

河南省焦作市土壤重金属污染现状与修复技术研究进展

高雅

河南省焦作市环境安全应急中心

DOI:10.12238/eep.v8i5.2692

[摘要] 当前土壤重金属污染问题已成为制约区域生态安全与土地可持续利用的重要因素。本文围绕河南省焦作市土壤重金属污染问题展开分析,系统梳理其主要来源与危害,明确工业排放、交通沉降及矿产开发等污染关键成因。同时归纳区域土壤污染现状,总结污染空间分布特征。在此基础上,重点探讨固化/稳定化、电动力学、化学淋洗、化学脱卤及微生物修复等典型修复技术的适用条件,为焦作市重金属污染土壤的生态环境修复提供理论依据。

[关键词] 土地生态环境; 重金属检测; 土壤污染治理与修复

中图分类号: X131.3 文献标识码: A

Research progress on soil heavy metal pollution and remediation technology in Jiaozuo city, Henan Province

Ya Gao

Environmental Safety Emergency Center of Jiaozuo City, Henan Province

[Abstract] Soil heavy metal pollution has become a critical factor constraining regional ecological security and sustainable land use. This study systematically analyzes soil heavy metal contamination in Jiaozuo City, Henan Province, identifying key sources including industrial emissions, transportation deposition, and mineral exploitation. The research also maps the current status of regional soil contamination and summarizes its spatial distribution patterns. Building on this foundation, the paper explores the applicability of typical remediation technologies such as solidification/stabilization, electrokinetic processes, chemical leaching, chemical desulfurization, and microbial remediation, providing theoretical support for ecological restoration of heavy metal-contaminated soils in Jiaozuo City. Keywords: soil ecology, heavy metal detection, soil pollution control and remediation.

[Key words] land ecological environment; heavy metal detection; soil pollution control and remediation

引言

土壤重金属污染是当前土地生态环境中最为复杂且持久的问题,具有隐蔽性强与高生态风险等特点。重金属进入土壤后难以自然降解,易长期残留在生态环境中,并经生物富集作用进入食物链,影响人类健康。同时,这种污染来源具有多元复合特征,与区域工业结构、资源开发模式及土地利用方式密切相关。

1 河南省焦作市土壤重金属污染来源与危害

1.1 河南省焦作市土壤重金属污染来源

焦作市作为河南省重要的老工业城市,其土壤重金属污染问题呈现出复合化、多源性特征。其中工业排放与历史遗留污染构成该地区最主要的污染源。早期布局的大型化工、冶金、采矿企业在生产过程中排放大量含重金属的废水、废气与固体废物。同时,废弃矿山与尾矿库等历史遗留地块常年渗漏,释放镉、铅、砷等重金属,污染地下水与土壤。除此之外,交通与大气沉降也是该区域的次生污染源,机动车尾气、轮胎与刹车磨损

释放的铅、锌、铜等金属元素经大气沉降方式在城市道路两侧及城乡结合带形成污染带^[1]。

1.2 河南省焦作市土壤重金属污染危害

焦作市土壤中铬、铅、镉等长期累积的重金属对生态环境造成显著破坏,其危害表现在土壤生态系统功能退化方面。微生物难以分解重金属元素,会导致土壤重金属持续富集,降低土壤微生物群落多样性,减弱酶活性,进一步阻碍土壤中正常进行的碳氮循环等生态过程。农业生态系统则受到直接影响,污染土壤种植的农作物易出现根系受抑、生长迟缓等现象,重金属在农产品中的富集也会引发食品安全风险,进而影响区域农业发展。除此之外,重金属的垂直迁移更会导致地下水中金属离子浓度升高,一旦形成地下水污染羽,不仅修复难度极大,而且会经由灌溉渠道重新影响表层土壤与农作物生长,形成污染循环链。

2 河南省焦作市土壤重金属污染现状与成因

2.1 河南省焦作市土壤重金属污染现状

焦作市土壤重金属污染问题呈现出区域差异显著、元素种类多样、污染形态复杂等特点,污染现状总体表现为多点分布、高强度集中的趋势。从整体空间格局看,污染程度依次表现为工业集中区最重,其次是城市生活区。工业区域因冶金、化工、机械制造等行业长期排放,土壤中普遍存在镉、铅、铬等元素超标问题,污染强度高。而城市主干交通沿线由于长期机动车密集通行,受尾气排放与道路磨损影响,土壤中铅、锌等元素富集明显,且污染带宽度相对稳定。矿区周边土壤污染则表现出持续加重态势,主要与矿渣堆放、地表径流渗透等因素有关。

