

基于 UAV LiDAR 的海阳万米海岸沙丘形态演化

麻德明^{1,2}, 田梓文², 徐金燕^{1,3}, 王勇智², 林震^{1,3}

(1.福建省海岛资源生态监测与保护利用重点实验室, 福建 平潭 350400; 2.自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3.自然资源部海岛研究中心, 福建 平潭 350400)

摘要: 海岸沙丘记录了海岸带动力地貌系统的演变过程, 蕴含着丰富的气候变迁、海平面变化、环境演变等信息, 在全球变化研究中具有重要的指示作用。针对其受极端天气、海岸侵蚀以及人类活动等影响导致的动态变化, 提出利用 UAV LiDAR 技术, 对海阳市万米海岸沙丘形态变化进行三期全覆盖式面域监测, 研究表明: 2017 年 7 月与 2018 年 4 月两次监测间, 研究区海岸沙丘整体形态相对稳定, 部分岸段沙丘前滨出现侵蚀趋势; 2018 年 4 月与 10 月两次监测间, 海岸沙丘形态后滨基本保持不变, 超过 60% 前缘则出现了侵蚀现象。该研究有利于下一步对侵蚀岸滩区域整治修复提供精准靶标, 同时为海阳万米沙滩海洋自然保护区生态环保和海岸侵蚀防治以及环境演变提供技术支持和信息参考。

关键词: 海岸沙丘; UAV LiDAR; 动态变化; 侵蚀防治

中图分类号: P737.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2025)04-0622-08

Morphological evolution of ten thousand meters coastal dune in Haiyang based on UAV LiDAR

MA Deming^{1,2}, TIAN Ziwen², XU Jinyan^{1,3}, WANG Yongzhi², LIN Zhen^{1,3}

(1.Fujian Key Laboratory of Island Monitoring and Ecological Development, Pingtan 350400, China; 2.First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3.Islands Research Centre, Ministry of Natural Resources, Pingtan 350400, China)

Abstract: Coastal dunes record the evolution process of the dynamic geomorphological system in the coastal zone, containing rich information on climate change, sea level changes, environmental evolution, and so on. It plays an important indicative role in global change research. In response to the dynamic changes caused by extreme weather, coastal erosion, and human activities, we propose to use UAV LiDAR technology to conduct a three-stage full coverage surface monitoring of the morphological changes of the ten thousand meter coastal dunes in Haiyang. The research results indicate that from July 2017 to April 2018, the overall morphology of the coastal sand dunes in the study area was relatively stable, and there was a slight erosion trend in some sections of the sand dunes on the front shore. From April 2018 to October 2018, the morphology of coastal dunes remained largely unchanged on the backside, while slight erosion occurred at the front edge of the sand dunes. This study is beneficial for providing precise targets for the remediation and restoration of eroded beach areas in the next step, and can also provide technical support and information reference for the ecological protection, coastal erosion prevention and control, and environmental evolution of the Haiyang Ten Thousand Meters Beach Marine Nature Reserve.

收稿日期: 2024-07-17, 修订日期: 2025-01-05

基金项目: 福建省海岛资源生态监测与保护利用重点实验室开放基金(2023ZD08); 山东省自然科学基金(ZR2023MD080); 海洋公益性行业科研专项(201405028); 海洋行业标准(201810011-T)

作者简介: 麻德明(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为海岸带环境演变与遥感应用, E-mail: demingma@fio.org.cn

Key words: coastal sand dunes; unmanned aerial vehicle-Light detecting and ranging; dynamic changes; erosion prevention and control

海岸沙丘位于海陆交界带,是一种独特的海岸地貌类型,蕴含着丰富的气候变迁、海平面变化、环境演变等信息,在全球变化研究中具有重要的指示意义^[1]。它的形成发育与演化是数千年来陆地、海洋和大气环境相互耦合作用的产物^[1-3],作为一种宝贵的自然资源,在保持生物多样性和维持生态系统平衡等方面起着重要的作用,并且对区域环境变化相对比较敏感,也是较为薄弱的地区,极易遭受极端天气、海岸侵蚀等的影响^[4-5],其三维动态变化探测、定量表达与演变分析一直是沙丘科学研究的热点和难点^[6-7],系统解析海岸沙丘动态变化过程及原因,可为当地的旅游资源和自然保护区生态环境保护 and 海岸风沙危害防治提供必要的技术支持和科学依据,同时对于研究海岸带地貌演化,科学、统筹、合理、有序利用海岸带资源具有重要的理论和实践意义。

