

基于高光谱与 LiDAR 融合的尾矿库 Pb 元素浓度反演

刘福江^{1,3}, 李博¹, 林伟华^{1,3*}, 郭艳², 朱哲¹, 王勉之¹

1. 中国地质大学（武汉）地理与信息工程学院，湖北武汉 430078

2. 中国地质大学（武汉）计算机学院，湖北武汉 430074

3. 中国地质大学区域生态过程与环境演变湖北省重点实验室，湖北武汉 430078

摘要: 尾矿库是重金属迁移与富集的高风险区域, 其受胁迫植被在光谱特征与冠层结构上表现出显著响应。本研究融合机载高光谱影像与 LiDAR 点云数据, 构建多源特征体系, 提取光谱与三维结构参数共 112 项, 并通过相关性分析与 ReliefF 方法筛选出 10 个关键特征, 建立多种反演模型进行对比。结果表明, 多源特征融合能够从生理与结构两个层面刻画 Pb 胁迫特征, 显著提升模型对复杂污染信号的表达能力, 其中 ReliefF-RF 模型表现最优。空间反演结果显示, Pb 高值区主要分布于一、二号尾矿库内部及其东南缘低洼区域, 与地形汇流路径高度一致。研究结果为尾矿区重金属污染监测与生态风险评估提供了可行的技术路径。

关键词: 高光谱遥感; 重金属污染; 尾矿库监测; 特征优化; ReliefF-RF

中图分类号: X87

收稿日期: 2025-09-15

Inversion of Heavy Metal Pb Concentration in Tailings Areas Based on Hyperspectral and LiDAR Multi-Source Data Fusion

Liu Fujiang^{1,3}, Li Bo¹, Lin Weihua^{1,3*}, Guo Yan², Zhu Zhe¹, Wang

Mianzhi¹

1 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

基金项目: 遥感科学国家重点实验室开放基金资助(编号: 6142A01210404); 湖北智能地理信息处理重点实验室(项目编号: KLIGIP-2022-B03); 云南省元阳县大坪金矿床成矿模式与矿化预测研究(项目编号: 2022026821); 中国科学院西南生态与环境研究所可持续发展研究项目(项目编号: CAS-ANSO-SDRP-2024-01); 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费资助项目(项目编号: 2025XLA58); 国家自然基金火星大地基准与正常重力场研究项目(项目编号: 42374051)

作者简介: 刘福江(1973-), 男, 博士, 中国地质大学(武汉)副教授, 主要从事环境遥感方面的研究, E-mail:liufujiang@cug.edu.cn; 李博(2002-), 男, 硕士, 毕业于中国地质大学(武汉), 研究方向为高植被覆盖遥感找矿模型研究。E-mail: Libobo@cug.edu.cn

2 School of Computer Science, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

3 Hubei Key Laboratory of Regional Ecology and Environmental Change, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

Abstract: Tailings reservoirs are high-risk areas for the migration and accumulation of heavy metals, and vegetation under stress exhibits pronounced spectral and canopy structural responses. This study integrates airborne hyperspectral imagery and LiDAR point-cloud data to construct a multi-source feature set, extracting a total of 112 spectral and three-dimensional structural parameters. Key features were further reduced to 10 through correlation analysis and the ReliefF method, and multiple inversion models were established for comparison. The results indicate that multi-source feature fusion captures Pb stress characteristics from both physiological and structural perspectives and significantly enhances the model's ability to represent complex pollution signals, with the ReliefF-RF model achieving the best performance. Spatial inversion results show that high Pb concentrations are mainly distributed within the first and second tailings reservoirs and in low-lying areas along their southeastern margins, which are highly consistent with terrain flow paths. The proposed approach provides a feasible technical pathway for heavy-metal pollution monitoring and ecological risk assessment in tailings areas.

