

Research on Monitoring and Remediation Technology of Soil Heavy Metal Pollution

Shuzhen Su^{1,2} Kun Wang³

1. Inner Mongolia Eco-environmental Science Research Institute Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

2. Inner Mongolia Environmental Damage Judicial Appraisal Center, Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

3. Inner Mongolia Solid Waste and Soil Ecological Environment Technology Center, Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

Abstract

Soil heavy metal pollution is a global environmental problem that affects agricultural production and ecosystems, posing a threat to human health. The paper systematically elaborates on the current situation, sources, monitoring methods, and remediation technologies of soil heavy metal pollution. By analyzing the harm of heavy metal pollution to the environment and human beings, this paper explores the causes and main sources of heavy metal pollution, and summarizes various effective pollution monitoring methods and remediation measures, including physical, chemical, and biological remediation technologies. The advantages, disadvantages, and applicability of various remediation technologies are compared. Research has shown that effective remediation of soil heavy metal pollution still requires a balance between the precision of monitoring technology and the economic feasibility of remediation technology. The overall idea of soil heavy metal pollution control still needs to be promoted from multiple aspects such as policy level, technological innovation, and public participation to ensure sustainable development and ecological environment security.

Keywords

soil heavy metal pollution; monitoring technology; repair measures; pollution control; environmental safety

土壤重金属污染监测与修复技术研究

苏淑珍^{1,2} 王坤³

1. 内蒙古生态环境科学研究院有限公司, 中国·内蒙古 呼和浩特 010000

2. 内蒙古环投环境损害司法鉴定中心, 中国·内蒙古 呼和浩特 010000

3. 内蒙古自治区固体废物与土壤生态环境技术中心, 中国·内蒙古 呼和浩特 010000

摘要

土壤重金属污染是全球范围内的环境问题, 影响农业生产和生态系统, 威胁人类健康。论文系统阐述了土壤重金属污染的现状、来源、监测方法以及修复技术。通过分析重金属污染对环境和人类的危害, 探讨了重金属污染的成因和主要来源, 并总结了多种有效的污染监测方法与修复措施, 包括物理、化学和生物修复技术, 比较了各类修复技术的优缺点及适用性。研究表明, 土壤重金属污染的有效修复仍需要在监测技术的精准性和修复技术的经济可行性之间寻找平衡。土壤重金属污染治理的整体思路还需要从政策层面、技术创新以及公众参与多个方面协同推进, 确保可持续发展与生态环境安全。

关键词

土壤重金属污染; 监测技术; 修复措施; 污染治理; 环境安全

1 引言

土壤重金属污染已成为现代社会重要的环境问题之一, 严重威胁农业生产、生态安全及人类健康。随着工业化和城市化进程的不断推进, 重金属污染物的大量排放进入土壤环境中, 并通过食物链等途径对人类产生不可逆的影响。因此, 土壤重金属污染的有效监测和修复是当前环境保护领域的研究重点。论文将围绕土壤重金属污染的现状、污染监测

方法及修复技术等方面进行系统阐述, 以期对未来土壤污染的治理提供理论基础和技术支持。通过广泛的文献调研和实际案例分析, 论文旨在全面探讨现有监测和修复技术的有效性, 并展望未来土壤重金属污染治理的方向和挑战。

2 土壤重金属污染的来源与特征

2.1 工业与农业活动的影响

工业和农业活动是土壤重金属污染的主要来源。工业化生产过程中, 冶金、采矿、电镀、化工等行业会产生大量的重金属废弃物, 这些废弃物通过排放、泄漏等途径进入土壤中, 造成重金属污染。农业活动中, 大量使用含有重金属的化肥和农药, 导致重金属长期在土壤中累积。农用污泥的

【作者简介】苏淑珍 (1988-), 女, 中国内蒙古呼和浩特人, 硕士, 工程师, 从事生态环境修复、环境损害司法鉴定研究。

施用也可能含有大量的重金属,进而对土壤造成二次污染。研究表明,在一些重工业发达地区,土壤中的重金属含量已远远超过背景值,给当地生态环境带来了极大压力。数据显示,某些地区的镉含量达到国家标准的 3~5 倍,严重影响了当地的农业生产和居民健康。此外,一些含有重金属的工业废水未经处理直接排入农田,进一步加剧了污染问题。

