

矿山地质环境遥感动态监测中的测绘技术分析

文 / 徐会芹 海南省地质环境监测总站

杨明明 海南省地质环境监测总站（通讯作者）

摘要：本次研究海南省白沙县 2024 年度矿山地质环境，采用无人机平台集成多光谱传感器、LiDAR 系统，科学优化飞行航线和高精度 POS 定位，实时获取矿区厘米级地形点云。基于数字高程模型 (DEM) 差分、归一化植被指数 (NDVI) 时序分析，精准识别了采场边界扩张、排土场堆叠、植被覆盖度下降等环境退化趋势。结合变化检测算法，量化评估了地形高程变化量和生态损毁范围，分析了矿山开采活动给地表形态、生态系统带来的动态影响。经过实践证明，该研究成果为白沙县矿山环境监管、生态修复工程规划、闭坑治理提供高精度的科学决策依据。

关键词：矿山地质环境；遥感动态监测；测绘技术；分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.114

引言

在国家大力推进生态文明建设战略背景下，矿山地质环境保护和生态修复已成为国土空间治理的关键议题。海南省白沙县作为重要的矿产资源区，其 2024 年度矿山地质环境面临采场扩张、植被破坏、地形扰动等严峻挑战，传统地面监测手段无法实现大范围、高频次的动态监管，亟需引入精准的测绘技术。而无人机遥感技术凭借其高时空分辨率、灵活机动、多数据融合能力，为矿山环境动态监测提供了创新性手段。通过搭载多光谱传感器和 LiDAR 系统，同步获取矿区地表的光谱特征，精细化感知地表沉陷、边坡稳定性、植被覆盖度、土地损毁状况。该技术不仅能够实时捕捉矿山开采活动引发的环境变化，识别潜在地质灾害风险，更为生态修复工程的规划、实施、成效评估提供了高精度的空间数据支撑，对于提升白沙县矿山精细化管理水平具有重要意义。

一、工程概况

2024 年度，对海南省白沙县纳入监测的 3 个典型矿山（分别处于正常开采、停产及闭坑治理状态）开展了基于野外调查、无人机航测（2024 年 9 月）的地质环境动态监测，监测范围覆盖龙江农场、七坊镇、牙叉农场等区域。成果显示，三座矿山累计占用及破坏土地总面积达 317,862 平方米，以林地损毁为主，其中开采区占 205,707 平方米。截至监测期，已经完成生态复垦 235,738 平方米，仍然有 82,124 平方米待修复，其中 C 石料石场已经建成封闭式加工区，全面落实“边开采、边治理”模式，并在 2024 年 4 月成功入选省级绿色矿山名录；A 建筑用花岗岩矿虽然没有被开采，但南侧边坡复绿效果相对较差，岩壁裸露，采坑底部填土未平整，存在严重的积水问题，生态恢复未达预期；另一 C 石场则已经全面完成生态修复并通过专家验收。本次监测为精准评估矿山环境现状、指导差异化治理、监管提供了详细的空间数据基础。

二、无人机遥感技术的基本原理

（一）无人机系统主要架构

无人机遥感系统由飞行平台、任务载荷、地面控制

站模块构成，形成一个完整的空基观测闭环。飞行平台作为系统的运载主体，集成了动力系统、机体结构、航电系统，其中动力系统直接决定了无人机的续航能力和最大有效载荷，如四旋翼平台在满载多光谱传感器时仍需保障 25 分钟以上的作业时间。航电系统是整个飞行控制的核心部件，包含飞行控制单元 (FCU)、惯性测量单元 (IMU)、高精度 GNSS 接收机，通过融合导航算法，将算法精准度提高到厘米级定位，有助于提高飞行轨迹的精确性。任务载荷即搭载的遥感传感器，是数据采集的直接工具，根据监测需求可配置高分辨率 RGB 相机、多光谱成像仪、热红外传感器，地面控制站通过数据链路，实时指挥无人机，其通信距离可达 5 公里，延迟低于 300 毫秒，有效保障了任务执行的可靠性（见图 1）。

