

土壤重金属污染：环境风险与治理策略

张雨婷, 齐欣宇*

(北京建筑大学, 北京 102616)

摘要: 土壤重金属污染已经成为全球性的环境问题, 它不仅威胁土壤质量, 还影响农作物正常生长, 进而对人类身体健康构成潜在危险。本文探讨了重金属污染的定义、种类及其来源, 分析了这些重金属污染物对土壤环境和人体健康可能产生的影响。同时, 全面地梳理了当前的防治与修复策略, 包括物理、化学、生物修复及农业管理措施, 强调综合应用的重要性。土壤重金属污染的检测与治理需综合运用多种技术手段, 并不断探索和开发新技术, 以应对日益严峻的环境挑战。

关键词: 土壤重金属污染; 环境风险; 治理策略; 检测方法

0 引言

当前, 土壤重金属污染已成为全球范围内的环境问题, 其影响广泛深远^[1-2]。重金属, 如铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)和砷(As)等, 因其不易降解和生物累积性, 对生态系统造成长期威胁。随着工业化和城市化的快速发展, 土壤重金属污染问题愈发严重, 不仅影响农业生产, 降低作物产量和品质, 还通过“土壤-作物-人体”链式传递引发神经损伤、器官病变及存在致癌风险。这一问题在发展中国家尤其突出, 已成为加强生态环境保护亟待解决的关键一环。

考虑土壤重金属污染的严重性, 本综述旨在全面评估其风险、治理策略和检测方法。本文将探讨土壤重金属污染的主要来源和分布特征, 以及它们如何影响环境和人类健康, 并详细介绍土壤重金属的检测技术。通过这一综述, 本文期望为政策制定者、科研人员和公众提供科学依据, 便于更有效地管理和减轻土壤重金属污染的风险。

1 土壤重金属污染的来源与分布

1.1 工业活动对土壤重金属污染的影响

工业活动是土壤重金属污染的关键源头^[3]。冶金、电镀等行业排放的重金属污染物(如Pb、Cd、Cr), 通过废气颗粒沉降和废水渗透进入土壤。典型工业区周边土壤重金属含量可达自然值的数十倍, 其中易被植物吸收的活性形态占比超过30%, 显著增加了食物链累积风险。同时, 这些区域居民慢性病发病率与土壤污染程度呈现显著关联。

1.2 化肥和农药使用对土壤重金属含量的影响

在农业活动中, 化肥和农药的广泛使用也是土壤重金属污染的重要途径^[4]。部分化肥中含有重金属元素, 如磷肥中的镉含量较高, 长期施用会导致土壤中镉的积累。此外, 一些农药含有重金属, 如含有汞或砷的杀虫剂, 它们的使用增加了土壤中重金属的含量。随着现代农业生产对化肥和农药依赖性的增加, 土壤重金属污染的风险也随之上升^[5]。这种污染不仅影响土壤质量和作物生长, 还可通过食物链对人类健康造成威胁。

1.3 交通运输对土壤重金属污染的影响

交通运输构成土壤重金属污染的重要移动源, 其污染特征呈现沿交通干线梯度扩散模式。柴油车尾气颗粒物与刹车片磨损产生的Cu-Zn合金粉尘, 通过气载迁移-径流输移耦合作用形成带状污染区。这类污染可通过空气扬尘直接进入人体, 形成“道路-土壤-人体”的快速暴露通道。

1.4 其他途径

土壤重金属污染还涉及废弃物处置与地质背景双重因素。垃圾填埋渗滤液和焚烧飞灰持续释放重金属。虽然地质源重金属生物有效性通常低于人为污染源, 但其与人为污染的叠加效应可使生态风险指数提升1.7倍。

2 土壤重金属污染的环境与健康风险

2.1 重金属对土壤微生物和植物生长的影响

土壤重金属污染形成“毒性级联效应”: 在植物系统中, Cd等重金属诱发活性氧爆发, 破坏叶绿体镁离子转

第一作者: 张雨婷, 研究方向为给排水科学与工程专业。

* 通信作者: 齐欣宇, 硕士, 讲师, 研究方向为环境工程。E-mail: qixinyu@bucea.edu.cn

运通道, 导致小麦光合效率下降 41%。微生物群落则呈现功能基因偏移, 固氮菌丰度降低至污染前 23%, 氮循环关键酶(脲酶、脱氢酶)活性衰减 57%~82%。生态链层面, 蚯蚓体内金属硫蛋白表达量异常升高 4.2 倍, 其生物扰动功能丧失引发土壤孔隙度下降 29%, 形成“污染-生物退化”恶性循环。土壤酶活性, 作为反映土壤肥力的一个敏感性生物指标, 也易受重金属污染的影响, 从而影响土壤的生物化学过程。

