

微塑料与重金属复合污染对土壤-农作物系统生态效应的影响机制探讨

邢哲楠^{1,2} 倪佳琪^{1,2} 夏武军^{1,2} 李增锴³

1. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 中国·湖南 湘潭 411201

2. 煤炭资源清洁与矿山环境保护湖南省重点实验室, 中国·湖南 湘潭 411201

3. 中南大学资源与安全工程学院, 中国·湖南 长沙 410083

摘要: 微塑料与重金属是土壤环境中两类广泛共存且难以降解的典型污染物, 其复合污染对土壤健康与农产品安全构成日益严峻的潜在威胁。微塑料可改变土壤理化性质并作为载体影响重金属的迁移与生物有效性, 而两者的交互作用可能产生协同、加和或拮抗等复杂的联合效应, 其机制尚未明晰。本文综述旨在系统梳理微塑料、重金属单一污染及其复合污染对土壤生态系统和农作物的影响。核心在于重点探讨微塑料与重金属在土壤环境中的交互作用, 及其复合污染对土壤-农作物系统的生态效应路径与内在机制。

关键词: 微塑料; 重金属; 复合污染; 生态效应

Influence Mechanism of Microplastics and Heavy Metal Composite Pollution on Soil-Crop System Ecological Effects

Xing Zhenan^{1,2}, Ni Jiaqi^{1,2}, Xia Wujun^{1,2}, Li Zengkai³

1. Hunan University of Science and Technology School of Resources, Environment and Safety Engineering, China Hunan Xiangtan 411201

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Clean Coal Resources and Mine Environmental Protection, China Hunan Xiangtan 411201

3. Central South University School of Resources and Safety Engineering, China Hunan Changsha 410083

Abstract: Microplastics and heavy metals are two prevalent coexisting and refractory pollutants in soil environments, whose combined contamination poses increasingly severe threats to soil health and agricultural product safety. Microplastics can alter soil physicochemical properties and act as carriers influencing heavy metal migration and bioavailability, while their interactions may generate complex synergistic, additive, or antagonistic effects with unclear mechanisms. This review systematically examines the impacts of single and combined microplastic/heavy metal pollution on soil ecosystems and crops, with a focus on investigating the interactions between these pollutants in soil environments and elucidating the ecological pathways and underlying mechanisms of combined pollution in soil-crop systems.

Keywords: Microplastics; Heavy metals; Combined pollution; Ecological effects

0 引言

土壤是全球生态系统物质循环和能量流动的核心载体, 也是农业生产与粮食安全的基础^[1]。然而, 随着工业化、城市化的快速推进以及农业集约化生产, 土壤污染已成为全球性的重大环境问题^[2]。在众多土壤污染物中, 微塑料(MPs, 通常指粒径小于5毫米的塑料颗粒)和重金属是两类具有代表性的持久性污染物。微塑料主要来源于农用地膜、塑料废弃物降解、污水灌溉、大气沉降等, 其在环境中难以降解, 可通过改变土壤结构、影响水分和养分运移而对土壤生态系统产生深远影响^[3]。重金属(如镉、

铅、砷、汞等)则主要源于矿产开采、金属冶炼、化石燃料燃烧、含重金属废水/废弃物排放及含重金属农药/化肥的施用^[4]。重金属同样具有环境持久性和生物累积性, 可通过食物链威胁人体健康。这两类污染物在土壤环境中普遍存在, 且由于它们特殊的表面性质(如微塑料的高比表面积和疏水性), 可能成为重金属等污染物的载体, 共同迁移、转化, 加剧了环境行为的复杂性和生态风险^[5]。

1 微塑料与重金属在土壤环境中的赋存与交互作用

微塑料作为重金属的“载体精准地揭示了二者在土壤

环境中一种关键的交互机制,即微塑料通过其物理化学特性吸附并富集重金属,并可能促进其在环境介质中的迁移与生物可利用性。从分子层面看,微塑料成为有效“载体”的前提是其具备强大的吸附能力。原始微塑料表面通常疏水且官能团较少,吸附能力有限。但一旦进入环境,它们会经历光氧化、热降解和生物老化等过程。这些老化作用,尤其是紫外线辐射,会在微塑料表面引入大量含氧官能团,显著增加其比表面积和表面粗糙度。这些新生成的官能团为重金属离子提供了丰富的配位点,通过静电吸引、表面络合、离子交换甚至沉淀等机制实现高效吸附。