（二）遥感技术工作原理

无人机遥感技术基于电磁波理论，利用机载传感器在非接触状态下，远距离、多波段地探测地物反射的电磁辐射能量，从而反演地表环境特征。其工作流程始于无人机按照预设航线对目标区域进行系统性航拍，传感器利用特定的空间分辨率采集地表的光谱信息，多光谱传感器通过分离可见光、近红外等波段，计算归一化植被指数 (NDVI) 等生物物理参数，科学评估植被覆盖度。而原始遥感影像在应用前必须经过严格的预处理，包括几何校正、辐射校正、大气校正，进一步提高数据的物理真实性，经过处理的影像数据可生成数字正射影像图 (DOM)、数字表面模型 (DSM)，为后续的地形变化检测提供高精度的空间信息基础。

三、矿山地质环境遥感动态监测中的测绘技术分析

（一）数据采集

1. 设备选型

为了精准获取海南省白沙县矿山地质环境的多维信息，选用了 DJI Matrice 300 RTK 无人机作为飞行平台，构成了集成 LiDAR、多光谱传感器为一体复合载荷系统，该平台具备 2.7kg 的最大有效载荷能力、15m/s 的可调飞行速度，满足复杂地形下的高效作业需求。在实际使用中，其应用优势在于搭载了高精度 GNSS-RTK 模

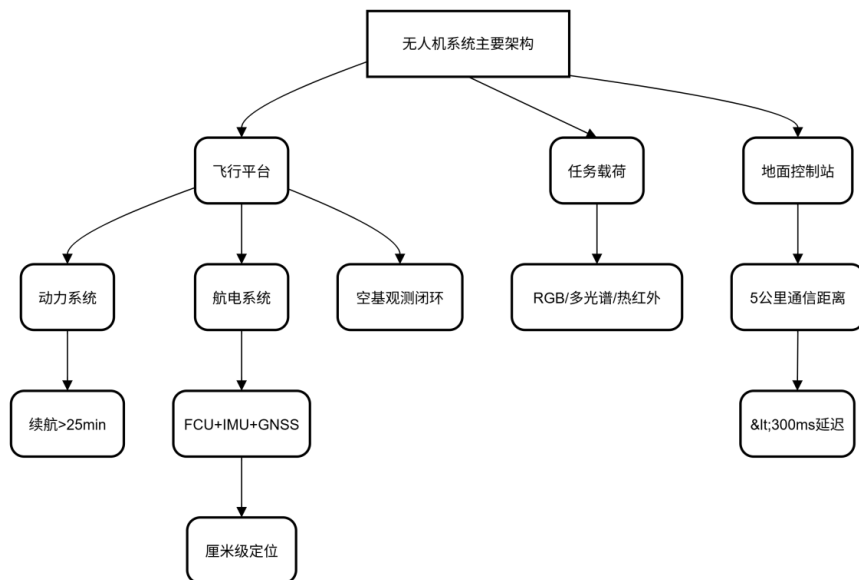


图1 无人机系统的主要架构

块、惯性测量单元 (IMU)，动态定位为厘米级，飞行路径重复执行误差控制在 0.5m 以内，为多时相数据的精确配准提供了坚实基础。L1 LiDAR 传感器可发射激光脉冲，通过测量回波时间生成高密度三维点云，空间分辨率达 1~5cm，能精确刻画采场边坡形态、排土场堆体体积、地表微小沉降。多光谱传感器涵盖蓝 (450-510nm)、绿 (530-590nm)、红 (640-680nm)、红边 (730-740nm)、近红外 (770-810nm) 五个波段，地面采样距离 (GSD) 为 0.5m，具备强大的地物识别能力，可基于光谱特征反演植被覆盖度、叶绿素含量，并辅助识别矿物风化带，为生态损毁评估提供数据源。

