

农田土壤重金属污染来源、迁移累积及防控修复研究进展综述

施清齐, 张宗靖*

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年6月2日; 录用日期: 2026年7月9日; 发布日期: 2026年7月21日

摘 要

随着工业化和农业机械化生产进程的持续推进, 土壤污染已成为不可忽视的环境问题, 而其中的重要部分便是土壤重金属污染。现有重金属污染土壤治理手段包含物理、化学、生物修复与新兴联合修复工艺。然而, 目前关于重金属污染土壤修复的标准仍不够完善。由于重金属具有持久性、隐蔽性和难降解性, 其在土壤中的累积不仅威胁生态系统功能, 也对农业生产和人体健康构成长期风险, 当前由于修复技术的快速发展, 修复土壤的技术标准框架仍相对滞后, 制约了相关技术的规范化应用与推广。本文系统综述了土壤重金属的来源与污染现状, 比较分析了主要修复技术的优势、局限性及适用条件, 进一步梳理了修复标准及修复技术的研究进展, 以期为重金属污染土壤修复研究与实践提供理论支撑。

关键词

农田土壤, 重金属污染, 环境地球化学, 迁移积累, 防控修复

A Review of the Research Progress on the Sources, Migration, Accumulation, Prevention, and Remediation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil

Qingqi Shi, Zongjing Zhang*

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

*通讯作者。

文章引用: 施清齐, 张宗靖. 农田土壤重金属污染来源、迁移累积及防控修复研究进展综述[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(7): 1064-1076. DOI: 10.12677/ag.2026.167095

Received: June 2, 2026; accepted: July 9, 2026; published: July 21, 2026

Abstract

With the continuous advancement of industrialization and agricultural mechanization, soil pollution has become an environmental problem that cannot be ignored, and an important part of it is soil heavy metal pollution. The existing heavy metal contaminated soil treatment methods include physical, chemical, bioremediation and emerging combined remediation processes. However, the current standards for remediation of heavy metal contaminated soil are still not perfect. Due to the persistence, concealment and difficult degradation of heavy metals, their accumulation in soil not only threatens the function of ecosystem, but also poses a long-term risk to agricultural production and human health. At present, due to the rapid development of remediation technology, the technical standard framework of soil remediation is still lagging behind, which restricts the standardized application and promotion of related technologies. This paper systematically reviewed the sources and pollution status of heavy metals in soil, compared and analyzed the advantages, limitations and applicable conditions of the main remediation technologies, and further combed the research progress of remediation standards and remediation technologies, in order to provide theoretical support for the research and practice of heavy metal contaminated soil remediation.

Keywords

Farmland Soil, Heavy Metal Pollution, Environmental Geochemistry, Migration Accumulation, Prevention and Control Repair

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

农田土壤是农业生产与粮食安全的重要基础[1],生态文明建设是关系中华民族永续发展的根本大计,粮食安全是“国之大者”。所谓“悠悠万事,吃饭为大”,农田土壤重金属污染问题日益凸显,已成为制约农业绿色发展、农产品质量安全保障及生态环境保护的重要因素。据中华人民共和国生态环境部调查结果表明,我国耕地土壤环境质量总体形势不容乐观,约 19.4%的耕地存在污染超标现象[2],土壤是农业生产的重要自然资源,承担着粮食及其他可再生资源供给的基础功能。然而,随着工业化和农业机械化生产进程的持续推进,大量重金属通过工业排放、农业投入及其他人为活动进入土壤,导致土壤重金属污染日益成为全球环境变化与农业可持续发展领域的重要问题[3]。与一般污染物相比,重金属具有持久性、隐蔽性、难降解性和生物累积性等特点[4],一旦在土壤中富集,便可通过土壤-作物系统迁移转化,破坏植物细胞膜结构和正常生理代谢过程,抑制光合作用和养分吸收,进而影响作物生长发育、产量与品质。近年来,围绕重金属污染土壤修复已形成物理修复、化学修复、生物修复及联合修复等多种技术路线,相关研究不断深化,技术体系逐步丰富。然而,与修复技术快速发展相比,重金属污染土壤修复标准、效果评价方法及修复后土壤功能判定体系仍相对滞后,制约了相关技术的规范化应用与推广。基于此,系统梳理土壤重金属的来源与污染现状,比较分析主要修复技术的优势、局限性及适用条件,对于推动重金属污染土壤修复研究与实践具有重要意义。

2. 土壤重金属来源

2.1. 自然来源

自然来源的重金属主要源自成土母质以及各类地质作用, 火山喷发、大气沉降、岩石风化等过程均会造成重金属在土壤中累积。在自然环境下土壤重金属主要来源于岩石的风化物, 岩石风化和成土过程都对土壤中的重金属含量产生了重要影响, 不同类型的岩石矿物中的重金属含量差异较大, 土壤母质中重金属的含量也有显著的差异。如成土母质为碳酸盐岩、玄武岩及泥岩等, 土壤中的重金属含量相较于其他土壤普遍较高。除此之外, 不同的土壤类型由于土壤性质的不同而造成了土壤对重金属离子吸附能力的差异, 进而造成土壤重金属含量的差异, 如阳离子交换量、土壤酸碱度等。

