

农田土壤中微塑料的赋存、迁移及生态效应研究进展

王金花, 李冰, 侯宇晴, 王兰君, 王军, 朱鲁生

引用本文:

王金花, 李冰, 侯宇晴, 王兰君, 王军, 朱鲁生. 农田土壤中微塑料的赋存、迁移及生态效应研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 951–965.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0966>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

土壤微塑料污染及生态效应研究进展

任欣伟, 唐景春, 于宸, 何娟

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1045–1058 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1409>

(微)塑料污染对土壤生态系统的影响:进展与思考

朱永官, 朱冬, 许通, 马军

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 1–6 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1427>

土壤微塑料和农药污染及其对土壤动物毒性效应的研究进展

薛颖昊, 黄宏坤, 靳拓, 陈思, 徐湘博, 李少华, 宝哲, 居学海, 习斌

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 242–251 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1248>

微塑料的环境行为及其生态毒性研究进展

刘沙沙, 付建平, 郭楚玲, 党志

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 957–969 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1016>

沈阳周边农田土壤中微塑料组成与分布

时馨竹, 孙丽娜, 李珍, 吕良禾

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1498–1508 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1502>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王金花, 李冰, 侯宇晴, 等. 农田土壤中微塑料的赋存、迁移及生态效应研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 951-965.

WANG J H, LI B, HOU Y Q, et al. Research process on the occurrence, migration, and ecological effects of microplastics in farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(5): 951-965.

农田土壤中微塑料的赋存、迁移及生态效应研究进展

王金花, 李冰*, 侯宇晴, 王兰君, 王军, 朱鲁生

(山东农业大学资源与环境学院, 山东省高校农业环境重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要:继海洋及淡水环境微塑料污染受到广泛关注后,土壤环境微塑料污染也逐渐受到重视,但基于农业生态系统视角关注土壤环境微塑料污染的研究仍相对匮乏。微塑料可通过多种途径进入农田土壤并持续累积,进而对农田土壤生态系统产生重要影响,甚至能够通过食物链威胁人类健康。本文基于CNKI中文数据库和Web of Science核心合集数据库,利用CiteSpace软件对土壤微塑料污染的研究结果和文献报道进行了分析,追踪对比了国内外研究的重点和热点。在此基础上,介绍了以农业生产活动为主的土壤微塑料来源,总结了国内外农田土壤中微塑料的丰度及分布特征,探讨了微塑料在农田土壤中的迁移行为及机制,同时从土壤理化性质以及土壤动物、植物、微生物等方面阐述了农田土壤中微塑料的生态效应。最后,提出了农田土壤微塑料污染研究中需要进一步解决的问题,并且对农田土壤微塑料污染未来的研究方向及重点进行了展望,以期对农田土壤微塑料的生态风险评估以及污染防控提供科学参考。

关键词:农田土壤;微塑料;来源;赋存特征;生态效应

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)05-0951-15 doi:10.11654/jaes.2022-0966

Research process on the occurrence, migration, and ecological effects of microplastics in farmland soil

WANG Jinhua, LI Bing*, HOU Yuqing, WANG Lanjun, WANG Jun, ZHU Lusheng

(College of Resources and Environment, Key Laboratory of Agricultural Environment in Universities of Shandong, Shandong Agriculture University, Tai'an 271018, China)

Abstract: Following widespread concern about microplastics pollution in marine and freshwater environments, microplastics pollution in farmland soil is now attracting more attention, and has become a hot research topic. Microplastics enter farmland soil through a variety of ways and continuously accumulate. This has an important impact on farmland soil ecosystems and may eventually pose a threat to human health through the food chain. In this study, CiteSpace software was used to analyze the literatures on microplastics pollution in soil, based on publications listed in the China National Knowledge Infrastructure database and the Web of Science core collection database, to track and compare the focus and hotspots of research in China and other countries. On this basis, this paper introduced the sources of microplastics in soil, mainly from agricultural production activities; summarized the abundance and distribution characteristics of microplastics in farmland soil; discussed the migration behavior and mechanisms of microplastics in farmland soil; and expounded the ecological effects of microplastics in farmland soil from the aspects of soil physicochemical properties, soil animals, plants, and microorganisms. Finally, this paper pointed out the problems that remain to be solved in the study of microplastics pollution in farmland soil and the prospects for future directions in this field. The construction of prevention and control technology systems were proposed to provide a scientific reference for ecological risk assessments and the control of microplastics pollution in farmland soil.

