

固体吸附剂在重金属污染土壤修复中的作用研究

陈 勇

商洛市绿宝环境科技有限公司 陕西 商洛 726000

【摘要】：固体吸附剂在重金属污染土壤修复中发挥着重要作用。通过物理吸附、离子交换和表面络合等机制，固体吸附剂能够有效降低土壤中重金属的生物有效性，从而缓解环境风险。近年来，活性炭、沸石、生物炭及改性黏土等多种固体吸附剂在不同类型重金属污染土壤中的应用研究逐渐深入。研究发现，吸附剂的孔隙结构、比表面积和表面官能团是影响吸附性能的关键因素。本文围绕固体吸附剂的类型、作用机理及应用效果展开探讨，为实现高效、可持续的土壤修复技术提供理论依据和实践参考。

【关键词】：固体吸附剂；重金属污染；土壤修复；吸附机理；应用研究

DOI:10.12417/2811-0528.25.022.022

引言

重金属污染是当前全球面临的重大环境问题，对生态系统和人体健康构成严重威胁。工业废水排放、矿产资源开采、冶金以及农业生产等活动是土壤重金属污染的主要来源。土壤作为重金属的重要汇集与转化介质，一旦遭受污染，不仅会导致其肥力下降和生态功能退化，重金属元素还可通过食物链迁移和富集，最终危害人体健康。近年来，采用固体吸附剂修复重金属污染土壤的技术因其高效性、经济性及操作简便性而受到广泛关注。各类吸附材料通过多样的物理化学作用机制，可有效降低土壤中重金属的迁移性和生物有效性。因此，深入研究固体吸附剂的作用机理与应用效果，对于发展高效、绿色的土壤修复技术具有重要意义，已成为环境科学与工程领域的研究热点。

1 重金属污染土壤的环境危害与修复需求

近年来，土壤重金属污染问题日益凸显。工业废水、矿产开采、冶金及农业活动等是导致土壤中铅、镉、汞、砷等重金属积累的主要成因。这些重金属元素在自然环境中难以降解，具有持久性、迁移性和生物毒性等特征。它们可通过淋溶、渗透等途径进入水环境，造成二次污染；也可被农作物吸收，并通过食物链富集放大，最终对人体健康构成严重威胁，如引发神经系统损伤、肝肾功能障碍乃至致癌风险。此外，重金属污染还会破坏土壤微生物群落结构，抑制其活性，导致土壤自净能力减弱、肥力下降，严重破坏生态系统平衡。

在此背景下，土壤修复成为环境治理领域的迫切需求。与可被降解的有机污染物不同，重金属无法被彻底消除，只能通过物理、化学或生物方法改变其存在形态，降低其生物有效性和迁移性，从而控制环境风险。在众多修复技术中，基于固体吸附剂的修复方法因其的高比表面积、丰富的表面官能团和良好的离子交换能力而展现出显著优势。该类吸附剂可通过吸附、络合、沉淀等作用固定重金属，有效降低其活性和生物可

利用性，减少对地下水及农作物的二次危害。相较于传统的化学淋洗或客土法等技术，固体吸附剂技术具有成本低、环境友好、操作简便等优点，应用潜力巨大。

当前，固体吸附剂的应用需求持续增长，尤其在高风险工业场地和农业生产区价值显著。针对不同污染场地的特性，可选用活性炭、沸石、生物炭、改性黏土等多样化吸附材料，通过优化其孔隙结构、比表面积和表面化学性质，实现对特定重金属的高效固定与钝化。随着环境标准的日趋严格，固体吸附剂修复技术正朝着高效化、绿色可持续和精准定向的方向发展，为保障农产品安全与生态系统健康提供了可靠的技术支撑。

2 固体吸附剂的作用机理与应用策略

固体吸附剂修复技术的核心在于其与重金属离子发生的表面物理化学反应，主要机理包括物理吸附、离子交换、表面络合以及化学沉淀等。吸附剂表面富含的羧基(-COOH)、羟基(-OH)、氨基(-NH₂)等官能团，可与重金属离子发生配位作用，形成稳定的表面络合物，从而有效固定重金属，降低其迁移性和生物毒性。例如，沸石凭借其独特的硅铝酸盐晶体结构和阳离子交换性能，对 Cd²⁺、Pb²⁺等具有选择性吸附能力；而活性炭和生物炭则主要依靠巨大的比表面积和发达的孔隙结构实现对重金属的物理吸附与富集。

