



基于无人机倾斜摄影的三亚市蜈支洲岛综合地质调查研究

黄 诚, 吴能友, 龙军桥, 汤 伟, 辛 卓, 罗生龙, 胡 旋, 颜 历, 邢景峰, 陈 龙, 张云锺, 郭泽俊, 李 央

Comprehensive geological survey and research on Wuzhizhou Island of Sanya City based on UAV tilt photography technology

HUANG Cheng, WU Nengyou, LONG Junqiao, TANG Wei, XIN Zhuo, LUO Shenglong, HU Xuan, YAN Li, XING Jingfeng, CHEN Long, ZHANG Yunzhong, GUO Zejun, and LI Yang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022092801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

声学水面无人艇在浅水海底地貌调查中的应用

Application of acoustic unmanned surface vehicle to submarine geomorphology survey in shallow water

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 219

高分辨率三维海洋反射地震P-cable系统应用进展

PROGRESS OF APPLICATION OF P-CABLE SYSTEM OF 3-D HIGH-RESOLUTION SEISMIC

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(4): 221

苏拉威西俯冲带结构与俯冲起始机制的三维地震观测

Introduction to the 3-D seismic observation of the north Sulawesi subduction zone and the study of initiation mechanism

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(5): 131

基于原位观测的黄河水下三角洲悬浮物浓度叠加锯齿模型

The superposed sawtooth model of suspended sediment concentration in the Yellow River subaqueous delta based on in-situ observation

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 195

黄河三角洲北部地区软土工程地质特性及空间分布

Soft soil engineering geological characteristics and spatial distribution in the north of Yellow River delta

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 31

基于HHT方法的地层Q值补偿方法研究

Research of compensation method for formation Q value based on HHT method

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 175



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄诚, 吴能友, 龙军桥, 等. 基于无人机倾斜摄影的三亚市蜈支洲岛综合地质调查研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(3): 195-208.
HUANG Cheng, WU Nengyou, LONG Junqiao, et al. Comprehensive geological survey and research on Wuzhizhou Island of Sanya City based on UAV tilt photography technology[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(3): 195-208.

基于无人机倾斜摄影的三亚市蜈支洲岛综合地质调查研究

黄诚^{1,2}, 吴能友^{2,3}, 龙军桥¹, 汤伟¹, 辛卓¹, 罗生龙⁴, 胡旋¹, 颜历¹, 邢景峰¹, 陈龙¹,
张云锺¹, 郭泽俊¹, 李央¹

1. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 571127
2. 中国海洋大学, 青岛 266100
3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
4. 东华理工大学, 南昌 330013

摘要: 交通不便、植被覆盖茂盛、地形险峻等因素导致无居民海岛开展综合地质调查研究极其困难。为了补充登岛调查人员不足, 降低安全风险, 提高作业效率, 本文探索无人机倾斜摄影技术在无居民海岛综合地质调查中的应用。利用飞马 D20 无人机搭载 5 镜头 D-OP3000 模块, 快速获取海岛低空 (190 m)、多角度、高精度影像数据, 影像平均地面分辨率优于 0.03 m。对获取的影像数据应用 Smart3D 软件生成数字正射影像 (DOM)、构建海岛实景三维模型, 并基于实景三维模型实现对海岛进行全方位观测, 提升对海岛的宏观认识。通过对数字正射影像及海岛实景三维模型进行综合研究, 结合实地调查, 获取了蜈支洲岛线性断裂特征, 探讨了其成因; 提取了蜈支洲岛土地开发利用现状信息; 识别出岛岸崩塌、断裂活动及岛滩侵蚀等地质灾害隐患点 15 处, 并提出了防治建议, 为海岛开发利用、生态保护修复、地质灾害治理及海岛综合管理提供了科学依据。

关键词: 综合地质调查; 数字正射影像; 实景三维模型; 无人机倾斜摄影; 海岛

中图分类号: P737.2

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022092801

Comprehensive geological survey and research on Wuzhizhou Island of Sanya City based on UAV tilt photography technology

HUANG Cheng^{1,2}, WU Nengyou^{2,3}, LONG Junqiao¹, TANG Wei¹, XIN Zhuo¹, LUO Shenglong⁴, HU Xuan¹, YAN Li¹, XING Jingfeng¹,
CHEN Long¹, ZHANG Yunzhong¹, GUO Zejun¹, LI Yang¹

1. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 571127, China
2. Ocean University of China, Qingdao 266100, China
3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China
4. East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: It is extremely difficult to carry out comprehensive geological surveys on uninhabited island due to factors such as inconvenient transportation, lush vegetation coverage, and steep terrain. To overcome the shortage in in-situ investigational staff, reduce safety risks, and improve the working efficiency, the UAV (manned aerial vehicle) tilt photography technology was applied and tested in the Wuzhizhou Island, Hainan Province. A FEIMA D20 UAV carries a D-OP3000 module that equipped with 5 lens with which low-altitude (190m), multi-angle, and high-precision image data could be obtained quickly. The average ground resolution of the image was finer than 0.03m. In addition, Smart3D software was used to generate digital orthophoto maps (DOM) and to build a real-scene 3D model of the island. Therefore, the island could be observed in an omnidirectional way, and the overall understanding of the island was enhanced. Combined with a comprehensive study of digital orthophoto maps, the real-scene 3D model and field investigation, and the linear fracture characteristics of Wuzhizhou Island were obtained, and its origination was explored. The information of current status of land development and utilization of the island was extracted and 15 hidden risk points of geological disasters were spotted, including costal bluff collapse, fault activity, and beach erosion, to which countermeasures were

资助项目: 中国地质调查局项目“海南海棠湾-崖州湾海岛(礁)综合地质调查”(ZD20220609)

作者简介: 黄诚 (1987—), 男, 博士, 主要从事海洋地质与区域地质调查研究工作, E-mail: hc_learn@126.com

通讯作者: 吴能友 (1965—), 男, 研究员, 主要从事海洋地质与天然气水合物研究, E-mail: wuny@ms.giec.ac.cn

收稿日期: 2022-09-28; 改回日期: 2022-12-26. 张现荣编辑

proposed. This study provided a scientific basis for island development and utilization, ecological protection and restoration, geological disaster management, and comprehensive management of the islands alike.

Key words: comprehensive geological survey; digital orthophoto maps; real-scene 3D model; ocean island; UAV tilt photography

传统的海岛地质调查方法如登岛人工调查、船载作业等,受地形、地貌复杂因素和开发程度影响,面临较大困难^[1]。20 世纪 90 年代以来,卫星遥感技术逐步在海岛地质调查工作中获得了较好的应用效果,如利用卫星遥感影像进行大比例尺海岛(礁)测绘^[2-3]、利用高分辨率卫星遥感技术对海岛动态变化进行监测^[4]、应用遥感影像对人类活动特征进行识别^[5]等。卫星遥感技术的发展为海岛综合调查带来了极大便利,具有空间分辨率高、定位精确和地物信息丰富等优势^[6],但也存在诸如历史数据质量良莠不齐(受云层和潮位影响)、现势性和分辨率不能满足高精度和高时效调查需要、只能获取正射影像等不足^[7-8]。无人机低空倾斜摄影是近年来发展起来的一项新的测量技术,取得了很好的实际应用效果,展示了广泛的应用前景^[9-10]。

与卫星遥感技术相比,无人机低空倾斜摄影技术在海岛综合地质调查方面优势明显^[8, 11-13]:①低空飞行,可以有效规避云层和潮汐影响,获取海岛高质量光学影像;②搭载多个摄像机,获取不同角度高分辨率影像,实现三维实景建模,增强信息提取的效率;③可以针对具体目标进行反复拍摄,提高

重点调查精度;④操作简单,低成本,设计好航线后,可以实现自动采集相关数据;⑤可实施高风险区调查任务。对于人员无法到达的危险区域,应用无人机技术有独特优势。

本文采用低空无人机倾斜摄影技术,对三亚市蜈支洲岛开展全方位倾斜摄影测量工作,并应用 Smart3D 将获取的不同角度数据进行分析处理,建立海岛三维实景模型。基于该模型,结合海岛实测资料,提取有效基础地质、环境地质、旅游地质及灾害地质信息,为海岛空间规划、开发利用和生态保护修复提供决策依据。

1 研究区概况

蜈支洲岛位于海南岛三亚东部海棠湾,是国家 5A 级景区,又称牛奇洲(图 1)。蜈支洲岛西北角距离海南本岛约 2.5 km,北侧与椰子洲岛遥相呼应,南临亚龙湾,全岛呈不规则“爱心状”,面积约 1.01 km²,东西长 1 500 m,南北宽 1 100 m^[14-15]。蜈支洲岛中心地理坐标位置为 18°18'43"N、109°45'44"E,海拔高约 79.3 m,岸线总长度约 6.91 km。蜈支洲岛北部发

