

土壤重金属污染修复技术的应用现状及问题探析

徐乐微 季云

泰科检测科技江苏有限公司, 中国·江苏 泰州 225300

摘要: 土壤重金属污染已成为全球性环境难题, 严重威胁生态系统安全与人体健康。本文梳理了该污染的三大核心来源: 工业领域的采矿、冶金、电镀等环节排放重金属, 农业领域来自高重金属杂质的化肥、有机肥、污灌及相关农药的施用, 交通领域则来自尾气排铅、轮胎磨损产锌粒、车辆部件脱落金属碎片等途径, 明确了重金属难分解、易富集、毒性持久的特性, 会破坏土壤生境、沿食物链逐级放大, 甚至诱发人体肾衰、骨骼畸形、神经紊乱、癌症等问题, 凸显了污染治理的紧迫性与长远价值。文章深入剖析了当前主流的三类修复技术: 以客土法、电动修复为代表的物理修复, 以固化稳定化、淋洗修复为代表的化学修复, 以植物修复、微生物修复为代表的生物修复, 结合实际工程案例说明各类技术的应用特点与优势。同时指出这类技术大面积推广时仍存在突出障碍: 修复成本高昂、处理周期偏长, 存在二次污染风险, 各类技术自身存在适用范围局限, 且不同技术间协同不足, 缺乏覆盖全流程的长效监管机制, 严重制约修复实效。据此提出, 未来需重点研发绿色低碳、长效稳定的可持续修复技术, 推动多技术融合联用, 同时完善配套政策法规体系, 搭建覆盖治理全周期的动态监测与长期管理机制, 支撑土壤修复行业高质量、绿色化发展。

关键词: 土壤重金属污染; 修复技术; 应用现状; 问题分析; 可持续治理

Application Status and Problems Analysis of Soil Heavy Metal Pollution Remediation Technology

Xu Lewei, Ji Yun

Taike Testing Technology Jiangsu Co., Ltd., China Jiangsu Taizhou 225300

Abstract: Soil heavy metal pollution has become a global environmental problem, seriously threatening ecosystem security and human health. This article summarizes the three core sources of pollution: heavy metal emissions from mining, metallurgy, electroplating, and other processes in the industrial sector; fertilizers, organic fertilizers, sewage irrigation, and related pesticides with high heavy metal impurities in the agricultural sector; and lead emissions from exhaust gases, zinc particles from tire wear, and metal fragments from vehicle parts in the transportation sector. It clarifies the characteristics of heavy metals, such as difficult decomposition, easy accumulation, and persistent toxicity, which can damage soil habitats, gradually amplify along the food chain, and even induce problems such as kidney failure, bone deformities, neurological disorders, and cancer in the human body, highlighting the urgency and long-term value of pollution control. The article deeply analyzes the three mainstream restoration technologies: physical restoration represented by guest soil method and electric restoration, chemical restoration represented by solidification stabilization and leaching restoration, and biological restoration represented by plant restoration and microbial restoration. It combines practical engineering cases to illustrate the application characteristics and advantages of various technologies. At the same time, it is pointed out that there are still prominent obstacles to the widespread promotion of such technologies: high repair costs, long treatment cycles, risks of secondary pollution, limited applicability of various technologies, insufficient collaboration between different technologies, and lack of long-term regulatory mechanisms covering the entire process, which seriously restrict the effectiveness of repairs. Based on this, it is proposed that in the future, the focus should be on developing green, low-carbon, long-term and stable sustainable remediation technologies, promoting the integration and use of multiple technologies, while improving the supporting policy and regulatory system, establishing a dynamic monitoring and long-term management mechanism covering the entire governance cycle, and supporting the high-quality and green development of the soil remediation industry.

