

土壤重金属污染修复技术与农田环境保护应用研究

王博¹ 全韦娜^{2*}

1. 新疆朴润环保科技有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

2. 乌鲁木齐市金正禾源环保技术有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 土壤重金属污染已成为破坏农田生态、威胁农产品安全的关键问题。本研究聚焦污染治理方法与农田生态保护的实践应用, 系统梳理了污染的工业与农业来源及污染物种类, 重点分析了客土填充、固化稳定化等物理化学方法与植物修复、微生物修复等生物方法的原理、应用现状及技术经济限制。针对单一技术的不足, 探讨了物化-生物联合修复的协同优势与操作模式, 并关注修复后土壤肥力维持与重金属再积累防控问题。研究提出通过技术整合、标准化建设及政策规范推动技术推广, 为农田土壤污染防治提供理论与实践参考。

关键词: 土壤重金属污染; 修复技术; 农田环境保护; 联合修复; 可持续利用

Research on Soil Heavy Metal Pollution Remediation Technologies and Their Application in Farmland Environmental Protection

Wang Bo¹, Quan Weina^{2*}

1. Xinjiang Purun Environmental Protection Technology Co., Ltd., China Xinjiang Urumqi 830000

2. Urumqi Jinzheng Heyuan Environmental Technology Co., Ltd., China Xinjiang Urumqi 830000

Abstract: Soil heavy metal pollution has become a critical issue that damages farmland ecosystems and threatens the safety of agricultural products. This study focuses on the practical application of pollution control methods and farmland ecological protection, systematically reviewing the industrial and agricultural sources of pollution as well as the types of contaminants. It analyzes the principles, current applications, and technical-economic limitations of physical-chemical methods such as soil replacement and solidification-stabilization, as well as biological methods like phytoremediation and microbial remediation. To address the shortcomings of single technologies, the study explores the synergistic advantages and operational models of combined physical-chemical and biological remediation, while also addressing the issues of maintaining soil fertility and preventing heavy metal re-accumulation post-remediation. The research proposes promoting technology adoption through integration, standardization, and policy regulation, providing theoretical and practical references for the prevention and control of farmland soil pollution.

Keywords: Soil heavy metal pollution; Remediation technology; Farmland environmental protection; Combined remediation; Sustainable utilization

0 引言

随着工农业快速发展, 采矿、冶炼、污水灌溉及化肥农药使用导致土壤重金属污染日益突出。重金属难分解、易积累、隐蔽性强, 破坏土壤生态功能并通过食物链威胁农产品安全与人体健康。农田作为粮食生产根基, 土壤质量直接关系到国家粮食安全与农业可持续发展, 污染治理与安全利用已成为农业环保的核心任务。当前物理化学修复与生物修复技术虽已开展研究并初步应用, 但在成本控制、长期稳定性及与农业生产的兼容性方面仍面临诸多挑战。本文系统梳理污染来源与修复技术原理, 分析各技术在农田应用中的瓶颈, 提出多技术协同创新与政策管理配套的

解决路径, 为我国农田土壤污染治理提供科学依据与政策参考。

1 土壤重金属污染问题的基本情况

1.1 污染物的主要来源与类型

土壤里面重金属污染的原因来源广泛, 可以分成两种类型, 一种叫自然原因, 一种叫人为活动原因。自然原因主要是土壤形成时里面的矿物质带有一些重金属, 在风吹日晒雨水冲刷下慢慢释放出来, 这种来源带来的污染量为有限, 分布情况各不相同。造成农田土壤里面重金属含量过高并且长时间积累起来的主要驱动因素^[1]。工业生产过程中挖矿炼铁做各种金属制品还有做化工产品这些环节,

这些活动产生的废气、废水、废渣通过飘散或者随便丢弃的方式最终流入周围农田里面。施用肥料喷洒农药处理动物粪便这些行为也属于一种污染方式,因为用量太多或者方法不对,导致土壤里面重金属不断聚集起来。农田土壤里面常见的重金属污染物有镉铅铬汞砷这些物质,这些物质涵盖金属及类金属元素,比如镉因为容易移动又毒性很强因此成为最为受关注的污染元素之一。

1.2 农田环境的污染特征与危害

农田土壤中的重金属污染表现出非常明显的积累、隐藏和持久的特点。重金属不容易被土壤中的微生物分解掉,会在土壤里慢慢堆积起来,污染过程具有隐蔽性,一开始不会让农作物产量明显减少,也不会让农作物长得不好看,所以难以直观察觉,其危害具有滞后性。如果积累起来的重金属总量超过了土壤能够承受的极限,将引发一系列严重后果。从生态学的角度来看,重金属含量过高会抑制乃至杀灭土壤微生物和帮助分解有机物的酶,破坏土壤中生物种类的分布和正常工作状态,使得土壤里面的养分无法顺畅流动,土壤肥力下降,生态系统服务功能也会慢慢变差。从食品安全和人体健康的方面来看,某些重金属比如镉、铅、汞,可以通过农作物的根部吸收进入食物中,再通过吃进去的食物传递给人类身体,这样就会影响到人的身体健康,易引发肾脏损伤、神经系统的异常反应,甚至可能诱发癌症等严重疾病。

