

无人机低空遥感技术在海岸带地质环境监测中的应用 ——以海南岛崖州湾为例

沈爱斯^{1,2}, 朱 钰^{2,3}, 秦 菡², 李华彦², 陈 文²,
王 莹², 韩宗珠¹, 付 标^{2,3}

(1.中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2.海南省海洋地质调查院, 海南 海口 570206;
3.海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南 海口 570206)

摘 要:海南岛崖州湾作为我国重要的南端通商口岸,近年来在海洋科技与产业方面发展迅速。由于缺乏有效的监测手段和长期的监测资料,该区域海岸带地质环境现状及研究相对滞后,制约其海洋经济的可持续发展。本文通过多期/次无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 低空航测遥感影像提取的地质环境要素,构建了海岸带数字正射影像和地表高程模型,对海岸带侵蚀淤积进行动态分析,并评价其稳定性。研究表明:人工补砂工程实施前,崖州湾大部分海岸带处于侵蚀状态。补砂修复一年后,受防浪堤工程影响,北部岸段持续侵蚀,而中部岸段侵蚀淤积趋于动态平衡,南部南山港邻近区域则呈现显著淤积。科学合理地结合多种修复方式,可提升砂质岸线的稳定性和功能性。

关键词:无人机; 低空遥感; 海岸带

中图分类号:X87

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2025)04-0581-07

Application of low-altitude remote sensing technology in coastal geological environment monitoring: a case study of Yazhou bay in Hainan Island

SHEN Aisi^{1,2}, ZHU Yu^{2,3}, QIN Han², LI Huayan², CHEN Wen², WANG Ying²,
HAN Zongzhu¹, FU Biao^{2,3}

(1.College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2.Marine Geological Survey of Hainan Province, Haikou 570206, China; 3.Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou 570206, China)

Abstract: As an important southern trading port in China, Yazhou Bay on Hainan Island has developed rapidly in marine technology and industry in recent years. Due to the lack of effective monitoring means and long-term monitoring data, the status and research of the coastal geological environment in this region are relatively backward, which restricts the sustainable development of its marine economy. In this paper, based on the geological environment elements extracted from the low altitude aerial remote sensing images of multiple unmanned aerial vehicles (UAV), the Digital Orthophoto Image and surface elevation model of the coastal zone are constructed, the dynamic analysis of coastal erosion and deposition is carried out, and its stability is

收稿日期:2024-08-13, 修订日期:2025-01-24

基金项目:海南省自然科学基金青年基金项目(421QN369); 海南省自然科学基金青年基金项目(423QN322); 海南省海洋地质资源与环境重点实验室开放基金项目(22-HNHYDZZYHJKFO28)

作者简介:沈爱斯(1983—), 女, 海南海口人, 高级工程师, 研究方向为海洋测绘和海洋地质, E-mail: 79008690@qq.com

通信作者:李华彦(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为地理信息系统, E-mail: 66929332@qq.com

陈 文(1988—), 男, 工程师, 研究方向为海洋测绘和海洋地质, E-mail: 909568315@qq.com

evaluated. The research shows that most of the coastal zone of Yazhou Bay is in an erosive state before the implementation of the artificial sand filling project. After one year of sand filling and repair, affected by the Breakwater Project, the erosion and deposition in the northern section continued to erode, while the erosion and deposition in the central section tended to be in dynamic balance, and the adjacent area of Nanshan port in the South showed significant deposition. Scientific and reasonable combination of various restoration methods can improve the stability and functionality of sandy shoreline.

Key words: UAV; low-altitude remote sensing; coastal zone

海岸带是海洋和陆地相互作用的地带,是大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互影响、密切联系的地带^[1-2]。海岸带地理位置特殊,战略地位和生态价值突出,是沿海地区社会经济发展的重要载体和依托。近年来,海岸带社会经济的迅猛发展使人口快速向海岸带聚集,生态系统面临巨大压力,海洋环境问题日益突出。开展海岸带监测工作,可为海岸带区域的开发、保护、治理提供基础数据和技术支撑,对海岸带科学管理起到重要的作用^[3]。