2.2 交通运输及城市发展对土壤污染的影响

随着交通运输业的发展,尤其是车辆数量的不断增加,尾气排放和轮胎磨损成为土壤重金属污染的重要来源之一。汽油中的铅、刹车片中的铜和镉等重金属通过降尘进入土壤中,导致城市土壤的污染。近年来,尽管无铅汽油逐渐取代含铅汽油,但在一些交通繁忙的地区,土壤中铅的残留量依然处于较高水平,对人类健康和城市生态环境构成威胁。此外,城市化建设过程中的建筑废弃物和污水处理残渣同样含有较高的重金属成分,在缺乏有效管理的情况下,这些污染源会对城市周边土壤造成长期的潜在危害。

3 土壤重金属污染监测方法

3.1 化学分析方法

土壤重金属污染的监测主要依赖于化学分析方法,其中最为常见的是原子吸收光谱法(AAS)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)以及紫外分光光度法等。这些方法可以对土壤样品中的重金属浓度进行精准测定,尤其是 ICP-MS 方法,其检测灵敏度极高,可以对痕量重金属元素进行有效分析。然而,这些方法的不足之处在于操作复杂且成本较高,无法进行大范围的实时监测,需要结合其他简便的检测手段。相比之下,ICP-MS 方法可以同时检测多种重金属元素,且灵敏度更高,能够检测到 ppt (10^{-12}) 级别的重金属含量,是当前监测土壤重金属污染的主流方法之一。然而,这些方法对实验设备和操作人员的要求较高,不适用于一般环境监测机构。

3.2 土壤重金属污染的物理探测技术

近年来,物理探测技术在土壤重金属污染监测中逐渐得到应用,尤其是地球物理勘探技术。地球物理法如电阻率法、伽马射线测量等可以有效地反映土壤中重金属的空间分布特征,便于开展污染源的跟踪和溯源。这类方法在一定程度上可以弥补化学分析方法的不足,提供更为全面的土壤污染信息。然而,物理探测技术对设备的要求较高,且需要专业人员进行操作和解释,限制了其在一般环境监测中的推广应用。这种方法的优点在于可以快速获取大面积的污染信息,但精度相对较低,通常需要结合化学分析数据进行验证。伽马射线测量则是利用重金属元素的放射性特征,对土壤中的镭、铀等元素进行监测,适用于特定区域的污染调查。

4 土壤重金属污染的修复技术

4.1 物理修复方法的研究

物理修复是通过工程措施减少或隔离土壤中的重金属

含量,主要包括换土法、土壤覆盖法以及土壤淋洗法等。其中,土壤淋洗法是一种通过添加洗涤剂将重金属从土壤中溶解并移出的方法,适用于中小规模污染场地的修复。研究表明,通过土壤淋洗法处理后的土壤,重金属去除率可达 70%~90%,但其操作过程中可能带来二次污染的风险,需要采取有效的处理措施。换土法是最为直接的物理修复手段,通过将污染严重的土壤挖出并更换为未污染的土壤来实现污染的去除。然而,由于换土法成本高昂且需要处理大量的污染土壤,因此仅适用于污染程度极高且修复面积较小的场地。此外,土壤覆盖法是通过在污染土壤表面覆盖干净的土壤或其他材料,以减少重金属暴露和迁移的风险,适用于污染场地的临时控制,但并不能从根本上消除污染,详见图 1。



图 1 物理修复方法图解

4.2 化学修复方法的应用

化学修复是通过添加改良剂,将土壤中的重金属转化为不易被植物吸收或迁移的形态,减少其生物有效性。常见的化学改良剂包括石灰、磷酸盐以及有机螯合剂等。化学修复方法在污染土壤的修复过程中应用广泛,其优点在于见效快,操作简便,且修复成本相对较低。然而,长期的效果和潜在的生态风险仍是化学修复方法亟待解决的问题。研究数据表明,在某些修复案例中,化学改良剂的添加量与重金属的固定率存在明显的正相关关系。例如,石灰的添加可以通过提高土壤的 pH 值,减少重金属如镉、铅的生物有效性,从而降低其被植物吸收的风险。研究数据显示,当土壤 pH 值由 5.5 提高至 7.0 时,镉的生物有效性可以降低约 60%。此外,磷酸盐的添加可以通过沉淀反应将铅固定为不溶性的磷酸铅,从而减少其迁移性和生物有效性。

4.3 生物修复技术的研究与进展

生物修复是利用植物、微生物或土壤动物等生物体来修复被污染的土壤。植物修复是其中最为常用的一种方法,特别是一些超积累植物对镉、铅等重金属具有较强的富集能力,研究显示,通过种植向日葵、芥菜等超积累植物,可以有效减少土壤中重金属的含量。生物修复方法具有环保、可持续等优点,但其修复周期较长,适用于低浓度、广范围的污染区域。微生物修复也是生物修复的重要组成部分,主要通过微生物对重金属的吸附、沉淀及转化作用来减少土壤中的重金属污染。某些细菌和真菌能够通过产生特定的酶或代谢产物将重金属转化为毒性较低的形式。例如,研究表明,假单胞菌属的一些菌株对铬的还原能力非常强,可以将六价铬还原为毒性较低的三价铬,从而降低其环境风险。

