

土壤微塑料研究二十年演进图谱: 从全球趋势到中国方案^①

李昊^{1,2}, 王芳^{1,2,3*}

(1 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021; 2 教育部中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021; 3 林木资源高效生产全国重点实验室, 银川 750004)

摘要: 微塑料作为 21 世纪新兴环境污染物, 其环境归趋与生态风险已成为全球环境科学的研究的前沿领域。本研究基于 Web of Science 核心合集和中国知网数据库 2004—2024 年文献数据, 运用 VOSviewer 和 CiteSpace 文献计量工具, 系统解析了土壤微塑料研究的演进脉络、知识结构与前沿动态。结果表明, 国际研究聚焦于三大核心领域: ①土壤微塑料污染特征、环境行为及其生态健康效应; ②微塑料污染源解析、多介质传输与量化检测评估体系; ③区域土壤微塑料赋存特征及迁移控制治理实践。通过突现词检测发现, 2016 年以后国际研究呈现显著转向, 关键词集群从“海洋环境”“淡水系统”转向“农业土壤”“地表水–地下水界面”, 研究维度从污染表征拓展至环境过程模拟与生物毒性机制解析。国内研究则呈现出差异化特征, 可划分为 2016—2019 年、2020—2022 年、2023—2024 年 3 个阶段, 我国土壤微塑料研究领域整体呈现出从理论体系构建逐步到治理技术及措施探索的趋势。未来研究需进一步阐明微塑料–环境界面富集规律, 解析土壤功能网络响应机制, 建立标准化检测–监测–修复技术体系, 为全球土壤塑料污染防治提供系统解决方案。

关键词: 土壤微塑料; 文献计量分析; 研究热点; 演进趋势

中图分类号: X53 文献标志码: A

Unveiling Two Decades of Soil Microplastic Research: A Multi-Database Bibliometric Journey from Global Trends to China's Solutions (2004—2024)

LI Hao^{1,2}, WANG Fang^{1,2,3*}

(1 School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Regions, Yinchuan 750021, China; 3 National Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Yinchuan 750004, China)

Abstract: Microplastics, as an emerging environmental pollutant in the 21st century, have positioned their environmental fate and ecological risks at the forefront of global environmental science research. This study systematically analyzed the evolutionary trajectory, knowledge structure, and research frontiers of soil microplastic research, utilizing bibliometric tools VOSviewer and CiteSpace on literature data (2004—2024) from the Web of Science Core Collection and the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database. The results revealed three primary international research focuses: 1) Pollution characteristics, environmental behavior, and ecological-health effects of soil microplastics; 2) Source apportionment, multi-media transport, and quantitative detection/assessment systems for microplastic pollution; 3) Occurrence characteristics and migration control/remediation practices for regional soil microplastics. Burst detection analysis indicated a significant shift in international research focus post-2016, with keyword clusters transitioning from “marine environment” and “freshwater systems” towards “agricultural soil” and the “surface water-groundwater interface”. Research dimensions have expanded from pollution characterization to encompass environmental process simulation and mechanistic analysis of biotoxicity. Domestic (Chinese) research exhibited distinct characteristics, evolving through three phases (2016—2019, 2020—2022, 2023—2024), demonstrated an overall trend shifting from theoretical framework construction towards the exploration of remediation technologies and control measures. Future

①基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2024AAC03129)、宁夏大学“双一流”研究生优质课程项目(202510)和国家自然科学基金项目(42067022)资助。

* 通信作者(fangwang0820@nxu.edu.cn)

作者简介: 李昊(2004—), 男, 河南南阳人, 本科生, 主要研究方向为土壤地理与生态环境质量评价。E-mail: 18737735912@163.com

research necessitates further elucidating microplastic-environment interfacial enrichment mechanisms, deciphering soil functional network response pathways, and establishing standardized detection-monitoring-remediation technical frameworks. This will provide systematic solutions for global soil microplastic pollution prevention and control.

Key words: Soil microplastics; Bibliometric analysis; Research hotspots; Evolution trends

塑料作为 20 世纪最具变革性的人工合成材料,以高分子聚合物为核心的分子结构赋予了其独特的可塑性与多功能性^[1]。联合国环境规划署数据显示^[2],1950—2017 年间累计塑料产量达 92 亿吨,预计 2050 年将突破 330 亿吨大关。然而,目前仅 9% 的塑料废弃物得到有效回收,其余通过环境老化过程转化为更具生态威胁的微塑料(粒径<5 mm)与纳米塑料(粒径<1 μm)^[3-4],潜藏着深重的环境危机。值得注意的是,土壤作为陆地生态系统的核心载体,其微塑料赋存浓度可达海洋系统的 4~23 倍^[5]。法国约 76% 农业土壤检出微塑料污染^[6];同时我国中南地区农用土壤微塑料丰度高达 4.68×10^3 particles/kg^[7]。

当前研究已初步阐明土壤微塑料的三大环境效应:①通过改变孔隙结构诱发土壤板结(渗透率降低 53%~72%)^[8];②作为载体促进重金属/有机污染物的协同迁移(吸附容量提升 2~3 个数量级)^[9-10];③干扰微生物群落功能(氮循环酶活性抑制率达 41%)^[10-11]。这些发现虽然构建了“污染-效应”的基础认知,然而现有研究过度聚焦单一机制解析,缺乏基于文献计量的知识演进脉络解构,导致“理论认知-技术研发-治理实践”的链条断裂。进一步追溯学科发展轨迹可见,全球研究经历了从海洋到陆地的范式转移:2004 年 Thompson 团队在 *Science* 首次警示海洋塑料污染后,由此开启海洋微塑料研究热潮^[3];2016 年后关键词集群从“海洋环境”转向“农业土壤”“地表水-地下水界面”,表明土壤微塑料污染问题越来越受到重视。目前有关土壤微塑料污染治理实践方面存在显著的区域异质性,欧美国家侧重农田生态系统监测,亚洲国家则关注城市土壤复合污染,而非洲和南美地区相关研究仍处于空白状态,标准化检测体系的缺失导致技术落地困难^[12]。