Keywords: farmland soil; microplastic; source; occurrence characteristic; ecological effect

收稿日期:2022-09-30 录用日期:2022-12-12

作者简介:王金花(1978—),女,博士,教授,主要从事环境污染治理与修复研究。E-mail:wjh@sdaa.edu.cn

*通信作者:李冰 E-mail:libing201709@sdaa.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42277039,42177266);泰山学者工程专项

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(42277039,42177266); The Special Funds of Taishan Scholar of Shandong Province, China

微塑料是指尺寸小于5 mm的塑料颗粒、纤维或碎片^[1]。按形成过程,微塑料可分为初级微塑料和次级微塑料。初级微塑料是指专门为特定工业或家庭用途而制造的尺寸小于5 mm的塑料微珠,如化妆品和个人护理品中所含的塑料微珠等;次级微塑料是指环境中废弃的大尺寸塑料制品在紫外线或者其他外力条件下破碎和裂解生成的塑料微粒、纤维和碎片^[2]。按化学组成,微塑料可分为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酰胺(PA)微塑料等。按形状,微塑料可分为纤维、碎片、薄膜、颗粒和泡沫等形状。由于微塑料化学性质稳定,能够在环境中长期存在,因此其作为一种新型的环境污染物受到了国内外学者的广泛关注^[3]。

早期关于微塑料的研究主要集中在海洋和淡水环境中微塑料的来源、丰度、环境行为以及生态效应等方面。已有研究表明,在海洋、海岸线、河口、水库、河流、湖泊、冰川、沉积物等各类水环境中以及水生生物中均检出了微塑料,因此,海洋被认为是微塑料的一个重要的汇^[4-7]。近年来,有研究者指出陆地环境中存在的微塑料至少是海洋环境中微塑料的4~23倍,每年仅通过污泥农用向欧洲和北美农田土壤输入的微塑料的量就远超过全球海洋和地表水中微塑料的总量^[8]。土壤,尤其是农田土壤,可能是比海洋更重要的微塑料的汇。土壤可为作物生长提供必需的矿物质元素和水分,是农业生产的基础和核心。土壤环境中微塑料的逐年累积将会导致土壤质量下降,对粮食生产构成安全隐患,其甚至能够通过食物链的累积和传递对人体健康造成威胁。因此,土壤微塑料污染作为一种新型环境问题逐渐受到重视,并成为现今研究的热点。目前已有众多文献对土壤环境微塑料污染进行了综述^[9-14],但基于农业生态系统视角关注土壤环境微塑料污染的文献综述还相对较少^[12,15-17]。

本文基于CNKI中文数据库和Web of Science核心合集数据库,利用CiteSpace软件对土壤微塑料污染的研究结果和文献报道进行分析,追踪对比了国内外研究的重点和热点。并在此基础上,介绍了以农业生产活动为主的土壤微塑料来源,总结了国内外农田土壤中微塑料的丰度及分布特征,探讨了微塑料在农田土壤中的迁移行为及机制,同时从土壤理化性质以及土壤动物、植物、微生物等方面阐述了农田土壤中微塑料的生态效应。最后,提出了农田土壤微塑料污染研究中有待进一步解决的问题,并且对农田土壤微

