

土壤重金属污染的监测与评估技术

● 郭庆闪



[摘要] 本文从重金属污染的监测方法、数据采集与处理技术、评估模型与方法以及技术发展趋势四个方面进行了系统分析。阐述了化学分析技术、高光谱成像和传感器技术是当前监测重金属污染的主要手段;数据采集与处理依赖于高精度仪器和大数据分析技术;污染评估可通过指数法、模型模拟和空间分析技术进行精准化评估;未来发展趋势集中于智能化、集成化和便携化,为污染防治与环境修复提供重要支撑。文章旨在为土壤重金属污染监测与评估技术的优化,提供一些理论依据与实践指导。

[关键词] 重金属;监测技术;评估方法;大数据分析;智能化

土壤中重金属污染物的来源主要是:大气沉降;能源、冶金行业、污水的无组织排放以及本身就含有重金属的污泥等几方面。另外,农业中常用到的化肥、农药和地膜等,本身的化学成分或是不可降解性,加上农民的环保意识不够强烈,不合理使用和随地丢弃金属包装,也会导致土壤重金属污染。如何高效、精准地监测并评估土壤重金属污染是当前环境科学与技术研究的重点之一,而传统监测与评估方法存在周期长、精度不足等局限性,因此需要探索更加科学、高效的技术与方法。本文从监测方法、数据处理、评估模型及发展趋势四个方面探讨土壤重金属污染监测与评估的技术体系,以期污染防治和环境修复提供科学支持。

Q 土壤重金属污染的监测方法

(一)化学分析技术

化学分析技术是测定土壤重金属含量的核心手段,其高灵敏度和精准性为污染监测提供了可靠依据。原子吸收光谱法(AAS)可利用特定波长的光被重金属元素吸收的特性,能够准确测定铅、镉、汞等元素的浓度,在重金属定量分析中被广泛应用。随着仪器性能的不断优化,AAS在检测下限、线性范围和分析速度上也得到了提升。电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)作为另一种主流技术,凭借极高的灵敏度和多元素同步分析能力,能够快速、准确地完成复杂土壤样品中多种重金属的检测。

在化学分析技术中,样品前处理技术包括酸消解、微波消解和湿法氧化等方法,旨在将土壤中的重金属完全溶解为分析所需的液态形式。为进一步提高分析效率和环保性,

新型绿色溶剂的研发逐渐受到重视。利用标准物质校准仪器,确保测定结果的准确性和可重复性。此外,化学分析技术的未来发展方向还包括将微型化技术与现场便携检测设备相结合,以适应更多监测场景。

(二)高光谱成像技术

高光谱成像技术通过结合光谱分析与成像技术,为土壤重金属污染的空间分布监测提供了新思路。高光谱成像具备高分辨率与非破坏性检测的双重优势,每个像素点的光谱信息能够反映土壤中重金属元素的种类与含量。随着仪器技术的发展,高光谱相机已能够覆盖可见光、近红外和中红外等多个波段,为重金属污染的全面检测提供了可能性。数据处理是高光谱成像技术应用中的核心环节,常采用光谱特征提取、波段选择与分类算法对高维数据进行降维与分析。其支持向量机(SVM)与随机森林等机器学习算法,在高光谱数据的分类和预测中表现优异,能充分利用光谱数据的非线性特征,提高检测精度。地面验证实验则通过对高光谱成像结果与实际样本测定值的比对分析,验证模型的可靠性与推广性。高光谱成像技术因其高效性与无损性,在大面积土壤重金属污染监测中表现出广阔的应用前景。

(三)传感器监测技术

传感器监测技术凭借实时性与便捷性,正在逐步成为土壤重金属污染监测的重要工具。电化学传感器通过检测重金属离子在电极表面的电化学反应,能够实现多种重金属的快速检测。这类传感器通常采用修饰技术(如纳米材料修饰)来提高检测灵敏度和选择性。光学传感器则利用重金属离子与特定荧光探针或比色剂的相互作用,利用光信号变化间接反映重金属含量,因其高特异性使得低浓度污染物的检

测也成为可能。

传感器技术的核心优势在于其小型化和便携性，便于在野外环境下进行实时监测。集成无线通信模块后，传感器能够将数据实时传输至监测平台，实现远程控制与分析。多传感器网络的搭建可覆盖更大区域，结合大数据分析技术能够更准确地刻画污染分布特征。

Q 数据采集与处理技术

(一) 高精度仪器数据采集

高精度仪器在土壤重金属污染监测中的性能直接决定了数据的准确性和可靠性。电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)因其超高灵敏度和宽广的动态范围，能够精确测定土壤样品中微量重金属元素的浓度。随着技术的进步，最新型号的ICP-MS已集成了碰撞池和干扰消除技术，可有效降低复杂基质对检测结果的干扰。原子荧光光谱仪(AFS)则以其对特定重金属(如汞、砷)的高灵敏度，在快速筛查中表现突出。

