

DOI: 10.20103/j.stxb.202307281621

刘加强, 崔陆, 周子振, 丁千, 杨杨阳, 蒋园园, 徐蕾. 土壤中微塑料: 类型、载体效应、迁移行为和潜在风险综述. 生态学报, 2024, 44(9): 3586-3599.  
Liu J Q, Cui L, Zhou Z Z, Ding Q, Yang Y Y, Jiang Y Y, Xu L. Microplastics in soils: a review of types, carrier effects, migration behavior, and potential risks. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3586-3599.

# 土壤中微塑料: 类型、载体效应、迁移行为和潜在风险综述

刘加强<sup>1</sup>, 崔 陆<sup>2</sup>, 周子振<sup>2</sup>, 丁 千<sup>2</sup>, 杨杨阳<sup>1</sup>, 蒋园园<sup>3</sup>, 徐 蕾<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> 徐州工程学院环境工程学院, 徐州 221018

<sup>2</sup> 中原工学院能源与环境学院, 郑州 450007

<sup>3</sup> 江苏省徐州环境监测中心, 徐州 221000

**摘要:** 微塑料 (microplastics, MPs) 作为一种新兴污染物, 广泛存在于土壤中, 并不断迁移转化, 对土壤生态系统和生物多样性产生潜在风险。为了全面评估土壤 MPs 的环境风险, 加强 MPs 污染的风险管控, 讨论了土壤环境中 MPs 的类型, 系统阐述了土壤 MPs 的载体效应和迁移行为, 并从微生物、植物、动物以及人类四个方面综述了土壤 MPs 的潜在风险。土壤中 MPs 并不是单独存在的, MPs 的潜在风险一方面来自其本身 (颗粒和添加剂) 的生物毒性, 另一方面是其对共存污染物 (有机污染物、重金属和致病菌等) 的载体效应。在非生物 (淋溶、重力) 和生物等作用下, 土壤中的 MPs 时刻都在经历着复杂的迁移过程, 从而加剧了其对土壤生态系统的影响。由于粒径小, MPs 很容易进入食物链并层层传递, 从而对不同营养级生物的正常生理活动产生不利影响, 包括影响土壤动植物的新陈代谢, 生长、发育和繁殖。此外, MPs 不仅在环境中存在, 而且也在人体中被发现。MPs 可通过饮食、呼吸或皮肤接触等途径进入人体, 从而对人体可能产生一系列不良反应。虽然目前仍没有足够的证据证明 MPs 对人体的直接危害, 但其潜在风险仍不容忽视。探讨了土壤 MPs 污染治理的策略, 并对未来土壤微塑料污染的研究方向和重点进行了展望。研究将有助于加深人们对土壤微塑料污染的认识, 并为更好地开展微塑料的毒理效应研究和风险评估提供科学线索和理论参考。

**关键词:** 土壤微塑料; 类型; 载体效应; 迁移行为; 毒性效应; 治理策略

## Microplastics in soils: a review of types, carrier effects, migration behavior, and potential risks

LIU Jiaqiang<sup>1</sup>, CUI Lu<sup>2</sup>, ZHOU Zizhen<sup>2</sup>, DING Qian<sup>2</sup>, YANG Yangyang<sup>1</sup>, JIANG Yuanyuan<sup>3</sup>, XU Lei<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China

<sup>2</sup> School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China

<sup>3</sup> Xuzhou Environmental Monitoring Center Station, Xuzhou 221000, China

**Abstract:** Microplastics (MPs), as an emerging class of pollutants has become a global concern, and is receiving increasing attention. MPs are considered ubiquitous in soil ecosystems and continuous migration and transformation, which generates the potential risk on soil ecosystems and biodiversity. In order to comprehensively assess the environmental risk of MPs in soil and strengthen the risk control of MPs pollution, the types of MPs in the soil environment were discussed in detail, and the carrier effect and migration behavior of MPs from soil were systematically elaborated in this paper as well. In addition, we performed a systematic literature review to identify the potential risk of MPs in soil from four perspectives:

**基金项目:** 江苏省生态环境保护地下水监测监控与污染预警重点实验室开放课题 (GWKL2203); 河南省科技攻关项目 (232102320261); 徐州市重点研发计划项目 (KC23322)

**收稿日期:** 2023-07-28; **网络出版日期:** 2024-02-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 554091486@qq.com

microorganism, plant, animal, and human. The MPs did not exist independently, and on coexist with other contaminants in the soil environment. On the one hand, toxicity of MPs can be caused by the plastic polymers themselves, the particles or by the additives they contain. On the other hand, MPs are potential carriers of some hazardous substances, such as persistent organic pollutants, heavy metals, antibiotic resistance genes, and pathogenic microorganisms. MPs in soil inevitably undergo complex aging transformation and transport process all the time under the effect of either biotic (e.g. plant growth and the daily activity of animals) or abiotic (e.g. leaching and gravity) processes. As a result, contamination of soils by MPs further exacerbates the effects on the soil ecosystem. Because of their small grain size, MPs can easily enter into the food chain and transmit them layer by layer, thus adversely affecting the normal physiological activities of organisms at different trophic levels, including affecting the metabolism, growth, development and reproduction of soil animals and plants. Furthermore, MPs have not only been found in the environment, but also in the human body. MPs can enter the body through various routes, including dietary intake, breathing inhalation, and skin contact, which may cause a series of side effects on human health. Although there is still inadequate evidence to prove the direct harm of MPs to human body, their potential risk should not be ignored. Finally, we explored the strategies for the management of soil MPs pollution, and provided a perspective on future research directions and priorities for soil MPs pollution. This comprehensive review will help to deepen the understanding of soil MPs pollution, and at the same time provides valuable scientific clues and theoretical references for a better carrying out toxicological research and risk assessment of soil MPs pollution.

**Key Words:** soil microplastics; type; carrier effect; migration behavior; toxic effects; governance strategies

MPs 通常被定义为粒径小于 5 mm 的塑料颗粒或碎片<sup>[1]</sup>。由于其具有高度的化学稳定性、持久性和生物累积性,导致其极易在生物体内累积并通过食物链层层传递,最终给生态安全和人类健康构成巨大威胁。土壤是微塑料重要且长期的储存库,每年排入土壤的微塑料量远大于海洋<sup>[2]</sup>。MPs 主要通过地膜降解、污水灌溉、污泥利用、有机肥料施用、塑料垃圾填埋和大气沉降等途径进入土壤(图 1)。据统计,世界范围内地膜使用后的回收率仅为 50%,塑料薄膜的残留成为农业土壤中微塑料污染的主要污染源之一<sup>[3]</sup>,田间残膜的持续积

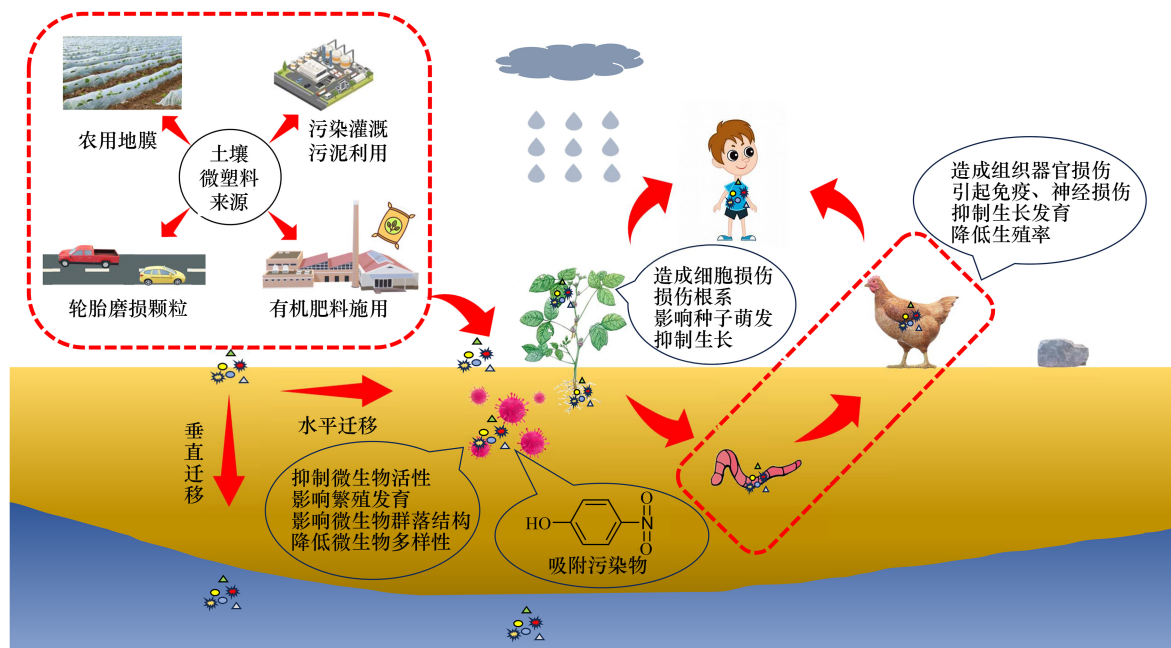


图 1 土壤微塑料的来源、载体效应、迁移行为及其生物有效性

Fig.1 Sources, carrier effects, migration behavior and bioavailability of soil microplastics

