滩肩区域细砂和极细砂的含量增加,滩肩至滩面陡坡侧的粗砂和极粗砂显著增加。在台风期间,滩面区域同时受到冲沟增加水流汇聚和高能波浪的双重叠加的影响,导致粗颗粒物向岸推移。同时,滩肩区域大部分波浪被冲沟所引导,使滩肩处能量较低,从而更易于细颗粒物质的沉积(图5a1和b1);P2相对于P1属于开阔区域,台风期间S向波浪直接越过冲沟作用于该区域,因此正常天气沉积下的细颗粒物质的分布极易受到台风期间的大浪影响,导致滩肩表面的细颗粒组分向滩面输运;相较之下,P3仍表现出一定的稳定性。综上所述,台风和尾水排放的联合作用赋予了影响岸滩一个与正常岸滩截然不同的沉积响应模式,冲沟地形对台风期间水动力的空间分异效应是造成台风前后各断面沉积特征差异的重要因素。

相较于正常岸滩,影响岸滩各断面和平均粒径的均值变化较为明显(表3),且分选系数表现得更加稳定(图6,表4)。这一现象可能表明,台风和尾水的共同作用在局部引发了显著的沉积物动态扰动,虽然导致单个断面内的沉积物分配较为混乱,但在区域尺度上则主要体现为沉积物的局部再分配的过程,因此整体的平均粒径变化不大。这种局部扰动与整体平衡的现象体现了一种复杂的动态平衡机制:每条剖面因受不同强度的水动力和冲沟地形影响,导致沉积物输运过程复杂多变;而在区域尺度上,可能形成了以高位池尾水排放为主导的动力环境。此外,分选系数可表征沉积物粒度分布的均匀程度,可用于揭示在复杂环境中筛选出具有相似特征颗粒的水动力过程。台风后受影响岸滩的分选系数基本保持稳定(图5,表3,表4),这反映了尾水排放对沉积物分选的长期影响,台风对沉积物粒度分布的影响是暂时的,未能根本改变影响岸滩的沉积特征。特别是在台风后影响岸滩的沉积物变化未向正常岸滩的规律性方向调整,这也表明尾水排放对沉积物分布具有更为显著的控制作用。

本研究揭示了高位池尾水排放与台风对海滩沉积物变化的显著影响,但仍有许多问题亟待深入探讨。沉积物粒度信息不仅包含特征粒径、粒级组成和粒度参数3类指标,其余可用于刻画沉积物信息的粒度指标(粒度端元组成、敏感粒级)、粒形指标(圆度、凹凸度、扁平度、对称度和球形度)、化学元素含量和微塑料等<sup>[32-36]</sup>在文中尚未被讨论。未来的研究可以从以下几个方面进行拓展和深化:(1)探讨高位池影响区域和正常区域在台风过后的恢复期内对沉积物分布信息多指标的响应差异;(2)开展高位池影响岸滩区域的长期监测,包括不同台风、高程地形和尾水排放量等的观测;(3)利用高分辨率数值模型对高位池尾水排放海滩动态变化进行精细模拟和预测。

## 6 结论

本文以2203号台风“暹芭”为研究时段,对台风前后湛江市东海岛龙海天受高位池尾水排放影响岸滩和临近区域正常岸滩沉积物粒度分布时空变化特征(特征粒径、粒级组分和粒度参数)进行分析,主要得出以下结论:

(1)从特征粒径来看,台风过后,影响岸滩各断面的变化比正常岸滩更为显著。正常岸滩呈现出特征粒径由岸向海的减小趋势,与台风前的模式相反,即沉积物变粗且靠岸侧特征粒径较台风前有所增大(颗粒变细),靠海侧减小(颗粒变粗)。

(2)从粒级组分来看,影响岸滩在台风后主要粒径组分无明显规律。正常岸滩3条断面中,细砂组分增加了0.98%至6.30%,而中砂和粗砂组分分别减少了1.24%至12.21%和0.65%至9.36%,由岸向海上靠岸侧细颗粒增加、靠海侧粗颗粒增加。

