

微塑料在土壤中的污染效应及治理技术分析

李振懿¹, 蔡河山¹, 李达光², 陈柱宏¹, 冯业竣¹, 方 铮¹, 黎晓霞^{1*}

(1. 佛山大学环境与化工学院, 广东 佛山 528000; 2. 顺德职业技术学院轻化与材料学院, 广东 佛山 528000)

摘要: 微塑料作为四大新污染物之一, 近年来受到全球广泛关注, 其在土壤中的污染途径及防治技术是当前研究的热点。微塑料在土壤环境中不断扩散和累积, 对土壤的理化性质及其中的生物造成潜在威胁和危害。文章旨在系统综述土壤中微塑料的污染状况及其对土壤中动物、植物和微生物的影响, 并提出相关防治技术, 以减少土壤中微塑料的危害, 有效保护土壤生态环境。

关键词: 微塑料; 土壤; 污染效应; 治理技术

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0185-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.033

Analysis of Pollution Effects and Treatment Technology of Microplastics in Soil

LI Zhenyi¹, CAI Heshan¹, LI Daguang², CHEN Zhuhong¹, FENG Yejun¹, FANG Zheng¹, LI Xiaoxia^{1*}

(1. School of Environment and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China; 2. School of Light Chemical and Materials, Shunde Vocational and Technical College, Foshan 528000, China)

Abstract: Microplastics, as one of the four major emerging pollutants, have garnered widespread global attention in recent years. The pathways of their pollution in soil and the prevention and control technologies have become hotspots in current research. Microplastics continuously disperse and accumulate in the soil environment, posing potential threats and hazards to the physicochemical properties of the soil and its biota. The article aims to systematically review the pollution status of microplastics in soil and their impacts on soil fauna, flora, and microorganisms, and to propose relevant prevention and control technologies to mitigate the hazards of microplastics in soil and effectively protect the soil ecological environment.

Keywords: Microplastics; Soil; Pollution effects; Treatment technology

2004年, THOMPSON等在《Science》杂志上首次提出微塑料的概念, 将直径小于5 mm的细小塑料污染物定义为微塑料^[1]。微塑料主要来源于塑料产品的降解、工业活动以及个人护理产品等。根据来源, 微塑料可分为初级微塑料和次级微塑料, 而直径小于1 μm的塑料颗粒则被定义为纳米级微塑料^[2]。微塑料广泛存在于大气、水、土壤和海洋等各种环境中^[3], 已成为一种难以治理和控制的新污染物。微塑料对大气、水体和土壤生态系统造成的危害已引起广泛关注, 尤其在土壤方面, 中国西北部土壤中微塑料的污染情况较为严峻, 以陕西省为例, 农田中微塑料浓度约为1 430~3 410个/kg^[4]。面对土壤中日益严峻的微塑

料污染问题, 亟须寻求有效的治理方法。本文旨在系统综述土壤中微塑料的污染状况及其对土壤中动物、植物和微生物的影响, 并提出相关的防治技术。

1 微塑料在土壤中的分布状况

微塑料种类繁多, 其中进入土壤环境的微塑料主要包括聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)和聚氯乙烯(PVC)^[5]。土壤中的微塑料主要来源于工业、农业及农业灌溉污水、生产活动遗留的塑料残余废物、污泥、垃圾填埋场渗流、塑料废弃物以及大气沉降等^[6]。MAI等^[7]研究表明, 在珠江三角洲地区, 微塑料的丰度与人口密度呈显著正相关。土壤中的微塑料分布广泛^[8], 不仅在物理特性上

收稿日期 Submitted date 2025-03-21; 修回日期 Revised date 2025-04-20; 录用日期 Accepted date 2025-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107031); 广东省普通高校青年创新人才类项目(2024KQNCX169); 佛山市自筹经费类科技创新项目(2420001003624); 特里尔应用技术大学合作教育项目(FD2019001)

*联系人, 450507294@qq.com

引用本文: 李振懿, 蔡河山, 李达光, 等. 微塑料在土壤中的污染效应及治理技术分析[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 185-189.

Citation: LI Z Y, CAI H S, LI D G, et al. Analysis of pollution effects and treatment technology of microplastics in soil[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 185-189.