海岸带侵蚀淤积动态监测是获取海岸带地质环境演变的重要手段。目前,海岸带侵蚀淤积动态监测主要采用人工实地监测和卫星遥感技术。实时动态测量(real time kinematic, RTK)技术是现有人工实地岸滩剖面监测方法中较常用且具有高精度的方法^[4],它能够实时快速地获得测量点的三维定位坐标值^[5],但需外业人员到达测量点进行人工实地操作。近年来,国内外学者利用卫星遥感手段对海岸线时空变迁研究开展了大量的工作^[6-7]。卫星遥感技术具有覆盖面广、空间和时间尺度多样、光谱信息丰富等优势^[8]。但卫星数据解译时需要人工辅助修测^[9];在海岸带突发和灾难性事件中,获取随机时间和地点的卫星数据仍然困难^[10]。随着计算机视觉技术(structure from motion, SFM)的出现,无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)低空遥感技术得到了快速发展^[11-13],它可以在短时间内连续获取大面积的海岸带地表数据,具有时效高、成本低、精度高等优势^[14]。

海南省三亚市崖州湾地理单元东侧为南山角,西侧为鼻头岭,海蚀地貌发育,湾内有宁远河、盐灶河汇入。本研究以崖州湾多期/次无人机低空航测遥感影像为数据基础,提取地质环境要素,构建海岸带数字正射影像(Digital Orthophoto

Map, DOM)和数字表面模型(Digital Surface Model, DSM),对海岸带侵蚀淤积进行动态分析,评价海岸带的稳定性,以为海岸带修复、空间功能拓展、重点岸段规划开发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域位于海南省三亚市崖州湾的宁远河以东至南山港岸段(图1)。湾区水深为0~25 m,由岸向海逐渐变深,坡度较缓。研究区域地处热带,属热带海洋性季风气候区。研究海域潮汐属于混合的不正规日潮,以半日潮为主,平均潮差为0.80 m。波浪以偏S向浪为主,年均波高约为0.7 m,受热带气旋影响最大波高可达7 m,多出现于秋季^[15]。自2022年起,三亚市政府在这一区域启动了多期海岸线生态修复工程,包括海滩修复、绿化工程、步道系统的建设。截至2023年,海滩修复工程已基本完成。

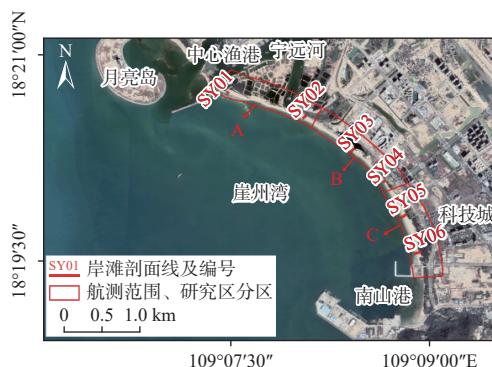


图1 研究区域

Fig. 1 The location of the research area

1.2 数据采集

研究采用2000国家大地坐标系(CGCS2000),1985国家高程基准。由于研究区域海岸线弯曲程度差异较大且可参照的地物特征较少,因此将

飞行参数设置为: 航向重叠度 80%, 旁向重叠度 70%, 飞行高度为 100 m, 飞行速度 7.5 m/s, 边距外控 50 m, 中央平均测光模式。在 2020 年 7 月、2021 年 5 月、2022 年 7 月、2023 年 7 月、2024 年 6 月, 研究人员选择天气晴朗、光照充足的退潮时段, 使用大疆精灵 4RTK 多旋翼无人机在研究区域进行 5 期航空摄影, 作业前 6 个月内三亚未遭受风暴潮影响。航测技术路线如图 2 所示。