Keywords: hyperspectral remote sensing; heavy metal pollution; tailings monitoring; feature optimization; ReliefF-RF

0 引言

随着工业化和城市化的快速发展,重金属污染已成为全球性的突出环境问题。矿业生产过程中产生的尾矿库常富集大量有毒重金属元素,一旦管理不当,污染物可通过风蚀、水蚀及渗透作用向周边土壤与地下水扩散(Dai et al., 2021),在极端天气或尾矿库破损事故中更会加速迁移,进而威胁下游农业生产与居民饮水安全(Akoto et al., 2023; Briffa et al., 2020; Wang et al., 2022a)。尾矿库作为重金属迁移与累积的高风险区域(Chen et al., 2018),其表层植被常表现出显著的生理、生化胁迫特征,成为监测环境污染的重要指示生物。

传统的重金属检测依赖 AAS、ICP-MS 等实验分析方法,虽然精度高,但存在采样稀疏、周期长、成本高及难以覆盖复杂地表环境等局限(Wang et al., 2022),在污染呈强空间异质性的尾矿库环境中难以满足大范围快速监测需求 (Tao et al., 2019 ; 成永生等, 2021)。遥感技术具有大范围、非接触、高效率等优势,为尾矿区重金属推断提供了新的可能(杨汉水等, 2025)。前人研究表明,红边参数、植被指数及连续统去除特征在识别污染胁迫方面具有良好表现(Habashi et al., 2024; Hu et al., 2025)。然而,高光谱数据主要反映植被生化信息,对结构变化敏感性有限,尤其在轻度胁迫条件下,其表征能力仍存在不足(Shi et al., 2025)。

LiDAR 作为获取植被三维结构的重要手段,可有效刻画冠层高度、密度分布及层间结构,在植被健康监测、生物量估算和环境胁迫识别方面具有显著优势(Chen et al., 2023)。相关研究表明,重金属胁迫常导致植被冠层稀疏、叶片脱落等形态退化特征,并可在点云高度分布与密度变化中得到反映(刘正盛等, 2025; 陈哲锋等, 2025; 陈刚等, 2024)。因此,将高光谱的生化敏感性与 LiDAR 的结构敏感性进行融合,可从生理与形态双重尺度增强植被胁迫的综合表征能力。近年来,高光谱与 LiDAR 多源融合已在植被生化参数估算、森林健康监测和矿区环境评估等领域展现出优越性,不仅能够缓解光谱饱和与混合像元问题,还

显著提升了胁迫识别的稳健性和空间适用性 (Modzelewska et al., 2020; 陈彪等, 2023)。然而, 针对尾矿库植被重金属胁迫的光谱、结构融合反演研究仍较为缺乏, 特征选择体系与模型构建方法亦有进一步优化空间。

在模型方法方面, 支持向量回归 (SVR)、随机森林 (RF) 等机器学习模型在小样本、高维特征条件下表现稳定, 已广泛应用于环境遥感与植被生理参数反演(Bai et al., 2018; Cheng et al., 2019)。相比之下, 深度学习模型如 Transformer 虽具备强特征表达能力, 但在样本规模有限的条件下容易产生过拟合, 难以充分发挥优势(Jaffari et al., 2024, Chen et al., 2025.)。针对尾矿库区域高维特征与有限样本并存的特点, 合理的特征降维与筛选尤为重要。ReliefF 能够处理多维、非线性交互特征, 并在生态遥感反演中展现出良好的稳定性与鲁棒性 (Liu et al., 2025 ;Urbanowicz et al., 2018), 为构建高精度、低过拟合风险的重金属胁迫反演模型奠定了可靠基础。

基于此, 本研究以湖北秭归月亮包金矿尾矿库为案例, 利用机载高光谱影像与 LiDAR 点云构建光谱—结构融合特征集, 通过 Pearson 与 ReliefF 选择关键特征, 比较 SVR、RF、Transformer 与 ReliefF - RF 的反演能力, 并分析 Pb 空间分布特征, 旨在构建适用于尾矿库复杂胁迫环境的精确反演模型, 为区域重金属监测与生态风险评估提供理论与技术支撑。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