累会对土壤理化性质产生负面作用,对粮食生产有长期影响<sup>[4]</sup>。污水处理厂是 MPs 向自然环境释放的重要枢纽。尽管之前的研究表明,经过二级处理后污水处理厂对微塑料的去除率已达到 98.4%,但每天仍有 6500 万个微塑料会随污水厂排出进入河流中<sup>[5]</sup>。而农业灌溉的方式又可将河流中存在的微塑料转移到农田土壤中,从而造成土壤中微塑料的积累。污水处理厂中被截留的微塑料主要转移到了污泥中,研究发现每千克干污泥中微塑料的含量约 0.16—5.64 万个<sup>[6]</sup>。而污泥土地利用被认为是污泥处置的重要途径。据估计,由污泥处置不当或土地利用引入土壤生态系统的微塑料总量可达 15 万—51 万亿个/a。轮胎磨损微粒(tire wear particles, TWP)作为一类特殊类型的微塑料,在全球微塑料污染中扮演着重要角色。据统计,每年全球大约排放 600 万 t TWP 进入环境,相当于每人每年排放 0.81 kg 的 TWP<sup>[7]</sup>。其中,土壤系统是 TWP 主要的释放去向,大约 49%—90% 的 TWP 最终残留在土壤生态系统中<sup>[8]</sup>。

残留于土壤中的 MPs 可以改变土壤的保水性和渗透性,导致土壤类型的蒸发特性发生改变,致使土壤易开裂、收缩。在非生物和生物等作用下,微塑料在土壤中能够发生迁移,从而扩大了其污染范围。然而,土壤中 MPs 并不是单独存在的,MPs 的潜在生态风险一方面来自其本身(颗粒和添加剂)的生物毒性,另一方面是其对共存污染物(有机污染物、重金属和致病菌等)的载体效应。MPs 由于颗粒小、疏水性强、比表面积大等特性,能够显著影响共存污染物的环境行为,产生不同于单独污染的生物效应,进而可能对环境产生更大的生态风险。

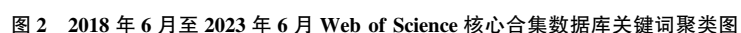
MPs 会随着食物链传递,并对不同营养级生物健康产生危害。MPs 会影响土壤中的微生物群落结构,降低微生物的丰度,从而对土壤生态系统的微生物多样性产生负面影响<sup>[9]</sup>。土壤中的 MPs 被植物吸收后,可以聚集并吸附在植物的根系表面,对根系细胞壁和细胞质膜的结构造成损害,抑制植物生长<sup>[10]</sup>。被土壤动物摄食的微塑料会在其体内富集,造成组织器官和神经损伤、抑制生长发育和降低生殖率等<sup>[11]</sup>。然而,MPs 最终会通过食物链传递进入人体,已经证实在实验室条件下 MPs 可以引起炎症和细胞损伤<sup>[12]</sup>。尽管目前还没有足够的证据表明 MPs 对人类健康的危害,但其潜在风险仍不容忽视。针对土壤微塑料污染不断加剧的现状,本文系统性的解析了土壤微塑料的类型、载体效应、迁移行为、以及对生物有效性的影响,总结了治理微塑料污染的策略。以期为微塑料污染风险管控与精准治理提供科学依据。

## 1 土壤微塑料污染相关文献可视化分析

本文以 Web of Science 核心合集数据库和 CNKI 数据库作为文献分析的数据来源,以“土壤微塑料”为主题,检索近五年(截止 2023 年 6 月)相关英文文献 1737 篇,其中出现 30 次及以上的关键词共 74 个;相关中文文献 446 篇,其中出现 5 次及以上的关键词共 36 个。以此为数据源,利用 VOS-viewer 软件进行关键词共现分析,生成的关键词共现网络分析图,如图 2 和图 3 所示。进一步分析发现,出现频次最高的 10 个关键词往往相伴出现(图 4),具有强烈的交叉性和共现性。将这些关键词进行分类,其中 microplastics、soils 为主题关键词,sediments、transport 与环境行为有关,另外还包括与分离鉴定相关的关键词 identification,与累积效应相关的关键词 accumulation 和与毒性效应相关的关键词 toxicity。此外,中、英文关键词之间高度吻合,表明当前国、内外对土壤微塑料的研究主要聚焦于土壤微塑料的污染现状、环境行为、分离鉴定、累积效应、和生态毒性等方面。

## 2 土壤微塑料的类型

塑料是人类发明的重要基础材料,由于其具有优良的物化特性以及价格低廉等优点,在社会的各个领域中被广泛地应用,给人们的生产和生活带来了极大的便利<sup>[13]</sup>。微塑料种类繁多,根据降解程度,微塑料可以分为可生物降解微塑料和不可生物降解微塑料。不同类型微塑料的对比如表 1 所示。常见微塑料的化学结构如图 5 所示。



**Fig.3 Keyword clustering chart of CNKI database from June 2018 to June 2023**

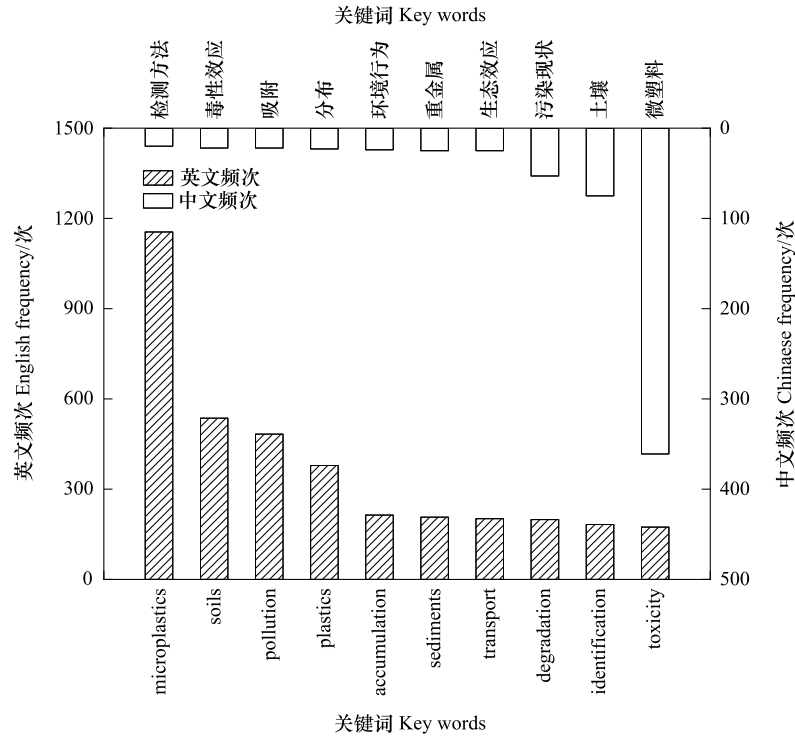


图 4 关键词共现分析中出现频次最高的 10 个关键词  
Fig.4 The top 10 keywords that appear most frequently in keyword co-occurrence analysis

