

刘文良, 褚宏宪, 法鸿洁, 等. 基于机载 LiDAR 和剖面数据的海滩地形动态监测[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(1): 81-92.

LIU Wenliang, CHU Hongxian, FA Hongjie, et al. Dynamic monitoring of beach topography based on airborne LiDAR and profile data[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(1): 81-92.

基于机载 LiDAR 和剖面数据的海滩地形动态监测

刘文良^{1,2}, 褚宏宪^{1,2*}, 法鸿洁³, 王洪松^{1,2}, 鲍宽乐^{1,2}, 李晓阳^{1,2}, 刘京强^{1,2}

(1 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264004; 2 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 烟台 264004; 3 烟台市牟平区海洋与渔业监督监察大队, 烟台 264100)

摘要: 传统的海滩监测剖面方法无法获得区域尺度的监测数据, 制约了海滩区域地形变化规律的研究。根据 2022 年 4 月—2023 年 9 月周期性 RTK 实测剖面数据和多期机载 LiDAR 数据, 分析了烟台市金山湾局部地区的海滩地形变化特征。结果显示, 机载 LiDAR 技术能够快速获得海滩的三维点云信息, 具有厘米级的精度, 且基于多测次的数据能够估算泥沙的侵蚀/淤积体量。2 年的剖面监测数据表明, 研究区海滩在年际变化中整体呈现淤积趋势, 年平均淤积厚度约为 0.19 m/a; 海滩的季节变化特征表明, 弱动力条件下的泥沙淤积量小于强动力条件; 平均高潮线以上地形相对稳定, 潮间带区域受风浪、潮流等因素影响地形变化频繁。4 测次的机载 LiDAR 数据资料显示, 研究区海滩在秋季整体以淤积为主, 平均淤积厚度约为 0.09 m, 潮间带区域侵蚀和淤积相间分布状况明显。汉河入海口东侧海滩的侵蚀深度和淤积厚度相对西侧海滩偏大, 河口沙坝东西向有一定增长, 导致河口变窄。风浪、潮流、河流等自然因素是塑造海滩形态和控制海滩演化的主要动力因素。极端天气可影响海滩的季节性演化。人类活动在一定程度上影响了海滩地形的自然演化。

关键词: 机载 LiDAR; RTK; 海滩; 动态监测; 烟台市金山湾

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.121

0 引言

海滩是指沿海地带出露的沙泥滩, 多是由粉砂和黏土组成的平缓地带, 同时也是敏感的海陆动力相互作用区, 在保护沿海地区免受风暴潮影响、增加后备土地资源、支持生物多样性等方面具有重要的生态功能和社会经济价值^[1-2]。按地貌和出露部位分为潮上带、潮间带和潮下带。潮上带是平均大潮高潮线以上的地带, 该部分长期出露水面, 可用传统陆地测量手段进行地形测绘; 潮间带是平均大

潮高潮线至平均低潮线之间的地带, 此部分周期性的受海水淹没, 侵蚀、淤积复杂, 滩面常见潮沟和波浪侵蚀的坑洼, 因底质类型和潮汐等原因, 该区域不便于开展大规模测绘作业; 潮下带是平均低潮线以下向海延伸的地带, 常年被水淹没, 通常使用水下测量设备进行测量。

剖面监测是研究海滩地形动态变化的直接有效手段之一, 利用 RTK(real time kinematic)技术对地形剖面开展连续监测可以反映海滩的侵蚀和淤积程度, 众多学者基于此技术手段在不同海滩开展了相关研究^[3-5]。虽然 RTK 技术精度较高, 但是不能反映区域整体的动态变化情况, 且剖面的布设具有一定的主观性, 在一定程度上制约了海滩地形变化规律的研究。也有学者使用卫星遥感来研究海滩地形的反演和动态演化^[6-10], 该方法虽然能够实现大尺度监测, 但是由于空间分辨率限制以及位置计算存在水平偏移误差, 导致测量精度不高。随着无人机技术的发展, 有学者探索使用无人机 SFM

收稿日期: 2023-12-13

资助项目: 中国地质调查局项目“胶东北部海岸带与岛礁综合地质调查”, “1: 25 万威海幅海洋区域地质调查”(DD20220875, DD20230412)

第一作者: 刘文良(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事环境地质和遥感技术方面的研究工作。E-mail: 813357425@qq.com

* 通讯作者: 褚宏宪(1973—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事海洋地质调查方面的研究工作。E-mail: chx-8@163.com

(structure from motion)摄影测量技术对海滩进行地形测绘^[11-12]和动态监测^[13-16],该技术使用二维照片重建出正射影像和数字表面模型(digital surface model, DSM),易受光照和周围环境影响,且后期数据处理需要较多的人工干预;亦有学者利用机载LiDAR技术开展海滩地形测绘方面的研究工作^[15,17-20],但是由于成本、空域以及海滩地貌等原因,少有学者开展动态监测方面的研究。轻小型无人机和LiDAR传感器的发展为地形测量提供了一种低成本、可重复和高精度的方案,目前已在矿区沉降监测方面有了较为广泛的应用^[21-22],对海滩进行动态监测还需进一步研究和考证。

金山湾是山东半岛北部典型的夷直性海岸,研究海滩的侵蚀淤积状况对于保护该区域的沙滩资源具有重要意义,前人在该区域的调查多以传统的剖面监测为主^[23-25],缺少范围性的监测研究。本文基于机载LiDAR和网络连续运行参考站的实时动态定位(CORS-RTK)技术,以烟台市金山湾局部海滩为研究区,从剖面 and 区域两种监测尺度分析研究海滩的动态变化,探讨海滩演化的驱动因素,深化对山东半岛北部夷直性海滩演化规律的认识。

1 研究区概况

金山湾是位于胶东半岛北部、烟台市牟平区姜格庄镇北部的一个带状区域,属夷直性海岸,开敞向外海,岸线全长约22 km,拥有约8 km²的滩涂。本文选择其中形态影响因素最多的一段海滩为研究区(37°27'00"—37°27'30"N、121°43'25"—

121°46'35"E,图1)。研究区东西长约4.5 km,海滩平均宽度约为120 m,最窄处约为70 m,最宽可达400 m,汉河在海滩中部入海,海滩沉积物类型主要为砂,河口处有少量的淤泥和黏土。汉河河水流量较小,仅在丰水期有少量泥沙入海,枯水期基本无泥沙运输。研究区地处温带,属季风气候;降水集中在6—9月,冬季空气较湿润,降雪丰富;夏季多南风,冬季则多偏北风。

根据《中国海湾志》^[26]及前人相关研究资料^[23-25],研究区附近海域四季波浪以风成浪为主,常风向和强风向为NNW向;相应的,常浪向和强浪向为NNW向,最大月均波高出现在冬季,夏季较小。9月至次年3月,以NNW向风为多,尤其是冬季寒潮大风过境时,出现强浪;5—8月偏南风,以涌浪为主,且较微弱。研究区潮汐类型为正规半日潮,但无实测验潮资料,东侧15 km处双岛湾验潮站平均潮差约为1.6 m,平均波浪周期约为2.6 s,平均波高约为0.4 m。

2 数据与方法

2.1 海滩剖面监测

通过野外踏勘,观察到河流入海口东西两侧海滩侵蚀/淤积特征或有不同,因此各布设了2条剖面,共4条(P1、P2、P3、P4),并于2022—2023年对4条剖面进行了重复性测量,时间为每年的4月和9月,其中,P3和P4在2023年8月加测一次,剖面起点坐标、测量方向等信息如表1所示。

