

厦门白城海滩地貌季节性变化的沉积物粒度响应

郑威乐¹, 曹超^{1,2,3,4}, 蔡锋^{2,3,4}, 戚洪帅^{1,2,3,4}, 何岩雨^{2,3,4},
李元⁵, 刘根^{2,3,4}, 赵绍华^{1,2,3,4*}

(1.福州大学先进制造学院,福建 泉州 362251; 2.自然资源部第三海洋研究所海洋与海岸地质研究室,福建 厦门 361005;
3.自然资源部海洋生态保护修复重点实验室,福建 厦门 361005;
4.福建省海洋生态保护与修复重点实验室,福建 厦门 361005; 5.河海大学水灾害防御全国重点实验室,江苏 南京 210024)

摘要:根据厦门白城海滩2022—2023年连续4个季节的海滩剖面形态测量和表层沉积物粒度分析,探讨非典型砂泥复合型海滩地貌的季节性变化规律及其主控因素,尝试揭示海滩表层沉积物粒度结构对海滩地貌季节性变化的响应过程。研究表明:由2022年秋季至冬季、再到2023年春季,白城海滩上风向强烈侵蚀、下风向淤积,受厦门环岛顺时针向的沿岸输沙作用控制;且随着季风转向和波浪减弱,沿岸输沙减弱,海滩侵蚀强度降低。而由2023年春季至夏季,沿岸输沙进一步减弱,但白城海滩各剖面均显示不同程度的侵蚀,滩砂流失加剧,与夏季强降水引起的滩砂横向顺坡向下搬运有关,并伴随着大量游客的涌入加剧了海滩的侵蚀。白城海滩侵蚀强度强-弱-强的季节阶段性变化与沿岸输沙-横向输沙的季节性转变有关,海滩表层沉积物粒度也随之产生明显的联动变化。白城海滩在秋-冬-春-夏的季节时间尺度上,剖面坡度和沉积物粒径数值均呈现先下降后上升的变化趋势,海滩侵蚀强度大、沉积物粒径增加、滩面变陡,主要与沿岸输沙-横向输沙的季节性转变过程有关。研究结果对于深入理解砂泥复合型海滩动力地貌过程具有重要意义。

关键词:海洋地质学;海滩剖面;粒度特征;季节性变化;敏感粒度组分;砂泥复合型海滩

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20231219001

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2024)03-0533-12

海滩是沿海地区重要的海洋自然资源,兼具旅游休闲、防灾减灾、生态维护三大功能,是滨海旅游业快速发展的核心要素和重要驱动力^[1-4]。受全球气候变化和高强度人类活动影响,全球约24%~70%的海滩侵蚀退化^[5],在我国形势更加严峻,砂质岸线仅占全国海岸线的27%,其中就有49.5%遭受不同程度的侵蚀^[6],海滩资源基本功能逐渐丧失,其开发利用及有关的海洋产业发展面临巨大挑战。砂泥复合型海滩作为我国沿海地区常见的一种介于砂质海滩与泥质潮滩之间的过渡型海滩,以低潮时暴露显著的砂泥转换带(sand-mud transition, SMT)为典型特征,存在着一定的开发利用潜在价值,能够弥补我国对海滩资源的需求。近年来我国砂质岸线受各类海岸工程、大规模围海填地等高强度人类活

动影响,导致海滩泥化现象加剧^[7-8],部分砂质海滩逐渐演变为砂泥复合型海滩,甚至完全退化为泥质潮滩,因此研究砂泥复合型海滩的动力地貌过程对海滩泥化防护和治理有重要研究意义。

海滩地貌变化是沉积物与海洋动力相互作用、相互适应的结果,波浪是最重要的营力。我国海岸受东亚冬、夏季风转向及风速大小变化影响,近岸海域波浪强弱及浪向随之发生明显改变^[9-11],导致海滩地貌发生季节性变化^[12]。海滩地貌变化必然伴随着沉积物的迁移,与沉积物的颗粒大小密切相关^[13]。而我国沿岸广泛分布的砂泥复合型海滩地貌变化同时包含粘性泥沙(泥)和非粘性泥沙(砂)的动力搬运过程,存在砂-泥-水等相互作用过程,理论上受河流输沙和波浪季节性

收稿日期: 2023-12-29

资助项目: 厦门市自然科学基金(3502Z20227090); 国家自然科学基金(42206171, U22A20585, 42076058); 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费(海三科2022017, 海三科2023023)

作者简介: 郑威乐(1998—), 男, 硕士研究生; E-mail: wlzhengaurora@163.com

* 通讯作者: 赵绍华(1987—), 男, 博士, 副研究员; E-mail: zhaoshaohua@tio.or.cn

变化的影响更为显著,其海滩动力地貌过程和演化机理更加复杂^[14-15]。然而,尽管有学者对砂泥复合型海滩沉积特征、SMT 迁移规律和动力地貌演化过程等开展了一些研究^[14-20],但对这类海滩地貌变化过程中的沉积物粒度响应的研究较少,二者是否随着季风转向而发生季节性变化及其控制机制尚不清楚。

厦门白城海滩仅在大潮低潮位线附近才暴露有泥质沉积物,是一个非典型的砂泥复合型海滩。虽然泥质沉积物会在一定程度上降低白城海滩的景观效果,但由于其作为国内外知名旅游城市——厦门最重要的旅游海滩之一,又是厦门 20 km 黄金海岸的起点,周围旅游景点众多,地理位置优越,每年都能吸引大量游客参观游玩,具有较高的旅游价值^[21]。因此本研究通过对白城海滩地貌和沉积物开展定期调查和采样分析,揭示海滩剖面形态与沉

积物粒度结构的季节性变化及其相互联系,对于深入理解这类海滩动力地貌过程,进而对其进行保护和利用具有重要的科学研究价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

厦门白城海滩为岬湾型砂泥复合型海滩,位于福建省厦门岛南部,九龙江口北岸,长约 650 m,近 SE—NW 走向,朝向约 210°(图 1)。海滩东南端岬角为花岗岩类基岩,西北端为人工护岸,向岸入射波浪能量相对较强。白城海滩滩面坡折点以上较陡的区域以砂质沉积物为主,坡折点以下较为平缓的区域以泥质沉积物为主,SMT 位于滩面坡折点向海侧,仅在大潮期间有一定出露,为非典型砂泥复合型海滩^[22]。

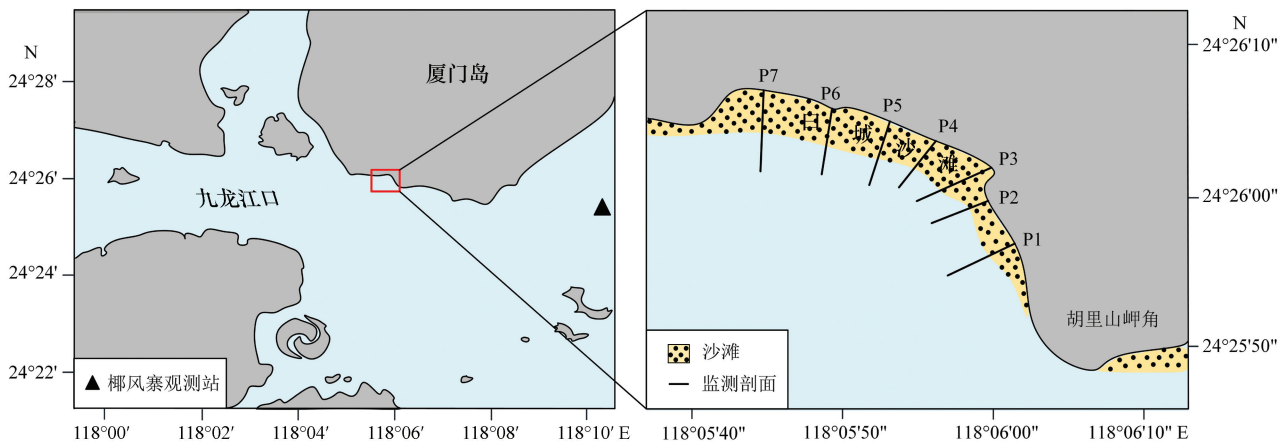


图 1 厦门白城海滩地理位置与调查剖面

Fig. 1 Geographical location of Baicheng beach in Xiamen and the surveyed beach profiles