受海-陆-气的耦合影响,海岸沙丘一直处于一个动态变化的过程,对其移动与形态变化的观测是研究其发育与演化的基本手段之一。目前,传统大地测量、高精度 GNSS 以及 RS 与 GIS 融合技术等方法,被广泛应用于欧洲波罗的海^[8]、英国^[9]、法国^[1]、北美^[10]、南美^[11]、韩国^[12]、澳大利亚^[13]、地中海^[14] 和我国^[15-17] 的不同类型海岸沙丘的移动及形态变化观测。其中,GNSS 作为一种高精度、低成本、快速的测量方法,被广泛应用于航空、环境、交通、海洋测量、地质灾害监测等各个领域,已成为监测海岸沙丘变化的主要技术手段^[18-19]。但该技术主要是通过剖面测量进行监测,不能实现对海岸沙丘的全覆盖式面域测量。随着测绘新技术的进步,国内外学者开始利用无人机遥感(UAV RS)^[20]、三维激光雷达(LiDAR)^[21-22] 等先进技术开展海岸带环境演变监测,以弥补传统监测手段精度不高、工作效率低等缺陷。而搭载于 UAV 平台的三维激光雷达(UAV LiDAR)技术以其快速、大范围、连续覆盖获取高精度三维地形的独特优势,已广泛应用于地形测绘、地质灾害识别、林业监测、海岸带

动态监管以及实景三维构建等各个领域^[23-26]。基于此,本文借助 UAV LiDAR 技术,以海阳万米海滩为例,通过对海岸沙丘进行多期全覆盖式周期监测,获取研究区域高精度 DEM,以期全面掌握海岸线自然形态、岸滩冲淤或侵蚀情况,为海岸沙丘生态环境保护与整治修复等提供技术支撑和决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海阳市位于胶东半岛南岸,位于 120°50'E—121°29'E, 36°16'N—37°10'E, 濒临黄海,其沿海往东北至乳山口,西南近岸延伸至丁字湾口,素有“东方夏威夷”之称,海阳市东西绵延近 30 km 的砂质海岸^[27],以沙细、坡缓、浪稳、水清而著称,有“万米海滩”的美誉,是重要的旅游资源,于 2011 年批准建立海阳万米海滩海洋特别保护区。

研究区春季常浪向为 SSE 向,秋季强浪向为 SSW 向,平均波高 0.5~0.8 m,属于正规半日潮,平均潮差 2.39 m,具有较强的往复流特征,主流向为偏 W-E^[17, 28-29]。附近海域沉积物粒径沿沙滩向海逐渐变细,沿岸有东村河和纪疃河两条河流入海,并在洪水期携带泥沙输运入海,输运趋势由 NE 往 SW,监测期内流量较小或断流状态,基本无泥沙输运。

然而,随着城市化进程和滨海旅游活动开发以及沿海养殖业的发展,海岸沙丘存在沙丘侵蚀、滩面下蚀的潜在灾害风险^[17, 28] 和人类活动造成形态变化现象,严重制约沿海生态旅游发展和破坏海岸景观自然风貌。为此我们对沿岸沙丘典型区域开展了多期 UAV LiDAR 监测,研究范围是沿着海岸线从纪疃河口向东到羊角畔,以期摸清海阳市沙丘变化及侵蚀特征,解析其演变原因,为海滩侵蚀评估与防护对策制定提供基础数据支撑。

1.2 数据源与研究方法

UAV LiDAR 是一种搭载于无人机平台的主

动式遥测新技术,通过向目标发射和接收激光测距信号来解算地物单元的精细结构信息,系统集成激光测距仪、导航定位系统、惯性测量单元和成像装置,可快速获取高精度地表三维坐标信息,进而高效生成高分辨率 DEM 产品,通过研究目标区域多期 DEM 产品叠加差值分析,从而可进一步反演地表形态变化趋势,并解析其演化原因及驱动因素。

本研究的 UAV LiDAR 海岸沙丘运移监测系统是基于 DJIM600 PRO 无人机平台,搭载 Velodyne VLP-16 和 Trimble APX-15 POS 系统,分别于 2017 年 7 月、2018 年 4 月和 2018 年 10 月开展了三次重复监测,UAV LiDAR 系统详细海岸沙丘监测流程如图 1 所示。鉴于 UAV LiDAR 获取的百万量级点云大数据,在确保点云密度分布不影响监测精度的条件下,为提高计算效率而快速获得监测结果,本研究在对 UAV LiDAR 获取的毗邻航带点云数据通过拼接、滤波和噪声剔除处理后,通过设置阈值遍历搜索进行点云抽稀,并根据研究区现场地物类型,实现点云分类,最后借助不规则三角网构建整个监测岸段沙丘 TIN 模型,再利用自然邻域插值法生成监测区域海岸沙丘 DEM 成果。