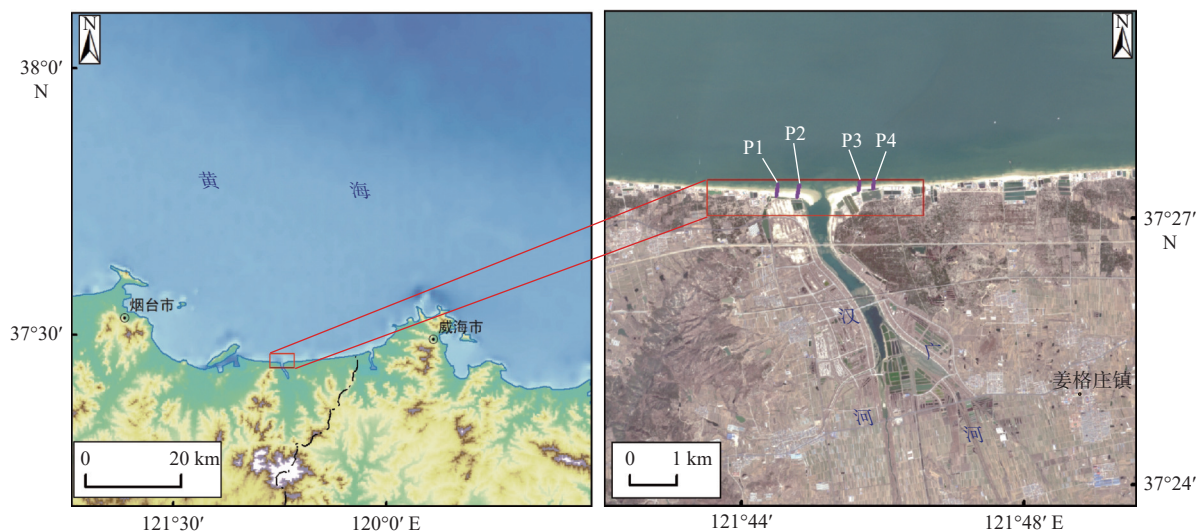


图1 研究区及海滩剖面位置示意图

Fig.1 Location of the study area and distribution of the surveying sample plots

表 1 研究区海滩剖面信息统计

Table 1 Information of beach profile of the study area

剖面编号	起点坐标	剖面方向	测量时间
P1	37°27'12.2"N, 121°44'25.9"E	8°	2022年4、9月, 2023年4、9月
P2	37°27'11.7"N, 121°44'43.9"E	8°	2022年4、9月, 2023年4、9月
P3	37°27'16.5"N, 121°45'35.9"E	6°	2022年4、9月, 2023年4、8、9月
P4	37°27'23.7"N, 121°45'49.3"E	6°	2022年4、9月, 2023年4、8、9月

剖面选择陆地一侧固定位置为起点, 方向垂直于海岸线, 测量终点约为水下 1 m 处。本文使用中海达 iRTK5 测量型 GNSS 接收机结合网络 CORS-RTK 沿剖面方向采集数据, 采集点为剖面方向上的特征部位, 间隔约为 1~2 m, 最终获得剖面每个采集点的经纬度、高程点和大地坐标。

2.2 机载 LiDAR 数据

本文使用的机载 LiDAR 数据由两种激光传感器在月大潮日干潮前后约 1 h 内进行数据采集, 搭载平台分别为大疆 M300 和飞马 D20 无人机, 相关参数见表 2。在波长方面, 禅思 L1(以下简称“L1”)波长为 905 nm, 飞马 LiDAR22(以下简称“LiDAR22”)波长为 1 550 nm, 均属于近红外激光器, 不能穿透水面采集水底数据, 在实际数据采集过程中, LiDAR22 发射的激光脉冲在水面基本全部被吸收, L1 由于波长相对较短可返回少量的激光脉冲; 在测程方面, LiDAR22 属长测程激光, L1 在 100 m 测距以内才能保证较高的测量精度。本文中, 使用 L1 采集 3 个测次(2023 年 8、10 和 11 月), LiDAR22 采集 1 个测次(2023 年 9 月)。2023 年 8 月采集的 LiDAR 数据与剖面数据同步展开测量, 9 月采集的 LiDAR 数据与剖面数据为准同步测量, 数据采集时间相差 4 天。

2 种激光传感器采集的 LiDAR 数据同样基于网络 CORS-RTK 获取数据。利用 L1 和 LiDAR22 采集的数据分别利用大疆智图和 SDCImport 软件进

行数据预处理生成三维点云, 4 个测次的数经与靶标检查点对比, 水平误差和垂向误差均在 5 cm 以内, 在无人机管家软件进行航带平差、去噪、平滑、地面点分类、裁剪等处理, 生成数字高程模型(digital elevation model, DEM), 空间分辨率为 5 cm。最后对 RTK 实测剖面数据和机载 LiDAR 生产的 DEM 数据根据测区周边水准点计算的高程偏移量进行修正, 最终数据的平面基准为 2000 国家大地坐标系, 高程基准为 1985 国家高程。

3 结果与分析

3.1 海滩剖面数据和机载 LiDAR 数据一致性分析

为分析机载 LiDAR 数据的有效性, 将同步和准同步测量的 RTK 实测高程值和 LiDAR 点云数据进行叠置, 并截取相应位置的点云剖面, 如图 2 所示。各剖面图中, 红色点为 RTK 实测高程值, 彩色色带为对应位置的 LiDAR 点云剖面, 其中, P2、P3、P4 因 2023 年 9 月采集数据时潮沟尚有少量水体, 发射的激光脉冲被吸收造成色带存在空白条段(图 2d—f)。由图可知, RTK 实测数值与机载 LiDAR 采集的高程值吻合度较高, 两种技术手段在相同位置采集的数值基本一致, 其中, 同步采集的数据吻合度优于准同步采集。

为进一步验证机载 LiDAR 数据和 RTK 实测数据的一致性, 在基于 LiDAR 点云生产的 DEM 上提取 RTK 实测位置处的对应高程值, 并将剖面位置的 RTK 测量值与 DEM 数值绘制散点图, 如图 3 所示, 横轴为 RTK 测量值, 纵轴为 DEM 高程值。其中, 图 3a、b 为 2023 年 8 月同步测量的 P3 和 P4 剖面散点图, 图 3c—f 为 9 月准同步测量的 P1、P2、P3、P4 剖面散点图。

由图 3 可知, 机载 LiDAR 数据整体呈现了较好的测量精度, 同步测量的情况下, 由 LiDAR 点云生产的 DEM 与对应 RTK 测量值的均方根误差 RMSE<7 cm, 其中, P4 剖面 RMSE 数值较大, 为

表 2 机载 LiDAR 传感器参数和数据采集时间

Table 2 Airborne LiDAR (light detection and ranging) sensor parameters and data acquisition time

参数	禅思 L1	飞马 LiDAR22
搭载平台	大疆 M300	飞马 D20
飞行高度	80 m	200 m
波长	905 nm	1 550 nm
回波数	3 次	5 次
分辨率	>100 点/m ²	>50 点/m ²
扫描角度	70.4°	360°可调
采集时间	2023 年 8、10、11 月	2023 年 9 月