九龙江口潮汐类型为正规半日潮,平均潮差 3.99 m,最大潮差 6.42 m^[4]。涨潮流流向以 NW 向为主,落潮流流向为 SE,涨落潮流向基本平行海岸。落潮流速大于涨潮流速,涨潮流最大流速 0.46 ~ 0.57 m/s,落潮流最大流速 0.61 ~ 0.93 m/s。九龙江口海域风速和风向受季节影响变换十分显著,冬半年盛行风向以 NE—ENE 向为主,夏半年盛行风向主要以 SE 和 S 向风为主。根据珍珠湾站波浪观测数据,厦门岛南部岸段全年的波向为 SE—S 向,其中常浪向为 SSE 向,次浪向为 SE 向^[23]。春、夏、秋三季常浪向均为 SSE 向,冬季常浪向为 SE 向。厦门岛年均有效波高约 0.15 ~ 0.35 m,平均浪周期为 2.6 ~ 3.4 s,最大周期可达 5.4 s。厦门外海附近流速约 0.20 m/s^[24]。

厦门岛沿岸海滩天然沉积物主要源自九龙江来沙、海岸侵蚀供沙和沿岸输沙。九龙江由西溪、北溪和南溪组成,根据北溪浦南站和西溪郑店站的水文资料^[25],二者年平均含沙量分别为 0.206 kg/m³ 和 0.210 kg/m³,平均输沙量为 2.9 Mt/a,最大可达 6.5 Mt/a,但随着九龙江流域水库建设、河岸固化、水土保持等影响,河流输沙明显减少^[26];同时厦门岛受围填海、海岸护堤以及海砂开采等高强度人类活动影响,海岸侵蚀来沙急剧减少,沿岸输沙受阻,导致厦门岛沿岸海滩长期处于沉积物亏损状态^[27]。

1.2 海滩地貌测量与数据分析

为揭示厦门白城海滩地貌的季节性变化趋势,采用 GPS-RTK(型号为 STONEX S9 II PRO,水平和高程精度分别为 ±8 mm 和 ±15 mm) 测量技术,结合

CORS(continuously operating reference stations)对白城海滩 P1 至 P7 共 7 条典型剖面形态开展了 2022 年 10 月至 2023 年 7 月期间 4 次定期调查(图 1、表 1),其中 1 月(冬季)、4 月(春季)、7 月(夏季)和 10

月(秋季)分别对应冬季风盛行期、冬-夏季风转换期、夏季风盛行期和夏-冬季风转换期,每次测量均选择当月大潮低潮位时进行。

表 1 厦门白城海滩监测剖面位置与监测时间

Tab. 1 Location and monitoring time for each profile at Baicheng beach, Xiamen

| 剖面名称 | 桩点纬度 | 桩点经度 | 方位角 | 测量时间序列 |
|------|---------------|----------------|------------|--|
| P1 | 24°25'57.01"N | 118°06'01.62"E | 240°00'00" | 1 st 2022-10-09 2 nd 2023-01-10 3 rd 2023-04-17 4 th 2023-07-03 |
| P2 | 24°25'59.46"N | 118°05'59.47"E | 248°58'12" | |
| P3 | 24°26'01.59"N | 118°05'59.80"E | 249°05'24" | |
| P4 | 24°26'03.62"N | 118°05'56.13"E | 215°06'36" | |
| P5 | 24°26'04.81"N | 118°05'53.47"E | 197°01'12" | |
| P6 | 24°26'05.75"N | 118°05'49.46"E | 185°09'00" | |
| P7 | 24°26'06.71"N | 118°05'45.17"E | 179°43'12" | |

考虑到研究海滩剖面形态特征及其变化情况(图 2),本研究重点分析剖面坡折点以上、滩肩或者人工护岸以下部分海滩滩面坡度的变化,采用 1985 黄海高程基准,利用高程差与其宽度之比计算,表示为 $\tan\beta$ 。同时为了清晰揭示厦门白城海滩剖面的季节性变化规律,利用 Burvingt 等^[28]提出的断面体积法来计算剖面单宽体积变化量(erosion and siltation volumes in a unit width, UED)。

$$UED = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} z dz \quad (1)$$

式(1)中:UED 的单位为 m^3/m , z 对应每米插值的地形高程值(m), z_{\max} 和 z_{\min} 分别为剖面测量的离岸最远处和剖面起点, z_{\max} 选取每条剖面上多次测量高程为 -2 m 时的最远离岸距离。

1.3 表层沉积物采集与粒度分析

选择白城海滩 P5、P7 两条剖面开展表层沉积物定期采样与分析工作,采样时间与海滩地形测量同步,共采样 4 次、共计 96 个样品(表 1)。测量剖面由岸向海每隔 5~15 m 设置一个采样点,取厚度 3~5 cm 表层沉积物,每条剖面每次采集 12 个样品(标记为 S1 至 S12)。

白城海滩沉积物样品粒度分析在自然资源部第三海洋研究所使用 POWTEQ SS2000 振动筛分仪完成,振幅 1.0 mm,振动 10 min,套筛孔径范围为 0.063~4.00 mm,每个粒度相差 0.5 ϕ 。取适量海滩沉积物样品烘干,对于含有少量泥质砂样,采用水筛法(0.063 mm 孔径筛网)分离出泥后烘干,再进行振动筛分;而对于不含泥的砂样,则直接烘干筛分。获得

各粒级样后依次称重并记录,计算各粒级重量百分比,采用 Folk-Word 公式计算沉积物粒度参数,并结合各粒级标准偏差提取粒度敏感组分(sensitive group, SG)^[18,29]。

2 结果与分析

2.1 典型海滩剖面的季节性变化

2022 年 10 月至 2023 年 7 月,白城海滩 P1 至 P5 剖面明显侵蚀,UED 为 -94.8~-9.7 m^3/m ;而 P6、P7 剖面呈现淤积状态,UED 分别为 11.5、5.9 m^3/m ,多发生在滩面较陡的部分(图 2、3)。其中,P1 和 P2 剖面坡折点以上的潮间带持续侵蚀,坡度变缓,滩面剥蚀厚度约为 0.5~1.2 m。P3~P5 剖面滩肩后退较为明显,蚀退量分别为 25.9、11.7、4.5 m,幅度逐渐减小,总体滩面坡度变小。而 P6、P7 剖面以淤积为主,在坡折点以上的潮间带滩面淤积厚度约为 0.1~0.5 m。

白城海滩的侵蚀-淤积变化存在一定的季节性差异,从 2022 年 10 月到 2023 年 1 月,再至 4 月,UED 自东南向西北呈现先侵蚀后淤积的变化趋势。其中 P1 剖面位置存在的潮间带沿岸沙坝逐渐侵蚀消失,P2 剖面呈现一定的弱侵蚀,P3 和 P4 剖面均呈现强侵蚀状态,P5 剖面滩肩逐渐后移,P6、P7 剖面上部滩面都有所淤积(图 2、3)。而由 2023 年 4 月到 7 月,P1 至 P7 剖面均呈现一定侵蚀,具体表现为 P1 至 P4 剖面因侵蚀变缓,P5 剖面滩肩显示向海移动,P6 和 P7 剖面上部滩面则显示一定侵蚀。

