

微塑料污染对土壤质量和微生物的影响、进展与展望

吴静妍¹, 尤丽娜², 李颖杰³, 孙博¹, 刘杭³, 王蒙¹, 张磊^{1*}

(1. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心), 长春 130033; 2. 吉林省农业广播电视学校, 长春 130022; 3. 吉林农业大学资源与环境学院/吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室, 长春 130118)

摘要: 微塑料(MPs)是一种在大气、水体和土壤中普遍存在的新型污染物质, 水生环境中微塑料污染的研究已有广泛研究。研究表明, 微塑料对土壤质量构成严重威胁, 土壤微塑料污染已成为国内外研究的一个热点问题。本文就土壤微塑料的来源成因、微塑料对土壤质量的影响, 以及对土壤微生物的影响进行了综述, 主要包括: 微塑料对土壤理化性质的影响、对土壤酶活性的影响、对土壤微生物群落的影响。

关键词: 微塑料; 土壤微生物; 土壤理化性质; 酶活性

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2025)06-0040-05

Effects of Microplastic Pollution on Soil Quality and Microorganisms: Progress and Prospect

WU Jingyan¹, YOU Lina², LI Yingjie³, SUN Bo¹, LIU Hang³, WANG Meng¹, ZHANG Lei^{1*}

(1. Jilin Academy of Agricultural Sciences(Northeast Agricultural Research center of China), Changchun 130033; 2. Jilin Agricultural Broadcasting and Television School, Changchun 130022; 3. Key Laboratory of Soil Resource Sustainable Utilization for Jilin Province Commodity Grain Bases, College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Microplastics(MPs) are emerging pollutants that are ubiquitous in the atmosphere, soil and water. Microplastic pollution was first discovered in the aquatic environment. Soil microplastic pollution is a hot issue in research at home and abroad. In this paper, the origin of soil microplastics, the effect of microplastics on soil quality and the effect on soil microorganisms were systematically reviewed. The effects of microplastics on soil microorganisms mainly include: the effect of microplastics on soil enzyme activity and the effect of microplastics on soil microbial community. The prospects for addressing key scientific issues in future research are proposed.

Key words: Microplastics; Soil microorganisms; Soil physical and chemical properties; Enzyme activity

塑料的问世,极大地改变了人们的生活与生产方式,但由于大量的废旧塑料未得到有效循环利用,从而进入海洋、大气和陆地,塑料制品的污染日益严重,已经成为一个世界性的重大问题。微塑料是最大单边粒径<5 mm 塑料的总称,分为初级微塑料和次级微塑料。微塑料包括薄膜、碎片、颗粒及球形等多种形状的聚乙烯、聚丙烯及聚酯等多种材料^[1]。早在2012年,“微塑料的累积会对土壤的特性和生物多样性产生影响”这一观点被首次提出^[2]。因此,微塑料污染问题越来越受到人们的关注,目前已成为众多学者的主

要研究领域。近年来,学者对微塑料污染问题的关注已经逐渐从水生环境扩展到陆地系统,由于受风化、雨水侵蚀等因素的影响,微塑料渗入土壤后表面会变得粗糙,并且伴有部分微塑料裂解导致微塑料颗粒变小、比表面积增大的情况,进而影响土壤的物理性质、化学性质及生物性质。微塑料不仅能在一定程度上影响土壤的容重和水分保持,而且还会对微生物群落产生一定的影响^[3]。微生物群落及其活性是评价土壤污染效应的重要指标^[4],研究显示,微塑料对土壤中的微生物群落起到选择性作用^[5],其中原理是微塑料能降低土壤pH值,进而影响根际的微生物群落多样性^[6],通过在水、沉积物和动物器官中作为一种可选择的生态位置来调节微生物群落,影响细菌和参与氮循环的特定官能团之间的相互作用等^[7]。

收稿日期: 2025-08-09

作者简介: 吴静妍(1991-),女,助理研究员,硕士,主要从事作物栽培技术研究。

通信作者: 张磊, E-mail: ccz119860327@163.com

然而,关于微塑料进入土壤改变土壤理化性质、微塑料对土壤酶活性和微生物群落的影响的相关研究较少,本文对此进行了归纳和总结。

1 微塑料污染的来源

1.1 地膜的广泛使用

微塑料进入陆地生态系统,将对其物理和能源的流动造成重大的影响^[8]。其污染形式有两种:一是点源污染,主要是由污水处理厂的废水和污泥直接排放到土壤中;二是非点源污染,包括使用农膜、垃圾填埋、堆肥等^[9]。此外,土壤农田中微塑料的来源有以下几个方面:覆膜、农田投入产品、农药塑料包装、有机肥污染、污泥、地表径流农业灌溉、大气沉降、轮胎磨粒等^[10]。

