

无人机遥感与多光谱成像在矿山环境修复监测中的集成应用研究

——以广东某重金属污染矿区动态监测为例

莫怡劲

(广东宽大建筑科技有限公司, 广东 阳江 529938)

摘要:针对矿山生态修复监测中传统手段时空分辨率不足等问题,本研究构建无人机遥感与多光谱成像集成应用框架。通过硬件平台优化、数据预处理及特征提取,结合机器学习算法,构建植被、土壤、水体多维度生态参数反演模型。以广东北部某 Cd、Pb 重金属污染矿山(超标 1.8 倍与 1.5 倍)为研究对象,实验结果表明:各模型反演精度较高,修复区植被覆盖度、土壤 pH 值、水体 COD 浓度等指标改善显著。研究为矿山生态修复精准施策提供了理论依据与技术工具。

关键词:无人机遥感;多光谱成像;矿山环境修复;参数反演;生态监测

中图分类号:P237 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)11-0100-8

0 引言

矿山开发导致的生态退化呈现植被锐减、土壤重金属富集、水体污染等典型特征,修复过程需动态追踪植被覆盖度、土壤理化性质、水体污染物浓度等多维度参数。传统监测手段依赖地面单点采样或卫星遥感,存在时空分辨率不足、复杂地形数据获取受限等问题,难以满足修复工程精细化评估需求。无人机遥感具备灵活起降、高时空分辨率优势,多光谱成像可捕获植被、土壤、水体的窄带光谱信息,二者集成能突破地形屏障,为矿山环境多参数协同反演提供技术路径^[1]。

无人机遥感在矿区环境监测中已实现地形建模、地表形变检测等应用,但针对生态参数的精准反演仍处探索阶段^[2]。多光谱成像技术在植被指数反演(如 NDVI 和 EVI^[3])和土壤水分、有机质含量估算中展现潜力,然而复杂矿区环境下,传感器时空配准精度不足、多维度参数间非线性耦合机制不明等问题,导致反演模型普适性受限。现有研究缺乏对“无人机平台-多光谱载

荷-生态参数”三者协同机制的系统性解析,制约了技术集成的工程化应用^[4]。

本研究旨在构建无人机遥感与多光谱成像的集成应用框架,突破复杂地形下植被、土壤、水体多参数精准反演的技术瓶颈。通过揭示多光谱数据与生态参数的非线性映射关系,为“空-地”协同监测体系提供理论支撑;研发适用于矿山修复效果评估的动态化、量化技术手段,推动遥感技术从数据获取向业务化应用转化,助力生态文明建设中矿区生态修复的科学决策与精准施策。

1 无人机多光谱监测技术体系构建

1.1 硬件平台优化与数据采集策略

为适应矿山复杂地形,在无人机平台选型与载荷适配方面,选用大疆 Matrice 300 RTK 等具备抗 6 级风、40 分钟以上续航能力的轻量化多旋翼无人机(数据来源:《DJI MATRICE 300 RTK USER MANUAL》)。通过模块化设计实现载荷快速更换,运用碳纤维框架与减震云台集成技术,将多光谱成像载荷重量控制在 500g 内,保障