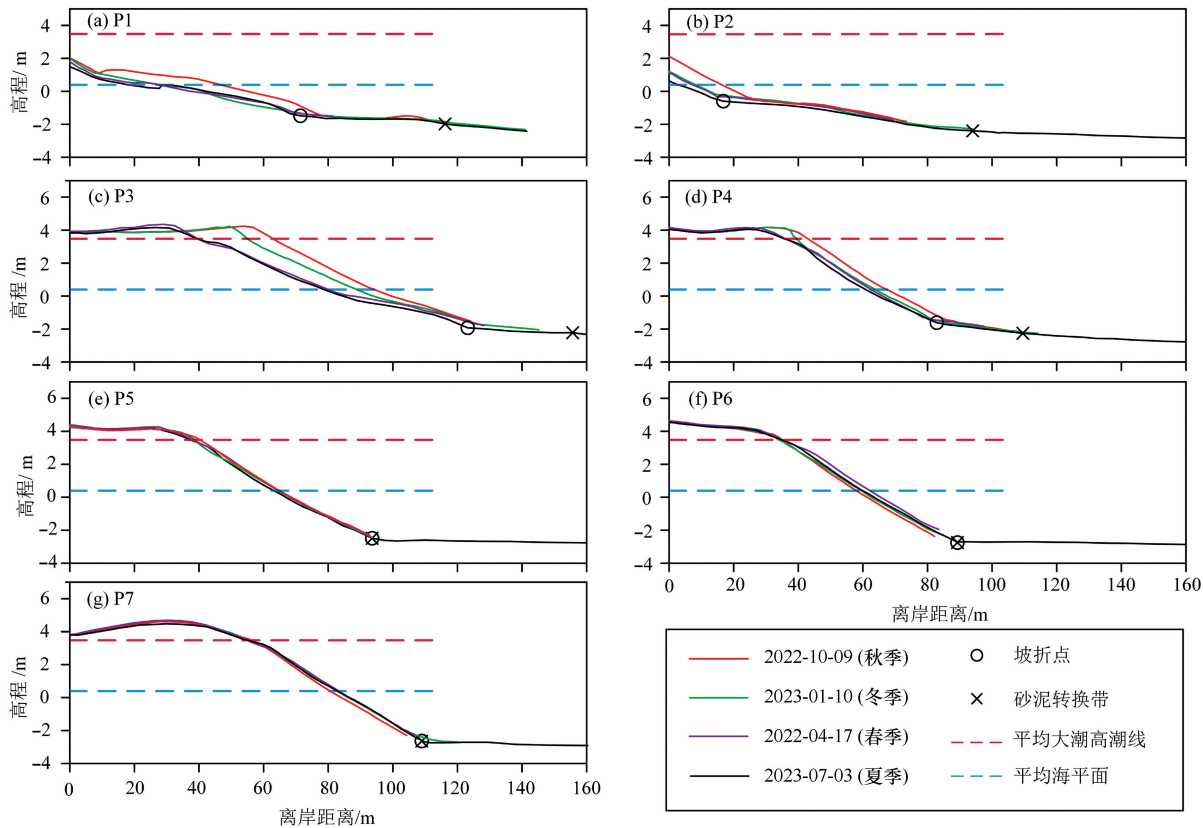


图 2 白城海滩剖面形态变化

Fig. 2 Morphological changes in Baicheng beach profiles

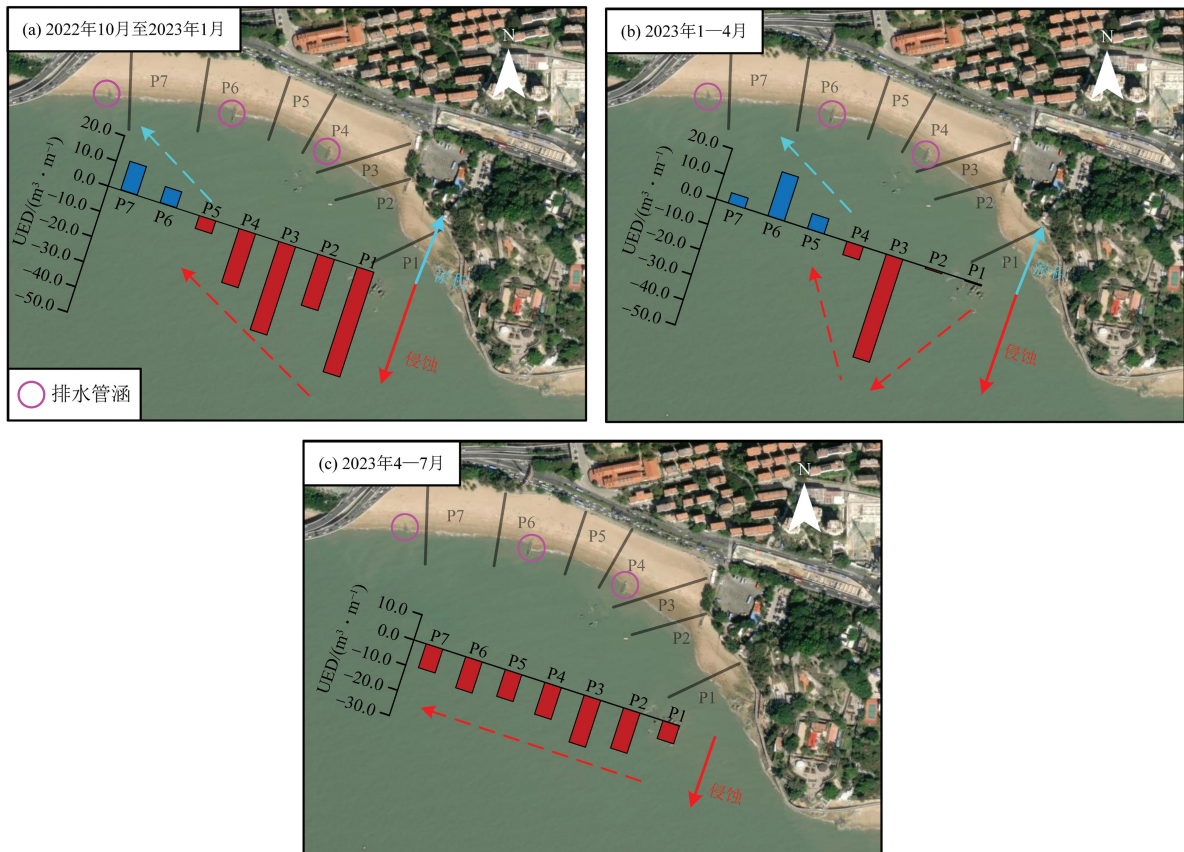


图 3 白城海滩各剖面单宽体积变化量随时间的变化

Fig. 3 Time series of UED on each profile at Baicheng beach

2.2 表层沉积物粒度的季节性变化

白城海滩 P5 和 P7 剖面 SMT 向岸侧表层沉积物的组成和变化基本一致,主要由砂(大于 63.8%)和砾石(15.7%~36.2%)组成,后滨区域沉积物颗粒较小、滩肩至 SMT 中间区域沉积物颗粒较粗(图 4)。后滨区域主要为细中砂,沉积物粒度结构整体较为稳定;平均粒径约为 0.24~0.61 mm(0.72~2.04 ϕ),平均值为 0.32 mm;分选系数、偏态和峰度的变化范围依次为 0.47~1.26、-0.53~-0.06、0.92~1.34,平均值分别为 0.73、-0.27、1.08,分选性多为较好至中等、偏态为极负偏至负偏、峰度为中等至尖锐。相对地,滩肩至 SMT 之间滩面表层沉积物粒径逐渐变粗,由中粗砂逐渐变为砾质砂,粒度频率分布曲线多为近对称或

