

Cd 污染土壤修复技术的研究进展

李乾龙, 张文莉*

云南水利水电职业学院, 云南 昆明 650000

DOI: 10.61369/SDME.2026060041

摘 要 : 随着社会的发展, 在可持续发展理念的推动下, 重金属污染土壤修复工作已经成为当代社会发展的重要问题, 土壤中重金属污染问题的解决关键是污染防治技术。在工业持续发展的过程中, 重金属可经由大气沉降、固废堆积、污水排放等多种途径汇入土壤环境, 进而引发土壤重金属污染。该类污染物难以依靠生物作用实现自然降解, 会长期留存于土体之中, 对人体健康构成潜在且持久的安全威胁。论文探讨了土壤重金属 Cd 污染源类型, 分析了重金属 Cd 对土壤污染的危害, 介绍了土壤重金属 Cd 污染修复技术, 为 Cd 污染土壤修复提供一定的参考和基础。

关 键 词 : Cd 污染; 土壤; 修复技术

Research Progress on Remediation Technologies for Cd-Contaminated Soils

Li Qianlong, Zhang Wenli*

Yunnan Water Conservancy and Hydropower Vocational College, Kunming, Yunnan 650000

Abstract : With social development and the promotion of sustainable development concepts, heavy metal contaminated soil remediation has become a critical issue in contemporary societal progress. The key to addressing heavy metal pollution in soils lies in pollution prevention and control technologies. During industrial development, heavy metals can enter soil environments through multiple pathways such as atmospheric deposition, solid waste accumulation, and wastewater discharge, subsequently leading to soil heavy metal contamination. Such pollutants are resistant to natural degradation through biological processes and tend to persist long-term in soil, posing persistent and potential health risks to humans. This study investigates the sources of cadmium (Cd) contamination in soils, analyzes the hazards of heavy metal Cd on soil pollution, and introduces remediation technologies for Cd-contaminated soils, providing valuable references and foundational knowledge for Cd-contaminated soil remediation efforts.

Keywords : Cd pollution; soil; remediation technology

Cd (Cadmium, Cd) 是在环境中普遍存在的一种重金属, 也是一种典型的土壤重金属污染物, 主要来源于工矿“三废”的排放及人类农业活动中农药化肥的过量使用^[1]。随着我国工业的迅速发展, 我国土壤总超标率为 16.1%, 其中 Cd 为 7.0%^[2]。土壤中的 Cd 具有明显隐蔽性、富集性、不可逆转和治理困难等特点^[3], 且重金属 Cd 不可生物降解^[4], 生物毒性强。土壤作为地球生态系统的重要组成部分, 能够为植物生长提供所需的肥力。Cd 是植物生长非必要的微量金属元素, 当其进入到植物体并累积到一定量时, 就会表现为生长受抑制、失绿、萎蔫, 甚至死亡等症状^[5-6]。长期食用受 Cd 污染的食物是人类接触 Cd 的主要途径, 通过食物链, 最终富集在人类的体内, 进而引起生理机能紊乱, 甚至引发肺癌、肾功能不全等疾病^[7]。国际癌症研究机构 (IARC)^[8] 将 Cd 列为第一类致癌物, 世界卫生组织 (WHO) 将 Cd 列为优先食物污染物。因此, 筛选并研发安全高效的治理与修复技术, 已成为当前改良土壤镉污染问题的迫切需求。

一、重金属 Cd 土壤污染源分析

土壤重金属污染主要是指人类各类生产活动向土体环境输入大量重金属物质, 使得区域土壤中该类元素含量远超自然背景本底值, 进而引发生态系统退化与环境质量下降的一类环境问题。Cd 作为一种有毒元素, 是我国南方农田和水稻的主要污染物, 其来源可以分为自然来源和人为来源两大类, 如图 1, 下面主要介绍人为来源。

