

汪拾金, 张一鸣, 王致辉, 等. 浙江朱家尖岛东南沙滩群地形年际变化特征及影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(8): 1-12.

WANG Shijin, ZHANG Yiming, WANG Zhihui, et al. Inter-annual morphological evolution characteristics and impact factors of the south-eastern sandy beaches of Zhujiajian Island, Zhejiang Province[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(8): 1-12.

浙江朱家尖岛东南沙滩群地形年际变化特征及影响因素

汪拾金^{1,2}, 张一鸣^{3*}, 王致辉², 胡鹏^{3,4}, 董超⁵, 李薇³

(1 东海实验室, 舟山 316021; 2 浙江省海洋地质调查大队, 舟山 316021; 3 浙江大学海洋学院, 杭州 310058;

4 浙江大学舟山海洋研究中心, 舟山 316021; 5 浙江省水文地质工程地质大队, 宁波 315000)

摘要:为探究浙江朱家尖东南沙滩群的地形变化特征及影响因素, 2012 年 11 月至 2015 年 11 月开展了 6 次沙滩剖面地形观测。结果显示, 在人为补沙前, 各沙滩地形呈现明显的季节性变化特征: 夏秋台风季后至冬季结束, 沙滩中上部显著淤积, 最大淤积高度达 0.97 m, 沙滩顶部及底部轻微侵蚀, 侵蚀深度基本 < 0.3 m, 东沙北部及南沙南部剖面形成明显滩肩; 春季始至夏秋台风季前, 沙滩中部侵蚀, 最大侵蚀深度约 0.8 m, 上部和下部淤积, 淤积高度 < 0.5 m; 夏秋台风季内, 各沙滩中上部剧烈侵蚀, 最大侵蚀深度超过 1.0 m, 下部淤积, 最大淤积高度约为 0.45 m, 剖面坡度减小, 形成典型的风暴型剖面。2012 年 11 月至 2015 年 11 月, 东沙南部和南沙北部年际地形变化较强, 存在侵蚀风险, 局部侵蚀深度超过 1.0 m; 千沙、里沙和青沙地形变化介于 -0.6~0.4 m, 整体处于动态平衡。此外, 沙滩的冲淤过程受波浪和潮流共同控制, 地貌条件和人类活动进一步影响各个沙滩的地形演变。其中, 东沙受到两侧岬角的遮蔽作用更弱, 水动力作用更强, 地形冲淤变化相对更剧烈。人类活动可能是引起东沙和南沙侵蚀风险的重要原因, 科学规划人工护岸修建对于维持沙滩自然动态平衡有重要意义。

关键词:朱家尖岛; 沙滩; 地形变化; 水动力; 人类活动

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.172

0 引言

朱家尖岛位于舟山群岛东南部海域, 陆域面积 62.2 km², 海岸线长 79.2 km^[1], 滨海资源丰富多样, 自然景色秀美, 是国家 AAAA 级旅游景区, 尤其是岛东南部由“东沙、南沙、千沙、里沙、青沙”5 个沙滩组成的沙滩群, 沙滩坡度平缓, 沙粒质地优越, 有“十里金沙”之称, 是该区域重要的经济旅游资

源^[1-3]。朱家尖岛四面环海, 是海陆相互作用的动力敏感地带, 该沙滩群也处于动态冲淤变化之中^[2, 4], 人类活动^[4-5]、台风等极端天气^[6-9]更会导致该沙滩群的严重侵蚀。深入研究朱家尖东南沙滩群的地形变化特征及影响因素对其沙滩资源的保护及开发具有重要的意义。

目前, 已有学者针对该区域的地形变化特征及相关动力机制开展了研究。张朝阳^[10]基于水沙观测资料, 发现朱家尖岛东部近岸海域为不正规半日潮, 以顺时针旋转潮流为主, 海域沉积物主要由粉砂组成; 董超等^[2]根据 2012—2015 年朱家尖南沙的地形测量数据, 阐明了该区域夏季侵蚀、冬季淤积的季节性冲淤特征, 并基于经验公式计算了南沙的沿岸输沙率分布, 认为波生沿岸流输沙是控制沙滩演变的关键因素; 程林等^[4]基于朱家尖东沙 2010—2012 年的剖面地形实测数据, 揭示了东沙冬

收稿日期: 2024-07-17

资助项目: 东海实验室开放基金(DH-2022KF0221); 中央自然灾害防治体系建设项目(2023330053); 浙江省地质专项资金项目(2023013); 国家自然科学基金(12272349, 52339005)

第一作者: 汪拾金(1972—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋地质方面的研究工作. E-mail: 834846727@qq.com

* 通讯作者: 张一鸣(1998—), 男, 博士, 主要从事海岸水沙动力学方面的研究工作. E-mail: zhangym1998@zju.edu.cn

季呈滩脊-沟槽,夏季呈平坦缓坡的季节性地貌调整特征,并分析认为水动力、沉积物来源与人类活动共同控制该区域的地貌演变;郭俊丽等^[6-8]通过对朱家尖东沙地形的现场观测,分析了多场风暴影响下东沙的冲淤变化,并发现东沙持续面临风暴侵蚀的风险;GUO 等^[9]和 JIANG 等^[11]基于实测数据探讨了人为补沙对东沙冲淤演变的影响,发现人为补沙虽然能在短期内补充风暴侵蚀的泥沙,但并未从根本上解决东沙的侵蚀问题,有必要进一步科学规划补沙方案。然而,上述研究均针对特定的某一沙滩(东沙、南沙),缺少对于整个沙滩群地形变化空间分布特征的系统研究。同时,上述研究大多局限于台风季前后,尚不清楚该沙滩群在年内常态天气下以及多年的地形变化规律。本文基于对朱家尖东南沙滩群 2012—2015 年的 6 次剖面地形观测,分析了该沙滩群的年内和年际地形变化特征,并基于潮汐、波浪等资料进一步探讨了其地形演变的影响因素。

1 研究区域概况

1.1 研究区域及调查方法

研究区域沙滩群位于舟山市朱家尖岛东南侧,由东沙、南沙、千沙、里沙和青沙 5 个沙滩组成(图 1)。依据研究区域的岸线形状和走向,在各个沙滩以 200~400 m 为间隔分别布设了东沙 7 条,南沙 6 条,千沙 6 条,里沙 4 条,青沙 2 条,共计 25 条沙滩剖面(图 1,沿岸线自东北至西南分别为

AT1—AT25,红色剖面是下文所展示的代表性剖面)。由于 2016—2017 年间东沙曾进行过 10 次人为补砂^[9],本文选取 2012 年 11 月、2013 年 3、8、10、11 月以及 2015 年 11 月沿沙滩剖面进行的 6 次地形测量工作,以排除人为补砂对滩面高程的影响。沙滩剖面测量采用全站仪结合 GPS-RTK,全站仪用来测量剖面点的坐标位置和高程信息,GPS-RTK 用以对测量结果进行检验,检查点的数量不少于主测点的 10%。测量结果显示,剖面高程测量的误差 < 5 cm,测量剖面线偏差小于设计剖面线 50 cm,满足测量精度的要求。此外,文中的地形高程数据均统一为 1985 国家高程基准。