鉴于此,本研究采用文献计量学知识图谱技术,整合 Web of Science(WOS)和中国知网(CNKI)双数据库 2004—2024 年文献资源,通过 VOSviewer 和 CiteSpace 软件进行协同分析,旨在解析全球土壤微塑料研究的时空演进规律,识别跨国研究的范式差异与技术鸿沟,构建污染风险评估的多维度指标体系,特别关注中国情境下的微塑料-重金属复合污染机制,以期为土壤微塑料研究相对空白状态的发展中国

家提供治理方案,更可为全球土壤塑料污染防治提供“中国方案”。

1 数据来源与分析方法

本研究外文文献数据源自美国科学信息研究所的 Web of Science(WOS)数据库。研究采用“TS=(microplastic)AND TS=(soil)”等关键词进行文献检索。2004 年,“微塑料”的概念首次被提出^[3],故选择该年份作为研究的起始年份。而 2025 年相关文献在持续更新,为包含所有出版年,因此检索时间跨度设为 2004 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日,排除了非相关论文,最终筛选出 1 010 篇有效文献。从中国知网(CNKI)获取中文文献数据,以“土壤”为主题并包含“微塑料污染”作为检索条件,时间跨度设定为 2004 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日,在排除外文期刊、会议报告等非相关文献后,最终筛选出 599 篇有效文献。

VOSviewer 和 CiteSpace 是对研究热点和主题等文献信息进行数据挖掘和可视化分析常用的软件。VOSviewer 的聚类算法较为成熟,能够更有效地将关键词进行聚类。而 CiteSpace 则能够提供更多样化的可视化类型,例如时间线图、突现词图等,能够更全面地展示研究热点和趋势。本研究综合使用文献计量分析软件 VOSviewer 和 CiteSpace,对土壤微塑料污染领域的文献进行关键词共现分析、突现分析以及时区演变分析。

2 国际研究热点与前沿

本研究利用 VOSviewer 软件,绘制了国际土壤微塑料污染研究领域的文章关键词共现网络,清晰展现了关键词间的联系及研究热点的分布格局。此外,通过 CiteSpace 对“突现词”,即在特定时期内高频引用的词汇进行深入分析,进一步揭示了国际土壤微塑料污染研究的动态演变,为把握该领域的研究前沿提供了有力依据。

2.1 国际研究热点与主题

图 1 为国际土壤微塑料研究关键词共现图,各节点表示关键词,而色彩一致的节点归属同一聚类。当前国际微塑料研究主要呈现为三大核心领域:①土壤

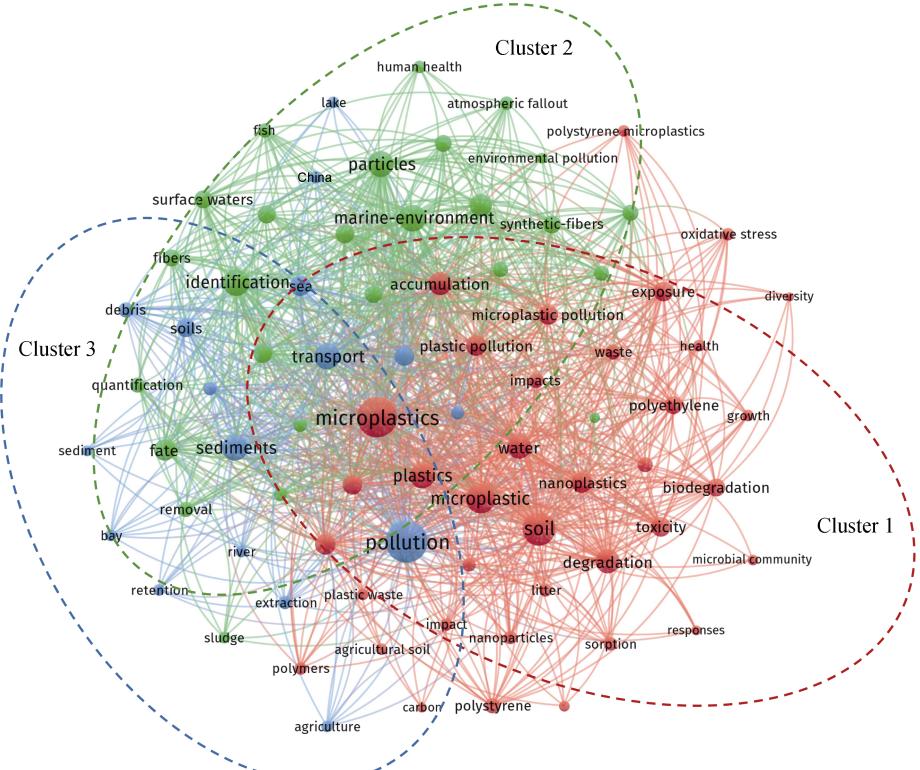


图1 国际土壤微塑料污染研究关键词共现图

Fig. 1 Co-occurrence map of keywords in international studies on soil microplastics pollution

微塑料污染特征、环境行为及其生态健康效应；②微塑料污染源解析、多介质传输与检测评估体系；③区域土壤微塑料赋存特征及迁移控制治理实践。3个聚类共同构建了土壤微塑料污染研究的“理论—方法—实践”闭环体系：聚类1通过解析污染特征、环境行为机制以及生态健康效应，为聚类2的源解析和风险评估提供理论支撑；聚类2量化多介质传输路径与健康风险，指导聚类3锁定重点治理区域与技术方向。

2.1.1 聚类1“土壤微塑料污染特征、环境行为及其生态健康效应” 此主题为图1中的红色部分，包括 accumulation、adsorption、agricultural soil、biodegradation、carbon、contamination、degradation等37个关键词。聚类1关键词主要可以分为4类：微塑料污染及类型、微塑料污染物、环境行为及过程以及生态影响与健康效应。该聚类表现出当前土壤微塑料理论层面的研究现状：聚焦微塑料的物理化学属性(如聚乙烯、聚苯乙烯等类型)及其污染来源(个人护理产品、塑料废弃物等)，揭示其在土壤环境中的吸附、迁移和降解等行为，阐明微塑料对土壤微生物群落结构、生物毒性及微塑料-重金属复合污染的生态影响机制。

