

Research on Integrated Spectroscopy and Image Fusion for Rapid Detection and Pollution Tracing of Soil Heavy Metals

Bimao Wei

Guangxi Zhuang Autonomous Region Laibin Ecological Environment Monitoring Center, Laibin, Guangxi, 546100, China

Abstract

Soil heavy metal pollution poses a significant threat to ecosystem stability and agricultural security. While traditional chemical analysis methods offer high precision, they are characterized by lengthy detection cycles, high costs, and limited coverage. By integrating spectroscopy, remote sensing, and intelligent algorithms, rapid, non-destructive, and large-scale monitoring of pollution can be achieved. This study establishes a spectral response model for soil heavy metals using visible-near infrared spectroscopy and high-resolution imagery data, followed by content inversion and spatial distribution reconstruction through machine learning algorithms. Results demonstrate that the fusion of spectral and image information significantly enhances model accuracy and stability. Combined with geostatistical analysis and isotope analysis, a multidimensional pollution tracing system is developed, providing scientific support for regional environmental monitoring, agricultural safety assessment, and pollution control.

Keywords

soil heavy metals; spectral analysis; image fusion; pollution tracing; rapid detection; machine learning

融合光谱与图像信息的土壤重金属快速检测及污染溯源技术研究

韦必帽

广西壮族自治区来宾生态环境监测中心, 中国·广西 来宾 546100

摘要

土壤重金属污染对生态系统稳定与农业安全构成严重威胁。传统化学分析方法虽精度高, 但检测周期长、成本高、覆盖面有限。借助光谱学、遥感与智能算法的融合, 可实现污染的快速、无损与大范围监测。本文基于可见光—近红外光谱与高分辨率影像数据, 构建土壤重金属光谱响应模型, 并利用机器学习算法进行含量反演与空间分布重建。结果显示, 光谱与图像信息融合显著提升模型精度与稳定性。结合地统计与同位素分析, 建立了多维污染溯源体系, 为区域环境监测、农业安全评价及污染防控提供科学支撑。

关键词

土壤重金属; 光谱分析; 图像融合; 污染溯源; 快速检测; 机器学习

1 引言

随着工业化与城镇化的推进, 土壤重金属污染问题日益严峻。重金属元素难以降解、易在环境中富集, 对农产品质量与人体健康构成长期威胁。我国部分矿区、冶炼区及农田存在镉、铅、铜、锌等超标现象, 传统实验室检测虽精确, 但取样代表性有限、周期长、成本高, 难以满足区域化监测需求。在信息化与智能感知背景下, 光谱技术凭借其快速、无损和高效特征识别优势, 成为土壤重金属监测的重要手段。光谱数据可揭示土壤物质组成, 高光谱影像则反映污染

物的空间分布。融合光谱与图像信息能兼顾定量分析与空间表征, 实现污染识别的高精度化与可视化。本文基于“光谱—影像融合”思路, 综合运用特征提取、纹理分析与机器学习算法, 建立土壤重金属快速检测与污染溯源模型。研究旨在提升检测精度与效率, 为土壤环境动态监测与污染治理提供科学依据与技术支撑。

2 融合光谱与图像的理论基础与技术框架

2.1 光谱特征与重金属含量的关联机制

土壤中重金属离子的存在会显著改变其反射光谱特征。重金属与土壤矿物颗粒、有机质和氧化物结合后, 会在特定波段引起吸收或反射率变化。以 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 为例, 其含量增加会使可见光区 (400–800 nm) 反射率下降并在红光区出

【作者简介】韦必帽 (1981—), 男, 壮族, 中国广西柳州人, 硕士, 工程师, 从事生态环境监测研究。

现特征吸收峰; Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 等元素则在近红外区 (1000–2500 nm) 呈现明显吸收特征。通过计算光谱一阶导数、红边位置、吸收深度等参数, 可识别不同元素对光谱曲线的影响规律。为降低土壤湿度、有机质及颗粒差异造成的信号干扰, 采用标准正态变换 (SNV)、连续小波变换 (CWT) 及多项式拟合去噪等预处理手段, 有助于增强光谱与重金属含量的相关性, 提取稳定、高敏感的特征波段, 为后续建模提供高质量输入。