存在差异,还可能向环境中释放多种有毒有害化学物质,如增塑剂和稳定剂等^[9]。

表1为国内外部分地区土壤微塑料分布特征。从表1可以看出,土壤中的微塑料在全球各地均有分布且种类繁多,多集中于农用地,这与农用塑料薄膜的使用密切相关。

表1 国内外部分地区土壤微塑料分布特征

Tab.1 Distribution characteristics of soil microplastics in some areas at home and abroad

国家或地区	取样地点	微塑料种类	平均丰度/(个·kg ⁻¹)	文献来源
中国北京	菜园	PE、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)	440±179	邱名德等 ^[11]
中国上海	蔬菜地	—	78±13	徐征鑫 ^[12]
中国广东	果园	PE、PP	188~279	肖进男等 ^[13]
中国贵州	烟草地	—	4 810	代良羽等 ^[14]
澳大利亚	—	PP、PE、聚醚砜树脂(PES)	1 500	LU等 ^[15]
墨西哥	花园	—	870	陈占等 ^[16]
智利	农用地	—	540±320	钱益斌等 ^[17]

注:“—”表示原文献未提及。

2 土壤中新污染物微塑料的影响效应

表2为微塑料对土壤理化性质的影响及其作用机制。

表2 微塑料对土壤理化性质的影响及其作用机制

Tab.2 Effect of microplastics on soil physicochemical properties and their action mechanism

性质	变化	原因	文献来源
物理性质	降低最大持水能力	PE降低了土壤中的小孔隙体积	杨文硕等 ^[18]
	影响土壤团聚体的稳定	随微塑料浓度的增大,团聚体质量平均直径和几何平均直径减小	陈荣桓等 ^[19]
化学性质	提高pH值	微塑料对四环素的吸附作用	杨杰等 ^[20]
	有机磷、有机碳含量下降	微塑料可吸附重金属等污染物	贾涛等 ^[21]

2.1 微塑料对土壤中植物的影响

在对植物根系造成物理损伤方面,不同粒径的微塑料表现出不同的危害形式。较大粒径的微塑料虽难以被植物根系直接吸收,却会在根系周围大量累积^[22]。在自然土壤环境中,其不规则形状严重阻碍根系的自然延伸。根系表皮细胞在与大粒径微塑料的持续摩擦和挤压过程中,完整性受到破坏,导致根系对水分和养分的吸收效率显著降低。李曦彤等^[23]研究表明,粒径超过100 nm的微塑料颗粒因空间位阻被细胞壁阻隔。以农业生产中的常见情况为例,块状或纤维状的大粒径微塑料会缠绕根系,限制根系生长空间,减少根系分支,缩短根系长度,最终影响植物的整体生长发育^[24]。小粒径微塑料具有更强的侵入性,能够深入植物组织内部,堵塞植物的气孔和细胞连接^[25]。气孔是植物与外界环境进行气体交换和水分蒸腾的关键通道,若被微塑料堵塞,植物的呼吸作用和蒸腾作用将无法顺利进行,进而无法与外界环境进行有效的物质交换^[26]。陆灿等^[27]研究发现,植物的蒸腾作用对微塑料的迁移具有重要作用,微塑料可通过维管系统被转移到植物的其他部位。微塑料还干扰植物的光合作用,土壤环境中微塑料的存在会使植物叶片中叶绿素含量降低,降幅约为5.74%^[28]。叶

据调查,土壤中微塑料的含量与农用地膜使用量呈显著相关性^[10]。不同地区的微塑料分布也存在差异,这可能与当地的气候和资源条件有关。例如,在中国海南,热带季风海洋性气候以及丰富的光、热、水资源促进土壤微塑料的迁移与扩散^[11]。

从表2可以看出,微塑料的特性导致土壤理化性质发生改变,进而对土壤中的动植物及微生物产生影响。

绿素是植物进行光合作用的核心物质,其含量减少会直接影响植物对光能的吸收和利用能力。光合作用是植物将光能转化为化学能、合成有机物的关键生理过程,叶绿素含量的降低会导致光合效率下降,使植物无法积累足够的能量和物质^[29]。在实际田间观察中,受微塑料影响的植物常出现生长缓慢、叶片发黄、植株矮小等症状,严重时甚至会导致植物死亡^[30]。以水稻为例,图1为微塑料对水稻的毒性效应。