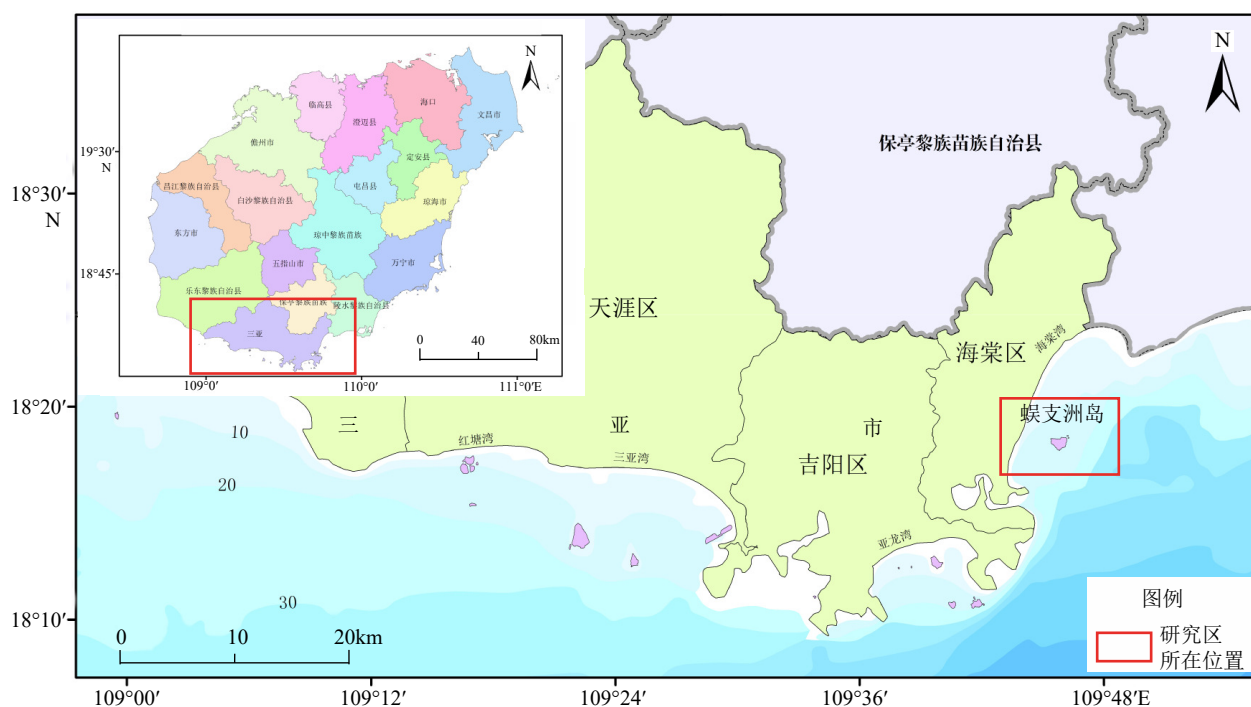


图 1 研究区所在地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

育第四系烟墩组(Qh³y)灰白色亚砂土、含砾黏土、灰黄色砾质砂及海滩岩;东南、西南两侧出露燕山早期花岗岩,主要岩性为中粗粒含斑黑云母花岗岩;中部出露燕山晚期花岗岩,主要岩性为细粒黑云母花岗岩。

蜈支洲岛地处热带,属热带海洋气候,受南部季风影响,雨量充沛,岛上拥有 85 科 2 700 多种原生植物,包括有“地球植物老寿星”之称龙血树等珍稀植物^[16]。蜈支洲岛海洋牧场是我国第一个热带休闲旅游型海洋牧场国家级示范区,近岛珊瑚礁区域是休闲渔业开发的核心区^[17]。与此同时,三亚蜈支洲岛海洋牧场靠近琼东沿岸上升流核心区,其近岸珊瑚礁位于我国珊瑚礁过渡区,上升流可以减弱区域内海水温度上升对珊瑚胁迫影响,使得岛周珊瑚礁保持了较高的生物多样性^[18]。

2 数据与方法

2.1 无人机倾斜摄影平台

无人机采用飞马 D20 机型,搭载 1.2 亿像素的 D-OP3000 模块相机镜头(其中 1 个为正射镜头,其余为倾斜镜头)。D20 及相机镜头参数如表 1。

2.2 数据获取

本次工作无人机倾斜摄影时间为 2020 年 8 月 30—31 日,历时 2 天,飞行期间天气晴朗,风速 3 级,飞行条件良好。无人机倾斜摄影测区面积约为 1.8 km²,在踏勘的基础上进行了航线规划设计,

表 1 飞马 D20 无人机和 D-OP3000 相机硬件参数

Table 1 Hardware parameters of FEIMA D20 UAV and D-OP3000 cameras

飞马D20性能参数			D-OP3000性能参数		
序号	项目	参数	序号	项目	参数
1	材质	碳纤维+镁铝合金	1	型号	D-OP3000
2	最大载荷	6 kg	2	相机数量	5
3	巡航速度	8 m/s	3	传感器尺寸	23.5×15.6 mm
4	最大续航时间	60 min	4	有效像素	约2430万×5像素
5	测控半径	30 km	5	镜头焦距(下视)	25 mm定焦
6	起降方式	垂直起降	6	镜头焦距(倾斜)	35 mm定焦

航线相关参数按照《GB/T 39612-2020 低空数字航摄与数据处理规范》执行^[19]。采用国家 2000 坐标系统和 2000 国家高程基准,飞行高度 190 m,航向 216°,无人机飞行姿态俯仰角 6~8°,航向重叠率 70%,旁向重叠率 60%,影像平均地面分辨率优于 0.03 m。在蜈支洲岛中部较为空旷、通视条件较好的电动车站设置无人机起降点,自北向南依次等间距部署 21 条航线(图 2),为保证全面覆盖设计范围,航线做了必要外扩,本次共采集照片 5 535 张。

无人机倾斜摄影工作过程中采用飞马 D20 自带的 RTK 模块进行实时厘米级定位,并根据地形起伏进行变高飞行,以保证影像一致性。同时,按照航摄要求,提前在蜈支洲岛遮挡较少的空旷区域或有标志性建筑的区域布置像片控制点,本次工作布设像片控制点 10 个(表 2),以保证影像数据质量。

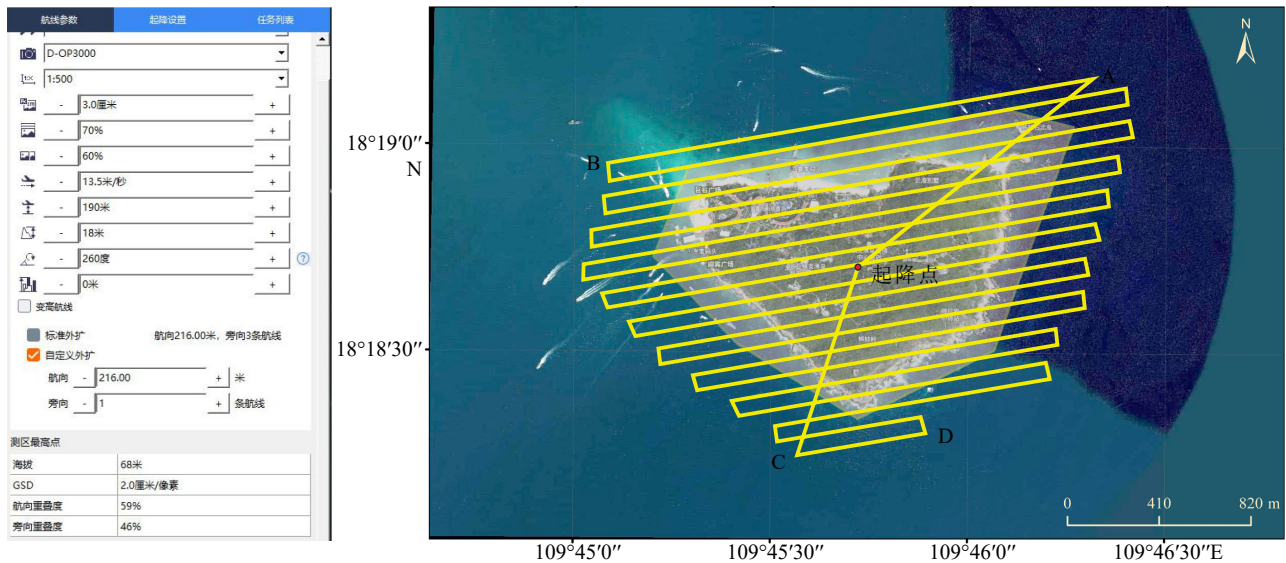


图 2 无人机倾斜摄影航线规划图

Fig.2 Route planning of the UAV tilt photography

表 2 像控点信息表
Table 2 Information at the image control points

点名	原始经纬度	原始大地高度/m	解状态	解算卫星	基站ID	基站距离/m
Pt11	18°18'43.3060"N、109°45'59.2932"E	14.773	固定解	38	268	2 874.959
Pt12	18°18'42.7392"N、109°46'02.1141"E	-0.483	固定解	39	268	2 800.159
Pt15	18°18'58.1493"N、109°45'51.4230"E	-5.797	固定解	39	1164	2 714.165
Pt16	18°18'58.1498"N、109°45'51.4233"E	-5.799	固定解	39	1164	2 714.169
Pt17	18°18'52.3249"N、109°45'43.6898"E	-6.689	固定解	33	1164	2 558.176
Pt18	18°18'53.5039"N、109°45'35.4785"E	-6.397	固定解	39	1164	2 321.49
Pt19	18°18'53.5801"N、109°45'28.1935"E	-5.010	固定解	35	1164	2 125.469
Pt20	18°18'44.8661"N、109°45'37.2398"E	16.349	固定解	33	1164	2 483.683
Pt21	18°18'38.1566"N、109°45'34.4190"E	49.754	固定解	39	1164	2 518.853
Pt22	18°18'35.4427"N、109°45'41.7395"E	58.335	固定解	39	1164	2 744.847

2.3 数据处理

同一地面点会在多张影像上成像,这些点的集合称为连接点,连接点生成在摄影测量中非常重要,为捆绑调整提供必要的输入信息量^[20]。数据处理前,对所有采集到的 5 535 张照片进行标定,标定成功的照片数量为 3 160 张,获取的连接点为 24.8 万个。未标定成功的照片中大部分为处于航线的外延部分。应用 Smart3D 软件对标定成功的 3 160 张照片进行处理,经过差分解算、处理分区和空三计算,得到蜈支洲岛及其周边部分海域的数字正射影像图(DOM)和实景三维模型(图 3)。