2018 年 9 月 18—19 日,沿前期布设的沙滩剖面进一步开展了表层沉积物取样工作,取样点如图 1 所示。沉积物粒度测试采用筛析和激光粒度分析 2 种方法^[12]。对于粒径 < 2 mm 的样品,直接采用 Mastersizer2000 型激光衍射粒度仪测试;对于粒径 > 2 mm 的样品,经称重后用 1 mm 孔径筛子湿筛,过筛部分在激光粒度仪上分析,未过筛部分使用传统筛析法分析,两部分数据利用 Mastersizer2000 型激光衍射粒度仪仿真程序合并获得完整粒度分布^[13-14]。沉积物粒度分级采用尤登-温德华氏等比制 Φ 值粒级标准^[12],沉积物命名采用 Folk 三角图分类法^[15],粒度特征参数根据 FOLK 和 WARD^[16]计算。

1.2 气候与水文条件

历史资料显示,研究区域年平均气温为 16.4 °C,年平均降水量为 1 096.7 mm,冬季降水量较少,降

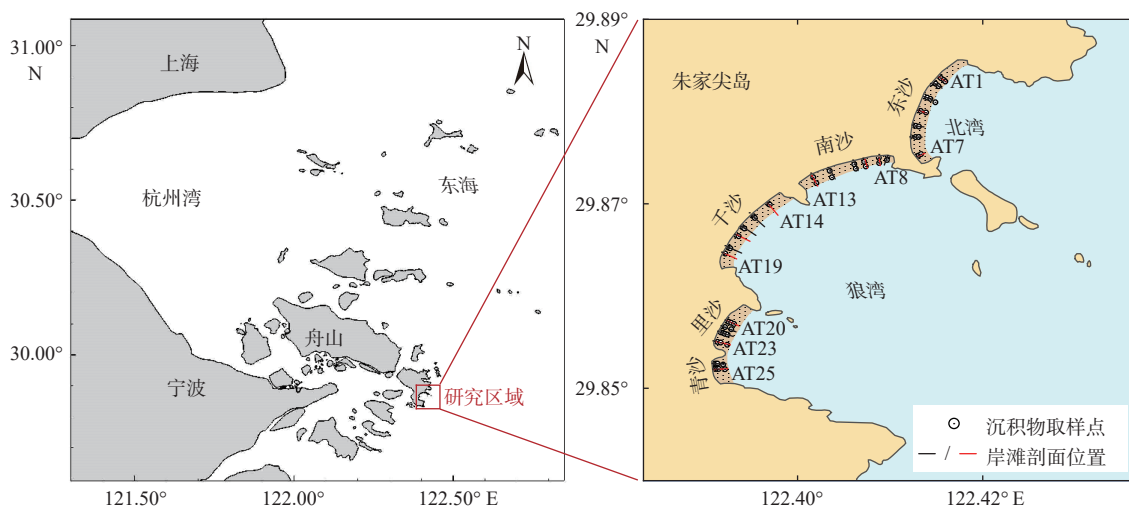


图 1 研究区域及观测位置

Fig.1 Overview of the study area and observation sites

水多集中于 3—6 月和 8—9 月^[1, 17]。季风明显, 秋冬多偏北风, 春夏多偏南风。全年多大风, 夏秋多台风。研究区域内平均风速为 7.1 m/s, 最大风速为 32 m/s, 常风向为 NNE, 各月平均风速为 5.9~8.0 m/s^[18]。

1959—1964 年朱家尖波浪观测资料显示, 研究区域内以风浪为主, 平均波高为 0.5 m, 周期为 3.6 s, 历史最大波高为 4.2 m, 波向为 E, 出现时间为 8 月; 各月平均波高为 0.3~0.6 m, 各月平均周期为 2.8~4.5 s。大浪集中于 8—10 月, 常波向为 N、NE 和 S, 其频率分别为 14.2%、17.9% 和 16.9%^[18]。

研究区域内潮汐属于不正规浅海半日潮, 潮位在 1 个太阴日内出现 2 次高潮和 2 次低潮, 并且有显著的日不等现象, 平均潮差为 2.61 m, 最大潮差为 4.79 m; 平均涨、落潮历时分别为 6 和 6.43 h^[1, 10, 18]。潮流属于不正规浅海半日潮, 以往复流为主, 表层和底层的平均流速分别为 1.08 和 0.78 m/s, 最大流速分别为 2 和 1.25 m/s^[18]。

1.3 地貌特征

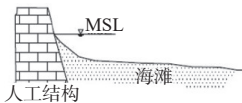
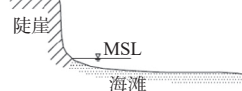
如图 1 所示, 研究区域沙滩群以岬湾相间的弧形砂质海岸为形态特征, 岸线呈不规则的锯齿状, 走向大致为 NE—SW。岬角环绕形成北湾和狼湾两大海湾, 其中, 北湾纵深 1.5 km, 弦长 1.7 km; 狼湾纵深 2.8 km, 弦长 3.0 km。湾内水深介于 0~20 m, 水下地形简单, 滨外地形坡度较缓。研究区域各海滩宽度介于 140~220 m, 坡度基本介于 0.75°~2.6°, 海滩上部较陡, 向下逐渐平缓。

根据现场调查, 各海滩主要呈现出 4 种地貌组合形态, 如表 1 所示。东沙、南沙和里沙的人类活动程度较高, 其中, 东沙上部已建成稳定的人工护岸, 并因其为免费开放的海水浴场, 高潮线以上区域受人类活动影响尤为严重。此外, 东沙北部滩角可观察到小范围的砾石带^[4]。南沙同样开发程度较高, 尤其是沙滩南部已建成公园和海滨浴场, 自然岸线已被人工护岸所取代。南沙北部 AT9—AT11 段是开展沙雕艺术节所堆放的人工沙丘; AT9 断面以北后方逐渐出现了自然形成高度为 5~6 m 左右的风成沙丘, 沙丘上覆蔓藤类植被, 沙丘前缘有自然侵蚀形成的陡坎。里沙外围由侵蚀剥蚀低丘组成, 低丘前缘分布有规模较小的风成沙丘, 沙滩南部入口处局部为人工结构-海滩组合, 整个海滩由条带状的砾石滩和砂质海滩组成。

相较而言, 千沙和青沙的人类活动相对较弱,

表 1 各沙滩的地貌组合类型^[19]

Table 1 Geomorphological classification of each beach^[19]

组合类型	剖面示意图	分布位置
人工结构-海滩		东沙、南沙、千沙、里沙
风成沙丘-海滩		南沙、千沙、里沙
陡崖-海滩		千沙、里沙、青沙
人工沙堆-海滩		南沙

受自然因素影响为主。千沙周边由低山丘陵所围, 为典型的基岩岬湾型海岸, 其东北部是风成沙丘-海滩类型, 逐渐向西南方向, 地貌组合类型变为陡崖-海滩形态; 千沙南部入口处局部呈现人工结构-海滩形态。青沙位于 5 个沙滩最南端, 沙滩规模较小, 区域水深较深, 地貌形态主要为陡崖-海滩类型。