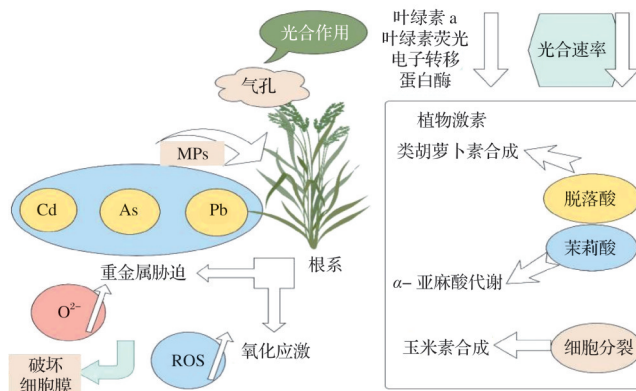


图1 微塑料对水稻的毒性效应

Fig.1 Toxic effects of microplastics on rice

2.2 微塑料对土壤中动物的影响

微塑料本身含有添加剂、染料等有毒有害物质^[31],当动物误食微塑料后,其中的有毒物质可能会释放出来,进而对动物的身体产生毒害作用。此外,微塑料还可能吸附环境中的污染物,例如重金属、农药等^[32],会增加动物接触这些污染物的风险。表3为土壤中典型动物受微塑料污染的影响。从表3可以看出,土壤中的动物会受到微塑料污染的影响,主要体现在肠道、摄食、免疫反应及毒性等方面,进而影响动物的繁殖和发育等功能。研究表明,微塑料被土壤动物摄入后,会导致动物的器官和组织衰竭,并引发炎症反应。此外,土壤中的动物通过取食活动转移微塑料,这成为微塑料迁移和转化的重要途径之一^[33]。

表3 土壤中典型动物受微塑料污染的影响

Tab.3 Typical animals in soil are affected by microplastic pollution

动物	影响	文献来源
蚯蚓	肠道损伤、繁殖受损及免疫反应改变	刘航等 ^[34]
变形虫	氧化损伤、神经毒性	谢福武等 ^[35]
线虫	咽部抽动速率降低,影响摄食	张诗晴等 ^[36]
跳虫	组织抗生素抗性基因的毒性	王储等 ^[37]
蚂蚁	运动障碍、肠道损伤	胡双庆 ^[38]

2.3 微塑料对土壤中微生物的影响

土壤中的微生物能够被微塑料吸附,形成独特的微塑料生物膜^[39]。由于不同微生物会吸附不同类型的微塑料,这种生物膜中的微生物群落可能与周围土壤中的微生物群落存在差异^[40]。微塑料改变了土壤微生物的群落结构。徐文卿等^[41]研究表明,微塑料作为微生物的附着基质,可能促进某些特定菌群的增殖,同时抑制其他敏感菌群的生长。例如,微塑料增加了土壤中放线菌的丰度,降低了变形菌的比例,从而改变了土壤微生物群落结构^[42]。此外,微塑料的化学组成会进一步加剧这种选择性压力,影响微生物群落的稳定性。微塑料可以通过直接或间接途径干扰土壤微生物的生理功能^[43],也可能释放有毒化学物质抑制微生物的代谢活性^[44]。微塑料还可能改变土壤酶的活性,例如降低纤维素酶、脲酶的活性,从而阻碍土壤的养分循环^[45]。微塑料还可能成为微生物基因水平转移的载体,促进抗性基因的传播^[46]。王喜英等^[47]研究表明,微塑料表面的生物膜为微生物提供基因交换的场所,增加了抗性基因的扩散风险。此外,微塑料可能保护病原菌免受环境压力的影响,增加其在土壤中的存活和传播能力。

3 土壤中微塑料的防治技术

3.1 物理分离法

物理分离法是指利用物理分离技术对土壤中的微塑料进行提取和分离,主要包括磁性分离法、密度分离法和泡沫浮选法等^[48]。磁性分离法主要通过磁粉产生的磁场作用实现微塑料的分离^[49]。密度分离法是提取微塑料的典型方法之一,通过使用特定的NaCl溶液并结合振荡和