(1) 无人机飞行高度设为 60 m,沿海岸沙丘走向布设测线,根据相关规范,设定相邻测线之间的重叠度约 30%,以保证获取足够的点云密度,确保对研究区的全覆盖监测。

(2) 进行 UAV LiDAR 监测时,在测区内同步布设 GNSS 地面基准站,通过 UAV LiDAR GNSS 数据与 GNSS 地面基准站数据联合差分后处理解算,确定 UAV LiDAR 监测航迹,然后与 UAV LiDAR POS 数据耦合解译,获取监测时刻 UAV LiDAR 的姿态和位置数据,再结合激光雷达角度及测距等参数信息,得到海岸沙丘各测点三维坐标,最后经过地理校正后,生成海岸沙丘监测区域高精度点云数据。

(3) 航带拼接与数据去重。对不同条带点云进行拼接,去除航带间重叠点云,以避免拼接后点云数据的不均匀分布。

(4) 点云去噪。根据获取的海岸沙丘 UAV LiDAR 点云数据空间分布特征与规律,本研究

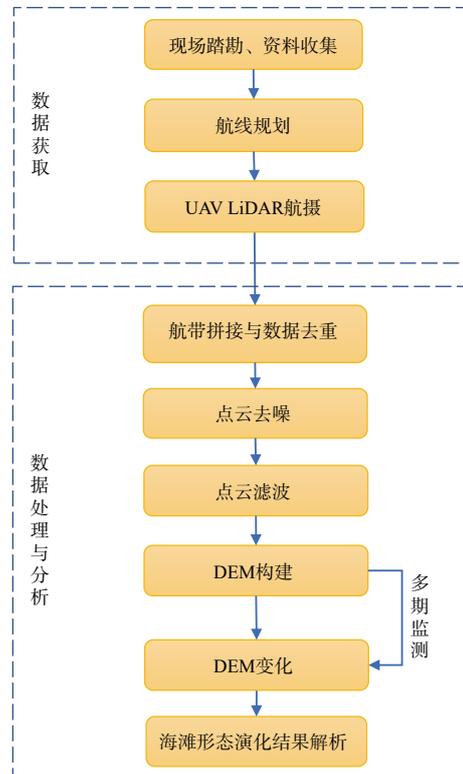


图 1 UAV LiDAR 监测流程

Fig. 1 UAV LiDAR monitoring process

采用 SOR 离群点去噪算法^[30],剔除不合理观测值范围内的 UAV LiDAR 点云回波数据。

(5) 点云滤波算法。通过设置规则格网进行组织和划分离散的海岸沙丘监测区点云数据,结合海岸沙丘区域 LiDAR 点云数据特征,基于坡度滤波算法原理^[31],利用规则格网内的坡度信息和高程阈值,参考滩涂 LiDAR 点云数据的改进坡度滤波方法进行处理^[32]。

(6) DEM 构建。利用经去噪和滤波处理后的点云数据,通过自然邻域插值法,构建海岸沙丘区域 DEM。

(7) 海岸沙丘 DEM 变化。基于生成不同时期的 DEM,利用 ArcGIS 的求差值运算,获取两期间隔时间段内的海岸沙丘变化。

2 结果与讨论

分别于 2017 年 7 月、2018 年 4 月和 2018 年 10 月对研究区海岸沙丘进行了 UAV LiDAR 三次周期监测,获取了三期海岸沙丘的点云数据结果,如图 2 所示。