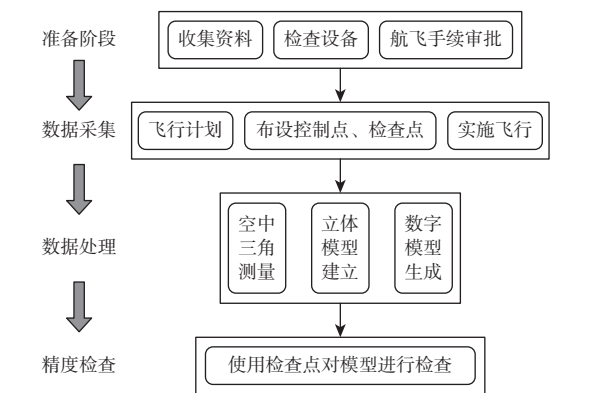


图2 航测技术路线

Fig. 2 Aerial survey technology roadmap

在实际测量过程中, 根据岸段形状、植被分布等情况进行控制点布设: 对于靠近道路的地区, 采用油漆喷涂均匀布设控制点; 对于不能明显区分周围地物的海岸带地区, 使用半径 0.15 m 的圆形标靶布设控制点。控制点做到大小适宜、易于辨认、不易遮挡, 同时能最大限度均匀控制测绘面积^[16]。5 期测量共布设控制点 146 个, 检查点 41 个, 均为平高点(图 3)。

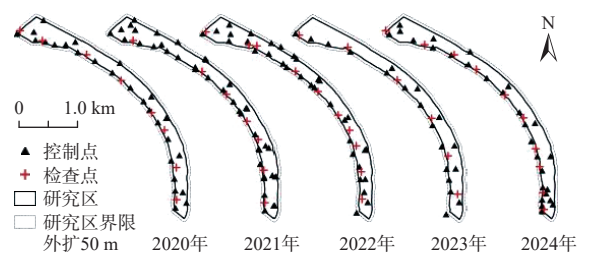


图3 控制点与检查点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ground control point and checkpoints

1.3 数据处理

航测数据处理主要包括空中三角测量、立体

模型建立和数字模型生成 3 个步骤。

基于光线束法的空中三角测量可以解算相片中各点的三维坐标^[17]。无人机数据、控制点文件, 经过影像特征点提取、同名点匹配等步骤实现空三测量。空三测量后需要人机交互进行控制点配准工作, 需进行多次全自动空三加密优化^[18-19], 直至空三测量的精度满足要求。

根据空三加密测量成果进行模型分块, 并在此基础上, 全自动提取测区密集点云, 以便进行点云分类、影像图制作、可视化及分析等; 然后, 生成不规则三角网, 同时利用镜头获取的纹理信息, 自动贴图, 得到测区三维网格模型。

在完成立体建模后, 自动生成可互操作的高精度 DOM、DSM 模型^[20]。5 期数据生成的 DOM、DSM 分辨率均优于 0.075 m。

1.4 研究方法

1.4.1 剖面布设

以 5 期 DSM 为基础, 沿垂直于岸线的方向, 均匀布设 6 条剖面线(图 1)。每条剖面线间隔设定为 500 m, 平均 1 m 提取一个点位坐标和高程, 地形变化显著区域增加点位密度。每条剖面的起点坐标及走向固定不变(表 1), 确保每期获取的数据之间具有可比性。

表 1 岸滩剖面的起点坐标及走向			
Tab.1 Starting point coordinates and the trend of beach profiles			
剖面名称	起点坐标		走向
YZ01	109°7' 28.154"E	18°20' 44.690"N	225°
YZ02	109°8' 2.951"E	18°20' 34.774"N	226°
YZ03	109°8' 24.822"E	18°20' 20.389"N	245°
YZ04	109°8' 38.978"E	18°20' 6.846"N	226°
YZ05	109°8' 48.993"E	18°19' 51.901"N	236°
YZ06	109°8' 55.971"E	18°19' 35.627"N	255°

1.4.2 岸滩侵蚀淤积速率

在专业地理信息软件中导入数字模型, 圈定模型中岸滩的区域, 将其作为计算范围。按照 1 m×1 m 的网格对计算范围进行划分, 提取其中心点的高程数据, 计算相邻年份同一网格中心点的高程变化值和岸滩侵蚀淤积速度, 采用克里金插值绘制岸滩侵蚀淤积速率图。岸滩侵蚀淤积

速率公式如下:

$$V = \frac{(h_j - h_i)\Delta S}{t_j - t_i} \times 100\% \tag{1}$$

式中: V 代表岸滩侵蚀淤积速率(正值为岸滩淤积速率, 负值为岸滩侵蚀速率); t_i 代表地形高程计算开始时间; t_j 代表地形高程计算终止时间; h_i 代表 t_i 时的地形高程; h_j 代表 t_j 时的地形高程; ΔS 代表一个网格的面积(本研究中一个网格面积等于 1 m^2)。