离心操作来分离微塑料^[50]。

3.2 化学法

化学法包括光催化降解法、Fenton氧化法和热解法等,这些方法通过化学反应将土壤中的微塑料转化为小分子或低聚物。

3.2.1 光催化降解法

光催化技术因其颗粒粒径和材料结构的特性,能够有效去除微塑料^[51]。复合光催化剂通常由两种或多种不同材料组成。JIANG等^[52]利用新型四元层状双氢氧化物复合光催化剂CuMgAlTi-R400,在可见光照射下对微塑料进行光催化降解。经过300 h的可见光照射,微塑料的平均粒径比初始平均粒径减小54.2%。ZHANG等^[53]指出,一种新型的石墨相氮化碳/二氧化钛(g-C₃N₄/TiO₂)复合材料异质结光催化剂能够增强电子-空穴对的形成,从而有效去除微塑料。石墨相氮化碳/二氧化钛/废棉基活性炭(g-C₃N₄/TiO₂/WCT-AC)三元复合光催化材料增加了活性位点的数量。在可见光照射200 h、pH值为7的条件下,加入50 mg g-C₃N₄/TiO₂/WCT-AC复合光催化材料后,PE微塑料的去除率达到67.58%。LU等^[54]合成一种三元异质结催化剂Mo₃Fe₅,并合理构建Mo₃Fe₅异质结构。该结构作为一种性能优异的压电光催化剂,通过Fe_{1-x}S、FeMoO₄与MoS₂之间的交叉异质结,凭借三者间的强协同作用,显著提升了界面电子调制和内部电场调控能力。三元异质结构、材料自身的压电响应特性以及光照条件共同为H₂O₂的生成提供有力支持,促进活性氧物种的快速活化,从而高效降解微塑料。在压电光催化体系中,Mo₃Fe₅催化剂展现出强大的降解能力,在30 h内成功将58.46%的PS微塑料降解,处理后的微塑料颗粒几乎完全破碎。

3.2.2 Fenton氧化法

Fenton反应是一种Fe²⁺和H₂O₂在酸性条件下生成羟基自由基的高级氧化技术。羟基自由基具有很强的氧化能力,能够有效降解微塑料^[55]。SUJATHAN等^[56]使用Fenton试剂从污泥中提取微塑料,对于粒径大于20 μm的颗粒,提取效率约为78%。Fenton工艺具有很强的耦合性,可以轻松与其他工艺结合,从而实现对微塑料的高去除率^[57]。其中,热芬顿氧化法是一种基于Fenton反应的高级氧化技术。该技术利用高温促进Fe²⁺和H₂O₂之间的反应,加速羟基自由基的生成,同时降低反应的活化能,从而实现对微塑料的高效降解。ORTIZ等^[58]采用热芬顿氧化法对PE微塑料进行降解研究。在温度为80 °C、pH值为3、H₂O₂浓度为1 000 mg/L、Fe²⁺浓度为10 mg/L的条件下,经过7.5 h反应,PE微塑料的质量损失率约为10%。研究还发现,随着微塑料粒径的减小,氧化效率显著提高。当微塑料粒径为20~50 μm时,PS微塑料质量损失率可达20%。LIU等^[59]使用Fenton试剂和Fe²⁺活化的过氧单硫酸盐产生自由基以促进尼龙6和PS的降解。经过处理后,PA6和PS的质量损失率分别为25.6%和22.1%。

3.2.3 热解法

热解法是在无氧或低氧条件下,加热微塑料等有机物质使其分子内的化学键断裂,产生气体和一些固体产物。郝正卿等^[60]指出,热解过程可以改变土壤中微塑料的性质,包括强度、弹性和韧性等。热解法主要包括4种类型:分步热解、催化热解、共热解和联合热解。张康莹等^[61]研究指出,分步热解处理是基于微塑料热解过程中卤素释放温度与焦油生成温度的差异进行的。在350℃热解30 min的条件下,PVC的脱氯效率可达98.74%。严臻睿等^[62]采用分析催化热解证明合适的催化剂可以提高土壤中微塑料分解的催化效率。王铁等^[63]研究麦秆与PS塑料的共热解特性。通过分析实际失重与理论失重的差值($\Delta\alpha$),发现 $\Delta\alpha$ 越大,组分间的相互作用越强。在质量比为1:1时, $\Delta\alpha$ 变化最大,表明生物质与塑料共热解具有协同作用。DEMIN等^[64]对塑料联合热解模型进行分析,发现在650℃的温度水平下,最终液态和气态非冷凝部分的总产率高达93%,煤渣和灰分的产率分别为5%和2%。当空气供应量(ER)小于0.3时,不完全燃烧产物中乙炔和乙烯的浓度会增加;而当ER为0.3~0.6时, H_2 、 CO 、 CH_4 等成分的体积分数也呈现明显的变化趋势。具体而言,当ER为0.3时, H_2 的体积分数为4.81%, CO 的体积分数为30.14%, CH_4 的体积分数为6.06%;而当ER变为0.6时, H_2 的体积分数降至5.14%, CO 的体积分数降至18.01%, CH_4 的体积分数则大幅减少至 10^{-8} 以下。上述结果表明,温度水平和空气供应量决定了联合热解的效果。