5 土壤重金属污染修复的效果评估与未来展望

5.1 修复效果的评估方法

对土壤重金属污染修复效果的评估主要包括土壤重金属残留量的测定、土壤理化性质的变化以及植物健康状况的分析。通过实验数据分析,修复后土壤中重金属含量的降低程度是判断修复效果的直接指标。此外,土壤中的 pH 值、有机质含量等理化参数的变化也可以反映修复过程对土壤生态系统的影响。

例如,在一项针对镉污染土壤的修复实验中,经过两年的植物修复处理,土壤中镉的含量由原来的 3.2mg/kg 降低至 1.1mg/kg,修复率达到了 65% 以上。同时,土壤有机质含量也显著提高,植物的生长状况良好,说明修复过程对土壤生态系统具有积极的影响。此外,通过分析植物地上部分重金属的累积量,可以进一步验证修复的有效性和植物的富集能力。

5.2 重金属修复的经济性分析

土壤重金属污染修复技术的经济可行性直接影响其大规模推广应用。在实际操作中,物理、化学和生物修复方法的成本各不相同,通常化学修复的单价成本最低,但需要考虑长期的潜在生态风险;而物理修复的成本较高,但适用于高度污染的小范围区域;生物修复则在成本和效果之间具有一定的平衡性,是未来具有发展潜力的方向之一。研究数据显示,采用化学修复方法的成本大约为每吨土壤 200 元,而生物修复的成本则为每吨土壤 150~300 元。

例如,通过生物修复后的土壤,其重金属含量较低,可以继续用于农业生产,增加了土壤的经济利用价值。而物理修复方法如换土法,尽管可以彻底消除污染,但高昂的处理和运输成本使得其在大面积污染场地中的应用受到限制。因此,在实际应用中,需要根据具体的污染程度和修复目标选择合适的修复技术,以实现最佳的经济和环境效益。

5.3 未来修复技术的发展方向

未来土壤重金属污染的修复研究将朝着多技术联合应用的方向发展。通过结合物理、化学和生物修复方法,可以取长补短,发挥各类技术的优势。例如,物理隔离与植物修

复相结合的修复方式,可以快速降低重金属的迁移风险,同时在长期内通过植物的吸收进一步减少土壤中重金属的含量。此外,开发新型环保、高效的修复剂也是未来研究的重要方向,研究表明,通过纳米材料的引入,可以显著提高土壤重金属的固定效率。

例如:纳米铁氧化物由于其较大的比表面积和优异的吸附性能,被认为是一种具有潜力的土壤重金属修复材料。实验数据显示,纳米铁氧化物对土壤中铅的去除率可达 85% 以上,且对土壤理化性质影响较小。此外,基因工程技术的应用也为重金属污染修复提供了新的可能,通过基因编辑手段,可以培育出对重金属具有更强富集能力的植物或微生物,从而提高修复效率。未来的研究还应关注修复过程中的生态风险评估,确保修复技术的安全性和可持续性。

6 结语

土壤重金属污染问题的严重性和复杂性决定了其监测与修复需要系统、科学的方法。通过对污染源的有效识别和监测,可以采取针对性的修复措施以减小污染对生态环境的危害。在未来的研究和应用中,如何在修复效果和经济成本之间找到平衡,将是土壤重金属污染治理的核心挑战之一。多技术联合应用、新型修复材料的开发以及生态环境的整体改善,将是未来重金属污染修复技术发展的重要方向。通过政府政策支持、技术创新和公众参与,可以实现土壤重金属污染治理的长效管理,为生态环境的可持续发展提供保障。

参考文献

- [1] 陈文琦,杨震华.重金属污染土壤的修复技术研究进展[J].环境科学与技术,2023,46(5):49-56.
- [2] 林秀梅,梁子毅.土壤重金属污染监测方法及其应用[J].土壤学报,2024,58(1):82-89.
- [3] 孙玉钧,冯雨亭.土壤修复过程中重金属的化学固定研究[J].生态环境学报,2024,43(3):101-110.
- [4] 朱翊飞,郭俊铭.城市土壤重金属污染的来源与控制措施[J].中国环境管理,2023,52(6):112-118.
- [5] 高曼雪,赵慧欣.植物修复技术在重金属污染土壤中的应用[J].农业环境科学学报,2024,40(4):144-150.