塑料污染未来的研究方向及重点进行了展望,以期为农田土壤微塑料的生态风险评估以及污染防控提供科学参考。

1 土壤微塑料污染相关文献可视化分析

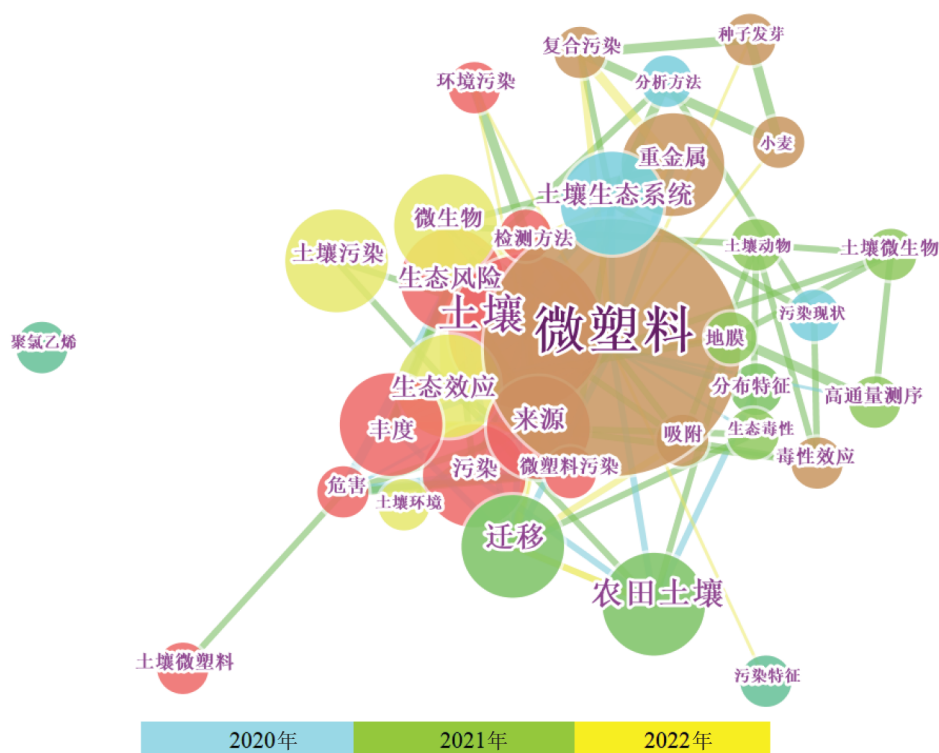
在CNKI中文数据库中,以“微塑料”和“土壤”为主题,检索得到近3 a(截至2022年9月)相关中文文献(学术期刊)共180篇,其中出现5次及以上的关键词共25个。以此为数据源,利用CiteSpace软件进行关键词共现分析,生成的关键词共现图谱如图1所示,出现频率前10的关键词如表1所示。从表1可以看出,除检索词“微塑料”和“土壤”外,农田土壤、迁移、生态风险、生态效应、来源、土壤生态系统、土壤污染、重金属为高频关键词,表明相关研究主要关注土壤(尤其是农田土壤)中微塑料的来源、迁移及污染现状,微塑料对土壤生态系统的影响,微塑料与共存污染物(如重金属)的复合污染效应,微塑料的分离与检测方法等。

在Web of Science核心合集数据库中,以“microplastics”和“soil”为主题,检索得到近3 a(截至2022年9月)相关英文文献共951篇,其中出现30次及以上的关键词共43个。以此为数据源,利用CiteSpace软件进行关键词共现分析,生成的关键词共现图谱如图2所示,出现频率前10的关键词如表1所示。从表1中可以看出,除检索词“microplastics”和“soil”外, pollution、water、sediment、transport、particle、identification、plastics、degradation为高频关键词,表明相关研究主要关注不同环境介质(土壤、水、沉积物等)中微塑料的污染现状、迁移、分离与检测方法、降解过程以

表1 关键词共现分析中出现频次最高的10个关键词

Table 1 Top 10 keywords with high frequency

CNKI数据库关键词 Keywords in the CNKI database	频次 Frequency	Web of Science数据库关键词 Keywords in the Web of Science database	频次 Frequency
微塑料	167	microplastics	567
土壤	48	pollution	293
农田土壤	18	soil	284
迁移	16	water	126
生态风险	11	sediment	124
生态效应	11	transport	123
来源	10	particle	120
土壤生态系统	10	identification	119
土壤污染	8	plastics	116
重金属	8	degradation	115



任一圆形节点表示该领域的某个关键词,节点的大小表示关键词出现的频次高低。下同。

Circular node represents a keyword in the domain, and size of the node represents the frequency of keyword occurrence. The same below.