3.3 生物降解法

土壤中的微塑料可通过生物降解法处理,该方法主要利用微生物分泌的酶来降解微塑料。图2为微生物降解微塑料的4个阶段。从图2可以看出,微生物通过分泌酶,经综合作用、解聚、同化及转化等一系列过程,最终将微塑料转化为无污染的 CO_2 和 H_2O 等产物。

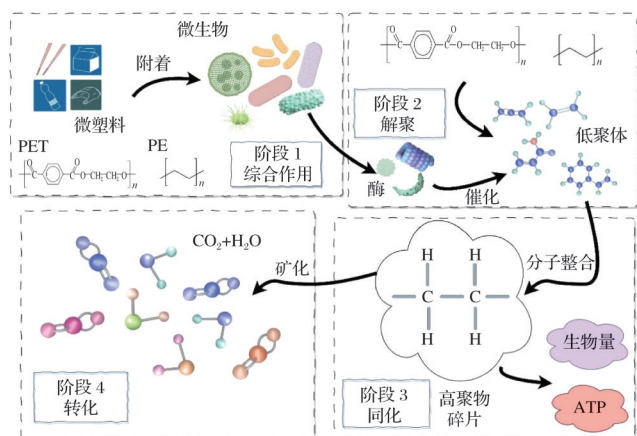


图2 微生物降解微塑料的4个阶段

Fig.2 Four stages of microbial degradation of microplastics

4 结论

微塑料作为一种新污染物,在土壤中分布广泛且污染

途径多样。其不仅影响土壤本身的理化性质,还对土壤中的动物、植物及微生物产生影响。目前,虽然在化学高级氧化法应对微塑料污染方面已有较深入的研究,但在生物防治领域仍存在明显不足。面对土壤微塑料污染的挑战,未来应进一步加强微塑料的源头管控,推动综合防治技术的开发,深入研究微塑料的环境行为和生态效应,提升全社会对土壤微塑料污染问题的关注度。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 包振宗,侯艳艳.环境中微塑料的老化特性及对污染物吸附影响的研究进展[J].塑料科技,2023,51(10):102-106.
- [3] 孙梦瑶,郭家阳,王欣奕,等.微塑料来源、分布及其对植物、动物和人体危害研究进展[J].应用生态学报,2024,35(8):2301-2312.
- [4] 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.
- [5] 江俊涛,陈宏伟,阎薪竹,等.聚丙烯微塑料添加对大豆和花生生长及生理生态特征的影响[J].农业环境科学学报,2023,42(4):761-768.
- [6] 依代倩,农传江,王成尘,等.土壤微塑料对农作物的危害作用机制与防治措施[J].环境科学,2025,46(1):510-522.
- [7] MAI Y Z, PENG S Y, LAI Z N, et al. Measurement, quantification, and potential risk of microplastics in the mainstream of the Pearl River (Xijiang River) and its estuary, Southern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(38): 53127-53140.
- [8] 李信茹,董翠敏,石峰,等.微塑料对土壤生态系统的影响及其修复技术[J].环境工程技术学报,2024,14(3):732-741.
- [9] 李岩,陈海燕,黄玮钰,等.海南岛不同功能区海滩微塑料的污染特征及生态风险[J].安全与环境工程,2025,32(1):21-32.
- [10] 张彦,宾明,郝松泽,等.中国农田土壤微塑料赋存特征研究进展及展望[J].灌溉排水学报,2024,43(12):11-20.
- [11] 邱名德,谢福武,葛成军,等.海南岛北部农业土壤微塑料赋存特征与分布状况[J].中国无机分析化学,2025,15(7):1027-1037.
- [12] 徐征鑫.典型覆膜区域棉田土壤微塑料分布特征研究[D].阿拉尔:塔里木大学,2023.
- [13] 肖进男,张珍明.农田土壤中微塑料的来源、赋存特征及其潜在风险[J].中国塑料,2024,38(9):137-144.
- [14] 代良羽,高维常,张淑怡,等.贵州覆膜烟田土壤中微塑料丰度与赋存特征研究[J].安徽农业大学学报,2024,51(2):291-296.
- [15] LU H C, CAO W, JONES S, et al. Microplastic in Australian processed organics: Abundance, characteristics and potential transport to soil ecosystem[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 375: 124359.
- [16] 陈占,杨旅,刘海龙,等.土壤中微塑料污染及处理技术综述[J].安徽农业科学,2024,52(23):16-19.
- [17] 钱益斌,何小康,杨帅,等.典型热带区域农用地微塑料残留特征及种植类型影响[J].安全与环境学报,2024,24(11):4475-4483.
- [18] 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.
- [19] 陈荣桓,余瑶,黄珊,等.聚乙烯微塑料浓度对黑土团聚体特征及其稳定性的影响[J].土壤通报,2023,54(1):56-66.
- [20] 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.