Keywords: Heavy metal pollution in soil; Repair technology; Application status; Problem analysis; Sustainable governance

0 引言

伴随工业化、城市化和农业现代化迅猛推进,土壤重金属污染已成为威胁全球生态安全与人类健康的突出环境难题。重金属经由工业排放、农业投入品施用、交通活动等多元途径侵入土壤,凭借难分解、易富集、毒性持久的特性沿食物链逐级传递,对生态系统稳定和公共健康形成长期隐性威胁。当前国内外已开发出物理、化学、生物等多类修复技术,且在实际应用中取得一定成效,但技术落地推广过程中仍面临诸多现实阻碍。本文梳理土壤重金属污染的核心来源与危害,点明污染治理的紧迫性,重点剖析主流修复技术的实际应用特征,深入探究技术落地过程中暴露的成本、周期、二次污染与技术适配性等痛点问题,同时指明未来绿色可持续修复技术的研发方向与综合治理体系的优化路径,为国内土壤重金属污染修复工作的科学决策与高效落地提供参考支撑。

1 土壤重金属污染概况

1.1 主要来源与危害

土壤重金属污染来源可划分为工业、农业、交通三大核心类别。工业是最主要污染源,采矿、冶金、电镀、化工生产及电子废物处理等环节会释放大量的镉、铅、汞、砷、铬等重金属,经废水直排、废渣堆存、废气沉降等途径进入土壤。农业污染主要来自长期施用带重金属杂质的化肥、有机肥,含重金属的污灌以及相关农药喷洒,其中镉、砷在农田土壤中的累积问题尤为突出。交通污染则来自汽车尾气排铅、轮胎磨损产生的含锌颗粒物、车辆运行脱落的金属碎片等,随道路沿线扩散渗入周边土壤。重金属进入土壤后具备难分解、易生物富集、毒性持久的特性:生态层面会破坏土壤理化性质与微生物群落结构,阻碍植物正常生长,还会沿食物链逐级传递放大,威胁整个区域的动植物生存安全;人体健康层面,长期暴露在污染区域的人群可经食物摄取、空气吸入、皮肤接触等途径摄入重金属,易诱发肾功能衰竭、骨骼畸形、神经紊乱,甚至提升患癌概率,处于发育期的儿童受到的不可逆健康危害尤为显著。

1.2 治理的紧迫性与意义

当前国内历史遗留污染地块存量较大,新增污染压力持续存在,不少区域土壤重金属含量远超安全阈值,直接威胁粮食供应、饮用水安全与人居环境安全。这类污染隐蔽性强、影响滞后且累积效应突出,往往多年后才完全暴露危害,一旦污染显现,后续治理难度与治理成本会急剧攀升。及时开展科学的修复治理,是阻断污染扩散、降低生态破坏、守护公众健康的基础条件,更是支撑社会可持

续发展的核心举措。这项工作兼具三重核心价值:生态层面可恢复受损土壤的生态功能,筑牢动植物栖息生存的基础;社会层面能保障农产品安全,守护公众健康,维护社会和谐稳定;经济层面可盘活闲置、受损害的土地资源,撬动环保产业良性发展,实现生态效益与经济效益的双赢,是我国生态文明建设不可或缺的关键组成部分。

2 主流修复技术的应用现状

2.1 物理修复技术的做法与实例

物理修复技术主要依靠物理分离或者隔离方法来减少污染风险。客土法属于应用广泛的典型例子,通过挖掘出被污染的土壤并用干净的土壤进行替换,或者用干净的土壤直接覆盖在污染层上面,从而快速切断污染来源。电动修复利用电流产生的电场推动土壤孔隙中的重金属离子移动到电极附近,这种方法特别适合渗透能力较差的黏土环境。国内某铅污染场地曾采用客土覆盖法,在表层铺设一定厚度的洁净土壤,有效降低了表层土壤中铅的暴露风险。物理修复方式能够快速取得良好效果并且原理比较清楚明白,但是施工规模巨大、所需费用很高昂,而且没有彻底去除掉污染物本身。

