

Study on long-term monitoring technology of soil pollution and remediation effect

Qifeng Wu¹ Yongbin Zhao²

1. Inner Mongolia Lvyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 017010, China

2. Ordos Ecological environment Monitoring and Control Center, Ordos, Inner Mongolia, 017010, China

Abstract

Soil pollution exhibits characteristics including complex pollutant types, strong spatial heterogeneity, and unpredictable temporal variations. The effectiveness evaluation and dynamic regulation during remediation processes impose higher demands on monitoring technologies. To meet the requirements for establishing long-term monitoring systems, it is essential to integrate techniques such as pollution source identification, remediation process types, and environmental response mechanisms to build a comprehensive monitoring framework with broad coverage, high resolution, and rapid responsiveness. By deploying various sensors and integrating IoT with data analysis methods, real-time monitoring and trend prediction of pollutants can be achieved, significantly enhancing the quantitative assessment of remediation outcomes. Long-term monitoring not only supports scientific decision-making in soil remediation processes but also provides foundational support for post-remediation management and risk early warning, driving soil environmental governance toward precision, dynamism, and intelligitization.

Keywords

soil pollution; remediation technology; long-term monitoring; data analysis; environmental assessment

土壤污染与修复效果的长期监测技术研究

吴启峰¹ 赵永彬²

1. 内蒙古绿研环保科技有限公司, 中国·内蒙古·鄂尔多斯 017010

2. 鄂尔多斯市生态环境监测监控中心, 中国·内蒙古·鄂尔多斯 017010

摘要

土壤污染问题呈现出污染物种类复杂、污染空间异质性强与时序变化不确定等特征, 修复过程中的效果评估和动态调控对监测技术提出更高要求。针对长期监测的系统构建需求, 需结合污染源识别、修复工艺类型与环境响应机制进行技术集成, 构建覆盖面广、分辨率高、响应及时的监测体系。通过部署多类型传感器、融合物联网与数据分析手段, 可实现污染因子的实时捕捉与趋势预判, 有效提升对修复成效的量化判断能力。长期监测不仅支撑土壤修复过程的科学决策, 也为后期管理与风险预警提供基础保障, 推动土壤环境治理向精准化、动态化、智能化方向迈进。

关键词

土壤污染; 修复技术; 长期监测; 数据分析; 环境评估

1 引言

随着工业化与城镇化的快速推进, 大量有毒有害物质进入土壤环境, 形成难以自然降解的复合型污染。传统修复工作在治理手段选择、目标设定与效果评价方面存在信息缺失与响应滞后问题, 制约治理效率。土壤污染的治理已不再仅依赖修复技术本身, 更需依托长期连续的监测系统支撑全过程管理。从污染识别、修复介入到后期评估, 每一阶段对监测系统的精度、广度与数据稳定性都提出具体要求。构建高效、稳定、智能的土壤污染长期监测技术体系, 成为提升

修复成效与保障土壤生态安全的关键技术路径。

2 土壤污染成因分析与典型污染类型识别

2.1 土壤污染物的来源结构与分布特征分析

土壤污染物的来源结构受到区域产业结构、人口密度与土地利用模式的共同影响, 在空间上呈现出显著的不均质分布特征。工业活动排放带来的重金属沉积物集中在工业园区与交通干道沿线, 农业区域则多见农药与化肥残留形成的有机污染物带。城市建设用地中的生活垃圾填埋、污水渗漏及历史遗留污染点常构成多源复合型污染区域。在垂直剖面上, 不同污染因子在土层中存在滞留性与迁移性差异, 部分难降解物质如铅、镉长期积聚于表层 30 厘米范围内, 而部分有机污染物则随水分运动向下迁移至 80 厘米以上深层。

【作者简介】吴启峰(1987-), 男, 蒙古族, 中国内蒙古兴安盟人, 本科, 工程师, 从事环境保护与监测研究。

高密度监测数据显示,在土地利用强度较高区域,污染物浓度较周边区域平均值高出3.6倍,呈明显聚集态势。

2.2 典型污染因子的理化性质与迁移机制探讨

土壤中的典型污染因子包括铅、汞、镉等重金属类和多环芳烃、邻苯二甲酸酯等有机类物质,不同成分在理化属性方面差异显著,直接决定其在土壤中的行为方式。重金属类物质具有高密度、低挥发性特征,在土壤中以离子态或络合态存在,容易与粘土矿物、有机质形成稳定结合物,在酸性条件下溶出性增强。有机污染物因具有疏水性强、挥发性高等特性,容易吸附于有机质或在气相中扩散。部分物质在微生物代谢下发生降解反应,产生中间代谢产物,形成二次污染风险。在不同水文条件与pH背景下,污染物的迁移途径呈现复杂动态,水分携带是主要向下迁移驱动因素,年降水量超过800毫米地区污染向深层传输能力增强40%以上,对地下水系统构成潜在威胁^[1]。