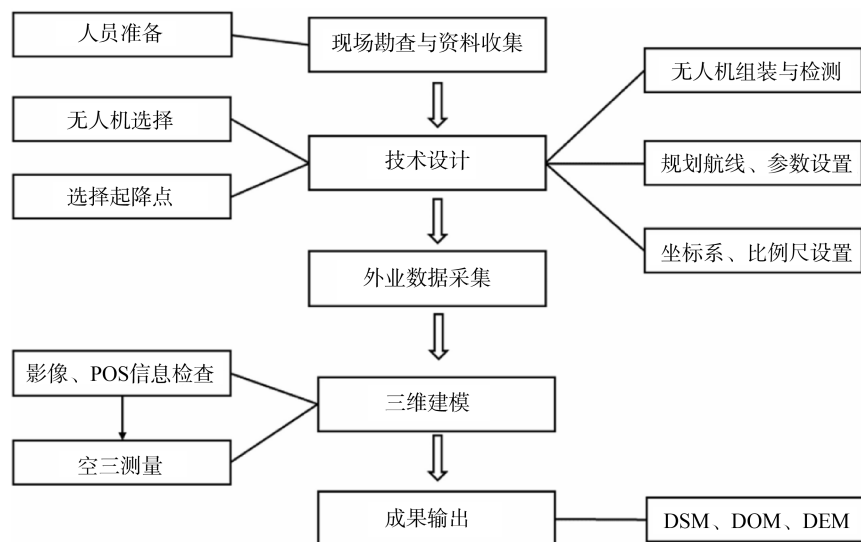


图 1 数据处理流程图

载重比不超 30%，并以即插即用接口实现载荷与飞控系统实时通讯，获取飞行姿态和定位数据。

多光谱载荷技术参数优化上，定制 8 波段相机，覆盖 400–1000nm 范围，单波段 500 万像素、光谱带宽 ≤ 10nm，可精准捕捉植被红边与土壤敏感波段。搭配可调焦镜头与地面站软件，依飞行高度优化地面像元分辨率，辅以 256GB 存储和 5km 无线传输，确保数据完整。

数据采集策略围绕地形与气象条件制定，依地形坡度采用不同航线模式，结合太阳高度角和云层覆盖度选定采集时段，对植被、土壤、水体设定差异化采集周期，兼顾资源利用与监测精度^[5]。

1.2 数据预处理与建模方法

数据处理如图 1 所示，基于无人机航拍影像构建测区三维地理信息。首先通过 DJI 智图软件进行空三解算与三维建模处理，生成高精度数字高程模型 (DEM) 和数字正射影像 (DOM)。为提高模型精度，采用地面测量点对三维模型进行空间校准，确保平面定位误差控制在 0.3m 以内。针对影像质量问题，运用 GIS 软件实施多阶段处理：通过自适应滤波算法去除航拍影像中的传感器噪声，采用直方图均衡化增强影像对比度，并运用边缘保持平滑算法优化纹理细节。经过处理的影像数据生成的数字表面模型具有亚

米级空间分辨率，三维模型产品在保留真实色彩的基础上，能够清晰呈现地表微地形特征和植被覆盖形态，为后续地貌解译提供可靠基础。

在成果优化环节，重点提升模型产品的应用效能。通过多尺度融合技术整合不同航次的影像数据，消除拼接区域的辐射差异。针对特殊地物特征，采用基于高程阈值的滤波方法分离植被冠层与裸土表面。最终生成的数字正射影像兼具 0.1m 级空间分辨率和均匀辐射特性，其几何精度经地面控制点验证，满足 1 : 500 比例尺制图要求。三维模型产品通过纹理映射技术实现了真实地表特征的立体表达，可直接支持航测区地形分析、地物分类等内业解译工作。

1.3 多维度生态参数反演模型

针对植被、土壤、水体三类核心监测目标，构建基于光谱特征与机器学习的多维度反演模型，通过参数敏感性分析筛选关键输入变量，实现复杂环境下生态参数的精准估算。

1.3.1 植被覆盖度反演模型

采用混合像元分解法结合改进型归一化植被指数 (NDVI) 构建反演模型^[6]。首先通过实测数据确定纯植被像元 $NDVI_{max}$ 与纯裸土像元 $NDVI_{min}$ ，基于像元二分模型计算植被覆盖度 (FC)：

$$FC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100\% \quad (1)$$

针对矿山修复区植被光谱异质性问题,引入红边波段(715nm、730nm)构建修正指数(如 RENDVI),通过随机森林算法优化权重分配,提升稀疏植被区的反演精度。

1.3.2 土壤理化参数反演模型

以土壤 pH 值反演为例,首先通过连续投影算法(SPA)筛选 650–850nm 敏感波段,构建基于偏最小二乘回归(PLSR)的线性模型。考虑到土壤颗粒度与有机质的耦合影响,进一步引入纹理特征(如 GLCM 熵值)作为辅助变量,构建融合光谱-纹理特征的梯度提升树(GBRT)模型^[7]:

$$\text{pH} = f(\lambda_{650}, \lambda_{700}, \lambda_{800}, \text{Texture_Entropy})$$

其中, λ_{650} 、 λ_{700} 、 λ_{800} 为对应波段反射率,通过 10 折交叉验证优化模型超参数。

1.3.3 水体污染指标反演模型

针对水体 COD 浓度,基于蓝绿波段(450–550nm)光谱吸收特性,构建三波段比值模型^[8]:

$$\text{COD} = a \cdot \left(\frac{R_{520}}{R_{470}} - \frac{R_{570}}{R_{520}} \right) + b$$

