

固废堆存场地重金属污染特征及风险评价

其木格

乌兰察布市生态环境局凉城县分局 内蒙古 乌兰察布 013750

摘要：固废堆存过程中重金属易通过迁移转化进入土壤、水体与大气，引发环境污染，威胁生态系统安全与人体健康，开展污染特征分析与风险评价是防控污染的关键。本文概述固废分类、堆存方式及重金属来源，阐述重金属基本特性与迁移转化机制，构建风险评价标准与体系，从生态、健康两个维度开展风险评价并分析结果，提出针对性防控、修复措施及长期管控方案。研究表明，固废堆存场地重金属污染呈现明显空间差异，不同重金属风险等级不同，科学的风险评价与防控修复可有效降低污染危害，为固废堆存场地重金属污染治理提供理论与实践支撑。

关键词：固废堆存场地；重金属污染；污染特征；风险评价

引言：随着工业快速发展与城市化进程加快，各类固体废弃物排放量大幅增加，堆存场地数量与规模持续扩大。固废中含有的铅、镉、铬等重金属，易通过淋溶、挥发等方式迁移扩散，污染周边土壤与水体，长期累积还会通过食物链危害人体健康，成为亟待解决的生态环境问题。当前，固废堆存场地重金属污染底数不清、风险不明、防控不到位等问题突出，亟需系统分析污染特征、开展风险评价，提出科学防控修复措施。本文围绕固废堆存场地重金属污染展开研究，为污染治理与风险管控提供支撑。

1 固废堆存场地相关概述

1.1 固废分类与堆存方式

固体废弃物种类繁多，按来源可分为工业固废、生活垃圾、农业固废与危险废物四大类，不同类型固废重金属含量与种类差异显著。工业固废（如冶炼废渣、煤矸石）重金属含量最高，常含有铅、镉、铬、汞等有毒有害物质；生活垃圾中含有的废旧电池、电子产品等也会携带重金属；农业固废与危险废物因来源特殊，部分类型也会富集特定重金属。固废堆存方式主要分为露天堆存、填埋堆存、封闭堆存三种，露天堆存易受降雨、风力影响，重金属迁移扩散风险最高；填埋堆存虽有一定防护措施，但仍存在渗漏风险；封闭堆存防护效果最好，可有效减少重金属迁移，但建设与运营成本较高，适用于危险废物等高危固废堆存。

1.2 固废堆存场地重金属来源

固废堆存场地重金属主要来源于固废本身及外部输入，其中固废自身携带是核心来源。工业固废是重金属的主要载体，冶炼、采矿、化工等行业产生的废渣中，重金属作为伴生成分被带入堆存场地；生活垃圾中的废旧家电、电池、涂料等，会释放铅、汞、镉等重金属；农业固废

中，农药、化肥残留的重金属会随废弃物堆存进入场地。外部输入来源主要包括大气沉降与地表径流，周边工业企业排放的含重金属废气，经大气沉降落到堆存场地；降雨形成的地表径流会冲刷周边污染区域，将重金属带入固废堆存场地，进一步加剧污染程度^[1]。另外，堆存过程中固废自身分解也会促使重金属释放，增加污染扩散风险。

2 重金属污染相关理论

2.1 重金属基本特性

重金属是指密度大于 4.5g/cm^3 的金属元素，固废堆存场地中常见的污染重金属包括铅、镉、铬、汞、砷、铜、锌等，其核心特性决定了污染的严重性与难治理性，也是区别于其他污染物的关键特征。重金属具有强毒性，即使在低浓度下，也会对生态系统与人体健康造成不可逆危害，其中镉、汞、砷等属于剧毒重金属，长期接触或摄入会引发人体慢性中毒，损伤肝、肾、神经系统等关键器官，甚至诱发癌症，对儿童生长发育与人体生殖系统的危害更为显著。重金属具有难降解性，进入土壤、水体等环境后，无法被微生物分解代谢，会长期在环境介质中累积，形成持久污染，其污染影响可延续数十年甚至上百年。另外，重金属具有显著的迁移性与生物富集性，可通过雨水淋溶、大气挥发、生物吸收等多种方式在固废、土壤、地下水、大气等不同环境介质中迁移扩散，且能通过食物链逐级富集，从植物、小型无脊椎动物向高等动物及人体传递，浓度逐级放大，最终严重危害人体健康，同时其迁移与富集能力受pH值、温度、土壤质地、有机质含量等环境因素影响显著，酸性环境下重金属更易以离子态存在，迁移性与毒性显著提升。