在微生物层面,微塑料与重金属的复合胁迫会显著改变土壤细菌群落的结构和代谢功能。研究发现,六种常见微塑料均能抑制氨氧化菌等关键功能菌群的丰度,干扰氮循环等核心生物地球化学过程^[6]。微塑料表面形成的独特微生物群落——“塑料圈”,也为重金属提供了一个动态的生物-无机交互界面,可能影响其生物转化。在植物层面,这种调节作用尤为关键。微塑料不仅可能通过物理方式破坏根系屏障(如凯氏带),为重金属进入植物体内提供直接通道,更重要的是,它会诱导植物产生氧化应激反应。为了应对这种复合胁迫,植物会主动分泌更多的低分子量有机酸(如柠檬酸、苹果酸)来螯合重金属,这一生理响应虽然旨在解毒,却意外地提高了重金属在根际的溶解度和移动性,从而加剧了其吸收。一项涵盖 87 项独立研究、包含 3226 个观测值的大型荟萃分析证实,除砷(As)外,微塑料与重金属的共存普遍对植物产生协同毒性,导致植物生物量显著下降且重金属积累量增加^[7]。

2 复合污染对土壤-农作物生态系统的影响机制

微塑料与重金属的复合污染深刻改变了土壤理化性质,并引发了从微生物到植物的系统性级联效应,对土壤-农作物生态系统功能产生多重冲击。

在土壤系统中,微塑料作为外源惰性颗粒,其物理存在能改变土壤团聚体结构、孔隙度与持水能力,进而干扰水热状况和氧化还原环境。这种物理扰动与重金属的化学行为紧密耦合。一方面,微塑料老化后表面富含的含氧官能团使其成为高效的重金属吸附剂,能够从土壤固相中竞争性吸附重金属离子,并将其重新释放到更具活性的土壤溶液相中,从而普遍提升了 Cu、Pb、Cd、Fe 和 Mn 等重金属的生物有效性。另一方面,在某些土壤条件下,微塑料也可能通过强吸附固定重金属或改变微环境间接降低其有效态,这种效应的高度情境性取决于微塑料类型、老化

程度、浓度与土壤性质(如 pH、有机质)的动态博弈。

复合污染显著扰动了土壤生物群落。微生物群落对胁迫尤为敏感,微塑料与重金属共存会改变土壤细菌群落结构,抑制如氨氧化菌等关键功能菌群的丰度,干扰氮循环等核心生物地球化学过程。微塑料表面形成的“塑料圈”为重金属提供了动态的生物-无机交互界面,进一步影响其生物转化与毒性。这种微生物层面的扰动向上传递至植物。大型荟萃分析证实,除砷(As)外,微塑料与重金属的共存普遍对植物产生协同毒性,导致生物量下降,同时增加重金属在植物体内的积累。其机制包括:微塑料通过物理损伤根系屏障(如凯氏带),为重金属进入提供通道;更重要的是,复合胁迫诱导植物产生强烈氧化应激,刺激根系分泌大量低分子量有机酸(如柠檬酸、苹果酸)以螯合重金属。这一本意为解毒的生理响应,却意外提高了重金属在根际的溶解度和移动性,形成“自诱导活化”机制,从而加剧了重金属的吸收。

在农作物个体层面,复合污染的影响贯穿其生命周期。种子萌发与幼苗生长阶段受到显著抑制,表现为萌发率降低、根芽生长受阻及生物量减轻,其根本在于复合胁迫加剧了细胞氧化损伤^[8]。在根系发育中,微塑料颗粒可直接阻碍或损伤根尖,破坏根系结构,而复合胁迫诱导的有机酸分泌在活化根际重金属的同时,也促进了其向根系内部的转运。在植株生理代谢上,光合作用因叶绿素破坏和气孔导度下降而受抑制,碳同化减少;过度激活的抗氧化防御系统(如大量合成 SOD、POD、CAT)消耗大量资源,挤占了正常生长代谢;此外,土壤中参与氮循环的关键功能菌群受抑制,间接影响了植物对氮等营养元素的获取^[9]。