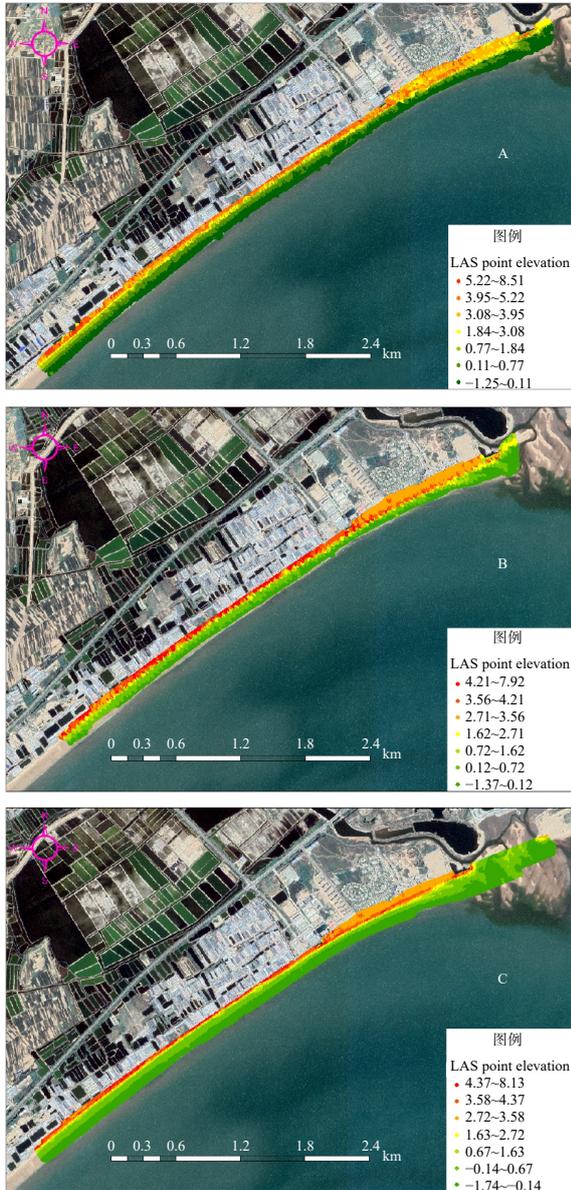


图 2 2017—2018 年三期海岸沙丘 UAV LiDAR 监测岸段点云数据

Fig. 2 Three phases of coastal dune UAV LiDAR monitoring point cloud data from 2017 to 2018

2.1 UAV LiDAR 监测精度评估

为评估 UAV LiDAR 航摄系统的可靠性, 检验测量精度是否满足监测需求, 通过比对 UAV LiDAR 监测和 GNSS RTK 地形测量同一岸滩剖面高程进行精度验证。由图 3 可以看出, UAV LiDAR 提取岸滩断面高程和 GNSS RTK 剖面测量点吻合较好, 变化趋势基本一致, 海岸沙丘岸滩剖面高程差值平均 4 cm, 零星有集中超过 10 cm 的跳点, 根据现场观测, 源于该岸段有部分积水,

激光不能穿透导致精度受损。因此, 总体来讲 UAV LiDAR 航摄系统测量精度可满足海岸沙丘运移监测的需求, 能够进行推广应用。

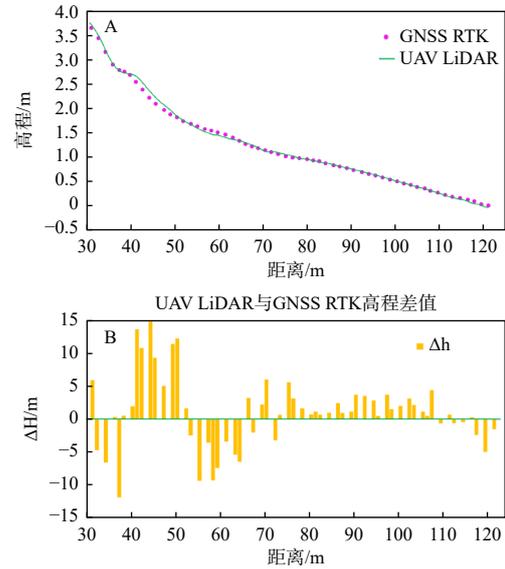


图 3 海岸沙丘岸滩剖面精度比对

Fig. 3 Comparison of accuracy of coastal dune beach profiles

2.2 海岸沙丘面域形态变化

为获取三期监测期间海岸沙丘的形态变化情况, 把三期 DEM 统一到同一坐标系下, 并按同一范围进行裁剪(图 4), 在一年多的时间内得到的三期海岸沙丘 DEM 成果, 不难发现总体上 DEM 变化较小, 仅个别区域发生了沙丘形态移动。为进一步识别三期 DEM 的精细变化及其空间分布, 我们以前一期 DEM 成果为基准, 进行差值计算, 分别得到 2017 年 7 月至 2018 年 4 月和 2018 年 4 月至 2018 年 10 月的海岸沙丘变化结果, 如图 5 所示。根据 DEM 差值结果, 基于沙丘变化趋势总体的一致性, 把 2017 年 7 月至 2018 年 4 月(图 5A)划分为 I、II、III、IV、V 五个区域, 而 2018 年 4 月至 2018 年 10 月(图 5B)划分为①、②、③三个区域。根据国标《海岸侵蚀监测与灾害损失评估技术规范》(GB/T 42435—2023)中海岸侵蚀灾害强度等级分级结果标准, 从图 5A 中我们发现, 海岸沙丘形态总体相对比较稳定, 变化较大的沙丘主要集中在 V 号东村河口区域, 主要原因是洪水期河流携带泥沙入海, 同时在河口向海进行运输。海岸沙丘前缘