2 结果与分析

2.1 表层沉积物特征分布

各沙滩表层沉积物的粒度组成如表 2 所示。总体来说, 各沙滩沉积物以具有较高的砂组分为特征, 其中东沙为中砂占比最高(平均为 49.8%), 其余 4 个沙滩则是细砂占比最高(平均分别为 56.4%、62.5%、53.2%、60.8%); 仅 6 个点位的沉积物含有砾和粉砂组分, 所有取样点均不含黏土组分。根据 Folk 三角图分类法^[15], 研究区域表层沉积物可分为 3 类, 以砂(S)为主, 占有所有取样点的 93.3%; 少量点位为砾质砂(gS)和砂质砾(sG), 分别占有所有取样点的 3.30% 和 3.30%。其中, 南沙、千沙和青沙沉积物类型相对单一, 各站点均为砂(S); 里沙除 1 个站点为砂质砾(sG)外, 其余站点也均为砂(S); 东沙的沉积物组成最为复杂, 以砂为主, 同时有 3 个站点的砾质砂(gS)和 2 个站点的砂质砾(sG)。

根据 FOLK 和 WARD^[16], 进一步计算了各站点的粒度特征参数, 包括平均粒径(Mz)、分选系数(σ)、偏态(Sk)和峰态(Kg)。总体来说, 东沙相较于其他沙滩表层沉积物粒径更粗, 分选性更差。具体而言, 研究区域沙滩沉积物的平均粒径 Mz 范围为

表 2 各沙滩表层沉积物的粒度特征

Table 2 Grain size characteristics of surface sediments on each beach

区域		粒度组成及粒度参数						
		砾/%	砂/%	粉砂/%	Mz/ Φ	σ	Sk	Kg
东沙	最小值	0.00	61.1	0.00	-0.11	0.36	0.00	0.83
	最大值	33.8	100	7.40	2.10	2.05	0.24	1.96
	平均值	5.70	93.2	1.10	1.56	0.72	0.03	1.01
南沙	最小值	0.00	100	0.00	1.92	0.39	-0.01	0.95
	最大值	0.00	100	0.00	2.27	0.49	0.00	0.97
	平均值	0.00	100	0.00	2.09	0.43	0.00	0.96
千沙	最小值	0.00	100	0.00	2.00	0.36	-0.01	0.96
	最大值	0.00	100	0.00	2.27	0.51	0.01	0.98
	平均值	0.00	100	0.00	2.14	0.40	0.00	0.97
里沙	最小值	0.00	60.1	0.00	-0.11	0.36	-0.01	0.81
	最大值	34.2	100	5.70	2.19	2.28	0.22	1.07
	平均值	1.80	97.9	0.30	1.96	0.54	0.02	0.96
青沙	最小值	0.00	100	0.00	2.04	0.40	0.00	0.96
	最大值	0.00	100	0.00	2.27	0.49	0.04	1.04
	平均值	0.00	100	0.00	2.15	0.44	0.01	0.97

-0.11 Φ ~2.27 Φ , 东沙表层沉积物平均粒径为 1.56 Φ , 明显粗于其他 4 个沙滩, 如表 2 所示。分选系数 σ 反映了粒度大小的均匀性, 南沙、千沙和青沙的分选最好, 分选系数介于 0.36~0.51; 里沙分选系数的平均值为 0.54, 分选较好; 东沙分选系数平均值为 0.72, 分选中等, 在沙滩群内分选最差。偏态 Sk 反映了粒度分布的不对称程度, 除东沙和里沙的个别采样点位呈略微正偏(Sk > 0)外, 其余点位的偏态值多接近 0, 呈近似对称的粒度分布。各沙滩的沉积物峰态 Kg 大多位于 0.9~1.0, 峰度中等。

2.2 年内地形变化特征

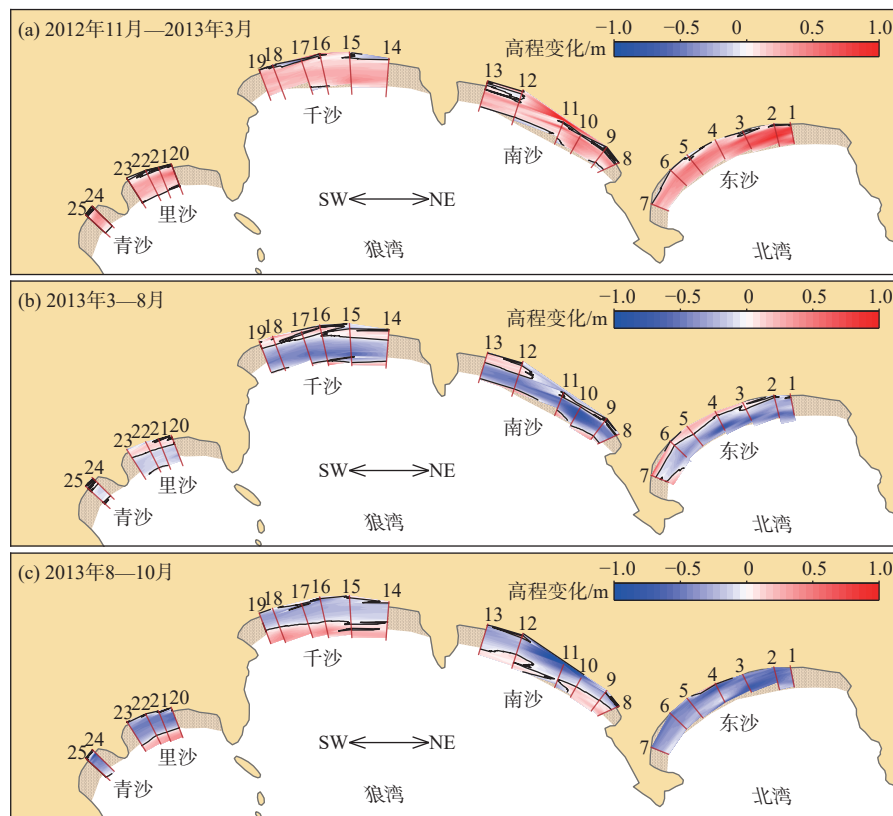
选取 2012 年 11 月、2013 年 3 月、2013 年 8 月及 2013 年 10 月 4 次观测以探究研究区域各沙滩的年内地形变化特征。其中, 7 月至 10 月为研究区域的台风季, 2012 年 11 月观测时间处于研究区域内当年夏秋台风季影响后。2013 年 3 月正处于研究区域冬、春交替之时。2013 年可能对研究区域产生较大影响的风暴有 4 场, 分别是热带风暴“康妮”(8 月 25—31 日)、强热带风暴“桃芝”(9 月 1—4 日)、强台风“菲特”(9 月 30 日—10 月 7 日)和超强台风“丹妮丝”(10 月 4—9 日)。2013 年 8 月与 10 月的观测时间分别为 8 月 20—25 日和 10 月 14—19 日, 正处于当年夏秋台风季前与后。因此, 上述 3 个时间段 2012 年 11 月—2013 年 3 月、2013 年 3—8 月和 2013 年 8—10 月可分别体现研

