

铅锌污染土壤的现状和修复治理应用技术研究

张珏坪

江苏省环保集团苏州有限公司 江苏 苏州 215000

摘要: 铅锌污染土壤对生态环境、农业生产及人体健康危害深远。其污染范围广泛,因铅锌矿开采、冶炼、工业废水排放及含铅锌化肥农药使用等多元污染源导致。不同区域污染程度差异大,高浓度污染对土壤生态系统破坏严重,低剂量长期累积也危害人体健康。不同修复技术各具特点,物理、化学、生物修复方法各有利弊,实际应用中需权衡选择,综合施策以达成高效安全修复目标。

关键词: 铅锌污染土壤;修复治理技术;土壤生态影响

引言

在工业化和农业现代化进程中,铅锌污染土壤问题日益凸显。铅锌矿的广泛分布及长期大规模开采、冶炼活动,使周边土壤遭受严重污染。同时,工业废水排放、含铅锌化肥农药施用等,进一步扩大了污染范围。铅锌污染对土壤危害严重,破坏结构、降低肥力,影响生态循环,阻碍农作物生长且危害人体健康,研究其修复技术是环境科学亟待解决的重要课题。

1 铅锌污染土壤的影响与意义

铅锌污染土壤对生态环境、农业生产及人体健康均产生深远影响。在生态环境方面,铅锌污染会破坏土壤结构,降低土壤肥力,影响土壤微生物的活性与多样性,进而干扰土壤生态系统的物质循环与能量流动。长期污染还会导致土壤板结、酸化,加剧水土流失,破坏生态平衡。农业生产中,铅锌污染土壤会抑制植物根系发育,影响养分吸收,导致农作物生长受阻、产量下降、品质变差。铅锌等重金属在植物体内积累,通过食物链传递,影响畜禽健康,降低畜禽产品品质,还使农产品重金属超标,无法满足食品安全标准,限制农业产业的可持续发展。对人体健康而言,铅锌污染土壤是重要的重金属污染源。土壤中的铅锌可通过皮肤接触、呼吸吸入及食物摄入等途径进入人体,在体内积累并产生毒性作用。铅会损害神经系统、血液系统、免疫系统,影响儿童智力发育,引发贫血、免疫力降低等问题;锌过量摄入会干扰人体对其他微量元素的吸收利用,导致代谢紊乱,研究铅锌污染土壤的修复治理技术具有重要意义。通过修复治理,可恢复土壤生态功能,提高土壤质量,保障农业生产安全,降低农产品重金属污染风险,同时减少重金属对人体健康的危害,对维护生态环境稳定、促进农业可持续发展和保障人类健康具有不可忽视的作用。

2 铅锌污染土壤的现状

2.1 污染范围

铅锌矿在全球分布广泛,我国铅锌矿产资源储备丰富,多个区域存在铅锌矿带。在铅锌矿资源富集的南方地区,长期大规模开采与冶炼活动,致使周边土壤铅锌污染状况严峻。以湖南、广西等地铅锌矿区为例,土壤检测表明铅锌含量远超国家土壤环境质量标准。伴随工业化进程加快,铅锌污染土壤范围持续扩张。除矿区及其周边,农业生产区域因长期受含铅锌废水灌溉、大气沉降影响,土壤铅锌含量逐步上升。含铅锌废水灌溉时,铅锌离子随水进入土壤,在土壤中累积;大气沉降中,工业废气、汽车尾气排放的铅锌颗粒物沉降到土壤表面,被土壤吸附,城市化建设也使原本远离污染源的城区土壤受到影响。工业搬迁遗留的污染土壤、交通尾气排放的铅锌污染物,通过大气干湿沉降进入城区土壤,导致城区土壤受到不同程度铅锌污染。土壤铅锌污染范围不断扩大,对区域生态环境安全造成严重威胁,影响土壤生态功能,干扰土壤生物多样性,破坏土壤-植物-动物系统的平衡。

2.2 污染程度

(1) 不同区域铅锌污染土壤的污染程度差异显著。在铅锌矿开采与冶炼活动密集区域,污染程度极为严重。部分核心污染区域土壤中铅锌含量可高达数千mg/kg,远超土壤自净能力与环境承载极限。(2) 高浓度铅锌污染对土壤生态系统造成毁灭性破坏。农作物生长受严重影响,种子萌发、根系生长及光合作用均受到抑制,导致农作物产量大幅降低,甚至绝收。土壤微生物群落作为土壤生态系统的关键组成部分,其种类和数量因铅锌污染发生改变,微生物的代谢活性和功能受到抑制,干扰土壤中物质循环和能量转化。(3) 在远离铅锌污染源的区域,土壤铅锌污染相对较轻。然而,长期的