2 主要修复技术的原理与应用现状

2.1 物理与化学修复方法的特点

物理和化学修复方法依靠工程手段或者化学变化改变土壤里面重金属的形态或者空间分布情况,从而达到减少污染的目的。物理修复的主要技术有客土填充、换土以及深耕翻土,这些技术的优点是能够可快速、彻底地把污染物移除或者隔离起来,技术原理直观简单,使用效果很好,适合污染特别严重并且面积比较小的土地区域。化学修复的核心内容是通过添加改良材料,比如石灰、磷酸盐、粘土矿物等等,来促进重金属发生沉淀、吸附或者氧化还原反应,最终形成不易被植物吸收的稳定形式,降低重金属对农作物的危害程度。这样的技术在中等污染农田的钝化修复过程中应用得非常普遍,操作起来比较简单容易掌握,处理所需时间也比较短。

2.2 生物修复方法的进展与条件

生物修复方法利用植物、微生物或者动植物的生命过程来去除、转化或者分解土壤里面的重金属,依靠环境友

好并且费用比较低的特点成为大家关注的重点。植物修复技术里面,超积累植物可以专门吸收并且储存特定种类的重金属,之后通过收割植物身体把污染物带出来。微生物修复依靠微生物进行吸附、氧化还原或者胞外沉淀的方式来减弱重金属的活性和移动能力。植物微生物联合修复系统的研究发展明显提高了修复效果^[1]。生物修复真正取得成功的关键因素完全取决于当地环境的具体情况,比如土壤的物理化学性质、天气状况、污染物被生物利用的程度以及选择的生物种类是否能够很好地适应当地条件,一般修复所需要的时间都比较长。

2.3 各种修复技术的局限性与成本

各种修复方式都具有各自存在的缺点。物理化学手段虽然效果明显,但通常费用很高,施工规模很大,而且容易破坏土壤结构以及周围环境,比如客土法需要运送大量泥土并处理这些泥土。化学钝化修复方式长期稳定程度存在疑问,存在添加物质导致二次污染的风险。生物修复方式修复所需时间较长,受到天气和季节变化影响特别大,而且超积累植物的生物量一般很少,能够处理的深度也有限,其推广使用常常受到地点和种类的约束。从经济角度来看,物理化学修复方式的初期投资特别高,而生物修复方式的后续维护和管理工作的花费也不可忽略,必须结合污染场地的实际状况进行综合考虑和合理选择。

3 农田环境修复实践中的关键问题

3.1 单一技术应用的不足

单一修复技术处理农田污染时遇到了很大的困难。比如用物理修复的方法,比如客土填埋这种方式,虽然效果看起来不错,但需要动用大量的人力物力,花费非常高昂,而且会破坏原来土壤的结构,还会留下很多需要处理的污染土壤。化学固化稳定化技术可以减少重金属对环境的危害,但可能会往土壤里添加一些有害的化学物质,而且这种技术的稳定性很容易受到土壤酸碱度、氧化还原条件等各种因素的影响。植物修复和微生物修复这些生物修复的方式,看起来比较环保,费用也相对便宜,但修复速度很慢,对土壤的种类、气候条件以及污染物的具体成分都有很高的要求,很难在短时间内解决大面积或者多种污染物混合造成的污染问题。

3.2 联合修复技术的优势与模式

联合修复技术整合物理、化学和生物方法的长处,形成协同增效的修复模式,克服单一技术的不足。常见的联合模式包括化学固定与植物提取相结合,通过添加钝化剂

降低重金属迁移性来保证环境安全, 然后种植超积累植物逐步移除污染物。物理 / 化学强化与微生物修复相结合, 例如使用螯合剂或表面活性剂激活重金属, 再通过特定微生物的代谢活动进行转化或吸附^[3]。这种协同作用可以提高整体修复效率、缩短周期, 并且减少二次污染风险, 满足边修复边生产的农田应用需求, 为复杂农田污染场地的综合治理提供了更具实用价值的技术方案。

3.3 修复后土壤功能的长期稳定性

农田土壤功能的长期稳定性是判断修复是否成功的最重要标准。这个标准包括重金属的长期稳定以及土壤生态功能的全面恢复和长期维持。采用固化稳定化方法处理过的重金属, 如果遇到环境条件发生变化, 比如遭受酸雨侵蚀或者受到农业耕作的影响, 就可能会重新释放出来, 带来一定的安全隐患。整个修复过程中, 土壤的物理结构、养分循环情况以及微生物群落的变化都需要特别关注。必须建立起一套长期的监测体系, 详细观察重金属的形态变化和潜在的迁移风险, 并且采取有效措施来维持或恢复土壤的肥力和生物活性。

