

土壤环境监测及污染修复技术的深化研究

郭梦龙

河南省资源环境调查三院有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i6.3243

[摘要] 土壤圈层作为地表圈层交互的核心介质,承载着物质迁移转化的全过程,各类外源物质持续改变土壤理化与生物属性,多层级监测体系由此成为掌握土壤状态的核心依托。土壤内部重金属、有机污染物存在吸附、淋溶、生物转化等多重反应,单一检测手段难以完整捕捉时空维度的浓度波动,多源传感、光谱解析、网格布点形成的复合监测体系可实现全域土壤状态的连续刻画。土壤修复工艺由单一处置转向多工艺协同组合,物理调控、化学钝化、生物降解各自适配不同污染基底,多种工艺叠加可消解单一技术存在的作用边界局限。立足河南区域土壤基底特征、产业污染来源与土地整治业务场景,从多个方面展开梳理,完整阐述监测与修复两类技术的演化逻辑与落地路径,形成适配中原地域土壤治理业务的技术应用框架。

[关键词] 土壤监测; 污染修复; 土壤治理

中图分类号: Q938.1+3 **文献标识码:** A

In-depth Research on Soil Environmental Monitoring and Contamination Remediation Technologies

Menglong Guo

The Third Institute of Resources and Environment Investigation of Henan Province Co., Ltd.

[Abstract] As the core medium for the interaction of surface spheres, the soil layer carries the entire process of material migration and transformation. Exogenous substances continuously alter the physicochemical and biological properties of soil, making a multi-level monitoring system the essential foundation for understanding soil conditions. Within the soil, heavy metals and organic pollutants undergo multiple reactions such as adsorption, leaching, and biotransformation, making it difficult for single detection methods to fully capture concentration fluctuations across space and time. A composite monitoring system formed by multisource sensing, spectral analysis, and grid-based sampling enables continuous characterization of soil conditions across the entire area. Soil remediation technologies have shifted from single treatment methods to multi-technique synergistic combinations. Physical regulation, chemical passivation, and biodegradation each suit different contaminated substrates, and the stacking of multiple techniques can mitigate the operational limitations of individual technologies. Based on the soil substrate characteristics, industrial pollution sources, and land remediation scenarios in the Henan region, this study systematically examines various aspects to comprehensively elucidate the evolutionary logic and implementation pathways of monitoring and remediation technologies, ultimately forming a technical application framework tailored to soil management in the Central Plains region.

[Key words] Soil monitoring; Pollution remediation; Soil management

引言

国土空间综合管控体系持续完善,土壤质量管控覆盖农用地、工业遗留地块、矿山损毁场地等多元空间,区域土壤基底差异、产业排放类型决定监测与修复工艺的选用逻辑。监测工作为全部土壤治理作业提供底层数据支撑,修复工艺直接决定土壤恢复后的理化与生物指标,两类技术体系相互支撑构成完整土壤治理作业链条。梳理监测技术迭代方向与修复工艺组合逻辑,

结合河南本土土壤基底与业务场景搭建技术应用框架,能够为区域土壤污染治理、生态恢复、土地整治等相关作业提供完整技术参照。

1 土壤环境监测整体体系架构

土壤环境监测完整体系由点位布设、样品前处理、多维度检测、数据解析四层结构组成,四层结构形成闭环数据流,逐层完成土壤本底、污染分布、动态波动的完整刻画。点位布设决

定数据空间代表性,不同用地类型、水文条件、产业分布对应差异化网格密度,山地矿区、化工遗留地块、连片耕地设置差异化加密规则,消除均质布点带来的数据偏差。样品前处理环节针对黏土、砂质、有机质富集土壤设计分离消解流程,消解方式匹配目标污染物理化属性,规避土壤基质对检测信号的干扰。多维度检测整合实验室精准分析与田间快速筛查两类模式,两类检测数据交叉校验,平衡大范围摸排与精准定量两类作业需求。数据解析依托土壤迁移规律构建空间插值模型,结合区域降水、地下水埋深参数推演污染物扩散范围,完成污染边界精准划定。