根据尺寸大小，塑料碎片可以分为大塑料碎片($>5\text{ mm}$)、微塑料碎片(MP, $<5\text{ mm}$)和纳米塑料碎片

(NP, $<1\text{ }\mu\text{m}$)^[13]。根据来源，微塑料可以分为初级微塑料和次级微塑料。环境中的初级微塑料主要来源于含微塑料产品的直接释放，如用于制造塑料产品的预生产微塑料颗粒和个人护理产品添加剂的塑料微珠^[14]。次级微塑料来源于大型塑料在其环境暴露后的非生物和生物降解，包括家庭使用、工业制造废弃及汽车轮胎碎片等^[13-14]。

微塑料作为一种持久性有机污染物，容易吸附土壤中的有毒污染物，并且可以在土壤中长期存在，对土壤-植物系统产生影响，如改变土壤理化性质，改变碳/氮循环与温室气体排放，影响植物的生长和土壤无脊椎动物的发育，促进土壤中微生物群落的演替^[10, 15]。当被生物摄入后，其具有跨膜运输能力，甚至能通过血脑屏障、胎盘屏障等生物屏障，在组织和器官中蓄积，从而对生物造成严重危害^[16-17]。人体暴露于微塑料的主要途径为皮肤接触、吸入和摄入。其中摄入被微塑料污染的食物是微塑料进入人体的重要途径^[10]。

土壤的环境行为主要包括赋存、吸附、迁移以及降解等。土壤微塑料赋存形状主要包括纤维、碎片、薄膜、颗粒、条状、球形，其分布受土壤类型、深度及耕作方式影响^[16, 18]。作为一种在环境中广泛分布的新型环境持久性污染物，微塑料由于其疏水性强、

比表面积高, 易吸附共存的其他种类污染物(重金属、有机污染物等), 进而导致微塑料的表面性质发生变化^[15]。微塑料在土壤中的迁移行为主要受环境因素(如降雨、土壤质地)和自身性质(如粒径、形状)的共同影响^[19]。微塑料的降解方式主要分为非生物降解和生物降解两大类。非生物降解包括物理方法(如吸附和过滤)以及化学方法(如热氧化和光氧化)。在自然环境中, 光降解是塑料降解的主要途径^[20]。此外, 自然界中存在多种可以降解微塑料的生物, 包括动植物和微生物^[21-22]。目前研究表明土壤中的部分昆虫、细菌和真菌具有降解微塑料的能力, 相较于物理化学途径降解, 生物降解也更加环保、安全^[23]。深入研究微塑料降解机理有助于解决微塑料治理难题。

2.1.2 聚类 2 “微塑料污染源解析、多介质传输与量化检测评估体系” 此聚类为图 1 中的绿色部分, 包括 fresh-water、human health、identification、ingestion、knowledge gaps、marine-environment 等 26 个关键词。聚类 2 关键词主要可以分为 3 类: 污染来源与传输途径、健康与风险评估以及检测与量化方法。该聚类表现出当前土壤微塑料方法层面的研究现状, 即通过识别农业土壤、大气沉降、污水处理厂等污染输入途径, 明晰微塑料在土壤、淡水及生物载体等之间的跨介质迁移规律, 完善样本采集与分析技术, 并建立基于人体摄入暴露模型和归趋分析的风险评估方法。

土壤微塑料主要输入途径包括农业活动(地膜覆盖、污水污泥及堆肥施用、废水灌溉)、大气沉降、轮胎磨损及废弃物倾倒^[24]。其中污水污泥的施用是土壤微塑料污染的主要源头^[25]。大量含有微塑料的废水经过废水厂处理后会将微塑料富集于污泥中, 同时污泥中还含有氮、磷、钾等植物生长所需的重要元素, 将其进行无害化处理后可作为土壤调理剂, 提高土壤肥力, 施用时可能将微塑料带入农田土壤中, 导致土壤微塑料污染^[26-27]。

微塑料作为一种新型污染物, 具有广泛的环境分布和潜在的环境风险, 能够影响生态系统的结构和功能, 并对人体健康构成潜在威胁^[28]。因此微塑料污染的风险评估在环境保护和人类健康方面具有重要意义。现有研究采用聚合物风险指数、污染负荷指数(PLI)、地累积指数(Igeo)、潜在生态风险指数(RI)等方法对土壤微塑料风险进行评估, 评估体系尚不完善, 多沿用传统化学污染物评估方法, 缺乏针对微塑料特性的标准^[29]。

土壤微塑料的检测主要包括采样、分离和鉴定 3 个环节。采样部分根据土壤区域特点, 采用简单随机抽样、系统网络抽样或系统随机抽样等方法^[30]。土壤微塑料分离提取常采用筛分、密度分离和加压流体萃取^[31]。土壤中微塑料检测方法主要包括目检法、光谱分析法和质谱分析法^[9], 检测方法及其优缺点如表 1。

表 1 土壤中微塑料的主要检测方法
Table 1 Main detection methods for microplastics in soil

分类	方法	优点	缺点	参考文献
目检法	目视法	操作简单	存在人为误判, 还需进行表征	[32]
	光学显微镜	操作简单, 能够提供塑料尺寸形状等表观信息	耗时长, 存在人为误判, 无法辨识化学信息	
	电子显微镜	可显示颗粒表面高分辨率图像	涂层影响微塑料表面纹理和颜色, 无法辨识化学信息	
光谱分析法	傅里叶红外光谱(FTIR)	高准确性, 不受颜色影响	需复杂的前处理, 无法原位检测	[28]
	拉曼光谱法	高灵敏度, 可检测亚微米级颗粒	易受荧光干扰	
质谱分析法	热裂解-气相色谱质谱联用 (Py-GC/MS)	无需提前筛选样品, 可获得微塑料的化学组成及添加剂信息	设备昂贵, 操作复杂	[28]
	热萃取解吸气相色谱-质谱联用法(TED-GC-MS)	无需复杂的样品预处理, 分析简便快速, 能检测复杂的非均质基质	破坏性分析, 无法获得样品的表面形貌等信息	

2.1.3 聚类 3 “区域土壤微塑料赋存特征及迁移控制治理实践” 此主题为图 1 中的蓝色部分, 包括 abundance、bay、China、debris、deposition、lake、pollution、retention、river、sea、Shanghai、transport 等 17 个关键词。聚类 3 关键词主要可以分为 3 类:

地理区域与特定环境、污染介质与物理形态、污染动态与迁移过程。该聚类表现出当前土壤微塑料实践层面的研究现状即分析特定区域(如中国上海)土壤微塑料污染的分布、沉积和运输特征, 同时探讨全球范围内的污染现状和防治策略, 展现了从区域到全球层

面的污染特征研究和综合治理视角。

在过去的20年中,数百篇论文专门关注微塑料在环境中的积累,包括在海岸线上、深海中、水柱(水体表面和水底之间的垂直水域)和海冰中以及跨越生物分类的生物体中,从食物链底部的无脊椎动物到顶级捕食者,最近还包括在河流、湖泊和溪流中,在土壤中,在珠穆朗玛峰的附近,在大气层中,这些表明了微塑料污染已遍布全球^[33]。

联合国、欧盟委员会等国际组织针对微塑料污染问题制定并实施了多项法律措施,如欧盟委员会于2023年9月颁布的《Commission Regulation(EU) 2023/2055》禁止微塑料及其相关产品在欧盟境内的投放^[34]。在我国,2008年国务院办公厅发布了禁止生产、销售和使用超薄塑料袋的通知,并对塑料袋实行有偿使用政策,对塑料的使用进行了进一步的

限制^[35]。鉴于微塑料污染的全球特点,为了应对这一日益严峻的全球性问题,各国际组织、国家以及国家内部各部门需要建立一个高效的合作机制,共同对微塑料污染进行战略规划。

2.2 国际研究趋势与前沿

通过对国际微塑料研究文献中关键词的突现分析(表2),可以揭示该领域研究前沿的演进趋势。根据突现词的时间跨度和突现率,可以将研究趋势划分为3个阶段:①稳态型研究前沿:持续时间长(≥ 5 年)且强度高,代表成熟研究体系;②渐进型研究前沿:起始较晚(2017—2019年),强度高但持续时间较短(2~3年),代表快速发展的研究方向;③最新研究前沿:近期突现(2020—2021年)且强度较高,代表未来研究热点方向。此划分基于突现时间与持续性,动态揭示了领域热点演进规律以及清晰的发展路线。

表2 2015—2024年国际土壤微塑料研究突现关键词

Table 2 Keywords with the strongest citation bursts of international studies on soil microplastics (2015—2024)

关键词	突现年份	强度	起始年份	结束年份	2015—2024年
marine environment	2016	11.13	2016	2024	
synthetic fibers	2017	9.98	2017	2024	
fresh water	2018	4.65	2018	2024	
plastic debris	2017	4.48	2017	2024	
agricultural soils	2017	4.28	2017	2024	
surface waters	2018	3.62	2018	2024	
identification	2016	3.43	2016	2024	
phthalate esters	2017	3.17	2017	2024	
particles	2017	2.66	2017	2019	
ingestion	2017	2.46	2017	2019	
pollutants	2016	2.43	2016	2024	
litter	2018	2.32	2018	2024	
transport	2018	1.94	2018	2019	
mytilus edulis 1	2017	1.9	2017	2019	
debris	2017	1.8	2017	2024	
environment	2017	1.8	2017	2019	
plastic waste	2018	1.68	2018	2019	
sewage sludge	2018	1.62	2018	2024	
persistent organic pollutants	2018	1.51	2018	2019	
extraction	2017	1.48	2017	2019	
atmospheric fallout	2020	2.84	2020	2024	
gut microbiota	2020	2.28	2020	2024	
Polycyclic aromatic hydrocarbons	2020	2.19	2020	2024	
marine debris	2021	1.68	2021	2024	
dissolved organic matter	2020	1.59	2020	2024	

2.2.1 稳态型研究前沿

marine environment、synthetic fibers、plastic debris 和 identification 等长期

受研究者广泛关注,并进行了深入的研究。全球对于不同环境介质中微塑料的研究是从海洋环境切入和

展开的^[36]。经过长期研究已经能够确定典型的土壤微塑料污染物，如合成纤维及塑料碎片等物质。合成纤维在土壤微塑料污染中受到研究者关注的是其来源、环境行为和生态影响^[37]。此外，塑料碎片也是土壤微塑料污染中的另一重要组成部分。塑料碎片通过农业地膜、污水污泥、有机肥料以及大气沉降等途径进入土壤^[38]。土壤微塑料检测方法长期以来就受到研究者的重点关注，不同的检测方法和计量方式可能会影响最终的检测结果，因此未来亟需建立统一的检测方法和计量标准。

2.2.2 演进型研究前沿 演进型研究前沿是指发展趋势逐渐增强的高突现性关键词。此类突现性词语有 particles、ingestion 和 transport 等，表明研究越来越关注土壤微塑料在土壤环境中的迁移过程以及通过食物链富集放大效应。微塑料进入土壤后，迁移、转化和生物反应会在物理、化学和生物因素的共同作用下发生，对土壤环境的负面影响是多方面的^[19]。目前的大多数研究均表明，很多畜牧业产品已经受到微塑料的污染，即使含量极少，但是这些微塑料通过食物链不断富集后，可能在人体内大量累积，最终可能会对机体造成很大的损害^[39]。

2.2.3 最新研究前沿 最新研究前沿是指 2021—2024 年间出现在文献中的高突现性关键词，主要有

atmospheric fallout、gut microbiota、polycyclic aromatic hydrocarbons 和 dissolved organic matter。这一时期热点话题表明土壤微塑料污染领域的最新研究前沿主要集中在微塑料的来源、对土壤微生物和溶解有机物的影响，以及与其他污染物的复合污染效应等方面。不同圈层间微塑料的迁移成为土壤微塑料源解析的重要途径，如微塑料的大气沉降^[40]。由于人类活动的影响，微塑料在环境中已广泛存在，并且其作为农药、重金属和抗生素等污染物的重要载体，可能会加剧土壤污染和毒性^[41-44]。随着研究领域的不断扩展，生物工程领域研究发现微塑料(MPs)被生物摄食会造成肠道的潜在危害，从免疫调节到药物代谢，肠道微生物群在宿主生理的各个方面都发挥相应的效应^[45]。