表 1 不同类型微塑料的对比  
Table 1 Comparison of different types of microplastics

| 指标<br>Index                            | 可生物降解微塑料<br>Biodegradable microplastics      | 不可生物降解微塑料<br>Non-biodegradable microplastics               |                                                                                            |
|----------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                        |                                              | 传统热塑性微塑料<br>Conventional thermoplastic microplastics       | 热固性微塑料 (TWP)<br>Thermosetting microplastics (TWP)                                          |
| 主要类型或成分<br>The main type or ingredient | 聚乳酸 (PLA)、聚羟基丁酸酯 (PHB) 和聚丁二酸丁二酯 (PBS) 等      | 聚乙烯 (PE)、聚苯乙烯 (PS)、聚丙烯 (PP)、聚氯乙烯 (PVC)、聚碳酸酯 (PC)、尼龙 (PA) 等 | 天然橡胶 (NR)、丁苯橡胶 (SBR)、顺丁橡胶 (BR)、炭黑 (CB)、二氧化硅 (SiO <sub>2</sub> )、碳酸钙 (CaCO <sub>3</sub> ) 等 |
| 主要添加剂<br>Main additives                | 甘油、木糖醇、聚乙烯醇、聚乙二醇、聚氨酯、聚己内酯、乳酸低聚物、滑石粉、硫酸钡、多酰胺等 | 邻苯二甲酸酯、磷酸酯、卤代烃、脂肪二羧酸酯、双酚类等                                 | 矿物油、增量油、树脂、有机胺类、酚类、芳香和脂肪族酯、硫、氧化锌、氧化钙等                                                      |
| 密度范围<br>Density range                  | 1.20—1.30 g/cm <sup>3</sup>                  | 0.80—1.40 g/cm <sup>3</sup>                                | 1.10—1.30 g/cm <sup>3</sup>                                                                |
| 主要形貌<br>Main topography                | 碎片、纤维、近球形                                    | 碎片、纤维、近球形                                                  | 瘦长、锯齿状、近球形                                                                                 |
| 产生途径<br>Pathway                        | 大块塑料风化或受到物理化学作用而破碎形成                         | 大块塑料风化或受到物理化学作用而破碎形成, 初级微塑料直接形成                            | 主要由轮胎与路面摩擦形成                                                                               |
| 释放有毒物质<br>Release of toxic substances  | 钙 (Ca)、镁 (Mg)、钡 (Ba)、芥酸酰胺、特丁基对苯二酚等           | 邻苯二甲酸酯类、双酚类、多溴联苯醚等                                         | 锌 (Zn)、铜 (Cu)、锰 (Mn)、镉 (Cd)、铅 (Pb)、苯并噻唑、多环芳烃等                                              |
| 参考文献<br>References                     | [14—15]                                      | [16—17]                                                    | [18—19]                                                                                    |

PLA:聚乳酸 Poly(lactic acid); PHB:聚羟基丁酸酯 Poly(hydroxyalkanoates); PBS:聚丁二酸丁二酯 Butylene succinate; PE:聚乙烯 Poly(ethylene); PS:聚苯乙烯 Poly(styrene); PP:聚丙烯 Poly(propylene); PVC:聚氯乙烯 Poly(vinyl chloride); PC:聚碳酸酯 Poly(carbonate); PA:尼龙 Poly(amide); NR:天然橡胶 Natural rubber; SBR:丁苯橡胶 Styrene butadiene rubber; BR:顺丁橡胶 Butadiene rubber; CB:炭黑 Carbon black

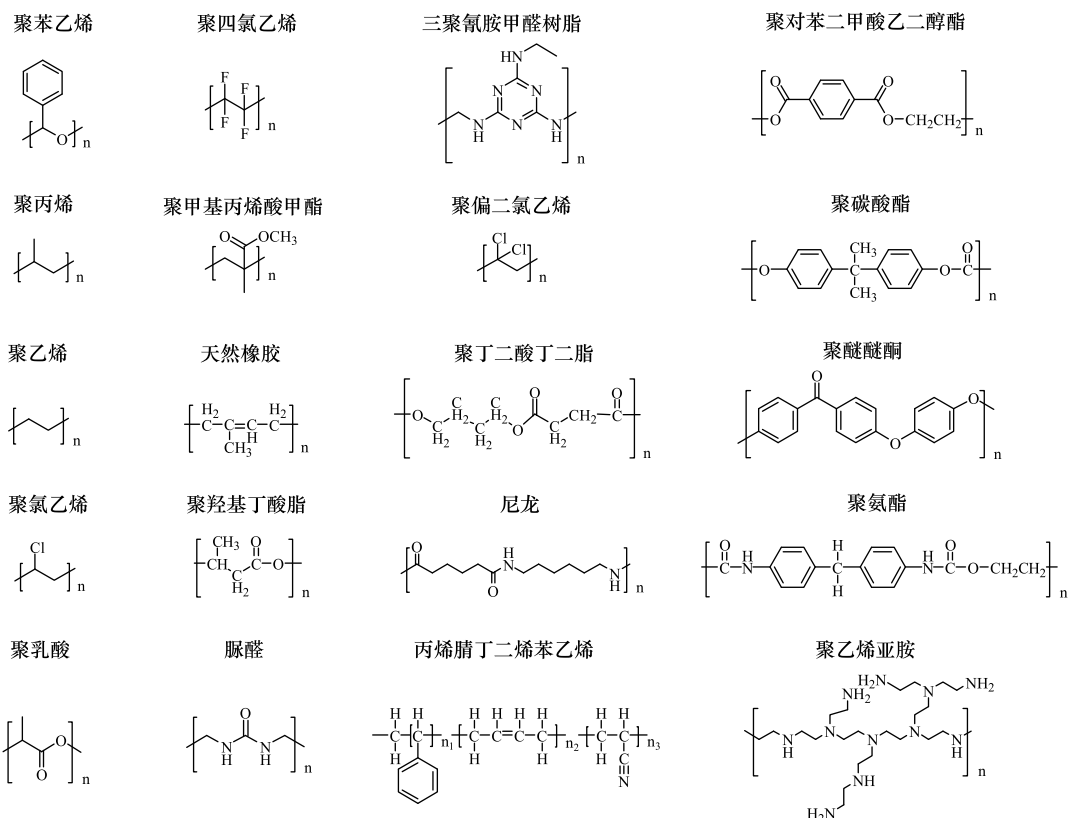


图5 常见微塑料的化学结构

Fig.5 Chemical structure of common microplastics

### 3 土壤微塑料的载体效应和迁移行为

#### 3.1 土壤微塑料的载体效应

微塑料可作为细菌、真菌、病毒等致病菌的载体,并在它们的生长和形态变化中扮演着重要角色。微塑料极长的半衰期,强烈的疏水性,大的比表面积,为细菌等微生物群落生长提供了理想的附着点,促进生物膜的形成<sup>[20]</sup>。通常,细菌粘附在微塑料表面主要是由布朗运动,静电力,范德华力和疏水相互作用介导的<sup>[21-22]</sup>。研究表明,PS 微塑料对 T4 噬菌体的吸附依赖于静电相互作用。在 100 mg/L PS 浓度下,吸附率达到 $(98.6 \pm 0.2)\%$ 。此外,PS 还可以作为病毒的潜在载体,延长病毒的存活率<sup>[23]</sup>。

微塑料在迁移过程中极易吸附并富集环境中的共存污染物,成为污染物的载体,并随着环境因素的改变而释放出来,进而影响共存污染物的环境行为。研究表明,微塑料对多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)、有机氯农药(OCPs)、抗生素等有机污染物及重金属均表现出较强的吸附能力,而且老化导致的微塑料表面变化更有利于污染物的吸附<sup>[24]</sup>。吸附机理表明,微塑料表面的含氧和含氮官能团在重金属吸附过程中起主导作用,包括表面络合、静电吸引和离子交换<sup>[25]</sup>。Tang 等人<sup>[26]</sup>的研究表明,铅(II)在老化尼龙微塑料上主要通过表面络合吸附,最大吸附容量为 1.05 mg/g。微塑料对污染物的载体作用还与其自身的结构性质及环境因素密切相关。疏水性能、结晶区域、聚合物链距和官能团等结构性质的变化,以及光照、pH、溶解性有机物(DOM)、盐度、温度、污染物浓度等环境因素的变化,都影响着微塑料对其共存污染物的吸附和解吸能力。

随着微塑料在环境中的迁移,吸附在微塑料表面的污染物及微塑料中含有的增塑剂、添加剂又会向环境中释放,并可能被生物体摄食在食物链中传递,从而对生物体的生命和代谢活动造成影响或危害<sup>[27]</sup>。也有学者认为,塑料微粒对污染物的载体作用既有可能增加生物体内污染物的蓄积水平和毒性效应,表现出明显的

污染物增敏效应<sup>[28]</sup>;也有可能降低污染物在生物体内的生物有效性,表现出稀释和抑制作用<sup>[29]</sup>。污染物在塑料微粒表面与生物体之间的逸度梯度是影响其生物有效性的重要因素,肠道环境中持久性有机物从塑料微粒表面产生解吸的效率是其在水环境中的 2—31 倍<sup>[30—31]</sup>。