2 结果与讨论

2.1 精度评价

本研究采用检查点来检验数据精度。航测开始前, 在研究区域布设检查点, 并采集其平面坐标及高程数据, 检查点不参与航测数据的处理过程。通过比较检查点的测量值和数字模型上同名像点的成果值, 计算其测量中误差。

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}} \tag{2}$$

式中: σ 代表测量中误差; n 代表检查点总数; Δ_i 代表第 i 个点测量值与成果值的差值。中误差是一个重要的测量精度指标。中误差越小, 表明测量的准确性越高。检查点的平面位置中误差最高为 0.074 m , 高程中误差最高为 0.063 m ; 整体平面中误差为 0.058 m , 高程中误差为 0.041 m (详见表 2, σ_j 代表检查点 j 方向上的

中误差)。

表 2 检查点的平面位置与高程中误差

Tab.2 Root mean square error of the plane position and elevation of the checkpoint

年份	σ_x/m	σ_y/m	σ_{xy}/m	σ_z/m
2020年	0.016	0.008	0.018	0.026
2021年	0.042	0.044	0.061	0.040
2022年	0.014	0.024	0.028	0.016
2023年	0.039	0.042	0.057	0.019
2024年	0.047	0.058	0.074	0.063
整体 σ	0.039	0.044	0.058	0.041

采用检查点的测量值与模型上同名像点的成果值绘制拟合图, 结果显示两者呈线性相关关系。以检查点的高程为例(表 3), 测量值与成果值存在严格的线性相关关系(图 4), R^2 达到 0.9987 。检查点的中误差和拟合图的分析结果表明测量精度较高, 满足《1 : 500 1 : 1000 1 : 2000 外业数字测图规程》(GB/T 14912—2017)的要求。

2.2 剖面形态变化

YZ01 剖面(图 5)位于中心渔港防浪堤东侧的航道口处。该剖面地形变化较强烈, 表现为滩面向岸整体后移。以滩面平均高潮线处计算, 2020—2024 年, 每年滩面向岸侵蚀分别为 2.88 m 、 13.65 m 、 0.21 m 、 8.78 m , 历年垂向侵蚀厚度分别

表 3 检查点高程汇总表

Tab.3 Checkpoint elevation summary table

检查点编号	高程测量值/m	高程成果值/m	差值/m	检查点编号	高程测量值/m	高程成果值/m	差值/m
20-1	2.633	2.638	0.005	22-7	4.719	4.715	-0.004
20-2	2.127	2.122	-0.006	22-8	2.403	2.385	-0.018
20-3	2.626	2.625	-0.001	22-9	2.649	2.623	-0.026
20-4	2.485	2.489	0.004	22-10	3.037	3.015	-0.022
20-5	2.536	2.532	-0.004	23-1	2.225	2.215	-0.011
20-6	4.326	4.317	-0.009	23-2	2.683	2.708	0.025
20-7	0.999	1.004	0.006	23-3	2.855	2.874	0.019
20-8	2.947	3.018	0.071	23-4	3.217	3.237	0.020
21-1	1.446	1.391	-0.055	23-5	3.185	3.207	0.022
21-2	3.243	3.271	0.028	23-6	6.686	6.703	0.017
21-3	1.957	1.923	-0.034	24-1	2.020	2.030	0.010
21-4	2.565	2.604	0.039	24-2	3.953	3.919	-0.035

续表

检查点编号	高程测量值/m	高程成果值/m	差值/m	检查点编号	高程测量值/m	高程成果值/m	差值/m
21-5	2.632	2.674	0.042	24-3	2.967	2.827	-0.140
21-6	4.541	4.581	0.040	24-4	3.125	3.129	0.004
21-7	1.030	1.068	0.039	24-5	2.391	2.349	-0.042
22-1	3.929	3.914	-0.016	24-6	2.893	3.010	0.117
22-2	4.688	4.676	-0.013	24-7	3.438	3.453	0.015
22-3	2.841	2.844	0.003	24-8	2.572	2.621	0.049
22-4	2.253	2.250	-0.003	24-9	1.604	1.633	0.029
22-5	1.468	1.440	-0.028	24-10	4.702	4.713	0.011
22-6	2.521	2.518	-0.003				