2.2. 人为污染源

人为污染源是各类导致环境重金属富集的人类生产活动, 其涵盖了交通运输、矿产采冶、金属锻造、露天焚烧、污水农田灌溉与生活垃圾填埋等类型, 采矿与冶炼更是诱发矿区土壤重金属污染的首要诱因。矿产开采环节会产出海量选矿尾水与冶炼废水, 污水未经无害化管控随意排放, 极易引发矿区周边土壤、地下水重金属超标; 生产过程还会生成重金属粉尘, 该类微粒以气溶胶飘散于空气, 后续依靠自然沉降与降雨淋溶落地, 最终汇入土壤(图 1)。其次, 交通运输同样也是土壤重金属的重要来源, 尾气排放、轮胎及镀锌零件磨损等过程均会导致重金属微粒的释放[5]。除此之外, 选矿作业遗留的尾矿砂经雨水冲刷淋滤, 会持续向周边环境释放大量重金属离子。我国作为农业大国, 化肥、农药及污水灌溉也是土壤重金属污染的来源之一, 农田耕地往往由于农药、化肥、家禽化肥的滥用, 导致 Cd、Cu、Zn 等重金属含量的超标。

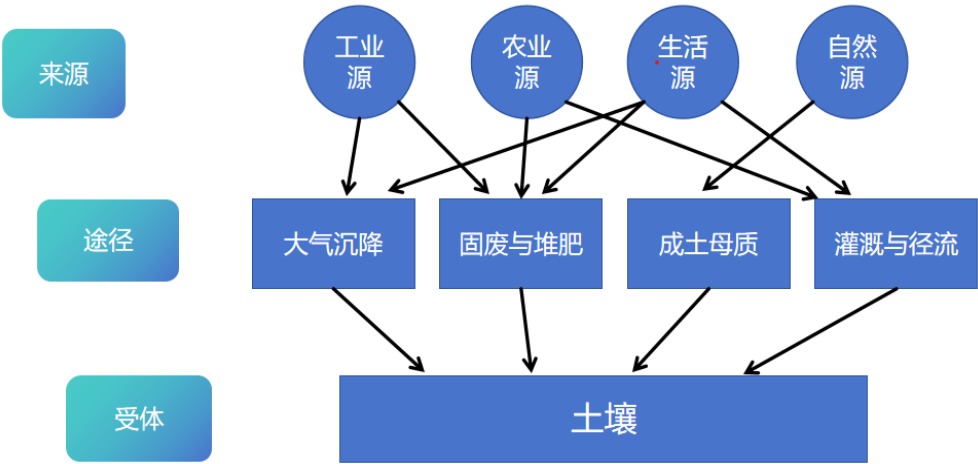


Figure 1. Sources and pathways of heavy metals in soil
图 1. 土壤重金属来源及途径

2.3. 可耕地中重金属污染的来源

农业土壤是珍贵的不可再生自然资源。它极易受到镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)、砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu)、镍(Ni)、锌(Zn)、铝(Al)等有毒重金属污染, 这些污染既可能由自然原因引起, 也可能由人为活动导致[4]。自然原因包括但不限于金属含量岩石被雨水风化以及大气沉降。人为活动包括工业活动(例如采矿、皮革鞣制、纺织和石油化工)、金属废物的处置、汽车尾气排放以及农业实践[6]。然而, 无论污染来源如何, 持续向耕地中添加重金属都可能导致土壤达到过于有毒的程度, 以至于支持植物的生长和生产力。下文依托图 2, 着重讲述不当的农业生产行为造成耕地重金属污染的相关内容。

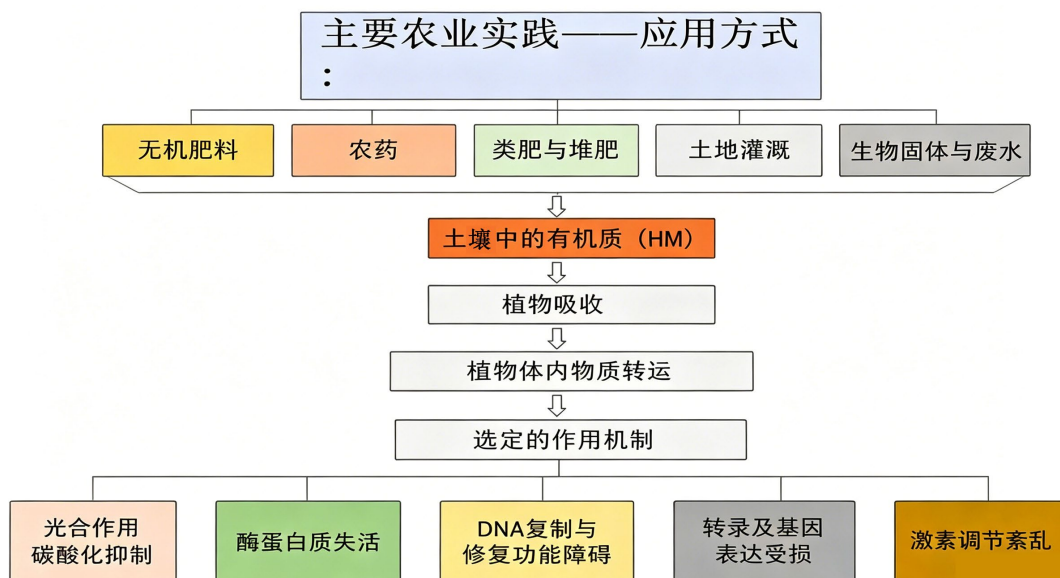


Figure 2. A flow chart shows the pollution of heavy metals in farmland, their absorption and transfer in crops, and the key mechanisms of plant species in agricultural practice

图 2. 一个流程图，显示了农业实践中重金属在农田中的污染、它们在农作物中的吸收和转移，以及植物中作物的关键机制

2.3.1. 化学肥料的应用

无机化学肥料是农作物生产必不可少的投入物。因此，大量的无机肥料，包括氮(N)、磷(P)、钾(K)以及复合肥料，常规地被施用于农田，以提供充足的这些大营养元素。据估计，2019 年全球施用了超过 2.2 亿吨的商品化肥和石灰材料，主要用于农业田地[7]。