正偏的双峰分布[图 5(a)],平均粒径约在 0.52~2.81 mm(-1.47~0.96 ϕ) 范围内变化,平均值为 1.50 mm;分选系数、偏态和峰度的变化范围依次为 0.43~1.65、-0.44~0.57、0.60~1.40,平均值分别为 1.05、0.22、0.96,分选性由好至较差不等、偏态为极负偏至极正偏、峰度为很宽至尖锐。

白城海滩沉积物粒度的敏感粒径分析显示在 0.22 mm 和 2.50 mm 处标准偏差较大[图 5(b)],即为敏感粒径细粒组分 SG1 和粗粒组份 SG2。SG1 在滩肩附近显著降低,在 P5 剖面处平均下降了 10.9%,在 P7 剖面处平均下降了 7.5%[图 4(i)、(j)];SG2 由滩肩至坡折点附近逐渐增加,分别于 P5、P7 剖面处达到最大值 14.0%、6.7%[图 4(k)、(l)]。

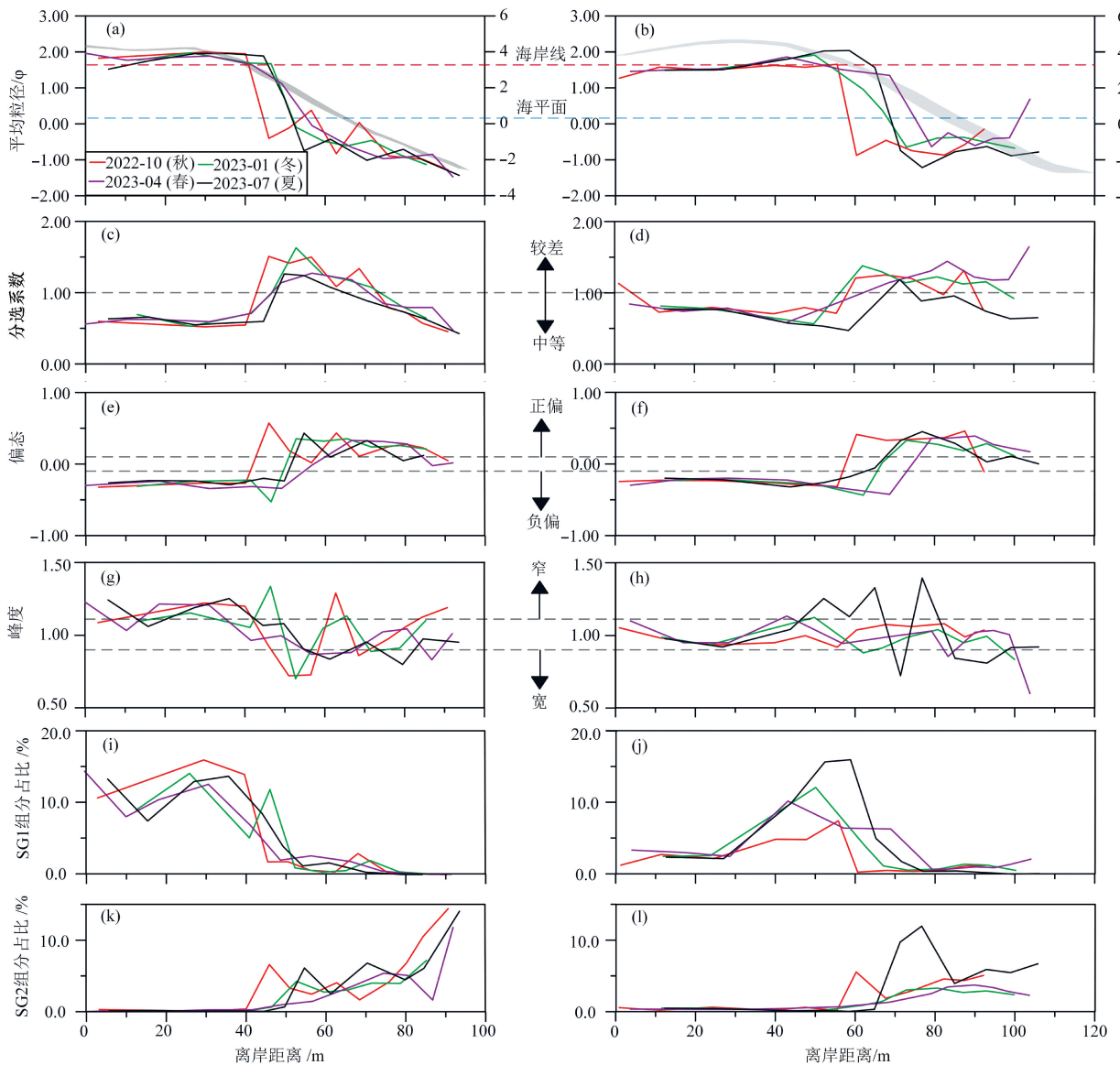


图 4 白城海滩粒度参数沿 P5、P7 剖面变化趋势

Fig. 4 Grain-size parameters and sensitive grain-size along profiles P5 and P7

图(a)、(c)、(e)、(g)、(i)、(k)分别对应 P5 剖面的平均粒径、分选系数、偏态、峰度、SG1 组分占比和 SG2 组分占比;图(b)、(d)、(f)、(h)、(j)、(l) 分别对应 P7 剖面的平均粒径、分选系数、偏态、峰度、SG1 组分占比和 SG2 组分占比。

白城海滩表层沉积物粒度特征以及敏感粒径组分沿剖面横向分布均显示明显的季节性迁移,以滩肩到坡折点位置的滩面沉积物变化最为显著(图4)。从2022年10月到2023年1月,再至4月,沉积物粒径变细、分选性变好、偏态趋向负偏以及SG1和SG2组分占比变大的趋势由岸向海移动,平均粒

径较小的沉积物带在每个季节向海移动了约2.3~4.2 m。而由2023年4月到7月,平均粒径较小的沉积物带向岸回迁了约1.1~3.1 m,分选性变差、偏态趋向正偏以及SG1和SG2组分占比变大的趋势也呈现由海向岸回迁。

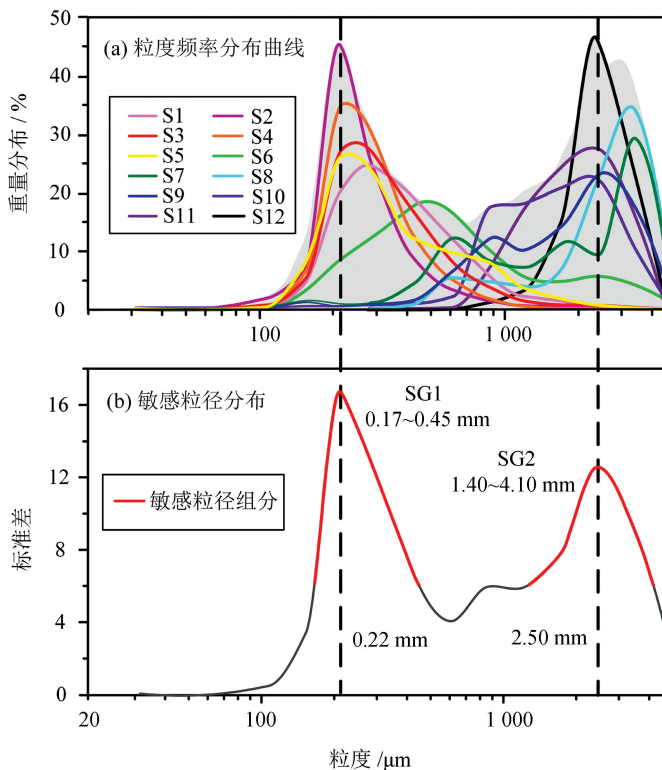


图5 白城海滩粒度频率分布曲线及敏感粒径分布

Fig. 5 Grain-size distribution and sensitive grain-size components of Baicheng beach sediments