空三计算是通过无人机倾斜摄影外业测量的地面像控点位置信息,在室内无人机影像处理过程中辅助确定全部影像的位置信息元素的一种测量方法^[21]。空三计算的关键取决于航测过程中获取 POS(机载定位定向系统)数据的精度,POS 数据包括该组镜头航测瞬间所处位置的高程、经纬度、航向角、俯仰角及翻滚角信息^[22]。本次研究中无人机

倾斜摄影采用前、后、左、右和正射 5 个镜头同时拍摄,5 个镜头的 POS 数据同时参与计算,显著提高了计算精度,提升了构建实景三维模型的质量和精度。空三计算完成之后,Smart3D 软件可自动完成实景三维模型构建。

3 海岛综合地质信息提取及解释

实景三维模型不仅可以多角度、立体化实现研究区野外场景重现,利于对研究区现状进行宏观和微观相结合的观察、理解,而且可借助无人机倾斜摄影测量成果对关注的地质点、线、面、体等重点地质信息进行识别、量测和分析^[21]。具体包括地质体空间坐标信息、地质接触界面、节理及断裂产状、现状岸线侵蚀淤积状况、地质灾害及隐患区空间分布范围等。本次工作基于高精度无人机倾斜摄影数据构建的实景三维模型,结合数字正射影像图(DOM),对蜈支洲岛进行综合地质解译。

3.1 蜈支洲岛线性构造及球状风化信息提取

本次倾斜摄影测量的第 5 组镜头为正射影像镜头,利用 Smart3D 软件对正射数据经差分解算、控制点平差和空三计算等步骤形成正射影像。正射影像图可视同为近地遥感数据,兼具地图的几何特征和影像特征,以高精度、直观易读和缩放方便等优点,广泛地应用于地图信息处理、自然资源保护、灾害防护治理等领域^[23]。通过对正射影像图进行解译,可以比较直观研究蜈支洲岛海岛线性构造以及与断裂密切相关的球状风化等地质现象。

通过对数字正射影像进行解译,可以清晰识别



图 3 蜈支洲岛实景三维模型图

Fig.3 3D real scene model of the Wuzhizhou Island

出 NW、NE 和近 SN 向 3 组线性断裂及部分环形断裂(图 4)。这些线性断裂多沿着节理发育, 规模不一, 其中 NW 向断裂占据主导地位。NW 向断裂走向 $301^{\circ}\sim 333^{\circ}$, 倾角近直立; NE 向断裂走向为 $40^{\circ}\sim 48^{\circ}$, 倾角 $78^{\circ}\sim 86^{\circ}$; 近 SN 向断裂走向 $342^{\circ}\sim 353^{\circ}$, 倾角 $76^{\circ}\sim 82^{\circ}$ 。沿 NW 向和近 SN 向断裂发育了多处基性岩脉, 其宽度为 $0.5\sim 2.4\text{ m}$, 表现为岩墙群形态, 岩性为辉绿岩(图 5)。环形断裂可能是蜈支洲岛上后期侵位的花岗岩体所致。

蜈支洲岛是一个花岗岩型海岛, 除北部被少量第四系沉积物覆盖以外, 其余部分均为花岗岩。花岗岩的球状风化现象在自然界比较常见, 一般认为, 其成因为岩体早期受三维裂隙控制形成四方块体, 由于棱角突出, 易受风化, 故棱角逐渐缩减, 最终趋向球形^[24]。除了普通的球状风化, 花岗岩的球状风化还可表现为如洋葱般层层剥落, 可能是花岗岩在循环失水-吸水过程中, 反复不均匀收缩、膨胀促使微观岩体结构扰动和拉伸, 最终形成洋葱状球状风化现象^[25]。蜈支洲岛岩滩部分花岗岩普遍发育球状风化, 且普通球状风化和洋葱状球状风化均有发育, 特别是在海浪能够作用到的范围易形成层层剥落的球状风化。应用实景三维模型, 在蜈支洲岛上能够比较快捷地发现球状风化发育的各个阶段(图 6)。球状风化不仅对工程地质条件影响较

大, 而且是加速基岩岸线侵蚀的一个重要潜在因素, 对蜈支洲岛来说是一个不良地质现象。

3.2 蜈支洲岛的岸线资源及土地开发利用现状

基于 DOM 数据遥感解译, 结合实地调查, 对海岛岸线类型及空间分布和海岛土地利用现状图等信息进行识别。应用 Arcgis 等软件还可统计各开区块面积、各类岸线长度信息等。蜈支洲岛岸线类型主要为基岩岸线、砂质岸线和人工岸线(图 7)。其中基岩岸线除海岛西北角以外几乎遍布全岛, 总长度约 5.38 km , 基岩岩性为细粒黑云母花岗岩和中粗粒含斑黑云母花岗岩。砂质岸线分布于海岛北侧及西北角, 总长度约 1.08 km , 砂质洁白, 蜈支洲岛重要的旅游资源。人工岸线主要为夏、冬两季码头修筑时所形成的地基及少部分人工构筑的防波堤, 分布于海岛西北角。

蜈支洲岛的岸滩主要为岩滩和沙滩, 几乎不含砾石滩, 蜈支洲岛的沙滩是世界上极少数不含或仅含少量砾石和其他岩屑的海滩^[14](图 8), 这与位于三亚市宁远河入海口处养生园岛岛滩明显不同(图 9)。反映了其不同的沉积物源供应特点。

蜈支洲岛是海南乃至全国著名的旅游海岛, 海岛的开发利用主要围绕旅游和生态保护进行。按照 GB/T 21010-2017 土地利用现状分类方案^[26], 将蜈

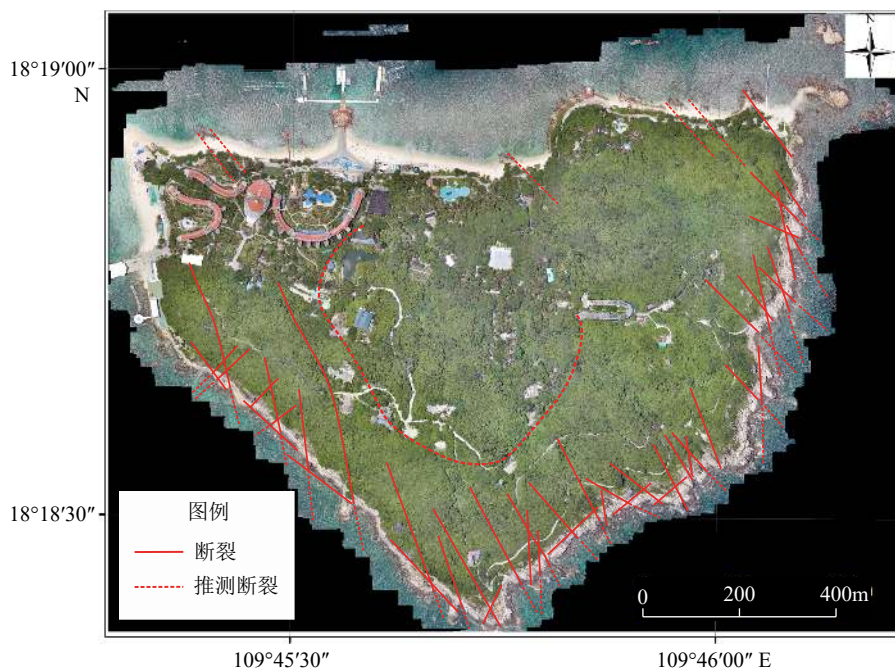


图 4 蜈支洲岛线性断裂分布图

基于 DOM 数据。

Fig.4 Distribution of linear fracture in Wuzhizhou Island

Based on DOM.

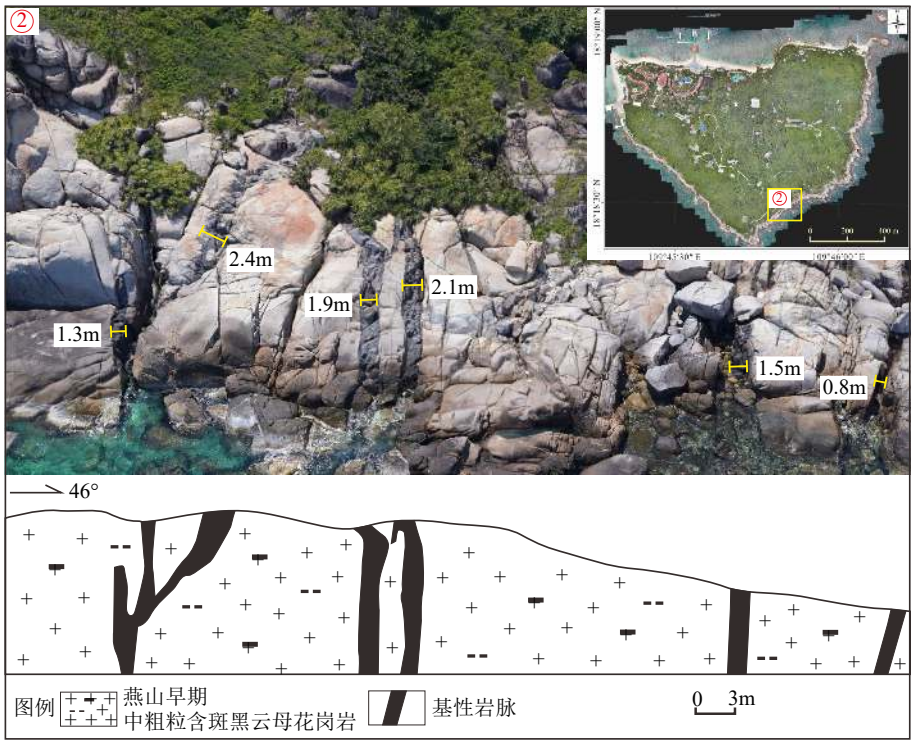


图 5 蜈支洲岛东南部发育的基性岩脉
基于实景三维模型。

Fig.5 Basic dykes developed in southeast of the Wuzhizhou Island
Based on real-scene 3D Model.