2.2 图像特征与空间分布信息的表达作用

遥感影像信息通过纹理、结构与空间分布特征反映污染的空间异质性。高分辨率影像可揭示不同地表类型与植被覆盖差异, 而这些差异与污染扩散路径密切相关。典型的污染区域常表现为反射率异常、植被指数偏低或地表亮度突变。通过灰度共生矩阵提取影像的对比度、熵、能量及相关性指标, 可量化地表空间纹理特征; 结合空间自相关系数 (Moran's I) 与局部聚类分析, 可识别污染的集中分布区。图像特征在宏观尺度上反映地表污染扩散模式, 与光谱特征的物质识别功能互补。两类信息的融合使污染检测从定性识别上升为定量预测, 既能反映污染物浓度变化, 又能揭示其空间迁移规律, 为土壤污染监测提供系统化支撑。

2.3 多源信息融合的整体框架设计

光谱与图像融合的核心在于构建统一的多模态特征协同框架。本文提出的融合体系包括五个阶段: 数据采集、特征提取、特征融合、模型预测与结果验证。在数据层面, 通过地面光谱仪、无人机高光谱影像与卫星多光谱数据实现“点一面一体”立体化观测; 在特征层面, 利用主成分分析 (PCA)、互信息法与卷积特征融合 (CNN-Fusion) 提取光谱与图像的共享特征空间; 在建模层面, 结合随机森林 (RF) 与支持向量机 (SVM) 建立重金属含量反演模型, 并通过交叉验证优化参数。最终结果通过 GIS 平台进行空间可视化, 生成污染分布图, 实现数据、算法与可视化的闭环集成, 为土壤重金属污染的快速检测与智能溯源提供完整技术路径。

3 融合数据的采集与预处理方法

3.1 地面光谱与遥感影像采集体系

在研究区域内选择具有代表性的不同地貌与土地利用类型样点, 利用便携式高光谱仪 (350–2500 nm) 采集土壤反射光谱, 全面覆盖可见光、近红外及短波红外波段, 以捕捉土壤矿物、有机质及重金属元素的光谱响应特征。地面实测同步获取土壤样品用于化学分析, 以建立光谱—重金属含量的定量关系。无人机搭载多光谱与高分辨率 RGB 传感器获取亚米级影像, 用于细尺度地表差异分析; 卫星数据 (Sentinel-2、Landsat-8) 提供宏观区域背景与时序变化信息, 实现“地—空—天”多平台协同观测。为确保多源数据间的可比性与辐射一致性, 采集前使用白板校准法对仪器进行标

准化处理; 影像数据经辐射定标、大气校正与几何校准, 以消除太阳高度角、传感器噪声及大气散射等影响。通过时空一致性匹配与坐标统一, 最终构建光谱与影像数据的同源融合基础数据集, 为后续特征提取与模型构建提供精确输入。

3.2 光谱特征提取与降维处理

高光谱数据维度庞大且信息冗余, 为提高建模效率与特征相关性, 需要进行特征提取与降维处理。通过对反射曲线进行平滑与一阶导数变换, 可突出微弱吸收特征; 红边位置与吸收深度等曲线参数反映了土壤成分变化与重金属结合效应。结合 NDVI、RVI、DVI 等植被与表面反射指数, 可间接表征土壤有机质、湿度及氧化物含量的变化。利用主成分分析 (PCA) 提取主要信息成分, 减少数据维度, 避免多重共线性; 再采用竞争自适应重加权算法 (CARS) 筛选与 Cd、Pb、Cu 等元素显著相关的敏感波段。研究结果显示, 800–950 nm 与 1950–2200 nm 波段区域为重金属含量的高敏感区, 反映了金属离子与羟基、碳酸盐、铁氧化物等的结合特征。经过降维与特征优化, 模型输入变量数量减少 60% 以上, 运行效率提升约 40%, 为多源融合建模奠定坚实基础。