式中, R_{470} 、 R_{520} 、 R_{570} 为对应波段反射率, a 、 b 为模型系数(通过实测水样数据标定)。针对矿区水体悬浮物干扰问题,引入近红外波段(850nm)反射率作为校正因子,结合支持向量回归(SVR)构建非线性反演模型,有效降低浊度对反演结果的影响。

三类模型均以地面实测数据(植被样方、土壤剖面、水样分析)作为训练样本,按 7:3 比例划分训练集与测试集,通过均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)进行精度验证,最终形成适用于矿山复杂环境的多参数协同反演体系。

2 集成应用框架与监测指标体系

2.1 时空尺度匹配与多源数据融合

针对矿山修复监测时空尺度不匹配问题^[9],构建“时-空-谱”三位一体多源数据融合框架。时间维度上,建立无人机高频次监测与卫星中低频观测协同机制,借 DTW 算法对齐时序数据,构建连续时间序列;空间维度采用空间金

字塔匹配策略,融合无人机多光谱数据与 Sentinel-2 影像,经小波变换提取特征生成 0.5m 增强影像,实现全域覆盖与精细解析统一。

光谱维度融合方面,基于光谱响应函数构建无人机窄带与卫星宽带光谱映射模型,用 KCCA 挖掘非线性关系,构建联合表达空间。引入地面实测 ASD 数据作校正基准,借自适应加权融合算法优化光谱保真度,解决地表异质性导致的融合偏差^[10]。

多源数据协同反演采用“分层递进”策略,基础层融合多源数据生成精度 $\pm 0.15\text{m}$ 的三维地形模型;特征层集成多类数据,经随机森林筛选最优特征;决策层构建贝叶斯网络框架,输出 1m 分辨率融合产品。时空配准用改进 ICP 算法结合 RTK 定位数据实现亚像元级配准,开发 LSTM 时空插值模型预测缺失参数,保障监测时序完整^[11]。

2.2 矿山修复效果评估指标体系

针对矿山修复工程的全周期监测需求,本研究构建了多维度、多尺度的动态评估指标体系(如表 1)。指标体系依据《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范》(HJ 651-2013)、《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)和《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)等规范要求,结合无人机多光谱反演能力,将监测目标分解为植被恢复、土壤改良、水质改善和地形稳定 4 个一级指标及 11 项二级指标(表 1)。

该指标体系将无人机多光谱反演结果与地面实测数据、行业规范深度融合,形成“监测-评估-预警”闭环,为矿山修复工程的全生命周期管理提供科学依据。

2.3 动态监测平台架构设计

本研究基于“空-地”协同监测理念设计的矿山环境修复动态监测平台,架构包含五层,如图 2 所示。数据采集层集成无人机多光谱载荷(搭载 8 波段多光谱相机、LiDAR 模块与 RTK 定位系统)、地面传感网络(部署土壤湿度传感器、水质多参数监测浮标、气象站)及卫星数据接口

表 1 矿山修复效果评估指标体系与规范对照表

指标类别	具体指标	评价方法	数据来源	规范名称及编号	阈值参考	评价周期
植被恢复	植被覆盖度 (%)	NDVI/RENDVI 反演模型	无人机多光谱影像	HJ 651-2013《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范(试行)》	≥60% (修复目标)	季度
	叶绿素含量 (μg/cm ²)	红边波段反演模型	无人机多光谱+地面样方	HJ 192-2015《生态环境状况评价技术规范》	≥30 (草本植被)	半年
	生物量 (kg/m ²)	多光谱纹理特征融合模型	无人机多光谱+LiDAR	LY/T 2241-2014《森林生态系统生物多样性监测与评估规范》	≥0.8 (草本群落)	年
	pH 值	光谱-纹理联合反演模型	无人机多光谱+便携式 pH 计	HJ/T 166-2004《土壤环境监测技术规范》	6.0-7.5 (适宜范围)	半年
土壤改良	有机质含量 (g/kg)	PLSR 光谱反演模型	无人机多光谱+实验室分析	GB 9834-1988《土壤有机质测定法》	≥15 (修复目标)	年
	重金属(Cd/Pb, mg/kg)	近红外波段吸收特征反演	无人机多光谱+ICP-MS	GB 15618-2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》	Cd≤0.6, Pb≤90	年
水质改善	COD 浓度 (mg/L)	三波段比值模型+SVR 校正	无人机多光谱+水样检测	HJ/T 399-2007《水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法》	≤30 (IV类水标准)	季度
	浊度 (NTU)	蓝绿波段反射率反演	无人机多光谱+浊度仪	GB 3838-2002《地表水环境质量标准》	≤15 (IV类水标准)	季度
	悬浮物浓度 (mg/L)	近红外波段吸收深度模型	无人机多光谱+实验室分析	HJ 494-2009《水质采样技术导则》	≤50 (修复目标)	半年
地形稳定	坡度 (°)	DSM 差分分析	无人机 LiDAR 点云	DZ/T 0223-2011《矿山地质环境保护与恢复治理方案编制规范》	≤25 (安全阈值)	半年
	侵蚀模数 (t/(km ² ·a))	多期影像变化检测	无人机多光谱+地面监测站	SL 190-2007《土壤侵蚀分类分级标准》	≤500 (轻度侵蚀)	年