2.2 重金属通过食物链对人类健康的潜在危害

土壤中的重金属通过食物链对人体健康构成严重威胁。重金属如 Cd、Pb、Cr、Ni 和 Hg 等能够通过食物链累积在人体中, 引发多种健康问题^[6-7]。例如, 过量的 Cd 摄入会引起骨矿密度降低和骨折发生概率增加, 而 Pb 能导致生殖功能下降、机体免疫力降低、头晕、头疼、记忆力减退和腹痛等症状。长期食用含 Cr 的食物, 人体会出现不同程度的皮肤和呼吸道系统病变, 并且出现溃疡和炎症。

3 土壤重金属污染的治理策略

3.1 法规与政策

加强环境法规 and 政策的制定与执行是强化污染治理的首要条件。按照“三个坚持”原则^[8], 从源头预防、源头减量、源头治理三方面发力, 协同治理、降本增效。此外, 还需严格落实污染防治措施^[9], 解决长期积累的严重污染问题, 健全体制机制。

3.2 源头控制

源头控制是减少土壤重金属污染的关键。在工业领域, 可以通过强化土壤污染重点监管单位和化工园区环境管理^[9], 排查整治管网泄漏、严控涉重金属污染排放、加强固废环境管理和综合利用, 协同水、气、固体废物等多要素污染防治。在农业方面, 推动农药化肥减量增效和盐碱地生态环境保护, 以及采取“以地适种”安全利用等措施加强黑土地保护。

3.3 土壤修复技术

土壤修复技术是治理土壤重金属污染的重要手段^[10-11], 包括物理修复、化学修复和生物修复。①物理修复技术: 包括换土与深耕、固化法、电动力法和热脱附法^[12-13]。换土与深耕通过将受污染土壤与未被污染土壤混合或翻挖深层未污染土壤至表层, 以减少重金属含量^[14-15]。固化法通过添加稳定剂、固化剂固化重金属, 但需注意二次污染问题。电动力法利用电流使土壤中的重金属移动到电极两端, 达到去除重金属离子的目的。热脱附法适用于易挥发的重金属污染土壤的修复, 通过高温使土壤中重金属离子

以蒸汽形式挥发。②化学修复技术: 包括淋洗法和玻璃化法。淋洗法通过注入溶剂使重金属转化成液态形式, 以便液相提取分离。玻璃化法在高温、高压环境下熔化土壤中重金属, 将其包裹在玻璃体中, 从而清除重金属。③生物修复技术: 包括动物修复、植物修复和微生物修复^[14]。动物修复利用动物吸收土壤中的重金属污染物。植物修复通过植物吸收土壤中有害的重金属元素^[15-17], 达到净化土壤的目的。微生物修复利用微生物新陈代谢的特点降低土壤中重金属污染物的毒性。植物修复技术, 特别是超积累植物^[18]的使用, 已被广泛研究。该技术在不损害土壤结构及肥力的条件下, 能够恢复污染土壤生态功能。此外, 微生物修复技术因其成本低廉和环境友好特点而得到广泛应用。微生物修复技术涉及利用细菌、真菌、藻类等微生物对重金属进行吸收与转化^[5]。

4 土壤重金属污染的检测技术

4.1 光谱分析法

光学分析法, 以其非破坏性、高灵敏度和选择性好等优点, 在土壤重金属检测中发挥着重要作用。紫外-可见与荧光光谱法基于光吸收或荧光发射原理, 紫外-可见分光光度法(UV-Vis)操作简便但易受背景干扰, 荧光光谱法灵敏度较高但依赖稳定探针材料。X射线荧光光谱法(XRF)通过特征 X 射线实现多元素同步检测, 适用于野外快速筛查, 但检测精度受样品湿度、粒度等基质效应影响。拉曼与红外光谱法通过分子振动或转动能级跃迁提供结构信息, 常作为辅助验证手段补充其他检测结果。

4.2 电化学检测技术

电化学分析法基于电极反应原理, 通过测量电流、电压或电导等电化学参数, 实现对重金属离子的定量分析。阳极溶出伏安法(ASV)基于电流峰信号实现痕量重金属检测, 具备成本低、响应快的优势, 但易受电极材料、溶液组成和温度等因素的影响, 导致检测结果的不稳定性。电化学阻抗谱(EIS)通过阻抗变化解析重金属吸附与氧化还原过程, 在复杂土壤样品中的应用需进一步优化抗干扰能力。

4.3 高精度联用技术

色谱与质谱联用技术结合了色谱的分离能力和质谱的高灵敏度^[18-20], 成为土壤重金属检测的重要手段。高效液相色谱(HPLC)与电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)联用技术, 通过色谱柱将重金属离子分离后, 利用 ICP-MS 测量离子的质荷比和丰度, 实现高灵敏度和高选择性的定量分析。该方法具有分辨率高、检出限低、线性范围宽等优点, 但设备昂贵、操作复杂, 且对于某些挥发性重金属化合物可能需要特殊的样品处理技术, 限制了其在现场快速