在这些肥料中，磷肥含有最高水平的重金属污染物[8]。在一项评估有无磷肥施用的土壤研究中，锌的浓度不仅在施肥的土壤中较高[9]，而且在该土壤中生长的植物中也较高。研究表明，由于施用磷肥，土壤中的镉含量会持续增加[10]。镉在土壤液相中溶解性好、迁移性能突出，故而对植物有着强烈的毒害效果。一项研究中评估的几种磷肥中作为杂质存在的镉浓度如表 1 所示。

Table 1. Cadmium concentration in various phosphate fertilizers (adapted from [11])

表 1. 多种磷肥中的镉浓度(改编自[11])

肥料	镉含量(毫克/千克)	
	基于产品	基于磷含量
复合肥料	23~29	418~527
单质过磷酸钙	16~26	186~302
过磷酸钙	13~34	151~395
磷矿石	7.2~47	54~303
高浓度分析肥料	<0.6~5.6	15~118
重过磷酸钙	<0.6~12	<3.6~72
三重过磷酸钙	0.8~7.0	24~35
磷酸-铵	1.8~8.1	12~37
磷酸二氢铵	4.3~6.6	22~28

除磷肥外，硫酸铜、硫酸亚铁和硫酸锌肥料同样会夹带铅等重金属杂质[12]。一项温室实验研究报告指出，连年施用化肥会造成土壤中多种重金属元素的积累(表 2)。针对马来半岛和我国广东省农田土壤样本进行的实验表明，不同重金属元素(As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)的浓度相比对照土壤样本高出数倍。这些重金属元素的来源可能与农业活动有关，包括化肥施用。无机肥料在生产时选用的原料，是化肥重金属污染物的重要来源。例如，磷矿石，也称磷灰石，被用于磷肥生产[13]。

Table 2. Heavy metal concentrations in greenhouse soils due to repeated application of inorganic fertilizers (adapted from [8])
表 2. 由于反复施用无机肥料导致温室土壤中的重金属浓度(改编自[8])

元素	最大值	最小值	倍数差异
毫克/千克土壤			
Cd	0.65	0.06	10.8
Cu	171.5	21.0	8.2
Ni	36.9	28.7	1.3
Pb	38.0	20.5	1.9
Zn	433	71.9	6

2.3.2. 农药施用

农药是现代农业生产不可或缺的物质。据估计，如果停止使用农药，世界粮食产量可能会减少接近 40% [14]。另有研究统计，如果不使用农药，水果产量将损失 78%，蔬菜产量将损失 54%，谷物产量将损失 32% [15]。农药如杀虫剂、杀真菌剂、灭鼠剂、线虫剂和除草剂，由有机或无机化合物组成，对目标生物具有毒性。对这些化合物的分析表明，其中一些含有重金属元素，或作为活性成分(表 3)，或作为配方中的杂质。

Table 3. Pesticide active ingredients containing different heavy metal elements (adapted from [16] [17])
表 3. 含有不同重金属元素的农药活性成分(改编自[16] [17])

化学名称	分子式	HM 元素
杀虫剂		
磷铝化物	AlP	Al
硅酸铝	Al ₂ Si ₂ O ₇	Al
砷酸	Al ₂ AsO ₄	As
氧化铜	Cu ₂ O	Cu
砷酸铅	AsHO ₄ Pb	As, Pb
杀菌剂		
氧化铜	CuO	Cu
醋酸铜	Cu ₂ (CH ₃ COO) ₄	Cu
碳酸铜	CH ₂ Cu ₂ O	Cu
氯化铜	CuCl ₂	Cu
氧化汞	HgO	Hg
氯化汞	Hg ₂ Cl ₂	Hg

续表

脱叶剂		
重铬酸钾	$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	Cr
氯化锌	ZnCl_2	Zn
氯化汞	HgCl_2	Hg
灭鼠药		
硫酸铊	Tl_2SO_4	Tl
磷化锌	Zn_3P_2	Zn
碳酸钡	BaCO_3	Ba
除草剂		
砒霜	H_3AsO_4	As
砷酸钙	$\text{As}_2\text{Ca}_3\text{O}_8$	As

以往农田大范围施用的部分杀虫与杀菌剂,有效成分中检出较高含量的重金属组分。例如杀菌剂中富含铜,如硫酸铜和氯化铜;含铅的杀虫剂,如砷酸铅;以及含铜的杀虫剂,如醋酸氧砷铜。农药产品活性成分中常见的重金属元素包括铜(Cu)、砷(As)、铅(Pb)、汞(Hg)、铬(Cr)、锌(Zn)、铝(Al)、锂(Li)、钡(Ba)、硼(B)和钛(Ti) [16] [17]。

另一方面,重金属元素也可能作为杂质存在于农药产品中。例如,日本用于害虫控制的某些农药产品中含有镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)和铅(Pb)作为污染物[18]。利用电感耦合等离子体/光学发射光谱(ICP-OES)对含有 11 种草甘膦为基础的除草剂配方在内的多种农药进行化学分析,检测到砷(As)、铬(Cr)、钴(Co)、铅(Pb)和镍(Ni)作为污染物[19]。对几种杀虫剂进行的类似 ICP 质谱分析检测到锌(Zn)、铜(Cu)、铬(Cr)、钴(Co)、铅(Pb)和铊(Tl)作为污染物[20]。