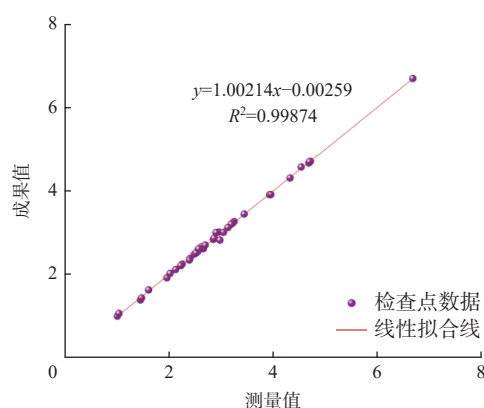


图 4 测量值与成果值线性拟合

Fig. 4 Linear fitting graph of measured values and result values

为 0.33 m、1.99 m、0.10 m、0.98 m。YZ01 剖面岸线侵蚀的主要原因是防浪堤的阻浪作用导致水流沿堤向岸冲刷, 波浪作用加强, 造成了泥砂的扰动, 岸滩受到强烈侵蚀, 同时防浪堤也阻断

了宁远河向东侧的输砂。

YZ02 剖面(图 5)后滨宽阔, 植被发育茂密, 滩肩宽度约为 22 ~ 38 m, 前期呈现淤积状态, 补砂后滩脊线明显向海前进, 后期剖面变化不大, 呈平衡状态。2020—2021 年滩面在平均高潮位处向海前进约 10.49 m, 垂向淤积厚度约为 1.20 m, 滩肩脊向海前进约 9.05 m; 2022 年在人为补砂的影响下, YZ02 剖面滩肩向海扩宽约 4.63 m, 滩面地形高程明显增加, 在平均高潮位处向海前进约 5.59 m; 2022—2024 年, 滩肩、滩面无明显变化, 岸段可能进入新一期的稳定平衡阶段。

YZ03 剖面(图 5)呈现淤积状态。在 2020—2022 年未发育滩肩, 滩面在平均高潮位处向海淤积约为 6.59 m, 垂向淤积厚度约为 0.37 m; 通过补砂工程, 该处形成滩肩, 并逐年变宽, 2023 年滩肩宽度为 20 m, 2024 年增宽至 28.72 m, 2022—2024 年滩面在平均高潮位处向海淤积约

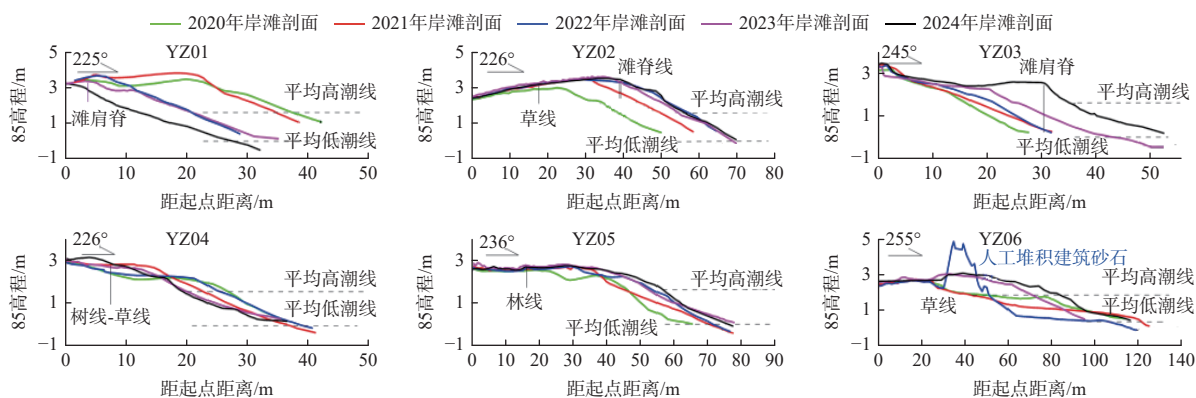


图 5 YZ01—YZ06 岸滩剖面

Fig. 5 YZ01-06 Beach profile of Yazhou bay

12.77 m, 垂向淤积厚度约 1.84 m, 补砂养滩效果较明显。

YZ04 剖面(图 5)呈现轻微侵蚀。2020—2021 年剖面没有明显变化;2022 年,滩面在平均高潮位处向岸侵蚀约 3.38 m,垂向侵蚀厚度约为 0.37 m;补砂后,2023 年滩肩、滩面高程显著增加,滩肩的宽度约为 3.99 m;2024 年,滩面向陆侵蚀,滩肩和滩面的高程有所降低。