2.2 固废堆存场地重金属迁移转化机制

固废堆存场地重金属的迁移转化主要发生在固废-土

壤-水体-大气体系中,分为迁移过程与转化过程,两者相互关联、相互影响。迁移过程主要包括淋溶迁移、挥发迁移、生物迁移与地表径流迁移:降雨或渗滤液淋溶固废,使重金属溶解进入土壤与地下水,实现淋溶迁移;汞、砷等易挥发重金属,通过固废表面挥发进入大气,形成大气迁移;植物根系吸收土壤中的重金属,通过食物链传递实现生物迁移;地表径流冲刷堆存场地,携带重金属进入周边水体,完成地表径流迁移。转化过程主要包括氧化还原转化、络合螯合转化与沉淀溶解转化,重金属在环境中通过氧化还原反应改变价态,影响其毒性与迁移能力;与土壤中的有机物、无机物形成络合物或螯合物,改变其形态;通过沉淀反应形成难溶性化合物,降低迁移性,或通过溶解反应释放到环境中,加剧污染^[2]。

3 固废堆存场地重金属污染风险评价

3.1 评价标准与评价体系构建

固废堆存场地重金属污染风险评价需遵循科学性、系统性、实用性原则,结合场地实际构建完善的评价体系。评价标准以国家现行相关规范为依据,土壤重金属评价采用《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》,地下水评价采用《地下水质量标准》,大气评价采用《环境空气质量标准》,明确不同用地类型、不同重金属的筛选值与管制值。评价体系涵盖评价单元划分、污染物识别、暴露途径分析、风险计算、风险分级五个环节:首先根据场地地形、固废类型、污染分布划分评价单元;其次识别场地内主要重金属污染物及来源;分析重金属通过土壤、水体、大气、食物链等暴露途径;采用相应评价模型计算风险值;根据风险值划分低、中、高三个风险等级,为后续风险管控提供依据。

3.2 重金属生态风险评价

重金属生态风险评价聚焦于污染对生态系统的危害,核心是评价重金属对土壤微生物、植物、土壤动物及周边水体生物的影响,采用潜在生态风险指数法开展评价。该方法结合重金属的毒性系数与污染指数,计算潜在生态风险指数,根据指数大小划分风险等级。评价过程中,首先检测土壤、水体中各重金属含量,计算单因子污染指数与综合污染指数,判断污染程度;其次结合各重金属的毒性系数,计算单因子潜在生态风险指数与综合潜在生态风险指数;最后根据综合指数,将生态风险划分为低风险、中风险、高风险三个等级,明确不同区域、不同重金属的生态危害程度,为生态保护提供针对性依据。

3.3 重金属健康风险评价

重金属健康风险评价主要评价重金属通过不同暴露

途径对人体健康造成的潜在危害,分为致癌风险与非致癌风险两类,采用暴露评估-效应评估-风险表征的流程开展。暴露评估明确人体通过皮肤接触、口腔摄入、呼吸吸入三种主要途径接触重金属的剂量;效应评估结合重金属的毒性参数,确定参考剂量与致癌斜率因子;风险表征通过计算非致癌风险商与致癌风险值,判断健康风险等级。非致癌风险商小于1时,表明无明显非致癌风险;大于等于1时,存在非致癌风险。致癌风险值小于 10^{-6} 时,致癌风险可忽略;介于 10^{-6} 与 10^{-4} 之间时,存在可接受致癌风险;大于 10^{-4} 时,存在较高致癌风险。

3.4 风险评价结果分析与讨论

结合评价标准与评价体系,固废堆存场地重金属污染风险评价结果呈现明显的空间差异与重金属差异。从空间分布来看,堆存场地中心区域重金属含量最高,风险等级以中、高风险为主,主要由于固废集中堆存、重金属累积量大;场地周边区域重金属含量随距离增加逐渐降低,风险等级以低、中风险为主,污染主要来源于中心区域的迁移扩散。从重金属种类来看,镉、汞、砷等剧毒重金属的风险等级普遍较高,主要因其毒性强、富集性强,易对生态系统与人体健康造成危害;铜、锌等重金属风险等级相对较低,但其含量过高时也会产生一定危害^[3]。此外,不同堆存方式与固废类型对风险等级影响显著,露天堆存场地风险高于封闭堆存场地,工业固废堆存场地风险高于生活垃圾堆存场地,需针对不同情况制定差异化管控措施。

