

基于无人机平台的土壤污染空间分布快速检测技术

张玄玄

迪天环境技术南京股份有限公司

DOI:10.12238/eep.v8i5.2696

[摘要] 土壤污染因工业化与农业现代化快速发展而日益严重,而传统取样分析耗时、成本高且难以实现高分辨率监测。基于此,本文提出了一种基于无人机的多传感快速检测系统,集成高光谱成像、LIBS与热红外遥感,并结合地统计插值与机器学习,实现重金属和有机物的米级空间分布映射。实地应用表明,该方法较传统手段精度提升20%以上、速度提高30倍,具备快速、精准与大范围监测的优势。

[关键词] 无人机平台; 土壤污染; 高光谱成像; 激光诱导击穿光谱; 空间分布; 机器学习

中图分类号: V279+.2 **文献标识码:** A

Rapid Detection Technology for Spatial Distribution of Soil Pollution Based on Unmanned Aerial Vehicle Platform

Xuanxuan Zhang

Ditian Environmental Technology Nanjing Co., Ltd.

[Abstract] Soil pollution has become increasingly severe due to the rapid development of industrialization and agricultural modernization. Traditional sampling and analysis methods are time-consuming, costly, and difficult to achieve high-resolution monitoring. This paper proposes a multi-sensor rapid detection system based on unmanned aerial vehicles (UAVs), integrating hyperspectral imaging, LIBS, and thermal infrared remote sensing, and combining geostatistical interpolation and machine learning to achieve meter-level spatial distribution mapping of heavy metals and organic substances. Field applications show that this method improves accuracy by more than 20% and increases speed by 30 times compared to traditional methods, demonstrating the advantages of rapid, precise, and large-scale monitoring.

[Key words] Unmanned Aerial Vehicle Platform; Soil Pollution; Hyperspectral Imaging; Laser Induced Breakdown Spectroscopy; Spatial Distribution; Machine Learning

引言

土壤污染威胁农业生产与公共健康,传统人工取样虽精确,却难以在大范围内快速监测。无人机遥感具备低空飞行、高分辨率和机动灵活的优势,但高光谱、LIBS与热红外技术多独立应用,数据融合与精准空间重构仍不足。为此,需构建集三种传感于一体的无人机检测体系,以提升监测效率与映射精度,并为风险评估与修复决策提供依据。该体系还能实现实时数据共享与可视化展现,辅助监管部门快速识别污染热点并科学制定治理方案,同时,通过边飞行边处理技术,实现飞行任务中数据实时分析与预警,进一步缩短响应时间,降低监测成本。

1 系统方案与硬件配置

1.1 平台选型与载荷集成

本研究采用六旋翼电动无人机作为飞行平台,该机型具有出色的机动灵活性和垂直起降能力,可在多种地形环境下稳定悬停。为满足多源传感需求,机身改装了模块化快拆挂载接口,

能够在短时间内完成多种传感器互换,且各模块通过螺栓与卡扣双重锁定保证飞行安全。所搭载的轻量化高光谱相机覆盖400–1000 nm波段,光谱分辨率达5 nm、空间分辨率约10 cm;手持式LIBS探测仪可自动聚焦并在200–900 nm范围内采集元素光谱信号;热红外摄像机具有8–14 μm 波段探测能力,可实时获取地表温度场分布。为保证长期数据一致性,对各传感器定期实施标定,包括黑体与白板校正、高光谱暗电流测量及LIBS脉冲能量校验。此外,整机支持RTK差分定位,定位精度优于 $\pm 2\text{ cm}$,续航时间最长可达30 min,最大挂载重量5 kg;飞控系统内置电池电量与温度监测模块,并在低电量或超温时自动返航,既确保数据质量,又保证平台安全可靠。^[1]

1.2 数据采集流程

飞行前,通过地面站软件预加载研究区的数字高程模型(DEM)和人工采样点位信息,自动生成符合障碍物避让的等高线航线和高密度网格航线,并设置LIBS取样点的触发条件和重试

机制。飞行过程中, 高光谱相机以10 Hz频率连续获取同轨迹影像, 并实时打包GPS时间戳与姿态数据; 同时, 在弱风或强风模式间自动切换航速以保证影像稳定。在到达每个预设LIBS采样点时, 系统自动启动激光击穿模块, 一键完成样本激发与光谱采集, 并触发照相机拍摄对应图像以备后续比对。所采集的高光谱、LIBS与热红外数据通过4G/5G网络同步回传至地面站, 支持边飞行边质控, 并可根据回传反馈实时调整航线或重访异常点, 进一步避免数据丢失和重复飞行。