2 土壤环境细分监测技术体系

2.1 田间快速传感监测技术

田间传感监测依托微型电极、光谱探头实现原位无破损检测,设备可长期埋入土壤深层获取连续时序数据,消解人工周期性采样带来的时间断点。电化学传感模块针对重金属离子、土壤酸碱度、可溶性盐分设计专属感应元件,元件表层修饰选择性吸附涂层,降低土壤有机质、黏土胶体产生的信号干扰,设备响应时长控制在数十秒区间,单点位可持续留存三年以上连续数据。可见光近红外光谱探头通过土壤反射光谱反演有机质、氮磷钾养分指标,结合化学计量模型压缩光谱噪声,无需化学消解即可完成田间批量筛查。两类传感设备搭配无线传输模块,网格布设后形成全域感知网络,降雨、灌溉等水文扰动时段同步捕捉污染物浓度脉冲变化,完整记录土壤物质短期波动特征。整套传感技术适配河南百万亩连片耕地常态化监测作业,可嵌入高标准农田整治配套监测节点,持续输出地力与污染物同步变化数据,为田间轻度污染管控提供连续时序支撑。

2.2 实验室精准定量监测技术

实验室定量监测作为传感筛查的校验基底,依托消解分离、色谱质谱联用设备完成污染物精准浓度测定,适配工矿地块、重度污染场地精细化摸排作业。重金属检测采用湿法消解搭配原子吸收、电感耦合等离子体质谱设备,消解体系根据土壤黏土占比调整酸液配比,完全剥离胶体吸附态重金属,检出限值匹配农用地与建设用地两类管控阈值。有机污染物采用索氏萃取、固相微萃取完成土壤有机组分分离,气相色谱质谱联用设备区分多环芳烃、农药残留、化工中间体各类有机物质,同步定量各类组分含量。整套流程设置平行样、空白样、标准物质三重质控环节,消除消解、进样环节产生的数据偏移,检测数值可直接作为修复工艺设计的定量依据^[1]。

2.3 区域尺度遥感反演监测技术

遥感反演技术依托航空、卫星多光谱影像完成大范围土壤表层污染空间刻画,适配县域尺度全域土地整治前期摸底作业。影像预处理环节完成大气校正、植被掩膜处理,剔除农作物、地表植被对土壤光谱信号的遮挡,裸露耕地、废弃工矿地块可直接提取表层土壤反射特征。构建光谱参数与重金属、有机质含量的统计关联模型,以机器学习算法筛选特征波段,降低粉尘、地表积水带来的模型误差,生成千米尺度土壤质量分布图。多时序影像叠加可对比多年土壤光谱变化,推演污染物逐年扩散范围,

锁定新增污染片区。遥感监测仪覆盖土壤表层二十厘米区间,需搭配深层点位传感、实验室检测完成剖面数据补充,形成宏观区域与微观点位联动监测模式。

3 土壤污染修复基础技术类别

3.1 土壤物理调控修复工艺

物理调控依靠外力改变土壤颗粒结构、污染物空间分布,适用于高浓度重金属、难降解有机污染物重度污染地块。热脱附工艺通过控温加热促使有机污染物挥发分离,温控区间区分轻质农药与高分子化工污染物,配套废气收集处理单元,避免气态污染物二次扩散。电动修复借助电极电场驱动重金属离子定向迁移,电极排布匹配场地地下水流向,缩短离子迁移路径,适用于黏性密闭土壤。客土重构工艺剥离重度污染表层土壤,覆盖未污染均质土层,同步调整土壤颗粒配比,优化孔隙结构,多用于连片耕地轻度污染改造。各类物理工艺作业强度较高,单地块处置周期较短,配套固废处置单元收纳剥离污染土壤。整套物理工艺适配河南关闭化工厂区、历史小型矿山地块修复作业,在建设用地土地整治、损毁山体生态恢复项目中批量应用,快速削减表层高浓度污染物基底^[2]。