在实际应用中，需根据土壤理化性质（如 pH 值、有机质含量）和重金属种类（如 Cd、Pb、As、Hg）来优化选择吸附剂类型和修复策略。对于酸性土壤，可采用经石灰或酸改性的黏土矿物，通过提高其阳离子交换量(CEC)和调整表面电荷来增强对 Cu²⁺、Zn²⁺等离子的固定效果。在有机质含量较高的土壤中，施用生物炭不仅能有效吸附重金属，还可改善土壤团粒结构、增强保水保肥能力，实现边修复边改良的效果。为进一步提升吸附剂的性能，常采用酸/碱改性、负载纳米金属氧化物、表面功能化嫁接等方法进行改性处理，从而增强其吸附

容量、选择性和环境稳定性,尤其在处理多种重金属复合污染时效果显著。

高效的修复工程常采用联合修复策略。将固体吸附剂与植物修复技术联用,可在吸附剂钝化重金属活性的同时,利用植物根系对其吸收和富集,达到协同增效的目的。将其与稳定化药剂(如磷酸盐、硅酸盐)结合使用,可通过共沉淀等作用进一步降低重金属的溶解度和迁移性。工程实践表明,通过精准投加吸附剂并辅以长期监测,能够在确保修复效果的同时,最大限度地控制二次污染风险。这种多技术融合的策略正推动固体吸附剂修复向系统化、精准化和可持续化的方向发展。

3 研究进展与综合效果评估

近年来,固体吸附剂修复技术的研究不断深化,从早期对单一材料吸附性能的评价,逐渐发展到对材料改性、复合应用及机理探究的多维度协同优化。先进表征技术如原位傅里叶变换红外光谱(in-situ FTIR)、X射线吸收精细结构谱(XAFS)和扫描电子显微镜-能量色散X射线(SEM-EDS)等的应用,使得研究者能够在分子水平上揭示吸附作用机制,为定向设计高效吸附材料提供了理论依据。在此推动下,改性生物炭(如磁改性、纳米粒子负载)、功能化沸石及有机-无机复合材料等新型吸附剂成为研发热点,它们通常具备更高的吸附容量、优异的选择性和良好的环境稳定性,适用于复杂多变的实际污染环境。

当前,吸附材料的复合化与功能定向化是提升修复效能的关键策略。面对多种重金属复合污染,单一吸附剂往往局限性明显。通过将不同吸附材料复配(如生物炭-沸石复合材料),或制备负载型吸附剂(如纳米羟基磷灰石负载于生物炭),可

以整合多种优势,实现吸附功能的互补与强化,显著提升对多元重金属污染的修复效率。此外,技术耦合已成为重要趋势,例如将固体吸附剂与植物修复、电动修复或微生物修复等技术联用,可形成物理-化学-生物的协同修复体系,兼顾短期控制与长期稳定化的目标,实现更彻底、更可持续的治理。

对修复效果进行系统、全面的评估是技术推广的关键环节。评估不应仅限于重金属总量的降低,更应关注其形态分布、淋溶特性及生物有效性的变化,以准确评判修复效果的稳定性和持久性。试验表明,合理的吸附剂投加量、施用方式及养护周期是维持长期效果和保障土壤生态功能的关键。优秀的吸附剂不仅能有效固定重金属,还能改善土壤理化性质,促进微生物群落恢复,从而提升土壤整体健康水平。随着修复标准与生态风险评价体系的完善,固体吸附剂修复技术正从实验室走向规模化工程应用,成为治理重金属污染土壤的有力工具。

4 结语

固体吸附剂技术作为一种高效、经济且环境友好的方法,在重金属污染土壤修复领域已展现出巨大的应用潜力和价值。本文综述表明,通过物理吸附、离子交换、表面络合等多种机理,固体吸附剂能有效降低土壤中重金属的迁移性和生物有效性。活性炭、沸石、生物炭及改性黏土等材料各具特性,可通过改性优化和复合化设计进一步提升其性能。将吸附剂与其他修复技术联用,形成协同治理策略,是未来实现高效、可持续修复的重要方向。随着研究的不断深入和技术的持续创新,固体吸附剂必将在土壤环境治理与生态安全保障中发挥更为关键的作用。

参考文献:

- [1] 王建华,李玉梅.固体吸附剂在重金属污染土壤修复中的研究进展[J].环境科学学报,2021,41(7):2893-2905.
- [2] 陈国平,周晓峰.生物炭在重金属污染土壤修复中的应用与机制[J].土壤学报,2020,57(3):567-579.
- [3] 刘志强,孙丽华.改性沸石对重金属污染土壤的修复作用[J].环境工程学报,2019,13(5):1220-1231.