本研究选取的研究区为湖北省宜昌市秭归县茅坪镇拐子沟的月亮包金矿 ($110^{\circ} 56' 59.63''$ E, $30^{\circ} 47' 31.81''$ N), 构造上隶属于鄂西黄陵背斜构造单元 (图 1), 矿区总面积约 2.15 km^2 。区域地处长江上游山区, 地形起伏显著, 整体地势呈西高东低格局。矿区内已开拓 415 m、425 m 及 480 m 三个平硐, 当前主要开展金原矿的开采与选矿作业, 具有典型的矿治活动环境特征。

月亮包金矿的矿脉形态受控于构造裂隙发育特征、成矿热液运移-定位机制及围岩岩性条件, 整体呈复杂多样的分布格局。矿脉宽度一般介于 $10 - 30 \text{ cm}$, 空间展布以单脉为主, 局部可见复脉构造。从垂向变化特征看, 石英单脉主要集中于矿体上部 (近地表层位), 随深度增加逐渐演化为石英复脉。依据矿床成因类型及矿物组合特征, 该矿床被划分为中低温热液含金硫化物石英脉型矿床 (曹锐等, 2007)。矿石中除金为主要有用组分外, 还伴生有铅 (Pb)、锌 (Zn) 等重金属元素。在矿石开采、选矿及尾矿堆存过程中, 这些伴生重金属元素可能发生迁移扩散, 对区域土壤、水体及植被系统造成潜在的生态环境风险。

实地调查结果表明, 尾矿区现有防渗工程存在明显缺陷, 部分防渗膜已裸露并失效, 导致污染物渗透风险加剧。同时, 尾矿区及周边植被普遍表现出生理毒化特征, 如叶片失绿、生长迟缓及局部枯萎等, 反映植被已受到矿治活动相关污染物的显著胁迫。为精准识别植被污染信息, 有必要引入遥感技术对尾矿区及其周边植被开展动态监测。通过提取并分析植被光谱特征参数 (如归一化植被指数、红边位置与形态参数等), 探索其与重金属污染之间的响应关系, 可量化评估植被受重金属胁迫的空间分布与程度, 从而为月亮包金矿区生态环境现状诊断、生态修复方案制定及长期环境治理提供科学依据。