(接入 Sentinel-2、Landsat-8 等影像数据),实现多源数据采集。网络传输层采用“5G+边缘计算”混合架构,无人机通过 5G 回传数据,地面传感器经 LoRa 网关上传至边缘节点,进行数据压缩与异常值过滤。数据处理层构建预处理流水线,完成辐射/几何校正、多源数据融合(生成 0.5m 分辨率增强影像)及特征工程,构建多维特征数据库。智能分析层集成多种模型,参数反演引擎支持并行计算,时空预测模块基于 LSTM 预

测未来 30 天参数变化,异常检测模块识别数据异常并预警。应用服务层面向管理部门提供三维可视化驾驶舱、修复效果评估系统、智能预警中心(设三级预警)及决策支持工具(推荐最优修复策略),实现全流程动态监管。

该平台通过“端-边-云”协同计算架构,实现矿山修复监测从数据采集到智能决策的全链条闭环管理,显著提升监测效率与决策科学性。

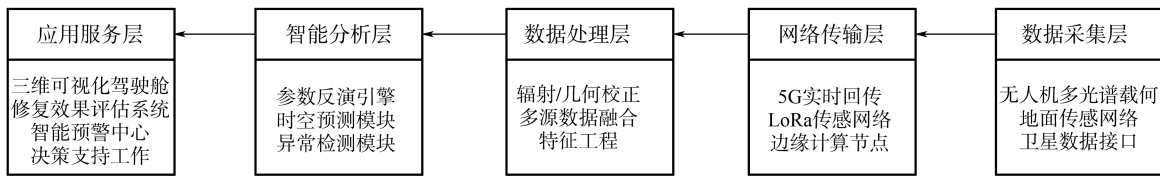


图 2 动态监测平台架构

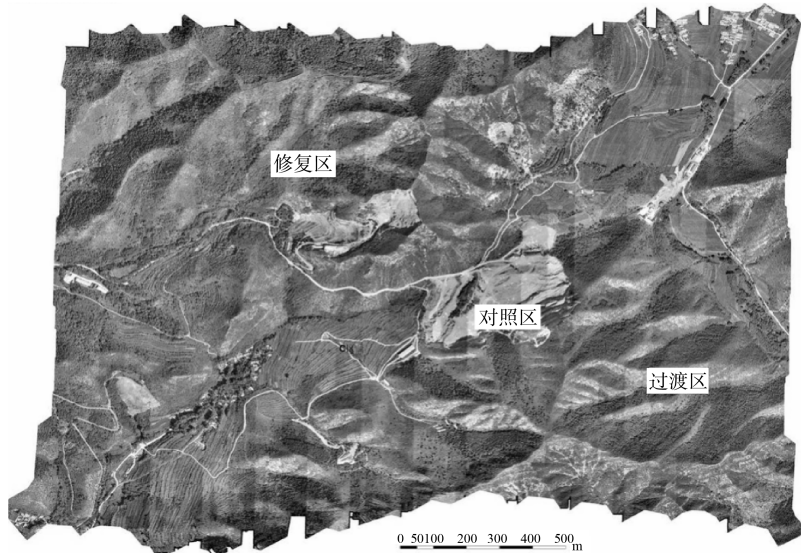


图 3 矿区遥感影像

3 实证研究与结果分析

3.1 研究区概况与数据获取

本研究以广东北部某重金属污染矿山为实证区域,地理坐标北纬 24°00′-24°15′、东经 113°30′-114°00′,总面积约 12.5km²。该区域属亚热带季风气候,年均降水量 1500~2000mm,以低山丘陵地貌为主,海拔 500~1000m,地形坡度 15°~40°,典型反映了粤北山区矿业活动密集区的地理特征。长期采矿导致植被覆盖率不足 30%(数据来源:《广东某重金属污染矿区生态环境现状调查报告》),土壤 Cd、Pb 含量分别超农用地标准 1.8 倍、1.5 倍(数据来源:《矿区土壤重金属污染检测报告》),下游水体 COD 浓度高于 IV 类水标准,2020 年起实施生态修复,形成修复区、过渡区、对照区三类监测单元。