在现场检测需求的推动下，便携式X射线荧光光谱仪(pXRF)因其无需样品预处理且检测速度快的特点，逐渐成为数据采集的重要工具。该仪器通过检测土壤中元素特有的荧光信号实现无损定量分析，为大面积快速评估提供了技术支持。融合光学与电化学传感技术的新型复合传感器也能够采集多维度数据，其实时性和高通量特性进一步提升了采集效率。

(二) 数据清洗与预处理

在监测数据的处理环节，清洗与预处理是确保数据质量的关键步骤。土壤监测数据通常因设备误差、环境干扰等因素出现噪声和异常值。异常值检测技术包括统计学方法和机器学习算法两大类。基于箱线图的统计方法适用于检测显著偏离正常分布的点，而孤立森林算法则通过多维数据建模识别复杂模式下的异常数据。

在缺失值处理方面，插值算法常被用于重建缺失数据。时间序列数据可采用线性插值或样条插值，而空间数据则多使用克里金插值或反距离权重法。在多源数据整合中，数据格式的标准化与一致性处理同样是预处理的重要环节。自动化脚本和开源工具(如Python的Pandas库)能够高效完成这些任务。经过清洗与预处理环节，数据中的冗余信息被有效剔除，准确性与一致性显著提升，为后续分析提供了高质量的基础。

(三) 大数据分析建模

随着土壤重金属污染监测数据的多样性与体量的增加，大数据分析技术已成为提取数据价值的一种手段。基于机器学习的模式识别算法能够发现污染特征与环境因子之间的潜在关联。例如，随机森林算法通过多次迭代优化模型，

在变量重要性评估和污染因子筛选中表现卓越。支持向量机(SVM)则适合处理复杂非线性关系，能够为污染分布分类提供精确的解决方案；在趋势预测领域，时间序列建模技术被广泛应用。长短期记忆网络(LSTM)是一种时间递归神经网络，适合于处理和预测时间序列中间隔和延迟相对较长的重要事件，因其对长期依赖特性的建模能力，能够精确预测土壤重金属浓度的动态变化。空间数据分析则通过地统计学方法，如普通克里金法或协同克里金法，揭示污染扩散的空间规律。地理信息系统(GIS)作为可视化工具，与数据分析模型的集成使得结果表达更加直观。大数据分析建模技术通过挖掘监测数据的内在规律，不仅为污染防治提供了科学依据，还在环境保护政策的制定中发挥了重要作用。

Q 土壤重金属污染的评估模型与方法

(一) 单因子与综合污染指数法

单因子污染指数法是一种直观的土壤重金属污染定量评估方法，利用计算单一污染物浓度与其背景值或相关标准限值的比值，明确单一重金属元素对土壤环境的影响程度。该方法因其计算简单、结果易于解释，常被用于初步评估重金属污染水平。设某种重金属的污染指数为 (PI) ，当其数值超过1时，表明污染物浓度超标。尽管该方法在污染源追踪和污染物浓度峰值分析中表现优越，但对多种污染物的交互影响却无法全面刻画。

综合污染指数法通过整合多种重金属污染指数，对整体污染程度进行定量化表述。常用的方法包括加权平均法和多因子综合评价法，其核心在于确定权重分配，以反映不同污染物在总体污染中的贡献度。综合污染指数的高低不仅表明污染程度，还揭示出潜在的生态风险。在应用时，需结合土壤背景值的区域差异性和标准限值的适配性，以确保评估结果的科学性和适用性。此类指数法特别适用于大范围土壤污染监测中的数据处理和对比分析。

(二) 数学模拟与预测模型

数学模拟为污染扩散过程的研究提供了强有力的工具，其基于数学方程建立的动态模型能够精准反映重金属污染物的迁移、累积与扩散特性。常见的模型包括对流扩散模型和吸附解吸模型。对流扩散模型通过描述重金属在土壤中的流体流动和分子扩散行为，揭示污染物沿水平和垂直方向的迁移过程；吸附解吸模型则重点关注污染物在土壤颗粒表面的化学和物理作用机制，模拟其动态平衡过程；在预测污染扩散趋势方面，结合时间序列分析和空间动态模拟的混合模型显示出高度适应性。引入参数校准与误差修正机制，模型能够有效提高预测精度。同时，污染防治效果的模拟实验也常借助数学模型进行评估。数学模拟的前景在于与