塑料微粒对污染物的载体效应也包括其对共存污染物多介质迁移转化的影响,Liu 等人<sup>[32]</sup>和 Hüffer 等人<sup>[33]</sup>发现塑料微粒对阿特拉津等农药的吸附作用可以促进这类污染物在土壤等环境介质中的迁移,其对污染物的可逆性吸附和解吸迟滞现象是产生这一促进效应的关键条件。环境因素的改变如离子强度的增加也可以通过减小塑料微粒与携带物之间的 Zeta 电位而形成易迁移的稳定原生异质团聚体,进而促进携带物在环境介质中的迁移能力<sup>[34—35]</sup>。

### 3.2 土壤微塑料的迁移行为

土壤的疏松多孔性为微塑料在土壤环境中的迁移提供了基础条件。在淋溶、重力、浮力及地下径流作用下土壤中的微塑料时刻都在经历着复杂的迁移行为,主要包括垂直迁移和水平迁移<sup>[36]</sup>。此外,不同的耕作方式、土壤理化性质、土壤动物的生长和活动、植物根系的扰动和蒸腾作用,以及微生物的生命活动对土壤微塑料的迁移也起着重要作用。David O'Connor<sup>[37]</sup>研究了五种不同粒径的 PP 和 PE 在砂柱中的迁移过程,发现粒径最小的 PE (21  $\mu\text{m}$ ) 具有最大的迁移能力,且微塑料经历多次干-湿循环后,渗透深度显著增加,渗透深度与干湿循环次数之间呈明显的线性关系( $r^2=0.817$ )。Wang 等人<sup>[38]</sup>研究了水流携带作用下不同粒径 PS 颗粒在饱和多孔介质中的迁移过程,发现微塑料在多孔介质的迁移特性强烈依赖于颗粒尺寸,高离子强度的淋溶液会导致 PS 颗粒在多孔介质中的高滞留率。平均粒径为 3.7  $\mu\text{m}$  的微塑料可以通过淋溶作用向下迁移至 70 cm 以上的土壤深处<sup>[2]</sup>。甚至有人预测,微塑料可能在淋溶作用下最终进入浅层地下水。

土壤是一种复杂的非均质介质,其环境条件(pH、离子强度、溶解性有机质等)都是影响微塑料迁移的重要因素。土壤环境中 pH 值的变化,能够引起微塑料及土壤介质表面官能团电离程度的改变,进而影响微塑料的迁移能力<sup>[39]</sup>。迁移能力通常随 pH 值的升高而增强<sup>[40—41]</sup>。溶解性有机质能通过  $\pi$ - $\pi$  键、氢键作用力等机制吸附多孔介质表面,增强介质的表面电负性,从而影响微塑料的迁移能力<sup>[42]</sup>。随着离子强度的升高,微塑料颗粒之间双电层被压缩而变薄,颗粒间静电排斥降低而易于团聚,使其迁移能力降低<sup>[32]</sup>。

耕作活动(如犁耕)可能会混合和分散土壤微塑料,导致其在土壤剖面中的迁移。同时,农药和化肥的施用可能与微塑料相互作用,改变其迁移和吸附能力,从而影响微塑料的分布。气候干燥会导致土壤裂缝的形成,为微塑料进入深层土壤提供通道。尽管这些外力作用对微塑料迁移产生一定影响,但传统耕作方式通常仅影响土壤的表层(20—30 cm),其对微塑料迁移的影响有限<sup>[2]</sup>。

土壤中的微塑料可能会附着在小型动物(如蚯蚓、螨等)的体表,或被摄食而进入其体内<sup>[43—44]</sup>。这些附着或被摄食的微塑料颗粒可以随着小型动物的活动在土壤中迁移,然后通过脱落、排泄或死亡等途径停留在其他区域。此外,植物根系的扰动(如根系运动、根系扩张)和蒸腾作用对土壤微塑料的迁移也起着重要作用<sup>[2]</sup>。例如表层土壤中的 MPs 可以通过植物根系活动进一步输送到深层土壤中<sup>[10]</sup>。研究发现小尺寸微塑料颗粒更容易吸附到种子表皮或根细胞壁上<sup>[45]</sup>,根系强壮或发育良好的植物更容易吸收微塑料<sup>[46]</sup>。

## 4 土壤微塑料的生态毒性

### 4.1 微塑料对土壤微生物的影响

微塑料在土壤环境中的积累会干扰微生物的活动,土壤微塑料如同一个载体表面可以富集大量微生物,从而影响土壤微生物生物量、多样性和群落结构<sup>[47]</sup>。研究发现 PLA 的添加对土壤微生物的多样性有直接影响,与对照处理组相比,细菌群落结构变得更加复杂,出现了厚壁菌、拟杆菌等优势菌群类型<sup>[48]</sup>。PVC 和 PE 微塑料的存在导致微生物群落结构由革兰氏阳性菌为主导向革兰氏阴性菌为主导转变<sup>[49]</sup>。此外,微塑料中添加剂的释放也会对土壤微生物产生毒性作用。例如,PVC 微塑料中氯的释放,会破坏土壤中的细菌和真菌群落<sup>[50]</sup>。Liu 等人对 92 份研究中 781 个观察结果进行了全球规模的 meta 分析,以研究 MPs 对土壤微生物群

的影响,结果表明,长期的 MPs 污染可能对土壤微生物群的结构和功能产生相当大的负面影响<sup>[51]</sup>,从而影响土壤生态系统提供生态系统服务和维持人类社会的能力。

微塑料对土壤微生物群落的干扰会影响氮循环过程,包括固氮、矿化、硝化、反硝化和厌氧氨氧化等环节。有研究报道,添加微塑料 PE 和 PP 后,土壤中变形菌门的丰度显著增加,其中包括伯克霍尔德菌(固氮菌)、假单胞菌(促进硝化和反硝化)和黄杆菌科(具有固氮能力)<sup>[52]</sup>。此外,微塑料添加还显著影响了土壤氮循环功能基因的丰度。研究表明,随着 PE 微塑料添加率的增加,氮固定和反硝化基因的相对丰度减少,而有机氮降解和合成基因增加<sup>[53]</sup>。

细菌群落是土壤中主要的酶生产者,微塑料在影响细菌群落结构的同时也在影响着土壤酶活性。例如土壤中不同类型、浓度和作用时间的 MPs 对脲酶产生不同的刺激,而脲酶可以催化尿素转化为氨。据报道,10 年的塑料薄膜覆盖使关键土壤酶(sDHA、S-UE、S-β-GC、S-Chi、cbbL、chi-A 和 β-glu)基因的表达下降,同时降低了土壤脲酶活性<sup>[54]</sup>。

4.2 微塑料对植物的影响

MPs 在土壤中广泛分布和积累,影响植物的生长和发育。研究表明,MPs 可被植物根系吸收并运输到地上组织,并对植物的许多生理生化过程产生广泛的毒性作用,如延迟种子萌发,抑制植物生长,改变根系特征,减少生物量,干扰光合作用,造成氧化损伤并产生遗传毒性<sup>[55]</sup>。不同 MPs 对植物的不同危害可能仅在特定条件下发生,这与 MPs 的性质、暴露剂量和植物种类等密切相关。不同类型微塑料对植物的影响如表 2 所示。

表 2 不同微塑料对植物的影响  
Table 2 Effects of different microplastics on plants

| 植物类型<br>Plant type           | 微塑料类型<br>Microplastics type | 微塑料浓度<br>Microplastics concentration    | 微塑料尺寸<br>Microplastics size | 影响<br>Effect                                               | 参考文献<br>References |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------|
| 玉米幼苗<br>Corn seedlings       | PS                          | 10 mg/mL                                | 0.2、0.5、1.0、2.0 μm          | 小于 2.0 μm 的 PS 可以积累并分布在所有组织中,大于 2.0 μm 的 PS 主要在木质部血管中积累和分布 | [ 56]              |
| 小麦<br>Wheat                  | LDPE                        | 1%( 质量分数)                               | 0.05—1 mm、4—10 mm           | 抑制生长、影响根际细菌群落组成和结构                                         | [ 57]              |
| 草莓幼苗<br>Strawberry seedlings | PS                          | 40 mg/L                                 | 100 nm 和 200 nm             | 可以进入根部,并运输到枝条、阻止养分运输、诱导草莓幼苗氧化应激、出现渗透胁迫                     | [ 58]              |
| 花生<br>Peanut                 | PP 和 RC                     | 1%( 质量分数)PP、1%( 质量分数)RC                 | 100 μm                      | 损害根尖细胞膜、抑制根系生长、降低植物氮吸收能力和光合速率                              | [ 59]              |
| 红树<br>Mangrove               | PE、PP 和 PVC                 | 5%( 质量分数)                               | 13—600 μm                   | 影响植物根系的生长和叶片光合作用,抑制植物的正常生长                                 | [ 60]              |
| 棉花<br>Cotton                 | PE                          | (28.00±5.29) 个/kg、(1426.67±136.49) 个/kg | <1 mm、1—3mm、3—5mm           | 抑制棉花根系增殖或伸长、籽棉产量降低                                         | [ 61]              |