3 国内研究热点与趋势

国内土壤微塑料污染研究关键词时区分异图谱如图 2 所示。关键词节点所处时间段代表该关键词首次出现的年份，若新的关键词与前期关键词在同一文章出现时两个关键词之间会有线段连接，根据节点大小及分布能够判断研究的热点和态势。

从研究阶段和内容，并根据土壤微塑料研究的关键词时区分异知识图谱来看，国内土壤微塑料研究可

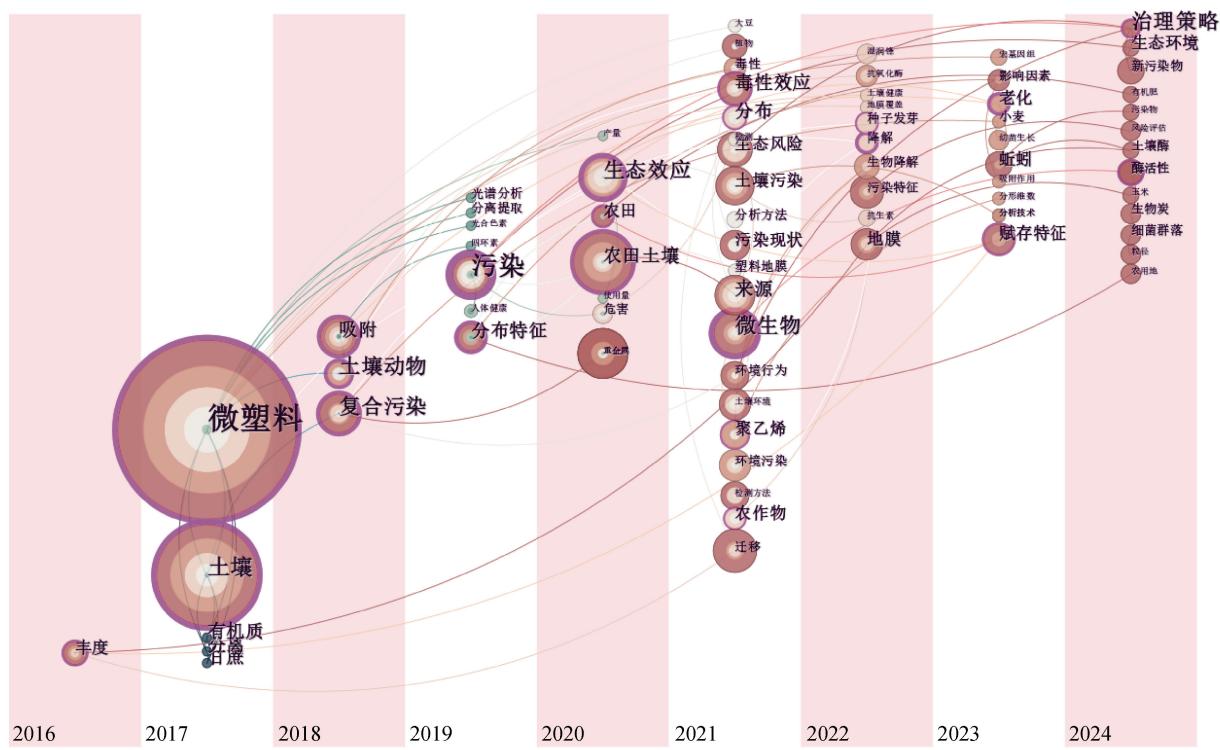


图 2 国内土壤微塑料污染研究关键词时区图

Fig. 2 Timezone view of keywords evolution in domestic studies on soil microplastic pollution

划分为：2016—2019年、2020—2022年、2023—2024年3个阶段。2016—2019年，关键词逐渐增多，但由于研究领域处于初始阶段，关键词数量相对稳定。2020—2022年，关键词大幅涌现，处于领域研究的快速增长期，注重土壤微塑料机理研究。2023—2024年，关键词数量相对稳定，处于领域研究的稳定期，转向对污染治理策略的研究。

2016—2019年，国内逐渐开展微塑料在土壤环境中的污染状况研究。此阶段国内研究者们初步对土壤微塑料的分离、提取及分析的技术和方法进行探索，在此基础上分析土壤环境中的微塑料丰度及分布状况，并评估微塑料对土壤动物以及人体健康的影响。在土壤微塑料检测方面，周倩等^[46]首次采用自行改进设计的连续流动—气浮分离一体化装置，有效分离和提取了潮滩土壤样品中微塑料，并结合扫描电子显微镜-能谱仪(SEM-EDS)对微塑料表面的微观特性进行了表征，探明了滨海潮滩土壤中微塑料的丰度。在土壤微塑料丰度及分布状况方面，由于该领域的研究处于起步阶段，只能基于有限研究材料得出结论：微塑料在空间上呈现分布不均的现象。这可能与地区自然地理特点、发展程度和人口密集程度等相关，但确切因素需要进一步研究^[47]。在微塑料对土壤环境影响方面，微塑料通过物理、化学、生物等多种方式可能对土壤动物、植物、微生物甚至经食物链

最终对人体健康造成影响，同时也有研究发现微塑料可作为抗生素载体导致土壤的复合污染现象^[47-48]。

2020—2022年是国内土壤微塑料研究的快速增长期，研究焦点已从单纯的土壤微塑料污染分布与特征分析转向探讨微塑料在土壤中的环境行为及其生态环境影响。通过关键词时区分异知识图谱并结合文献可知，该阶段研究主要聚焦于农田土壤。农田土壤微塑料来源途径多样，其中塑料地膜是最主要的污染源^[49]。对于土壤微塑料的环境行为，部分研究者对土壤微塑料的赋存、迁移及降解等行为进行研究与探讨，尤其是微塑料在土壤环境中与重金属等污染物质形成的复合污染现象受到重点关注。土壤微塑料比表面积大、疏水性强，因此，它们很容易吸附土壤重金属^[50]，主要吸附机理如图3所示。吸附机制主要包括静电引力和化学键合机制^[41]。静电引力吸附机制指表面呈电负性的微塑料易通过静电作用吸附Cu²⁺、Cd²⁺、Pb²⁺等重金属阳离子^[51]。此过程主要受微塑料极性的影响，极性较小的微塑料更易带负电，会与带正电的重金属离子通过静电作用相互结合^[52]。化学键合机制是指微塑料表面的一些官能团可与重金属离子通过化学键结合^[41]。土壤环境中的微塑料在老化及风化过程中，经历各种物理、化学和生物作用，其中生物作用指在生物(细菌、真菌、藻类等)的作用下，使聚合物表面性质发生改变或机械强度降低的过