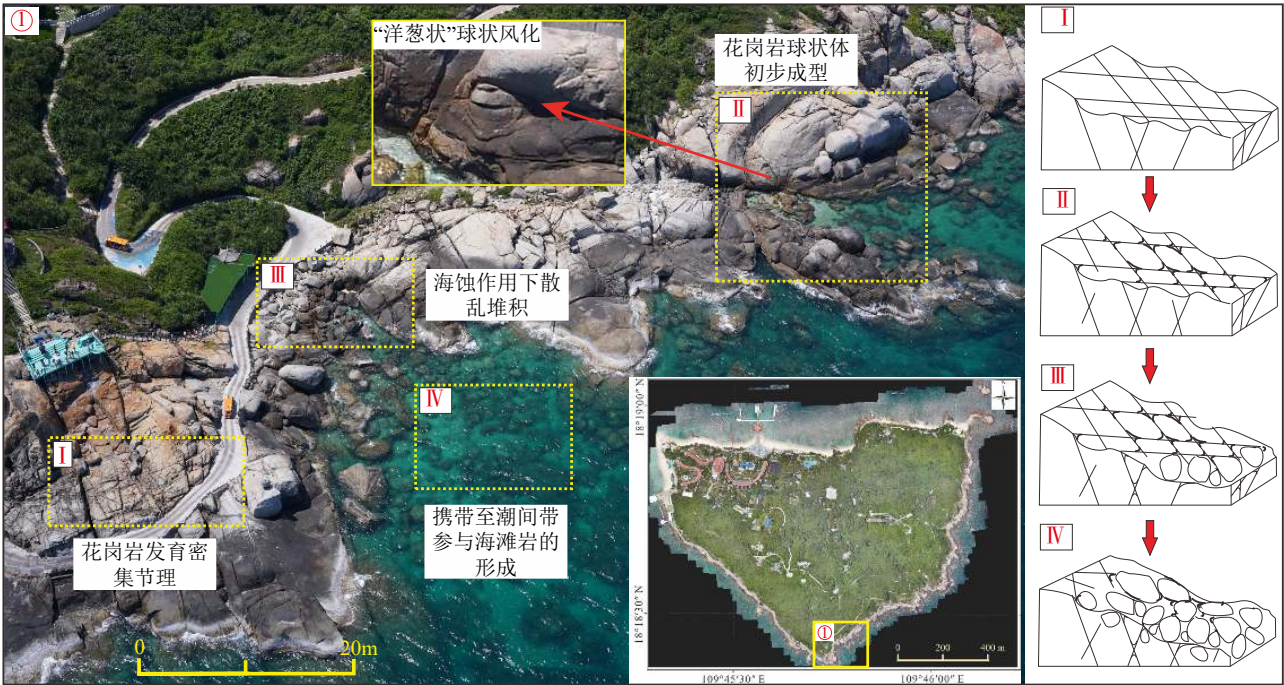


图 6 蜈支洲岛岛岸球状风化 4 个不同发育阶段
Fig.6 Different development stages of spherical weathering along the coastal Wuzhizhou Island

支洲岛土地利用状况划分为乔木林地、灌木林地、建设用地等 10 类。其中乔木林地分布面积最大, 为 637 630 m²; 其次为灌木林地, 统计面积为 120 478.16 m²;

建设用地面积为 62 294.2 m²。对各用地类型空间分布及面积进行了统计(图 10), 以乔木林地、灌木林地和草地总面积, 计算蜈支洲岛的植被覆盖率约为 77.8%。

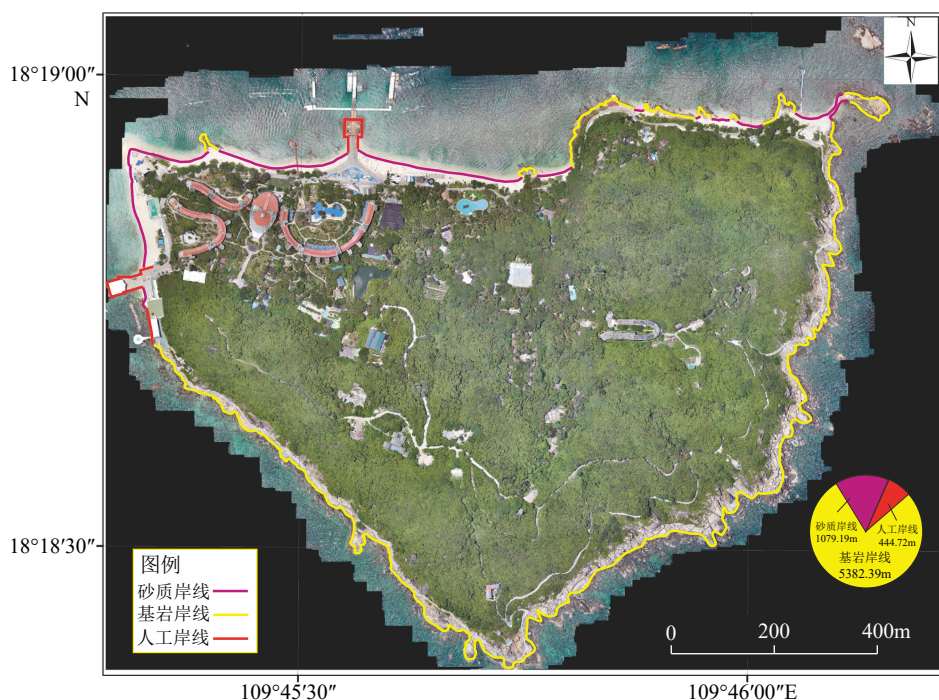


图 7 蜈支洲岛岸线类型及空间分布 (基于 DOM 数据)

Fig.7 Coastline types and spatial distribution of the Wuzhizhou Island



图 8 蜈支洲岛北部沙滩

Fig.8 Sandy beach of the northern Wuzhizhou Island

3.3 基于实景三维模型的海岛地质灾害研究

海岛地质灾害是指对海岛地质、生态环境和地貌景观造成破坏,或对海岛人民生命财产造成直接损失的,分布于岛陆、岛岸、环岛近岸海域的地质现象和地质作用^[27]。随着海岛开发力度和强度的提升,潜在的地质灾害也日益突出^[28]。常见的海岛地质灾害主要包括滑坡、崩塌、海岸侵蚀、湿地退化、地面沉降、风沙灾害、沙滩泥化等,其中以滑坡、海岸侵蚀、海水入侵和滨海湿地退化最为典型^[29-30]。按照分布位置,海岛地质灾害又可分为岛陆、岛岸



图 9 崖州湾含砾石沙滩

Fig.9 Sandy beach with pebbles and cobbles in the Yazhou Bay

和近岸海底地质灾害。总体来看,岛岸地质灾害最多,也是受灾害影响最严重区域。通常,海岛岛岸地区植被覆盖度低,通视情况较好,应用遥感技术能够取得较好的应用效果。

本次工作基于实景三维模型,获取了蜈支洲岛岸崩塌、断裂活动、海岸侵蚀等地质灾害信息,共发现崩塌风险隐患点 5 处(图 11-①⑤⑥⑦⑩),断裂活动风险隐患点 3 处(图 11-①②⑪);海岸侵蚀隐患点 7 处(图 11-①③④⑫⑬⑭⑮)。

3.3.1 蜈支洲岛崩塌及断层活动地质灾害

岛岸的崩塌主要发生在基岩裸露,且节理密集发育的区域,受热带气候强烈阳光照射,在昼夜温

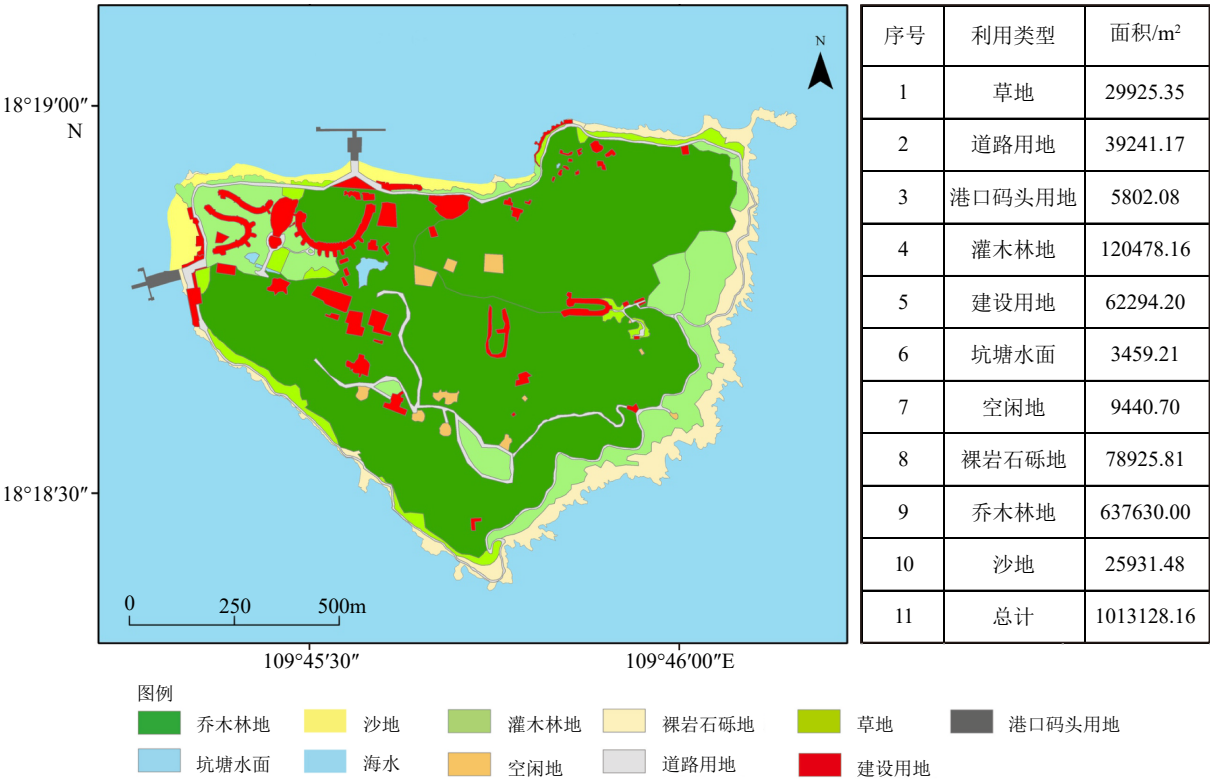


图 10 蜈支洲岛土地开发利用现状图
Fig.10 Current situation of land development and utilization in the Wuzhizhou Island