2. 路径规划

本次监测采用专业航测软件进行自动化航线设计，飞行高度设定为 120 米，此高度在保障多光谱影像 0.5m GSD 分辨率的同时，有效降低了大气散射对光谱数据的影响，且航线采用“蛇形” (Serpentine) 覆盖模式，沿着矿区长轴方向布设，有助于提高飞行轨迹的连续性。为了满足后期影像匹配、三维重建的精度要求，航向重叠率、旁向重叠率均设定为 30%，控制相邻影像间有足够的同名像点用于空三加密。针对矿区内地形起伏显著的特点，航线规划采用地形跟随 (Terrain Following) 模式，无人机根据预设的数字高程模型 (DEM) 实时调整飞行高度，始终保持传感器和地面高度在固定位置，从而保证影像的地面分辨率一致，避免出现图像缩放问题，确保数据的几何精度 (见图 2)。

飞行计划还充分考虑了野外作业的不确定性，系统预设了多个应急航点和备降方案，一旦遇到突发强风，无人机可自动切换至安全航线。在飞行过程中，地面控制站以 1Hz 的频率实时接收无人机的位置、姿态、电池电量、传感器状态等遥测数据，全程监控无人机飞行状态，若发现风速超出安全阈值，操作员可立即介入，手动调整航速，全面提高设备运行安全。



图2 无人机飞行路径示意图

(二) 数据预处理

1. 数据清洗

原始影像在采集过程中容易受到云层遮挡、大气湍流、光照不均、传感器抖动等因素影响，致使部分图像过于模糊。本研究采用基于深度学习的自动识别算法，批量筛查海量影像，精准识别并剔除非云覆盖超过 15% 或信噪比 (SNR) 低于 50 dB 的低质图像，剔除比例约为 10%。对于保留的有效数据，全面实施严格的影像质量评估，重点检测图像的清晰度、对比度、边缘锐度。为了提高地物特征的可辨识度，工作人员采用自适应对焦、非锐化掩模算法进行增强处理，处理后影像对焦精度由 0.30m 提升至 0.15m，锐化强度上升 50%，对比度、亮度分别优化 20% 和 10% (见表 1)，显著增强了地表纹理、植被边缘、人工构筑物的细节表现力，标准化控制数据质量，为后续高精度几何奠定了坚实基础。

表 1 图像自动对焦与锐化处理效果

参数名称	调整前值	调整后值	调整幅度 (%)
对焦精度 (m)	0.3	0.15	50
锐化强度	0.6	0.9	50
对比度调整	1	1.2	20
亮度调整	1	1.1	10

2. 图像校正

由于无人机在飞行过程中受到姿态角（俯仰、横滚、偏航）变化、风速扰动、镜头畸变等因素影响，原始影像存在明显的几何扭曲。为了纠正此类误差，本文采用区域网平差技术，布设不少于五个地面控制点，其平面坐标通过高精度 RTK 测量获取，点位误差严格控制在 0.1 米以内，且采用最小二乘法解算，将影像像素坐标和 GCPs 的地面坐标进行精确匹配，有效校正了由飞行姿态不稳产生的影像偏移。等到校正后，影像的绝对空间定位精度达到 ±0.3 米，满足矿山环境动态监测对空间一致性的严格要求，确保多时相影像能够精确叠加比对^[1]。

辐射校正则致力于消除非地物本身因素引起的光谱失真，太阳高度角变化、大气散射、气溶胶吸收会导致不同波段的辐射值发生系统性偏差，严重影响植被指数等定量反演的准确性。基于此，本研究采用 MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) 大气辐射传输模型，结合影像获取时的太阳天顶角、观测角度、大气参数，校正原始数字数值 (DN 值) 大气，反演地表真实反射率，有效消除了程辐射、大气衰减的影响，确保各波段的光谱反射率误差控制在 5% 以内。最后，基于校正后的几何辐射信息，将影像进行地理编码，投影至 WGS 84 地理坐标系，精确映射真实地理坐标^[2]。

(三) 数据分析

1. 地质环境特征分析

本研究综合利用高分辨率多光谱影像和 LiDAR 点云数据，提取矿山地质环境的精细化特征，多光谱传感器具备八个波段 (430 - 890nm)，空间分辨率达 0.4m，通过计算归一化植被指数 (NDVI) 定量评估地表生态状况：