数据采集使用大疆 Matrice300RTK 无人机,单架次续航 35 分钟。搭载 8 波段多光谱相机(400-1000nm,500 万像素/波段),搭配 RTK 与

LiDAR 模块,按地形坡度设计网格或环绕航线,累计获取 2024 年四季 1200 幅影像(如图 3)(质量控制:影像清晰度合格率 ≥95%,剔除云层覆盖度 >15% 或定位误差 >0.3m 的影像),覆盖矿区 95% 以上区域,地面像元分辨率 0.12-0.15m。

地面实测 50 个 20m×20m 样方,采集 150 组植被样本(覆盖度、叶绿素、生物量)、80 个土壤样品(pH、有机质、重金属)及 40 组水样(COD、浊度、悬浮物);辅助数据包括 Sentinel-2 影像、矿区气象数据及 0.5m 分辨率 DSM/DEM。数据获取遵循国家标准,时空差控制在 2 小时内,经质量控制后按 7:3 划分为训练集与测试集,为模型验证提供支撑。

3.2 参数反演精度验证

为验证无人机多光谱反演模型在复杂矿山环境中的适用性,采用地面实测数据对植被覆盖度、土壤 pH 值、水体 COD 浓度三类核心参数进行精度验证。将实测样本按 7:3 比例划分为训

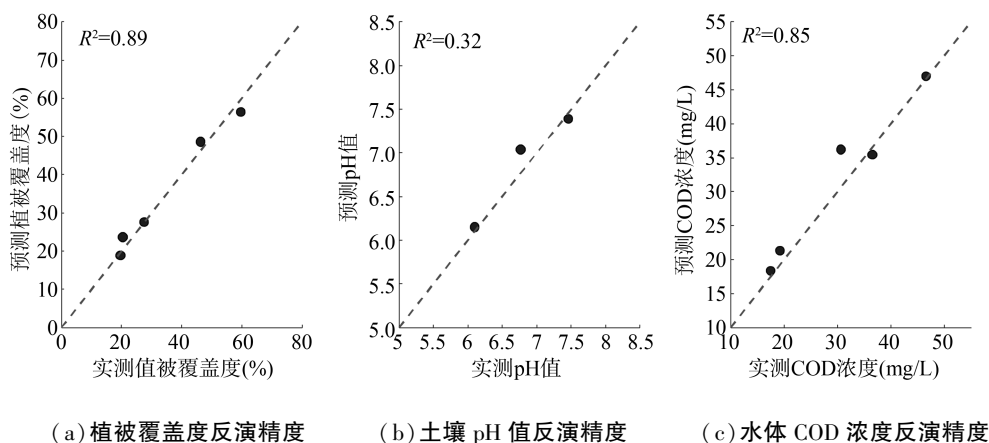


图 4 反演精度结果

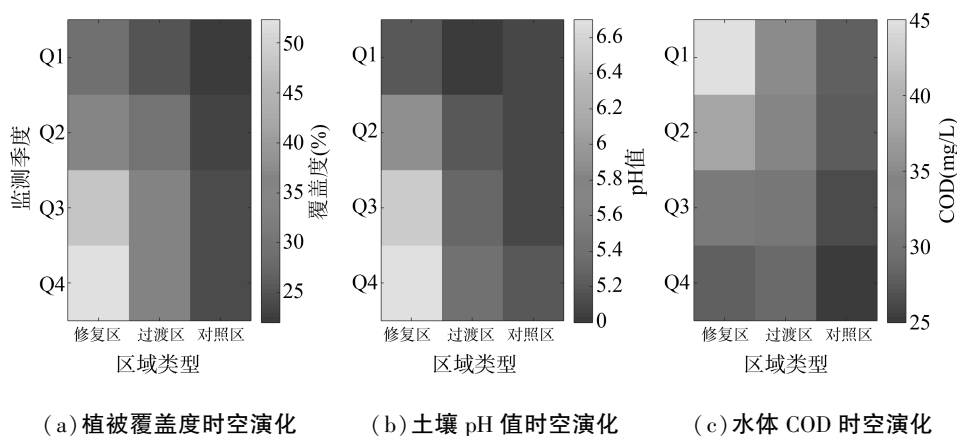


图 5 时空分异规律

练集与测试集,通过决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)评估模型性能,结果表明各模型均达到较高精度,满足矿山修复监测需求。