3.2 土壤化学稳定修复工艺

化学稳定通过药剂与污染物发生络合、沉淀、吸附反应,降低土壤中污染物可溶迁移形态,适用于农用地中度重金属污染土壤。钝化药剂选用改性生物炭、黏土矿物、硫酸盐复合体系,药剂孔隙结构吸附游离重金属离子,表层官能团形成稳定络合物,降雨淋洗场景下抑制离子向地下水迁移。有机污染土壤搭配氧化药剂,催化分解高分子有机组分,拆分难降解环状结构,转化为低分子无害物质。药剂投加量根据实验室定量监测数据调整,分层翻拌保障药剂与土壤均匀混合,翻拌深度匹配作物根系活动区间,避免药剂集中堆积产生局部理化突变。整套化学工艺流程简便,药剂原料可选用区域农业废弃物加工产物,适配河南大面积耕地安全利用改造,嵌入高标准农田土地整治配套改良工序,同步实现污染物管控与地力提升双重作用。

3.3 土壤生物降解修复工艺

生物降解依托微生物、超富集植物代谢作用消解或固定土壤污染物,整体作业扰动强度偏低,适配连片耕地、生态缓冲带长效治理。微生物修复投加功能菌剂,菌剂以秸秆生物炭为载体,菌体代谢过程分泌有机酸,活化胶体吸附重金属离子,同步降解农药、多环芳烃有机组分。植物修复选用本土耐污富集植被,植被根系吸收土壤游离重金属,地上植株定期采收统一处置,根系分泌物改良土壤微生态,提升土壤微生物活性。两类生物载体搭配绿肥轮作体系,每年持续补充有机质,重构土壤微生物群落结构,长效维持污染物低迁移状态。整套生物工艺周期跨度更长,无外源强化学药剂投入,适配河南沿黄耕地、南水北调沿线生态缓冲带治理,在全域土地综合整治生态修复板块长期落地,兼顾土壤治理与农田生态系统养护^[3]。

4 土壤环境监测修复融合路径

4.1 耕地整治配套监测修复模式

河南境内耕地覆盖面积广阔,土壤污染以镉铅轻度重金属、农药残留复合类型为主,土地整治工程同步开展地力提升与污染管控两类作业。监测环节采用田间传感网格搭配年度实验室定量抽检,遥感影像划定片区污染分布,监测节点同步记录养分与重金属两类指标,数据作为整治改良方案编制依据。修复环节采用化学钝化药剂搭配轮作生物修复联合体系,药剂依托本地小麦秸秆制备改性生物炭,翻拌工序嵌入土地平整作业流程,整治沟渠同步设置生态拦截带,拦截农田径流携带可溶性重金属。监测网络长期留存于整治后高标准农田,每季同步输出土壤动态数据,药剂投加量、植被搭配方案根据年度监测数值微调,形成监测数据驱动修复运维的闭环模式。整套模式适配黄淮平原连片高标准农田整治项目,同步完成土壤污染管控、耕地地力提升、田间监测网络布设三项作业,贴合区域粮食种植基地长期土壤养护需求。

4.2 工矿地块整治配套监测修复模式

豫北、豫西分布大量关停化工、有色金属遗留地块,土壤呈现重金属有机复合重度污染,土地整治包含场地平整、地貌重塑、生态复绿完整工序。监测阶段分层采集不同深度土壤样品,实验室定量区分各类污染物浓度,遥感锁定污染羽空间范围,网格传感捕捉地下水界面污染物波动,完整绘制场地三维污染分布图。修复先采用热脱附剥离表层高浓度有机组分,电动工艺驱动深层重金属定向富集,表层覆盖钝化改良土层,复绿阶段种植本土耐污灌木草本构建生物修复层。整治平整作业同步铺设地下防渗阻隔层,阻断污染物向下游地下水迁移,场地边角布设长期监测传感节点,全年连续记录土壤与地下水污染物变化。整套流程将详查监测、分层修复、地貌整治、长效监测整合为一体化作业链条,适配矿山损毁土地、化工遗留地块生态恢复项目,完成重度污染场地安全改造与地貌重构双重目标^[4]。