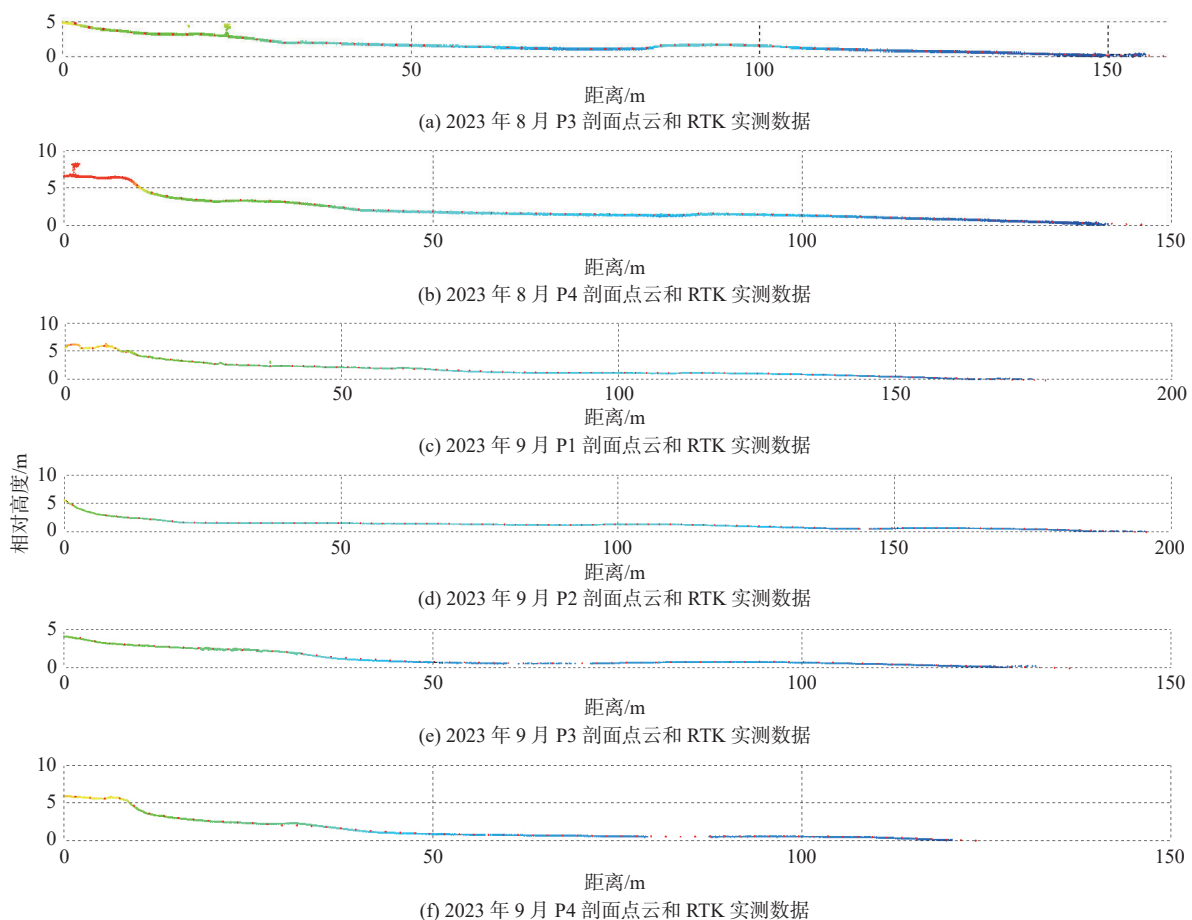


图2 剖面点云与RTK实测高程叠加图

Fig.2 Superposition of profile point cloud and RTK (real time kinematic) measured elevation

6.98 cm。准同步测量的场景下, RMSE 相对于同步测量数值偏大, 但是大都 <10 cm, 误差最大的剖面为P1, RMSE 达到了 10.26 cm。经查验, 高程值相差最大的异常点位于剖面靠陆一侧, 差值达到了 60 cm 以上, 该位置靠近养殖区厂房, 人类活动频繁, 猜测由于人类活动导致了地形的短期突变; 此外, 在滩面靠海的位置, RTK 测量值与 DEM 值的散点在 $y=x$ 趋势线上下出现了不同幅度的波动, 表明海滩地形在波浪作用下不断的变化。

综上所述, 机载 LiDAR 能够克服传统测量方法的不足, 获得高精度的海滩三维点云信息。基于 LiDAR 点云生产的 DEM 与 RTK 测量数据吻合度较好, 同步测量的情况下, 垂向误差 <7 cm, 表明了机载 LiDAR 技术适用于海滩地形测量。

3.2 海滩剖面变化特征

为便于比较和定量分析海滩的地形变化, 将采集的各剖面观测数据绘制成图, 并将平均高潮线和低潮线标识在图上, 如图 4 所示。其中, P1、P2 观

测位置位于河口西侧, P3、P4 位于河口东侧, 东西两侧海滩地形平坦, 滩面坡度约为 1.1%~2.5%。从剖面分布情况来看, 河口东西两侧的变化特征存在差异, 河口西侧 2 条剖面在平均高潮线以上区域的变化幅度小于东侧。本文将 4 条剖面分成河口东、西侧 2 组进行分析:

(1) 河口西侧海滩剖面变化

剖面 P1 距离河流中线西侧约 1 000 m, 由陆向海依次为水产养殖工房、风成沙丘、滩肩、滩面, 沙丘上有绿色植被覆盖, 滩肩以上位置人类活动相对频繁; 剖面 P2 距离河流中线约 550 m, 剖面起点埋有固定桩, 由陆向海依次为风成沙丘、滩肩、滩面, 剖面附近人类活动相对较少, 可大致反映海滩的自然变化。

比较 2 条剖面(图 4a、b), 整体呈现淤积趋势, 其中, 风成沙丘以上的位置地形相对稳定, P1 受人类活动影响存在些许变动; 滩肩和滩面的变化幅度相对较大, 其中 P2 变动更为明显。对比 2022—2023 年的剖面数据可知, 滩肩和沙坝最大向陆淤积