低剂量铅锌累积,依然会对土壤质量和生态功能产生不利影响。铅锌等重金属通过食物链传递,会在生物体内逐渐富集,对人体健康构成潜在风险。即便土壤中铅锌含量未达到极高水平,但长期摄入含有低浓度铅锌的食物,也对人体神经系统、免疫系统等造成损害^[1]。

2.3 污染来源

开采期间,大量废石与尾矿堆积如山,这些堆积物铅锌等重金属含量极高。在自然风化和雨水长期淋溶作用下,重金属不断溶出,通过地表径流与下渗等方式,逐步侵入土壤,致使土壤污染不断加剧。未经严格处理的采矿废水直接排放,高浓度的铅锌离子随着废水进入土壤,改变土壤原有的酸碱度与氧化还原电位,破坏土壤理化性质。铅锌冶炼同样是重要污染源。冶炼过程的高温熔炼环节会产生大量含铅锌废气,废气中的铅锌颗粒通过大气沉降进入土壤。而冶炼产生的废水与废渣若处置不当,含有的大量铅锌物质会持续向土壤中释放,恶化土壤污染状况。除矿业和冶炼行业外,其他工业生产产生的含铅锌废弃物,因缺乏妥善的资源化利用与无害化处理,也会成为土壤铅锌污染的源头。在农业领域,部分含铅锌化肥和农药的施用,短期内满足了农作物生长和病虫害防治需求,但经过长期的累积,土壤中的铅锌含量不断升高,加剧土壤的重金属污染负荷,对土壤生态系统和农作物安全生产构成严重威胁^[2]。

3 铅锌污染土壤修复治理应用技术

3.1 物理修复技术

3.1.1 客土法和换土法

客土法,作为一种较为直观的土壤修复策略,通过在铅锌污染土壤表层覆盖未受污染的土壤,稀释污染土壤中铅锌的相对浓度,以此降低污染物对土壤生态系统和农作物生长的负面影响。换土法则更为彻底,将受污染的土壤挖掘移除,替换为清洁土壤,快速且明显地减少土壤中铅锌含量。这两种方法凭借其快速有效的特点,在污染面积较小、污染程度严重的区域,如矿区的局部污染地块、小型工业污染场地,展现出突出的修复效果。然而,这两种方法也存在显著弊端。客土和换土过程需要大量的土方作业,耗费巨大的人力、物力和财力,还会引发一系列环境问题。大量土壤的运输和处理,会导致周边土壤结构破坏,植被受损,加剧水土流失。挖掘出的污染土壤若处置不当,会成为新的污染源,造成二次污染。在实际应用中,需全面评估其环境 and 经济影响,谨慎采用^[3]。

3.1.2 电动修复法

(1) 其运行原理基于土壤中离子的电迁移特性。在

污染土壤中合理布置阴阳电极,并施加直流电后,土壤孔隙溶液中的带电离子,尤其是铅锌离子,会在电场力驱动下发生定向迁移。阳离子向阴极移动,阴离子则向阳极。通过收集并处理电极附近的电解液,便能实现对铅锌离子的有效去除。(2) 电动修复法具有显著的技术优势。该方法对低渗透性黏土类土壤中的铅锌污染修复效果突出。且它可在土壤原位开展修复工作,减少对土壤结构的扰动,降低修复过程对周边环境的影响。相较于部分传统修复技术,其操作流程相对简单,无需复杂的设备与工艺。(3) 电动修复法也存在一定的局限性。一方面,该技术修复周期较长,需持续施加直流电,导致能耗较高,大幅增加了修复成本。另一方面,在修复过程中,电极附近会发生电化学反应,造成土壤pH值改变,进而影响土壤理化性质与微生物活性。在实际应用中,需借助专业设备,对土壤温度、酸碱度、氧化还原电位等环境参数进行实时监测,并依据监测结果灵活调控修复过程,以此提升修复效果与效率。

3.2 化学修复技术

3.2.1 淋洗法

淋洗法作为铅锌污染土壤化学修复的重要手段,借助淋洗剂与土壤中铅锌物质发生的系列化学反应,促使难溶性铅锌化合物转化为可溶态,实现从土壤中淋洗分离的目标。根据化学特性与作用机制,淋洗剂主要分为无机酸、有机酸和螯合剂三大类别。无机酸淋洗剂,像盐酸、硝酸这类强酸,凭借强大的溶解能力,能迅速且高效地去除土壤中的铅锌污染物。但这类淋洗剂在发挥作用时,其强酸性会对土壤结构造成严重破坏。土壤团粒结构被瓦解,透气性和透水性下降,致使土壤板结。强酸性环境对土壤微生物群落的生存构成极大威胁,大量有益微生物死亡,严重损害土壤的生态功能,影响土壤长期的健康状况。有机酸淋洗剂,如柠檬酸、草酸,以及螯合剂如乙二胺四乙酸(EDTA),化学性质相对温和,对土壤结构的破坏程度较低,对土壤微生物的影响也较小。淋洗剂虽可用于铅锌污染治理,但制备成本高、部分难降解有新隐患,且废水处理不当会引发二次污染,加剧环境负担^[4]。