差和热带季风的双重作用下,节理密集发育区的基岩逐渐发生崩解(图 12)。

断裂活动造成岩石错动或塌陷,在海浪的反复侵蚀和冲刷下,断裂活动的危害性进一步加剧,不仅损坏道路,也会对海岛上的建筑产生破坏。蜈支洲岛最南端转角处,长约 8 m 的道路已经出现裂痕,并产生约 20 cm 的错断,影响了观光车及游客安全(图 13)。

3.3.2 蜈支洲岛海岸侵蚀地质灾害

蜈支洲岛岸滩整体保护较好,但在登岛实际调查过程中也发现几处岩滩存在侵蚀及部分沙滩存在淤积的状况。受海岛管理和通行条件影响,系统的实地调查难以实现,但基于无人机三维实景模型则可在室内实现系统分析研究。详细的研究表明蜈支洲岛存在 7 处较为明显的岩滩侵蚀点和 4 处沙滩淤积点(图 11)。

岩滩侵蚀部位主要发生在节理或断裂密集发育处,长期受到海浪和潮流冲刷影响,逐步向岛陆后退,与此同时,海岛基岩在断裂、海风、海浪、太阳辐射的共同作用下逐渐崩解,被海流带入海洋(图 14)。还有部分侵蚀发生在人工建筑物周边。这些侵蚀作用对海岛开发利用带来很大安全隐患。长此以往,在无其他沉积物源补充的情况下,海岛

岩滩部分逐步缩小。

分布在海岛北侧的沙滩常在地形变化较大的转折处发生淤积,淤积如果发生在河道,通常造成河道和水路改道或淤堵,是一种不良地质现象^[31],但这种淤积对于海岛的沙滩养护来说有其积极的一面。通常海岸的侵蚀淤积是平衡的,一个地段的侵蚀可能造成另一地段的淤积。在⑧号地质点可以清晰观察到海底岩石(附着有海草)的定向排列显示了海流的运动方向。基岩尖嘴凸出部分改变了海流的运动方向,从而导致海洋沉积物在湾口淤积,与此同时,海洋环流的作用会显著增强岩石尖嘴部分的侵蚀作用(图 15)。

4 讨论

蜈支洲岛虽然是一个沿岸海岛,距离大陆岸线最近的距离也有 2.5 km,但从本质上而言,蜈支洲岛原是大陆的一部分,地貌构架基本上是大陆向海的延伸,因海平面上升或地面沉降与大陆分离。按成因分类,蜈支洲岛属于大陆岛,其岩性组成与相邻陆地完全相同^[32-33]。因此,蜈支洲岛的地质构造特征与海南岛的地质演化过程息息相关。

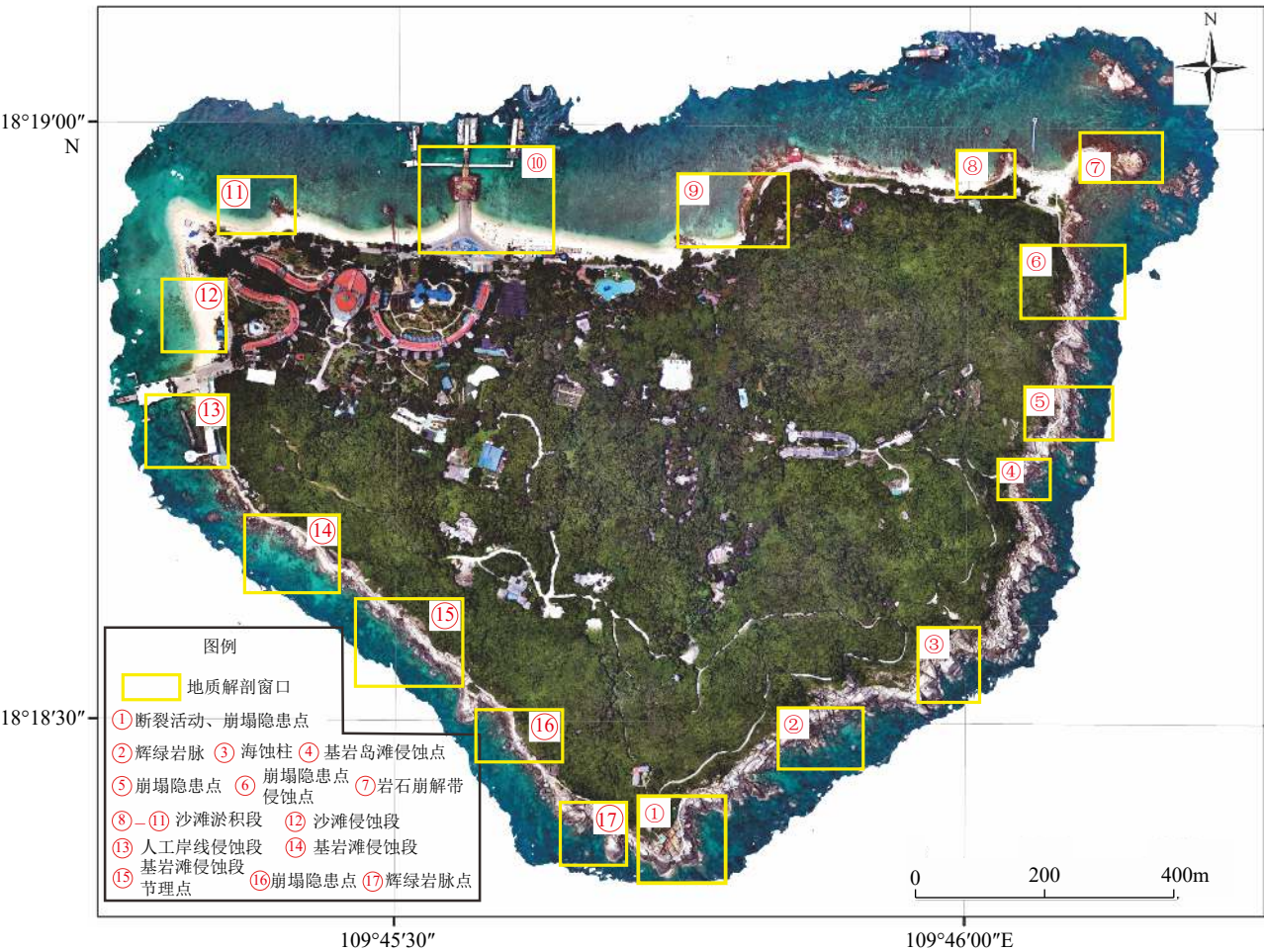


图 11 蜈支洲岛地质灾害隐患点分布图
Fig.11 Distribution of geological hazards in the Wuzhizhou Island

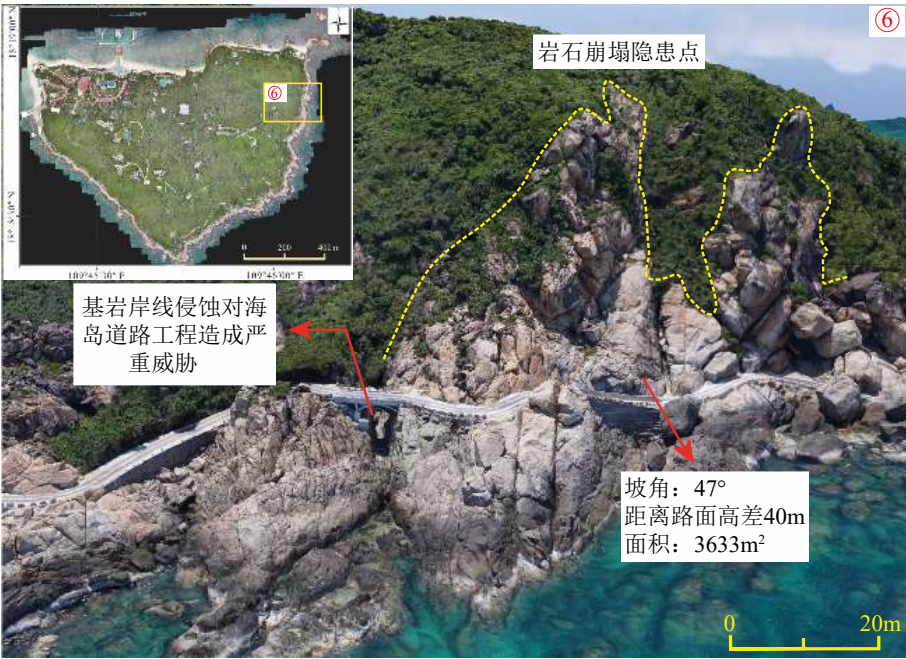


图 12 蜈支洲岛东侧崩塌隐患点
Fig.12 A hidden risk point of bluff collapse on the eastern side of the Wuzhizhou Island