究区域夏秋台风季后至冬季结束、春季始至夏秋台风季前以及夏秋台风季的地形演变特征, 具有一定的季节代表性。

2.2.1 平面分布特征

图 2 分别展示了上述 3 个时间段各沙滩的地形变化平面分布。总体来说, 沙滩群在年内各时期分别表现明显的地形变化特征。2012 年 11 月—2013 年 3 月(图 2a), 各沙滩整体处于台风后的恢复状态, 表现为显著的淤积, 其中东沙和南沙的最大淤积高度分别达 0.97 和 0.85 m, 千沙、里沙和青沙的淤积稍弱, 淤积高度基本在 0.6 m 以内; 各沙滩顶部和底部表现为局部侵蚀, 使得沙滩宽度整体有所减小, 侵蚀弱于淤积, 各沙滩侵蚀深度基本在 0.3 m 以内。2013 年 3—8 月(图 2b), 各沙滩整体表现为沙滩中部侵蚀, 上部和下部淤积的状态, 沙滩宽度有所增大, 整体上侵蚀的强度和范围均大于淤积。东沙和南沙的侵蚀最强, 最大侵蚀深度约 0.8 m; 千沙和里沙稍弱, 最大侵蚀深度约 0.6 m。东沙、南沙和千沙最大淤积高度均在 0.5 m 左右, 里沙淤积稍弱, 大部分区域的淤积高度在 0.2 m 以内; 青沙整体冲淤幅度微弱, 高程变化在 -0.3~0.1 m 区间内。

2013 年 8—10 月的台风季内(图 2c), 各沙滩基本表现为滩面中上部侵蚀、滩面下部淤积的特征, 导致沙滩宽度有所增大。各沙滩侵蚀范围和高度均强于淤积, 这与程林等^[4]、郭俊丽等^[6]和 LIU 等^[20]的结论相吻合。风暴期间各沙滩冲淤变化剧烈, 2 个



黑色实线代表高程变化 0 m 等高线

图 2 2012 年 11 月—2013 年 10 月不同时段各沙滩的滩面高程变化

Fig.2 Intra-annual topographic difference plot of each beach during Nov. 2012– Oct. 2013

月的侵蚀深度已相当于甚至超过台风前 5 个月的侵蚀深度。其中,南沙(AT10—AT11)和青沙(AT24)上部的局部侵蚀深度超过 1.0 m,东沙侵蚀稍弱,最大侵蚀深度达 0.8 m,里沙和千沙所受侵蚀最弱,侵蚀深度整体上分别小于 0.6 m 和 0.5 m。对于淤积而言,南沙、千沙和里沙最大淤积高度在 0.45 m 左右,青沙稍弱为 0.3 m 左右。东沙下部未发现明显淤积,一方面,可能因为东沙的波流动力相对更强,滩面所侵蚀的泥沙被输运至距离滩面较远的水下位置从而未被观测到;另一方面,也可能因为东沙 2013 年 10 月观测时潮位不够低,低潮区间地形数据相较于其他沙滩采集不足(图 3a)。此外,台风季的侵蚀范围较春季及台风前有所上移,推测可能是风暴期间的增水和强波浪以及强风所致的风沙移动导致滩面中上部受到的侵蚀强度增加。

2.2.2 剖面形态变化特征

此外,各沙滩的剖面形态也相应表现出一定的季节性变化特征。图 3 分别展示了各沙滩的代表性剖面(图 1 红色剖面)在不同时期的形态对比。在冬季结束(2013 年 3 月剖面,红色实线),沙滩从台风季侵蚀后逐渐恢复,滩面前滨的泥沙在波浪和

潮流的作用下输运向岸堆积,从而使得前滨滩面坡度变陡,后滨滩面变缓。东沙北部(AT1—AT4,图 3a、b)和南沙南部(AT10—AT13,图 3e、f)剖面形成了明显的滩肩,但两沙滩其余剖面相对平缓,未观察到明显滩肩形成(图 3c、d)。这可能是由于岬角和岛屿对东沙南部和南沙北部的遮蔽作用削弱了该处的水动力,从而导致向岸泥沙堆积减弱。此外,其他 3 个沙滩剖面也并未观察到滩肩形成(图 3g—i),这说明 2012 年 11 月至 2013 年 3 月期间东沙和南沙的水动力可能相对于其他 3 个沙滩更强。

受风暴影响后(2012 年 11 月及 2013 年 10 月剖面,灰色及绿色实线),滩面中上部受到强波流动力冲刷,泥沙向海方向运输并堆积在滩面下部形成一定高度的潮间带沙坝,前滨滩面坡度变缓而后滨坡度变陡,形成典型的风暴型剖面形态。值得注意的是,东沙剖面在风暴后虽然也表现明显的滩面中上部冲刷,但所形成的沙坝相较于其他沙滩并不明显,这可能指示东沙滩面在风暴期间所冲刷的泥沙被搬运至离岸更远的区域,从而可能增大其在风暴后恢复的难度。