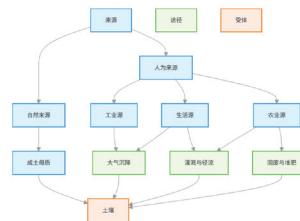


图 1 重金属 Cd 在土壤中的来源和累积途径

项目信息: 云南省教育厅科学研究基金项目: 再生水灌溉对土壤及叶类蔬菜的影响研究 (2024J1832)。

作者简介: 李乾龙 (1989-), 男, 河南商丘人, 硕士, 讲师。研究方向: 水利工程农田水利灌溉。

通讯作者: 张文莉 (1988-), 女, 河南商丘人, 硕士, 讲师。研究方向: 环境污染控制与修复。

（一）大气中重金属的沉降

大气重金属的赋存源头涵盖工业生产排放、机动车尾气排放，及轮胎磨损过程中释放的含重金属有害气态与颗粒态物质，其空间分布高度集中于工矿业周边区域，以及公路、铁路沿线两侧。该类污染物进入土壤圈的主要迁移路径为自然沉降作用与降水淋溶沉降过程^[9]。

经由上述两种沉降方式进入土体系统后的重金属污染，其扩散特征以工矿烟囱、固体废物堆放点及交通干线为核心向周边辐射蔓延；空间上呈现“城市—郊区—农区”的梯度递减规律，即距城市中心越远污染程度越弱，其中城乡结合部的污染负荷相对较高。此外，大气重金属沉降量与城市人口集聚度、建设用地开发强度及机动车保有密度呈显著正相关关系；区域重工业产业越发达，其周边土壤环境面临的重金属污染风险通常越高。

（二）农药、化肥和塑料薄膜的使用

施用含镉（Cd）的农药以及化肥的不合理施用，是引发土壤镉污染的重要农业源途径。在各类肥料中，过磷酸钙与氮肥通常含有较高水平的镉元素，磷肥的镉含量次之，而钾肥中的镉含量相对较低。此外，农用薄膜生产过程中所使用热稳定剂也含有镉成分，在塑料大棚与地膜的大规模推广应用过程中，同样会造成土壤镉污染的累积。

（三）污水灌溉

污水灌溉通常指利用经一定工艺处理后的城市生活污水，对农田、林地与草地开展灌溉作业的水资源利用方式。受大量工业废水与生活污水共同汇入市政管网的影响，城市污水中富集了高浓度的镉（Cd）离子，这类重金属会伴随污水灌溉过程持续输入土壤环境。近年来，污水灌溉已成为我国农业生产用水的重要补充途径，其中北方旱作区的污灌应用最为广泛，其污灌面积占全国总规模的90%以上，也因此成为土壤镉污染问题相对突出的区域。

二、重金属 Cd 对土壤污染的危害

土壤胶体对镉元素具备较强的吸附固定作用，极易造成该重金属在土层内不断富集，其富集范围多集中于0~15 cm表层土壤，15 cm以下深层土体的镉含量则会出现大幅下降。土壤环境中，镉主要以碳酸镉、磷酸镉与氢氧化镉等化合态稳定存在，其中碳酸镉为优势赋存形态，该特征在pH大于7的石灰性土壤中表现尤为明显。依据活性差异可将土壤镉划分为可给态与交换态两类，该形态组分迁移转化能力较强，极易被农作物吸收利用；而难溶性镉性质稳定，长期滞留于土壤中且难以被作物摄取。两种形态镉可在外界环境因子改变的条件下发生相互转化。镉并非植物生长发育所必需的营养元素，但各类农作物均可通过根系从土壤与灌溉水体中吸收该物质，并不断在植株体内积累留存。

当土壤镉含量超出正常耐受范围时，不仅会造成重金属在农产品中残留富集，还会对作物生理代谢产生明显抑制作用。镉毒害会破坏植物叶片组织结构，减缓生长速率，造成植株长势衰弱、矮化，同时阻碍根系正常伸长与发育，引发一系列生理胁迫

问题，最终导致农产品减产；若处于高浓度镉污染环境，植物还会因严重毒害作用出现枯萎死亡现象。农业生产层面，镉污染带来的最突出风险为镉超标稻米、蔬菜等农产品的产出，人体长期食用此类污染食材，极易诱发痛痛病等慢性中毒病症。除此之外，镉元素还会破坏人体肾小管功能，诱发肾性糖尿，同时对呼吸系统、心血管系统造成不可逆损伤，现有研究也已证实镉具有潜在的致癌、致畸与致突变毒性。

三、重金属 Cd 土壤污染修复技术

土壤镉污染的修复治理主要包含两大技术思路：其一为调控重金属的赋存形态，将高活性的镉组分转化为稳定钝化形态，降低其生物有效性；其二则是通过技术手段直接移除土壤中的镉污染物，从根本上削减重金属总量。常用的修复技术主要有以下三种。