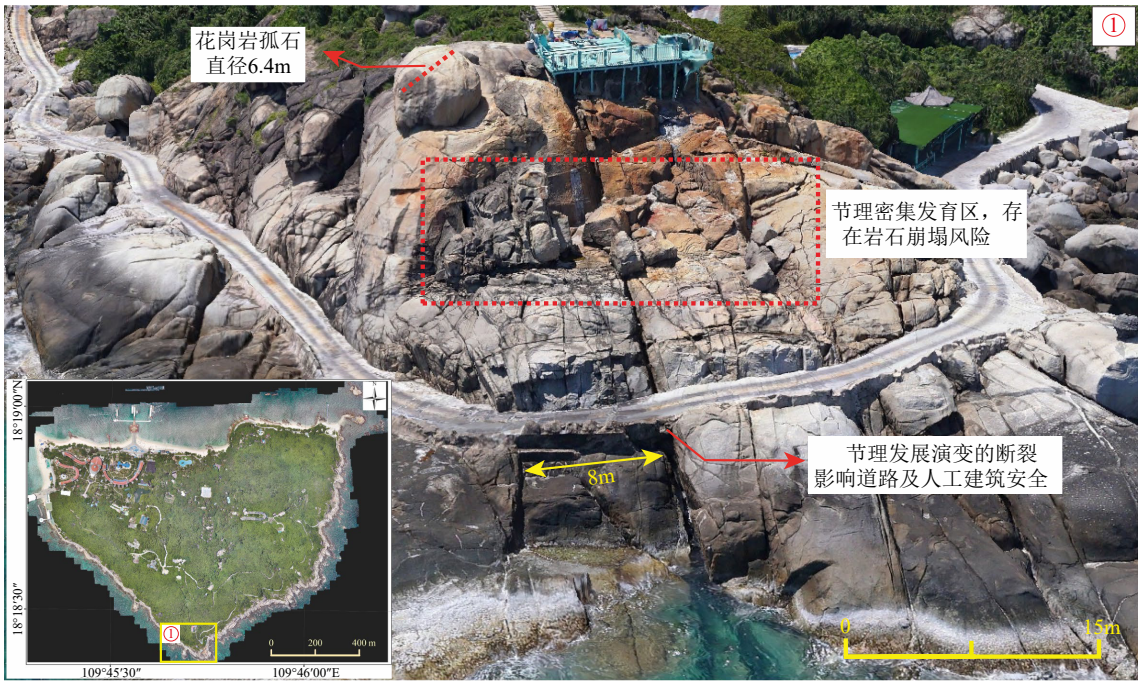


图 13 蜈支洲岛南部崩塌隐患点

Fig.13 A hidden risk point of bluff collapse in the southern Wuzhizhou Island

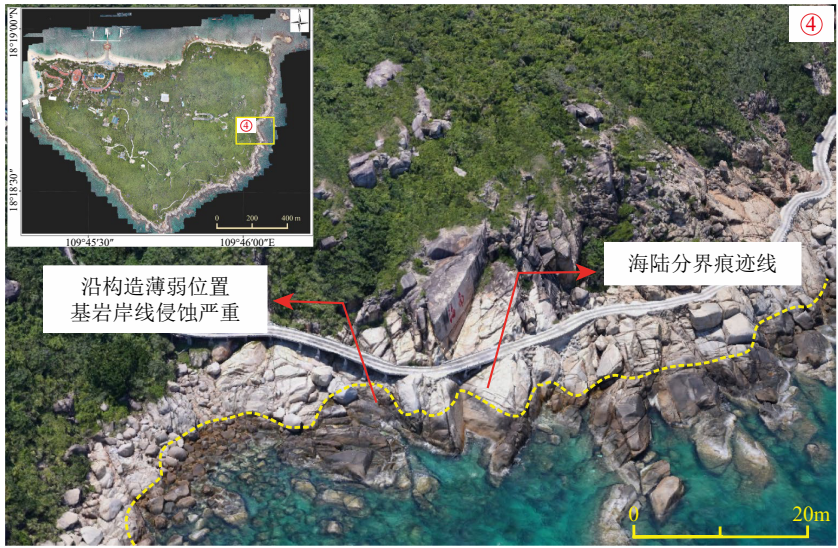


图 14 蜈支洲岛东侧岩滩侵蚀段

Fig.14 An erosion section of rocky beach on the eastern side of Wuzhizhou Island

4.1 蜈支洲岛线性构造特征分析

我国海岛大多受 NE、NNE 向断裂带、拗陷和隆起的控制,其走向分布和运动方式与中生代燕山运动时形成的构造保持一致^[34]。空间分布上,蜈支洲岛与其 SW 方向的野薯岛,NE 方向的分界洲岛、南洲仔岛、大洲岛等海南岛近岸海岛在空间上呈 NE-SW 向展布,受 NE 向断裂控制作用明显。根据 1 : 25 万乐东县幅、陵水县幅区域地质调查报告,蜈

支洲岛上的花岗岩大致形成于燕山期。有学者认为,燕山早期,由于区域岩石圈裂解拉张,在三亚地体形成了与陆内拉张有关的侵入岩,但在燕山早期,蜈支洲岛所在的三亚地体与琼中、琼北微地块地质构造环境不同。至燕山晚期,三亚地体才与琼中块体沿九所-陵水断裂发生拼贴对接^[35]。

蜈支洲岛上 NE、NW 和近 SN 向三组断裂具备如下特征:①断裂断面平直光滑;②断裂产状稳定,沿走向延伸较远;③空间上呈等距离排列,且没有



图 15 蜈支洲岛北部砂质岸线淤积段

Fig.15 A siltation section of sandy coastline in the northern Wuzhizhou Island

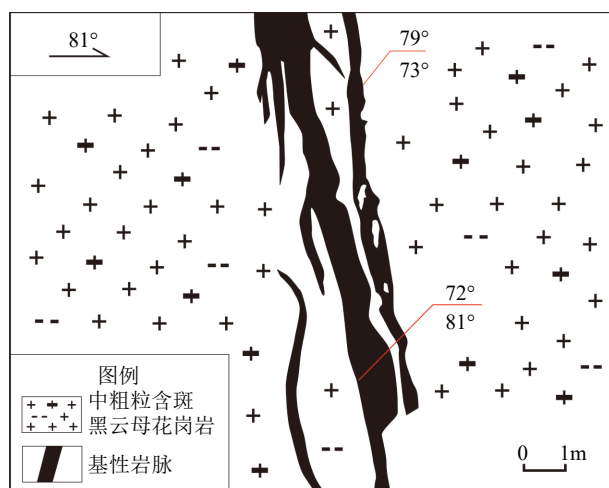


图 16 蜈支洲岛东南侧近 SN 向张性断裂素描图

Fig.16 Sketch of a tensional fracture in near S-N direction in the southeastern side of Wuzhizhou Island

明显位移;④充填有基性岩脉的断裂面出现转弯、分叉,表现为张裂特征(图 16);⑤NW 向和近 SN 向断裂裂开的程度比 NE 向断裂要大。蜈支洲岛上发育的 3 组线性断裂表现出共轭“X”型剪节理系特征,很可能是受燕山晚期三亚地体与琼中块体发生拼贴时产生的 SN 向压应力作用而形成。

调查中还发现,基性辉绿岩脉大多发育在 NW 向和近 SN 向断裂中,局部地段密集出现(图 5)。海南岛广泛发育基性岩墙群,如琼海市文市乡、三亚市南山村以及西瑛洲岛等地。研究表明三亚市南山村的辉绿岩基性岩墙群形成于 90 Ma 左右,指示了海南岛南部在该时期经历了强烈的区域性拉伸作用^[36]。表明蜈支洲岛上的基性岩墙群很可能也是在此地质背景下形成。

4.2 基于无人机 DOM 影像的海岛痕迹线识别

一般近岸海岛面积较小,岸线蜿蜒曲折,传统遥感手段受干扰条件较多,主要用于活动区海岛整体影像,不易精细识别不同海岛岸线所涵盖的复杂地物类型^[37]。无人机低空遥感技术则可以快速获取小尺度范围内高分辨率遥感影像,是海岛岸线精细化探测的有效技术手段。应用无人机高光谱遥感和机载激光雷达数据(LiDAR)开展自动或半自动海岛岸线已经取得了较好应用^[37-38]。本次工作尝试应用无人机正射影像结合实景三维模型对蜈支洲岛岸线进行识别。

蜈支洲岛岸线类型主要包括基岩岸线、砂质岸线和人工岸线。其中人工岸线主要为港口码头和防波堤,岸线信息提取相对容易。对于砂质岸线和基岩岸线受潮汐影响,若采用海水与岛滩(沙滩或岩滩)交接线作为岸线,则在不同时间获取的影像岸线位置完全不同,对于地形较为平缓的岛滩,差异性非常大。需要获知遥感影像拍摄的具体时间(精确到小时),再引入潮汐数据并结合 DEM 数据进行校正,流程较为繁琐。因此,直接采用海水交接线来确定岸线位置比较困难,且效率较低。海岛经常受海水冲刷影响,长期以来在海岛周围形成了一条稳定的海岛痕迹线。以海岛痕迹线作为岸线界定标准时,在同等条件下,受潮汐影响较小,能够提高岸线识别和提取效率^[39]。对于砂质岸线,海岛痕迹线在干滩与潮滩交界处;对于基岩岸线,海岛痕迹线在基岩的明暗交界处。这两类海岛痕迹线在 DOM 数据和三维实景影像上可以清晰识别出来