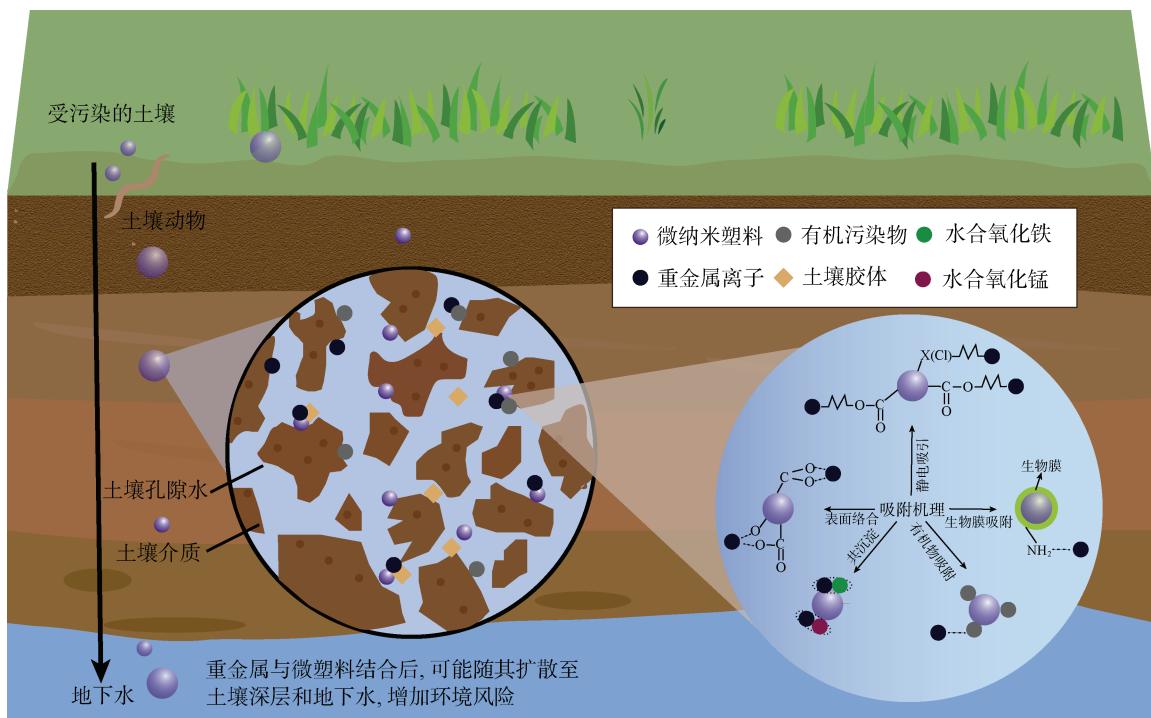


图3 土壤微塑料与重金属吸附机理

Fig. 3 Mechanism of soil microplastics and heavy metal adsorption

程, 最终导致土壤微塑料理化性质发生显著改变^[53]。一方面, 老化导致了微塑料形态变化, 常表现为表面粗糙度增加、裂纹产生、碎片化以及比表面积增大等; 另一方面, 老化使微塑料表面含氧官能团增加(如羟基—OH、羧基—COOH、羰基 C=O)^[51, 53]。微塑料的粒径细小、比表面积大以及孔隙率高, 同时具有表面的极性官能团, 从而引起有机污染物吸附作用增强, 金属离子能与塑料表面的带电区或中性区域发生络合作用, 与铁锰氧化物产生吸附或共沉淀作用等^[51]。微塑料难以降解, 长期滞留土壤并易迁移, 因此微塑料与重金属结合后, 可能随其扩散至土壤深层和地下水, 增加环境风险^[41]。微塑料对生态系统具有多方面的负面影响, 它不仅抑制作物生长, 干扰其生理过程并降低产量, 还对土壤动物的健康构成威胁, 影响其生存、生长和繁殖^[54]。

2023—2024 年是国内土壤微塑料研究的理论应用时期, 我国此阶段微塑料研究聚焦于土壤微塑料污染的影响因素、土壤生物对微塑料迁移的影响以及生物防治策略。当微塑料进入土壤环境后, 由于其老化使得污染程度大幅增加。有研究指出, 微塑料老化会改变其表面特性, 进而影响其吸附和迁移能力, 甚至可能导致所含污染物的释放^[55]。当前土壤生物对微塑料迁移的影响研究相对缺乏, 向黎等^[56]研究发现, 蚯蚓活动能促进微塑料向下迁移, 但作用随土层加深减弱; 生物活动与塑料特性共同调控该迁移过程。在防治措施方面, 研究发现, 生物质炭在修复微塑料污染土壤方面具有显著的效果^[57]。生物质炭具有高抗分解性、高比表面积和高碳氮比, 常被用作改善土壤质量的土壤改良剂。生物质炭因其特殊的孔隙结构具有良好的土壤养分保持能力^[57-58]。冉泰山等^[58]将生物质炭施用于微塑料污染的石灰性土壤中, 发现生物质炭能够有效改善土壤的理化性质, 并促进土壤细菌群落的结构和功能恢复。在微塑料污染的土壤中施入生物质炭后能较好地改善土壤理化性质, 从而影响土壤微生物群落结构, 减小微塑料污染对土壤细菌丰度的影响程度。土壤微生物群落组成的变化会进一步影响土壤微生物的功能, 如微生物生长、代谢以及一些功能基因的相对丰度^[57, 59]。

4 结论

1) 国际土壤微塑料污染研究呈现出三维聚焦态势: ①环境行为与生态效应, 围绕微塑料在土壤—植物系统中的迁移转化规律及其对土壤微生物群落、酶活性的影响机制展开研究; ②检测技术与风险评估,