LDPE:低密度聚乙烯 Low density polyethylene;RC:橡胶屑 Rubber crumb

微塑料的老化或降解会导致各种添加剂的释放,包括邻苯二甲酸酯(PAEs)、双酚 A、多溴二苯醚和重金属。研究表明,这些有毒物质可以被植物的根吸收,并引起广泛的植物毒性<sup>[62]</sup>。例如,PAEs 可以分解植物叶绿体类囊体基粒和片层,通过阻碍光合作用最终导致植物生物量的减少<sup>[63]</sup>。增塑剂显著( $P<0.05$ )抑制小麦种子萌发,影响植物抗氧化酶活性,甚至通过改变相关基因表达引发种子细胞程序性死亡<sup>[64]</sup>。

微塑料由于疏水表面和大比表面积,可用作天然载体积累不同类型的污染物。与单一污染相比,微塑料与重金属的联合作用可能会导致更强的植物毒性,主要表现在减少生物量<sup>[65]</sup>,影响光合作用和抑制根系活性<sup>[66]</sup>,引起氧化损伤<sup>[67]</sup>,并改变植物的性能和共生关系<sup>[68]</sup>。

### 4.3 微塑料对土壤动物的影响

土壤动物作为土壤食物网不可或缺的成员,发挥着关键的生态功能,如凋落物分解、养分循环和能量流动<sup>[69]</sup>。微塑料能够被土壤动物摄入和蓄积,对土壤动物生长、存活和繁殖等产生一系列毒理学影响,如肠道菌群失调、组织病理学损伤、氧化胁迫、DNA 损伤、遗传和生殖毒性、神经毒性和代谢紊乱<sup>[70]</sup>。Su 等人<sup>[71]</sup>基于 meta 分析量化了微塑料暴露下土壤动物特征从基因到生存的等级变化。结果表明,在微塑料的威胁下,土壤动物的活性氧(ROS)大幅增加 62.1%,抗氧化剂基因拷贝数增加 35.7%,抗氧化物酶活性增加 11.5%。然而,抗氧化反应并没有完全消除增加的 ROS。动物行为和生存水平的性状(如运动能力、繁殖率、生长率和存活率分别下降 22.7%、12.8%、7.5%和 3.1%)显著降低。此外,圆形微塑料对土壤动物的成活率造成严重的影响,抑制达到 16.6%。在另一项 meta 分析中也提到,MPs 会抑制动物的生长。其中动物的体长、体重、生长速率、肝脏器官重量和相对肝脏重量分别减少了 7%、5%、19%、8%和 6%,动物寿命缩短了 8%,繁殖率下降了 11%<sup>[72]</sup>。MPs 可以影响土壤动物的生长发育、运动行为和生殖等功能,其毒性作用机制与肠道损伤、机体代谢改变、氧化应激和相关基因表达异常等有关<sup>[66]</sup>。

微塑料对土壤动物的影响会随着微塑料性质(类型和大小)和实验变量(MPs 暴露的剂量和时间)的变化而变化。Kim 等人<sup>[73]</sup>研究表明,与 PE、PP 和 PS 相比,PET 对土壤动物的毒性更大,且呈剂量依赖性。在 28 d 的土壤培养试验中,与对照组相比,暴露于 1%浓度的 MPs 处理组的弹尾虫死亡率增加了 28%<sup>[74]</sup>。Huerta Lwanga 等人<sup>[75]</sup>发现,0.2%的 PE(<150  $\mu\text{m}$ )对蚯蚓(*Lumbricidae*)的生长和存活没有影响,但较高的添加量(1.2%)有抑制作用。虽然低浓度 MPs 暴露不会明显影响动物的生长和引起动物死亡,但会诱使动物组织病理损伤和免疫响应。跳虫(*Folsomia candida*)摄入粒径小于 2  $\mu\text{m}$  的 PE 颗粒后,平均爬行速度和移动距离随之下降<sup>[76]</sup>。

另外,微塑料可以与土壤中的污染物(如重金属,农药,抗生素,有机污染物等)共存,进一步改变污染物对土壤生物的影响。Zhou 等人<sup>[77]</sup>的研究表明,MPs 和镉(Cd)的联合处理比 MPs 单独处理的负面影响更大,MPs 的存在增加了 Cd 在蚯蚓体内的累积含量。PE 和吡虫啉联合暴露于 28 d 后,蚯蚓的生长抑制、氧化损伤、死亡率明显比 PE 和吡虫啉单独暴露增加<sup>[78]</sup>。跳虫(*Folsomia candida*)摄入微塑料后改变了肠道微生物群、抗生素抗性基因(ARG)图谱和组织中的同位素分馏,且吸附的磺胺甲恶唑加剧了 MPs 的影响<sup>[79]</sup>。这些结果表明,MPs 可以提高土壤污染物的有效性,增加土壤生物接触污染物的可能性。

### 4.4 微塑料对人类健康的影响

MPs 可谓无处不在,它不仅在环境中弥漫,也在我们的身体中弥漫。MPs 可以通过人们的食物、呼吸或皮肤接触等途径进入人体<sup>[66]</sup>。微塑料通过饮食被人体摄入后,不能被人体胃肠消化,大部分会随着粪便排出,小量滞留在胃肠道中。微塑料经呼吸摄入后,相对较大的微粒会被上呼吸道的黏膜和纤毛“截留”,然后随痰液等排出,更细小的颗粒会深入肺部,并有可能沉积下来。吸附到皮肤上的微塑料大部分会被皮肤屏障阻截或汗液排出,小部分则会随着皮肤破损或薄弱处渗入体内<sup>[80]</sup>。粗略估计人类平均每周可能摄入 0.1—5 g 微塑料<sup>[81]</sup>。2022 年荷兰阿姆斯特丹自由大学研究团队采用裂解-气相色谱/质谱(Py-GC/MS)技术,首次在人类活体血液中检测出微塑料颗粒,平均浓度为 1.6  $\mu\text{g}/\text{mL}$ <sup>[12]</sup>。不仅是血液,最近人们在人类胎盘和母乳中也检出了微塑料<sup>[80,82]</sup>。这些滞留在人体的微塑料颗粒并不安分,其数量日积月累,不仅会造成或加剧人体不适,并且其内含或吸附的有毒物质,会因颗粒的继续分裂破碎或体内酶的作用,慢慢地在体内脱附析出,从而抑制人肠道细胞的外排泵,诱导细胞毒性。研究发现,肠炎患者的粪便中的微塑料含量是健康者的 1.5 倍,意味着微塑料在肠炎患者肠道内有更多的堆积,可能加重了炎症<sup>[83]</sup>。在另一项研究也检测到了由微塑料引起的人类肠道细胞的氧化应激现象<sup>[84]</sup>。过量产生的 ROS 可以通过介导抗氧化系统来改变细胞的稳态。那些在生产合成纤维纺织品、棉和聚氯乙烯等企业工作的人员无疑暴露在一个更高浓度的微塑料环境下,他们患肺部相关疾病的机率可能更高<sup>[85]</sup>。

