

土壤重金属污染风险管控与修复路径

范思琪

邵阳学院, 湖南邵阳 422000

[摘要] 土壤重金属具有隐蔽性、累积性和难降解性, 能够经农产品和地下水进入人体。当前治理中仍存在污染源识别不准、风险评价与土地用途衔接不足、修复技术适配性不强及长期监测缺位等问题。土壤重金属治理应由污染浓度控制转向环境与健康风险控制, 通过源头阻断、分类管理、安全利用和联合修复构建全过程治理体系, 并依据土地用途、污染程度和重金属形态选择差异化路径。

[关键词] 土壤污染; 重金属; 风险管控; 安全利用; 土壤修复

DOI: 10.64635/ja.2026.1413

中图分类号: X53

文献标识码: A

Risk Control and Remediation Pathways for Soil Heavy Metal Pollution

Fan Siqi

Shaoyang University, Shaoyang 422000, Hunan, China

Abstract: Soil heavy metals are characterized by concealment, accumulation, and difficulty in degradation, and they can enter the human body through agricultural products and groundwater. Current governance still faces problems such as inaccurate identification of pollution sources, insufficient connection between risk assessment and land use, weak adaptability of remediation technologies, and the absence of long-term monitoring. Soil heavy metal governance should shift from pollution concentration control to environmental and health risk control. A whole-process governance system should be established through source blocking, classified management, safe utilization, and combined remediation, while differentiated pathways should be selected according to land use, pollution degree, and the forms of heavy metals.

Keywords: soil pollution; heavy metals; risk control; safe utilization; soil remediation

引言

土壤重金属污染是镉、汞、砷、铅、铬、铜、锌和镍等元素在土壤中持续累积, 并对农产品质量、生态系统或人体健康形成不利影响的环境问题。重金属进入土壤后难以通过自然降解彻底消除, 还会受到土壤酸碱度、有机质、氧化还原条件和黏土矿物组成影响, 在不同化学形态之间发生转化。土壤中重金属总量较高, 并不必然对应同等程度的现实危害, 其迁移能力、生物有效性、土地用途和暴露途径共同决定风险水平。

原环境保护部、原国土资源部 2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 全国土壤点位总超标率为 16.1%, 耕地土壤点位超标率为 19.4%, 无机污染物超标点位占全部超标点位的 82.8%^[1]。该数据来源于 2005 年 4 月至 2013 年 12 月开展的首次全国土壤污染状况调查, 属于特定调查时期、采样范围和评价标准下的历史基线, 不能直接作为当前全国土壤污染比例。调查结果仍能反映重金属污染在土壤环境治理中的突出地位。

土壤重金属治理早期多以降低土壤污染物总量为

目标, 实践中逐渐转向风险管控、安全利用与修复治理相结合。该变化意味着治理成效不能只看土壤浓度下降, 还要考察污染源有无得到控制、农产品能否达到质量安全要求、暴露途径能否被阻断以及土地功能能否稳定维持。建立覆盖污染识别、风险评价、分类管理、技术修复和长期监测的治理体系, 是提高土壤污染防治效能的关键。

1 土壤重金属污染的形成及风险传导

1.1 污染来源与空间累积特征

土壤重金属来源可分为自然来源和人为来源。自然来源包括成土母质风化、火山活动和含矿岩石释放, 部分矿产资源集中区具有较高的土壤重金属背景值。人为来源包括矿山开采与冶炼、工业废气沉降、污水灌溉、固体废物堆存、交通排放以及含重金属肥料和农药的长期使用。

工业和矿业污染通常呈现点源扩散特征。采矿废石、尾矿和冶炼烟尘中的重金属可经地表径流、大气沉降和渗滤液进入周边土壤。农业投入造成的污染具有分散性和累积性, 短期内不易观察, 经过多年施用后可能在耕层逐渐富集。污染源不同, 治理重点也

存在差异。工矿污染侧重切断排放通道和处理污染介质，农业投入型污染则需要控制肥料、农药、有机肥及灌溉水质量。

全国土壤污染状况调查公布的八种无机污染物点位超标情况见表 1。

表 1 全国土壤污染状况调查中无机污染物点位超标情况

污染物	点位超标率 (%)	轻微污染点位比例 (%)	轻度污染点位比例 (%)	中度及重度污染点位比例 (%)
镉	7.0	5.2	0.8	1.0
汞	1.6	1.2	0.2	0.2
砷	2.7	2.0	0.4	0.3
铜	2.1	1.6	0.3	0.2
铅	1.5	1.1	0.2	0.2
铬	1.1	0.9	0.15	0.05
锌	0.9	0.75	0.08	0.07
镍	4.8	3.9	0.5	0.4

表 1 显示，镉的点位超标率在八种无机污染物中最高，镍、砷和铜也具有较高的点位超标率。不同元素的毒性、迁移性和作物吸收规律并不一致，超标率不能直接等同于人体健康风险大小。具体地块仍需结合土壤性质、农产品检测结果和暴露情景开展评价。