3 土壤修复技术对长期监测工作的技术要求

3.1 化学修复技术对监测指标体系构建的影响

化学修复通过药剂投加或反应调控改变污染物的化学形态与活性,对监测体系提出更高指标设定需求。稳定化处理常引入钙基、铁基材料以降低重金属生物可利用性,监测指标应涵盖有效态金属含量、pH、氧化还原电位等关键因子。氧化还原法通过过氧化氢、高锰酸钾等氧化剂引发污染物结构裂解,修复过程中需实时跟踪反应副产物浓度、土壤氧化还原状态变化及有机质损耗速率。药剂反应具有强烈的空间非均质效应,监测点设置需兼顾反应区与缓冲区,以反映修复效果的空间过渡。监测频率受制于反应活性期,短周期高频监测阶段一般持续2至4周,后期可转入月度监测。

3.2 生物修复措施对监测频率与周期的具体需求

生物修复依赖微生物代谢或植物吸收实现污染物降解、固定或富集,修复过程具有缓慢演进与季节性显著特点,决定了长期监测工作的频率与周期设置应体现动态变化趋势。植物修复要求监测植物根际土壤中污染物浓度、生物量变化与金属富集系数,同时结合植物生长周期调整数据采集节奏,关键时期每月采样一次以捕捉高效吸收阶段。微生物修复涉及土壤中菌群活性、有机质含量及温湿度等多重变量变化,需结合修复初期、中期与稳定期阶段分别设计日常与定期采样方案。部分微生物强化技术在30至60天内形成代谢高峰,应在此期间加密数据采集密度,确保污染物降解率与微生物活性间的耦合关系被完整记录。

4 土壤长期监测系统的技术集成与运行模式

4.1 长期监测网络中传感器布设策略的技术优化

长期监测网络建设需兼顾空间代表性、数据覆盖度与技术可操作性,在布点密度、深度分布与地形适配方面实现系统优化。针对污染分布梯度显著的区域,每平方公里设置不低于6个传感节点可确保污染水平的空间分辨率达90%

以上。剖面垂向布设采用三层布点方式,分别在表层20厘米、中层50厘米与深层100厘米部署传感器,形成三维污染动态响应结构。在不同土地利用背景下,点位设计需融合土壤质地、电导率与湿度分布特性进行布设调整,硬质粘土区采用浅层高密布点模式,砂性壤土区则采用深层穿透式监测方案。传感器选型强调抗干扰能力与长期稳定性,误差范围控制在 $\pm 3\%$,数据传输率达到98%以上,确保动态变化的连续捕捉能力^[2]。

4.2 多参数监测设备的功能配置与协同采集方案

多参数监测设备在长期运行中需满足对不同类型污染因子和环境变量的同步监测需求,关键配置包括离子选择电极、光谱比色模块与温湿度集成传感单元。一套标准配置的采集单元可同时获取铅、镉、汞、pH值、温度与土壤含水率等8项核心指标,采样频率为每小时1次,每日数据量可达192组。为降低设备间数据干扰与能耗浪费,采用主从式无线通信结构,主节点统一协调6台从节点进行数据同步采集与压缩上传。设备集成太阳能供电模块与备用电池系统,在连续阴雨条件下可维持72小时稳定运行。节点间通过ZigBee与NB-IoT技术实现短距协调与远程回传,每天总传输量可达15MB,在数据丢包率小于1%的条件下确保所有变量的稳定记录。分析结果通过可视化平台进行动态展示,系统具备异常数据回溯与修正功能,支持人工复核与自动纠偏,确保监测数据在应用过程中的科学性与连续性,详见图1。

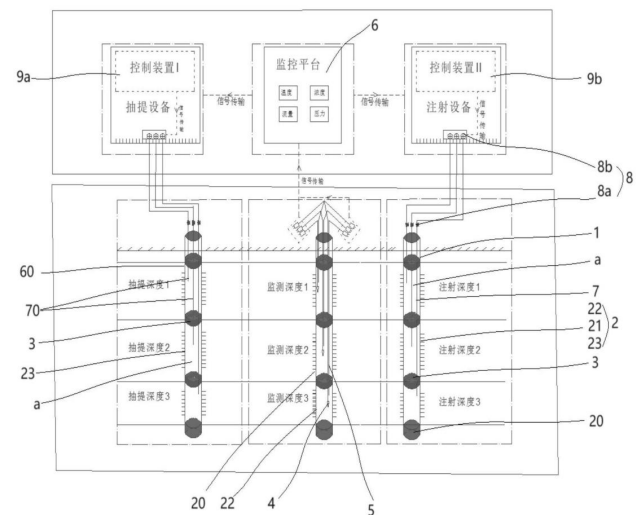


图1 一种用于有机污染土壤自动化精准监测体系

5 土壤污染修复效果评估中的监测数据应用

5.1 关键污染物浓度变化对修复阶段划分的支持

土壤修复过程的阶段性特征在污染物浓度的动态变化中体现明显,污染物含量的数值波动能够反映修复介入的效果与时序进展。在修复初期,外源性干预手段引发污染物浓度迅速下降,以重金属铅为例,部分区域在第一个月内平均