2.3.3. 牲畜粪肥与堆肥的应用

在农业生产中,常把以家禽、猪,羊,牛粪为主的禽畜粪便作为有机肥料。农作物生产中最常见的便是将这些粪便以及粪便制作成的堆肥施用在农田之中。然而,禽畜粪便及其堆肥中含有高浓度的重金属(HM)元素,如铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)、镍(Ni)、铬(Cr)、砷(As)、铅(Pb)和汞(Hg)等污染物[21]。饲料中添加的矿物原料是粪便中重金属元素的主要来源。一些研究证实,为了促进动物生长和提高抗病性,商业饲料中人工添加了锌、铜、砷和镉[22]。然而,动物无法消化这些高金属(HM)元素,并会通过粪便将其排出。重金属无法被降解,在堆肥加工期间不能被分解转化。长期持续向农田施加畜禽粪便与腐熟堆肥,会造成土壤重金属不断富集,累积至有害阈值,危害作物生长并造成产量下降[23]。

2.3.4. 基于污水污泥的生物固体的应用

来自城市和工业废弃物的污水污泥中普遍富集砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、铅(Pb)、汞(Hg)、镍(Ni)、钼(Mo)、锌(Zn)等重金属元素。在一些发展中国家,长期在农田施用未经处理的污水污泥,从而造成耕地中重金属浓度升高[24]。然而,污水处理厂产出的污泥重金属含量大多偏低,有机质与养分充足,具备农用肥的利用条件。经过无害化处置后的污泥还可以还田,改良土壤理化性状,助力农作物增产。因此,许多国家已经普遍将这些废弃物资源化用于农业生产。

2.3.5. 陆地灌溉

直接使用被重金属污染的地表水与地下水开展农田灌溉,是造成耕地土壤重金属污染的又一重要诱

因。对过去二十多年(2000年至2025年)发表的多篇相关文献进行综述, 这些文献确定了全球地表水体中的重金属污染情况, 结果显示铬(Cr)、锰(Mn)、钴(Co)、镍(Ni)、砷(As)和镉(Cd)的平均含量超出了世界卫生组织和美国环境保护署规定的允许限度[25]。地表水体中重金属污染的原因包括自然原因和人为原因。自然原因包括但不限于大气沉降、地质和生物风化以及气候变化。人为原因包括但不限于排放含有重金属的农业、城市、生活和工业废弃物。来自各种来源的重金属元素如铅(Pb)、镍(Ni)、铬(Cr)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、锌(Zn)、铜(Cu)等通过径流进入地表水体和灌溉渠道, 通过渗透雨水垂直淋溶进入地下含水层。因此, 采用重金属超标水体灌溉农田, 既会制约农作物生长、造成减产, 还会破坏土壤原有品质。然而, 需要注意的是, 作物受损的程度将取决于灌溉水的pH值、氧化还原电位以及受污染重金属元素的水溶性。

3. 农田土壤重金属迁移累积规律及危害机制

重金属进入农田土壤后会发生迁移、富集, 并沿食物链传递, 威胁生态与人体健康, 结合图1、图2对其规律及危害简述如下。

3.1. 迁移与累积特征

3.1.1. 迁移途径

重金属主要通过大气沉降、地表径流、灌溉淋溶、农业固废还田等途径迁移[26]。镉、锌活性强、易随水扩散; 铅、铬多吸附于土壤胶体, 集中在耕作层。

3.1.2. 赋存形态转化

重金属在土壤中存在多种赋存形态, 且会随环境条件相互转化, 直接决定其迁移性与毒性[27]。主要分为水溶态、交换态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态。水溶态与交换态活性最高, 易被作物吸收、随水分迁移[28]; 铁锰氧化物结合态、有机结合态性质相对稳定; 残渣态最为惰性, 基本不参与迁移与生物利用[29]。

土壤pH、氧化还原电位、有机质含量改变时, 形态会发生转变: 酸性环境下, 稳定形态易转化为活性形态, 污染风险升高[30]; 有机质、钝化材料增多时, 活性重金属会向稳定形态转化, 毒性与迁移能力随之下降[31]。

3.1.3. 累积特点

重金属累积具有长期性、分层性、复合叠加的特点[32]。其难以自然降解, 长期施用化肥、粪肥会造成含量逐年升高[33]; 污染物主要聚集在表层土壤, 多种重金属共存还会放大污染风险[9]。土壤pH、胶体含量、耕作方式、微生物活动, 都会影响重金属的迁移能力[34]。

3.2. 作物对重金属的吸收与响应

重金属主要经作物根系吸收, 再转运至茎叶、果实, 整体富集规律为根系 > 茎 > 叶 > 果实[35]。作物可通过细胞壁吸附、体内螯合、液泡隔离等方式抵御重金属毒害[36]; 若污染超标, 防御机制会失效, 引发生理损伤[37]。

4. 重金属污染土壤的修复技术

现有相关研究显示, 重金属污染土壤的整治手段包含物理、化学、生物及联合修复技术。单独采用物理或化学修复工艺不仅投入成本高昂, 还容易衍生二次污染问题, 很难大面积推广应用。植物修复作为一种新兴的修复技术, 具有成本低、效果好、对环境干扰最小、不破坏景观生态等优点, 备受关注和

应用[38]。联合修复是指整合两种或多种修复技术协同施治,融合物理、化学、生物修复手段可在修复污染土壤的同时恢复区域生态,在今后的科研探究与实地应用方面发展前景极为可观。常用的重金属土壤修复技术及其优缺点如表 4~6 所示。

Table 4. Physical remediation technology of heavy metal contaminated soil

表 4. 常用的重金属污染土壤物理修复技术

方法	机制	影响因素	优势	劣势
耕作和土壤替换	用未受污染的土壤替代或部分替代受污染的土壤,以稀释土壤中的污染物浓度。	土壤替换量	有效隔离受污染土壤以减轻其对环境的影响	该方法劳动密集,长途运输成本高昂,仅适用于小范围内严重污染土壤的修复工作。
热治疗	通过加热从土壤中去挥发重性金属	土壤中重金属元素的挥发性	该方法能有效降低土壤中挥发性重金属的浓度。	该过程需要消耗大量能量,因此不适用于大规模修复。重金属的不当收集可能导致二次污染,并会破坏土壤湿度和有机质。
固结处理	采用过量电源电流对受污染土壤进行逐步加热,直至达到熔化温度。	温度与土壤导电性	该方法在清除大量受重金属污染的废弃物方面非常有效,可用于大规模土壤修复。玻璃化处理后的材料可回收再利用,作为骨料和清洁填料使用。	当土壤导电性较差时,该方法不可使用。仅适用于碱含量较低的湿润土壤中的原位固化工艺。其成本对于大规模田间应用而言过高。

Table 5. Common chemical remediation technologies for heavy metal contaminated soil.