图1 基于CNKI数据库的关键词共现图谱

Figure 1 Co-occurrence graph of keywords based on CNKI database

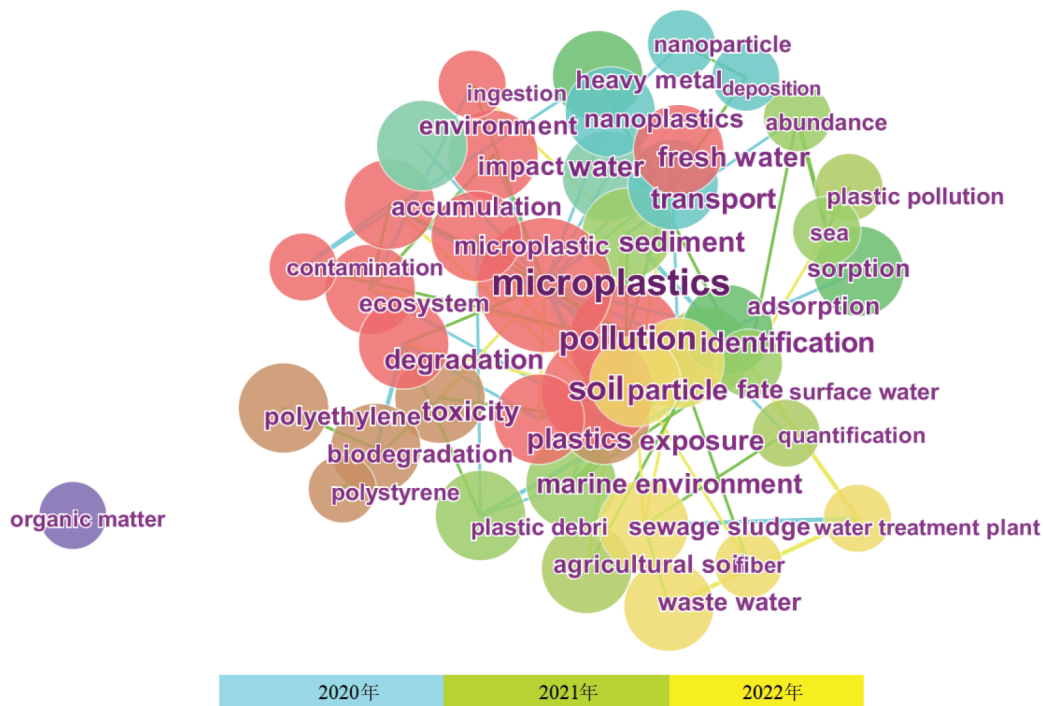


图2 基于 Web of Science 数据库的关键词共现图谱

Figure 2 Co-occurrence graph of keywords based on Web of Science database

及毒性效应等。

2 农田土壤中微塑料的来源与赋存特征

2.1 农田土壤中微塑料的来源

已有研究表明,农田土壤普遍存在微塑料污染现象,这与人类农业生产活动密切相关^[15]。农田土壤中微塑料的来源可分为直接来源和间接来源(图3)。其中,直接来源主要包括农用塑料薄膜、农药和化肥塑料包装以及农村塑料类生活垃圾的破碎和裂解、轮胎磨损等;间接来源主要包括有机肥料施用、污泥农用、农业灌溉以及大气沉降等。