3 讨论

3.1 沿岸输沙-横向输沙转变过程控制的海滩侵蚀季节性变化

白城海滩剖面的季节性变化主要表现为整体侵蚀强度的变化,由2022年秋季至冬季、2022年冬季至2023年春季、2023年春季至夏季的季节转化过程中,海滩侵蚀总量呈现强-弱-强的阶段性变化趋势(图6),这一趋势与沿岸输沙-横向输沙季节性转变有关。由秋季至冬季,海滩P1至P5剖面侵蚀、P6至P7剖面淤积[图3(a)],主要与沿岸输沙有关。白城海滩受较强的SE向波浪影响,浪向与海滩走向基本一致,入射波浪角度小,形成SE—NW向较强的沿岸输沙(图7);加上胡里山岬角聚能引起的局部动力增加^[32],导致白城海滩上游靠近岬角一端出现一个强侵蚀热点,对海滩地貌变化影响较

大,该处剖面UED可达 $-17.6 \text{ m}^3/\text{m}$ 。同时,受九龙江入海泥沙“南出北进”的运移趋势影响,白城海滩沿岸输沙作用进一步加强^[31,33]。冬季至翌年春季,伴随波浪方向变化,强度降低、有效波高变小[图6(g)、(h)],沿岸输沙能力变弱,造成白城海滩各剖面侵蚀强度的总体降低。白城海滩剖面侵蚀量最大值分别从P1、P7剖面转移到P3和P6剖面[图3(b)],两侧的最大侵蚀和最大淤积变化逐渐转移到中间,且UED由 $-15.1 \text{ m}^3/\text{m}$ 变至 $-2.8 \text{ m}^3/\text{m}$ 。

白城海滩剖面最大的变化发生在春季至夏季期间,海滩整体转为侵蚀,各剖面UED大致相同[图3(c)],由沿岸输沙主控转为横向输沙过程影响,与夏季强降雨这一影响因素密不可分。冬季风转为夏季风后,有效波高减弱至0.19 m,波向转为SSE向,波浪入射角度大,海滩沿岸输沙减弱、横向输沙增强。更重要的是夏季降雨明显增多[图6(i)],短期强降水

形成的片流冲蚀海滩滩面,滩砂顺坡向下搬运至较平坦的潮滩区,导致海滩砂质滩面侵蚀严重^[34-35]。此外,白城海滩因毗邻厦门大学而成为厦门海滩旅游热

点之一,夏季旅游人数增加[图 6(j)],特别是大量孩童挖沙玩乐,直接破坏滩面的稳定性,滩砂更容易流失,滩面侵蚀加重,UED 达 $-14.3 \text{ m}^3/\text{m}$ 。

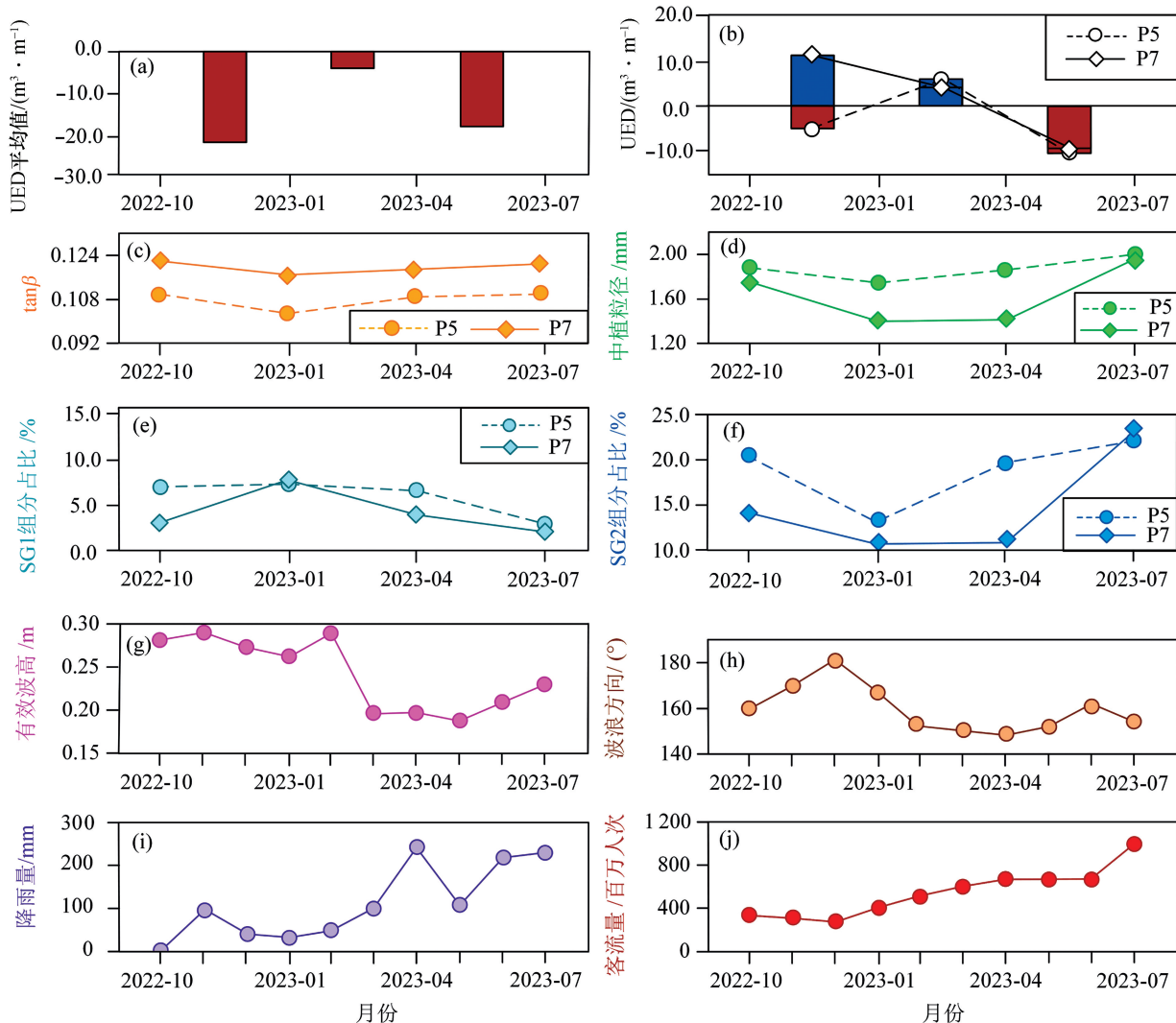


图 6 白城海滩剖面 UED 季节性变化及其对应的粒度、环境参数的关系

Fig. 6 Seasonal variation of UED in Baicheng beach profiles and its corresponding grain size and environmental parameters

有效波高和波浪方向数据来自椰风寨观测站,降雨量数据来自福建省水文旬报,客流量数据来自厦门市交通口岸系统主要经济指标完成情况。

因此,在东亚冬季风盛行期间(10月至翌年4月),沿岸输沙作用占据主导地位,对海滩侵蚀较强,并随着季风转向和有效波高的降低,沿岸输沙作用持续减弱,海滩侵蚀强度降低。在东亚夏季风盛行期间(6—8月),受到夏季频繁降雨和较大客流量的影响,横向输沙占据主导地位,各剖面均显示一定量的侵蚀,侵蚀总量增大。整体上,白城海滩持续的侵蚀过程说明其仍处于不平衡的状态。