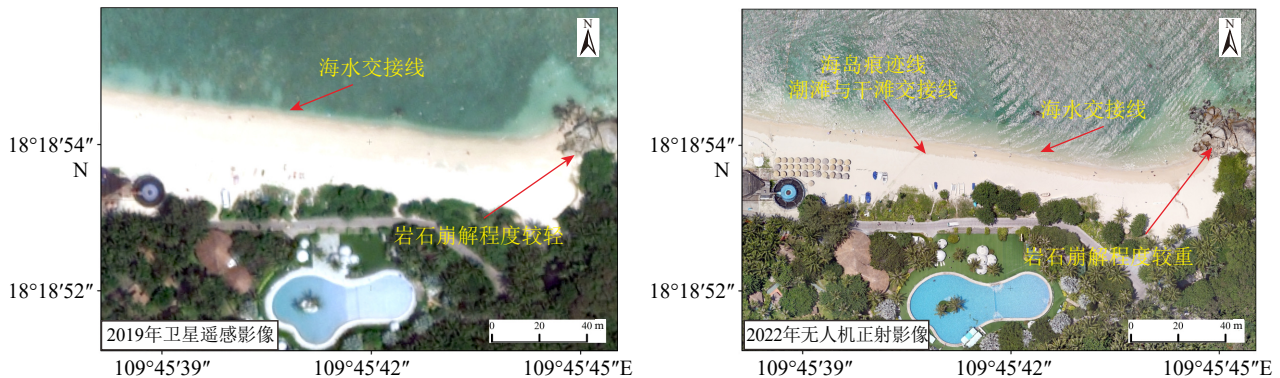


图 17 砂质岸段海岛痕迹线的识别

Fig.17 Identification of island trace line in sandy coastline

(图 14), 但由于分辨率的问题, 在卫星遥感影像上难以识别潮滩与干滩的交界线(图 17)。与卫星遥感影像相比, 海岛痕迹线的识别具有显著优势。

4.3 蜈支洲岛岸线形态的塑造因素

造成海岸线变化的主要因素包括气象、海浪作用、海平面上升等自然变化以及人工堤坝、围垦、采砂等人为活动^[40]。利用蜈支洲岛过往遥感影像数据, 经过处理、对比分析可以比较清晰获取海岛岸线变化情况。总体而言, 蜈支洲岛基岩岸线变化不大; 北部砂质岸线有淤积的倾向, 但受限于物源不足, 形态略有变化, 总体稳定; 变化较大的是蜈支洲岛西北角的砂质岸线(图 18)。

结合实地调查发现, 蜈支洲岛西北角变化较大的原因是人为开发行为与海浪侵蚀共同作用的结果。西北角是人工浴场所在地, 蜈支洲岛人工浴场经历了多次搬迁, 人为将海砂进行了搬运。

蜈支洲岛基岩岸线从 2005 年到现在总体形态变化不大, 显示了基岩岸线的稳定性。但在海浪、断裂和气象的长期共同作用下, 基岩岸线形态表现

出规律性特征。东南侧基岩岸线向海突出或凹陷的部分, 总体方位表现为 NW-SE 向; 而西南侧基岩岸线向海突出或凹陷部分, 总体方位为近 SN 向(图 18), 这与蜈支洲岛的线性断裂系统表现出来的特征基本一致, 表明断裂构造是控制蜈支洲岛基岩岸线形态的主控因素。亚热带气候的昼夜温差对基岩的风化作用(球状风化)以及海浪和潮汐的作用加剧了这一过程(图 6)。虽然海蚀作用时刻在发生, 但要观察到基岩岸线的显著变化, 在人为不干预及海平面较稳定的情况下, 需要更长的时间尺度。

5 结论与认识

(1) 蜈支洲岛主要发育 NW、NE 和近 SN 向 3 组线性断裂, 断裂面较陡直近于直立。断裂发育的早期表现为共轭“X”型剪切性质。燕山晚期(约 90 Ma), 海南岛南部在经历了强烈的区域性拉张作用, 导致基性岩浆上侵, 并形成辉绿岩墙群。

(2) 蜈支洲岛的主要土地利用类型包括: 乔木林地、灌木林地、裸岩石砾地(基岩海岸、自然景观)、建设用地(旅游设施、酒店、人文景观等)。以乔木林地、灌木林地和草地总面积, 计算蜈支洲岛的植被覆盖率约为 77.8%。蜈支洲岛的整体土地利用较好。但一些潜在旅游地质景观, 如海蚀柱、海蚀崖、基性岩墙群等还有待于进一步开发。

(3) 蜈支洲岛岛陆地质灾害主要包括岛岸崩塌、断裂活动、岸线侵蚀 3 种类型。本次工作应用无人机倾斜摄影成果有效识别出岛岸崩塌隐患点 5 处, 这些崩塌隐患点均被分布在旅游路线上, 风险性极大, 建议下步及时安装防护网或人工清除。识别出明显的断裂活动点 3 处(包括 2 处辉绿岩脉点), 断裂活动对旅游道路已造成明显的破坏, 下步随着海浪的侵蚀还会进一步加剧, 应尽早做好防

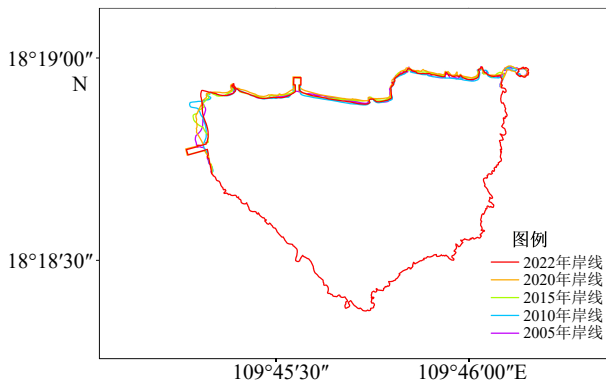


图 18 蜈支洲岛 2005 年以来岸线变化

Fig.18 The coastline changes of the Wuzhizhou Island since 2005

范。识别出岛滩侵蚀点7处,其中蜈支洲岛西北角的砂质岸线侵蚀点(图11-12)对海岛的生态地质和旅游地质带来较大影响,应尽早人工干预进行养护;对于基岩岸线的侵蚀,也需及时采取必要的养护手段,防止危及海岛旅游路线。

(4)无人机倾斜摄影测量在海岛综合地质调查中具有非常明显的优势,包括分辨率高、多维度信息提取、重点突出、低成本、安全可靠等。在海岛岸线(海岛痕迹线)识别、海岛地质灾害信息提取方面有独特优势。

参考文献 (References)

- [1] 龚旭峥, 高亚萍, 杨小央. 倾斜摄影实景三维技术在海岛调查中的应用[J]. *测绘技术装备*, 2020, 22(4): 69-70. [GONG Xuzheng, GAO Yaping, YANG Xiaoyang. Application of real 3D scene from tilt photogrammetry in island survey [J]. *Geomatics Technology and Equipment*, 2020, 22(4): 69-70.]
- [2] 卢汉明, 胡东平, 刘继东. 卫星遥感影像在海岛(礁)测图中的应用研究[J]. *海洋测绘*, 2015, 35(1): 70-72, 75. [LU Hanming, HU Dongping, LIU Jidong. Application of satellite remote sensing imagery in island/reefs mapping [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(1): 70-72, 75.]
- [3] 李亚萍. 高分辨率遥感影像海岛礁地表覆盖变化检测与分析[D]. 兰州交通大学硕士学位论文, 2015: 1-78. [LI Yaping. Change detection and analysis of surface coverage on Island and reefs via high resolution remote sensing image [D]. Master Dissertation of Lanzhou Jiaotong University, 2015: 1-78.]
- [4] 李晓敏, 马毅, 张杰, 等. 基于高分遥感的西沙群岛典型海岛时空变化分析[J]. *海洋通报*, 2020, 39(6): 717-729. [LI Xiaomin, MA Yi, ZHANG Jie, et al. Spatial and temporal dynamics of typical islands in the Xisha Islands using high-resolution satellite images [J]. *Marine Science Bulletin*, 2020, 39(6): 717-729.]
- [5] 刘志军. 无居民海岛及其人类活动特征遥感识别方法研究[D]. 武汉大学博士学位论文, 2010: 1-42. [LIU Zhijun. The study to the unhabitted islands and its human activity characteristics based on remote sensing [D]. Doctor Dissertation of Wuhan University, 2010: 1-42.]
- [6] 马毅, 张杰, 李晓敏, 等. 遥感技术应用于海岛保护与利用规划的可行性研究[J]. *海洋开发与管理*, 2009, 26(7): 92-95. [MA Yi, ZHANG Jie, LI Xiaomin, et al. On the feasibility of the application of remote sensing technology to island conservation and usage planning [J]. *Ocean Development and Management*, 2009, 26(7): 92-95.]
- [7] 许祝华, 张彦彦, 杨晖, 等. 海域无人机遥感监测三维立体监管系统的建设与研究[J]. *海洋开发与管理*, 2013, 30(6): 16-18. [XU Zhuhua, ZHANG Yanyan, YANG Hui, et al. Construction and research of three-dimensional monitoring system for remote sensing monitoring of marine drones [J]. *Ocean Development and Management*, 2013, 30(6): 16-18.]
- [8] 杨国东, 王民水. 倾斜摄影测量技术应用及展望[J]. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(1): 13-15, 18. [YANG Guodong, WANG Minshui. The tilt photographic measurement technique and expectation [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(1): 13-15, 18.]
- [9] 金伟, 葛宏立, 杜华强, 等. 无人机遥感发展与应用概况[J]. *遥感信息*, 2009(1): 88-92. [JIN Wei, GE Hongli, DU Huaqiang, et al. A review on unmanned aerial vehicle remote sensing and its application [J]. *Remote Sensing Information*, 2009(1): 88-92.]
- [10] 刘倩, 梁志海, 范慧芳. 浅谈无人机遥感的发展及其行业应用[J]. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(6): 167-169. [LIU Qian, LIANG Zhihai, FAN Huifang. The development of UAV remote sensing and its application in Geo-information related industries [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(6): 167-169.]
- [11] 杨燕明, 郑凌虹, 文洪涛, 等. 无人机遥感技术在海岛管理中的应用研究[J]. *海洋开发与管理*, 2011, 28(1): 6-10. [YANG Yanming, ZHENG Linghong, WEN Hongtao, et al. Application of UAV remote sensing technology in island management [J]. *Ocean Development and Management*, 2011, 28(1): 6-10.]
- [12] 方德涛, 刘珊珊, 张笑. 低空无人机遥感系统在海岛潮间带监测中的应用[J]. *北京测绘*, 2019, 33(1): 71-75. [FANG Detao, LIU Shanshan, ZHANG Xiao. Application of low altitude UAV remote sensing in intertidal zone monitoring of islands [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2019, 33(1): 71-75.]
- [13] 邓才龙, 刘焱雄, 田梓文, 等. 无人机遥感在海岛海岸带监测中的应用研究[J]. *海岸工程*, 2014, 33(4): 41-48. [DENG Cailong, LIU Yanxiong, TIAN Ziwen, et al. Application of UAV remote sensing in the monitoring of islands and coastal zones [J]. *Coastal Engineering*, 2014, 33(4): 41-48.]
- [14] 黄学富, 张宏胜, 孙福成. 三亚蜈支洲岛景区开发现状及发展对策分析[J]. *经济研究导刊*, 2021(2): 41-44. [HUANG Xuefu, ZHANG Hongsheng, SUN Fucheng. Analysis on the current situation and countermeasures of the development of Wuzhizhou Island scenic spot in Sanya [J]. *Economic Research Guide*, 2021(2): 41-44.]
- [15] 张晓浩, 黄华梅, 吴秋生, 等. 三亚市蜈支洲岛海岸侵蚀与沉积的定量分析[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(5): 51-56. [ZHANG Xiaohao, HUANG Huamei, WU Qiusheng, et al. Quantitative analysis of coastal erosion and deposition on Wuzhizhou Island of Sanya City [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(5): 51-56.]
- [16] 匡巧娟. 海南蜈支洲岛景观资源的保护与利用研究[D]. 海南大学硕士学位论文, 2018: 1-79. [KUANG Qiaojuan. The study of protection and utilization on landscape resources in Hainan Wuzhizhou Island [D]. Master Dissertation of Hainan University, 2018: 1-79.]
- [17] 马文刚, 夏景全, 魏一凡, 等. 三亚蜈支洲岛海洋牧场近岛区底表大型底栖动物群落结构及评价[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(3): 135-146. [MA Wen'gang, XIA Jingquan, WEI Yifan, et al. Community structure evaluation of epifaunal macrozoobenthos in the near-island waters of marine ranching in Wuzhizhou Island, Sanya [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(3): 135-146.]
- [18] Huang J Z, Wang F X, Zhao H W, et al. Reef benthic composition and coral communities at the Wuzhizhou Island in the south China sea: The impacts of anthropogenic disturbance [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 243: 106863.
- [19] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 39612-2020 低空数字航摄与数据处理规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. [State Administration of Market Supervision and Administration of the