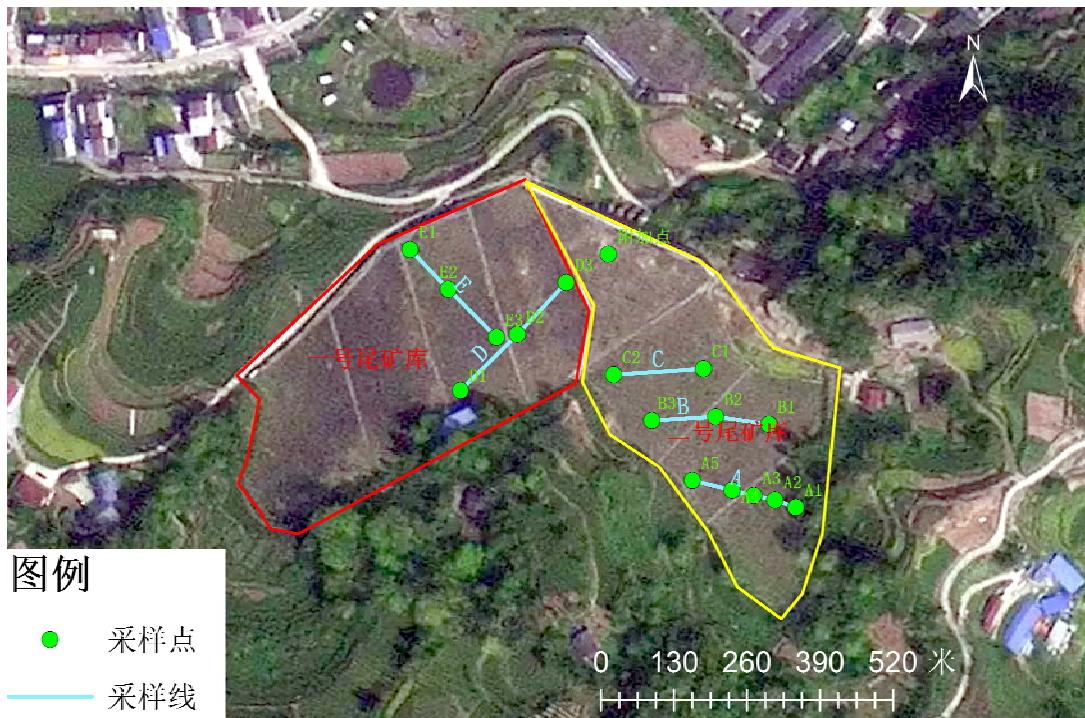


图 1 研究区概况

Figure 1. Overview of the study area

1.2 数据来源

1.2.1 机载高光谱-激光雷达数据采集与预处理

本研究使用的大气高光谱影像与激光雷达点云由大疆 M600 无人机搭载 IRIS 一体式高光谱-LiDAR 成像系统于 2024 年 9 月采集，激光雷达采用 16 线模式获取尾矿区三维结构信息（参数见表 1）。飞行作业在晴朗、微风、无云条件下进行（陈博文等，2023），采集时间为 12:00–14:00，飞行高度 100 m，航带重叠度 50%。最终获得空间分辨率 0.07 m、光谱范围 381–1000 nm、150 个波段的高光谱数据及同步 LiDAR 点云（图 2）。高光谱预处理包括 POS 轨迹解算、航段划分、标准白板辐射定标、几何校正、地理配准与影像拼接。LiDAR 数据经回波解算、噪声点滤除与航带重叠抽稀获取高精度三维结构信息。高光谱与点云采用同平台同步采集，配准误差控制在 1–2 cm (<0.3 像元)，满足像元级融合精度要求，植被像元筛选基于 $NDVI > 0.4$ 与 LiDAR 高度 > 0.2 m 的联合条件剔除裸地与阴影像元。