（一）物理修复技术

基于土壤物理性质的差异，物理修复技术可通过多种手段实现污染物的分离与去除，具体包括清洁土体混合、无污染土层置换、上下层土壤翻混等措施，以此降低表层土壤污染物富集水平。在重金属污染发生初期，污染物分布相对集中，该类修复手段应用较为广泛，常见技术形式涵盖客土改良、原位换土、表层剥离以及深耕翻土等措施。

物理修复手段对污染程度高、占地面积小的地块修复效果显著、见效迅速。但若是应用于大范围污染区域，将会耗费大量人力物力，治理成本偏高。同时，该方式易破坏原有土壤结构、降低农田肥力，还可能引发土地占用、污染物下渗及二次污染等衍生问题，因此并不适合大面积重金属污染场地的治理应用。

（二）化学修复技术

通过向镉污染土体施加各类化学改良材料，例如修复药剂、钝化固定剂与稳定化试剂，可调节并转变重金属在土壤中的赋存形态，同时优化土体电位环境与酸碱平衡条件。借助化学吸附、离子交换、表面络合等一系列化学反应，能够有效降低镉元素的生物可利用度，削弱其对土壤生态及农作物的毒害作用。

土壤淋洗是用淋洗剂去除土壤中重金属污染物。该修复方式能够应用于大面积、高强度污染地块的治理工作，在砂质类土壤环境中治理优势更为突出。但该技术仍存在明显局限，修复过程需要投放成本较高的淋洗试剂，此类淋洗介质极易渗入地下水体，诱发地下水环境污染隐患。此外，淋洗作用在去除土壤重金属的同时，还会伴随流失根系范围内钙、镁等作物必需营养元素，进而造成土壤养分失衡，阻碍植株正常生长代谢。淋洗后淋洗液也需要处理。

固化技术主要依靠施加改良药剂，将土壤中的有毒重金属组分包裹固定，使其转化为性质稳定的化合形态，从而有效抑制重金属向外界环境释放扩散。而稳定化法则通过投加专用稳定剂，利用吸附作用、沉淀与共沉淀反应、络合结合等多重机制，削弱重金属在土体中的迁移能力，降低其生物活性与毒害风险。固化修复技术成本相对较低，操作简便，但效果可能受土壤类型和污染程度的影响。

（三）生物修复措施

生物修复技术依托各类生物的代谢生理过程，削减土壤重金属含量或转变其赋存形态，促使受损的土壤生态逐步恢复至健康水平。该技术主要分为植物修复、微生物修复与土壤动物修复三大类别。凭借修复效果优良、投入成本低廉、操作管理简便、无次生环境风险等突出优势，生物修复技术现已广受行业关注，成为当前污染场地治理领域的研究热点与重要应用方向。

1. 植物修复措施

植物修复技术以植物对特定元素的耐受机制与超富集特性为理论支撑。在重金属超标区域，大量耐性植物可通过多种生理途径抵御重金属毒害，例如主动阻隔重金属吸收、将有害物质固定于根部细胞壁，或是结合体内蛋白质、有机酸生成低毒稳定化合物，以此提升植株的抗逆耐受能力。依托高等植物与根际微生物的协同作用去除环境污染物，是一类新兴的绿色环保治理技术，兼具经济性与安全性，近些年已在农田污染改良中得到广泛实践。

筛选适配的耐性植物与超富集物种，是保障植物修复成效的核心关键。超富集植物可高效吸收并富集土壤中的镉等重金属，但该技术仍存在明显短板：多数超富集植株生物量偏小、生长速率缓慢，修复周期漫长，整体治理效率有限，一定程度制约了实际应用。

2. 微生物修复措施

微生物修复的作用原理，是利用土壤土著功能微生物对重金属的吸附固定、沉淀固化、氧化还原等生理作用，弱化重金属的生物毒性与迁移能力。相较于真菌等真核微生物，细菌、放线菌等原核微生物对重金属胁迫更为敏感。基于这一特性，可定向驯化培育耐镉功能菌群，待微生物富集重金属后，结合浓缩蒸发、活性炭吸附等工艺实现镉污染土壤的无害化处置。现阶段，借助遗传改良、基因编辑等现代生物技术选育高效降毒菌株，已成为重金属污染修复领域的重点研究方向。