(3)从粒度参数来看,影响岸滩平均粒径 $\phi$ 值在台风后变化较正常岸滩显著,前者3条断面平均的变化为0.35,而后者仅为0.1。影响岸滩中,除去P1部点位分选变化较大,其余点位分选基本保持不变,而正常岸滩大多数点位分选变差。两类岸滩沉积物的偏态和峰态在台风后无明显的变化规律。

(4)正常岸滩台风后沉积物靠岸侧变细、靠海侧变粗且分选变差主要由台风期间增大的有效波高引起。台风和尾水排放的联合作用使影响岸滩沉积响应模式与正常岸滩截然不同,长期受高位池尾水排放影响的岸滩,形成的复杂非均质分布和冲沟地形结构是导致两类岸滩沉积物分布差异的主要因素。

## 参考文献:

- [1] 林楠. 凡纳滨对虾+斑节对虾高位池轮养技术[J]. 中国水产, 2024(2): 82–84.  
Lin Nan. Rotational culture technology of *Litopenaeus vannamei* and *Penaeus monodon* in high-positioned ponds[J]. China Fisheries, 2024(2): 82–84.
- [2] 沈冰玲. 诏安县水产养殖现状及尾水排放治理分析[J]. 南方农业, 2024, 18(3): 241–244.  
Shen Bingling. Analysis of current situation of aquaculture and tail water discharge control in Zhao'an County[J]. South China Agriculture, 2024, 18(3): 241–244.
- [3] 魏龙, 张方秋, 高常军, 等. 广东湛江沿海木麻黄防护林生态系统的辐射通量特征[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(5): 1–6.  
Wei Long, Zhang Fangqiu, Gao Changjun, et al. Characteristics of radiation fluxes of *Casuarina* coastal shelterbelt in Zhanjiang, Guangdong Province[J]. Forestry and Environmental Science, 2016, 32(5): 1–6.
- [4] 徐元芹, 刘乐军, 李培英, 等. 我国典型海岛地质灾害类型特征及成因分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(9): 71–83.  
Xu Yuanqin, Liu Lejun, Li Peiying, et al. Geology disaster feature and genetic analysis of typical islands, China[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(9): 71–83.
- [5] Kathiresan K, Rajendran N. Coastal mangrove forests mitigated tsunami[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 65(3): 601–606.
- [6] 王金华, 董玉祥. 海岸沙地利用变化及其环境效应研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(5): 719–728.  
Wang Jinhua, Dong Yuxiang. Coastal sandy land use change and connected environmental effects: progresses and perspectives[J]. Tropical Geography, 2014, 34(5): 719–728.
- [7] Chan J C L, Shi Juen. Frequency of typhoon landfall over Guangdong Province of China during the period 1470–1931[J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(2): 183–190.
- [8] Kim D, Park D S R, Chang M, et al. Reanalyzing the relationship of tropical cyclone frequency and intensity affecting South Korea with the Pacific decadal oscillation[J]. Journal of Climate, 2023, 36(9): 2847–2855.
- [9] Gómez-Pina G, Muñoz-Pérez J J, Ramírez J L, et al. Sand dune management problems and techniques, Spain[J]. Journal of Coastal Research, 2002, 36(sp1): 325–332.
- [10] Wang Can, Yang Gang, Li Chunhui, et al. The response of sediment transport and morphological evolution to storms with different characteristics[J]. Science of the Total Environment, 2024, 946: 173987.
- [11] Xing Hao, Li Pingping, Zhang Lili, et al. Numerical simulation of the beach response mechanism under typhoon Lekima: a case study of the southern beach of Chudao[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(6): 1156.
- [12] 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. Study on storm response characteristics of south China beach[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(9): 975–985.
- [13] 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.
- [14] 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.  
Zeng Chunhua, Hu Taihuan, Zhang Huiling, et al. Wave motion response characteristics of swash zone to typhoon Wipha at Qing'an Bay in Xuwen, Guangdong Province, China[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(5): 74–83.
- [15] 李志强, 朱士兵, 曾春华. 台风影响下海滩表层沉积物变化研究[J]. 中国水运, 2021, 21(2): 68–70.  
Li Zhiqiang, Zhu Shibing, Zeng Chunhua. Study on surface sediment changes of beaches under typhoon influence[J]. China Water Transport, 2021, 21(2): 68–70.
- [16] 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.
- [17] 李高聪, 莫金玲, 王中锋, 等. 高位池养殖尾水排放对海滩表层沉积物横向粒度分布的影响初探[J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2025, 2025(2): 86–96.  
Li Gaocong, Mo Jinling, Wang Zhongduo, et al. Preliminary study on the influence of high-level pool aquaculture effluent discharge on the lateral grain size distribution of beach surface sediments[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2025, 2025(2): 86–96.
- [18] 唐文, 刘国忠, 覃月凤, 等. 台风“暹芭”引发广西极端强降水成因分析[J]. 气象研究与应用, 2024, 45(2): 126–133.  
Tang Wen, Liu Guozhong, Qin Yuefeng, et al. Analysis of the causes of extreme rainfall in Guangxi caused by typhoon “CHABA”[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(2): 126–133.
- [19] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 (第五分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.  
China Gulf Gazetteer Editorial Committee. China Gulf Gazetteer (Volume 5)[M]. Beijing: Ocean Press, 1992.
- [20] 沈雪云. 台风对湛江市电网造成的影响及防风加固措施[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(12): 127–128.  
Shen Xueyun. Impact of typhoon on Zhanjiang power grid and wind-proof reinforcement measures[J]. Inner Mongolia Coal Economy,