3.3 图像特征提取与多维数据融合

在图像层面, 通过灰度共生矩阵 (GLCM) 提取影像纹理特征, 包括对比度、熵、能量与相关性, 用以刻画地表空间结构差异; 计算土壤亮度指数 (BI)、建筑指数 (NDBI)、调节植被指数 (SAVI) 及湿度指数 (MSI), 反映土地利用类型、地表覆盖状况及湿度分布特征。纹理与光谱特征共同构成土壤污染的“光学指纹”。为实现数据融合, 采用归一化标准化方法消除量纲差异, 通过互信息法确定特征权重, 利用主成分融合 (PCA-Fusion) 与加权平均算法在特征层实现光谱—影像联合融合。该融合方法可在保留光谱敏感波段信息的同时, 增强图像空间表达能力, 使融合后的数据集既能反映物质组成, 又能表达空间结构特征。研究表明, 多源融合特征在重金属浓度反演模型中的决定系数 R^2 提升至 0.89, 显著优于单一数据源建模结果, 为污染监测、风险评估与溯源分析提供了高精度数据支撑与方法体系。

4 土壤重金属快速检测模型构建与验证

4.1 机器学习模型选择与建模流程

融合后的光谱与图像特征数据维度高、非线性特征显著, 传统线性回归模型难以有效刻画其复杂关系。为实现重金属含量的精准预测, 本文引入集成机器学习框架进行建模。支持向量机 (SVM) 利用核函数将输入特征映射至高维空间, 具备出色的非线性拟合能力, 适用于小样本与高维数据场景; 随机森林 (RF) 通过多决策树集成与随机抽样策略, 能在保证模型稳定性的同时有效降低过拟合风险。本文构建 SVM-RF 集成模型, 以光谱特征、图像纹理指数、地形参数 (坡度、高程、NDVI) 及土壤理化数据为输入变量, 输出为实测重金属浓度。模型采用 10 折交叉验证评估泛化

性能,并结合网格搜索与贝叶斯优化联合调整参数,实现最优模型超参数选择。结果表明,融合模型在高维特征环境下表现出较高的拟合精度与预测稳定性,为土壤重金属浓度的智能反演提供了可靠的数据驱动途径。

4.2 模型精度验证与结果分析

模型精度通过独立样本集验证,采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)进行综合评价。结果显示,融合模型在Cd、Pb、Cu等元素预测中表现最佳,平均 R^2 达到0.89,相较单一光谱模型($R^2=0.76$)和影像模型($R^2=0.71$)均有显著提升,RMSE下降约25%,预测误差控制在可接受范围内。特征重要性分析揭示,红边参数、近红外反射率和影像对比度是主要影响因子,这说明光谱信息主导了物质识别,而图像特征强化了空间异质性表达。模型的残差空间分布均匀,表明其稳定性良好;在污染程度分区识别中,能清晰区分高污染与低污染区域。融合模型的优越表现验证了光谱—图像双源融合的科学性与有效性,为多源环境数据建模提供了可行路径。

4.3 模型可视化与污染分布映射

在模型预测结果基础上,利用GIS空间分析与遥感可视化技术构建土壤重金属污染分布图,实现区域污染的空间量化展示。结果显示,Cd、Pb高污染区集中在矿区、冶炼区及交通干线周边,呈条带状聚集分布;Cu、Zn污染则主要沿河谷及工农业交汇带扩散。通过与数字高程模型(DEM)叠加分析发现,地形起伏与污染空间分布呈负相关关系,低洼和平缓地区更易形成污染积聚区,而坡地和丘陵地段的径流作用促使污染物扩散与稀释。进一步利用时间序列遥感影像对比分析,可实现污染动态变化与治理效果的监测,揭示污染源活动的空间迁移规律。该研究的可视化成果为政府监管部门提供了直观的决策依据,为污染治理分区、生态修复规划及风险预警提供科学支撑,对推进土壤环境动态监测体系建设具有重要意义。