表 1 机载高光谱-激光雷达设备参数

Table 1. Specifications of the airborne hyperspectral–LiDAR system

设备参数	参数范围
光谱范围	400~1000nm
光谱分辨率	2.1nm
扫描线程	16 线或 32 线

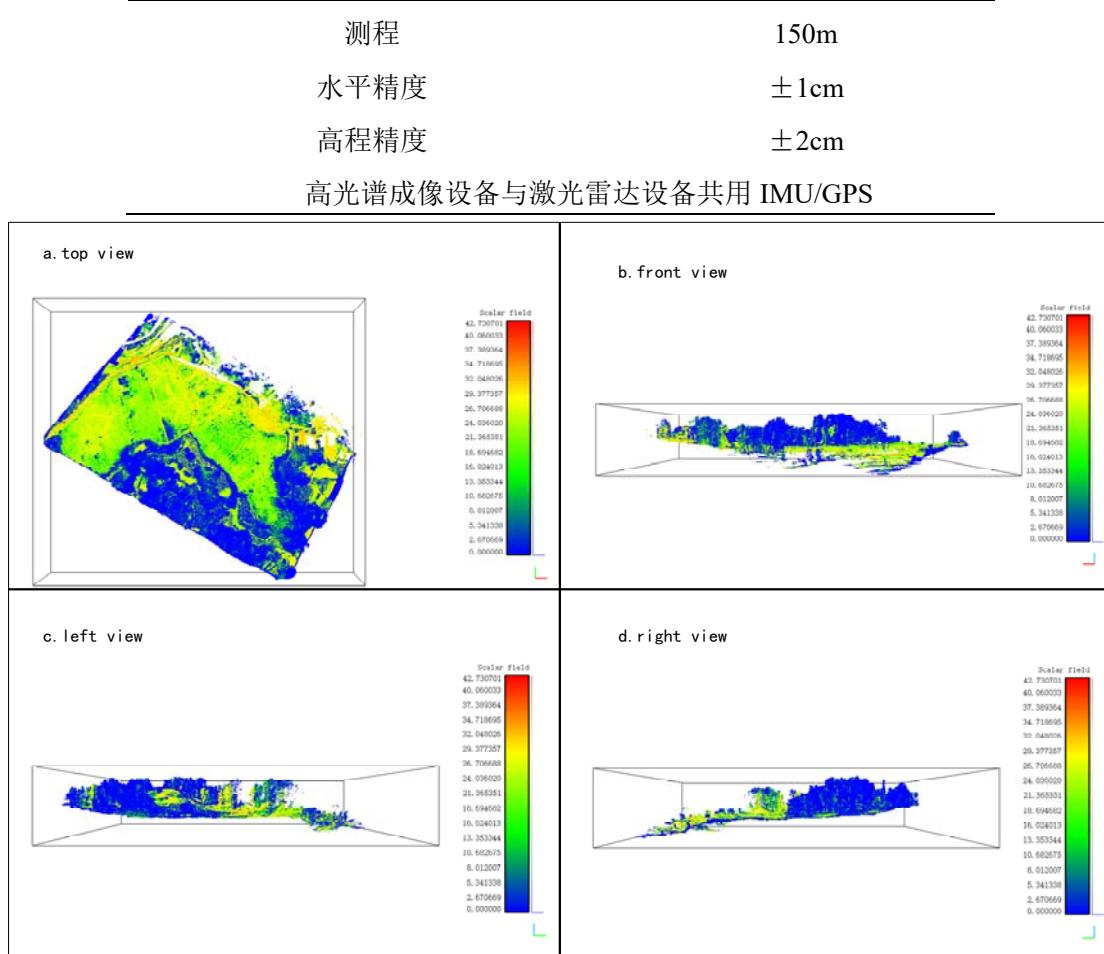


图 2 研究区激光雷达点云分布

Figure 2. LiDAR point cloud distribution of the study area

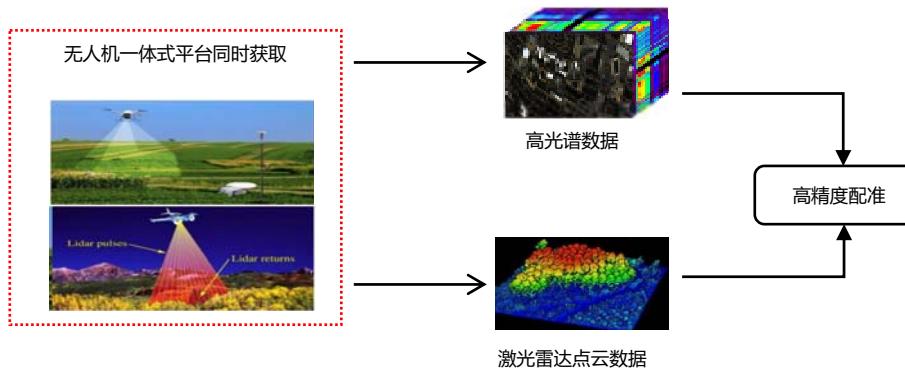


图 3 机载高光谱-激光雷达一体机数据采集过程示意图

Figure 3. Schematic of airborne hyperspectral–LiDAR integrated data acquisition

1.2.2 植被光谱数据采样与处理

本研究利用 ASD FieldSpec 3 手持式光谱仪在晴朗无云的中午开展植被光谱采集，光谱探头距样本约 10 cm，对根、茎、叶分别测量反射率，数据经异常剔除、平滑处理及噪