地膜即地面覆盖薄膜,用于地面覆盖,具有提高土壤温度,保持土壤水分,维持土壤结构,防止病害,促进植物生长的功能。由于其操作简单、成本低廉的特点,在农业种植中得到了很好的应用。2017年数据显示,中国每年的农业用塑料薄膜的使用量占全球70%,而塑料薄膜覆盖的陆地面积则占全球总覆盖面积90%以上^[11]。目前,中国的农业地膜回收率还不到60%,国内还没有建立起一套合理的地膜循环利用体系^[12]。因此可以在大多数地膜覆盖的农田土壤中找到微塑料^[13]。而大量的使用地膜,导致地膜塑料的土壤残留,它在紫外线辐射、沉积、侵蚀、风化等作用下导致大量的微塑料沉积在土壤表层^[14],然后经过动物摄取、雨水冲刷、农业灌溉等途径进入土壤深层,从而影响土壤微生物群落,以及土壤生态系统的稳定。

1.2 污水灌溉

全球环境恶化,水资源日益枯竭,在一些欠发达地区、缺水地区直接或间接使用污水灌溉农田的情况屡见不鲜。厨房污水、衣物洗涤剂等是生活污水的重要来源^[15]。此外,地表水体中还含有大量的微塑料。由此可以得出,不管是生活污水还是地表水的灌溉,他们都无一例外含有微塑料,同时也是土壤中微塑料的重要来源。

1.3 污泥堆肥

生活污水中大多都含有少量的塑料,需要进行净化处理。有研究表明,生活污水经过污水处理后降低了微塑料的浓度,但微塑料却没有完全降解,继续存在于污泥中^[16]。城市污水处理厂的污泥中含有大量的氮、磷、钾等营养成分,被使用到田里用于改善土壤肥力。然而,传统的污泥预处理技术很难对微塑料进行有效的脱除,使微塑

料的富集率在90%以上^[17],导致土壤微塑料丰度提高。牲畜的粪便堆肥也存在相同的问题,塑料通过食物进入牲畜体内,在动物的代谢过程中与排泄物混合,以微塑料的形式排出。由于技术上的局限性,相关研究还远远不够,但关于动物粪便中微塑料的研究已经取得了一些成果,研究表明,牲畜粪便中含有微塑料,长期使用粪肥是微塑料进入土壤的一个主要因素^[18]。

2 土壤微塑料的检测方法研究进展

国内外对微塑料的检测起步较晚,而土壤微塑料来源研究则是目前的重点。目前,常用的土壤微塑料的检测方法有:提取、分离和检测土壤微塑料。利用物理方法萃取微塑料,镊子直接取样和筛分收集微塑料^[19]。由于土壤中存在许多复杂的团聚体,这些团聚体的形成受到很多因素的影响,因此很难分离和检测微塑料。目前,广泛采用的分离技术有:密度分离法、加压流体萃取法、筛分-过滤法等。从环境介质中分离出来的样品含有多种成分,从而对微塑料的检测结果产生一定的影响,这是目前微塑料领域急需解决的问题。因此如何正确地分离出微塑料是研究人员需要关注的问题之一^[20]。根据微塑料的检测鉴定分析方法,可以将其分为物理和化学性质分析两大类。光学显微镜法、目检法和扫描电镜法是物理表征检测的主要分析技术。傅立叶变换红外光谱法(FTIR)、拉曼光谱法、扫描电子显微镜-能量色散X射线联用技术(SEM-EDS)和气相色谱-质谱联用技术是用于化学表征检测分析的常用技术。