YZ05 剖面(图 5)比较稳定,滩肩宽约为 20.22 m,发育有茂密的防护林。2020—2021 年剖面变化不大,处于一个动态平衡的过程;2022 年补砂后,滩面高程略有增加,2022—2024 年剖面无明显变化。在无进一步人工干预活动的状态下,岸滩将处于稳定的平衡状态。

YZ06 剖面(图 5)位于南山港南部。2020—2021 年,剖面呈现侵蚀,滩肩和滩肩脊消失,垂向侵蚀厚度约为 0.68 m;2022 年有高约 3 m 建筑砂石堆,2023 年砂石堆消失,滩面整体增高近 1 m,滩面处于侵蚀淤积动态平衡阶段;2024 年,受剖面南侧约 1 km 处新建人工防护堤的影响,海浪作用减弱,滩面逐渐淤积,岸段向海淤积约 11.80 m,补砂养滩效果较明显。

2.3 岸滩侵蚀淤积动态演变

依据研究区域的地理方位、地形特征以及经过统计的岸滩侵蚀淤积速率数据特征,将其划分为 3 个不同的区域:A 区、B 区和 C 区(图 6)。

A 区(图 6)位于宁远河出海口东侧,后滨紧邻大片的围塘养殖区。2020—2021 年,A 区以淤积为主,淤积区占 61.49%,平均淤积速度为 $0.31 \text{ m}^3/\text{a}$;侵蚀区占 38.51%,主要在靠近防护堤的西侧岸段,平均侵蚀速率为 $0.28 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2021—2022 年,整体以侵蚀为主,侵蚀区占 63.90%,西侧岸段侵蚀严重,最大侵蚀速率达到 $3.0 \text{ m}^3/\text{a}$,平均侵蚀速率为 $0.20 \text{ m}^3/\text{a}$;淤积区主要是东侧岸段,平均淤积速率为 $0.26 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2022—2023 年,三亚市政府填埋了一些对环境造成负面影响的虾塘鱼塘,岸滩宽度显著增加;在经过人工补砂措施后,除了西侧岸段,A 区呈现淤积现象,平均淤积速度为 $0.26 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2023—2024 年,A 区大部分岸滩地形变化不明显,淤积岸段主要集中在中部,平均淤积速度为 $0.15 \text{ m}^3/\text{a}$ 。在补砂后,砂粒被搬运和重新分布,岸滩稳定性增强,海滩修复工程初见成效。