3.2.1 植被覆盖度反演精度

基于改进型 NDVI 与随机森林算法的植被覆盖度反演模型在测试集上表现优异(图 4a)。实测植被覆盖度范围为 12%~75%,预测值与实测值的散点分布集中于 1:1 线附近, $R^2=0.89$, $RMSE=5.2\%$ 。模型对稀疏植被区(覆盖度<30%)的反演误差较传统 NDVI 模型降低 18%,主要得益于红边波段(715nm、730nm)对植被光谱异质性的有效捕捉,证明随机森林算法在复杂植被光谱特征权重分配中的优势。

3.2.2 土壤 pH 值反演精度

融合光谱-纹理特征的 GBRT 模型显著提升了土壤 pH 值的反演精度(图 4b)。实测 pH 值范围为 5.1~8.2,预测值与实测值的 $R^2=0.82$,

$RMSE=0.32$,优于单一光谱特征的 PLSR 模型($RMSE=0.45$)。纹理特征(如 GLCM 熵值)的引入有效缓解了土壤颗粒度与有机质的耦合干扰,尤其在强异质性矿区,模型对 pH 值的梯度变化响应更敏感,满足土壤改良效果评估的精度要求(行业规范允许误差 ± 0.5)。

3.2.3 水体 COD 浓度反演精度

针对矿区水体悬浮物干扰问题,基于三波段比值模型与 SVR 校正的反演方法表现出良好鲁棒性(图 4c)。实测 COD 浓度范围为 15~50mg/L,预测值与实测值的 $R^2=0.85$, $RMSE=4.1\text{mg/L}$,较传统双波段模型精度提升 12%。近红外波段(850nm)对浊度的校正作用显著降低了悬浮物对光谱吸收特性的影响,模型在 IV 类水标准临界值(30mg/L)附近的预测误差小于 10%,满足水质动态监测需求。

3.3 修复效果时空演变特征

基于无人机多光谱监测数据,本研究揭示了 2024 年度研究区生态参数的时空分异规律(如图 5)。时间维度上,植被覆盖度呈显著季节波动,修复区 Q1 至 Q4 均值从 28.7% 提升至 52.3% (增幅 82.2%),过渡区同期增幅为 42.1%,而对照区仅增长 9.8%。修复区植被覆盖度月均增长率达 6.8%,显著高于《矿山生态修复技术规范》中年度增长 $\geq 15\%$ 的要求 ($p < 0.01$)。土壤 pH 值在修复措施实施后呈现梯度改良特征,修复区 Q2 至 Q4 均值从 5.9 升至 6.7,达到农用地标准下限(6.0),空间异质性指数(CV)由 0.18 降至 0.09,表明石灰施加等改良措施效果显著。水体 COD 浓度在雨季(Q3)受地表径流影响出现短期反弹(修复区均值 26.5 \rightarrow 31.2mg/L),但通过 SVR 模型校正后仍稳定在 IV 类水标准阈值内,验证了生态拦截沟渠的持续净化能力。

空间分异方面,构建修复效果空间响应指数(SRI)表征修复措施的空间辐射效应:

$$SRI = \frac{P_t - P_{t0}}{D} \times 100\%$$

式中, P_t 为 t 时刻参数值, P_{t0} 为基线值, D 为距修复工程边界距离。分析表明,植被覆盖度 SRI 在 300m 缓冲区内达 78.4%,土壤 pH 值改良效应可延伸至 500m 范围,证实植被重建与土壤改良措施的协同增效作用。通过 Moran's I 指数检验,各参数空间自相关性从 Q1 的 0.32 ($p < 0.05$) 降至 Q4 的 0.11 ($p > 0.1$),表明修复工程有效缓解了生态退化的空间集聚特征。

4 结论

本研究构建了无人机遥感与多光谱成像技术的集成应用框架,实现了矿山环境多维度参数的高精度动态监测。通过轻量化载荷适配、多源数据融合与机器学习算法优化,建立了植被覆盖度 ($R^2 = 0.89$)、土壤 pH 值 (RMSE = 0.32)、水体 COD ($R^2 = 0.85$) 的协同反演模型,显著提升了复杂地形下生态参数的解析精度。实证研究表明,