- [21] 贾涛, 薛颖昊, 靳拓, 等. 土壤中微塑料的来源、分布及其对土壤潜在影响的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(5): 202-216.
- [22] 闫妍, 韩莹, 项生, 等. 地膜覆盖对蔬菜生产和农田环境的影响[J]. 宁夏农林科技, 2024, 65(10): 9-13.
- [23] 李曦彤, 盛优莹, 张玲玉, 等. 新污染物在水土食物链中的迁移转化行为[J]. 农业环境科学学报, 2025(3): 617-629.
- [24] 喻晨. 聚乙烯微塑料对豌豆生长及土壤特性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [25] REHMAN A, ZHONG S, DU D, et al. Unveiling the microplastics degradation and its transformative effects on soil nutrient dynamics and plant health: A systematic review[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2025, 54: 25-42.
- [26] 董晓, 丁海兵, 乔馨越, 等. 聚苯乙烯微塑料对杜氏盐藻生长及低分子量有机酸释放的影响研究[J]. 海洋环境科学, 2024, 43(2): 252-261.
- [27] 陆灿, 姜翠玲, 冯亚坤, 等. 两种沉水植物对聚乳酸微塑料胁迫的生长和生理响应[J]. 环境科学学报, 2024, 44(11): 378-385.
- [28] 刘勇, 马杰, 冯冰聪, 等. 微塑料迁移及其复合污染对土壤生态系统的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2025(3): 537-553.
- [29] 刘健, 胡智慧, 宋博雅, 等. 秸秆促腐还田耦合氮肥类型对黄淮海地区鲜食玉米生长和氮素利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2026, 43(1): 246-253.
- [30] 王琼, 戴宇如, 陈夕军. 微塑料对植物生长和抗病性影响的研究进展[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2025, 46(1): 11-20.
- [31] 彭亘. 工业区河流微塑料污染特征及其对微生物群落负载的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2025.
- [32] 王嘉嘉, 王佩瑶, 王成浩, 等. 土壤中微塑料的检测及其对土壤生态环境的影响[J]. 塑料科技, 2022, 50(10): 108-112.
- [33] 刘超. 城市雨水设施中微塑料的释放及迁移行为研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.
- [34] 刘航, 苏宁, 成宇涛, 等. 塑料垃圾填埋衍生的微塑料环境污染风险[J]. 化学进展, 2025, 37(1): 32-45.
- [35] 谢福武, 吴思怡, 田毓婷, 等. 海南儋州农用地土壤微塑料赋存含量与分布特征[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(5): 159-170.
- [36] 张诗晴, 李雯雯, 段伊蕊, 等. 聚苯乙烯纳米塑料与辐对秀丽隐杆线虫运动行为的影响及食物链传递特征[J]. 生态毒理学报, 2025(2): 396-404.
- [37] 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.
- [38] 胡双庆. 上海郊区农田土壤微塑料和6种邻苯二甲酸酯污染特征及生态风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(7): 975-984.
- [39] 肖传岐. 干湿交替条件下微塑料在土壤中的老化及对土壤微生物的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [40] 顾昊宇, 薛银刚, 胡敏, 等. 污水不同类型微塑料生物膜特征及其对磷元素转化的影响[J]. 环境科学学报, 2024, 44(6): 113-122.
- [41] 徐文卿, 刘雨森, 胡敏, 等. 微塑料对砷污染土壤中微生物群落和砷形态转化的影响[J]. 分析测试学报, 2024, 43(8): 1220-1226.
- [42] 杜整. 滴灌条件下棉田土壤微塑料迁移规律研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2024.
- [43] 陈冠霖, 王兰, 唐景春. 土壤微塑料对微生物及温室气体排放影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(5): 653-660.
- [44] 李志颖. 微塑料对污泥厌氧发酵的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- [45] 杨光蓉, 陈历睿, 林敦梅. 土壤微塑料污染现状、来源、环境命运及生态效应[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 353-365.
- [46] MIGUEL S V, LÓPEZ R L, ESTÉVEZ A M, et al. Microplastics as carriers of antibiotic resistance genes in agricultural soils: A call for research[J]. *Pedosphere*, 2025, 35(1): 12-16.