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

式中，*NIR* 表示近红外波段 (~800nm) 的地表反射率；*Red* 为红光波段 (~670nm) 的反射率。NDVI 值域介于 -0.1 至 0.6，清晰反映了从裸露岩土 (NDVI<0.2) 到中等植被覆盖 (0.4<NDVI<0.6) 的空间分布格局。同时，基于 LiDAR 生成的 0.3m 精度数字高程模型 (DEM)，精确刻画了地形三维形态。DEM 分析表明，矿区西侧受到长期开采因素影响，造成地面沉降达 0.9m，而东侧地形稳定 (沉降<0.2m)。结合坡度分析，精准识别出多处坡度超过 30° 且植被覆盖率低 (NDVI<0.3) 的区域，构成潜在滑坡高风险区，为地质灾害预警提供了空间依据^[3]。

2. 变化趋势分析

为了研究矿山环境的动态演变，采用时间序列遥感

数据进行变化检测^[4]。基于季度获取的 0.4m 分辨率多光谱影像，计算差分归一化植被指数 (ΔNDVI)，量化评估植被覆盖的年际变化：

$$\Delta NDVI = NDVI_{current} - NDVI_{previous} \quad (2)$$

其中，*NDVI_{current}* 和 *NDVI_{previous}* 分别代表当前期与前期的 NDVI 值。分析显示，矿区中心区域 ΔNDVI 为 -0.2 至 -0.4，表明植被持续退化。同步的 LiDAR 数据差分表明，东北角区域五年内平均高程下降 1.1m，证实了地表塌陷的累积效应，进一步基于历史 NDVI、高程数据序列，采用线性回归模型预测未来趋势：

$$y = kx + b \quad (3)$$

式中，*y* 为预测变量，*x* 为时间变量，*k* 为变化斜率，*b* 为常数项。预测结果显示，若维持当前开采强度，未来两年西侧植被覆盖率将再降 15%，地形高程可能继续下降 0.5m。该预测模型为制定动态修复方案提供了科学决策支持^[5]。

结语

本研究通过数值模拟 / 现场沉降观测，验证了锚杆格梁护坡在增强路基边坡稳定性方面的应用效果。施加锚杆格梁后，边坡最大位移由 2.95cm 降至 1.0cm，下降幅度为 65%，变形集中区转移至一级边坡中部，路肩最大变形控制在 1mm 以内，有效抑制了剪应变发展，最大剪应变降至 1.14×10⁻³。沉降监测表明，路基在填筑后三周内完成主要沉降，最终累计沉降 1.9cm，变形趋于稳定，满足行业规范要求。该支护结构显著提升了边坡整体性，保障了路基薄弱区的长期安全稳定。

参考文献

[1] 李婷, 叶丽娟, 杨俊泉, 等. 内蒙古中西部矿山地质环境遥感调查 [J]. 自然资源遥感, 2025, (3): 45-53.

[2] 陈永生, 杨宗闪, 付方华, 等. 矿山地质环境调查中的高光谱遥感技术 [J]. 世界有色金属, 2025 (4): 229-231.

[3] 穆哲, 孙康平, 王纪珍. 高分辨率遥感影像在矿山地质环境动态监测中的关键技术研究 [J]. 世界有色金属, 2025 (8): 229-231.

[4] 张自祥. 矿山地质环境中遥感动态监测的测绘技术分析 [J]. 石材, 2025 (1): 4-6, 90.

[5] 杨敏, 傅炜舜, 聂兴信, 等. 高光谱遥感技术在矿山地质环境调查中的应用 [J]. 现代矿业, 2024, 40 (1): 48-52.

作者简介：徐会芹，女，1986 年出生，汉族，云南省大理州人，大学本科学历，水文地质工程地质环境地质工程师，多年来从事地下水调查、地质勘察、矿山地质环境动态监测、地质灾害预警等工作。

通讯作者：杨明明，男，1985 年出生，汉族，湖北省襄阳人，硕士研究生学历，水文地质工程地质环境地质高级工程师，多年来从事地下水调查、监测、地质灾害调查、评估、治理、矿山地质环境调查等工作。