- 2019(12): 127–128.
- [21] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237–1248.
- [22] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3–26.
- [23] Dalrymple R W, Zaitlin B A, Boyd R. Estuarine facies models; conceptual basis and stratigraphic implications[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1992, 62(6): 1130–1146.
- [24] 冯淼彦, 董治宝, 黄日辉, 等. 广东省东海岛海岸老鼠芳 (*Spinifex littoreus*) 草丛沙堆形态及沉积特征[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 167–176.
- Feng Miaoyan, Dong Zhibao, Huang Rihui, et al. Morphology and sediments of coastal *Spinifex littoreus* nebkhas on Donghai Island of Guangdong Province, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(6): 167–176.
- [25] Carter R W G, Balsillie J H. A note on the amount of wave energy transmitted over nearshore sand bars[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1983, 8(3): 213–222.
- [26] Sunamura T, Takeda I. Landward migration of inner bars[J]. *Marine Geology*, 1984, 60(1/4): 63–78.
- [27] Cao Chao, Mao Zijian, Cai Feng, et al. Dynamic geomorphology and storm response characteristics of the promontory-straight beach—a case of Gulei Beach, Fujian[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 42(7): 64–78.
- [28] Sunamura T, Horikawa K. Two dimensional beach transformation due to waves[M]//American Society of Civil Engineers. Coastal Engineering 1974. Tokyo: University of Tokyo, 1974: 920–938.
- [29] Short A D. Three dimensional beach-stage model[J]. *The Journal of Geology*, 1979, 87(5): 553–571.
- [30] 李志强, 陈杏文. 湛江东海岛裂流风险评价[J]. *海洋开发与管理*, 2016, 33(S2): 73–78.
- Li Zhiqiang, Chen Xingwen. Rip current risk at the beach of Donghai Island, Zhanjiang, China[J]. *Ocean Development and Management*, 2016, 33(S2): 73–78.
- [31] 喜扬洋, 王日明, 冯炳斌, 等. 北海银滩响应台风作用的动力地貌过程[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(4): 97–104.
- Xi Yangyang, Wang Riming, Feng Bingbin, et al. Morphodynamic processes of the Yintan Beach in response to typhoon[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(4): 97–104.
- [32] 谭靖千, 高苑, Abarike G A, 等. 环雷州半岛海底表层沉积物 brGDGTs 组成分布特征及其环境意义[J]. *广东海洋大学学报*, 2021, 41(5): 84–93.
- Tan Jingqian, Gao Yuan, Abarike G A, et al. Composition and distribution characteristics of brGDGTs and significance of environment in surface sediments of Leizhou Peninsula[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2021, 41(5): 84–93.
- [33] 李自超, 蒲晓强, 赵辉, 等. 湖光岩玛珥湖表层沉积物粒度特征及其物源指示意义[J]. *广东海洋大学学报*, 2017, 37(3): 93–99.
- Li Zichao, Pu Xiaoliang, Zhao Hui, et al. Grain size characteristics of the surface sediments in Huguangyan Maar Lake and its significance to sediment source analysis[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2017, 37(3): 93–99.
- [34] 黄鑫, 蒲晓强. 热液活动对海底沉积物中有机质的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2017, 37(1): 117–124.
- Huang Xin, Pu Xiaoliang. The influence of hydrothermal activities on the organic matter in sediment[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2017, 37(1): 117–124.
- [35] 李高聪, 李志强, 朱士兵, 等. 图解法和矩值法海洋沉积物粒度参数的对比[J]. *广东海洋大学学报*, 2020, 40(6): 96–101.
- Li Gaocong, Li Zhiqiang, Zhu Shibing, et al. Comparative study on grain-size parameters of marine sediment derived from graphic and moment methods[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, 40(6): 96–101.
- [36] 张才学, 孙省利, 陈春亮. 湛江港湾表层沉积物重金属的分布特征及潜在生态危害评价[J]. *湛江海洋大学学报*, 2006, 26(3): 45–49.
- Zhang Caixue, Sun Xingli, Chen Chunliang. Distribution features and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in submarine surface sediments of Zhanjiang Bay[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2006, 26(3): 45–49.