最终,污染物在土壤-植物系统中的吸收、转运与累积过程被重塑。微塑料通过物理损伤根系和诱导“自诱导活化”机制,显著增加了重金属(如 Cd、Pb、Cu)在植物可食部分(籽粒、块茎等)的累积量。这意味着即使土壤重金属总浓度未超标,微塑料的共存也可能导致农产品重金属含量突破安全标准。此外,复合胁迫下,植物将更多资源用于抗逆防御,可能挤占合成蛋白质、淀粉、维生素等营养成分的代谢通量,导致农产品营养价值下降,同时对作物产量和外观品质产生负面影响,最终对食品安全构成严峻挑战。

3 复合污染的生态风险与展望

展望未来,复合污染研究亟需在以下几个关键方向取得突破。第一,从实验室走向真实世界。当前绝大多数研

究基于短期、高剂量的受控实验,难以反映农田土壤中长期、低剂量、多污染物共存的真实情景。未来的研究必须加强野外原位监测和长期定位试验,以获取更具生态相关性的数据。第二,深化机制解析与定量模型构建。需要利用多组学技术(宏基因组、代谢组等)深入解析微塑料-重金属-土壤生物互作的分子网络,并在此基础上开发能够精准预测不同情境下(如不同土壤类型、气候条件、农艺措施)复合污染生态风险的定量模型。第三,探索有效的风险管控与修复策略。应系统评估现有土壤改良剂(如生物炭、石灰、有机肥)对阻断微塑料活化重金属效应的有效性,并研发针对复合污染特性的新型绿色修复材料和技术。第四,加强全生命周期与政策研究。从源头减量、过程阻控到末端治理,建立覆盖微塑料全生命周期的综合管理体系,并推动相关法律法规的制定与完善,以实现对这一新兴复合污染问题的系统性防控。

参考文献:

- [1] Yu H J, Li C C, Jin Y, et al. A review on adsorption characteristics and influencing mechanism of heavy metals in farmland soil[J]. RSC Advances, 2023, 13(6): 3505-3519.
- [2] Rai M, Pant G, Pant K, et al. Microplastic Pollution in Terrestrial Ecosystems and Its Interaction with Other Soil Pollutants: A Potential Threat to Soil Ecosystem Sustainability[J]. Resources, 2023, 12(6): 67.
- [3] Xu Y H, Ou Q, van der Hoek J P, et al. Photo-oxidation of Micro- and Nanoplastics: Physical, Chemical, and Biological Effects in Environments[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(2): 991-1009.
- [4] Kasahudta V K, Kumar V, Bhagat A, et al. Ecological adaptation of earthworms for coping with plant polyphenols, heavy metals, and microplastics in the soil: A review[J]. Heliyon, 2023, 9(3): e14572.
- [5] Angon P B, Islam M S, KC S, et al. RETRACTED: Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain[J]. Heliyon, 2024, 10(7): e28357.
- [6] YUAN Y, YANG L, WAN X, et al. Microplastics in heavy metal-contaminated soil drives bacterial community and metabolic changes[J]. Science of The Total Environment, 2024, 948: 174770.
- [7] CHEN L, CHANG N, QIU T, et al. Meta-analysis of impacts of microplastics on plant heavy metal(loid) accumulation[J]. Environmental Pollution, 2024, 348: 123787.
- [8] Li G Q, Cai L, Liu Y N. Different effects of conventional and biodegradable microplastics on the amelioration process of cadmium-contaminated soil[J]. The Science of The Total Environment, 2023, 892: 164589.
- [9] Wang F L, Wang X J, Song N N. Polyethylene microplastics increase cadmium uptake in lettuce (*Lactuca sativa* L.) by altering the soil microenvironment[J]. The Science of The Total Environment, 2021, 784: 147133.
- 作者简介: 邢哲楠(2001-), 男, 汉族, 山西晋城人, 硕士研究生在读, 研究方向: 资源与环境(环境工程)。