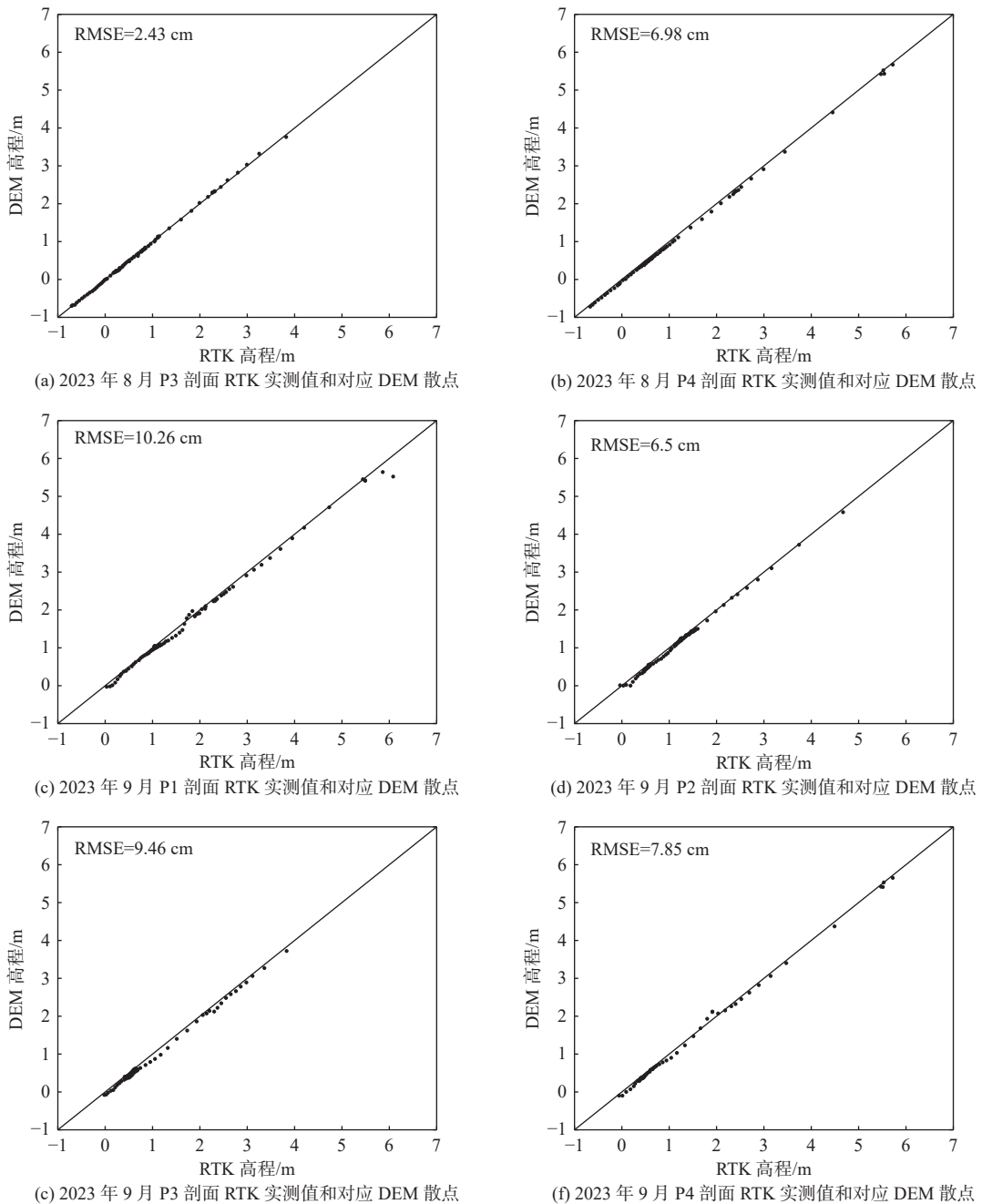


图 3 剖面 RTK 实测高程和 DEM 对应散点分布图

Fig.3 Scatter distribution of profile RTK (real time kinematic) measured elevation and DEM (digital elevation model) produced based on airborne LiDAR (light detection and ranging)

距离约为 32 m, 最大淤积厚度达到了 1.3 m。2 组剖面的季节变化特征为: 春季中段至夏季(4—9 月), 滩肩顶和沙坝存在向陆淤积的现象, 尤其是 2023 年 4—9 月, 受 6 号台风“卡努”的影响, 淤积的幅度大于 2022 年同一时期; 秋季至春季中段(9 月—次年 4 月)剖面整体呈现淤积, 淤积厚度约 0.03~1 m, 局部位置存在侵蚀。

(2) 河口东侧海滩剖面变化

剖面 P3 位于河流中线东侧约 720 m, P4 距离

河流中线约 1 050 m, 剖面测量起点埋有固定桩, 2 剖面由陆向海依次为风成沙丘、滩肩、滩面, 沙丘上有绿色植被覆盖, 向陆一侧有养殖场的防护围墙。其中, P3 沙丘附近人类活动频繁, 其他区域受自然因素影响演化; P4 附近人类活动较少, 可大致反映自然状态下的海滩演化。

比较 2 条剖面(图 4 c、d), 整体呈现淤积趋势, 潮间带局部位置存在微弱侵蚀, 其中剖面 P3 沙丘以上位置受人类活动影响地形变动较大。比较

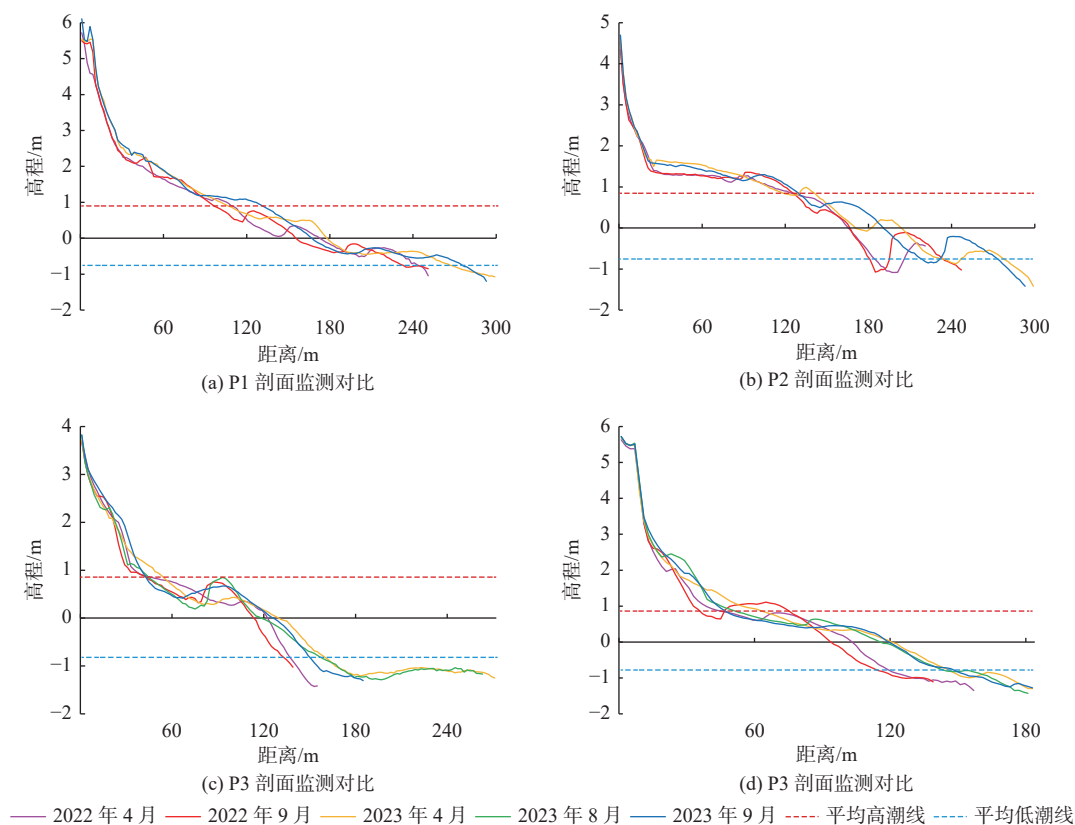


图4 海滩剖面监测对比

Fig.4 Comparison of beach profile monitoring

2022—2023 年的剖面数据, 滩肩和滩面均表现为向海淤积, 其中, 滩面最大淤积距离约为 20 m, 最大淤积高度约为 1.1 m, 滩肩位置向海淤积幅度相对较小。

2 组剖面的季节变化特征基本一致, 春季中段至夏季(4—9 月), 滩肩和滩面呈现微弱侵蚀, 滩肩顶部位置淤积特征明显, 淤积量为 0.1~0.4 m。2023 年 8—9 月, 受台风影响, 海滩形态发生了较大的变化, 尤其是 P3。秋季至春季中段(9 月—次年 4 月), 滩肩和滩面整体呈现淤积, 滩肩顶部位置被侵蚀, 平均淤积厚度达 0.17 m, 最大淤积厚度达 0.95 m。

3.3 基于机载 LiDAR 数据的海滩动态监测

叠置 4 个测次机载 LiDAR 数据生产的 DEM, 在河口东西两侧沿海滩最宽的方向设置剖面, 图 5a、b 显示了 2 个断面 3 个多月以来的海滩地形演化情况。2 条剖面在靠陆一侧均有风成沙丘, 高度可达 4 m, 河口东侧的沙丘坡度较缓, 沙丘以上位置未发现有明显的侵蚀和淤积情况, 主要受风的作用自然沉积。整体来看, 2 条剖面呈现淤积特征, 最大淤积厚度达到了 0.6 m。其中, 河口东侧剖面(P6)海滩