3 微塑料对土壤质量的影响

3.1 微塑料对土壤物理性质的影响

微塑料进入土壤后,由于干湿交替、耕作措施、生物扰动等因素而发生变化。现有的研究结果显示,微塑料对土壤的容重、孔隙度、土壤持水量等有一定的影响^[21]。土壤基质与微塑料结合后,土壤中的水分子通道加快了水分的蒸发,增大了大孔隙的体积,进而导致了土壤结构的破坏。在输入聚苯乙烯后,土壤的持水性得到了明显的提高,但在聚乙烯的作用下,其持水能力没有明显的改变。颗粒微塑料对大团聚体数量和孔隙数量有很大的影响,微塑料具有较大的比表面积和较大的吸附性,从而使大团聚体的数目增大,提高了土壤团聚体稳定性^[22]。微塑料还能改善团聚

体的稳定性,改善其粒径组成^[23]。微塑料对土壤物理性质的影响幅度与微塑料的类型和性质有关。因此,从微塑料本身的特点出发,对其对土壤物理性能的影响进行深入的探讨是非常有意义的。

3.2 微塑料对土壤化学性质的影响

碳是微塑料的重要组成部分,它可以为土壤中的微生物生态系统提供必要的碳源。土壤中的碳主要来自岩石风化后的成土母质。微塑料作为一种有毒化学聚合物,其对土壤碳循环作用的影响还处于它对碳代谢功能菌群的毒性效应。Wei等^[24]研究表明,微塑料对污泥的降解有一定的影响,对有机物的水解有一定的抑制作用,从而对氢气的生成和甲烷的生成有一定的影响。林旭萌等研究发现^[25],聚醚砜(PES)微塑料会抑制厌氧颗粒污泥甲烷所产生关键酶辅酶F420的活性。Li等^[26]研究发现,在短时间内,废水中的微塑性污染会对氨氧化反应的反应速率产生不利的影响,而亚硝酸盐的氧化速率却没有明显的影响,而对反硝化反应的影响更为显著。Chen等^[27]指出,微塑料聚丙烯在水塘中形成的生物膜上氨氧化、亚硝酸盐氧化和反硝化作用均显著加强。Ren等^[28]研究发现,将聚乙烯微塑性加入肥料土壤中,3 d后 N_2O 排放减少,30 d后 N_2O 排放有所上升。由此可以看出,微塑料在氮循环中的作用是非常复杂的,不同的环境介质中,不同的材料和不同的暴露时间对氮循环的影响均可能不同。

土壤中微塑料的降解过程中会产生大量的化学物质,导致土壤的污染。同时,微量塑料还可以改变土壤的碳氮比、电导率、酸碱度。此外,微塑料具有化学结构稳定、疏水性好、面积大、不易降解等优点,可长期储存于环境中,其他污染物亦可附着于表面,如有机物、重金属等,与之发生化学反应,使土壤化学性质发生变化^[29]。

4 微塑料对土壤微生物的影响

4.1 微塑料对土壤酶活性的影响

土壤中的酶是一种具有生物活性的蛋白聚合物,它是植物根系组织分泌及动物的活动的产物。由于土壤粒子与微塑料的差异,使其在进入土壤后会改变其物理和化学性能,从而导致土壤中微生物数量与活力的变化,进而影响各种的酶活性^[30]。

微塑料对微生物量碳、氮、磷有显著的抑制作用,且根际土壤中的微生物种类有明显的差异^[31]。用聚丙烯微塑料处理土壤微生物对土壤酶活性的

影响表明,在0.1%、1%质量的聚丙烯微塑料的条件下,可以抑制土壤脱氢酶、蔗糖酶的活性,并能促进土壤中的脲酶活性,且随塑料薄膜暴露量的增加,脱氢酶的活性显著降低。这主要是因为塑料的质量分数、种类、酶种类等因素造成的^[32]。近年来研究表明,聚乙烯微塑料会影响对土壤过氧化氢酶活性,改变土壤中的微生物群落结构^[33]。微塑料的作用机制是通过影响氮转换有关的微生物、酶的活性和功能的基因,并改变氧气的通量,从而影响硝化和反硝化等过程^[34]。Huang等^[35]研究发现,暴露2 000个/kg低密度聚乙烯后,土壤脲酶活性明显增加。倪丽佳等^[36]研究发现,覆膜使脲酶活力的抑制,下降了31.6%。Fei等^[37]研究发现,提高土壤脲酶的活性的条件是加入1%低密度聚乙烯。综上所述,在一定的条件下,聚丙烯微塑料能显著提高脲酶的活力。