3.2 表层沉积物粒度季节性变化与海滩地貌变化之间的联系

白城海滩表层沉积物粒度季节性变化与海滩地貌变化之间具有强相关性,且沉积物粒度越大,滩肩至坡折点间的滩面越陡。白城海滩不同季节沉积物中值粒径-坡度数据显示较为明显的线性关系,与全球海滩坡度-粒径数据统计结果一致^[36](图8),呈现粒径增加、滩面坡度增加的趋势。从时间上看,由2022年秋季至2023年夏季,P5和P7剖面坡度和

沉积物中值粒径均呈现先下降后上升的相同趋势 [图 6(c)、(d)],这一趋势与沿岸输沙-横向输沙季

节性转变有关。

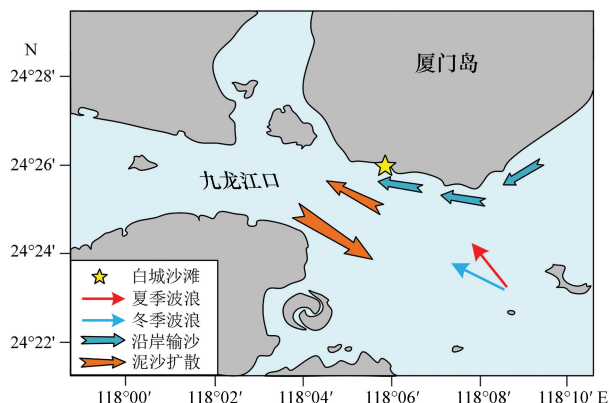


图 7 白城海滩时空演化控制因素示意图

Fig. 7 Controlling factors for the spatio-temporal evolution of Baicheng beach morphology

波浪方向根据文献[23],沿岸输沙方向根据文献[30],泥沙扩散方向根据文献[31]。

当白城海滩处于沿岸输沙作用主导下,表层沉积物粒度先变细后变粗,海滩侵蚀强度由强变弱。从秋季至冬季,P5、P7 剖面细粒组分增加,粒径减小 0.13~0.35 mm,坡度下降 0.005~0.007(表 2),主要与较强的沿岸输沙和人工构筑物拦沙作用有关。白城海滩 SMT 以下的泥沙混合物粘滞力较大,泥沙颗粒起动切力大^[37],因此在常浪条件下,砂质滩面上的细砂因其黏聚性和自重较低,更容易受到波浪作用悬浮跃动^[38],并沿 SE—NW 向持续运移沉积,同时受到 P5、P7 剖面下部滩面(坡折点以上)附近排水涵拦截作用[图 3(a)],细砂淤积于下部滩面导致坡度降低,下降幅度约 4.1%~6.4%,整体细粒组分 SG1 占比增加 0.3%~4.8%(表 2)。冬季至春季,沿岸输沙能力变弱以及海滩侵蚀强度变小,造成 P5、P7 剖面细粒组分来源持续减小,沉积物粒径增大 0.02~0.11 mm。同时排水涵拦沙效果降低,导

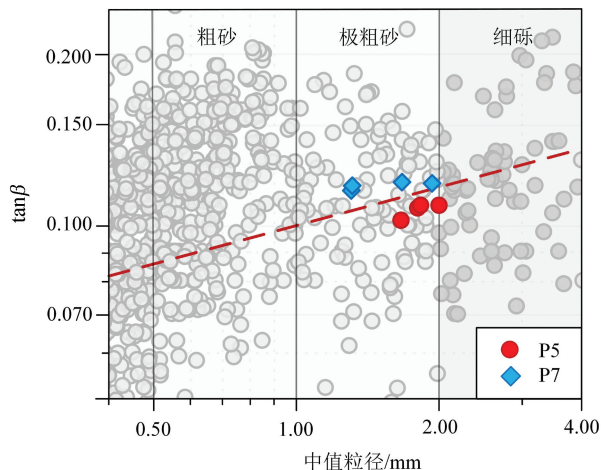


图 8 海滩坡度和中值粒径关系图

Fig. 8 Correlation between beach slope and median grain-size 改自文献[36]。

致下部滩面淤积减弱,整体坡度增大 0.002~0.006(表 2)。P5、P7 剖面下部滩面变化不大,而上部滩面淤积厚度增加约 0.1~0.5 m[图 2(e)、(g)],粗粒组分 SG2 占比提高约 0.1%~6.6%(表 2)。

春季至夏季期间,白城海滩受到横向输沙作用,表层沉积物粒度进一步粗化,海滩侵蚀强度增大。波浪强度和方向的季节性改变引起的近岸流系的变化进一步减弱了海滩的沿岸输沙作用^[39],随着夏季降雨增多,横向输沙作用逐渐占据主导,强降雨形成片流对细粒物质的冲刷作用最为显著^[40]。而白城海滩从滩肩到坡折点的沉积物粒度由 0.25 mm 增大至 4.00 mm[图 4(a)、(b)],因此滩肩附近的细砂更容易被冲刷而流失,滩面厚度减小约 0.1~0.5 m[图 2(e)、(g)],沉积物粒径减小 0.14~0.54 mm,滩面变陡且坡度增大 0.001~0.002(表 2)。

表 2 P5 和 P7 剖面在各季节变化下的剖面形态参数和粒度参数

Tab. 2 Morphological and grain-size parameters of profiles P5 and P7 under seasonal changes

| 剖面 | 季节 | 剖面形态参数 | | 粒度参数 | | |
|----|----|--|-------|---------|------------|------------|
| | | UED/(m ³ ·m ⁻¹) | tanβ | 中值粒径/mm | SG1 组分占比/% | SG2 组分占比/% |
| P5 | 秋季 | 0.0 | 0.110 | 1.88 | 7.1 | 20.5 |
| | 冬季 | -5.1 | 0.103 | 1.75 | 7.4 | 13.1 |
| | 春季 | 6.0 | 0.109 | 1.86 | 6.6 | 19.7 |
| | 夏季 | -10.7 | 0.110 | 2.00 | 2.9 | 22.1 |

续表

| 剖面 | 季节 | 剖面形态参数 | | 粒度参数 | | |
|----|----|--|-------------|---------|------------|------------|
| | | UED/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$) | $\tan\beta$ | 中值粒径/mm | SG1 组分占比/% | SG2 组分占比/% |
| P7 | 秋季 | 0.0 | 0.122 | 1.75 | 3.0 | 14.2 |
| | 冬季 | 11.3 | 0.117 | 1.40 | 7.8 | 10.7 |
| | 春季 | 4.1 | 0.119 | 1.42 | 3.9 | 10.8 |
| | 夏季 | -9.5 | 0.121 | 1.96 | 2.0 | 23.4 |