B 区(图 6)是一个呈细长带状延伸的区域。

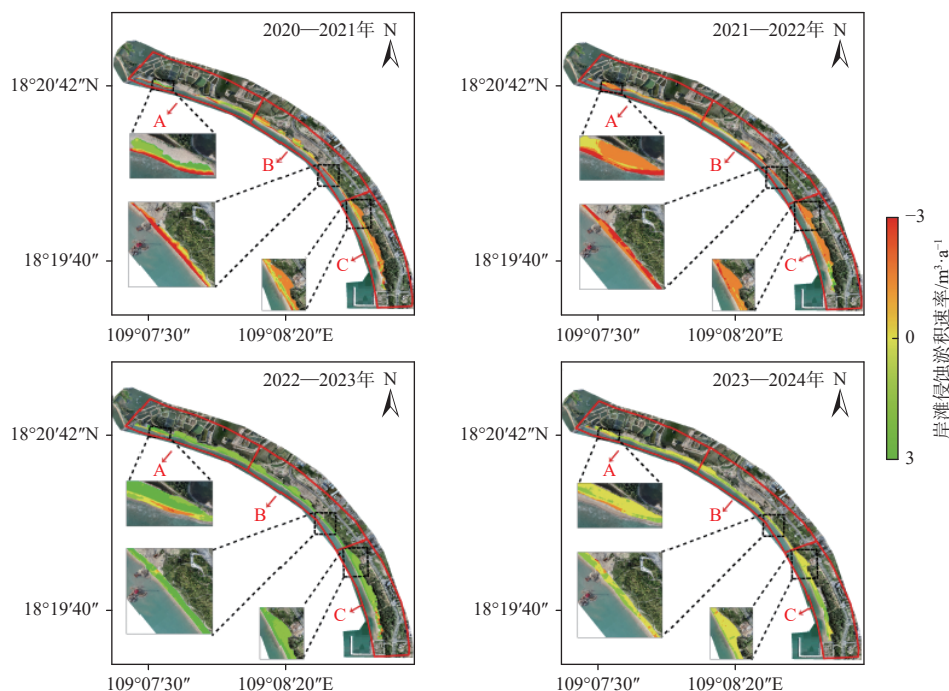


图 6 岸滩侵蚀淤积速率

Fig. 6 Chart of beach erosion and sedimentation rate

2020—2021 年, 侵蚀主要发生在 B 区南部, 平均侵蚀速率为 $0.27 \text{ m}^3/\text{a}$; 北部紧邻进行了填埋的鱼塘, 滩肩处淤积, 平均淤积速度为 $0.30 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2021—2022 年, 侵蚀面积增加, 侵蚀速率加快, 岸段南部侵蚀严重, 平均侵蚀速率为 $0.34 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2022—2023 年, 与 A 区类似, B 区经过人工补砂后呈现淤积现象, 滩肩显著拓宽, 滩面面积增大, 最大淤积速度为 $2.04 \text{ m}^3/\text{a}$, 平均淤积速度为 $0.39 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2023—2024 年, 在自然因素的影响下, 岸滩的形态进行了重塑, 侵蚀砂量与淤积量大致相抵, 整体上达到了一种新的动态平衡状态。补砂前 B 区处于侵蚀状态, 补砂后岸滩侵蚀淤积达到平衡, 这表明补砂工程在加强岸滩稳定性方面发挥了显著作用, 海滩修复工程成效明显。

C 区(图 6)位于南山港的北侧, 较 B 区更为开阔, 滩面平缓。2020—2023 年, 靠近南山港的 C 区南部有海岸工程工地, 在这期间不对该区域进行分析。2020—2021 年, C 区北部以侵蚀为主, 侵蚀主要发生在滩肩和滩面, 平均侵蚀速率为 $0.11 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2021—2022 年, 北部发生轻微侵蚀, 侵蚀速率普遍小于 $0.2 \text{ m}^3/\text{a}$, 平均淤积速度为 $0.14 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2022—2023 年, 与 A、B 区类似, C 区北部经过补砂后呈现淤积, 岸滩高程显著增加, 平均淤积速度为 $0.30 \text{ m}^3/\text{a}$ 。2023—2024 年, 北部地形变化不明显, 淤积主要集中在靠近南山港的岸段, 淤积程度较为明显, 平均淤积速度为 $0.35 \text{ m}^3/\text{a}$ 。南部岸段淤积的原因主要是补砂工程增强了岸滩的稳定性, 同时南山港的防浪堤减少了波浪的侵蚀, 为该区域岸段稳定性提供了额外的保障。

3 结论

(1) 本研究采用无人机遥感技术对崖州湾海岸带环境进行监测, YZ01—YZ06 剖面数据表明, 补砂修复前岸滩剖面之间差异显著, 补砂修复后, 除 YZ01、YZ04 剖面外, 其余剖面已趋于平衡或呈现淤积现象, 岸滩稳定性增强。

(2) 岸滩侵蚀淤积速率结果表明, 崖州湾岸滩在补砂修复前普遍存在侵蚀现象。补砂修复

一年后, 北部海岸带持续侵蚀, 其他区域的侵蚀和淤积已基本达到平衡。特别是在靠近南山港的岸段, 出现了明显的淤积现象。

(3) 研究结果表明, 科学合理结合多种海岸带修复方式, 不仅能有效恢复砂质岸线的稳定性, 还能拓展其空间功能性。本研究利用无人机低空遥感技术对崖州湾海岸带地质环境进行监测, 系统分析了该区域海岸带侵蚀淤积变化特征。基于崖州湾的实际监测案例表明, 无人机低空遥感技术具有时效性高、成本低、精确度高、地表数据获取速度快、建模能力强等显著优势。该技术为海岸带地质环境监测提供了高效的技术手段, 对海岸带生态修复和科学管理具有重要的实践价值。