地形变化的幅度相对较大, 滩肩和滩面部分侵蚀和淤积情况交替分布, 滩肩顶部受波浪和河流的共同作用表现为向陆淤积。

由无人机正射影像可知, 干潮时的河流入海口在河流中线偏东的位置, 入海口方向为 NNW 向, 受河流、波浪以及人工建筑等影响, 东西两侧海滩均分布有沙坝, 其中, 西侧海滩沙坝位于河流与海滩交界处, 东侧位于海滩中部。

为分析范围尺度的海滩地形变化, 将相邻月份的 DEM 做减法运算, 图 6 显示了研究区地形的月度变化情况以及 8—11 月的累计变化情况, 整体来看, 海滩的侵蚀和淤积呈现带状分布特征。图 6a 为 8—9 月的地形变化情况, 由图可知, 此时间段内从后滨到前滩侵蚀和淤积的情况交替分布, 受台风影响, 最大侵蚀和淤积量均 > 0.6 m; 图 6b 为 9—10 月的海滩地形演化情况, 可以看出, 该时间段内, 大部分区域都呈现淤积的状态, 但是淤积量大都 < 0.1 m, 局部区域淤积量达到了 0.5 m, 海滩前部靠海位置因受到海浪的冲刷存在不同程度的侵蚀; 图 6c 为 10—11 月的地形变化情况, 该时间段内侵蚀和淤积的情况交替现象更为明显, 沙丘到平均高潮线之间的区域仍旧以轻度淤积为主,

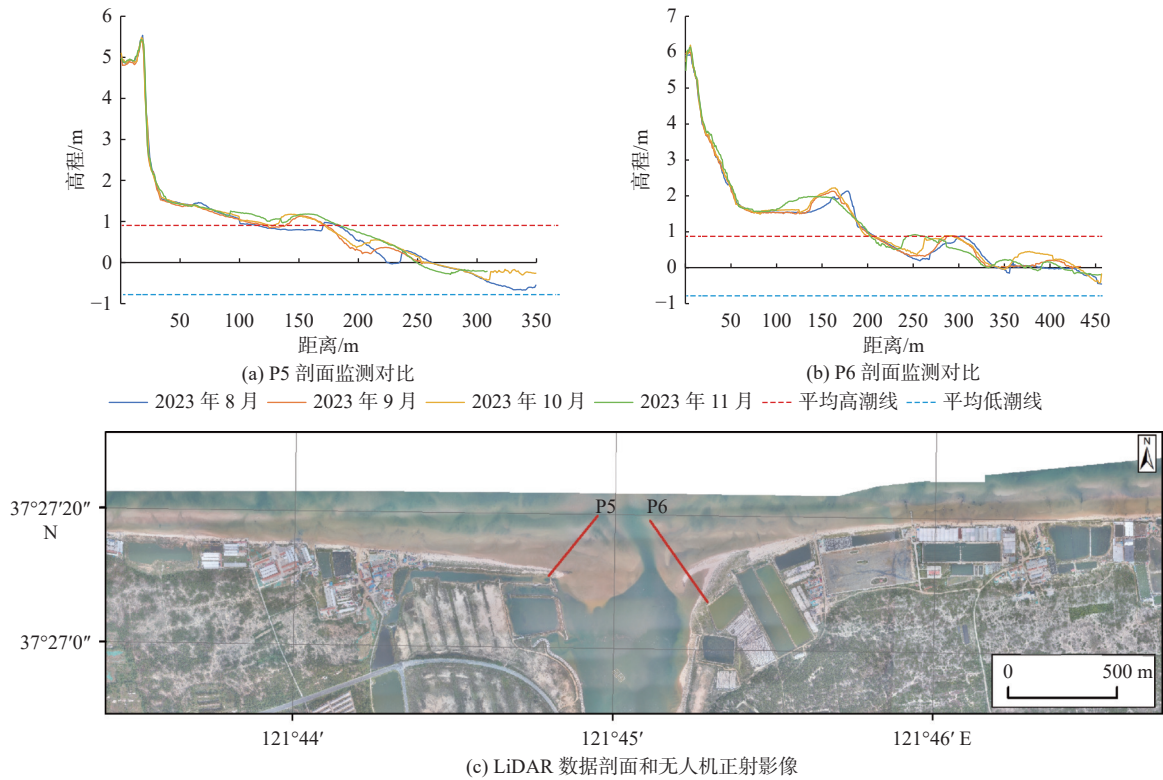


图 5 河口西侧 (P5)、东侧 (P6) 剖面地形变化和无人机正射影像图

Fig.5 Topographic profile changes of the western side (P5) and eastern side (P6) of the estuary and UAV (unmanned aerial vehicle) orthophotograms

局部区域存在侵蚀, 平均高潮线至海滩靠海一侧以侵蚀为主, 海滩中部区域侵蚀、淤积的幅度和范围较前两个时间段偏大, 淤积厚度大都 >0.4 m, 侵蚀量大都 <0.3 m。

图 6d 反映了海滩地形 8—11 月期间的短期冲淤变化情况, 由图可知, 秋季研究区海滩整体以淤积为主, 局部区域存在带状的侵蚀。东西两侧海滩在风成沙丘至平均高潮线之间主要呈现淤积特征, 除河口东侧在平均高潮线附近存在带状侵蚀区域外, 其余大部分区域表现为淤积, 西侧海滩淤积量大都 <0.2 m, 东侧海滩最大淤积量达到了 0.6 m。平均高潮线至前滨区域, 海滩侵蚀和淤积交替分布, 相对于河口西侧, 东侧海滩的侵蚀和淤积幅度更大, 最大侵蚀深度达到了 0.9 m, 淤积厚度达到 0.8 m。

3.4 泥沙侵蚀/淤积量计算

图 6d 中红框区域为汉河入海口附近的海滩, 在 GeoScience 软件中对 2023 年 8 月和 11 月之间的 DEM 差值进行统计, 入海口附近海滩 3 个多月来泥沙淤积面积约为 $224\,263.8\text{ m}^2$, 侵蚀面积约 $84\,117.2\text{ m}^2$, 区域泥沙平均增量约为 0.09 m。按照

公式(1)和图 7 所述原理对海滩累积泥沙淤积量进行计算, 计算所得入海口附近海滩泥沙淤积量约为 $27\,089.42\text{ m}^3$ 。

$$V = \sum_{i=1}^n \Delta h_i \times S / 10^6 \quad (1)$$

式中: V 为侵蚀/淤积量, m^3 ;

S 为单个像元的面积, cm^2 ;

Δh 为 DEM 差值的像元数值, cm ;

n 为像元数量。

4 海滩地形控制因素分析

金山湾属夷直性海岸, 开敞向外海, 中部河流汇入, 海滩地貌类型复杂多样, 属于现代海洋动力地貌, 现代海滩地貌的形成, 主要受风场、波浪、河流、极端天气等自然因素和人类活动等多种因素综合作用的影响。

(1) 风场和波浪

风场、波浪、潮汐等动力因素是塑造海岸地貌的重要因素, 其中, 波浪向岸传播引起的质量输送、破碎波产生的沿岸流及海岸水体堆积引起的离岸流等近岸流系对海滩的形成和发育是最具活跃的动力因素^[27]。风场对于海滩地形的作用主要是