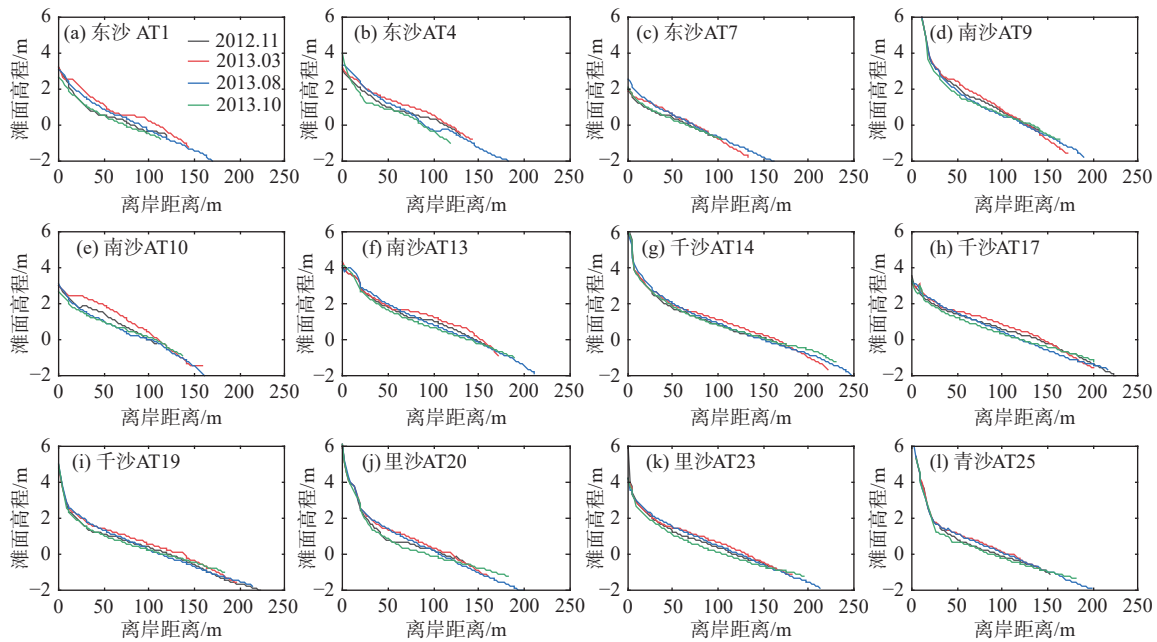


图3 各沙滩代表性剖面年内形态变化

Fig.3 Intra-annual morphological changes of typical bed profiles in each beach

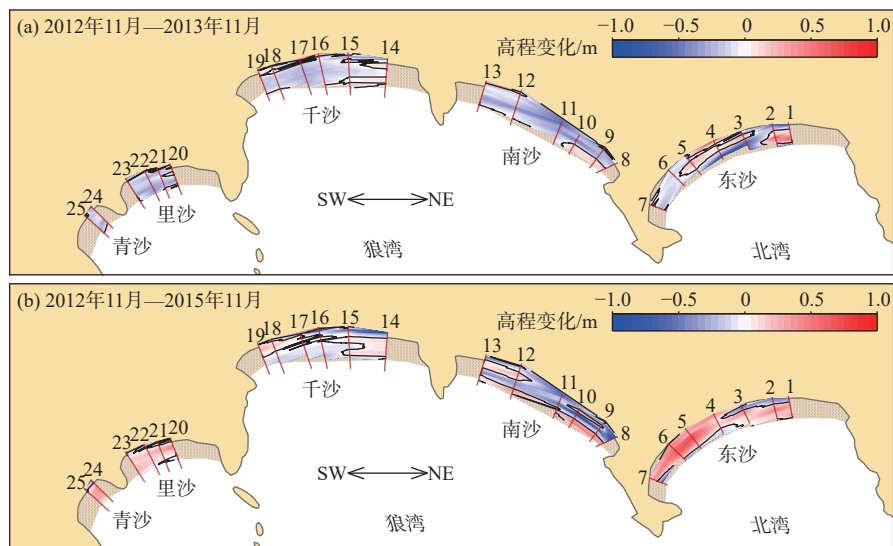
2.3 年际地形变化特征

2.3.1 平面分布特征

选取 2012 年 11 月、2013 年 11 月与 2015 年 11 月 3 次地形高程测量,以进一步探究研究区域各沙滩的年际地形变化特征,如图 4 所示。2012 年 11 月—2015 年 11 月,东沙表现为相对不规律的演变特征,整体上地形变化幅度较大,在 $-1.0\sim 0.7\text{ m}$ 的范围内。具体而言,AT1 至 AT2 段始终表现为滩

面上部侵蚀,中下部淤积的趋势;AT3—AT5 段则表现为滩面中上部淤积,下部侵蚀的特征;AT5—AT7 段在 2012—2013 年表现为轻微的侵蚀,整体侵蚀深度 $<0.3\text{ m}$,但在 2012—2015 年则表现为大范围的淤积,最大淤积高度可达 0.65 m ,AT7 下部出现局部较强的侵蚀,侵蚀深度可达 1.0 m 。

相较东沙而言,南沙和千沙的冲淤变化特征相对规律。2012 年 11 月—2015 年 11 月,南沙基本表现为滩面下部淤积,滩面中上部大面积侵蚀的趋



黑色实线代表高程变化 0 m 等高线

图4 2012 年 11 月—2013 年 11 月 (a) 和 2012 年 11 月—2015 年 11 月 (b) 各沙滩的滩面高程变化

Fig.4 Topographic difference plot of each beach during Nov. 2012- Nov. 2013(a), and Nov. 2012- Nov. 2015(b)

势, 侵蚀整体强于淤积, 最大侵蚀深度超过 1.0 m, 而淤积高度均在 0.5 m 以内, 整体地形变化幅度同样较大。此外, 南沙 AT12—AT13 和 AT9—AT10 的中部局部区域出现小范围淤积, 淤积高度在 0.3 m 以内。千沙 AT14—AT15 段中下部以及 AT17—AT19 段中上部表现为持续的淤积, 其他区域则始终为侵蚀。千沙地形相对稳定, 年际变化幅度处于 $-0.6 \sim 0.3$ m 的范围内, 仅在 AT14 顶部的局部范围内出现深度超过 1.0 m 的强侵蚀。里沙和青沙表现出相似的地形变化特征, 2012—2013 年两沙滩均表现为沙滩整体的侵蚀以及沙滩下部的小范围淤积; 2012—2015 年两沙滩却表现为整体的淤积和顶部局部的微弱侵蚀。考虑到在上述时段内两沙滩的地形变化幅度均相对较小, 基本处于 $-0.4 \sim 0.4$ m, 推测里沙和青沙处于动态平衡状态。

总体来说, 在本文 3 年的时段内, 东沙和南沙相较于其他沙滩的年际冲淤变化更强, 研究区域各沙滩并未表现明显的趋势性年际冲淤规律。然而, 2012—2015 年间, 东沙和南沙的部分区域表现为持续的侵蚀, 比如东沙 AT4—AT7 段的下部均持续表现为侵蚀; 2012 年 11 月以来南沙 AT8—AT11 段中上部的侵蚀逐渐加剧, 至 2015 年 11 月侵蚀高度超过 1.0 m。这指示了两沙滩在没有人为补砂的条件下存在一定的侵蚀风险, 有必要进一步加强沙滩地形监测和保护措施。此外, 前文显示东沙在风暴期

间所冲刷的泥沙可能被搬运至离岸较远区域。然而, 在常浪条件下沙滩下部的泥沙向岸运输, 离岸较远的沙坝可能导致这部分泥沙向岸运输后难以得到及时补充, 从而导致沙滩下部的侵蚀, 这与东沙南部(AT4—AT7)下部始终处于侵蚀趋势定性符合。因此, 风暴侵蚀后缺少充足的泥沙补给可能是东沙呈侵蚀趋势的重要原因。

2.3.2 剖面形态变化特征

进一步对比了各沙滩代表性剖面(图 1 红色剖面)在不同年份的形态特征。其中, 东沙北部(AT1—AT4, 图 5a、b)的剖面上部较为稳定, 而剖面下部处于动态变化, 表现为先侵蚀后淤积, 2012 年与 2015 年的剖面形态较为一致; 东沙南部(AT5—AT7, 图 5c)剖面变化较为显著, 2012—2015 年沙滩上部淤积、下部显著侵蚀, 使得剖面上部变缓、下部变陡, 沙滩宽度减小。对于南沙而言, 其北部剖面年际变化相对显著, 表现为剖面中部的持续侵蚀和下部的持续淤积, 滩面中部逐渐发育为沟槽, 沙滩宽度有所增大(图 5d、e); 南沙南部剖面相对稳定, 整体剖面形态较为平缓, 年际变化不显著(图 5f)。与东沙和南沙相比, 千沙、里沙和青沙各剖面形态相对稳定(图 5g-l)。2012—2015 年各剖面基本表现为先侵蚀后淤积, 地形变化幅度相对较小, 剖面形态没有定性改变, 整体较为平缓。因此, 推测这 3 个沙滩处于动态平衡状态。