## 5 土壤微塑料污染治理

微塑料种类多,分布广,潜在的危害大,已成为全球性的环境问题而备受关注。因此,全面正确认识微塑料在环境中的载体效应、迁移行为及生态毒性,是推动 MPs 生态安全科学研究的必然要求,也是开展微塑料污染控制和减少微塑料环境污染的实际需要。目前,对于塑料垃圾的处置问题是世界公认的环境难题,传统的废塑料处理方法垃圾填埋和焚烧,容易造成二次污染。生物可降解塑料被许多业内人士认为是解决塑料污染的有效方案<sup>[86-87]</sup>。然而,也有许多学者认为,解决塑料污染的办法主要不在于开发更好的生物塑料,而在于调整经济结构来增加塑料的回收利用量和减少污染源<sup>[88-89]</sup>。Lau 等人<sup>[90]</sup>结合多年来积累的有关全球塑料流动的信息,开发了一个名为“Plastic-to-Ocean”(P<sub>2</sub>O)的模型。在模型测试的多种干预措施中(如减少塑料使用、寻找塑料的替代品、对塑料进行回收和处理等),研究人员发现,没有一种措施能单独解决问题,想要有效应对塑料污染,采取综合的办法是最优选择。

为实现微塑料污染的治理,一方面要寻找塑料的替代品和循环利用,有机构已经研发出用芦苇或甘蔗制成的吸管来代替塑料吸管,以鱼皮和红藻为原料开发塑胶替代品,用仙人掌的果实来制造无毒的可食用塑料,用废弃的渔网制成冲浪板,用塑料代替传统的道路材料。另一方面要开发新技术,有研究人员已经开发出新型仿生与生物启发膜,能够高效去除 MPs 且使用寿命长<sup>[91]</sup>。各种生物质(如玉米秸秆、硬木、松树和云杉树皮、玉米芯等)合成的生物炭在不同的环境条件下对微塑料吸附表现出高水平的去除效率(> 90%)<sup>[92]</sup>。从垃圾场中分离出的一种新型细菌菌株(蜡样芽孢杆菌)在降解 LDPE 方面具有巨大的潜力<sup>[93]</sup>。已知 PS 可以在黄粉虫的肠道中生物降解<sup>[94]</sup>。许多真菌菌株也能降解一些塑料,如 PVC, PHB 和 PLA<sup>[95]</sup>。另外,蒋等人<sup>[96]</sup>成功合成了一种可溶解的 BiOBr-OH 半导体超分子框架材料(SOF),用于降解不同官能团修饰的 PS-MPs,表现出出色的降解性能。然而,目前对于如何有效控制塑料污染还没有成功的工程案例可以借鉴。人类是命运共同体,无论是从政策层面上还是技术层面上,有关塑料污染治理方面的研究还需全球各国的通力协作。

## 6 结论和展望

微塑料种类多,分布广,潜在的危害大,已成为全球性的环境问题而备受关注。到目前为止,已经对微塑料在海洋和其他水生生态系统中的存在和生态效应进行了广泛的研究,但在土壤系统中的研究相对有限。在此,我们综述了土壤中微塑料的类型、载体效应和迁移特性,以及对微生物、动植物以及人类的影响。特别地,讨论了土壤微塑料的污染治理。然而,由于土壤性质的复杂性,为了更好地了解微塑料在陆地土壤生态系统中的发生、分布和潜在生态风险,仍需要解决一些挑战。

(1)有关微塑料方面的研究通常集中在传统塑料上,这类塑料包括 PE、PS、PP、PVC、PET 等。作为传统塑料替代品的生物可降解塑料有着不同的结构和性质,与其他共存污染物的相互作用及生态毒性效应与传统 MPs 相比必然存在着显著差异。生物可降解 MPs 可能与传统 MPs 一样有毒。然而,目前生物可降解 MPs 对土壤生物的生态风险在很大程度上仍然未知,有待进一步研究。另外,轮胎磨损微粒代表一种特殊类型的 MPs,可能对生物体产生毒性或健康影响,它们的环境行为和生态风险应该得到特别关注。

(2)目前,土壤微塑料生态风险的研究大多基于小尺度的实验室模拟条件进行的,尽管实验室模拟能较好地阐明不同因素对微塑料生态风险的影响机制,但难以准确反映真实土壤环境的复杂性,因此,迫切需要进行野外尺度的微塑料生态风险研究。

(3)微塑料是一种不均匀材料,它不仅在颗粒属性(如尺寸和形状)上不同,而且在化学成分(包括聚合物、添加剂)上也不同。微塑料含有的添加剂(如塑化剂、阻燃剂、抗氧化剂等)会在一定条件下从微塑料中浸出,从而对土壤生物产生毒害效应。然而,什么是驱动微塑料毒性的关键因素,是微塑料颗粒本身还是其含有的化学物质,目前尚不清楚。

(4)农业塑料分解后生成的微塑料通过食物链和水循环进入人体,已在人体肠、肺、血液、大脑、以及母乳

中被发现。这些外来物质可能会引发人体组织排斥和炎症,极大的危害人类健康。然而,对于微塑料在食物链中传递,并最终对人类产生健康影响的相关证据仍然不足。呼吁采取量化全球农田土壤中的微塑料含量(比如使用卫星遥感技术)、限制农用塑料的最大使用量、开发微塑料污染治理新技术、鼓励使用塑料替代品和立法等方式,为缓解土壤微塑料污染和帮助农业可持续生产提供解决方案。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Zheng X J, Sun R K, Dai Z Q, He L, Li C Y. Distribution and risk assessment of microplastics in typical ecosystems in the South China Sea. *Science of the Total Environment*, 2023, 883: 163678.
- [ 2 ] Li J, Song Y, Cai Y B. Focus topics on microplastics in soil: analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113570.
- [ 3 ] Kasirajan S, Ngouajio M. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(2): 501-529.
- [ 4 ] Zhang D, Ng E L, Hu W L, Wang H Y, Galaviz P, Yang H D, Sun W T, Li C X, Ma X W, Fu B, Zhao P Y, Zhang F L, Jin S Q, Zhou M D, Du L F, Peng C, Zhang X J, Xu Z Y, Xi B, Liu X X, Sun S Y, Cheng Z H, Jiang L H, Wang Y F, Gong L, Kou C L, Li Y, Ma Y H, Huang D F, Zhu J, Yao J W, Lin C W, Qin S, Zhou L Q, He B H, Chen D L, Li H C, Zhai L M, Lei Q L, Wu S X, Zhang Y T, Pan J T, Gu B J, Liu H B. Plastic pollution in croplands threatens long-term food security. *Global Change Biology*, 2020, 26(6): 3356-3367.
- [ 5 ] Murphy F, Ewins C, Carbonnier F, Quinn B. Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5800-5808.
- [ 6 ] Li X W, Chen L B, Mei Q Q, Dong B, Dai X H, Ding G J, Zeng E Y. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China. *Water Research*, 2018, 142: 75-85.
- [ 7 ] Kole P J, Löhr A J, Van Belleghem F G A J, Ragas A M J. Wear and tear of tyres: a stealthy source of microplastics in the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(10): 1265.
- [ 8 ] Ding J, Lv M, Zhu D, Leifheit E F, Chen Q-L, Wang Y-Q, Chen L-X, Rillig M C, Zhu Y-G. Tire wear particles: An emerging threat to soil health. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2023, 53(2): 239-257.
- [ 9 ] 韦婧, 涂晨, 杨杰, 刘颖, 黄硕需, 卜元卿, 骆永明. 微塑料对农田土壤理化性质、土壤微生物群落结构与功能的影响. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(5): 644-652.
- [ 10 ] Chang X, Fang Y, Wang Y, Wang F, Shang L Y, Zhong R Z. Microplastic pollution in soils, plants, and animals: a review of distributions, effects and potential mechanisms. *Science of the Total Environment*, 2022, 850: 157857.
- [ 11 ] Zhang P T, Yuan Y, Zhang J, Wen T Y, Wang H, Qu C, Tan W B, Xi B D, Hui K L, Tang J. Specific response of soil properties to microplastics pollution: a review. *Environmental Research*, 2023, 232: 116427.
- [ 12 ] Leslie H A, van Velzen M J M, Brandsma S H, Vethaak A D, Garcia-Vallejo J J, Lamoree M H. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 2022, 163: 107199.
- [ 13 ] Guo J J, Huang X P, Xiang L, Wang Y Z, Li Y W, Li H, Cai Q Y, Mo C H, Wong M H. Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 2020, 137: 105263.
- [ 14 ] 张凯, 孙红文. (可降解)微塑料颗粒吸附有机污染物及其生物有效性的影响. *环境化学*, 2018, 37(3): 375-382.
- [ 15 ] 张株瑞, 胡长鹰. 食品接触用聚乳酸降解性及其中的化学物质迁移. *包装工程*, 2021, 42(17): 47-54.
- [ 16 ] Peng G G, Pu Z, Chen F Y, Xu H, Cao X, Chen C C, Wang J Z, Liao Y Y, Zhu X S, Pan K. Metal leaching from plastics in the marine environment: an ignored role of biofilm. *Environment International*, 2023, 177: 107988.
- [ 17 ] 万红友, 王俊凯, 张伟. 土壤微塑料与重金属、持久性有机污染物和抗生素作用影响因素综述. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(4): 643-650.
- [ 18 ] Wik A, Dave G. Occurrence and effects of tire wear particles in the environment-A critical review and an initial risk assessment. *Environmental Pollution*, 2009, 157(1): 1-11.
- [ 19 ] 刘建超, 胡雍容. 聚氯乙烯和橡胶中化学成分的浸出行为及生态毒性. *中国环境科学*, 2022, 42(11): 5408-5417.
- [ 20 ] He S Y, Tong J, Xiong W P, Xiang Y P, Peng H H, Wang W J, Yang Y, Ye Y H, Hu M, Yang Z H, Zeng G M. Microplastics influence the fate of antibiotics in freshwater environments: Biofilm formation and its effect on adsorption behavior. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 442: 130078.
- [ 21 ] Loiseau C, Sorci G. Can microplastics facilitate the emergence of infectious diseases? *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153694.
- [ 22 ] He S Y, Jia M Y, Xiang Y P, Song B, Xiong W P, Cao J, Peng H H, Yang Y, Wang W J, Yang Z H, Zeng G M. Biofilm on microplastics in