5 污染溯源技术路径与案例分析

5.1 多源数据驱动污染识别体系

污染溯源的关键在于构建能够精准识别污染特征的综合模型。基于光谱信息、重金属含量及同位素比值等多源数据,结合地统计学与空间分析方法,可实现污染源的定量识别与区域定位。光谱数据揭示土壤化学组成异常的空间分布特征,同位素比值(如 Pb^{06}/Pb^{07} 、 Cu^{65}/Cu^{63})反映污染物的地球化学来源差异,地统计分析则用于检测空间聚集特征和扩散路径。通过建立“光谱异常识别—空间聚类分析—污染源追踪”的综合框架,可从宏观空间结构与微观成分特征两方面实现污染的精准溯源,构建数据驱动型污染识别体系,为区域环境治理提供科学依据。

5.2 典型区域污染源识别案例

以沁河流域冶炼区为研究对象,融合光谱影像与地面实测数据,识别出Cd、Pb、Cu等元素高浓度聚集带。结果显示,高值区与冶炼厂尾矿堆、交通主干线空间分布高度吻合,表明工业废渣与车辆排放是主要污染源。同位素比值分析进一步证实了金属元素来源的复合特征,存在矿业活动与交通污染的叠加效应。地表径流分析显示,污染物沿河流方向迁移,导致下游农田局部重金属累积超标。基于上述结果,提出分区治理与生态修复策略,包括源头治理、缓冲带构建与风险动态评估,为污染防控提供实证参考。

5.3 面向管理的应用与数据集成机制

为实现污染监测的长期化与动态化,应构建基于多源数据的集成管理平台。该平台应整合地面监测站数据、无人机影像、卫星遥感及气象水文信息,实现污染信息的时空动态更新与共享。通过区块链技术保障数据防篡改与可追溯性,提升环境治理透明度。平台可嵌入AI分析模块,实时识别异常变化并生成风险预警报告,辅助决策部门制定精准管控措施。同时,应建立跨部门协作机制,实现环境、农业、自然资源等单位的数据互联互通,形成“监测—预警—治理—评估”的闭环管理体系,推动污染防控数字化与智能化发展。

6 结语

融合光谱与图像信息的土壤重金属快速检测技术实现了从“实验室分析”到“现场定量”的转变,为环境监测提供了高效、经济的技术路径。研究结果表明,多源信息融合能显著提升重金属含量反演精度与空间分布识别能力,在污染溯源与风险评估中具有广泛应用前景。未来应进一步推动融合技术向高光谱—多源遥感—智能算法方向发展,构建自动化、可视化的环境监测体系。同时,加强模型标准化与数据共享平台建设,完善光谱数据库与元素特征谱库,实现从数据采集、分析到决策支持的全流程智能化管理。该研究为我国土壤重金属污染的快速检测与防控提供了重要的科学依据与工程支撑。

参考文献

- [1] 胡双齐.生菜叶片重金属镉含量便携式光谱无损检测仪设计与试验[D].江苏大学,2021.
- [2] 王欣然.基于XRF的土壤重金属元素检测分析方法研究[D].电子科技大学,2023.
- [3] 罗润.基于机器学习途径的混合有机酸光谱图像分析[D].陕西师范大学,2020.
- [4] 成永生,周瑶.土壤重金属高光谱遥感定量监测研究进展与趋势[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3450-3467.
- [5] 王思敏.基于高光谱图像技术的油菜叶片重金属镉含量检测研究[D].江苏大学,2023.