表 5. 常用的重金属污染土壤化学修复技术

方法	机制	影响因素	优势	劣势
稳定化	外源添加钝化药剂可改良土壤理化特性,还能通过沉淀、吸附、配位络合、氧化还原等作用结合重金属,改变其存在形态,减少重金属水溶含量、迁移能力与生物有效性。	土壤粒径与孔隙度、重金属浓度及其形态	土壤粒径与孔隙度、重金属浓度及其形态	该方法并不能真正实现重金属的去除;一旦被激活,重金属便可能再次污染土壤。
浸出	使用含有化学试剂(酸/碱、表面活性剂、螯合剂、盐类或氧化还原剂)的浸出溶液,将金属从土壤转移至水溶液中。	重金属类型、浓度、形态及土壤特性	该方法能完全去除土壤中的重金属,具有高效去除能力和操作简便的特点。	常用的浸出剂要么难以降解,要么会破坏土壤的理化性质;而可降解的浸出剂则相对昂贵。

Table 6. Commonly used biological and combined remediation technologies for heavy metal contaminated soil

表 6. 常用的重金属污染土壤生物与联合修复技术

方法	机制	影响因素	优势	劣势
植物修复	利用植物的螯合作用、细胞壁沉淀作用、区室化机制及其他解毒机制,将土壤中的重金属吸收并富集到植物地上部分,随后收获地上部分以实现重金属的去除。	重金属的形态分类与土壤环境	该方法成本最低,经植物修复处理后,所得植物可用于生物能源生产,且不会产生二次污染,操作简便。	该方法仅对回收特定金属(镉、镍、铜和锌)有效;金属捕获动力学过程极为缓慢;含有金属的生物质在植物生长后必须进行妥善处理。

续表

动物修复	一方面依靠生物体吸收富集重金属, 减少土壤中的重金属存量; 另一方面借助生物活性活化土壤重金属, 提升作物对重金属的富集效果。	土壤环境与重金属形态分布	它能够改善土壤的理化性质, 促进植物生长, 提升生态环境质量, 且不会产生二次污染。	其耐受范围有限, 极易受环境因素影响, 具有高度特异性; 对于大面积受污染土壤而言, 其修复能力可能较为有限。
微生物修复	借助微生物对重金属离子的吸附、固化、甲基化与氧化还原作用, 或是微生物代谢生成的生物高分子螯合、沉淀重金属, 生成稳定络合物, 实现重金属毒性的下降。	土壤与温度	成本低、能耗低, 能够吸附多种重金属, 缩短修复时间, 参与调节土壤养分循环, 并提高重金属的转化率。	微生物环境条件极为严苛, 且该过程难以控制。某些微生物能够固定重金属, 从而降低植物对重金属的吸收。
联合修复技术	结合多种修复技术对重金属污染土壤进行治理	土壤重金属的类型与物种形成	它能够提高修复效率, 并弥补单一土壤修复技术的不足。	该技术的应用范围较为有限, 当前研究主要集中在植物化学物质联合修复与植物微生物联合修复技术。

4.1. 物理修复

重金属污染土壤的物理修复, 是借助各类物理手段改良土体, 达到削减、固存土壤重金属的目的, 其中的主流技术包含换土、土壤淋洗、固化填埋、热处理、电动修复等。

4.1.1. 耕作和换土

耕作涉及机械深翻土壤, 能够把聚集在土壤表层的重金属分散并转移到更深的层次, 从而实现污染稀释[39]。土壤置换也叫做客土法, 其原理就是往污染土壤中掺入足量无污染净土并均匀拌和, 稀释重金属含量至安全标准之下。翻耕覆土工艺适宜轻度污染农田, 能够在较短周期内完成土壤治理。然而, 它们的物资投入量大、治理造价偏高, 还极易破坏土壤肥力, 降低土地的生产能力不适合大规模推广。

4.1.2. 热处理

高温热处理技术是借助升温处理土壤, 使汞、砷等易挥发的重金属受热挥发脱离土体。该方法对土壤多环芳烃与挥发性污染物去除率可达 99% [40], 同时对一些非挥发性重金属和放射性元素也有一定的固定作用, 降低其环境风险。然而, 高温热解不仅工艺能耗偏高, 而且还会损耗土壤有机质、破坏土壤结构水, 从而导致该项技术难以大范围实际运用。

4.1.3. 凝固

固化修复技术, 是指在重金属污染土壤中投加稳定钝化材料, 从而改变土壤理化性状, 通过吸附与共沉淀作用, 降低重金属迁移能力及生物可利用性[41]。稳定剂不仅有着石灰、水泥、粉煤灰等单剂, 也有按不同配比复配制成的复合稳定剂, 从而用来改善这些工程技术。经过固化处理后的污染土壤, 重金属活性大幅降低, 处理后的土体可当作建材、路基原料使用。但固化修复技术存在缺陷, 如易损毁土体结构、扰动周边生态环境, 且稳定剂用料多, 整体治理花销偏大。因此, 该方式只适用于小范围污染地块整治, 想要规模化应用还需要进一步探究。