- aqueous environment: Physicochemical properties and environmental implications. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127286.
- [23] Lu J, Yu Z G, Ngiam L, Guo J H. Microplastics as potential carriers of viruses could prolong virus survival and infectivity. *Water Research*, 2022, 225: 119115.
- [24] Wang F, Wong C S, Chen D, Lu X W, Wang F, Zeng E Y. Interaction of toxic chemicals with microplastics: a critical review. *Water Research*, 2018, 139: 208-219.
- [25] Gao X, Hassan I, Peng Y T, Huo S L, Ling L. Behaviors and influencing factors of the heavy metals adsorption onto microplastics: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 319: 128777.
- [26] Tang S, Lin L J, Wang X S, Feng A X, Yu A Q. Pb(II) uptake onto nylon microplastics: interaction mechanism and adsorption performance. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 386: 121960.
- [27] 陈蕾, 高山雪, 徐一卢. 塑料添加剂向生态环境中的释放与迁移研究进展. *生态学报*, 2021, 41(8): 3315-3324.
- [28] Jeong C B, Kang H M, Lee Y H, Kim M S, Lee J S, Seo J S, Wang M H, Lee J S. Nanoplastic ingestion enhances toxicity of persistent organic pollutants (POPs) in the monogonont rotifer *Brachionus koreanus* via multixenobiotic resistance (MXR) disruption. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(19): 11411-11418.
- [29] Koelmans A A, Besseling E, Wegner A, Foekema E M. Plastic as a carrier of POPs to aquatic organisms: a model analysis. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14): 7812-7820.
- [30] Bakir A, Rowland S J, Thompson R C. Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions. *Environmental Pollution*, 2014, 185: 16-23.
- [31] Grigorakis S, Drouillard K G. Effect of microplastic amendment to food on diet assimilation efficiencies of PCBs by fish. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(18): 10796-10802.
- [32] Liu J, Ma Y N, Zhu D Q, Xia T J, Qi Y, Yao Y, Guo X R, Ji R, Chen W. Polystyrene nanoplastics-enhanced contaminant transport: role of irreversible adsorption in glassy polymeric domain. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(5): 2677-2685.
- [33] Hüffer T, Metzelder F, Sigmund G, Slawek S, Schmidt T C, Hofmann T. Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 242-247.
- [34] He L, Wu D, Rong H F, Li M, Tong M P, Kim H. Influence of nano- and microplastic particles on the transport and deposition behaviors of bacteria in quartz sand. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(20): 11555-11563.
- [35] Dong Z Q, Zhang W, Qiu Y P, Yang Z L, Wang J L, Zhang Y D. Cotransport of nanoplastics (NPs) with fullerene ( $C_{60}$ ) in saturated sand: effect of NPs/ $C_{60}$  ratio and seawater salinity. *Water Research*, 2019, 148: 469-478.
- [36] Zhao S L, Zhang Z Q, Chen L, Cui Q L, Cui Y X, Song D X, Fang L C. Review on migration, transformation and ecological impacts of microplastics in soil. *Applied Soil Ecology*, 2022, 176: 104486.
- [37] O'Connor D, Pan S Z, Shen Z T, Song Y N, Jin Y L, Wu W M, Hou D Y. Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 527-534.
- [38] Wang Y H, Xu L H, Chen H E, Zhang M. Retention and transport behavior of microplastic particles in water-saturated porous media. *Science of the Total Environment*, 2022, 808: 152154.
- [39] Wang M, Gao B, Tang D S. Review of key factors controlling engineered nanoparticle transport in porous media. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 318: 233-246.
- [40] Sadri B, Pernitsky D, Sadrzadeh M. Aggregation and deposition of colloidal particles: effect of surface properties of collector beads. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 530: 46-52.
- [41] Tong M P, Joanson W P. Excess colloid retention in porous media as a function of colloid size, fluid velocity, and grain angularity. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(24): 7725-7731.
- [42] Dong S N, Sun Y Y, Gao B, Shi X Q, Xu H X, Wu J F, Wu J C. Retention and transport of graphene oxide in water-saturated limestone media. *Chemosphere*, 2017, 180: 506-512.
- [43] Huerta Lwanga E, Gertsen H, Gooren H, Peters P, Salánki T, van der Ploeg M, Besseling E, Koelmans A A, Geissen V. Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 523-531.
- [44] Zhu D, Bi Q F, Xiang Q, Chen Q L, Christie P, Ke X, Wu L H, Zhu Y G. Trophic predator-prey relationships promote transport of microplastics compared with the single *Hypoaspis aculeifer* and *Folsomia candida*. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 150-154.
- [45] Bosker T, Bouwman L J, Brun N R, Behrens P, Vijver M G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere*, 2019, 226: 774-781.
- [46] Yu Z X, Song S, Xu X L, Ma Q, Lu Y. Sources, migration, accumulation and influence of microplastics in terrestrial plant communities. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 192: 104635.