2.2 河南省焦作市土壤重金属污染成因

焦作市土壤重金属污染形成过程具有典型的工业化背景,其中工业排放与历史遗留污染构成污染主要根源^[2]。区域内密集分布化工、冶金、电镀等高排放行业,企业在生产过程中排放的废水、废气及固体废物中普遍含有铬、镉等重金属,直接或间接进入土壤。其次,交通排放与大气沉降是污染次生来源。大量机动车尾气、轮胎与刹车材料磨损释放出的铅、锌等金属粒子,在城市主干道路周边经大气沉降方式富集于土壤表层。除此之外,矿产资源开发过程中形成的尾矿堆积体也是重要污染源。采矿作业中,重金属元素随粉尘或渗滤液扩散至周边区域,增加重金属向土壤迁移的风险。(如表1所示)

表1 焦作市主要土壤重金属污染来源

污染源类型	主要重金属元素	典型区域
工业排放	Cr、Pb、Cd、As	中站工业区、马村工业区
交通污染	Pb、Zn、Cu	焦克公路沿线
矿产开发	Cd、Zn、Pb	朱村矿、九里山矿周边

3 土壤重金属污染修复技术

3.1 物理修复技术

3.1.1 固化/稳定化技术

固化/稳定化技术是指运用物理或化学的方法将土壤中的有害污染物固定起来,或者将污染物转化成化学物质不活泼的形态,阻止其在环境中迁移、扩散等过程,从而降低污染物质的毒害程度的修复技术。该技术不以去除污染物为目的,而是改变重金属存在形态,将其由可溶性或交换态转变为稳定态,进而控制其在土壤中的活性。这种方法适用于修复污染浓度较高、污染元素种类明确的区域。

以水泥基稳定剂为例,其水化反应可生成水化硅酸钙与氢氧化钙,在土壤颗粒间形成胶结体结构,改善土壤pH环境,将重金属沉淀为氢氧化物或碳酸盐。磷酸盐类材料则与铅、镉等形成难溶的金属磷酸盐沉淀,提高重金属稳定性。同时,该技术还支持复配使用不同类型固化剂。其中,结合石灰与黏土矿物处理铬污染,可实现中和酸碱与吸附晶格,提升稳定效果。固化/稳定化效果既会受材料种类与掺量影响,还与污染物类型、土壤性质等环境因子密切相关。该技术虽具有成本较低、施工简便等优

势,但也存在原位体积膨胀、未彻底清除污染物等局限性。

3.1.2 电动力学修复技术

电动力学修复技术是向土壤施加直接电流,在电解、电迁移、扩散、电渗透、电脉等共同作用下,使土壤溶液中的离子向电极附近富集从而达到去除污染物的目的。在电场作用下,正负极间的电势差驱动带电离子向电极区定向迁移,从土壤基质中的解吸、迁移及富集污染物^[3]。该技术在处理重金属离子、放射性元素及部分有机污染物方面具备较高的技术可行性,适合于场地狭小的区域。同时,其效果受到土壤pH缓冲能力、重金属形态等多因素影响,在不溶性有机物处理过程中还需引入化学助剂辅助增溶。

电动力学修复常结合不同电极材料与功能填充剂提升迁移特定污染物的效率。如,修复人员采用惰性电极可减少电极腐蚀,并配合酸碱调节液控制电场两端的pH环境,稳定重金属形态,促进其溶出迁移。修复过程中,带正电的重金属阳离子会在电迁移驱动下向阴极移动,由阴极区设置的收集装置集中吸附或沉淀处理;而电渗透效应则驱动土壤孔隙水整体向阴极流动,带动污染物随水体迁移,同步转移电解质与污染物。在多种污染物共存的土壤环境中,电动力学修复迁移镉、锌、铅等可溶性重金属能力更强。该技术也可组合其他修复手段,其中配合固化/稳定化技术使用,能先固定污染物,再使用电场清除剩余可迁移部分。电动力学修复具有施工干扰小、能耗相对低、适用范围广等优势,可高效迁移污染物,逐步恢复土壤环境质量。

3.2 化学修复技术

3.2.1 化学淋洗技术

化学淋洗技术指利用淋洗液或化学助剂与土壤中的污染物结合,并通过淋洗液的解吸、螯合、溶解或固定等化学作用,使吸附或固定在土壤颗粒上的污染物脱附、溶解而去除的技术。按照操作方式该技术可分为原位淋洗与异位淋洗^[4]。原位淋洗适用于渗透性良好的粗质土壤,现场注入淋洗液并回收处理污染液体,实现原地治理;异位淋洗则需挖除污染土壤,在特定容器中进行强化处理,适用于复杂混合污染的场地。