4 技术推广与农田保护协同的措施

4.1 技术集成与标准完善

要大力推广土壤重金属污染修复技术的广泛应用, 并且保护好农田的长期健康发展, 最核心的部分就是把各种技术和方法进行整合创新, 同时把相关标准体系做得更加全面完整。技术整合这方面, 应摒弃单一技术最优的思维模式, 一定要努力打造一个涵盖修复、养护和监测全过程的技术整体方案。比如面对那些中等程度或者轻度混合污染的农田, 可以尝试采用植物提取、钝化、稳定化、微生物激活这些技术一起配合的方式, 这样既能大大减少土壤中重金属的有效含量, 又能很好地增加土壤的肥力和农作物的产量。还需要根据农业生产的具体做法, 开发出既经济又不会破坏耕地质量的原地修复方法和相应的工具设备, 比如利用控制浇水的方式来施放钝化剂的技术, 或者安排两种或更多作物轮换种植的修复作物种植方式, 这样才能真正适合大面积农田的实际操作需求。跟技术创新同样重要的事情是标准体系的搭建工作。目前, 国内非常需要尽快制定出一套完整覆盖修复技术选择、现场施工、最终效果评价以及后期维护整个过程的标准和规则。这些内容具体包括明确规定针对不同类型污染情况和不同土地用途所要求达到的修复目标数值, 建立起一套统一的标准来测量和评价修复效果, 并且制定出在修复完成后如何严格控制

土壤里面重金属风险的具体规定^[4]。

4.2 政策引导与规范化应用

技术的高效推广和农田保护目标的达成, 完全依靠强有力政策的指引以及规范化的应用管理。在宏观政策方面, 必须大力强化顶层设计工作, 把农田土壤重金属污染修复工作全面融入国家以及各个地区的生态保护战略和粮食安全保障战略的整体规划框架里面。可以通过安排专门的财政资金、给予减免税收的优惠政策或者发放各种形式的资金补贴的办法, 明显减少农民或者农业生产经营单位使用这些修复技术时所承担的各种费用负担, 从而有效激发其参与污染治理的积极性。另外还要尽快建立起一种把污染者应该承担的治理费用和受益者应当支付的相关费用合理结合起来的责任分配机制, 清楚地规定那些历史上已经形成的污染区域到底由谁来负责治理以及相关的资金应该怎么落实到位。在规范化的应用管理这个环节里面, 一定要严格加强整个过程的监督管理工作。具体来说就是要设立一个从污染情况调查分析、风险评估研究、修复方案制定和审查批准、工程施工实施以及现场监理监督、到最后修复效果进行验收确认并开展长期跟踪监测的一整套完整运行规则和管理制度。积极促进成立一批独立于政府部门之外的第三方专业服务机构, 并且对他们开展严格的市场准入审查和能力水平认证工作, 确保服务人员都具备足够的专业知识和技术水平, 能够胜任相关工作的开展任务^[5]。

5 结语

随着工业化和农业现代化的不断发展, 土壤中重金属污染的情况日益严峻, 已经成为阻碍农田能够持续使用和保证农产品安全供应的一个重要难题。经过全面整理和归纳出污染的主要来源、具体特点以及常用的技术方法, 系统阐明了目前依靠物理化学和生物修复这些技术, 在实际操作过程中会遇到效果不好、费用过高以及对环境造成危害等很多共同存在的困难。单纯使用某种技术手段, 往往很难同时达到提高修复效果、节省费用以及保护生态环境这三个目标, 因此, 基于污染特征与农田用途设计的和农田实际用途来设计的物理化学与生物结合的修复技术体系, 展现出很强的合作互补作用和适应不同场景的能力。今后处理农田土壤中重金属污染的问题和保护生态环境的工作, 必须在技术创新和综合运用两个方向上取得重大突破, 尤其要大力发展那些环保又高效的并且成本合理的多种修复工艺, 并且加强对修复之后土壤肥力提升和重金属长期稳定性的监测评估工作。还需要尽快建立从制定技术标准到

提供政策支持的一整套完整保障体系,推动各种修复技术得到标准化和大规模的应用,促进科研成果转化为工程实践,并且推动农田生态保护与修复治理的深度融合。

参考文献:

- [1] 王静. 典型农田土壤重金属污染修复技术及其应用[J]. 中阿科技论坛(中英文), 2021(04):30-32.
- [2] 王琦琦, 赵彦杰. 农田土壤重金属污染研究与修复措施[J]. 冶金管理, 2023(07):63-65.
- [3] 赵娟, 周新惟, 张学嘉等. 农田土壤重金属污染修

复技术探析[J]. 农家参谋, 2022(20):13-15.

[4] 王莹. 农田土壤重金属污染与修复技术应用[J]. 农业灾害研究, 2022,12(11):102-104.

[5] 王涛, 王翼鹏, 杨旭等. 重金属污染农田土壤修复技术的工程应用分析[J]. 中国资源综合利用, 2021,39(11):130-132.

作者简介: * 通讯作者: 全韦娜(1991.10-), 女, 汉族, 陕西洋县, 本科, 工程师, 研究方向: 环境咨询。