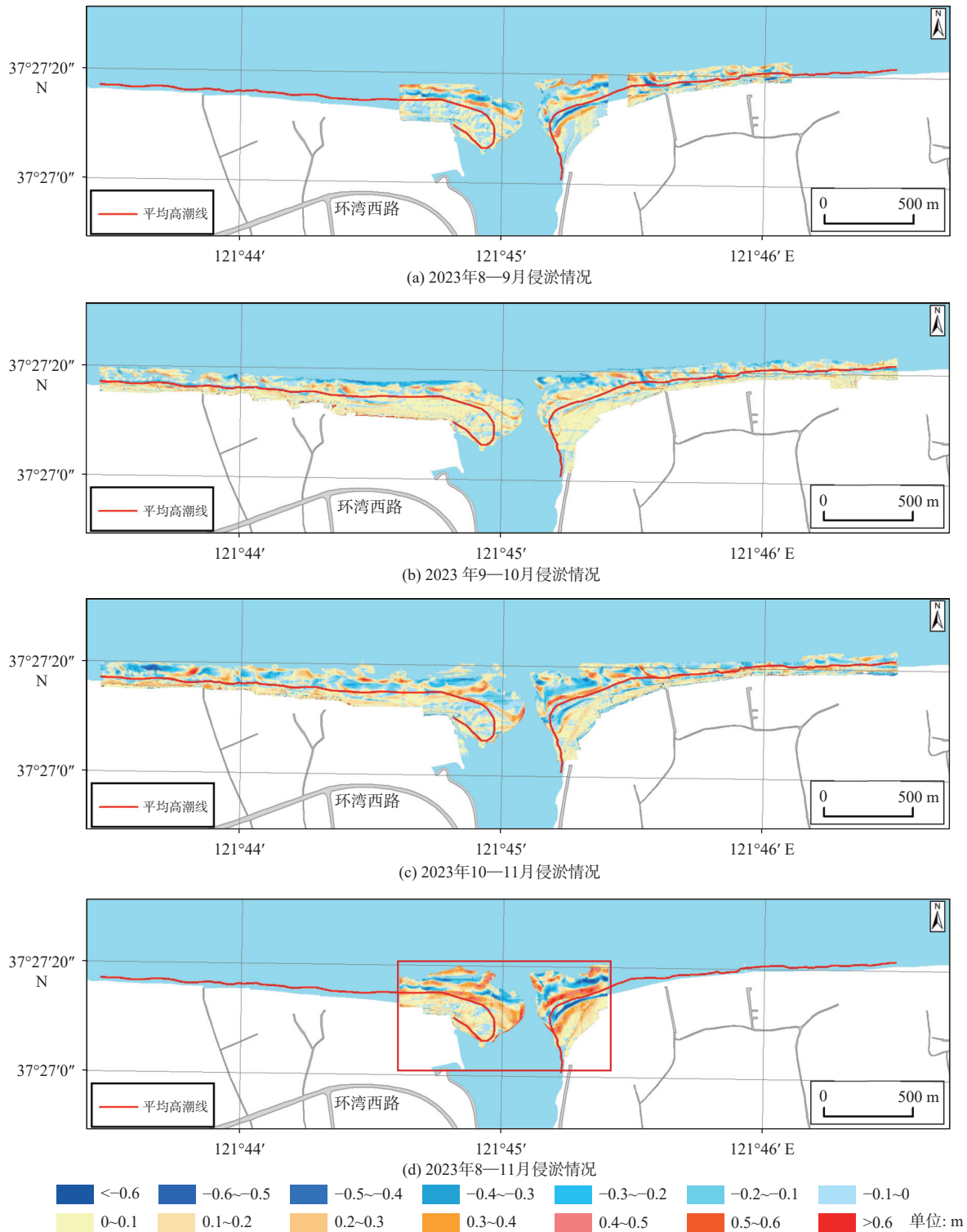


图6 研究区侵蚀和淤积变化

Fig.6 Variation in erosion and siltation of the study area

通过对波浪强度和方向的影响,能够在一定程度上促进波浪对海滩的作用^[4]。

通过分析欧洲中期天气预报中心(ECMWF)2022年1月—2023年11月的ERA5单层月平均再分析数据(空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨

率为1 m),研究区地表以上10 m处月平均风向与月平均波浪方向一致,均为NNW向(图8)。二者的作用在一定程度上促进了海水中的泥沙在潮间带地区淤积。4—9月的平均风速和波高数值小于9月一次年4月,海滩的淤积程度与这些因素呈正

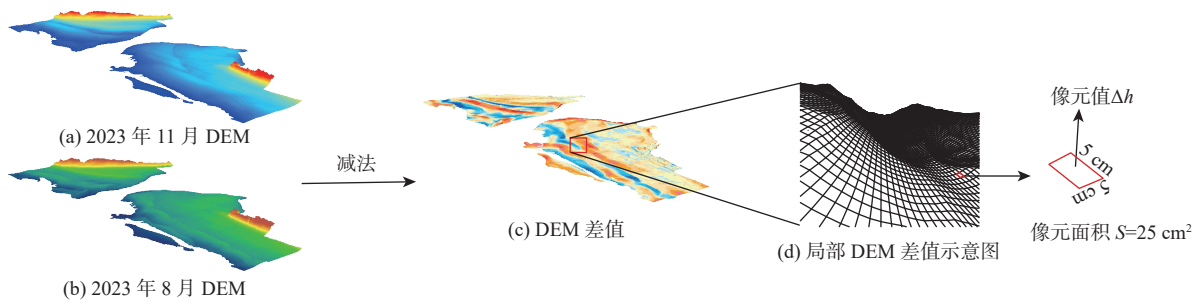


图 7 泥沙侵蚀/淤积量计算示意图

Fig.7 The calculation of sedimentary scouring/siltation

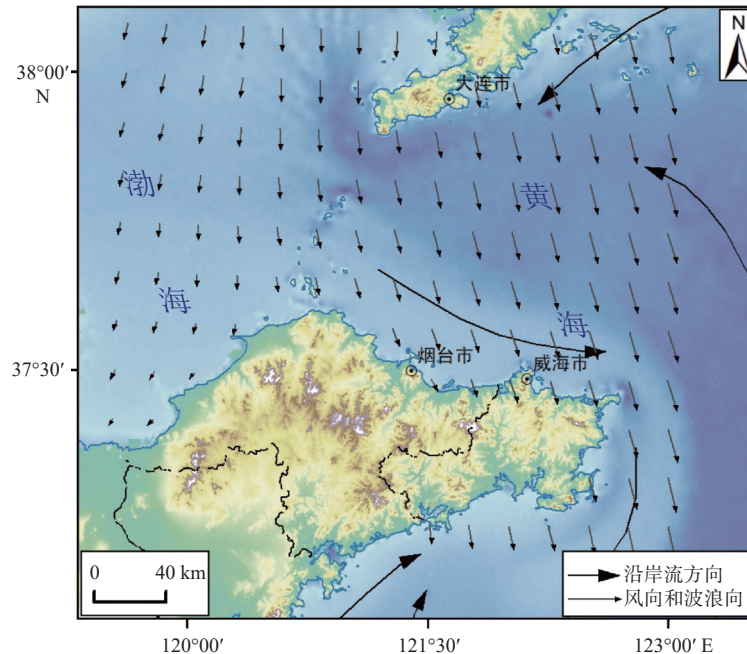


图 8 月平均风向、波浪向和沿岸流

Fig.8 Average monthly wind direction, wave direction, and coastal current around the study area

相关,说明弱动力条件下的泥沙淤积量小于强动力条件。

研究区北部海洋流系为鲁北沿岸流(图 8),该沿岸流冬强夏弱,在北向风的作用下,沿山东半岛北部海岸向东流动,在成山角处转向南流动,属黄海沿岸流北段^[28-29]。受此沿岸流的影响,研究区沿岸净输沙方向为自西向东,该沿岸流冬强夏弱的特征也造成了海滩在秋季至春季中段(9月—次年4月)的淤积量大于4—9月。