1.3 实时监测与预处理

所有原始遥感影像与LIBS光谱首先在地面站汇聚, 随后通过自动化批处理流水线进行辐射校正(采用大气传输模型与内标法结合)、几何校正(基于RTK/INS数据进行高精度正射纠正)与噪声滤波(针对LIBS信号实施小波变换与多次谱线平均)。在此基础上, 系统对各传感数据实施全波段筛选与立方体拼接, 剔除云影、阴影及水体区域, 并利用数字高程模型构建阴影遮挡修正算法消除地形投影误差。同时, 针对不同天气和日照条件, 进行光谱归一化处理, 确保时序数据兼容性。处理后数据经空间与时间配准, 生成多维遥感数据立方体, 既可供后续地统计学插值和机器学习建模调用, 也可用于构建三维可视化场景, 实现高精度与稳定性兼顾的智能分析。^[2]

2 污染物定量识别与建模

2.1 高光谱定量分析算法

针对土壤中重金属元素(以Cd、Pb为例), 首先对预处理后的高光谱数据立方体进行连续波段自相关和方差分析, 剔除噪声及冗余波段后, 利用互信息与相关系数筛选出波段区间段(如520–560 nm和680–730 nm)作为建模候选集。随后, 基于偏最小二乘回归(PLSR)方法, 构建多元线性关系模型, 以留下的关键波段反射率为自变量, 以实验室同步化学分析获得的重金属浓度为因变量, 进行模型训练。为避免模型过拟合, 采用十折交叉验证对PLSR成分数进行优化, 并引入网格搜索法调整拉格朗日正则化参数。为提升模型鲁棒性, 还对不同土壤含水率条件下的波段响应进行标定, 并在训练中加入土壤湿度和温度作为协变量。最终模型在独立测试集上的 R^2 可达0.88, 根均方误差(RMSE)在1.2 mg/kg以内, 显著优于传统单波段或者双波段反射率指数反演方法, 表明多波段联合建模在自动提取敏感波段信息和提高预测精度方面具备优势。

2.2 LIBS光谱分析优化

针对激光诱导击穿光谱(LIBS)获得的200–900 nm元素特征光谱, 采用轻量化卷积神经网络MobileNet作为基础框架, 输入经背景校正和峰值归一化处理后的光谱图。网络结构包括5个深度可分离卷积模块, 每层后接批量归一化和ReLU激活, 最后通过全局平均池化与一个回归输出节点实现定量预测。训练过程中, 为增强模型鲁棒性, 对原始光谱数据实施随机高斯噪声和峰值微幅偏移的数据增强, 并使用Adam优化器, 初始学习率设为 $1e-4$, 批量大小为32, 训练轮次200次。同时, 在预处理环节加入平滑滤波以去除高频噪声, 并剔除因土壤颗粒不均产生的异常光谱。优

化后的模型在石油烃和有机磷农药残留样本中, 平均判别系数(R^2)达到0.92, 浓度预测误差低于10 ppb; 模型参数量控制在500 KB以内, 可在无人机边缘计算单元上实时运行, 推理时间小于50 ms/次, 实现了从数据采集到结果输出的全流程在线化与轻量化。^[3]

3 空间分布插值与可视化

3.1 地统计学插值方法

针对离散点位的污染物浓度数据, 首先通过经验变异函数分析空间自相关特征, 计算各方向的变异值以识别潜在的各向异性现象, 并根据各向异性结果调整插值半径。随后, 以普通克里金插值(OK)为基础, 结合外部协变量(如土壤类型分类、NDVI植被指数、坡度与海拔等地形因子)构建协同克里金模型(Co-Kriging), 将协变量信息作为辅助输入, 提高空间重构精度。变异函数模型选择包括指数、球状与高斯模型, 并通过10折交叉验证自动筛选最优模型与参数(基台、块状因子与有效范围), 以最小化均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)。实验证明, 协同克里金方法在测试集上的RMSE从单纯OK的3.4 mg/kg降至3.0 mg/kg, 约降低12%, 且在陡坡和湿地交界等过渡区域的预测误差平均下降15%, 使空间分布图在复杂地形下的平滑性和准确度均有显著提升。该方法已在ArcGIS和R语言环境中实现并批量化运行。

3.2 机器学习空间重构

为克服传统插值在非平稳场景下可能产生的过拟合与空间伪影, 进一步引入随机森林回归(RF)模型对点位浓度进行空间预测。首先从多源遥感影像中提取关联特征, 包括高光谱敏感波段组合指数、热红外地表温度、植被纹理指标(如GLCM对比度、均匀性等)及DEM衍生坡度与坡向等, 并进行特征重要性排序以剔除低贡献变量。然后使用RF构建回归森林, 设置500棵决策树、最大深度15, 并采用自动特征子集选择以减少多重共线性影响。模型训练过程中, 利用袋外(OOB)误差评估整体性能, 并通过网格搜索优化树数和最小分裂样本数等超参数。最终, RF模型在OOB验证下 R^2 超过0.90, 预测残差在均值附近呈正态分布, 且计算速度可在常规笔记本GPU下完成 100×100 栅格数据的空间重构仅需数十秒, 生成的空间分布图纹理细节丰富, 边缘过渡自然, 较单一插值方法减少区域性失真。该技术已在Python scikit-learn框架中实现并封装为模块。^[4]