微生物修复的作用机制主要包含生物吸附与生物氧化还原两大类。生物吸附主要依靠蓝细菌、硫酸盐还原菌及藻类等微生物，分泌多糖、糖蛋白等富含阳离子基团的胞外聚合物，通过络合作用结合重金属离子，实现污染物固定；生物氧化还原则是通过微生物的代谢反应，对重金属离子进行氧化、还原、甲基化与

去甲基化转化，进而降低土壤中重金属的活性与污染风险。

3. 低等动物修复措施

蚯蚓等土壤小型低等动物，可通过摄食与体表吸收富集环境中的重金属，从而有效降低表层土壤的重金属累积量。已有学者以废弃砷矿与重金属矿区尾矿为研究对象，开展蚯蚓毒理与修复试验，结果证实蚯蚓对锌、镉元素具备良好的富集能力^[10]。据此可通过在污染地块投放蚯蚓，待其体内富集大量重金属后，采用电刺激、清水冲洗等方式集中收集处理，能够在一定程度上实现镉污染土壤的生态改良。

当前土壤镉污染的管控与治理，普遍遵循预防优先、综合治理的基本原则。对于未受污染的清洁地块，重点落实源头防控措施，阻断污染物输入途径，提升土壤环境承载能力；针对已发生重金属累积的污染区域，则以改良修复为主，最大限度消解环境危害。由于重金属在土壤系统中的迁移转化过程复杂多变，污染治理难度极大，亟需强化土壤环境保护管控，从源头严控重金属污染问题。

四、结论与展望

镉污染土壤的修复治理具有高度复杂性与长期性，现阶段仍缺乏兼顾稳定性、高效性且适配农业生产实际的成熟修复技术体系。物理与化学修复方法能够快速降低土壤重金属活性，但仅实现了镉元素的形态转化，无法彻底移除污染物，同时普遍存在治理成本高、施工规模大、易诱发二次污染等现实问题。微生物修复属于环境友好型治理手段，经济便捷且不会破坏土壤原有理化性质，但其修复速率缓慢、见效周期长，对土壤温湿度、酸碱度及养分条件要求严苛，难以在大范围污染区域推广落地。

植物修复技术治理成本低廉，可同步改善区域生态环境，综合效益突出，更适合大面积农田镉污染的规模化治理。未来研究应聚焦三大方向：持续挖掘优质超富集植物种质资源；深入探究超富集植物与根际微生物的协同修复机制；结合分子生物学与基因工程技术改良植物生理缺陷。通过多维度技术融合，研发绿色、稳定、高效的复合修复体系，为耕地镉污染常态化治理与农业生态安全保障提供理论支撑与技术参考。

参考文献

- [1] 朱瑞婷,牛奎举,张娉君,等.外源2,4-表油菜素内酯对Cd胁迫下草地早熟禾叶绿素代谢的影响[J].草地学报,2021,29(4):635-643.
- [2] Pan,Xiaohong,et al. Microbial strategy for potential lead remediation: a review study. World Journal of Microbiology and Biotechnology,2017.
- [3] Li,Gang,Nan Lu, and Yang Wei. Research progress on contaminated soil remediation materials based on soil organic reconstruction. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 300. No. 3. IOP Publishing,2019.
- [4] Ahn S C,Chang J Y,Lee J S,et al. Exposure factors of cadmium for residents in an abandoned metal mine area in Korea[J]Environmental Geochemistry and Health,2017,39(5):1059-1070.
- [5] LI F,QI J,ZHANG G,et al.Effect of Cadmium Stress on the Growth,Antioxidative Enzymes and Lipid Peroxidation in Two Kenaf (Hibiscus cannabinus L.)Plant Seedlings[J]. Journal of Integrative Agriculture,2013,12(4):610-620.
- [6] 王翔,苏胜,毛伟,等.植物—微生物联合修复镉污染土壤研究进展[J].中国农学通报,2025,41(30):97-104.
- [7] Li,Zhu,et al. Metal contamination status of the soilplant system and effects on the soil microbial community near a rare metal recycling smelter. Environmental Science and Pollution Research,2016.
- [8] 黄卡,冯娟,钟艳秋,等.镉污染农用地的危害及治理技术[J].基层农技推广,2024,12(3):132-134.
- [9] 柯馨姝.长株潭地区大气沉降中重金属污染特征及来源分析[D].山东:中国海洋大学,2015.
- [10] 魏佳玉.粪源生物炭对蔬菜生长及重金属转运的影响[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2021.