4.2 微塑料对土壤微生物群落的影响

由于微塑料在土壤中的降解,会产生大量的有毒物质,对土壤环境造成一定的污染,进而影响到土壤微生物。其中,最有代表性的就是邻苯二甲酸酯,已有研究显示,土壤中邻苯二甲酸和邻苯二甲酸二丁酯的含量越高,土壤中的微生物多样性就越低^[38]。已有研究表明,微生物会影响土壤中的噬菌体和细菌相关的抗生素抗性基因的产生^[39]。丁峰^[40]等通过实验得出,微塑料大小为0.15~0.20 mm、浓度为2.12 g/kg(2 000分子量)时,抑制细菌和真菌的丰富度;而浓度在2.12 g/kg(>100 000分子量)时,会使细菌和真菌的丰富度提高。另外结果显示,微塑料对根际微生物有一定的影响,如聚酯纤维能显著提高大葱根系内丛枝菌根菌丝的定殖量,聚乙烯微塑料会对丛枝菌根真菌的多样性及群落结构产生显著影响^[41-42]。聚乙烯微塑料对玉米根际微生物的影响最大,除伯克氏菌、变形杆菌的相对丰度增加以外,其他的细菌丰度有着大幅度的减少。添加微塑料能改善酸杆菌、放线菌、拟杆菌等菌门的相对丰度,而后壁菌门的相对丰度程度会明显降低。

微塑料能够间接通过化学性质来对微生物群落产生影响。塑料是一种人造的高分子聚合物,其化学成分含量很高,一旦被污染,就会引起土壤化学变化,从而影响微生物群落^[43]。李汶璐等研究发现^[44],微塑料含量的提高对微生物群落的影响较大,但添加聚乙烯(PE)、高丰度(5%~10%)聚氯乙烯(PVC)对细胞运动、膜转运蛋白和其他物质的代谢及降解有显著的促进作用,而碳水化合物

代谢、氨基酸代谢、能量代谢等功能丰度降低。此外,土壤pH值对塑料的表面性质及对污染物的吸收有较大的影响,从而影响土壤微生物丰度,使用较多的聚己二酸或对苯二甲酸丁二醇酯,会使土壤中的硝态氮和总磷浓度下降^[45-46],其对土壤营养的影响与土壤微生物的生长、繁殖有关^[47]。

5 展 望

土壤微生物在老化、迁移、降解过程中会产生大量的有毒物质,对土壤环境产生一定的影响,进而影响土壤理化性质、酶活性、土壤微生物群落,应该足够引起我们的重视。近年来,国内外学者针对农田中土壤微塑料污染危害、现状、特征及检测与分析等问题进行了深入的探讨,但有关土壤微生物污染的研究还很少,还处在摸索和积累的过程中。农田土壤中微塑料的赋存和迁移、土壤中微塑料的进一步检测及其对土壤生态环境的影响、微塑料迁移老化后对土壤微生物群落的影响、微塑料和土壤微生物之间相互影响、土壤微生物降解微塑料和土壤微生物降低微塑料对土壤的危害等方面可以作为今后的研究方向。

参考文献:

- [1] 骆永明,周倩,章海波,等.重视土壤中微塑料污染研究 防范生态与食物链风险[J].中国科学院院刊,2018,33(10): 1021-1030.
LUO Y M, ZHOU Q, ZHANG H B, et al. Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(10): 1021-1030.(in Chinese)
- [2] MATTHIAS C R. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(12): 6453-6454.
- [3] DE A A, LAU C W, TILL J, et al. Impacts of microplastics on the soil biophysical environment[J]. Environmental science & technology, 2018, 52(17): 9656-9665.
- [4] BERGKEMPER F, SCHÖLER A, ENGEL M, et al. Phosphorus depletion in forest soils shapes bacterial communities towards phosphorus recycling systems[J]. Environmental Microbiology, 2016, 18(8): 2767.
- [5] REN X W, TANG J C, LIU X M, et al. Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and the microbial community in fertilized soil[J]. Environmental Pollution, 2020, 256(C): 113347.
- [6] BANDOW N, WILL V, WACHTENDORF V, et al. Contaminant release from aged microplastic[J]. Environmental Chemistry, 2017, 14(6): 394.
- [7] ALICE A, ALEXANDER W, DAVID J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. Science of the Total Environment, 2017: 586.
- [8] 任欣伟,唐景春,于宸,等.土壤微塑料污染及生态效应研究进展[J].农业环境科学学报,2018,37(6):1045-1058.
REN X W, TANG J C, YU H, et al. Advances in research on the ecological effects of microplastic pollution on soil ecosystems [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(6): 1045-1058. (in Chinese)
- [9] 李宗超,陆峥,孙景博,等.微塑料污染监测现状与研究进展[J].中国环境监测,2022,38(4):1-12.
LI Z C, LU Z, SUN J B, et al. Current status and research progress of microplastics pollution monitoring[J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(4): 1-12. (in Chinese)
- [10] 薄录吉,李冰,张凯,等.农田土壤微塑料分布、来源和行为特征[J].环境科学,2023,44(4):2375-2383.
BO L J, LI B, ZHANG K, et al. Distribution, sources and behavioral characteristics of microplastics in farmland soil[J]. Environmental Science, 2023, 44(4): 2375-2383. (in Chinese)
- [11] 靳拓,薛颖昊,张明明,等.国内外农用地膜使用政策、执行标准与回收状况[J].生态环境学报,2020,29(2):411-420.
JIN T, XUE Y H, ZHANG M M, et al. Research advances in regulations, standards and recovery of mulch film[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(2): 411-420. (in Chinese)
- [12] 李威,苑鹤.农用地膜回收利用现状及措施研究[J].河北农机,2021(7):30-31.
LI W, YUAN H. Research on the current situation and measures of agricultural film recycling[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2021(7): 30-31. (in Chinese)
- [13] 白娜玲,张海韵,张翰林,等.不同地膜覆盖对土壤环境及芋艿生长的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(11):2569-2577.
BAI N L, ZHANG H Y, ZHANG H L, et al. Effects of different mulching films on soil environment and taro growth[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(11): 2569-2577. (in Chinese)
- [14] 王彤,胡献刚,周启星.环境中微塑料的迁移分布、生物效应及分析方法的研究进展[J].科学通报,2018,63(4):385-395.
WANG T, HU X G, ZHOU Q X. he research progress in migration, distribution, biological effects and analytical methods of microplastics[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(4): 385-395. (in Chinese)
- [15] 雷晓婷,雷金银,周丽娜,等.微塑料对农田土壤质量的.影响研究现状与分析[J].宁夏农林科技,2020,61(2):26-28.
LEI X T, LEI J Y, ZHOU L N, et al. Status and analysis of study on effects of microplastics on farmland soil quality[J]. Ningxia Journal of Agriculture, 2020, 61(2): 26-28. (in Chinese)
- [16] DE A A, KLOAS W, ZARFL C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. Global Change Biology, 2018, 24(4): 1405-1416.
- [17] 胡旭凯,桑成琛,曹萌萌,等.聚乙烯微塑料对土壤团聚体及其有机碳的影响[J].湖北民族大学学报(自然科学版),2021,39(4):476-480.