重点关注微塑料的高效分离提取技术优化、痕量检测方法创新及基于生态毒理效应的风险评价模型构建; ③区域特征与全球治理, 解析不同气候带、土地利用类型下的污染分布规律, 探索“源头控制—过程阻断—末端修复”的全链条防控策略。三大领域既保持相对独立性, 又在复合污染机制研究、标准化监测体系构建等方面形成交叉融合。

2) 研究前沿演进呈现阶段性特征: ①稳态期(2004—2015 年), 长期聚焦微塑料粒径分布、表面化学特性等基础科学问题; ②转型期(2016—2020 年), 在纳米塑料环境行为、微生物降解机制等方向持续深化; ③创新期(2021—2024 年), 新兴污染物交互作用、数字孪生技术在污染预测中的应用成为突破点。关键词共现图谱显示, 研究主题具有显著的继承性与拓展性, 体现出该领域在基础理论研究与技术创新间的动态平衡。

3) 国内研究呈现追赶式发展轨迹。早期研究集中于农田生态系统中微塑料的空间分布特征与环境行为解析, 近年来研究深度显著提升: ①污染机制层面, 开展微塑料—重金属/有机污染物复合污染的协同效应研究; ②治理技术层面, 开发生物质炭吸附、功能菌剂降解等绿色修复技术; ③政策响应层面, 参与制定农用薄膜标准, 推动限塑令在农业领域的落地实施。当前研究热点与国际前沿形成有效对接, 在区域污染特征研究方面展现独特优势。

5 展望

基于 20 年研究脉络的梳理, 未来需在 3 个方面深化探索, 以破解土壤微塑料污染治理的瓶颈。

1) 深化基础理论认知, 攻克关键科学难题: ①微塑料—环境界面反应的分子机制; ②土壤食物网中微塑料与关联污染物的物质流追踪; ③根际微域多相介质中微塑料的分配与归趋; ④长期低剂量暴露的生态阈值与累积效应。

2) 检测标准需逐渐统一化: ①短期制定深层土壤采样规范, 可融合黄土高原钻孔技术经验; ②中期建立聚合物光谱数据库, 重点收录中国农膜特征光谱; ③远期开发污染热点遥感反演算法(空间精度 $\geq 1 \text{ km}^2$, 非直接识别微塑料), 同步将生物有效性参数纳入生态风险指数(MP-ERI)。

3) 区域适配的技术集成: ①基于中国实践, 在碱性土壤修复方面, 验证菌根—零价铁对 PP/PS 的协同降解(石灰性土壤中 $\geq 83\%$); ②针对热带稻作区研发抗高湿生物质地膜, 避免传统 PE 膜碎片化; ③政策机制层面推广“地膜碳积分”制度等。

参考文献：

- [1] Thompson R C, Moore C J, vom Saal F S, et al. Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends[J]. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 2009, 364(1526, Plastics, the Environment and Human Health): 2153–2166.
- [2] Cincinelli A, Martellini T, Guerranti C, et al. A potpourri of microplastics in the sea surface and water column of the Mediterranean Sea[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 110: 321–326.
- [3] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic?[J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838.
- [4] Verma K K, Song X P, Xu L, et al. Nano-microplastic and agro-ecosystems: A mini-review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1283852.
- [5] Auta H S, Emenike C U, Fauziah S H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions[J]. *Environment International*, 2017, 102: 165–176.
- [6] Palazot M, Soccalgame L, Froger C, et al. First national reference of microplastic contamination of French soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 918: 170564.
- [7] 吴婷, 焦畅洋, 焦海华. 我国农用土壤微塑料赋存特征及其影响因素的 Meta 分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(1): 498–509.
- [8] 刘春锐, 李泽贤, 隋嘉, 等. 微塑料对土壤环境的影响及未来展望[J]. *环境科学与管理*, 2024, 49(11): 160–165.
- [9] 梁旭军, 任玉静, 丁玲, 等. 微塑料的检测方法、污染特征、环境行为及生态风险[J]. *化学进展*, 2025, 37(1): 16–31.
- [10] 杨杰, 涂晨, 袁宪正, 等. 土壤-植物系统中微/纳塑料的环境过程和生态效应[J]. *化学进展*, 2025, 37(1): 89–102.
- [11] 姜丽思, 刘子瑞, 姜美琪, 等. 微/纳米塑料对农作物的毒性效应研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2025, 20(1): 265–279.
- [12] Yu H, Zhang Y, Tan W B, et al. Microplastics as an emerging environmental pollutant in agricultural soils: Effects on ecosystems and human health[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 855292.
- [13] Mariano S, Tacconi S, Fidaleo M, et al. Micro and nanoplastics identification: Classic methods and innovative detection techniques[J]. *Frontiers in Toxicology*, 2021, 3: 636640.
- [14] Wu P F, Huang J S, Zheng Y L, et al. Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184: 109612.
- [15] 刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 等. 土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展[J]. *环境科学*, 2023, 44(11): 6267–6278.
- [16] 王储, 刘霞, 王萌, 等. 微塑料在土壤中的赋存特征、吸附和迁移机制[J]. *中国科学: 化学*, 2024, 54(12): 2463–2479.
- [17] Yong C Q Y, Valiyaveetil S, Tang B L. Toxicity of microplastics and nanoplastics in mammalian systems[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(5): 1509.
- [18] 李为明, 徐雷, 张李昶, 等. 滨海盐渍化土壤微塑料赋存特征及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(8): 5325–5335.
- [19] 李鹏飞, 侯德义, 王刘炜, 等. 农田中的(微)塑料污染: 来源、迁移、环境生态效应及防治措施[J]. *土壤学报*, 2021, 58(2): 314–330.
- [20] 黄志琴, 徐颂军, 秦俊豪. 微塑料降解的主要方法、影响因素及环境风险[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(2): 134–141.
- [21] 李连祯, 周倩, 尹娜, 等. 食用蔬菜能吸收和积累微塑料[J]. *科学通报*, 2019, 64(9): 928–934.
- [22] 郭鸿钦, 杨凯, 崔丽. 环境微塑料的微生物降解[J]. *化学进展*, 2025, 37(1): 112–123.
- [23] 杨文硕, 梁鑫, 王旭刚, 等. 微塑料对土壤理化性质和生物特性的影响及其降解研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(16): 20–29.
- [24] En-Nejmy K, El Hayany B, Al-Alawi M, et al. Microplastics in soil: A comprehensive review of occurrence, sources, fate, analytical techniques and potential impacts[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 288: 117332.
- [25] Carr S A, Liu J, Tesoro A G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants[J]. *Water Research*, 2016, 91: 174–182.
- [26] Yang G H, Zhu G Y, Li H L, et al. Accumulation and bioavailability of heavy metals in a soil-wheat/maize system with long-term sewage sludge amendments[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(8): 1861–1870.
- [27] Corradini F, Meza P, Eguiluz R, et al. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 411–420.
- [28] 张鑫, 赵保卫, 刘辉, 等. 土壤中微塑料分析、环境行为及风险研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2024, 47(5): 143–159.
- [29] 张彦, 窦明, 王飞宇, 等. 卫河流域新乡段土壤微塑料赋存特征及其生态风险评估[J]. *环境科学*, 2025, 46(2): 1168–1180.
- [30] Möller J N, Löder M G J, Laforsch C. Finding microplastics in soils: A review of analytical methods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(4): 2078–2090.
- [31] 宋君, 夏鑫鑫, 朱昱. 环境中微塑料的分析技术研究进展[J]. *分析试验室*, 2025, 44(4): 617–628.
- [32] 熊新港, 殷伟庆, 常铖炜, 等. 农田土壤微塑料的检测及环境行为研究进展 [J]. *土壤通报*, 2024, 55(3): 886–900.
- [33] Thompson R C, Courtene-Jones W, Boucher J, et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned?[J]. *Science*, 2024, 386(6720): eadl2746.