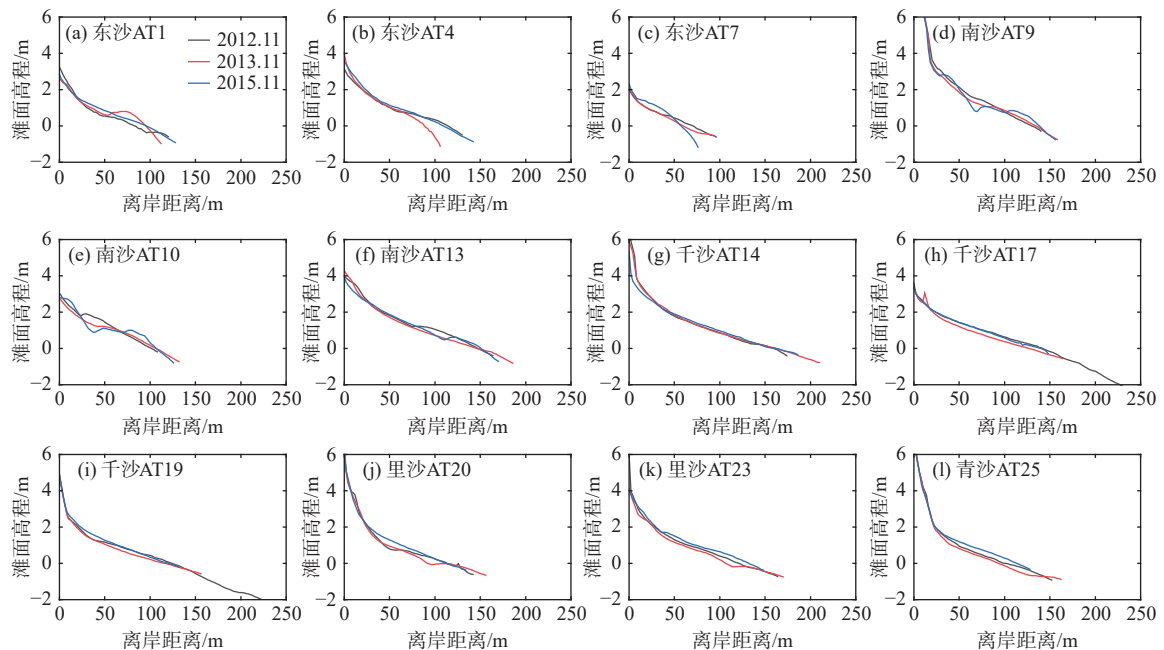


图 5 各沙滩代表性剖面年际形态变化

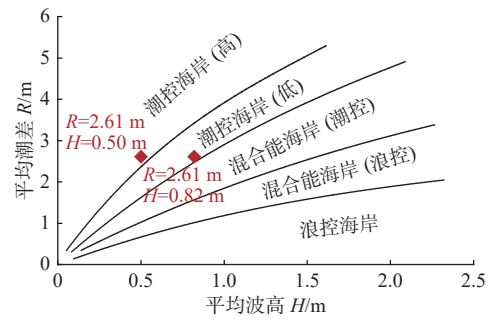
Fig.5 Inter-annual morphological changes of typical bed profiles in each beach

3 讨论

3.1 沙滩演变的水动力因素

波浪和潮汐是控制沙质海岸演变的重要水动力因素^[21-22]。根据平均潮差 R 和平均波高 H 的相对关系, DAVIS 和 HAYES^[23] 将海岸分为 5 类, 分别为潮控海岸(高)、潮控海岸(低)、混合能海岸(潮控)、混合能海岸(浪控)和浪控海岸, 如图 6 所示。为表征海岸的控制动力因素, 崔金瑞和夏东兴^[24]提出了浪潮作用指数 $K=2.5(H/R)$ 。 $K>1$ 与 $K<1$ 分别代表海岸地貌演变受波浪和潮汐控制, K 接近 1 则会发育过渡型地貌形态。以上 2 种分类指标已在海岸动力地貌研究中得到广泛应用^[25-27]。如前文所述, 研究区域平均潮差 R 为 2.61 m, 平均波高 H 为 0.5 m。考虑到该波浪资料年代久远, 同时搜集了 GUO 等^[9] 2016 年 6 月至 2017 年 7 月朱家尖 20 m 水深波浪浮标的观测结果用于分析, 该时段内平均波高 H 为 0.82 m。根据 DAVIS 和 HAYES^[23] 的划分方法, 研究区域属于潮控海岸, 如图 6 所示。此外, 根据 2 组波浪统计资料计算所得的浪潮作用指数 K 分别为 0.48 和 0.79, 均表征研究区域的地形演变受潮汐作用控制。

然而, 前文结果显示研究区域在台风季后至次年台风季前表现出先淤积后侵蚀的特征, 这与以往台风后沙滩逐渐淤积恢复的认识有所差异。历史统计资料显示, 研究区域以风浪为主, 同时季风特征显著, 推测常态天气条件下的沙滩冲淤受季节性风浪影响显著。由于缺少研究区域的实测风速与



根据文献 [23] 修改

图 6 研究区域控制动力类型

Fig.6 Energy regime of the study area

波浪数据, 本文搜集了 2012 年 11 月至 2013 年 8 月研究区域附近的 ERA5 再分析风场数据, 以探究风浪和沙滩演变的相关关系, 该数据已经过大量前人验证及使用^[28-29]。如图 7 所示, 研究区域两时段内的风向呈现明显差异。2012 年 11 月—2013 年 3 月, 研究区域主导风向为 N(21.4%)、NNW(13.8%)和 NNE(11.7%); 2013 年 3—8 月研究区域主导风向为 S(21.9%)、SSW(16.5%)和 SSE(12.9%), 同时这与历史资料中“秋冬多偏北风, 春夏多偏南风”的描述相符。考虑到研究区域沙滩群位于 SEE 朝向的半封闭海湾内, 春夏的偏南风可能会导致风浪更易传播进海湾内, 从而直接作用于沙滩造成侵蚀; 秋冬偏北风引起的风浪受到海湾地形的阻挡发生折射和绕射, 风浪作用减弱, 潮汐相对作用增强从而造成沙滩滩面淤积, 这和程林等^[4]的观点相吻合。此外, 历史资料显示台风季内最大波高达 4.2 m, 各沙滩在风暴后呈现明显的风暴型剖面特征, 风暴期间的强波浪也同样对各沙滩的地形演变造成剧烈的影响^[6-8, 11, 20]。因此, 尽管潮汐和波浪的相对大小表征了研究区域的潮控特性, 季节性变化的波浪同

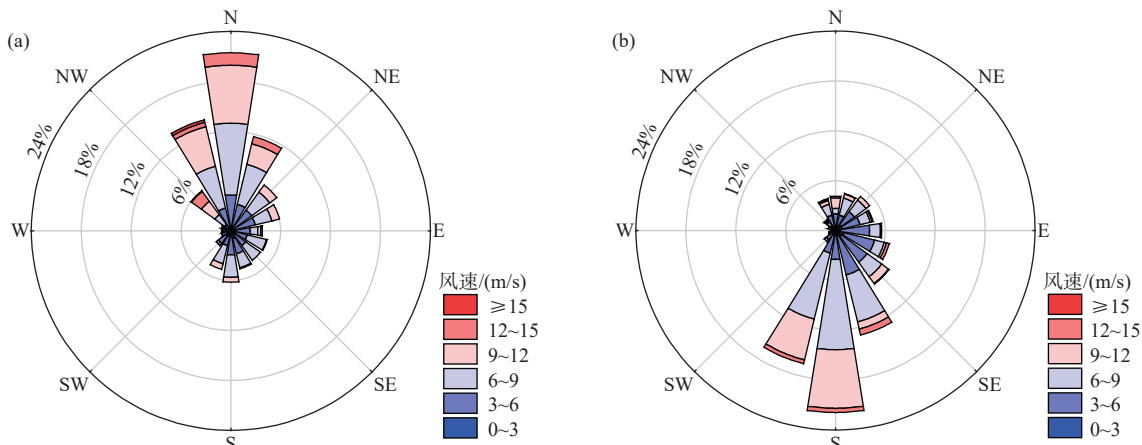


图 7 研究区域 2012 年 11 月—2013 年 3 月 (a) 和 2013 年 3—8 月 (b) 风玫瑰图

Fig.7 Wind rose in the study area during Nov. 2012-Mar. 2013(a) and Mar. 2013-Aug. 2013(b)