4.2. 化学修复

化学修复属于原位治理手段, 它是指通过向土体投加改良或钝化药剂, 促使重金属发生化学反应, 降低其溶解能力、迁移潜力与生物可利用性, 最终实现污染土壤的修复治理[42]。就目前来说, 改良剂在

土壤修复领域应用广泛, 优质改良剂需满足绿色无危害、价格低廉、修复高效且作用长效的条件。石灰、石灰石粉、磷灰石、羟基磷灰石、钙镁磷肥等常规改良材料均可在一定程度上修复污染土壤, 另外添加表面活性剂与重金属螯合剂也能够优化改良效果。

石灰和碳酸盐矿物是最常用的重金属固定材料[43]。据研究显示, 对土壤施用浓度为 0.2% 的石灰后, 铜、镉有效态含量分别下降 97%、86%。碳酸钙、白云石是重金属钝化常用碱性物料, 在污染土壤施加石灰或钙镁磷肥, 能够明显降低镉的交换态含量。磷基原料钝化效果突出, 磷灰石、磷酸钙、过磷酸钙、富磷污泥均是主流固磷钝化剂; 含硅物料则可对铝、铁、锌、镉、锰多种重金属起到固定修复效果。常用的含硅原料包括硅酸盐肥料、硅酸钙、含硅污泥、粉煤灰、硅酸盐粘土矿物等[44]。生物炭是一种富含碳的材料, 已用于修复重金属污染的农田[45]。已经越来越多地由于其具有减少土壤重金属污染、提高土壤肥力、促进土壤固碳等多重效益, 可用于重金属污染土壤的修复。其在土壤修复中的应用在实验室和现场试验中显示出良好的效果, 被认为是一种经济高效、环境友好的土壤改良剂。此外, 利用土壤重金属间的拮抗效应能够有效减轻污染物毒害。例如, 提升土壤中钙元素含量, 能够抑制作物吸收镉、镍、铅、锌、铬等重金属, 缓解重金属毒害。据此, 在土壤中投加含钙原料, 便可降低部分重金属的生物可利用性。

化学修复操作简便, 可选用工业副产物充当改良药剂, 治理成本偏低, 适用于大面积污染土壤改良。但单一化学修复难以彻底移除土壤重金属, 环境改变后被钝化的重金属容易再度活化析出; 同时药剂或干扰土壤微生物群落, 存在生态风险。为此实际施用化学修复技术时, 优先选用钝化效果稳定、对土壤生态扰动微弱的修复原料。

4.3. 生物修复

生物修复分为狭义与广义两类, 日常研究应用多采用广义定义, 即依托各类生物资源治理重金属污染土壤。生物依靠自身代谢活动, 既能削减土壤重金属总含量, 又能改变重金属赋存形态、降低生物毒性, 最终实现土壤修复。

4.3.1. 植物修复

植物修复主要是依靠植株与根区微生物协同作用, 通过富集吸收、挥发、转化、降解、固定等方式处置土壤污染物[46]。该修复途径主要分为植物提取、根际降解、体内降解、植物固定与植物挥发五类作用机理[47]。植物提取是借助超积累植物富集重金属的能力, 收割植株地上部位并加以处理, 把土壤里的重金属移出, 实现减污降毒的修复效果。目前该方法已被大量运用于重金属污染土壤的植物修复相关研究中[38]。植物修复治理成效受多重条件制约, 主要包含土壤受污染水平、根际微生物活性, 以及所选植物对重金属的阻隔、吸收、富集与降解性能。

4.3.2. 土壤动物修复

狭义土壤动物终生栖息于土壤内部, 广义范畴则包含仅某个生长阶段或季节性在土表、土层活动的生物, 动物修复一般选用广义定义下的土壤动物。该修复手段归属于生物修复, 依托自然或人工调控条件, 借助土壤动物与肠道微生物对污染物进行消化分解、富集浓缩, 以此削减土壤污染物含量。其修复机理主要有三点: 动物摄取重金属后合成金属硫蛋白; 机体代谢生成多肽, 依靠螯合作用钝化重金属; 受重金属胁迫时, 转运蛋白相关基因表达上调, 提升机体耐污能力[48]; 由于受应用短板限制, 相关研究整体偏少, 现阶段研究多聚焦蚯蚓、啮齿类等大型土壤动物, 该技术规模化落地仍有待深入探索。

4.3.3. 微生物修复

微生物修复是值在人工调控环境下, 依托土著或人工选育菌种, 一方面降解土壤有机污染物, 另一

方面借助生物吸附、氧化还原反应转变重金属赋存形态, 以此削减污染物毒性与环境危害[49]。各类菌种修复机理存在明显区别: 细菌以转化重金属形态为主, 真菌依靠体内金属硫蛋白螯合重金属, 减少游离重金属离子含量、减轻毒害。该技术施工方式灵活, 可选用原位、异位或是两种工艺联用, 加之造价低廉、修复效率优异, 现已成为重金属土壤治理的热门研究方向。但实际落地仍存有短板, 外源菌种易出现水土不服、和本土微生物生存竞争落败等问题, 修复成效极易受外界环境制约[50]。因此, 借助生物技术选育抗逆性强、修复适用范围广的工程菌种, 是今后土壤污染修复领域的发展方向。

4.4. 联合修复技术

伴随土壤污染持续复杂化, 各地污染程度、土质类型、自然环境与土地再利用标准各不相同, 单一修复手段很难实现预期治理效果。适用于治理区域的实际研发复合修复工艺, 已然成为重金属污染土壤治理的重要研究方向。当前主流联用修复模式包含植物-微生物、动植物耦合以及理化-生物复合修复等类别[51]。其中植物-微生物联合修复能够强化植物修复效率, 是国内外相关领域的重点研究课题。依据搭配模式的区别, 该技术分为植株搭配专一功能菌种、植物结合菌根微生物两类。和其余修复技术类似, 它的治理效果受多重条件制约, 涵盖土壤重金属污染量级、重金属生物有效性、受试植物自身性状, 以及 pH、氧化还原电位、根系分泌物、根际微生物与矿物组成等根际环境指标[52]。