检测中的应用。

4.4 生物与现场快速检测技术

生物传感器技术将生物信号转换为可测量的电信号或光信号^[20]实现重金属实时监测。生物检测方法的研究虽处于初级阶段,但其优异的选择性、在线监测连续性、响应快速和灵敏度高优点,为重金属离子的实时监测提供了新的手段。生物识别元件的稳定性与重现性是制约其实际应用的核心问题。常见的便携式现场检测设备集成电化学分析仪或XRF光谱仪等小型化设备,通过简化操作流程、缩小设备体积和提高检测速度,实现土壤重金属污染的快速筛查和实时监测,推动采样-分析一体化流程。虽然该技术具有众多优点,但其面对复杂基质干扰对检测可靠性的影响仍存在挑战。

5 结论与展望

本文综述了土壤重金属污染的来源、环境与健康风险、治理策略以及检测技术。研究涉及环境、健康、经济和社会等多个领域,有效的监测和管理策略对于控制和减少土壤重金属污染至关重要。其中,化学分析方法在土壤重金属检测中起核心作用,其应用对于水质和土壤污染的控制与管理具有重要意义。目前,提高分析技术的灵敏度和选择性、降低成本、提高修复技术的效率和环境兼容性仍是在化学分析和污染治理领域所面临的挑战。同时,随着纳米技术、生物技术和信息技术的发展,考虑到土壤重金属污染包含化学、环境和工程等多方面的综合因素,我们可以通过开发新型材料和方法,更有效地解决土壤重金属污染问题。未来,此方面研究应聚焦通过技术创新研发、政策体系优化与跨学科协同创新的三维驱动,构建土壤重金属污染靶向治理新范,以实现土壤重金属污染的有效管理和控制。

参考文献

- [1] SHI J, ZHAO D, REN F, *et al.* Spatiotemporal variation of soil heavy metals in China: The pollution status and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 871: 161768.
- [2] HU B, SHAO S, NI H, *et al.* Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 114961.
- [3] ZHANG Q, WANG C. Natural and human factors affect the

- distribution of soil heavy metal pollution: A review [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2020, 231: 1-13.
- [4] MAI X, TANG J, TANG J, *et al.* Research progress on the environmental risk assessment and remediation technologies of heavy metal pollution in agricultural soil [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 149: 1-20.
- [5] 付修治. 土壤重金属污染治理与修复策略思考 [J]. *皮革制作与环保科技*, 2024, 5(15): 109-111.
- [6] 李广云, 曹永富, 赵书民, 等. 土壤重金属危害及修复措施 [J]. *山东林业科技*, 2011, 41(6): 96-101.
- [7] 寇志安, 张婉霞, 张梓坤, 等. 微生物技术在土壤重金属污染修复中的应用研究进展 [J]. *世界生态学*, 2023, 12(2): 138-145.
- [8] 土壤污染源头防控行动计划 [J]. *环境影响评价*, 2024, 46(6): 101.
- [9] 土壤污染源头防控行动计划发布促进土壤健康和永续利用 [J]. *化工管理*, 2024, (34): 6.
- [10] 欧莉莎. 土壤有机磷农药污染及其修复方法研究进展 [J]. *乡村科技*, 2022, 13(23): 156-158.
- [11] 程木峰, 孙博. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践研究 [J]. *资源节约与环保*, 2023, (3): 49-52.
- [12] 吴才鑫, 赵宾, 陆奕茗, 等. 典型喀斯特区域土壤重金属污染特征、风险与修复研究进展 [J]. *地球与环境*, 2023, 51(5): 549-563.
- [13] 刘甜甜, 陈剑雄, 陈晨, 等. 固定/稳定化土壤修复技术的应用与优化分析 [J]. *土壤*, 2014, 46(3): 407-412.
- [14] 倪才英, 陈英旭, 骆永明. 土壤-植物系统铜污染与修复的研究进展 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2003, (3): 3-9.
- [15] 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.
- [16] 石平. 辽宁省典型有色金属矿区土壤重金属污染评价及植物修复研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [17] 靳前. 改性玉米秸秆生物炭对黑土与泥炭土性质及重金属镉铅形态分布的影响 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [18] 刘珊珊, 柯玮, 范子彦, 等. 食品接触材料中光引发剂残留及其迁移规律研究进展 [J]. *中国食品卫生杂志*, 2014, 26(5): 507-514.
- [19] 陈少华, 王义华, 胡强飞, 等. 电化学修饰电极在检测Cr(VI)中的研究进展 [J]. *化工进展*, 2023, 42(5): 2429-2438.
- [20] 余涛, 蒋天宇, 刘旭, 等. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展 [J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 460-476.