2.2 化学修复技术的做法与实例

化学修复技术借助化学反应改变重金属的形态或者将它们从土壤中移除。固化稳定化方法会加入黏结剂,比如水泥,或者稳定剂,比如磷酸盐,把重金属包裹起来或者转变成难以溶解的形态,从而降低其生物有效性。淋洗修复依靠化学溶剂,比如酸或者是络合剂,把这些重金属从土壤颗粒表面解吸并冲洗掉。针对镉污染的农田,可以施加石灰这类呈碱性的物质来调整土壤的酸碱度,让镉转变成氢氧化物沉淀,明显减少其生物有效性。化学技术修复速度较快,但是可能会破坏土壤结构,而且存在化学药剂残留造成二次污染的风险隐患。

2.3 生物修复技术的做法与实例

生物修复技术依靠生物活动来清除或者固定住重金属污染问题,表现出对环境保护非常有利的独特优势。选择一些特殊的超富集植物进行种植,这些植物能够吸收并把重金属元素带进植物的地上部分,人们收割下这些植物后把植株连根拔起带走污染物^[1]。另外一种方法是使用专门的微生物来开展修复工作,这些微生物可以通过吸附、沉淀或者氧化还原等方式来改变重金属的化学性质。东南景天是一种能够吸收锌和镉的超强富集植物品种,在南方一些中度受到污染的农田上进行了示范种植试验,采用持续多季的种植和收割方式,逐渐减少土壤中有效态的重金

属含量。生物修复技术的成本相对低廉,对周围生态环境的破坏也比较轻微,但是修复过程往往需要耗费很长时间,而且会受到天气状况、土壤具体条件以及植物本身的生长习性的制约。

3 技术应用中的主要问题

3.1 修复成本与周期问题

各类修复方法已经取得实际应用成果,但是高昂的治理费用和漫长的修复时间仍然是阻碍大面积推广应用的主要难题。客土法必须大量替换没有受到污染的土壤,挖土、运土和处理这些环节产生的费用特别高。电动修复具有原地修复的优点,但设备运行完全依靠稳定的电力供应,一旦供电中断就无法正常工作,因此电费负担非常沉重。化学淋洗方法需要使用大量的化学药品,并且还需要建设专门的废水处理系统,整体投入金额非常高。生物修复方法,比如利用植物清除污染物,通常需要几个生长周期才能明显减少污染程度,整个治理过程花费的时间很长,通常超过一年。以上各种原因共同导致修复项目的资金需求和时间要求都非常严格,严重限制了这种方法在大部分中等程度污染或者经济条件有限地区的实际应用范围。

3.2 二次污染风险与技术局限性

当前的技术在实际操作中遇到了一些麻烦,比如可能会造成二次污染或者受到自身条件的限制。用物理方法修复时,客土法可以有效清除污染物,但会留下大量的污染土壤需要运送到别的地方处理,如果处理不好,污染的风险可能会转移到其他地方。化学稳定化技术容易受到环境条件的影响,比如酸碱度的变化会让固化的效果变得不理想,导致重金属重新释放出来。化学淋洗产生的含重金属废水如果没有经过充分处理,就有可能污染到周围的水体或地下水。生物修复方面,那些富集重金属的植物在处理完后如何安全地处理也是一个大问题,如果处理方式不当,比如焚烧或者随便堆起来,就很容易让污染扩散开来。各种技术都比较看重污染物的种类、浓度以及土壤的理化性质,存在适用范围狭窄、效果不够稳定的技术瓶颈。

3.3 技术集成与长效监管的不足

现在修复工作经常只使用一种方法,没有根据污染土地的具体情况来安排多种技术一起合作或者把不同技术整合到一起,这样就造成修复的速度和成本效果不好。比如,没有把能够很快让毒物变得不那么危险的化学稳定化方式和需要时间长并且费用低的植物修复方式放在一起使用。另外一个重要问题是没有建立好修复完成之后的长期监督制度^[3]。很多工程结束以后就认为任务已经做完,没有继

续进行修复效果的长时间检查和记录,不能清楚知道固化物质到底能不能一直保持稳定、植物清除掉污染物以后会不会产生新的危害、污染物会不会因为某种原因重新活跃起来的可能性有多大。这样的做法过于重视短期的治理效果,却忽视了长期的监督管理,最终使得修复取得的效果能否一直保持下去以及土地在未来是否还能安全使用都存在很大风险,严重限制了整个修复工作的实际成果。