此外,白城海滩作为河口区砂泥复合型海滩,其沉积物粒度长时间尺度变化亦受九龙江的泥沙供给影响。充足的泥沙来源是砂泥复合型海滩发育的必要条件之一^[17,41],九龙江来沙为其河口区广泛发育砂泥复合型海滩提供了重要的物质基础;同时受强潮环境影响,这类海滩又显示典型的低潮阶地型海滩特征,中高潮区砂质滩面较陡,低潮区泥质潮滩滩面宽缓^[15]。SMT 作为海岸物质异质性最为显著的一条界限,白城海滩 SMT 向岸侧沉积物粒度频率分布曲线主要以单峰分布,且滩砂粒径在 SMT 附近达到最大;在 SMT 向海侧的泥质潮滩沉积物粒度频率分布曲线则变为双峰或三峰分布,主要是粉砂和粘土等成份的显著增加(图 5)。受季风降雨、河流输沙以及风暴等极端动力事件影响,海岸动力与沉积物来源的变化引起 SMT 迁移^[14,42],低能环境下通过波浪的振荡运动引起细颗粒沉积物的再悬浮与搬运,而高能波浪条件下则通过波浪破碎引起的强水流冲刷细颗粒沉积物^[20],以及河流泥沙供给增加通过大量悬浮泥沙的沉降过程,最终均导致海滩 SMT 的向岸/向海迁移,海滩表层沉积物粒度随之也发生显著的变细/变粗、单峰/多峰等变化。

总而言之,白城海滩表层沉积物粒度的变化必然会引起海滩地貌发生变化,受沿岸输沙-横向输沙的季节性转变,沉积物粒度“粗-细-粗”的阶段变化明显响应海滩侵蚀强度“强-弱-强”的趋势变化。受水坝建设、岸线固化、海岸工程等高强度人类活动影响,九龙江河流输沙和厦门岛海岸侵蚀来沙减少,厦门岛沿岸海滩将长期处于一定的泥沙亏损状态;而白城海滩又因存在极强的侵蚀热点,在沿岸输沙-横向输沙的季节性转变过程中造成海滩的持续侵蚀,特别是靠近胡里山炮台岸段的海滩泥化现象也将继续加强。本研究通过探讨厦门海滩的海滩剖面形态与沉积物粒度结构的季节性变化及其相互联系,进一步探讨了砂泥复合型海滩动力地貌的基本过程;但对于砂泥复合型海滩中砂泥组分变化的机理解释

仍存在一定不足,白城海滩作为非典型砂泥复合型海滩,在调查期间仅有一次大潮完整呈现 SMT 及泥质潮滩,且 SMT 附近砂泥混合物的样品采集不足,因此无法获取砂泥复合型海滩完整剖面上沉积物粒度结构变化及其与 SMT 迁移之间的关系,未来可加强此方面的进一步研究。

4 结论

本研究通过厦门白城海滩 2022—2023 年连续 4 个季节的海滩剖面形态测量和表层沉积物粒度分析,研究了非典型砂泥复合型海滩地貌和沉积物粒度季节变化特征及二者之间的联系,揭示了非典型砂泥复合型海滩的季节性演化规律,主要形成以下结论:

(1)白城海滩侵蚀强度强-弱-强的季节阶段性变化与沿岸输沙-横向输沙的季节性转变有关。由 2022 年秋季至冬季,再到 2023 年春季,白城海滩上风向强烈侵蚀、下风向淤积,受厦门环岛顺时针向的沿岸输沙作用强烈控制;且随着冬-春季节的波浪变小,沿岸输沙减弱,海滩侵蚀强度降低,UED 由 $-15.1 \text{ m}^3/\text{m}$ 增大至 $-2.8 \text{ m}^3/\text{m}$ 。而由 2023 年春季至夏季,沿岸输沙进一步减弱、横向输沙显著增强,但白城海滩各剖面均显示不同程度的侵蚀,滩砂流失加剧,与夏季强降水引起的滩砂横向顺坡向下搬运有关,大量游客的涌入加剧了海滩的侵蚀,UED 达 $-14.3 \text{ m}^3/\text{m}$ 。

(2)白城海滩表层沉积物粒度季节性变化与海滩地貌变化之间具有强相关性,受沿岸输沙-横向输沙的季节性转变影响,沉积物粒度“粗-细-粗”的阶段变化明显响应海滩侵蚀强度“强-弱-强”的趋势变化。在秋-冬-春-夏的季节时间尺度上,剖面坡度和沉积物粒径数值均呈现出先下降后上升的变化趋势,下降幅度约 4.3%~20.1%,上升幅度约 3.4%~40.1%,且海滩侵蚀强度越大、沉积物粒度越大,滩肩至坡折点间的滩面越陡。

参考文献:

- [1] HOUSTON J R. The economic value of beaches: a 2013 update[J]. *Shore & Beach*, 2013, 81(1): 3-11.
- [2] LIU S S, CAI F, QI H S, et al. Economic contribution of beach resources and their sustainable development in China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 239: 106598.
- [3] 蔡锋. 中国海滩养护技术手册[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [4] 蔡锋. 中国海滩资源概述[M]. 北京: 海洋出版社, 2019.
- [5] LUIJENDIJK A, HAGENAARS G, RANASINGHE R, et al. The state of the world's beaches[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 6641.
- [6] 蔡锋, 刘根. 我国海滩养护修复的发展与技术创新[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(4): 452-463.
CAI F, LIU G. Beach nourishment development and technological innovations in China: an overview[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38(4): 452-463.
- [7] 张春华, 刘金贵, 杨静. 北海银滩泥化与硬化成因初探[J]. *海洋预报*, 2017, 34(6): 83-88.
ZHANG C H, LIU J G, YANG J. Studies on muddy and consolidating process at Silver Beach in Beihai[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(6): 83-88.
- [8] 龚玉萌. 泥化沙滩的修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
GONG Y M. Research on restoration of muddy sand beach[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [9] CHIEN H, CHENG H Y, CHIOU M D. Wave climate variability of Taiwan waters[J]. *Journal of Oceanography*, 2014, 70(2): 133-152.
- [10] JOEVIVEK V, CHANDRASEKAR N, SARAVANAN S, et al. Spatial and temporal correlation between beach and wave processes: implications for bar-berm sediment transition[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2018, 12(2): 349-360.
- [11] MARCHESIELLO P, KESTENARE E, ALMAR R, et al. Longshore drift produced by climate-modulated monsoons and typhoons in the South China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2020, 211: 103399.
- [12] KOMAR P D. Beach processes and sedimentation[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1976.
- [13] MA B B, DAI Z J, PANG W H, et al. Dramatic typhoon-induced variability in the grain size characteristics of sediments at a meso-macrotidal beach[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 191: 104006.
- [14] ZHAO S H, CAI F, QI H S, et al. Contrasting sand-mud transition migrations in estuarine and bay beaches and their potential morphological responses[J]. *Geomorphology*, 2020, 365: 107243.
- [15] ZHAO S H, QI H S, CAI F, et al. Morphological and sedimentary features of sandy-muddy transitional beaches in estuaries and bays along mesotidal to macrotidal coasts[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45: 1 660-1 676.
- [16] CHANG T S, HONG S H, CHUN S S, et al. Age and morphodynamics of a sandy beach fronted by a macrotidal mud flat along the west coast of Korea: a lateral headland bypass model for beach-dune formation[J]. *Geo-Marine Letters*, 2017, 37(4): 361-371.
- [17] 周湘, 蔡锋, 戚洪帅, 等. 台湾海峡西岸两个典型复合型海滩砂泥转换带对比研究[J]. *海洋工程*, 2019, 37(5): 133-140.
ZHOU X, CAI F, QI H S, et al. Comparative study of sand-mud transition on two sandy-muddy transitional beaches along west coast of the Taiwan Straits[J]. *The Ocean Engineering*, 2019, 37(5): 133-140.
- [18] ZHAO S H, CAI F, LIU Z F, et al. Disturbed climate changes preserved in terrigenous sediments associated with anthropogenic activities during the last century in the Taiwan Strait, East Asia[J]. *Marine Geology*, 2021, 437: 106499.
- [19] LI T, SUN G H, YANG C P, et al. Source apportionment and source-to-sink transport of major and trace elements in coastal sediments: combining positive matrix factorization and sediment trend analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 344-356.
- [20] LI Y, ZHANG C, ZHAO S H, et al. Equilibrium configurations of sandy-muddy transitional beaches on South China coasts: role of waves in formation of sand-mud transition boundary[J]. *Coastal Engineering*, 2024, 187: 104401.
- [21] GAO Y E, LIAO Y Q, WANG D G, et al. Relationship between urban tourism traffic and tourism land use: a case study of Xiamen Island[J]. *Journal of Transport and Land Use*, 2021, 14(1): 761-776.
- [22] 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 H S, CAI F, LEI G, et al. Study on storm response characteristics of beaches in South China[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(9): 975-985.
- [23] 朱君, 蔡锋, 戚洪帅, 等. 基于数值模拟的厦门湾波浪特征研究[J]. *应用海洋学学报*, 2017, 36(3): 341-348.
ZHU J, CAI F, QI H S, et al. A study on characteristics of Xiamen waves based on numerical simulation[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2017, 36(3): 341-348.
- [24] 王小芳, 潘爱军, 郭小钢, 等. 台湾海峡西侧水动力环境的季节变化特征[J]. *应用海洋学学报*, 2013, 32(2): 156-163.
WAN X F, PAN A J, GUO X G, et al. Seasonal variation features of the hydrodynamic environment in the western Taiwan Strait[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32(2): 156-163.
- [25] 福建省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 福建省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [26] 福建省水利厅. 福建省九龙江流域综合规划修编报告[R]. 福州: 福建省水利厅, 2006.
- [27] 朱晓晶, 戚洪帅, 雷刚, 等. 沉积物供给影响下厦门岛东南部海滩响应差异性研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(4): 96-108.
ZHU X J, QI H S, LEI G, et al. The study of the difference of beach response under sediment supply in southeast of Xiamen Island[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(4): 96-108.
- [28] BURVINGT O, MASSELINK G, SCOTT T, et al. Climate forcing of regionally-coherent extreme storm impact and recovery on embayed beaches[J]. *Marine Geology*, 2018, 401: 112-128.
- [29] 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 83-86.