参考文献:

- [1] 刘 瑀, 马 龙, 李 颖, 等. 海岸带生态系统及其主要研究内容 [J]. 海洋环境科学, 2008, 27(5): 520-522.
- [2] 伊 飞, 张训华, 胡 克. 海岸带陆海相互作用研究综述 [J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(3): 28-34.
- [3] 骆永明, 韩广轩, 秦 伟, 等. 海岸带生态环境与可持续管理 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [4] 于得水, 单 瑞, 梅 赛, 等. 基于 GNSS-RTK 技术的高精度海岸侵蚀监测方法 [J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 45-51.
- [5] 李 阳, 袁 琳, 赵志远, 等. 基于无人机低空遥感和现场调查的潮滩地形反演研究 [J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 80-88.
- [6] YUAN S, GU W, LIU C Y, et al. Towards a semi-empirical model of the sea ice thickness based on hyperspectral remote sensing in the Bohai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 36(1): 80-89.
- [7] 陈晓英, 张 杰, 马 毅, 等. 近 40a 来三门湾海岸线时空变化遥感监测与分析 [J]. 海洋科学, 2015, 39(2): 43-49.
- [8] 单倩倩. 遥感技术在某海岸带地质环境调查中的应用 [J]. 赤峰学院学报 (自然科学版), 2016, 32(2): 122-123.
- [9] 毋 亭, 侯西勇. 海岸线变化研究综述 [J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1170-1182.
- [10] 李清泉, 卢 艺, 胡水波, 等. 海岸带地理环境遥感监测综述 [J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1216-1229.
- [11] 张 力, 刘玉轩, 孙洋杰, 等. 数字航空摄影三维重建理论与技术发展综述 [J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1437-1457.
- [12] 郝祥侠. 无人机航空摄影测量技术在地形图测绘中的应用 [J]. 西部资源, 2021(6): 107-109.

(下转第 597 页)

- al. Presence, concentrations and risk assessment of selected antibiotic residues in sediments and near-bottom waters collected from the Polish coastal zone in the southern Baltic Sea - Summary of 3 years of studies[J]. *Marine Pollution Bulletin*. 2018, 129(2): 787-801.
- [34] XU W H, ZHANG G, WAI O W H, et al. Transport and adsorption of antibiotics by marine sediments in a dynamic environment[J]. *Journal of Soils and Sediments*. 2009, 9(4): 364-373.
- [35] ZHAO W, GUO Y, LU S, et al. Recent advances in pharmaceuticals and personal care products in the surface water and sediments in China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2016, 10(6).
- [36] 孙 池. 污水中纳米颗粒物的分离、定量、识别及对抗生素的吸附特征 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [37] GOTTSELIG N, BOL R, NISCHWITZ V, et al. Distribution of phosphorus-containing fine colloids and nanoparticles in stream water of a forest catchment[J]. *Vadose Zone Journal*. 2014, 13(7).
- (本文编辑: 胡莹莹)

~~~~~

(上接第 587 页)

- [13] 李德仁, 李 明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2014, 39(5): 505-513, 540.
- [14] 荆文龙, 周成虎, 李 勇, 等. 基于无人机智能基地的空地协同低空无人机遥感网构建及应用 [J]. *遥感学报*, 2023, 27(2): 209-223.
- [15] 王 颖. 海南岛海岸环境特征 [J]. *海洋地质动态*, 2002, 18(3): 1-9.
- [16] 秦 茜, 曾维特, 李华彦, 等. 海岸带地质环境调查的无人机航测精度 [J]. *北京测绘*, 2022, 36(6): 773-778.
- [17] 朱述龙, 朱宝山, 王红卫. 遥感图像处理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] 袁修孝, 高 宇, 邹小容. GPS 辅助空中三角测量在低空航测大比例尺地形测图中的应用 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2012, 37(11): 1289-1293.
- [19] 李英成, 叶冬梅, 薛艳丽, 等. GPS 辅助空中三角测量技术在无人机海岛测图中的应用 [J]. *测绘科学*, 2012, 37(5): 55-57.
- [20] 邓才龙. 无人机遥感在海岛海岸带监测中的应用研究 [D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2015.
- ( 本文编辑: 胡莹莹 )