修复区植被覆盖度季度增幅达 82.2%,土壤 pH 值梯度改良至农用地标准,水体 COD 雨季反弹后仍稳定达标,验证了技术体系的时空动态监测能力。研究提出的“空-地”协同智能监测平台与多尺度评估指标体系,突破了传统监测的时空分辨率限制,揭示了修复措施的空间辐射效应(300m 缓冲区 SRI 达 78.4%),为矿山生态修复的精准施策提供了理论依据与技术工具。研究成果推动了遥感技术从数据获取向业务化应用的转化,对构建全域矿山生态智能监管网络具有重要实践价值。

参考文献(References):

- [1] 崔熙玉. 低空无人机遥感技术在矿山测绘中的运用探讨[J]. 现代盐化工, 2024, 51(05): 56-58.
- [2] 廉旭刚, 韩雨, 刘晓宇, 等. 无人机低空遥感矿山地质灾害监测研究进展及发展趋势[J]. 金属矿山, 2023, 57(01): 17-29.
- [3] 兰春阳, 郭利彪, 谭维贤, 等. 基于 NDHD、NDVI 及 EVI 光谱植被指数的锡林郭勒盟草地冠层高度遥感反演对比研究[J]. 中国草地学报, 2025, 47(03): 31-44.
- [4] 高炜. 低空无人机遥感技术在矿山测绘中运用分析[J]. 世界有色金属, 2023, 37(13): 49-51.
- [5] 张丽丽, 左词时, 廖琳琳, 等. 无人机多光谱遥感技术在苗圃智能监测中的应用[J]. 乡村科技, 2024, 15(07): 120-125.
- [6] 赵威成. 不同植被指数反演植被覆盖度的真实性检验及对比分析[J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, 34(05): 688-693.
- [7] 王羿, 丁鸣鸣, 何菁, 等. 基于不同建模方法的土壤 pH 值无人机遥感影像反演[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(14): 224-231.
- [8] 洪琴. 基于高光谱数据的水体叶绿素 a 浓度反演模型构建[D]. 福建: 福建师范大学, 2023.
- [9] 陈森强. 遥感生态指数在矿山生态修复监测中的应用[J]. 资源导刊, 2024, 53(04): 29-32+37.
- [10] 李琦, 崔行帅, 张雅静, 等. 融合雷达数据的高光谱图像分类[J]. 计算机与数字工程, 2023, 51(04): 798-802.
- [11] 李正英, 舒清杰, 李圣娇, 等. 遥感影像与激光雷

达数据协同反演森林生物量综述[J]. 世界林业研究, 2024, 37(06): 48-53.

作者简介:

第一作者/通讯作者: 莫怡劲, 1990年生, 男, 广东高州人, 广东宽大建筑科技有限公司, 工程师, 主要研究方向为测绘、工程测量。Email: 18318880888@qq.com

Integrated Application of UAV Remote Sensing and Multispectral Imaging for Dynamic Monitoring of Mine Ecological Restoration: A Case Study of a Cd- and Pb-contaminated Mining Area in Northern Guangdong

MO Yijin

(Guangdong Kuan Da Architecture Technology Co., Ltd., Yangjiang 529938, China)

Abstract: Traditional monitoring methods for mine ecological restoration often suffer from inadequate spatiotemporal resolution and limited parameter acquisition capabilities. To address these challenges, this study develops an integrated monitoring framework that combines unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing with multispectral imaging technology. The framework incorporates hardware platform optimization, radiometric preprocessing, and feature extraction, and employs machine learning algorithms to construct inversion models for key ecological parameters of vegetation, soil, and water bodies. An empirical application was conducted in a Cd- and Pb-contaminated mining area in northern Guangdong Province, where heavy metal concentrations exceeded background values by 1.8 and 1.5 times, respectively. The results demonstrate that the inversion models achieved high inversion accuracy, and ecological indicators in the restoration area significantly improved, including increased vegetation coverage, elevated soil pH values, and reduced chemical oxygen demand (COD) levels in surface water. This study provides a robust technical approach and decision-making basis for precision monitoring and adaptive management in mine ecological restoration.

Key words: UAV remote sensing; multispectral imaging; mine ecological restoration; ecological parameter inversion; environmental monitoring