5. 结论

综上所述, 农田土壤重金属污染已成为影响农业可持续发展、农产品质量和生态环境保护的重要环境问题。重金属来源具有多样性和复合性, 其中主要以大气沉降、污水灌溉、污水污泥、动物粪便、矿物肥料和农药为来源。由于重金属具有持久性、隐蔽性、难降解性和生物累积性, 其进入农田土壤后, 可在土壤中长期滞留, 并在土壤理化性质、植物种类及环境条件等多重因素共同作用下发生迁移、转化与富集, 进而影响农作物的生长、培育, 从而降低了产量与品质, 并且这种潜在威胁会通过食物链的传递给人体健康带来危害。

国内外针对重金属污染土壤治理的相关研究持续推进, 现已逐步建立起包含物理修复、化学修复、生物修复与复合联合修复在内的多类型土壤修复技术体系, 成为场地重金属管控的主流技术路径。不同修复技术各具特点: 物理修复见效较快, 但成本较高且适用范围有限; 化学修复能够有效降低重金属活性, 但存在持续稳定性和潜在二次风险问题; 生物修复环境友好、应用前景广阔, 但修复周期相对较长, 修复效率受环境条件制约; 联合修复则在一定程度上弥补了单一技术的不足, 是未来农田土壤重金属治理的重要发展方向。

参考文献

- [1] Wang, S., Cai, L., Wen, H., Luo, J., Wang, Q. and Liu, X. (2019) Spatial Distribution and Source Apportionment of Heavy Metals in Soil from a Typical County-Level City of Guangdong Province, China. *Science of The Total Environment*, **655**, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.244>
- [2] 黄卫, 庄荣浩, 刘辉, 等. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022, 45(1): 49-56.
- [3] 杨娇, 葛文静, 闫怡新, 等. 基于文献计量分析的农田土壤镉污染研究热点与进展[J]. 环境工程学报, 2025, 19(6): 1517-1530.
- [4] 郑铭洁, 张爽, 章明奎. 浙江省地质高背景农田的分布与重金属污染特点[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(1): 166-169.
- [5] Li, Z., Liang, Y., Hu, H., et al. (2021) Speciation, Transportation, and Pathways of Cadmium in Soil-Rice Systems: A Review on the Environmental Implications and Remediation Approaches for Food Safety. *Environment International*, **156**, Article 106749. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106749>

- [6] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2822-2833.
- [7] 方陵生. 磷肥过度使用之警示[J]. 世界科学, 2010(11): 6+5.
- [8] Wei, B., Yu, J., Cao, Z., Meng, M., Yang, L. and Chen, Q. (2020) The Availability and Accumulation of Heavy Metals in Greenhouse Soils Associated with Intensive Fertilizer Application. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, Article 5359. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155359>
- [9] Thomas, E.Y., Omuetti, J.A.I. and Ogundayomi, O. (2012) The Effect of Phosphate Fertilizer on Heavy Metal in Soils and *Amaranthus Caudatus*. *Agriculture and Biology Journal of North America*, **3**, 145-149. <https://doi.org/10.5251/abjna.2012.3.4.145.149>
- [10] Zhuang, Z., Mu, H., Fu, P., *et al.* (2020) Accumulation of Potentially Toxic Elements in Agricultural Soil and Scenario Analysis of Cadmium Inputs by Fertilization: A Case Study in Quzhou County. *Journal of Environmental Management*, **269**, Article 110797.
- [11] Satarug, S., Baker, J.R., Urbenjapol, S., Haswell-Elkins, M., Reilly, P.E.B., Williams, D.J., *et al.* (2003) A Global Perspective on Cadmium Pollution and Toxicity in Non-Occupationally Exposed Population. *Toxicology Letters*, **137**, 65-83. [https://doi.org/10.1016/s0378-4274\(02\)00381-8](https://doi.org/10.1016/s0378-4274(02)00381-8)
- [12] 季敏, 黄河清, 杨旭. 含硫酸脲复合肥料中氨挥发氮占总氮的百分率测定方法研究[J]. 肥料与健康, 2020, 47(5): 71-76.
- [13] 刘艳飞. 中国磷矿供需趋势研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [14] 陈欢, 周宏, 孙顶强. 信息传递对农户施药行为及水稻产量的影响——江西省水稻种植户的实证分析[J]. 农业技术经济, 2017(12): 23-31.
- [15] 仲乃琴, 刘宁, 赵盼, 等. 中国马铃薯化肥农药减施的现状与挑战[J]. 科学通报, 2018, 63(17): 1693-1702.
- [16] PPDB (Pesticides Properties Data Base) International Union of Pure and Applied Chemistry, UPAC. 2007. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/atoz.htm>
- [17] Lewis, K.A., Tzilivakis, J., Warner, D.J. and Green, A. (2016) An International Database for Pesticide Risk Assessments and Management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, **22**, 1050-1064. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>
- [18] 苏加强. 甘肃省常规农药产品中 Cr、Pb、Cd、As、Hg 重金属元素分析研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [19] Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J. and Séralini, G.E. (2018) Toxicity of Formulants and Heavy Metals in Glyphosate-Based Herbicides and Other Pesticides. *Toxicology Reports*, **5**, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.12.025>
- [20] Abdallah Alnuwaiser, M. (2019) An Analytical Survey of Trace Heavy Elements in Insecticides. *International Journal of Analytical Chemistry*, **2019**, Article ID: 8150793. <https://doi.org/10.1155/2019/8150793>
- [21] 鲍艳宇, 娄翼来, 颜丽, 等. 不同畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属 Pb Cd Cu Zn 的变化特征及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1820-1826.
- [22] 王飞, 邱凌, 沈玉君, 等. 华北地区饲料和畜禽粪便中重金属质量分数调查分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 261-267.
- [23] 姜萍, 金盛杨, 郝秀珍, 等. 重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 942-947.
- [24] 冯春, 杨光, 杜俊, 等. 污水污泥堆肥重金属总量及形态变化[J]. 环境科学研究, 2008(1): 97-102.
- [25] Kumar, V., Singh, J. and Kumar, P. (2019) Heavy Metals Accumulation in Crop Plants: Sources, Response Mechanisms, Stress Tolerance and Their Effects. In: Kumar, V., Kumar, R., Singh, J., Kumar, P., Ed., *Contaminants in Agriculture and Environment: Health Risks and Remediation*, Agro Environ Media—Agriculture and Environmental Science Academy, 38-57. <https://doi.org/10.26832/aesa-2019-cae-0161-04>
- [26] 郑顺安. 我国典型农田土壤中重金属的转化与迁移特征研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [27] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005(12): 1499-1502.
- [28] 李娜, 夏瑜, 何绪文, 等. 基于 Tessier 法的土壤中不同形态镉的转化及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(6): 1505-1512.
- [29] 黄思宇, 彭晓春, 吴彦瑜, 等. 土壤中重金属形态分析研究进展[J]. 广东化工, 2012, 39(2): 86-87+97.
- [30] 杨凤, 丁克强, 刘廷凤. 土壤重金属化学形态转化影响因素的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(29): 10083-10084+10096.