3.2.2 稳定化/固化法

(1) 该方法的核心原理,是向铅锌污染土壤中添加特定化学稳定剂,促使铅锌离子与之发生化学反应,进而生成难溶性化合物,实现铅锌生物有效性和迁移性的降低。常见的稳定剂包含石灰、磷酸盐、黏土矿物等。石灰通过提高土壤pH值,使铅锌离子转化为氢氧化物沉淀;磷酸盐与铅锌发生反应,形成难溶性磷酸盐矿物;

黏土矿物则借助表面吸附与离子交换,将铅锌离子固定在土壤颗粒表面。(2)稳定化/固化法具备操作简便、成本低廉的显著优势。相较于部分复杂的修复技术,该方法无需大型设备与繁琐流程,能在较短时间内降低土壤中铅锌带来的环境风险,因此在实际修复项目中应用广泛。(3)该方法也存在一定的局限性。稳定化/固化法并未从根本上移除土壤中的铅锌,改变了它们的存在形态。如果土壤环境条件发生变化,如pH值、氧化还原电位波动,原本固定的铅锌离子会再次释放到土壤环境中,带来二次污染风险。

3.3 生物修复技术

3.3.1 植物修复

植物修复是借助植物独特的生理机制来降低土壤铅锌含量的技术。超富集植物在生长进程中,可凭借自身强大的吸收能力,从土壤中大量摄取铅锌元素,并将其转运至地上部分储存。通过定期收割这些植物的地上部分,能将土壤中的铅锌逐步移除,实现土壤修复目标。植物修复过程中,植物根系发挥关键作用。根系分泌的有机酸、质子和酶等物质,能改变根际土壤的物理化学性质,如调节土壤pH值、氧化还原电位,优化微生物群落结构,增强土壤中铅锌的溶解性与可吸收性,促进植物对铅锌的吸收。该技术具有诸多优势,成本低廉,对环境友好,可实现原位修复,不会破坏土壤结构,还能在一定程度上改善土壤生态环境。然而,植物修复也存在一定局限性。其修复周期较长,受植物生长特性和气候条件影响明显。且对超富集植物的筛选和培育要求苛刻,需选取适应能力强、生长速度快、富集能力高的植物品种,以提高修复效率。

3.3.2 微生物修复

(1)微生物修复借助微生物独特的代谢功能,对土壤中铅锌的形态和生物有效性进行改变。特定微生物可通过吸附、沉淀、氧化还原等机制,有效降低铅锌的毒性和迁移能力。以硫酸盐还原菌为例,在厌氧环境中,

该菌能将硫酸盐还原为硫化物,硫化物与铅锌离子结合生成难溶性的硫化物沉淀,大幅降低铅锌在土壤中的溶解度,减少其向周围环境的扩散。(2)微生物修复具备明显优势。其成本低廉,修复效果持久,且对环境扰动小。微生物能够在原位对土壤进行修复,无需大规模的土壤搬运和处理,能更好地适应复杂的土壤环境,对土壤结构的破坏程度极小。(3)微生物修复也存在一定局限性。微生物的生长和代谢活动对土壤环境条件较为敏感,温度、pH值、氧气含量等因素的细微变化,都影响微生物的活性和修复效果。微生物修复的周期相对较长,需要持续对土壤环境进行监测和调控,以确保微生物处于适宜的生长和代谢状态,保障修复效果。

结束语

铅锌污染土壤现状严峻,污染范围不断扩张,污染程度差异显著,污染来源多元复杂。物理、化学、生物修复技术各有特点。物理修复见效快但成本高、易引发环境问题;化学修复针对性强但可能破坏土壤结构、产生二次污染;生物修复成本低、环境友好但修复周期长、受环境因素影响大。在实际应用中,应综合考虑污染程度、土壤性质、环境条件、成本效益等因素,选择适宜的修复技术或多种技术联合应用。

参考文献

- [1]陈国熙,周惠民,陈慧杰,陈双双,冯景,刘欣童,邓琳,邓衍明.观赏植物修复城市铅污染土壤技术分析展望[J].植物资源与环境学报,2025,34(1):82-93.
- [2]钱涌.铅锌污染土壤的现状和修复治理应用技术研究[J].世界有色金属,2024(23):100-102.
- [3]秦洋洋,潘亚飞,张蕾.铅锌污染土壤修复治理应用技术分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2024(4):0092-0095.
- [4]宋志文.铅锌有色金属选矿厂土壤污染治理修复技术研究[J].中国金属通报,2024(18):185-187.