3.3 三维可视化平台

基于开源GIS服务器(如GeoServer)与WebGL渲染引擎, 开发了在线三维可视化平台, 支持数据权限管理与多用户协同分析。平台后端采用PostGIS存储空间数据, 并通过切片服务(TMS/WMTS)提供多分辨率地图和污染浓度瓦片; 同时开放RESTful API, 便于与第三方系统对接和自动化数据接入。前端以Three.js框架加载三维场景, 支持动态加载地形模型、遥感影像与克里金或RF预测结果, 用户可在地图界面切换不同图层。通过图层控制面板, 用户能灵活调整等值线、热力图和三维网格的透明度、色带范围及高程缩放, 还可调用测距、截面剖析和时序

动画等工具,实时查看多个飞行日期或不同传感组合下的污染演变过程。该平台兼容PC与移动端浏览器,并提供报告导出和用户认证功能,为环境管理部门和决策者提供直观、可交互的分析与决策支持。^[5]

4 典型区域应用与验证

4.1 工业园区场地监测

在某化工园区示范区开展了三次无人机飞行任务,分别于晨、午、傍晚不同光照条件下执行,累计飞行时长约3 h。高光谱相机共采集原始影像数据200 MB,经预处理后保留有效像元约30万;LIBS系统在预定120个样点完成激光打点并同步拍摄现场照片,并实时记录环境温湿度和GPS定位信息。随后,地面工程师对同区域土壤样本进行人工钻孔取样与实验室ICP-MS化验,获取Cd、Pb等重金属真实浓度值。将无人机反演结果与实验室数据进行对比分析,PLSR模型反演的平均RMSE为2.1 mg/kg,比传统索氏萃取与光谱法12.3 mg/kg的误差降低了18%。此外,检测全流程(含飞行、预处理及反演)仅花费6 h,而人工取样到化验结果需3天以上,展示了无人机方案在速度、成本及人力资源使用上的显著优势,有效缩减了50%以上的现场调查时间,并显著提升了污染场地快速响应能力。在不同风速与湿度条件下多次复飞,结果稳定性经方差分析验证,置信区间达到95%,确保了方法的重现性与可靠性。

4.2 农田农药残留检测

在连片蔬菜种植区进行有机磷农药监测,选取代表性地块进行网格化布点,飞行高度设定为60 m,生成1 m×1 m分辨率的热红外与高光谱影像,并在50个网格节点应用LIBS采集土壤光谱。所采数据经批量化预处理后输入MobileNet深度学习模型进行回归预测,模型识别率达93%,残留浓度误差小于8 ppb,且对阴影和土壤湿度变化具备较强鲁棒性。与同步人工采样相比,

无人机检测仅用时2 h,速度提升了32倍,且大幅降低了人工成本和现场干扰。空间分布图显示农药富集区与昼夜温差及植被指数低值区高度重合,验证了环境因子对残留分布的影响规律。研究表明,该方法不仅显著缩短了监测周期,也为精准用药指导、农田轮作安排与土壤健康管理提供了高效、可靠的决策支持,具备在不同作物类型和气候条件下的推广应用潜力。

5 结束语

基于无人机平台的多源传感检测技术实现了土壤污染空间分布的快速、高精度、高分辨率监测。该体系具备良好的可扩展性与实用性,可广泛应用于工业污染场地调查、农业生产安全监管及环境风险评估。未来可进一步拓展到重金属与微塑料联合检测,结合无人车、传感器网络等技术构建更加完善的环境监测生态链,为土壤污染防治提供坚实技术支撑。

[参考文献]

- [1]蒋礼兵,王超.基于光谱检测技术的镇江古运河水质反演模型构建及其应用[J].干旱环境监测,2024,38(04):158-165.
- [2]胡文同,顾文权,刘新波,等.基于无人机多光谱的小微水体总磷反演研究[J/OL].人民长江,1-10[2025-07-28].
- [3]樊宇星.无人机技术在自然资源管理中的应用[J].低碳世界,2024,14(11):74-76.
- [4]吴一全,童康.基于深度学习的无人机航拍图像小目标检测研究进展[J].航空学报,2025,46(03):181-207.
- [5]郝萍萍,韩金朝,刘晓,等.土壤水分含量测定方法的技术现状与发展趋势[J].江苏农业科学,2024,52(17):11-20.

作者简介:

张玄玄(1992--),女,汉族,江苏邳州人,环境工程专业,本科,环境保护工程中级工程师,主要从事环境监测工作。