- [34] European commission. Commission regulation (EU) 2023/2055 of 25 September 2023 amending Annex XVII to regulation(EC) No 1907/2006 of the european parliament and of the council concerning the registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals(REACH) as regards synthetic polymer microparticles(text with EEA relevance)[EB/OL].(2023-09-27) [2023-11-29]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/2055/oj>.
- [35] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于限制生产销售使用塑料购物袋的通知(国办发〔2007〕72号)[N]. 中国政府网: https://www.gov.cn/zhuanti/2015-06/13/content_2879030.htm.
- [36] 李卓然, 季民, 赵迎新, 等. 全球微塑料研究现状及热点可视化剖析[J]. 环境化学, 2022, 41(4): 1124–1136.
- [37] 延雨宸, 杨忠芳, 余涛. 土壤中微塑料的来源、生态环境危害及治理技术[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 770–788.
- [38] 张蕾, 孙东, 张建强, 等. 农膜微塑料与酞酸酯在土壤中迁移的研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(5): 938–947.
- [39] 刘鑫蓓, 董旭晟, 解志红, 等. 土壤中微塑料的生态效应与生物降解[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 349–363.
- [40] Rezaei M, Abbasi S, Pourmahmood H, et al. Microplastics in agricultural soils from a semi-arid region and their transport by wind erosion[J]. Environmental Research, 2022, 212: 113213.
- [41] 曹可, 刘雪松, 苏海磊, 等. 土壤中微塑料和重金属的复合污染: 原理及过程[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1675–1684.
- [42] 寇诗棋, 关卓, 鲁旭阳, 等. 土壤中微塑料迁移及其对有机污染物的影响研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(3): 457–470.
- [43] 李凯贺, 门聪, 程世昆, 等. 土壤中微塑料与抗生素吸附、迁移及复合毒性研究进展[J]. 环境科学, 2025, 46(8): 5271–5282.
- [44] 石天池, 王志强, 曹园园, 等. 农用地土壤中重金属水平及潜在生态风险评价——以宁夏石嘴山地区为例[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 180–183.
- [45] 刘明亮, 李晨, 潘彦丹, 等. 肠道菌群介导微塑料致小鼠损伤的系统综述[J/OL]. 中国环境科学. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250205.001>.
- [46] 周倩, 章海波, 周阳, 等. 滨海潮滩土壤中微塑料的分离及其表面微观特征[J]. 科学通报, 2016, 61(14): 1604–1611.
- [47] 侯军华, 檀文炳, 余红, 等. 土壤环境中微塑料的污染现状及其影响研究进展[J]. 环境工程, 2020, 38(2): 16–27, 15.
- [48] 杨杰, 仓龙, 邱炜, 等. 不同土壤环境因素对微塑料吸附四环素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2503–2510.
- [49] 邓爱琴, 赵保卫, 朱正钰, 等. 土壤中微塑料的来源与其生态毒理效应研究进展[J]. 环境化学, 2023, 42(2): 345–357.
- [50] Fu L N, Li J, Wang G Y, et al. Adsorption behavior of organic pollutants on microplastics[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 217: 112207.
- [51] 徐笠, 李海霞, 韩丽花, 等. 微塑料对典型污染物吸附解吸的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 961–969.
- [52] 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[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 643–650.
- [53] 马思睿, 李舒行, 郭学涛. 微塑料的老化特性、机制及其对污染物吸附影响的研究进展[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 3992–4003.
- [54] 王子菡, 王亚晶, 杜亚欣, 等. 微塑料对土壤微生物活性和碳代谢功能的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(12): 7295–7303.
- [55] 谢洁芬, 章家恩, 危晖, 等. 土壤中微塑料复合污染研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2022, 31(12): 2431–2440.
- [56] 向黎, 杨杰, 涂晨, 等. 生物和非生物因素对蚯蚓驱动土壤中微塑料垂向迁移的影响研究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(5): 599–607.
- [57] 王海龙, 卢春梅, 王晓明, 等. 土壤微/纳米塑料对植物的毒害效应及防治措施研究进展[J]. 环境化学, 2025, 44(6): 2027–2043.
- [58] 冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 等. 生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4507–4518.
- [59] 吴启华, 陈迪文, 周文灵, 等. 生物炭添加对微塑料污染土壤养分和微生物群落及功能的影响[J]. 环境科学研究, 2024, 37(12): 2757–2770.