- People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 39612-2020 Specifications for low-altitude digital aerial photography and data processing[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.]
- [20] 范诗玥, 张峰, 卢文虎, 等. 基于红黑树数据结构的海岸线无人机正射影像拼接研究[J]. *海洋通报*, 2016, 35(2): 132-139. [FAN Shi-yue, ZHANG Feng, LU Wenhui, et al. Study on the coastline orthophoto mosaic using UAV images based on red-black data structure [J]. *Marine Science Bulletin*, 2016, 35(2): 132-139.]
- [21] 闫焯琛, 高学飞, 于向吉, 等. 无人机倾斜摄影测量技术在地质灾害隐患调查中的应用研究[J]. *科技创新与应用*, 2022, 12(17): 193-196. [YAN Yechen, GAO Xuefei, YU Xiangji, et al. Research on the application of UAV oblique photogrammetry technology in the investigation of geological hazards [J]. *Technology Innovation and Application*, 2022, 12(17): 193-196.]
- [22] 张川, 赵志国, 赵向东, 等. POS辅助空三数据建立立体模型及精度检测[J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(2): 171-173. [ZHANG Chuan, ZHAO Zhiguo, ZHAO Xiangdong, et al. Three-dimensional model building and precision testing with data of POS supported aerial triangulation [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(2): 171-173.]
- [23] 郝思宝. 数字正射影像建库关键技术研究[D]. 南京师范大学硕士学位论文, 2007: 1-52. [HAO Sibao. Research on the key technologies of building digital orthophoto map database[D]. Master Dissertation of Nanjing Normal University, 2007: 1-52.]
- [24] 夏邦栋. 普通地质学[M]. 2版. 北京: 地质出版社, 1995. [XIA Bangdong. Physical Geology[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Press, 1995.]
- [25] 董荣. 花岗岩球状风化的形成机理新析[J]. *矿产与地质*, 2016, 30(5): 842-845. [DONG Rong. A new analysis of the formation mechanism of granite spherical weathering process [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2016, 30(5): 842-845.]
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21010-2017 土地利用现状分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 21010-2017 Current land use classification[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
- [27] 杜军, 李培英. 海岛地质灾害风险评价指标体系初建[J]. *海洋开发与管理*, 2010, 27(S1): 80-82. [DU Jun, LI Peiying. On the building of risk assessment system for geological hazards of island [J]. *Ocean Development and Management*, 2010, 27(S1): 80-82.]
- [28] 李拴虎, 刘乐军, 高伟. 福建东山岛地质灾害区划[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(8): 45-52. [LI Shuanhu, LIU Lejun, GAO Wei. Geo-Hazard classification in Dongshan Island of Fujian Province [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(8): 45-52.]
- [29] 李萍, 刘杰, 徐元芹, 等. 我国典型海岛主要地质灾害类型及防治措施[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(5): 60-64. [LI Ping, LIU Jie, XU Yuanqin, et al. Main geological disasters in typical Islands and preventive Measures in China [J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(5): 60-64.]
- [30] 徐元芹, 刘乐军, 李培英, 等. 我国典型海岛地质灾害类型特征及成因分析[J]. *海洋学报*, 2015, 37(9): 71-83. [XU Yuanqin, LIU Lejun, LI Peiying, et al. Geology disaster feature and genetic analysis of typical islands, China [J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(9): 71-83.]
- [31] 孙丽. 厦门海岸侵蚀淤积灾害及防治研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2017. [SUN Li. Study on disasters and prevention of erosion and sedimentation in Xiamen coast[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2017.]
- [32] 桂峰, 樊超. 海岛生态环境调查与评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2018: 1-13. [GUI Feng, FAN Chao. Ecological Environment Investigation and Evaluation of Islands[M]. Beijing: China Ocean Press, 2018: 1-13.]
- [33] 谢财富, 丁式江, 傅太安, 等. 乐东县幅(E49C002001东北角)、陵水县幅(E49C002002西北角)1: 25万区域地质调查报告[R]. 宜昌: 宜昌地质矿产研究所, 2004. [XIE Caifu, DING Shijiang, FU Taian, et al. 1: 250 000 Regional geological survey report of Ledong County mapheet (E49C002001, Northeast Corner) and Lingshui County mapsheet (E49C002002, Northwest Corner)[R]. Yichang: Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, 2004.]
- [34] 全国海岛资源综合调查报告编写组. 全国海岛资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1996: 91-115. [Compilation Group of the National Island Resources Comprehensive Survey Report. National Comprehensive Survey Report on Island Resources[M]. Beijing: China Ocean Press, 1996: 91-115.]
- [35] 张业明, 谢才富, 付太安, 等. 海南岛地质构造演化刍论[J]. *科学技术与工程*, 2005, 5(20): 1485-1487. [ZHANG Yeming, XIE Caifu, FU Taian, et al. Tectonic evolution of Hainan Island [J]. *Science Technology and Engineering*, 2005, 5(20): 1485-1487.]
- [36] 唐立梅, 陈汉林, 董传万, 等. 中国东南部晚中生代构造伸展作用: 来自海南岛基性岩墙群的证据[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1204-1216. [TANG Limei, CHEN Hanlin, DONG Chuanwan, et al. Late Mesozoic tectonic extension in SE China: evidence from the basic dike swarms in Hainan Island, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 1204-1216.]
- [37] 徐栋, 杨敏, 苗宇宏, 等. 基于无人机高光谱遥感的海岛岸线精准提取方法研究与应用[J]. *海洋科学*, 2020, 44(12): 54-60. [XU Dong, YANG Min, MIAO Yuhong, et al. Research and application of accurate extraction method of island shoreline based on hyperspectral remote sensing of unmanned aerial vehicle [J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(12): 54-60.]
- [38] 沈蔚, 王家为, 王林振, 等. 一种基岩海(岛)岸线自动提取新方法[J]. *上海海洋大学学报*, 2015, 24(6): 975-981. [SHEN Wei, WANG Jiawei, WANG Linzhen, et al. One new method of bedrock (island) coastline extraction [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, 24(6): 975-981.]
- [39] 常立侠, 冼嘉俊, 陈昌亮, 等. 海岛岸线界定标准及方法初探[J]. *海岸工程*, 2015, 34(2): 89-96. [CHANG Lixia, XIAN Jiajun, CHEN Changliang, et al. A preliminary study on the standard and method of Island coastline definition [J]. *Coastal Engineering*, 2015, 34(2): 89-96.]
- [40] 李刚, 万荣胜, 陈泓君, 等. 海南岛南部海岸线变迁及其成因[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(1): 48-54. [LI Gang, WAN Rongsheng, CHEN Hongjun, et al. Coastline changes and their origin in the southern Hainan Island [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(1): 48-54.]