约 30% 的岸段出现了海岸侵蚀迹象,主要集中在 II 号和 IV 区域,这可能是养殖区的人类活动或者夏季旅游旺季游客的行为所致。总体来看,监测期内海岸沙丘整体相对稳定,部分沙丘前滨存在一定的侵蚀趋势。如图 5B 所示,海岸沙丘形态后滨基本保持不变,超过 60% 的沙丘前缘出现了不同程度的海岸侵蚀现象,局部沙丘前缘处于强侵蚀状态,而变化相对比较大的区域同样集中在③号河口区。

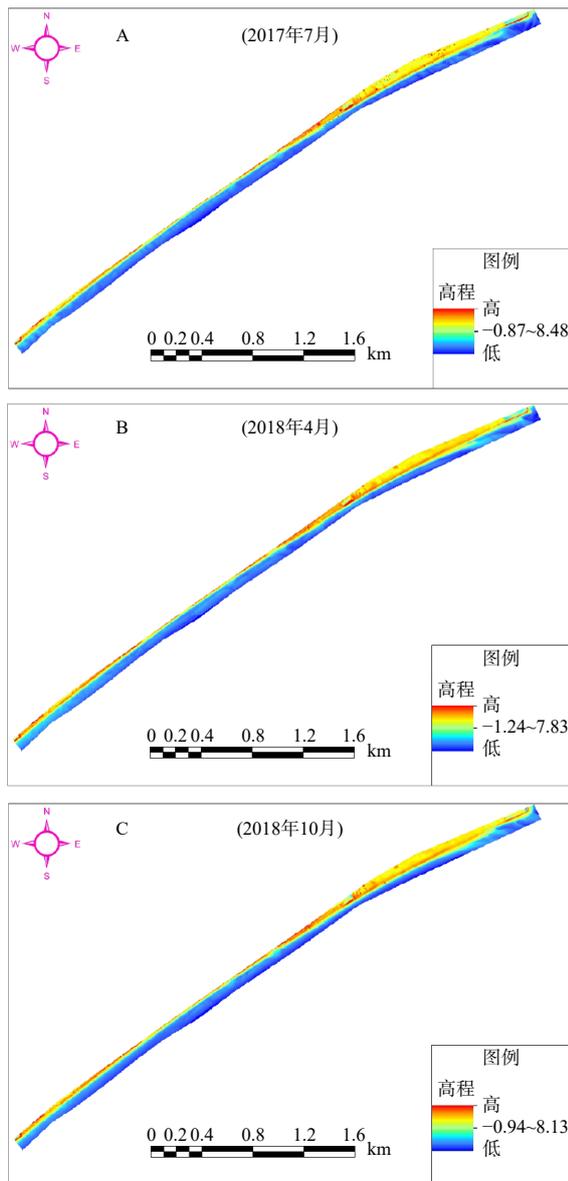


图 4 2017—2018 年三期海岸沙丘 UAV LiDAR 监测岸段 DEM

Fig. 4 Three phases of coastal dune UAV LiDAR monitoring DEM from 2017 to 2018

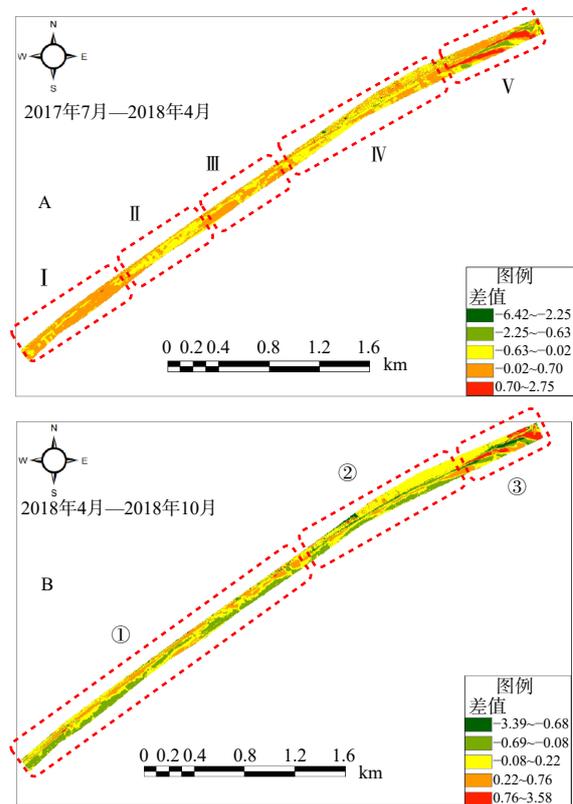


图 5 2017—2018 年三期海岸沙丘 UAV LiDAR 监测岸段 DEM 差值

Fig. 5 Difference in DEM values of coastal dunes monitored by UAV LiDAR in the third phase of 2017—2018