1.2 土壤—作物—人体风险传导

重金属污染风险主要通过农产品摄入、地下水迁移、扬尘吸入和皮肤接触等途径传导。农用地中，农作物吸收是连接土壤污染与食品安全的重要环节。部分重金属可以在植物根系、茎叶和籽粒中富集，进入食物链后形成长期暴露风险。

重金属的生物有效性受到土壤环境影响。酸性条件下，镉、铅和锌等元素的活性通常较高，作物吸收风险相应增加。土壤有机质、铁锰氧化物和黏土矿物能够吸附或固定部分重金属。稻田淹水形成的还原环境也会改变镉、砷等元素的形态，降低一种元素有效性的管理措施可能提高另一种元素的活性。

作物种类和品种之间同样存在明显差异。同一污染地块种植不同作物，农产品可食部分的重金属含量可能不同。风险评价不能只依据土壤总量，还需要同步检测土壤有效态、作物可食部分及灌溉水，并结合人群摄入量分析实际暴露水平。

2 土壤重金属污染风险管控面临的现实问题

2.1 污染识别与风险判定衔接不足

土壤污染调查通常以网格采样和实验室检测为基础。重金属污染具有明显的空间异质性，单一采样密度可能遗漏局部污染热点，也可能因异常点放大区域风险。矿山、冶炼厂、污灌区和固体废物堆场周边还需要结合生产历史、地形水文和污染迁移方向布设点位。

现行《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》设置了风险筛选值与风险管制值^[2]。筛选值用于识别可能存在的风险，超过筛选值并不等同于农产品必然超标。土壤污染物含量处于筛选值与管制值之间时，需要结合农产品质量监测和其他调查结果采取安全利用措施。超过管制值的地块风险较高，通常纳入严格管控范围。

部分治理项目把筛选值直接当作修复目标，忽视土地用途、背景值及污染物形态。部分地区又过度依赖农产品一次检测结果，缺少对土壤环境变化和污染来源的持续观察。风险判定与分类管理衔接不紧，容易造成过度修复或管控不足。

2.2 修复技术适用边界不清

土壤重金属修复技术包括客土换土、土壤淋洗、化学钝化、植物提取、微生物修复、农艺调控和种植结构调整等。不同技术在处理周期、成本、土地扰动和适用污染程度方面差异较大。

客土换土和土壤淋洗能够较快降低污染物总量，但工程量大、成本高，还会产生需要处理的污染土壤或废液。化学钝化通过吸附、沉淀和离子交换降低重金属有效性，适合面积较大的轻中度污染农田，但通常不能降低重金属总量，钝化效果还可能随土壤环境改变而减弱。植物提取具有扰动小、环境友好的特点，修复周期较长，污染植物的收割与处置也需要纳入管理。

余琼阳等指出，农田重金属污染安全利用主要通过降低土壤重金属生物有效性、减少作物吸收和阻断重金属进入食物链实现^[3]。单一技术难以同时满足土壤安全、农产品达标、作物稳产和成本可控等目标。若缺少前期小区试验和技术筛选，实验室效果不一定能够稳定转化为田间治理效果。

2.3 治理过程与修复效果监管薄弱

部分土壤修复项目较为重视竣工时的污染物检测，对修复材料来源、施工均匀程度、二次污染和长期稳定性关注不足。钝化剂过量施用可能改变土壤酸

碱度和养分平衡,淋洗修复产生的废水若处理不规范,污染物可能转移至其他环境介质。

农用地修复还需要兼顾作物产量和土壤肥力。某项措施虽然降低农产品重金属含量,却可能影响产量、品质或土壤微生物群落。仅以一个生产季的农产品达标情况评价修复效果,难以判断多年种植后的稳定性。

治理责任分散也会影响长效管理。生态环境、农业农村、自然资源和地方政府分别承担污染源监管、农产品质量、土地用途及项目实施等职责。监测数据缺少共享时,土壤风险、农产品质量和土地利用之间难以形成完整证据链。

3 土壤重金属污染风险管控机制

3.1 污染源头预防与全过程阻断

源头预防是降低土壤重金属累积速度的基础。涉重金属企业需要加强废水、废气、固体废物和尾矿库管理,防止污染物经沉降、渗漏和径流进入周边土壤。关停搬迁企业原址应开展土壤污染调查,避免污染地块未经评价直接改变用途。

农业生产环节可加强灌溉水、肥料、有机肥、农药和农膜质量控制。畜禽粪便、污泥及其他固体废物用于农田前,需要检测重金属含量并控制施用强度。长期施肥地区可建立土壤重金属投入与作物带出量核算,识别累积趋势。

污染传播通道同样需要阻断。矿区可完善雨污分流、废石覆盖和尾矿防渗设施,污染河道及灌溉渠道应同步治理。只修复受污染土壤而不控制持续排放,治理后的地块仍可能再次受到污染。