- SUN Y B, GAO S, LI J. Preliminary analysis of environmentally sensitive particle size components in marginal marine materials[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(1): 83-86.
- [30] 蔡锋, 苏贤泽, 杨顺良, 等. 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, 2002, 20(2): 85-90.
CAI F, SU X Z, YANG S L, et al. A rapid response to 9914 typhoon-induced storm wave force made by the beach profiles of Xiamen Island[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(2): 85-90.
- [31] 蔡锋, 黄敏芬, 苏贤泽, 等. 九龙江河口湾泥沙运移特点与沉积动力机制[J]. 台湾海峡, 1999, 18(4): 418-424.
CAI F, HUANG M F, SU X Z, et al. Characteristics of silt movement and sedimentary dynamic mechanism in Jiulongjiang Estuary[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1999, 18(4): 418-424.
- [32] MCCARROLL R J, MASSELINK G, VALIENTE N G, et al. Impact of a headland-associated sandbank on shoreline dynamics[J]. Geomorphology, 2020, 355: 107065.
- [33] 蔡爱智, 蔡月娥, 朱孝宁, 等. 福建九龙江口入海泥沙的扩散和河口湾的现代沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(1): 57-67.
CAI A Z, CAI Y E, ZHU X N, et al. Diffusion and modern sedimentation of seaward-transporting discharges in the estuary of Jiulongjiang River, Fujian Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(1): 57-67.
- [34] TORRES R, GOÑI M A, VOULGARIS G, et al. Effects of low tide rainfall on intertidal zone material cycling[J]. Coastal and Estuarine Studies, 2004, 59: 93-114.
- [35] TOLHURST T J, WATTS C W, VARDY S, et al. The effects of simulated rain on the erosion threshold and biogeochemical properties of intertidal sediments[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(10/11): 1 217-1 230.
- [36] BUJAN N, COX R, MASSELINK G. From fine sand to boulders: examining the relationship between beach-face slope and sediment size[J]. Marine Geology, 2019, 417: 106012.
- [37] SHI Z, REN L F, ZHANG S Y, et al. Acoustic imaging of cohesive sediment resuspension and re-entrainment in the Changjiang Estuary, East China Sea[J]. Geo-Marine Letters, 1997, 17(2): 162-168.
- [38] BROEKEMA Y B, GIARDINO A, VAN DER WERF J J, et al. Observations and modelling of nearshore sediment sorting processes along a barred beach profile[J]. Coastal Engineering, 2016, 118: 50-62.
- [39] SHORT A D. Australian beach systems: nature and distribution[J]. Journal of Coastal Research, 2006, 22(1): 11-27.
- [40] 黄带娣, 陈思. 低潮位降雨及其径流对淤泥质潮间带颗粒物运输的影响研究综述[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(6): 968-976.
HUANG D D, CHEN S. Review of the effects of low-tide rainfall-runoff on the particle transport in intertidal zone[J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(6): 968-976.
- [41] 赵绍华. 砂泥复合型海滩地貌与沉积特征及其演化机理研究[D]. 厦门: 自然资源部第三海洋研究所, 2020.
ZHAO S H. Morphological and sedimentary characters of the sandy-muddy transitional beaches and their evolution process[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, 2020.
- [42] GUO J L, SHI L Q, CHEN S L, et al. Sand-mud transition dynamics at embayed beaches during a typhoon season in eastern China[J]. Marine Geology, 2021, 441: 106633.

Responses of sediment grain size to seasonal variation of Baicheng beach morphology in Xiamen, China

ZHENG Weile¹, CAO Chao^{1,2,3,4}, CAI Feng^{2,3,4}, QI Hongshuai^{1,2,3,4}, HE Yanyu^{2,3,4},
LI Yuan⁵, LIU Gen^{2,3,4}, ZHAO Shaohua^{1,2,3,4*}

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362251, China;

2. Laboratory of Ocean and Coast Geology, Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China;

3. Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, MNR, Xiamen 361005, China;

4. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Xiamen 361005, China;

5. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Aiming to investigate seasonal variations of sandy-muddy transitional beach geomorphology and the key controlling factors on Baicheng beach of Xiamen in 2022–2023, the responses of surface sediment grain-size to the beach morphological variations were studied. Results showed that Baicheng beach was strongly eroded windward and accreted in the other section from autumn to spring when it was mainly controlled by the clockwise longshore sediment transport surrounded Xiamen Island. In view of monsoon wind direction changes and the weakening of the waves, the longshore sediment transport could be reduced clearly in a state of weak beach erosion. From spring to summer in 2023, the longshore sediment transport weakened further, but all profiles of Baicheng beach showed dif-

ferent erosions with intensified sediment loss related to the seaward transport of sediments caused by the strong precipitation in summer. Meanwhile, tourist activities have also intensified the beach erosion. Then, these seasonal changes showing strong-weak-strong erosion intensity on Baicheng beach was related to the seasonal transfer of longshore and cross-shore sediment transport, and subsequently, the grain size of surface sediment presented some immediate changes. From autumn to the following summer, the profile slope and sediment grain-size of Baicheng beach decreased at first and then increased, *i.e.*, the higher erosion intensity the steeper beach slope coupling with sediment grain-size increasing. It is mainly related to the seasonal transfer from longshore and cross-shore sediment transport and their interactions. The observations at Baicheng beach have provided some new findings for a better understanding of sandy-muddy transitional beach morphodynamics.

Key words: marine geology; beach profile; grain-size characteristic; seasonal variation; sensitive grain-size component; sandy-muddy transitional beach

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20231219001

* Corresponding author (E-mail: zhaoshaohua@tio.org.cn)

(责任编辑:王 静)