(2) 河流

汉河入海口附近河流和波浪相互作用,两者的相对强度以及波浪的入射方向共同控制入海口处海滩的形态和沉积物的分布^[30],河口东西两侧海滩的远海方向均存在沙坝。目前,研究区汉河水流量较小,水动力较弱,河流冲刷作用不明显,河口区地形受到河流、波浪、潮流及人工建筑等因素影响,共

同参与海滩地貌的塑造,河口区域以淤积为主,河口沙坝东西向有一定增长,河口宽度变小。

(3) 极端天气

台风带来的短时降水及其造成的剧烈水动力环境可在一定程度上影响海滩的演化。研究区在海滩剖面周期性监测期间,共经历 2 次台风,分别是 2022 年 12 号台风“梅花”和 2023 年 6 号台风“卡努”,但“梅花”过境后未采集剖面数据;利用机载 LiDAR 开展海滩动态监测期间,经历 1 次台风,为 2023 年 8 月 10 日在朝鲜半岛登录的“卡努”。文中 2023 年 9 月测量的剖面监测数据在台风“卡努”过境后展开,8 月和 9 月采集的 LiDAR 数据分别发生在台风过境前后,观测结果可在一定程度上反映极端天气对研究区海滩演化的影响。

观察图 4 中 4 组剖面 4—9 月的形态变化,台风“卡努”造成海滩滩肩、滩面的淤积和侵蚀幅度

大于 2022 年同一时期;由图 6a、b 可知,研究区 8—9 月的冲淤变化幅度大于 9—10 月。台风造成了滩肩顶和沙坝的侵蚀,同时也将海水中的泥沙带到海滩上,使海滩整体呈现淤积特征。

(4) 人类活动

除自然因素外,人类活动也是造成海滩地形变化的一大重要因素。海滩靠岸一侧为人工搭建的厂房和养殖水塘,正北方向约 10 km 处有大片的海上养殖区,局部区域人类活动较为频繁,风成沙丘附近经常出现人工堆放物品或转移砂子的情况,造成海滩地形的突然抬升或下降。退潮时海滩靠海一侧,常有赶海活动,造成海滩地形短期内发生变化,但是相对于自然因素影响较小且易恢复。此外,在海滩处早年建设的房屋、输水管道附近出现了不同程度的侵蚀,部分房屋的地基出现破损,沉积物颗粒较大。

综上所述,平均高潮线以上地形相对稳定,主要受风力沉积和人类活动影响;潮间带区域受风浪和潮流影响,地形变化频繁;台风、冬季寒潮大风等极端天气影响了海滩地貌的季节性演化;风浪、潮流、河流、人类活动等多种因素共同塑造了海滩地貌。

5 结论

本文基于多测次的机载 LiDAR 数据和 2 年的岸滩剖面监测数据,从断面和区域的尺度分析了金山湾局部海滩的动态变化特征,并探讨了海滩演化的驱动因素,主要结果如下:

(1) 机载 LiDAR 技术能够快速获取海滩的三维点云信息,相对于传统的剖面监测方法可获得区域内范围性的监测数据,与监测剖面数据有较高的吻合度,同步测量时的垂向误差在 7 cm 以内;且基于此技术手段可估算海滩泥沙的侵蚀/淤积体量。在一定程度上,无人机 LiDAR 技术或可替代传统的剖面监测方法,用于海滩范围性的地形变化监测。

(2) 对比两年的剖面监测数据,整体呈现淤积趋势,且弱动力条件下的泥沙淤积量小于强动力条件,年平均淤积厚度约为 0.19 m/a;平均高潮线以上地形相对稳定,潮间带区域受风浪、潮流等因素影响地形变化频繁。对比机载 LiDAR 生成的 DEM 数据,研究区海滩在 8—11 月整体以淤积为主,平均淤积厚度约为 0.09 m,潮间带区域侵蚀和淤积相

间分布;汉河入海口东侧海滩的侵蚀深度和淤积厚度相对西侧海滩较大;河口沙坝东西向有一定增长,河口宽度变小。

(3) 风浪、潮流、河流等自然因素是控制研究区海滩形态以及地形变化的主要动力因素;台风、寒潮大风等极端天气可影响海滩的季节性演化;工程建设、赶海等人类活动在一定程度上影响了海滩的自然演化。

参考文献:

- [1] NICHOLAS J M, ROBERT S C, STUART R P, et al. Tracking the rapid loss of tidal wetlands in the Yellow Sea[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(5): 267-272.
- [2] 张长宽, 龚政, 陈永平, 等. 潮滩演变研究进展及前沿问题 [C]// 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2017: 759-766.
ZHANG C K, GONG Z, CHEN Y P, et al. Research progress and frontier issues on tidal flat evolution[C]//Proceedings of the 18th China Ocean (Coastal) Engineering Academic Symposium. Beijing: Ocean Press, 2017: 759-76.
- [3] 岳保静, 高茂生, 邵家旺, 等. 河北省京唐港附近沙坝-潟湖海岸地貌演化特征 [J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(9): 10-16.
YUE B J, GAO M S, SHAO J W, et al. Geomorphological evolution of the barrier-lagoon system near the Jingtang Port, Hebei Province[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(9): 10-16.
- [4] 解航, 杨怡红, 朱龙海, 等. 山东半岛东南部典型砂质岸滩季节性演化及控制因素探讨: 以海阳万米海滩为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 57-67.
XIE H, YANG Y H, ZHU L H, et al. Seasonal evolution of the typical sandy coast of southeastern Shandong Peninsula and controlling factors: take the 10 000-meter beach in Haiyang as an example[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 57-67.
- [5] 张鑫, 李萍, 杨奇铮, 等. 广西北海涠洲岛典型岸滩剖面短期冲淤变化特征 [J]. 海洋科学, 2016, 40(6): 77-83.
ZHANG X, LI P, YANG Q Z, et al. Short-term shore change characteristics of erosion and deposition on Weizhou Island in Beihai, Guangxi Province[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(6): 77-83.
- [6] LI H, GONG Z, DAI W Q, et al. Feasibility of elevation mapping in muddy tidal flats by remotely sensed moisture (RSM) method [J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 85 (Sp1): 291-295.
- [7] LI W Y, GONG P. Continuous monitoring of coastline dynamics in western Florida with a 30-year time series of Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 196-209.
- [8] KANG Y Y, LEI J, WANG M J, et al. Topographic evolution of tidal flats based on remote sensing: an example in Jiangsu coast, Southern Yellow Sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1163302.