- HU X K, SANG C C, CAO M M, et al. Effects of polyethylene microplastics on soil aggregate and its organic carbon[J]. Journal of Hubei University for Nationalities(Natural Sciences Edition), 2021, 39(4): 476–480.(in Chinese)
- [18] RILLIG M C, LEHMANN A. Microplastic in terrestrial ecosystems[J]. Science, 2020, 368(6498): 1430–1431.
- [19] PRATA J C, COSTA J, DUARTE A C, et al. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: a critical review[J]. Trac Trends in Analytical Chemistry, 2019, 110: 150–159.
- [20] 查旭琼, 王娟, 郑阳. 土壤微塑料的检测方法研究进展[J]. 山东化工, 2021, 50(13): 56–58.
- ZHA X Q, WANG J, ZHENG Y, et al. Research progress in detection methods of soil microplastics[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(13): 56–58.(in Chinese)
- [21] QI Y, BERIOT N, GORT G, et al. Impact of plastic mulch film debris on soil physicochemical and hydrological properties[J]. Environmental Pollution, 2020, 266(3): 115097.
- [22] ZHANG G S, ZHANG F X, LI X T. Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment[J]. Science of The Total Environment, 2019, 670(20): 1–7.
- [23] YU J, WANG P, NI F, et al. Characterization of microplastics in environment by thermal gravimetric analysis coupled with Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 145(8): 153–160.
- [24] WEI W, ZHANG Y T, HUANG Q S, et al. Polyethylene terephthalate microplastics affect hydrogen production from alkaline anaerobic fermentation of waste activated sludge through altering viability and activity of anaerobic microorganisms[J]. Water Research, 2019, 63: 114881.
- [25] 林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 等. 微塑料 PES 与 2,4-DCP 复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1946–1955.
- LIN X M, SU C Y, WU S M, et al. Effects of PES and 2,4-DCP on the extracellular polymeric substances and microbial community of anaerobic granular sludge[J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1946–1955. (in Chinese)
- [26] LI L, SONG K, YEERKEN S, et al. Effect evaluation of microplastics on activated sludge nitrification and denitrification[J]. Science of the Total Environment, 2020, 707: 135953.
- [27] CHEN X, ZHAO Y, ZHOU H, et al. Effects of microplastic biofilms on nutrient cycling in simulated freshwater systems[J]. Science of the Total Environment, 2020, 719: 137276.
- [28] REN X, TANG J, LIU X, et al. Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and the microbial community in fertilized soil[J]. Environmental Pollution, 2020, 256(1): 1–13.
- [29] ZHOU Y W, ASHOKKUMAR V, AMOBYE A, et al. Current research trends on cosmetic microplastic pollution and its impacts on the ecosystem: A review[J]. Environmental Pollution, 2023, 320: 121106–121106.
- [30] HUANG Y, ZHAO Y, WANG J, et al. LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil[J]. Environmental Pollution, 2019, 254(Pt A): 112983.
- [31] ZHU F X, YAN Y Y, DOYLE E, et al. Microplastics altered soil microbiome and nitrogen cycling: the role of phthalate plasticizer[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 427: 127944–127944.
- [32] CHEN H Y, HAI R T, LI Q T. Effect of waste plastics recycling products on activities of soil catalase and urease[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, 4(6): 7.
- [33] 马云, 王剑. 土壤微生态系统中聚丙烯微塑料对土壤酶活性的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2022, 50(2): 216–221.
- MA Y, WANG J. Effect of polypropylene microplastics on soil enzyme activities in microenvironment[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50(2): 216–221. (in Chinese)
- [34] 卢萍, 闫振华, 陆光华. 微塑料对环境介质中氮循环的影响研究进展[J]. 环境科学研究, 2021, 34(11): 2563–2570.
- LU P, YAN Z H, LU G H. Influence of microplastics on nitrogen cycle in different environments[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(11): 2563–2570. (in Chinese)
- [35] HUANG Y, ZHAO Y, WANG J, et al. LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil[J]. Environmental Pollution, 2019, 254(Pt A): 112983.
- [36] 倪丽佳, 李非里, 刘秋亚, 等. 地膜覆盖对土壤微生态环境的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2011, 39(4): 407–410.
- NI L J, LI F L, LIU Q Y, et al. Influence of plastic film mulching on soil micro-ecological environment[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2011, 39(4): 407–410. (in Chinese)
- [37] FEI Y, HUANG S, ZHANG H, et al. Response of soil enzyme activities and bacterial communities to the accumulation of microplastics in an acid cropped soil[J]. Science of the Total Environment, 2019, 707: 135634.
- [38] KONG X, JIN D C, JIN S L, et al. Responses of bacterial community to dibutyl phthalate pollution in a soil-vegetable ecosystem[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 353: 142–150.
- [39] KIM S W, AN Y J. Soil microplastics inhibit the movement of springtail species[J]. Environment International, 2019, 126: 699–706.
- [40] 丁峰, 赖金龙, 季晓晖, 等. 聚乙烯微塑料对玉米根际土壤微生物群落结构的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 970–978.
- DING F, LAI J L, JI X H, et al. Effects of polyethylene microplastics on the microbial community structure of maize rhizosphere soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 970–978.(in Chinese)
- [41] DE SOUZA M A A, LAU C W, KLOAS W, et al. Microplastics can change soil properties and affect plant performance[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(10): 6044–6052.
- [42] WANG F Y, ZHANG X Q, ZHANG S Q, et al. Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil[J]. Chemosphere, 2020, 254: 126791.
- [43] ZHU F X, YAN Y Y, DOYLE E, et al. Microplastics altered soil microbiome and nitrogen cycling: The role of phthalate plasticizer [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 427: 127944.