样显著影响研究区域的地形变化。

3.2 地貌条件对沙滩演变的影响

整体上, 各沙滩的年内变化特征定性相似, 说明控制 5 个沙滩演化的动力因素具有一定的相似性。然而, 由于各个沙滩的地貌条件等因素的差异, 地形变化强度有所不同, 同时导致不同的年际地形变化特征。首先, 无论是台风季还是常态天气, 东沙始终表现较强的地形冲淤变化。相应的, 东沙的年际地形变化同样较为显著, 表现出一定的侵蚀风险。从地貌的角度看, 这可能是由于东沙所处的北湾相较于其他沙滩所处的狼湾纵深较小, 受到两侧岬角的遮蔽作用更弱, 从而使得东沙的水动力作用更强, 地形冲淤变化更剧烈。此外, 表层沉积物观测结果显示东沙相对于其他沙滩表层沉积物粒径最粗, 组成最复杂, 这同样指示东沙的水动力可能相较于其他沙滩更强。

狼湾内的 4 个沙滩也在各季节同样表现不同的冲淤强度。2013 年春季至台风季前, 里沙和青沙的地形变化相对于南沙和千沙更弱, 这可能是由于该时段的主导风向为偏南风, 里沙和青沙距离南岬角更近从而受到的保护作用更强。2013 年台风季, 里沙和青沙的侵蚀则强于千沙, 可能是由于台风期间的偏东风使得强波浪直接作用于两沙滩, 而千沙则受到北面岛屿的保护。因此, 附近岬角和岛屿的遮蔽作用使得各沙滩在相似的外海波流条件下表现不同的冲淤特征, 研究区域的地貌条件对各沙滩演变的影响显著。

3.3 人类活动对沙滩演变的影响

研究区域沙滩群作为当地重要的旅游资源, 其地形变化深受人类活动的影响, 最显著的表现是人工沙滩-海滩地貌组合类型的出现以及人工结构占比的逐渐增多。一方面, 人类活动直接改变沙滩地形, 比如南沙北部的 AT9—AT11 段, 尽管相较于南沙南部可能受到相对更强的遮蔽作用, 但其地形变化反而更为剧烈, 并且滩面中上部表现持续侵蚀的趋势。这可能是由于该段沙滩顶部为每年国际沙滩雕节举办的区域, 人类活动直接影响了该区域的地形演变。另一方面, 一些工程和设施可能改变自然动力条件, 破坏原本的动态平衡, 改变自然的滩面演变规律。比如, 东沙顶部人工护岸修建过于接近潮间带, 破坏了原本沙滩纵向的泥沙输运过程^[9], 增

强了波流对沙滩的冲刷^[4], 本文结果也支持了前人研究对于东沙持续受到侵蚀威胁的认识。此外, 沉积物分布进一步指示人类活动增强了冲淤过程的复杂性。东沙泥沙输运过程的破坏可能影响其沉积物供给, 导致了表层沉积物相对较差的分选性。同时, 在观测期间发现东沙滩面夹杂有建筑材料成分, 说明人工护岸以上酒店修建等工程同样影响了东沙沉积物组成。

相比之下, 南沙南部虽然也修建有大范围的人工护岸, 但却表现为动态平衡的年际地形变化, 未发现明显的侵蚀风险, 表层沉积物分选性较好。这可能是由于南沙南部的人工护岸位于高潮位以上, 对于自然动态平衡的动力条件影响相对较小。此外, 观测结果显示, 千沙、里沙和青沙整体处于年际地形动态平衡, 所受侵蚀风险相较于东沙和南沙更小, 因此这 3 个沙滩的自然岸线得以大范围保留。千沙和里沙虽然也修建有人工结构, 但仅位于沙滩入口附近, 范围相对局限, 同时人工结构也位于高潮位以上, 自然动力得以保护。因此, 人类活动显著影响研究区域的地形演变, 科学规划修建人工护岸对于维持沙滩自然动态平衡有重要意义。

4 结论

(1) 研究区域各沙滩地形在年内呈现明显的季节性变化特征。台风后至冬季结束, 各沙滩表现为滩面中上部的大范围淤积和顶部及底部的局部较弱侵蚀; 春季始至夏秋台风季前, 各沙滩中部侵蚀, 上部和下部淤积, 整体上侵蚀强度大于淤积; 夏秋台风季内, 各沙滩表现为滩面中上部全面侵蚀、滩面下部淤积的特征, 侵蚀显著强于淤积。各沙滩剖面形态表现相应的季节性调整。受风暴影响后, 各沙滩中上部冲刷, 泥沙堆积于滩面下部形成沙坝, 表现为风暴型剖面。风暴后的恢复期内, 各沙滩前滨泥沙向岸输运堆积, 东沙北部和南沙南部剖面形成了明显的滩肩。

(2) 2012 年 11 月至 2015 年 11 月, 东沙和南沙的年际地形变化幅度整体较大, 东沙 AT4—AT7 段下部、南沙 AT8—AT11 段中上部持续表现为侵蚀状态, 表明东沙和南沙两沙滩存在侵蚀风险, 风暴后缺少充足的泥沙补给可能是东沙侵蚀的重要原因。千沙、里沙和青沙的年际地形变化相对较小, 剖面形态相对稳定, 推测处于动态平衡状态。

(3) 研究区域属于潮汐动力控制的海岸, 但季

节性变化的风浪和风暴期间的强波浪均显著影响研究区域沙滩的冲淤过程。地貌条件的差异可能影响各沙滩的水动力强度,进而导致各沙滩呈现不同的地形变化特征。日益增长的人类活动可能干扰沙滩自然的动态平衡过程,使沙滩面临侵蚀风险。科学规划修建人工结构对于维持沙滩稳定具有重要意义。

参考文献:

- [1] 夏小明. 中国海岛志浙江卷(第二册): 舟山群岛南部 [M]. 北京: 海洋出版社, 2014: 371-458.
XIA X M. Records of Chinese Islands: Zhejiang Volume (Volume II) [M]. Beijing: China Ocean Press, 2014: 371-458.
- [2] 董超, 周宇渤, 张朋, 等. 朱家尖南沙海滩剖面变化特征与泥沙输运 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48(4): 359-366.
DONG C, ZHOU Y B, ZHANG P, et al. Profile variation characteristics and sediment transport of Nansha Beach in Zhujiajian [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 359-366.
- [3] 潘静芬. 舟山朱家尖海水浴场夏季水质状况分析与评价 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2012, 31(4): 366-370.
PAN J F. Monitoring and assessment of Zhoushan Zhujiajian bathing beach in summer [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2012, 31(4): 366-370.
- [4] 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 L, SHI L Q, XIA X M, et al. Sedimentation and recent morphological changes at Dongsha Beach, Zhujiajian Island, Zhejiang Province [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2014, 34(1): 37-44.
- [5] 吴晗, 杨世伦, 邓兵, 等. 长江口外泥沙向南输运速率的变化探讨: 以朱家尖岛附近海域为例 [J]. 上海国土资源, 2014, 35(1): 77-82.
WU H, YANG S L, DENG B, et al. Variation in the rate of southwards sediment transport from the Yangtze Estuary estimated from deposits in the inner continental shelf adjacent to Zhujiajian Island [J]. Shanghai Land and Resources, 2014, 35(1): 77-82.
- [6] 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 J L, SHI L Q, TONG X L, 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.
- [7] 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 J L, SHI L Q, CHEN S L, 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.
- [8] 郭俊丽, 时连强, 陈沈良, 等. 基于 Argus 图像的舟山东沙滩对连续风暴的响应研究 [J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(4): 728-739.
GUO J L, SHI L Q, CHEN S L, et al. Response of Dongsha Beach in Zhoushan to continuous storms based on Argus images [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(4): 728-739.
- [9] GUO J, SHI L, PAN S, et al. Monitoring and evaluation of sand nourishments on an embayed beach exposed to frequent storms in eastern China [J]. Ocean and Coastal Management, 2020, 195: 105284.
- [10] 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 Z Y. Study on tidal current and sediment characteristics of Zhujiajian Island offshore area [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [11] JIANG Z, SHI L, GUO J, et al. Storm response and recovery process after nourishment of Dongsha Beach, Zhujiajian Island, Zhejiang Province [J]. Journal of Coastal Research, 2020, 95(S1): 231-236.
- [12] 国家海洋局 908 专项办公室. 海洋底质调查技术规程 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 4-7.
908 Special Office of State Ocean Administration. Technical Specification for Marine Sediment Survey [M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 4-7.
- [13] 陈翰, 陈忠, 颜文, 等. 汕头近岸海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势 [J]. 沉积学报, 2014, 32(2): 314-324.
CHEN H, CHEN Z, YAN W, et al. Grain size characteristics of surface sediments and their transport patterns over the coastal waters of Shantou City, Guangdong Province [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(2): 314-324.
- [14] 廉耀康, 李炎. 台湾浅滩沉积物粒度特征及输运趋势 [J]. 台湾海峡, 2011, 30(1): 122-127.
LIAN Y K, LI Y. Grain size characteristics and transport trend in the Taiwan Bank [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(1): 122-127.
- [15] FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand [J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4): 937-968.
- [16] 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: 3-26.
- [17] 郭俊丽. 不同强度风暴事件影响下岬湾海滩动力地貌过程研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
GUO J L. Research of embayed beach morphodynamics under the impacts of storm events with different intensity scales [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [18] 王爱军, 高抒, 杨旸. 浙江朱家尖岛砾石海滩沉积物分布及形

- 态特征 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2004, 40(6): 747-759.
- WANG A J, GAO S, YANG Y. Sediment distribution and shape characteristics of gravel beach, Zhujiajian Island, Zhejiang Province[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2004, 40(6): 747-759.
- [19] 刘建辉. 福建砂质海岸侵蚀机制及影响因素分析 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- LIU J H. Analysis of mechanism and influencing factors of coastal erosion in Fujian Province[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [20] LIU X, KUANG C, HUANG S, et al. Modelling and evaluation of beach morphodynamic behavior: a case study of Dongsha Beach in eastern China[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2023, 240: 106661.
- [21] 蒋昌波, 伍志元, 陈杰, 等. 风暴潮作用下泥沙运动和岸滩演变研究综述 [J]. *长沙理工大学学报 (自然科学版)*, 2014, 11(1): 1-9.
- JIANG C B, WU Z Y, CHEN J, et al. Review of sediment transport and beach profile changes under storm surge[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2014, 11(1): 1-9.
- [22] 高抒, 贾建军, 于谦. 海岸冲淤动态的理论分析: 物质收支、剖面形态、岸线进退 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(2): 1-17.
- GAO S, JIA J J, YU Q. Theoretical framework for coastal accretion-erosion analysis: material budgeting, profile morphology, shoreline change[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2023, 43(2): 1-17.
- [23] DAVIS R A, HAYES M O. What is a wave-dominated coast?[J]. *Marine Geology*, 1998, 60: 313-329.
- [24] 崔金瑞, 夏东兴. 山东半岛海岸地貌与波浪、潮汐特征的关系 [J]. *黄渤海海洋*, 1992, 10(3): 20-25.
- CUI J R, XIA D X. The relationship between coastal morphology and the characteristics of waves and tides of Shandong Peninsula[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1992, 10(3): 20-25.
- [25] 郑承忠, 翁宇斌, 杨顺良. 厦门岛东南岸沙滩近期剖面变化研究 [J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(4): 73-80.
- ZHENG C Z, WENG Y B, YANG S L. A study on recent changes of beach profiles along southeast shore of Xiamen Island, Fujian Province, China[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(4): 73-80.
- [26] CAI F, CAO H, SU X, et al. Analysis on morphodynamics of sandy beaches in South China[J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, 23(1): 236-246.
- [27] MULHERN J S, JOHNSON C L, MARTIN J M. Is barrier island morphology a function of tidal and wave regime?[J]. *Marine Geology*, 2017, 387: 74-84.
- [28] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [29] RIVAS M B, STOFFELEN A. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT[J]. *Ocean Science*, 2019, 15(3): 831-852.

Inter-annual morphological evolution characteristics and impact factors of the southeastern sandy beaches of Zhujiajian Island, Zhejiang Province

WANG Shijin^{1,2}, ZHANG Yiming^{3*}, WANG Zhihui², HU Peng^{3,4}, DONG Chao⁵, LI Wei³

(1 Donghai Laboratory, Zhoushan 316021, China; 2 Zhejiang Institute of Marine Geology Survey, Zhoushan 316021, China; 3 Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4 Ocean Research Center of Zhoushan, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China;

5 Zhejiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ningbo 315000, China)

Abstract: To investigate the morphological evolution characteristics and impact factors of the southeastern sandy beaches in Zhujiajian, Zhejiang, six topographic surveys of bed profiles were conducted from November 2012 to November 2015. Results show that the beach morphology exhibited significant seasonal variations before beach nourishments. Specifically, the period from post-typhoon to the end of winter was featured by extensive accretion in upper and middle beach, with a maximum accretion height of 0.97 m. Meanwhile, the top and bottom of the beaches showed slight erosion, with erosion depths generally less than 0.3 m. Beach berms was formed as shown in the northern Dongsha and southern Nansha profiles. From spring to pre-typhoon season, the middle beach was eroded while the upper and lower beach were silted up, with the maximum erosion depth and accretion height of approximately 0.8 and 0.5 m, respectively. During the typhoon season, intense erosion occurred in the upper and middle parts of the beaches, with maximum erosion depth exceeding 1.0 m, while the lower parts experienced accretion, with maximum accretion height around 0.45 m, forming typical storm profiles. From November 2012 to November 2015, significant inter-annual morphological changes were observed in the southern Dongsha and northern Nansha with local erosion depths exceeding 1.0 m, which indicates erosion risks. In contrast, Qiansha, Lisha, and Qingsha exhibited dynamic equilibrium state with morphological changes ranged between -0.6 m and 0.4 m. Additionally, the morphological evolution of the beaches was jointly controlled by tides and waves, during which geomorphological conditions and human activities further influenced the morphological features. Dongsha, being less sheltered by headlands, experienced stronger hydrodynamic forces and more intense morphological changes. Human activities may contribute to the erosion in Dongsha and Nansha, highlighting the importance of scientifically design of artificial structures to maintain the natural dynamic balance of the beaches.

Key words: Zhujiajian Island; sandy beach; morphological evolution; hydrodynamic; human activity