# Influence of high-level pond aquaculture tailwater discharge on the response characteristics of surface sediment on the beach to Typhoon No. 2203 *Chaba*

Yuan Mingming<sup>1,2</sup>, Wang Huaqiang<sup>3</sup>, Tang Jieping<sup>1,2</sup>, Chen Dezhi<sup>2</sup>, Chen Yang<sup>1</sup>, Li Gaocong<sup>1,2</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Key Laboratory of Tropical Marine Ecosystem and Bioresource, Ministry of Natural Resources, Beihai 536009, Guangxi, China; 3. The Navigation Guarantee Center of South China Sea, Ministry of Transport, Guangzhou China, 510320)

**Abstract:** Investigating the impact of high-level pond aquaculture effluent discharge on the response mechanisms of sandy coastlines to typhoons is of significant importance for promoting the sustainable use and value enhancement of coastal resources. This study conducts a comparative analysis of sediment characteristics, including particle size, grain size distribution, and grain size parameters, before and after Typhoon No. 2203, *Chaba*, focusing on the influence of effluent discharge from high-level ponds on the coastal sediment distribution at Donghai Island in western Guangdong, as well as on normal coastal areas. The research findings indicate the following: (1) After the typhoon, the sediment in normal coastal areas exhibited poorer sorting, with finer sediments nearshore and coarser sediments offshore. (2) The sorting coefficient of sediment from the affected coastal area remained stable post-typhoon, while other parameters (characteristic particle size, grain size composition, and grain size parameters) did not show a consistent pattern of change. (3) The average changes in characteristic particle sizes ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ , and  $D_{90}$ ) and mean particle size of the affected coastal sediments were significantly greater than those of the normal coastal sediments after the typhoon. The intense wave action and rising water levels induced by the typhoon are critical factors influencing the sediment response in normal coastal areas. In contrast, the response of sediments in the affected coastal areas is more complex, resulting from the interplay between the gully topography created by effluent discharge and sediment redistribution processes, coupled with storm surge dynamics during the storm. This study provides a case for understanding the sediment grain size response characteristics of coastal areas influenced by high-level pond effluent during typhoon events, contributing to a better understanding of the interaction mechanisms between extreme events and aquaculture activities in coastal geomorphological evolution.

**Key words:** high level pond aquaculture; sandy coast; grain size of sediment; typhoon; Donghai Island in western Guangdong