4.3 流域生态修复监测修复融合路径

河南黄河干流、南水北调中线沿线分布大面积生态缓冲耕地,农业面源污染持续造成土壤氮磷累积与微量重金属富集,生态恢复作业兼顾水质阻隔与土壤养护。监测体系沿水系布设带状传感网格,同步采集土壤、沟渠水体两组数据,多时序遥感对比缓冲带土壤多年变化,实验室季度抽检判定污染物迁移风险。修复依托生态沟渠、缓冲林带构建立体生物修复体系,沟渠水生植物截留径流污染物,缓冲带富集植被吸收土壤微量重金属,土壤内部投加本土微生物菌剂持续降解农残。全域土地综合整治同步优化缓冲带空间布局,拓宽水系周边生态土壤范围,监测数据每年调整植被配比与菌剂投加规模,依靠连续时序数据维持缓冲带长效阻隔功能。整套路径适配跨流域生态治理项目,协调

土壤治理、水系防护、土地空间优化三类业务内容,降低面源污染物向主干水体迁移的长期风险。

4.4 区域长效运维监测配套机制

土壤修复、土地整治工程完工后污染物存在二次活化潜在趋势,长效监测机制为后期运维调整提供数据支撑,适配河南各类治理项目长期管护需求。全域治理片区布设分层传感网络,浅层耕作层、深层隔水层分别布设感应设备,全年无间断记录污染物、酸碱度、盐分动态数值,数据同步接入区域土壤治理信息平台。每年开展一次全域实验室定量抽检,与传感时序数据交叉校验,修正长期设备漂移带来的信号偏差,结合当年降水、灌溉数据推演次年污染物活化风险。根据监测输出的波动数值调整运维方案,数值抬升片区补充钝化药剂、增植富集植被,稳定片区维持常规绿肥轮作养护。长效监测设备整合进土地整治配套基础设施,与田间灌溉、水土保持设施同步管护,无需单独增设大规模作业投入,完整搭建治理完工后土壤状态持续感知体系,保障修复后土壤长期维持安全利用区间。

5 结语

综上所述,土壤环境监测形成点位布设、前处理、多维度检测、数据解析四层完整架构,田间传感、实验室定量、遥感反演三类技术分别适配不同空间与时间尺度摸排需求,多重监测手段交叉校验能够完整刻画土壤污染物时空分布规律。土壤修复分为物理调控、化学稳定、生物降解三类基础工艺。结合河南耕地、工矿地块、流域生态三类土地整治业务场景,搭建监测与修复一体化作业模式,配套长效监测运维机制,实现土壤污染消除、地力恢复、地貌重塑同步推进。后续土壤治理相关作业可进一步细化不同基底土壤监测参数阈值,优化本地农林废弃物制备修复药剂的加工工艺,完善区域差异化监测修复融合方案,持续适配中原全域土壤污染治理与生态恢复长期业务开展。

[参考文献]

- [1]雷喜云,王芳,韩家杰,等.土壤环境监测及污染防治技术探究[J].环境保护与循环经济,2025,45(11):84-88.
- [2]何丽红.土壤环境监测及污染修复技术研究[J].清洗世界,2025,41(9):187-189.
- [3]吴亚楠.污染地块土壤环境现状与修复策略分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(23):136-138.
- [4]侯光宇,鞠然.土壤环境保护与污染防治对策分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(6):96-98.

作者简介:

郭梦龙(1990--),男,汉族,河南新乡人,硕士研究生,工程师,研究方向:地质水工环。