下降幅度达到18%,说明修复体系开始对污染因子产生反应。在中期阶段,污染物浓度变化趋于缓慢,部分点位下降幅度不足3%,数据波动区间收窄至 $\pm 1.5\%$,表明污染迁移通量受到阻断或固化过程逐步稳定,修复体系进入效率减缓状态。后期阶段污染物残余值与国家土壤质量基准限值接近,如镉浓度稳定在0.3mg/kg以下,结合时间轴与数据平稳度判断修复已趋近尾声^[3]。若出现阶段末期污染物浓度反弹或波动放大现象,应结合周边环境因素与人为扰动情况评估二次污染可能性,必要时调整修复手段或延长治理周期。污染物浓度变化在不同阶段的走势形成分段拐点,为阶段判定提供直观依据,同时也支撑后续治理效果归因分析。

5.2 历史监测数据在修复策略动态调整中的作用

土壤修复工作的持续性与复杂性决定了对历史监测数据的依赖性必须提升至策略制定核心层面,不同时间段、不同条件下的监测信息可为修复手段的适配性、持续性与响应性提供技术支撑。通过对比污染物在同一位置、不同时间节点上的浓度变化,能够识别当前修复方式是否具备连续效果,在部分污染因子30天内浓度变化低于5%的区域,常提示修复手段失效或干预不足。历史数据还可揭示污染扩散路径与累积趋势,通过回溯一年内的重金属铬在垂向剖面中的浓度变化发现,其在50厘米至70厘米层间迁移速率提升42%,提示需要增加该深度的阻隔层设计。在制定季节性修复计划时,历史数据中温度、湿度变化对修复效率的影响趋势可作为优化依据,部分微生物修复技术在气温低于15℃条件下降解率下降超过60%,因此调整修复时间窗口可显著提升整体效率。历史监测信息还能作为模型训练数据输入,用于建立污染物变化趋势预测模型,提升前瞻性判断能力,降低策略调整的滞后性与盲目性^[4]。

5.3 多时序监测结果在成效评估与预警机制中的嵌入路径

多时序监测结果构成了土壤修复效果动态评估与风险预警体系的基础数据层,通过在空间与时间维度同步分析污染物浓度变化规律,可实现对修复效能的细致量化与过程控

制。日尺度数据可反映短期波动响应,便于识别外源扰动引发的异常变化,周尺度数据适用于过程阶段划分与修复模式评价,月尺度数据则有助于趋势判断与长期成效归纳。在污染物浓度七天滑动平均值低于预设下降阈值0.8%时,系统自动触发预警提示,提示修复成效显著减弱或措施需更换。在数据平台中嵌入基于污染物指标设定的可视化仪表盘,结合GIS图层可实现污染变化分布实时展示,管理人员可通过时间轴调取不同监测节点的数据走势,对修复成效进行综合研判。成效评估模型通过整合历史趋势、当前值与设定阈值,形成自动评分系统,对修复区域划分为高效、达标、警戒与失效四个等级,每个等级对应不同的治理建议与资金分配策略。多时序数据在系统中通过数据库接口、时序分析模块与模型嵌入路径构成完整技术链条,保障评估结果的科学性与预警机制的实时性。

6 结语

土壤污染问题的复杂性与修复工作的长期性决定了监测技术在整个治理过程中的核心地位。通过科学布设传感网络、集成多参数采集设备并构建智能分析平台,不仅能够实时掌握污染物动态变化,还能为修复阶段划分、策略调整与成效评估提供系统支撑。多时序监测数据的持续积累与应用,有助于实现土壤治理从粗放干预向精准管控的转变,推动环境管理模式迈向科学化、数据化与高效化。构建完善的土壤长期监测体系,是实现生态修复目标与保障土壤安全不可或缺的技术支柱。

参考文献

- [1] 李登峰.农业耕地土壤的重金属污染监测技术与治理路径研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(13):91-93.
- [2] 詹佳逸.土壤重金属污染的远程监测与治理技术应用[J].化工管理,2025,(19):72-75.
- [3] 张士光,王菲菲.土壤环境监测数据分析与预测模型的构建研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(12):76-78.
- [4] 冯淑娟.工业园区金属污染土壤与地下水治理技术研究[J].中国资源综合利用,2025,43(06):146-148.