自然资源部发布的《2023 年中国海平面公报》显示,从 1980 年到 2023 年,中国沿海海平面上升速度为 3.5 mm/a。与此同时根据文献研究区位于山东半岛,地壳缓慢抬升速率为 1~4 mm/a^[33],因此海平面上升导致海岸沙丘出现侵蚀现象的影响微乎其微。根据附近气象站 2017 年 7 月—2018 年 10 月降雨监测情况,其间气候干燥,比常年降雨量偏少,导致东村河和纪疃河携带泥沙入海量大大降低。此外,随着城市化进程加速,近 20 年来海岸沙丘区域入海河流流域上游由于建设用地急剧增加,有效的水土保持措施导致土壤流失量减少,河流携带冲刷土壤入海量呈现逐年减少趋势^[27],未能及时为海岸沙丘补充陆域河流入海输沙,输沙量的减少打破了区域输沙量与海水冲刷的动态平衡体系,为海岸侵蚀提供了必要条件和可能性。

研究区海岸沙丘开敞而平直,沙丘走向与迎

面波浪的常浪向基本保持垂直,在潮汐作用下,波浪由外海向近岸直接冲刷着海岸沙丘的前滨,波浪传播到近岸破波带破碎后,形成了强烈的海岸侵蚀力,为海岸沙丘侵蚀提供了必要的动力条件。在海岸沙丘东村河口处向海前方离岸约 1.3 km,于 2016 年建成人工岛(连理岛)后,波浪在传播过程中遇到岛屿后,阻挡了大部分的 SSE 向波浪和一部分的 SSW 向波浪,在连理岛后方形成波浪无法到达的波影区,且波浪经由连理岛障碍时会发生绕射,破坏了原有的水动力环境,打破了原先岛屿后方海滩动态稳定,导致近岸泥沙输移失衡稳定,从而会重塑海岸地貌,产生了海岸沙丘新形态。已有的研究结果显示^[17],东村河口处西侧输沙量东向略有增加,体现在 5A 图中 V 号西端海岸沙丘前缘稍有淤积,而 2018 年度由于降雨量的减少,河流携带泥沙入海量减少,连理岛建成导致东村河口西侧输沙量的增加不足以维持沙丘形态的稳定与平衡,导致在图 5B③号区域西端前缘出现了侵蚀的现象;除此以外,海岸沙丘形态的变化也可能是养殖区的人类不合理活动或者夏季旅游旺季游客的行为所致,破坏了海滩原有的形态。

本研究主要基于 LiDAR 技术视角对海岸沙丘形态变化进行全覆盖式面域监测,分别于 2017 年夏季、2018 年春季和秋季三个不同季节进行了观测,结果反映了监测期间内的海岸沙丘变化情况,在 2017 年 7 月至 2018 年 4 月这段时间内,虽然连理岛的建成造成了东村河口西侧处输沙量略有增加,但降雨减少这一自然因素导致入海泥沙量减少,打破了原有的海岸沙丘输运平衡,加之该期间人类活动的影响低于 2018 年 4 月至 2018 年 10 月,故海岸沙丘的变化总体上要小于后者,图 5B 监测期间海岸沙丘前缘的海岸侵蚀范围也明显高于图 5A 监测期间,图 5B 监测期间基本属于旅游旺季,人类活动比较频繁,对海岸沙丘的形态演化影响较大。鉴于海岸沙丘受自然环境变化和区域人类活动的耦合作用影响,是一个相对缓慢且复杂的演变过程,囿于单一数据来源以及观测频次较低和时间序列较短等,因此,更深层次的演化规律需采用多

源立体监测技术,并进行长时间序列信息提取,以期获得岸线、海岸沙丘相关要素的演化信息并进行科学评估,以避免监测结果的随机性。

2.3 海岸沙丘典型剖面演化

为进一步量化与分析研究区海岸沙丘形态演化,本研究垂直于海岸走向选定 4 条剖面进行剖析,如图 6 所示。P1 剖面位于河口区,P2 剖面背靠建设区与养殖区之间,P1 和 P2 剖面正前方有连理岛阻挡;P3 和 P4 剖面后面均为养殖区,属于海岸沙丘开敞区域。在获取的 2017—2018 年时间间隔内高分辨率 DEM 差值图基础上,通过选定的 4 条典型剖面切割,生成 2017—2018 年海岸沙丘 P1~P4 剖面时序变化图(图 7)。