实时监测数据的动态耦合,从而实现高时效性的污染预测和防治决策支持。

(三)空间分析与地统计方法

地理信息系统(GIS)通过整合多源数据,构建污染物分布的空间可视化模型,能够直观呈现污染的空间变异特征。GIS支持下的叠加分析与缓冲区分析,为评估污染源的影响范围和污染热点区域提供了工具;地统计学方法通过构建土壤属性的空间变异模型,对重金属污染的分布规律进行深入研究。常用的克里金插值技术结合样点数据,预测未采样区域的污染程度,广泛应用于污染空间扩散模式的研究。协同克里金插值则利用协变量信息,提高了预测的精确性。半方差分析能够量化重金属污染的空间相关性,为优化采样设计提供依据。

Q 土壤重金属污染监测与评估技术的发展趋势

(一)智能化与自动化

智能化和自动化的引入正在逐步改变土壤重金属污染监测与评估的传统模式。采用人工智能算法,可以将监测过程中的数据采集、分析与结果反馈实现全流程自动化。例如,深度学习技术能够快速处理高维度、多源数据,从中提取关键污染特征。卷积神经网络(CNN)在高光谱影像处理中的应用,使得土壤重金属分布检测的精确性和效率得到了质的提升。同时,强化学习算法通过与环境的交互,不断优化监测策略,适用于复杂多变的污染场景。

无人机和自动化监测机器人作为智能化技术的重要载体,正在逐步替代传统人力操作。这些设备可以搭载高精度传感器和实时分析模块,在复杂地形和高风险区域内执行任务,有效降低人力成本和操作风险。为了确保监测结果的准确性,人工智能技术还被应用于异常数据识别和质量控制环节。例如,基于聚类算法的异常检测技术能够快速定位监测数据中的偏离点,为结果校正提供依据。

(二)集成化与多功能技术

集成化与多功能技术的发展为土壤重金属污染监测系统带来了全新升级。将监测、分析和评估功能整合到同一系统内,不仅能够优化资源配置,还能提升工作效率。例如,一体化便携设备已集成了传感器、数据分析模块和结果显示界面,使得现场数据采集与初步分析可以同步完成。在数据管理与分析层面,多功能平台的开发实现了多源数据的整合与交互。大数据技术与地理信息系统(GIS)的结合,使得污染数据的空间分析与动态追踪更加直观。基于云计算的在线平台支持远程访问与多用户协作,可以实时更新数据,便于跨区域合作与决策支持。智能化决策模块已逐步嵌入集成化系统中,调用历史数据与实时监测数据,自动生成最优防治方案。

(三)便携化与低成本仪器

便携化和低成本监测设备的推广正在显著提升土壤重金属污染监测的普及率。传统监测设备因体积大、成本高,难以满足基层监测和大规模推广需求。针对这一问题,小型化技术的发展使得便携设备能够在保证精度的前提下显著降低重量与体积。例如,微型光谱仪和电化学传感器的结合,为现场快速检测提供了技术基础。另外,为了进一步降低设备成本,新型材料和工艺被引入到传感器制造中。例如,基于纳米材料的传感器具有高灵敏度和低能耗的特点,其批量生产的成本远低于传统技术。开源硬件与软件的普及为低成本设备的开发提供了广阔空间,开发者可以利用定制化设计以满足特定应用需求。

Q 结束语

土壤重金属污染的监测与评估技术是保障环境安全与健康的关键。通过化学分析技术、高光谱成像和传感器等手段,可以实现土壤重金属含量的精准测定,为后续评估提供可靠基础。在数据采集与处理环节,高精度仪器和大数据分析技术有效提升了监测数据的准确性和实用性,清洗与建模技术进一步优化了数据质量与预测能力。评估方法中,单因子与综合污染指数法简化了污染程度的量化过程,数学模型与空间分析技术则为污染分布和趋势预测提供了多维度支持。未来的发展趋势将集中在智能化、集成化和便携化,通过智能算法优化监测流程,利用多功能系统整合技术资源,同时推动低成本设备的研发与应用,为监测与评估提供了更多可能性。通过这些技术的不断发展与应用,土壤重金属污染的防治和修复将更加科学、高效,为生态环境保护和可持续发展提供重要支撑。

Q 参考文献

- [1]张娟,叶翠,张潇天.论土壤中重金属污染监测的现状与发展[J].科技视界,2020(21):152-153.
- [2]陈付荣.我国土壤重金属污染现状监测及其防治浅析[J].清洗世界,2022,38(08):128-130.
- [3]高鲁红.区域土壤重金属污染监测方法研究[J].环境科学与管理,2023,48(05):125-130.
- [4]杨媛媛.我国土壤重金属污染的监测与环境保护策略[J].皮革制作与环保科技,2022,3(16):42-43,50.
- [5]沈文娟,蒋超群,侍昊,等.土壤重金属污染遥感监测研究进展[J].遥感信息,2014,29(06):112-117,124.

作者简介:

郭庆闪(1991-),男,汉族,安徽亳州人,本科,助理工程师,安徽省蚌埠生态环境监测中心,研究方向:环境监测。