- [31] 韩张雄, 万的军, 胡建平, 等. 土壤中重金属元素的迁移转化规律及其影响因素[J]. 矿产综合利用, 2017(6): 5-9.
- [32] 曹建锋, 王震, 崔丽君, 等. 土壤重金属污染特点及治理的方法探讨[J]. 世界有色金属, 2022(19): 220-222.
- [33] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 986-996.
- [34] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 63-74.
- [35] 赵云杰, 马智杰, 张晓霞, 等. 土壤-植物系统中重金属迁移性的影响因素及其生物有效性评价方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(3): 177-183.
- [36] 陈慧茹, 董亚玲, 王琦, 等. 重金属污染土壤中 Cd、Cr、Pb 元素向水稻的迁移累积研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(12): 236-241.
- [37] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 449-459.
- [38] 鲍桐, 廉梅花, 孙丽娜, 等. 重金属污染土壤植物修复研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 858-865.
- [39] 连红芳, 苏庆平, 汪模辉, 等. 有害工业区域废址的无害化处理与修复[J]. 环境保护, 2003, 31(4): 20-24.
- [40] Pope, C.J., Peters, W.A. and Howard, J.B. (2000) Thermodynamic Driving Forces for PAH Isomerization and Growth during Thermal Treatment of Polluted Soils. *Journal of Hazardous Materials*, **79**, 189-208. [https://doi.org/10.1016/s0304-3894\(00\)00267-3](https://doi.org/10.1016/s0304-3894(00)00267-3)
- [41] Dermatas, D. and Meng, X. (2003) Utilization of Fly Ash for Stabilization/Solidification of Heavy Metal Contaminated Soils. *Engineering Geology*, **70**, 377-394. [https://doi.org/10.1016/s0013-7952\(03\)00105-4](https://doi.org/10.1016/s0013-7952(03)00105-4)
- [42] Zhang, L., Wang, J., Zou, R., Xie, D., Chen, L., Wang, H., *et al.* (2024) Remediation of Composite Contaminated Soil by Lead, Arsenic, Uranium and Thorium of Radioactive and Heavy Metal Using Chemical Drenching Combined with Passivation. *Water, Air, & Soil Pollution*, **235**, Article No. 599. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07416-7>
- [43] 陈远其, 张煜, 陈国梁. 石灰对土壤重金属污染修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1419-1424.
- [44] 马献发, 李伟彤, 孟庆峰, 等. 生物炭对土壤重金属形态特征及迁移转化影响研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(6): 82-90.
- [45] 伊如汗. 炭石灰对土壤中的 Pb 和 Cd 的化学固定修复[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [46] 王庆仁, 崔岩山, 董艺婷. 植物修复——重金属污染土壤整治有效途径[J]. 生态学报, 2001, 21(2): 326-331.
- [47] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [48] Wang, L., Yang, D., Chen, R., Ma, F. and Wang, G. (2022) How a Functional Soil Animal-Earthworm Affect Arbuscular Mycorrhizae-Assisted Phytoremediation in Metals Contaminated Soil? *Journal of Hazardous Materials*, **435**, Article 128991. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128991>
- [49] 袁金蕊, 郭富睿, 邹冬生, 等. 镉对土壤微生物的影响及微生物修复镉污染研究进展[J]. 湖南农业科学, 2018(3): 114-117+122.
- [50] Mishra, G.K. (2017) Microbes in Heavy Metal Remediation: A Review on Current Trends and Patents. *Recent Patents on Biotechnology*, **11**, 188-196. <https://doi.org/10.2174/1872208311666170120121025>
- [51] 张军, 蔺亚青, 胡方洁, 等. 土壤重金属污染联合修复技术研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(5): 1038-1042+1047.
- [52] Chen, H.M., Zheng, C.R., Tu, C. and Shen, Z.G. (2000) Chemical Methods and Phytoremediation of Soil Contaminated with Heavy Metals. *Chemosphere*, **41**, 229-234. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(99\)00415-4](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(99)00415-4)