4 固废堆存场地重金属污染防控与修复措施

4.1 污染防控措施

污染防控是固废堆存场地重金属污染管理的首要环节。源头减量措施包括固废分类收集、资源化利用和清洁生产改造。通过提高固废综合利用水平,减少堆存量;对含重金属浓度高的危险废物单独收集处理;改进生产工艺,减少重金属进入固废。新建堆场选址应远离水源地、农田和居民区,避开地下水补给区和断裂带。过程阻断措施通过工程手段切断污染扩散途径,垂直防渗系统采用水泥土墙、膨润土墙或高压注浆帷幕,阻断污染物侧向迁移。水平覆盖系统铺设粘土层、土工膜和植被层,减少雨水入渗和扬尘扩散。渗滤液收集系统收集堆场渗滤液并进行处理,避免污染物下渗。地下水水力控制系统通过抽水井形成水力坡降,控制污染羽扩散范围。建立堆场环境档案,记录堆存数量、成分、监测数据等信息。开展定期环境监测,设置土壤、地下水、地表水监测点位,及时发现污染趋势。制定应急预案,应对溃坝、滑坡等突发环境事件。严格执法监管,对违规堆

存、超标排放行为依法查处，督促责任主体履行污染防控义务。

4.2 污染修复技术选择与应用

污染修复技术选择应根据场地污染特征、土地利用规划和经济可行性综合确定。固化稳定化技术通过添加固化剂和稳定剂，将重金属转化为低溶解性、低迁移性形态，适用于重金属污染范围广、浓度相对均匀的场地，施工周期短、成本适中，处理后可用于建设用地。化学淋洗技术利用淋洗剂溶解和洗脱土壤中重金属，适用于污染集中、渗透性较好的场地，处理周期短但可能产生二次污染。植物修复技术利用超富集植物吸收积累重金属，适用于低至中度污染场地，成本低、环境友好但周期较长。适合的修复植物包括蜈蚣草富集砷、东南景天富集镉、伴矿景天富集镉。微生物修复技术利用功能微生物促进重金属沉淀或转化，可与植物修复联合应用。电动修复技术通过电场驱动重金属迁移富集，适用于低渗透性土壤，能耗较高。技术应用前应开展小试和中试试验，验证修复效果、优化工艺参数。工程实施过程需加强质量控制，确保修复药剂投加量、搅拌均匀性、养护条件等符合设计要求。修复后开展效果评估，通过采样检测验证污染物浓度是否达到修复目标，评估固化稳定化产物的长期稳定性。多种技术联合应用可发挥各自优势，实现高效修复，如植物修复与化学淋洗结合、固化稳定化与植被恢复结合^[4]。

4.3 修复效果评估与长期管控

修复效果评估是验证修复工程是否达到预期目标的必要环节。评估内容包括污染物削减效果、修复目标达标情况、二次污染控制情况和长期稳定性。采样检测应在修复完成后按规范布点，对比修复前后污染物浓度变化。固化稳定化场地应开展浸出试验，验证固化体的长期稳定性。植物修复场地需评估植物重金属积累量和生

物量，计算修复周期。建立长期监测系统，定期监测土壤和地下水质量，掌握污染物动态变化趋势。实施土地利用管控，根据修复后场地风险等级确定适宜用途，限制敏感用途开发。建立场地档案和信息公开制度，记录修复过程、监测数据和管控要求，便于后续管理和公众监督。修复后场地移交使用时应明确责任主体，确保长期管控措施持续落实。加强自然衰减监测，利用自然过程降低污染物浓度和风险。定期评估风险变化，动态调整管控措施。风险管控与修复相结合，可在保障安全前提下优化资源配置，实现污染场地可持续管理。

结束语

固废堆存场地重金属污染是当前突出的生态环境问题，其污染特征复杂、迁移转化路径多样，对生态系统与人体健康构成严重威胁，开展污染特征分析与风险评价是污染治理的前提。本文系统概述固废堆存场地相关内容与重金属污染理论，构建风险评价体系，从生态与健康维度开展评价，提出针对性防控修复措施与长期管控方案。未来需结合场地实际优化风险评价方法，研发高效、环保、低成本的修复技术，强化全流程管控，推动固废堆存场地重金属污染治理提质增效，保障生态环境安全与人体健康。

参考文献

- [1]姜萌萌,钟崇巍,胡蝶,等.生物炭-污泥协同黑麦草修复煤基固废堆场表层土壤及重金属污染风险评价[J].环境工程学报,2025,19(6):1455-1463.
- [2]张智勇.固废堆场周边耕地土壤和农作物重金属污染特征及风险评价[J].资源节约与环保,2025(4):144-147.
- [3]杜晨,王亚红,牛如.基于多种方法的铅锌矿区固废堆场土壤重金属污染评价[J].环境生态学,2025,7(5):17-23.
- [4]霍云剑.某工业固废填埋场地重金属污染地下水抽出处理工艺探究[J].化工管理,2024(23):69-71.