在技术实施过程中,化学淋洗所用溶液的类型与浓度影响修复效果。常用淋洗剂包括乙二胺四乙酸(EDTA)、柠檬酸、草酸等螯合剂,也可选用醋酸或硝酸等弱酸,以及绿色环保型表面活性剂。螯合剂类淋洗剂具有选择性强、金属结合能力强的优点,适合处理铅、镉、铜等重金属污染。表面活性剂作用则在于改变污染物分布界面张力,提高重金属与土壤颗粒分离效率,适合处理吸附较强的污染。操作模式上,原位淋洗技术是运用现场回灌与抽排循环污染液,对地下水位及土壤结构要求较高。异位淋洗则借助机械搅拌、物理分级与液固分离设备多轮洗脱,可有效控制反应条件与污染物迁移。

3.2.2 化学脱卤技术

化学脱卤技术是用于治理卤代有机污染物的异位化学修复方法,其基本原理是在受污染土壤中添加特定反应剂,借助化学反应置换、还原污染物分子结构中的卤素原子,使其转化为无毒

或低毒物质,进而去除污染物^[5]。该类技术反应剂多为强还原性物质或碱性化合物,可在适宜温度下快速脱卤。其处理过程依赖反应剂充分接触污染物,因此多采用异位处理方式。

实际操作中,化学脱卤过程多依赖机械搅拌与反应器环境控制设备,提高传质效率与反应速率来脱卤降解污染物。同时,修复人员可依据污染物结构特点选择金属还原剂、碱金属羟化物、有机胺类及配合螯合试剂等处理剂类型,其中以碱性条件下的脱卤反应最为常见。在处理多氯联苯类污染物时,添加强还原剂可脱离氯原子,分解其为较为稳定或易降解的中间产物。针对二恶英与呋喃等持久性污染物,修复人员还能采用碱热反应结合催化剂促进其分解,并采用吸附剂或氧化剂处理中间产物,提升总体修复效率。在此过程中,需严格控制温度、pH与反应时间等参数,保证充分脱卤反应且污染物转化产物无二次毒性风险。

3.3 微生物修复技术

微生物修复技术是指利用土壤中天然或人工引入的微生物,经由吸附、转化与分解等方式,降低污染物的毒性,净化土壤环境^[6]。土壤微生物具有丰富的代谢能力,能够与重金属离子发生物理化学反应,改变污染物在土壤中的形态,降低其生态危害。在重金属污染修复中,微生物经生物富集与生物转化机制能固定或还原污染元素,限制其在水体、土壤中的迁移行为。

在工程应用中,修复人员可针对重金属污染土壤开展微生物修复,定向构建与调控菌群。此过程中,需要筛选具备高效吸附、沉淀能力的功能性菌株,增强土壤中金属离子的转化效率。以镉污染治理为例,耐镉细菌能借助自身胞外分泌多糖或蛋白质基团与金属形成稳定络合物,调控胞内代谢途径在细胞器中还原或沉淀镉,达到脱毒目的。在多种重金属共存的复杂环境下,修复人员还可利用微生物的选择性吸附机制协同修复镍、铜、铅等元素。在修复实施中,还可施加生物刺激剂、调节pH或碳氮比等方式优化微生物生存环境,提升修复效率。为防止次生污染,

微生物修复过程中,修复人员需结合生态监测与菌群动态分析,保证目标菌系的稳定性。整体而言,微生物修复在重金属污染土壤治理中具有良好的适应潜力,适合中低浓度污染区域的长期生态修复任务。

4 结束语

重金属污染对焦作市土壤生态系统构成长期干扰,其形成与区域产业结构密切相关,具有明显的区域性。在污染治理方面,物理、化学与生物修复技术各具优势,需根据污染类型、土壤性质与修复目标科学选配。同时,深入理解污染机制并精准解析场地特征,以实现提升土壤环境质量与恢复土地功能的双重目标。

[参考文献]

- [1]陈业男.基于微生物技术的土壤重金属污染修复技术研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(12):5-6+9.
- [2]安娜,王莉,庄雨适,等.浅析土壤重金属污染现状及生态修复策略[J].皮革制作与环保科技,2025,6(05):114-116.
- [3]黄铭,陶艺,张茗.我国农用土壤重金属污染现状及修复技术探讨[J].广东化工,2024,51(17):148-149+147.
- [4]席海苏,曾微,林丹婷,等.土壤重金属污染现状及修复治理分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(10):102-104.
- [5]胡旻,余程凤,陈伟东.土壤重金属污染现状及生态修复策略分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(07):167-169.
- [6]张群丽,谢海云,陈家灵,等.重金属污染土壤修复固化/稳定化技术研究现状及存在问题分析[J].环境保护科学,2024,50(03):96-102.

作者简介:

高雅(1995—),女,汉族,河南省焦作人,硕士研究生,党员,研究方向:土壤污染治理与修复,单位:河南省焦作市环境安全应急中心。