- [47] 王喜英, 张露露, 赵辉, 等. 土壤微塑料来源及其对土壤氮循环影响的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2024, 52(7): 114-121.
- [48] 白润昊, 崔吉晓, 范瑞琪, 等. 农田土壤地膜源微塑料分离检测方法优化[J]. 中国环境科学, 2023, 43(5): 2404-2412.
- [49] XU Y F, ZHANG P T, ZHANG R, et al. Separation and degradation techniques for microplastics in soil environments[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 71: 107302.
- [50] SAKIN E, DILEKOĞLU M F, YANARDAĞ İ H. Unseen threat: The devastating impact of microplastics on soil health in agricultural lands[J]. *Catena*, 2025, 253: 108904.
- [51] 关羽辰. 基于g-C₃N₄改性复合材料的制备及光催化应用分析[D]. 佳木斯: 佳木斯大学, 2024.
- [52] JIANG S Y, YIN M S, REN H X, et al. Novel CuMgAlTi-LDH photocatalyst for efficient degradation of microplastics under visible light irradiation[J]. *Polymers*, 2023, 15(10): 2347.
- [53] ZHANG C X, HUANG L, NEKLIUDOV A. Construction of loading g-C₃N₄/TiO₂ on waste cotton-based activated carbon S-scheme heterojunction for enhanced photocatalytic degradation of microplastics: Performance, DFT calculation and mechanism study[J]. *Optical Materials*, 2024, 154: 115786.
- [54] LU Y R, DONG Y B, LIU W, et al. Piezo-photocatalytic enhanced microplastic degradation on hetero-interpenetrated Fe_{1-x}S/FeMoO₄/MoS₂ by producing H₂O₂ and self-Fenton action[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 508: 160935.
- [55] 孙瑞瑞. 微塑料源碳基催化剂非均相Fenton催化降解四环素的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [56] SUJATHAN S, KNIGGENDORF A K, KUMAR A, et al. Heat and bleach: A cost-efficient method for extracting microplastics from return activated sludge[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, 73(4): 641-648.
- [57] 李艳. 废旧塑料制备改性超交联树脂及CO₂捕集[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2024.
- [58] ORTIZ D, MUNOZ M, NIETO-SANDOVAL J, et al. Insights into the degradation of microplastics by Fenton oxidation: From surface modification to mineralization[J]. *Chemosphere*, 2022, 309: 136809.
- [59] LIU B, JIANG Q X, QIU Z H, et al. Process analysis of microplastic degradation using activated PMS and Fenton reagents[J]. *Chemosphere*, 2022, 298: 134220.
- [60] 郝正卿, 贾亚婷, 侯彬, 等. 环境中微塑料检测和降解研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(8): 27-31.
- [61] 张康莹, 武云飞, 王德超, 等. 预脱氯处理PVC残渣和平朔煤共热解的协同效应研究[J]. 燃料化学学报, 2021, 49(8): 1086-1094.
- [62] 严臻睿, 谢林洲, 商辉. 废塑料催化热解催化剂研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(1): 173-179.
- [63] 王铁, 许开立, 李季硕, 等. 麦秆与废聚苯乙烯泡沫塑料共热解特性研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 426-433.
- [64] DEMIN A, PAVLOV G, KHASIYATULLOV M. Thermo-chemical analysis and modeling of combustion of waste pyrolysis gaseous products[C]/E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021, 247: 01056.