声波段移除后, 共获得 130 条高信噪比光谱。结果显示(图 4、5), 受 Pb 胁迫植被在红边区(680–750 nm)反射率下降并发生约 5–10 nm 左移, 近红外反射整体减弱, 体现出叶绿素降低、冠层结构松散等典型生理退化, 其中节节草变化最为显著。ASD 光谱主要用于揭示 Pb 胁迫的光谱响应特征并验证敏感波段变化趋势, 为后续敏感指数选取和机载高光谱特征解释提供依据。

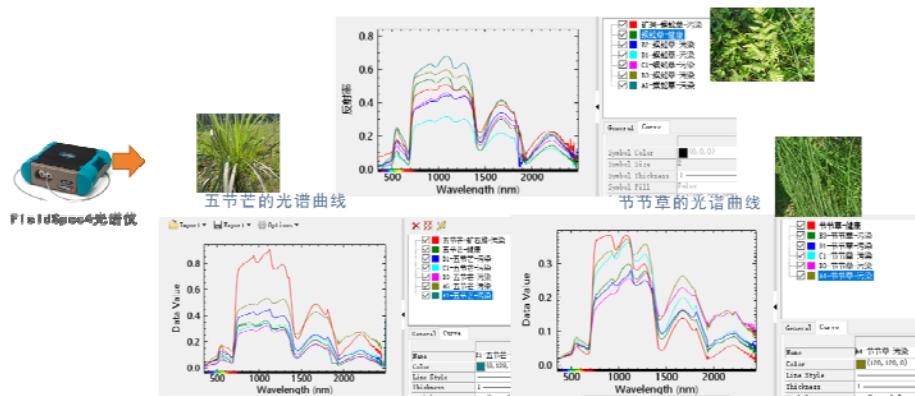


图 4 胁迫植被光谱采集

Figure 4. Spectral Data Acquisition of Stressed Vegetation

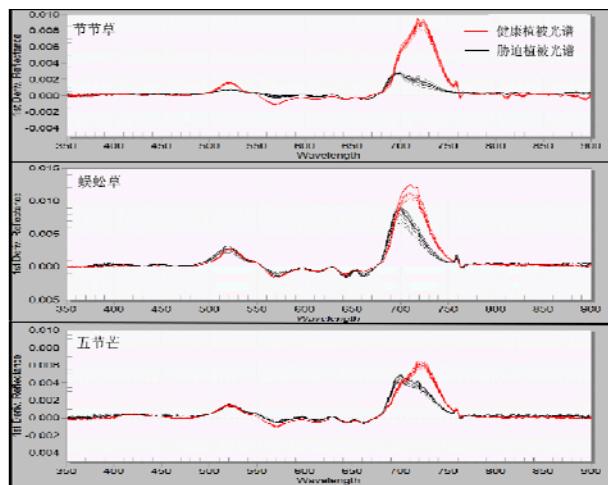


图 5 月亮包金矿尾矿库主要植被光谱与健康植被光谱对比

Figure 5. Comparison of Spectral Characteristics Between Primary Vegetation and Healthy Vegetation at the Yue liangbao Tailings

1.3 实测数据

本文在月亮包尾矿库及周边同步开展机载高光谱-LiDAR 数据获取与野外采样调查, 尾矿库内部植被类型较为单一, 主要由节节草(*Equisetum ramosissimum*)、蜈蚣草(*Dicranopteris pedata*)和五节芒(*Miscanthus floridulus*)等耐重金属草本植物构成, 伴生少量地衣与苔藓; 外围区域分布灌木与乔木。依据植被类型、地形特征及场地可达性, 本研究在尾矿库区沿污染梯度布设 5 条样带, 共采集 20 个植被土壤联合采样点, 经实验质控与异常值剔除后, 最终获得 17 个(图 6)具有可靠 Pb 含量实测值的有效采样点。