图 6 海岸沙丘典型剖面

Fig. 6 Typical profile of coastal dunes

由图 7 可以看出,P1 剖面 30 m 之前处于稳定状态,30 m 至 100 m,先减少后增大,总体变化较大,主要原因是位于河口区,河流携带泥沙入海,导致该区域沙丘形态变化较大,100 m 之后又趋于稳定;P2 剖面在 70 m 以内处于稳定状态,70 m 至 100 m 呈现上升趋势,100 m 至 120 m 处于侵蚀状态,120 m 以后逐渐趋于稳定;P3 剖面在 15 m 以内出现上升状态,监测期间发现游客在此区域游玩,特别是旅游旺季游客繁多,游客的亲沙活动扰动破坏了沙丘原有的形态,15 m 以后呈现稳定趋势;P4 剖面 50 m 以内出现沙丘下降,此处背靠人工养殖区,根据前期调研走访,了解到存在养殖人为采砂行为^[17],可能是养殖池取砂建设导致沙丘出现降低状态,50 m 以后逐渐趋于平稳状态。

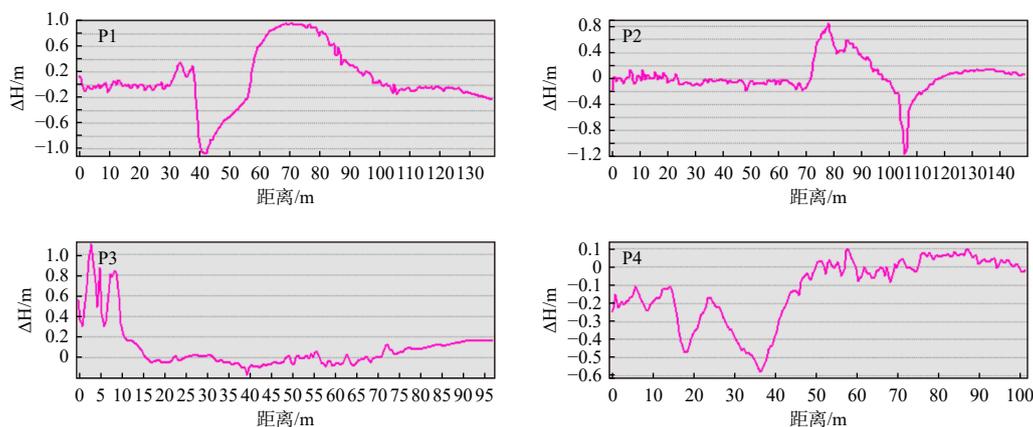


图7 典型剖面时序变化曲线

Fig. 7 Typical profile time variation curve

3 结论

(1)本研究基于 UAV LiDAR 对海岸沙丘形态变化进行了全覆盖监测,高效获取了高精度激光点云数据,生成了 DEM,并进行了精度验证,监测结果更加形象直观,能够满足海岸沙丘形态变化的精度需要,这是 UAV LiDAR 技术在海岸沙丘运移监测中应用的成功尝试,进一步丰富了海岸沙丘形态演变监测技术体系,为 UAV LiDAR 技术在海岸带环境动态监测的应用推广提供了实践路径。

(2)随着 UAV 平台的低成本和 LiDAR 的轻量化,该技术具有巨大的发展前景和应用空间,它的机动灵活、快速高精度在海岸带地形测绘和应急测绘方面具有无与伦比的优势,也是今后发展的重要方向。

(3)河流入海泥沙量运输的减少、连理岛建成后对海岸水动力环境的影响和人类活动的共同作用,造成了海岸沙丘形态的演化。研究成果有利于下一步为侵蚀岸滩整治修复提供精准靶标,可为海阳万米沙滩海洋自然保护区生态环保和海岸侵蚀防治以及环境演变提供技术支持和信息参考。

参考文献:

- [1] VAN VLIET-LANOË B, GOSLIN J, HÉNAFF A, et al. Holocene formation and evolution of coastal dunes ridges, Brittany (France)[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2016, 348(6): 462-470.
- [2] LEVIN N, JABLON P E, PHINN S, et al. Coastal dune activity and foredune formation on Moreton Island, Australia, 1944-2015[J]. *Aeolian Research*, 2017, 25: 107-121.
- [3] BRODIE K, CONERY I, COHN N, et al. Spatial variability of coastal foredune evolution, Part a: timescales of months to years[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(5): 124.
- [4] MOUNTNEY N P, RUSSELL A J. Coastal Aeolian dune development, Sólheimasandur, southern Iceland[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 192(3/4): 167-181.
- [5] VESPREMEANU-STROE A, PREOTEASA L. Beach-dune interactions on the dry-temperate Danube delta coast[J]. *Geomorphology*, 2007, 86(3/4): 267-282.
- [6] LABUZ T A. A review of field methods to survey coastal dunes-experience based on research from South Baltic coast[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2016, 20(2): 175-190.
- [7] PALALANE J, LARSON M. A long-term coastal evolution model with longshore and cross-shore transport[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 36(2): 411-423.
- [8] LABUZ T A, GRUNEWALD R, BOBYKINA V, et al. Coastal dunes of the Baltic Sea shores: a review[J]. *Quaestiones Geographicae*, 2018, 37(1): 47-71.
- [9] BAILEY S D, BRISTOW C S. Migration of parabolic dunes at Aberffraw, Anglesey, North Wales[J]. *Geomorphology*, 2004, 59(1/2/3/4): 165-174.
- [10] KILIBARDA Z, SHILLINGLAW C. A 70 year history of coastal dune migration and beach erosion along the southern shore of lake Michigan[J]. *Aeolian Research*, 2015, 17: 263-273.
- [11] HESP P, DE CASTILHOS J A, DA SILVA G M, et al. Regional wind fields and dunefield migration, southern Brazil[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(4): 561-573.
- [12] RHEW H S, YU K B. Pattern of Aeolian sand transport and

- morphological change in the foredune ridge, Shindu dunefield, Korea: a case study during the winter, December 2000 to March 2001[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(4): 1015-1024.
- [13] LEVIN N. Climate-driven changes in tropical cyclone intensity shape dune activity on Earth's largest sand island[J]. *Geomorphology*, 2011, 125(1): 239-252.
- [14] BAÑÓN L, PAGÁN J I, LÓPEZ I, et al. Validating UAS-based photogrammetry with traditional topographic methods for surveying dune ecosystems in the Spanish Mediterranean coast[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(9): 297.
- [15] 董玉祥, 张青年, 黄德全. 海岸风蚀地貌研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(1): 1-10.
- [16] MA D M, LIU Y X, LI Z H, et al. Recognition of the coastal dune migration micro-deformation in Changli gold coast of China based on GB-InSAR[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(6): 747-755.
- [17] 王勇智, 田梓文, 李霞, 等. 海阳市典型砂质海岸侵蚀机制与防护对策研究[J]. *海洋科学*, 2021, 45(12): 18-30.
- [18] ELBELRHITI H, CLAUDIN P, ANDREOTTI B. Field evidence for surface-wave-induced instability of sand dunes[J]. *Nature*, 2005, 437(7059): 720-723.
- [19] HARLEY M D, TURNER I L, SHORT A D, et al. Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring[J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(2): 194-205.
- [20] CHOI S K, KIM G H, CHOI J W, et al. UAV-based land cover mapping technique for monitoring coastal sand dunes[J]. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 2017, 35(1): 11-22.
- [21] CRAPOULET A, HÉQUETTE A, LEVOY F, et al. Using LiDAR topographic data for identifying coastal areas of northern France vulnerable to sea-level rise[J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 75(Suppl 1): 1067-1071.
- [22] SCHMELZ W J, PSUTY N P. Quantification of airborne lidar accuracy in coastal dunes (Fire island, New York)[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2019, 85(2): 133-144.
- [23] 高兴国, 田梓文, 麻德明, 等. 无人机 LiDAR 系统在砂质海岸监测中的应用[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(3): 468-472.
- [24] SHIDIQ I P A, WIBOWO A, KUSRATMOKO E, et al. Urban forest topographical mapping using UAV LIDAR[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 98: 012034.
- [25] 贾虎军, 王立娟, 范冬丽. 无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(2): 60-65.
- [26] 朱绪鹤, 罗宁馨, 王君毅. 基于倾斜影像和机载 LiDAR 点云的城市级实景三维模型生产技术[J]. *测绘通报*, 2024(2): 144-147.
- [27] 麻德明, 王勇智, 赵鸣, 等. 环海阳万米沙滩河流域土壤侵蚀量估算及演变[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(Suppl 2): 88-97.
- [28] 岳娜娜. 离岸人工岛对沙质海岸的影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [29] 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.
- [30] RUSU R B, BLODOW N, MARTON Z, et al. Towards 3D object maps for autonomous household robots[C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2007: 3191-3198.
- [31] 李峰, 崔希民, 袁德宝, 等. 改进坡度的 LiDAR 点云形态学滤波算法[J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(5): 128-132.
- [32] 冯晓珂, 吕沛娴, 张卡, 等. 面向滩涂 DEM 构建的机载 LiDAR 点云滤波方法[J]. *测绘通报*, 2023(7): 58-62.
- [33] 张绪良. 山东省海洋灾害及防治研究[J]. *海洋通报*, 2004, 23(3): 66-72.

(本文编辑: 曲丽梅)