3.2 分类管理与分级管控

农用地风险管理可按照优先保护、安全利用和严格管控三类实施。未超过风险筛选值的地块以保护为主,重点控制新增污染并开展周期性监测。超过筛选值但未超过管制值的地块可结合农产品检测结果,采取低积累品种、土壤调理、水肥管理和种植结构调整等安全利用措施。

超过风险管制值且农产品超标风险较高的地块,应限制食用农产品种植。部分地块可调整为非食用农产品、能源作物或修复植物种植,风险较高且缺少安全利用条件的地块可采取休耕、退耕或用途管制。建设用地则依据居住、公共管理、商业或工业用途设置不同暴露情景和管控要求。

分类结果需要动态调整。污染源得到控制、修复措施稳定发挥作用且连续监测达到管理目标的地块,

可重新评价风险等级。农产品连续超标或重金属活性上升的地块,则需要提高管控强度。

4 土壤重金属污染修复实施路径

4.1 优化调查监测与风险评估

污染地块调查应形成“历史溯源—现场踏勘—布点采样—实验检测—风险评价”的工作链条。除重金属总量外,可根据污染特征检测有效态含量、土壤 pH 值、有机质、阳离子交换量和氧化还原状况。农用地还需要同步采集农产品与灌溉水样品。

污染评价可结合单项污染指数、综合污染指数、潜在生态风险和健康风险模型,但模型参数必须与当地土地用途和人群特征相匹配。地质背景值较高区域需要区分自然来源与人为污染贡献,防止将自然高背景简单认定为企业排放。

遥感、地理信息系统和在线监测可以辅助识别污染分布,但不能完全替代现场采样。建立统一的地块编码和空间数据库,有利于关联污染源、土壤监测、农产品检测、修复工程及土地利用信息。

4.2 推进安全利用与联合修复

轻中度污染农用地可优先采用安全利用技术。孙丽娟等认为,低积累品种、化学钝化、农艺调控和生物修复联合应用,有助于在维持农业生产的同时降低镉进入作物可食部分的风险^[4]。品种选择需要经过当地田间试验,避免将单一区域筛选出的低积累品种直接推广到不同土壤条件。

土壤钝化材料可选择石灰、磷酸盐、黏土矿物、生物炭和含铁锰材料。材料选择应根据污染物种类和土壤性质确定。酸性镉污染土壤可通过适度提高 pH 值降低镉有效性,砷污染土壤则需关注 pH 变化及磷砷竞争可能带来的迁移风险。

中重度污染或污染热点可采用植物提取、土壤淋洗和局部换土。植物提取适合污染浓度较低、面积较大且治理周期允许的地块。淋洗和换土适用于范围较小、污染程度较高的地块。污染土、淋洗液和富集重金属的植物残体均需规范处置,防止污染转移。

联合修复可根据治理阶段配置技术。前期通过工程措施处理高浓度污染热点,中期采用钝化和低积累品种保障安全生产,后期利用植物和微生物逐步降低活性污染负荷。多技术组合需要经过成本、环境影响和长期稳定性比较。

4.3 健全长期监管和保障体系

土壤重金属修复效果评价应覆盖环境质量、农产品安全、土地功能和生态影响。核心指标包括土壤重

金属总量与有效态、农产品可食部分含量、土壤肥力、作物产量、地下水质量及修复材料稳定性。钝化类项目还需设置多年监测期,观察重金属再活化情况。

治理资金可按照污染责任、公共投入和受益分担相结合的方式筹集。责任主体明确的工业污染地块由污染责任人承担调查、修复和监测费用。历史遗留污染及责任主体灭失的地块,可由财政资金、专项基金和社会资本共同支持。

第三方调查、检测和效果评估机构需要保持独立,采样记录、检测报告和修复过程资料应完整留存。地方政府可以建立土壤污染风险清单,对重点地块实施定期复查,并向相关经营主体和居民公开必要的风险信息。

5 结语

土壤重金属污染治理的核心是控制污染物在环境与人体之间的风险传导。土壤污染物浓度、化学形态、土地用途、作物吸收和人群暴露共同决定治理方案。单纯追求土壤总量下降,容易忽略污染源控制、农产品安全与土地功能维持。

完善治理路径需要将源头预防置于首位,以调查

监测和风险评价为基础,对不同土地用途和污染程度实施分类管理。轻中度污染农用地侧重安全利用和生物有效性调控,重度污染及局部热点采用工程修复、用途限制与生态修复。全过程监管、长期监测和多部门数据协同逐步完善后,土壤重金属治理才能由一次性工程转向持续风险管理,实现土壤安全、农产品安全与土地可持续利用的统一。

【参考文献】

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R].北京,2014.
- [2] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB15618—2018[S].北京:中国环境出版集团,2018.
- [3] 余琼阳,李婉怡,张宁,等.农田土壤重金属污染现状与安全利用技术研究进展[J].土壤,2024,56(2):229-241.
- [4] 孙丽娟,秦秦,宋科,等.镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J].生态环境学报,2018,27(7):1377-1386.