4 土壤修复工作的未来方向

4.1 绿色可持续技术的发展

未来土壤重金属修复技术的核心发展方向,是突破传统技术高能耗、高投入、易产生二次污染的短板,聚焦绿色低碳、长效稳定的技术体系攻关。重点开发生物基修复材料、天然矿物钝化剂、环境友好型淋洗药剂等新型修复耗材,大幅降低药剂本身的环境负荷,避免修复过程中引入新的污染物。深化基因工程、合成生物学等前沿技术在植物修复、微生物修复领域的应用,定向培育高富集、强抗逆的超富集植物与功能修复菌株,大幅提升生物修复的处理效率,缩短修复周期。推动修复技术与低碳工艺深度融合,降低修复工程的能耗与碳排放,适配双碳目标下的环保产业发展要求。针对不同类型污染地块的差异化治理需求,开发适配农田、工业遗留场地、矿区等不同场景的定制化绿色修复技术方案,形成兼具经济性与环境友好性的新型修复技术体系,从根源上破解传统修复技术的环境副作用难题,为土壤重金属污染治理提供低环境负荷的技术支撑。

4.2 政策法规与管理机制的完善

技术研发的推广和应用,需要依靠完善的法律规范和长久有效的管理制度来提供坚实的支持,毕竟民法典法规增加了相关规定,修复的必要性,当前需严格对标《中华人民共和国生态环境法典》中土壤污染防治与生态修复的法定要求,加快补齐现有监管体系短板,建立覆盖污染地块调查、风险评估、修复工程实施、后期长期跟踪监测的全流程动态监管机制,在监测环节嵌入 X 射线荧光现场快速筛查、高光谱遥感大范围动态溯源、重金属同位素形态精准分析等先进检测技术,依托物联网、大数据技术搭建土壤修复数字化管理平台,实现治理全周期可追溯。同时要完善土壤污染修复相关的法律法规与行业技术规范,明确不同责任主体的治理义务,出台针对绿色修复技术的产业扶持政策,引导社会资本有序进入修复市场,推动行业规范化、高质量发展,最终形成“技术创新+机制保障”的完整治理体系,支撑土壤资源的安全可持续利用。

5 结语

土壤重金属污染治理是关乎生态文明建设与公众健康安全系统性攻坚工程。当前物理、化学、生物类主流修复技术已实现广泛落地应用,但仍受成本偏高、修复周期长、潜在二次污染风险、技术适配性局限等痛点制约,叠加多技术协同集成不足、全周期长效监管机制缺位等短板,严重影响污染地块彻底治理与安全再利用的实效。未来行业发展需锚定绿色可持续核心方向,持续加大科研投入,重点攻关低能耗、低成本、环境友好的新型修复技术与配套材料,推广多技术协同联用模式,大幅提升治理效能。同时从顶层设计层面,加快完善土壤污染防治的法律法规、技术规范与产业扶持政策体系,搭建覆盖污染调查、风险评估、工程实施到后期跟踪监测的全流程动态管理体系,依托技术突破与机制创新双向发力,推动土壤修复行业高质量长效发展,最终实现土壤资源永续利用与生态系

统健康稳定的目标。

参考文献:

- [1] 肖文魁. 土壤重金属污染现状及修复技术的应用[J]. 现代农业科技, 2021(18):182-184.
- [2] 徐玉娣. 土壤重金属污染现状及修复治理措施[J]. 区域治理, 2021(28):0184-0185.
- [3] 王鹤亭. 土壤重金属污染现状与修复技术应用[J]. 南方农机, 2021,52(13):64-66.
- [4] 王慧芳, 李辕成, 杨雪等. 土壤重金属污染现状及修复技术研究[J]. 种子科技, 2021,39(20):81-82.
- [5] 陈庆红. 土壤重金属污染现状及修复技巧探讨[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)自然科学, 2021(01):0018-0018.

作者简介: 徐乐微(1982.11-), 男, 汉族, 江苏南通, 本科, 工程师, 现主要从事生态环境监测工作。