- [9] 王子赫, 康彦彦, 王敏京. ICESat-2 与多源光学影像的潮滩地形反演方法 [J]. 测绘通报, 2023(5): 51-55.
WANG Z H, KANG Y Y, WANG M J. ICESat-2 and multivariate optical image for tidal flat topography inversion methods[J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2023, 5: 51-55, 61.
- [10] FAN Y S, CHEN S L, ZHAO B, et al. Monitoring tidal flat dynamics affected by human activities along an eroded coast in the Yellow River Delta, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(7): 396-412.
- [11] 胡勇, 何旭涛, 徐辉, 等. RTK 无人机在潮间带地形测量中的应用 [J]. 地理空间信息, 2021, 19(4): 41-43.
HU Y, HE X T, XU H, et al. Application of RTK UAV in the topography survey of intertidal zone[J]. Geospatial Information, 2021, 19(4): 41-43.
- [12] 庄佳铨, 罗科, 彭云, 等. 基于无人机 SfM 摄影测量的潮间带牡蛎礁地貌调查 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 45-54.
ZHUANG J Q, LUO K, PENG Y, et al. Geomorphological survey of intertidal oyster reefs based on UAV Structure-from-Motion photogrammetry[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 45-54.
- [13] CHEN B Q, YANG Y M, WEN H T, et al. High-resolution monitoring of beach topography and its change using unmanned aerial vehicle imagery[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2018, 160: 103-116.
- [14] LU C H, CHYI S J. Using UAV-SfM to monitor the dynamic evolution of a beach on Penghu Islands[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2020, 31(3): 283-293.
- [15] 陈奇, 张阳, 唐雯雯, 等. 低空无人机平台应用于海滩地形监测的初步研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 55-68.
CHEN Q, ZHANG Y, TANG W W, et al. Application of low-altitude airspace UAVs in beach terrain monitoring[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 55-68.
- [16] 郭一栋, 林杭杰, 于谦, 等. 基于无人机 SfM 摄影测量的海岸盐沼前缘形态变化研究 [J]. 海洋学报, 2022, 44(12): 148-160.
GUO Y D, LIN H J, YU Q, et al. Morphology of coastal salt marsh margins: a study using UAV-based Structure-from-Motion photo-grammetry[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(12): 148-160.
- [17] 许宝华, 刘世振. 机载 LiDAR 测量技术在潮间带测量中的应用 [J]. 人民长江, 2019, 50(11): 95-98.
XU B H, LIU S Z. Application of airborne LiDAR measurement technology in intertidal zone measurement[J]. Yangtze River, 2019, 50(11): 95-98.
- [18] 别君. 基于机载 LiDAR 数据的滩涂地形形变监测 [C]//“一带一路”战略与海洋科技创新—中国海洋学会 2015 年学术论文集: 海洋出版社, 2015: 31-35.
Bei J. Beach topography deformation monitoring based on airborne LiDAR data [C]// "Belt and Road" Strategy and Marine Science and Technology Innovation-2015 Academic Proceedings of the Chinese Society of Oceanography. Beijing: Ocean Press, 2015: 31-35.
- [19] 文学东, 李俊峰, 林昀. 机载 LiDAR 在高精度滩涂 DEM 制作中的关键技术分析 [J]. 测绘通报, 2019(6): 92-95.
WEN X D, LI J F, LIN Y. Key technologies analysis of airborne LiDAR in high accuracy tidal flats DEM production[J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2019(6): 92-95.
- [20] ZHANG H F, WANG L, ZHAO Y F, et al. Application of Airborne LiDAR measurements to the topographic survey of the tidal flats of the northern Jiangsu radial sand ridges in the Southern Yellow Sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 871156.
- [21] 杨帆, 任闯, 曲丹, 等. 机载 LiDAR 技术在矿区地表沉陷灾害监测中的应用 [J]. 测绘工程, 2023, 32(4): 59-68.
YANG F, REN C, QU D, et al. Airborne LiDAR technology sinks on the surface of the mine application in disaster monitoring[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2023, 32(4): 59-68.
- [22] 郑俊良, 姚顽强, 蔺小虎, 等. 无人机 LiDAR 在采空区沉陷监测中的应用 [J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(4): 825-835.
ZHENG J L, YAO W Q, LIN X H, et al. Application of UAV LiDAR in monitoring subsidence of goaf[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2023, 43(4): 825-835.
- [23] 岳保静, 廖晶, 高茂生, 等. 山东半岛砂质海滩动力地貌演化特征 [J]. 海洋科学, 2017, 41(4): 118-127.
YUE B J, LIAO J, GAO M S, et al. Evolutionary features of morphodynamics of sandy beaches on the Shandong Peninsula[J]. Marine Sciences, 2017, 41(4): 118-127.
- [24] 周良勇, 薛春汀, 刘健, 等. 山东半岛东、北部海滩动力地貌特征及影响因素 [J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 83-94.
ZHOU L Y, XUE C T, LIU J, et al. Beach morphodynamics and impact factors on the beaches in the northern and eastern of Shandong Peninsula[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(1): 83-94.
- [25] 张丽丽, 邢浩, 张旭日, 等. 山东半岛海滩动力地貌特征分类 [J]. 海洋科学, 2023, 47(2): 10-19.
ZHANG L L, XING H, ZHANG X R, et al. Classification of beach dynamic geomorphic features in the Shandong Peninsula[J]. Marine Science, 2023, 47(2): 10-19.
- [26] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第 3 分册 (山东半岛北部和东部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
Compilation Committee of Record of Bays in China (CCRBC). Records of Bays in China (Volume 3: Bays in the North and East Shandong Peninsula)[M]. Beijing: Beijing China Ocean Press, 1991.
- [27] 蔡锋, 苏贤泽, 曹惠美, 等. 华南砂质海滩的动力地貌分析 [J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 106-114.
CAI F, SU X Z, CAO H M, et al. Analysis on morphodynamics of sandy beaches in South China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(2): 106-114.
- [28] 韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨, 等. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质运输的影响 [J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 145-156.
WE Q S, YU Z G, RAN X B, et al. Characteristics of the west-

- ern coastal current of the Yellow Sea and its impacts on material transportation[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(2): 145-156.
- [29] 马晓红, 韩宗珠, 艾丽娜, 等. 中国渤黄海的沉积物源及输运路径研究 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2018, 48(6): 96-101.
- MA X H, HAN Z Z, AI L N, et al. Research on provenance and transport pattern in the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(6): 96-101.
- [30] 彭旸, 龚承林, 李顺利. 河流-波浪-潮汐混合作用过程研究进展 [J]. *沉积学报*, 2022, 40(4): 957-978.
- PENG Y, GONG C L, LI S L. Recent Advances in river-wave-tide mixed processes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(4): 957-978.

Dynamic monitoring of beach topography based on airborne LiDAR and profile data

LIU Wenliang^{1,2}, CHU Hongxian^{1,2*}, FA Hongjie³, WANG Hongsong^{1,2},
BAO Kuanle^{1,2}, LI Xiaoyang^{1,2}, LIU Jingqiang^{1,2}

(1 Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264004, China; 2 Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264004, China; 3 Marine and Fishery Supervision Brigade of Yantai Muping District, Yantai 264004, China)

Abstract: The traditional beach monitoring uses profile method cannot obtain the monitoring data of regional scale, which restricts the study of the terrain change law of beach area. According to the periodic RTK (real time kinematic) measured profile data and multiple airborne LiDAR (light detection and ranging) data from April 2022 to September 2023, the geomorphic changes of beach in some parts of Jinshan Bay, Yantai City, Shandong, East China were studied. Results show that the airborne LiDAR technology could quickly obtain the three-dimensional point cloud information of beach in centimeter-level accuracy, and the amount of sedimentary scouring/siltation could be estimated based on multi-epoch data. The two-year profile monitoring data showed that the beach showed a general trend of siltation in the interannual scale, with an annual average siltation rate of ~ 0.19 m/a. The seasonal variation of the beach showed that the siltation was smaller under weak dynamic conditions than that under strong dynamic conditions. The areas above the average high tide line was relatively stable, and those of intertidal zone changed frequently due to wind wave, tidal current, and other factors. The airborne LiDAR data from four epochs indicate that in the autumn, siltation dominated in the beach, with an average siltation thickness of ~ 9 cm. Scouring and siltation within the intertidal zone exhibited distinct alternating patterns. The scouring depth and siltation thickness of the beach on the eastern side of the Hanhe River estuary were larger than those on the western side, and the estuary bar grew slightly in east-west direction, which narrowed the estuary mouth. Natural factors such as wind wave, tide, and river were the main dynamic factors shaping the beach and controlling the evolution of the beach. The seasonal evolution of the beach was affected by extreme weather, and the natural evolution of the beach was affected by human activities to some extents.

Key words: airborne LiDAR (light detection and ranging); RTK (real time kinematic); beach; dynamic monitoring; Jinshan Bay in Yantai City