- [47] Ren X W, Yin S, Wang L, Tang J C. Microplastics in plant-microbes-soil system: a review on recent studies. *The Science of the Total Environment*, 2022, 816: 151523.
- [48] Liu R, Liang J W, Yang Y H, Jiang H, Tian X J. Effect of polylactic acid microplastics on soil properties, soil microbials and plant growth. *Chemosphere*, 2023, 329: 138504.
- [49] Shah T, Ali A, Haider G, Asad M, Munsif F. Microplastics alter soil enzyme activities and microbial community structure without negatively affecting plant growth in an agroecosystem. *Chemosphere*, 2023, 322: 138188.
- [50] Barili S, Bernetti A, Sannino C, Montegiove N, Calzoni E, Cesaretti A, Pinchuk I, Pezzolla D, Turchetti B, Buzzini P, Emiliani C, Gigliotti G. Impact of PVC microplastics on soil chemical and microbiological parameters. *Environmental Research*, 2023, 229: 115891.
- [51] Liu M L, Feng J G, Shen Y W, Zhu B. Microplastics effects on soil biota are dependent on their properties: a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 178: 108940.
- [52] Seeley M E, Song B, Passie R, Hale R C. Microplastics affect sedimentary microbial communities and nitrogen cycling. *Nature Communications*, 2020, 11: 2372.
- [53] Zhou Z D, Hua J F, Xue J H. Polyethylene microplastic and soil nitrogen dynamics: Unraveling the links between functional genes, microbial communities, and transformation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 458: 131857.
- [54] Iqbal S, Xu J C, Allen S D, Khan S, Nadir S, Arif M S, Yasmeen T. Unraveling consequences of soil micro- and nano-plastic pollution on soil-plant system: implications for nitrogen (N) cycling and soil microbial activity. *Chemosphere*, 2020, 260: 127578.
- [55] Zhang Z Q, Cui Q L, Chen L, Zhu X Z, Zhao S L, Duan C J, Zhang X C, Song D X, Fang L C. A critical review of microplastics in the soil-plant system: distribution, uptake, phytotoxicity and prevention. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127750.
- [56] Li H B, Chang X, Zhang J K, Wang Y H, Zhong R Z, Wang L X, Wei J, Wang Y. Uptake and distribution of microplastics of different particle sizes in maize (*Zea mays*) seedling roots. *Chemosphere*, 2023, 313: 137491.
- [57] Qi Y L, Ossowicki A, Yang X M, Huerta Lwanga E, Dini-Andreote F, Geissen V, Garbeva P. Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 387: 121711.
- [58] Zhang C, Yue N, Li X H, Shao H, Wang J, An L H, Jin F. Potential translocation process and effects of polystyrene microplastics on strawberry seedlings. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 449: 131019.
- [59] Liu Y Y, Xu F J, Ding L P, Zhang G C, Bai B, Han Y, Xiao L N, Song Y, Li Y, Wan S B, Li G W. Microplastics reduce nitrogen uptake in peanut plants by damaging root cells and impairing soil nitrogen cycling. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 443: 130384.
- [60] Chai M W, Li R L, Li B, Wu H L, Yu L Y. Responses of mangrove (*Kandelia obovata*) growth, photosynthesis, and rhizosphere soil properties to microplastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 189: 114827.
- [61] Liu B S, Li W F, Pan X L, Zhang D Y. The persistently breaking trade-offs of three-decade plastic film mulching: Microplastic pollution, soil degradation and reduced cotton yield. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 439: 129586.
- [62] Gao M L, Liu Y, Song Z G. Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-*n*-butyl phthalate in lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort). *Chemosphere*, 2019, 237: 124482.
- [63] 王晓娟, 金樑, 陈家宽. 环境激素 DBP 对拟南芥体外培养叶片超微结构的影响. *西北植物学报*, 2005, 25(7): 1362-1367.
- [64] 刘晓丹, 龚一富, 李军, 薛浚妍, 吴帆, 潘俊娟. 增塑剂对小麦种子萌发过程中细胞程序性死亡指标的影响. *麦类作物学报*, 2013, 33(2): 350-356.
- [65] Wang F Y, Zhang X Q, Zhang S Q, Zhang S W, Adams C A, Sun Y H. Effects of co-contamination of microplastics and Cd on plant growth and Cd accumulation. *Toxics*, 2020, 8(2): 36.
- [66] 李敏, 杨磊, 赵方凯, 陈利顶. 城乡景观中土壤生态系统微塑料的来源、迁移特征及其风险. *生态学报*, 2022, 42(5): 1693-1702.
- [67] Dong Y M, Gao M L, Qiu W W, Song Z G. Uptake of microplastics by carrots in presence of As (III): combined toxic effects. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411: 125055.
- [68] Wang F Y, Zhang X Q, Zhang S Q, Zhang S W, Sun Y H. Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere*, 2020, 254: 126791.
- [69] Wolters V. Biodiversity of soil animals and its function. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(4): 221-227.
- [70] Wang Q L, Adams C A, Wang F Y, Sun Y H, Zhang S W. Interactions between microplastics and soil fauna: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52(18): 3211-3243.
- [71] Su P J, Wang J, Zhang D, Chu K, Yao Y Z, Sun Q Q, Luo Y F, Zhang R J, Su X P, Wang Z C, Bu N S, Li Z L. Hierarchical and cascading changes in the functional traits of soil animals induced by microplastics: a meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 440: 129854.
- [72] Zhang J R, Ren S Y, Xu W, Liang C, Li J J, Zhang H Y, Li Y N, Liu X J, Jones D L, Chadwick D R, Zhang F S, Wang K. Effects of plastic residues and microplastics on soil ecosystems: a global meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 435: 129065.

- [73] Kim S W, Waldman W R, Kim T Y, Rillig M C. Effects of different microplastics on nematodes in the soil environment; tracking the extractable additives using an ecotoxicological approach. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(21): 13868-13878.
- [74] Ju H, Zhu D, Qiao M. Effects of polyethylene microplastics on the gut microbial community, reproduction and avoidance behaviors of the soil springtail, *Folsomia candida*. *Environmental Pollution*, 2019, 247: 890-897.
- [75] Huerta Lwanga E, Gertsen H, Gooren H, Peters P, Salánki T, van der Ploeg M, Besseling E, Koelmans A A, Geissen V. Microplastics in the terrestrial ecosystem: implications for *Lumbricus terrestris* (*Oligochaeta*, Lumbricidae). *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(5): 2685-2691.
- [76] Kim S W, An Y J. Edible size of polyethylene microplastics and their effects on springtail behavior. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115255.
- [77] Zhou Y F, Liu X N, Wang J. Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida*. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 392: 122273.
- [78] Fu H M, Zhu L Z, Mao L G, Zhang L, Zhang Y N, Chang Y M, Liu X G, Jiang H Y. Combined ecotoxicological effects of different-sized polyethylene microplastics and imidacloprid on the earthworms (*Eisenia fetida*). *The Science of the Total Environment*, 2023, 870: 161795.
- [79] Xiang Q A, Zhu D, Chen Q L, O'Connor P, Yang X R, Qiao M, Zhu Y G. Adsorbed sulfamethoxazole exacerbates the effects of polystyrene (2  $\mu\text{m}$ ) on gut microbiota and the antibiotic resistome of a soil collembolan. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(21): 12823-12834.
- [80] Campanale C, Massarelli C, Savino I, Locaputo V, Uricchio V F. A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1212.
- [81] Senathirajah K, Attwood S, Bhagwat G, Carbery M, Wilson S, Palanisami T. Estimation of the mass of microplastics ingested-A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 404: 124004.
- [82] Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, Catalano P, Notarstefano V, Carnevali O, Papa F, Rongioletti M C A, Baiocco F, Draghi S, D'Amore E, Rinaldo D, Matta M, Giorgini E. Plasticenta: first evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 2021, 146: 106274.
- [83] Yan Z H, Liu Y F, Zhang T, Zhang F M, Ren H Q, Zhang Y. Analysis of microplastics in human feces reveals a correlation between fecal microplastics and inflammatory bowel disease status. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(1): 414-421.
- [84] Wu B, Wu X M, Liu S, Wang Z Z, Chen L. Size-dependent effects of polystyrene microplastics on cytotoxicity and efflux pump inhibition in human Caco-2 cells. *Chemosphere*, 2019, 221: 333-341.
- [85] Prata J C. Airborne microplastics: consequences to human health? *Environmental Pollution*, 2018, 234: 115-126.
- [86] Tokiwa Y, Calabia B P, Ugwu C U, Aiba S. Biodegradability of plastics. *International Journal of Molecular Sciences*, 2009, 10(9): 3722-3742.
- [87] Mitra R, Xu T, Xiang H, Han J. Current developments on polyhydroxyalkanoates synthesis by using halophiles as a promising cell factory. *Microbial Cell Factories*, 2020, 19(1): 86.
- [88] Al-Salem S M, Lettieri P, Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. *Waste Management*, 2009, 29(10): 2625-2643.
- [89] Rochman C M, Kross S M, Armstrong J B, Bogan M T, Darling E S, Green S J, Smyth A R, Veríssimo D. Scientific evidence supports a ban on microbeads. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(18): 10759-10761.
- [90] Lau W W Y, Shiran Y, Bailey P M, Cook E. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, 2020, 369(6510): 1455-1461.
- [91] Zhang X, Li H N, Zhu C Y, Huang X J, Greiner A, Xu Z K. Biomimetic gill-inspired membranes with direct-through micropores for water remediation by efficiently removing microplastic particles. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 434: 134758.
- [92] Kumar R, Verma A, Rakib M R J, Gupta P K, Sharma P, Garg A, Girard P, Aminabhavi T M. Adsorptive behavior of micro(nano) plastics through biochar: co-existence, consequences, and challenges in contaminated ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 159097.
- [93] Jayan N, Skariyachan S, Sebastian D. The escalated potential of the novel isolate *Bacillus cereus* NJD1 for effective biodegradation of LDPE films without pre-treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 455: 131623.
- [94] Brandon A M, Gao S H, Tian R M, Ning D L, Yang S S, Zhou J Z, Wu W M, Criddle C S. Biodegradation of polyethylene and plastic mixtures in mealworms (larvae of *Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(11): 6526-6533.
- [95] Ghosh S K, Pal S, Ray S. Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(7): 4339-4355.
- [96] Jiang R R, Lu G H, Dang T J, Wang M, Liu J C, Yan Z H, Xie H J. Insight into the degradation process of functional groups modified polystyrene microplastics with dissolvable BiOBr-OH semiconductor-organic framework. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 470: 144401.