农用塑料薄膜因具有保温、保湿、提高农作物质量、增加农作物产量等优点而被广泛应用于农业生产^[18]。农业生产中应用覆膜技术在我国已经有近50年的历史,随着该技术的大力推广和使用,我国农用塑料薄膜的使用量呈指数式增长。据统计,2020年我国农用塑料薄膜的使用量约为 2.39×10^6 t,其中地膜使用量约为 1.36×10^6 t,覆盖面积约为 1.74×10^7 hm²,约占当年耕地总面积的13.6%,居世界首位^[19]。目前,农用塑料薄膜主要以PE和PVC为原材料制备而成,化学性质稳定,在自然环境中难以降解。同时,农用塑料薄膜厚度较小,且缺乏高效的回收利用机制,导致农用塑料薄膜的回收率不足2/3^[20]。随着农用塑料薄膜的大量使用,农田土壤塑料薄膜残留问题日益加剧。调查显示,我国塑料薄膜覆盖密集地区的

农田土壤均有不同程度的塑料薄膜残留,并且塑料薄膜残留量随覆膜年限的增加而显著增加^[21]。残留在农田土壤中的大块塑料薄膜在耕作、太阳辐射、风化以及微生物降解等的共同作用下进一步破碎、裂解形成微塑料^[22]。Huang等^[23]的调查表明,连续覆膜5、15、24 a的农田土壤(0~40 cm)中微塑料的平均丰度分别为 (80.3 ± 49.3) 、 (308.0 ± 138.1) 、 $(1\,075.6 \pm 346.8)$ 个·kg⁻¹,并且微塑料组成成分与塑料薄膜组成成分一致。Li等^[24]的调查也表明,连续覆膜32 a的农田土壤(0~10 cm)中薄膜类微塑料的平均丰度为 $(4\,033 \pm 472)$ 个·kg⁻¹,并且薄膜类微塑料组成成分与塑料薄膜组成成分一致。由此可见,农用塑料薄膜的破碎和裂解是农田土壤中微塑料最直接且最主要的来源,并且农田土壤中微塑料的丰度与农用塑料薄膜的使用强度和年限成正比。除塑料薄膜外,化肥和农药作为重要的农业生产物质资料在提高农作物产量方面也发挥了重要作用。然而,化肥和农药的使用也会产生大量废弃塑料包装,这些塑料包装被随意丢弃后进入农田土壤,最终破碎、裂解形成微塑料,这也是农田土壤中微塑料的来源之一^[16]。

农业灌溉可以弥补天然降水的不足,为作物正常生长提供所需水分。农业灌溉水源主要包括地表水、地下水以及净化后的污水。由于天然水资源分布不均匀,为了缓解用水危机,部分水资源匮乏地区也存在污水灌溉的情况。已有研究表明,在全球河口、水



图3 农田土壤中微塑料的来源

Figure 3 Sources of microplastics in farmland soil

库、河流以及湖泊等各类可供灌溉的地表淡水水体中均检测到了微塑料的存在,甚至受人类活动干预较小的偏远地区地表水体也未能幸免^[25-26]。进一步的研究指出,地下水也受到了一定程度的微塑料污染^[27]。例如:Panno等^[28]的研究发现从伊利诺伊州喀斯特含水层采集的17个地下水样品中有16个被微塑料污染,其最高丰度可达 $16\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$;Mu等^[29]的研究则发现在中国胶东半岛采集的5个地下水样品中均有微塑料的存在,其丰度范围为 $87\sim 6\,832\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$,平均丰度为 $2\,103\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此外,未经处理的污水中常含有浓度较高的微塑料(高达 $3\,160\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$),经污水处理厂处理后,污水中大部分的微塑料可被去除,但由于污水中原有微塑料丰度基数过大,净化后的污水中仍存在丰度较高的微塑料(高达 $125\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$)^[30]。因此,农业灌溉也是微塑料进入农田土壤中的一个重要途径。

有机肥料是指人畜粪便、农作物秸秆、动物残体、厨余垃圾等有机废弃物,经过堆肥、发酵而产生的肥料。向农田土壤中施用有机肥料可以实现营养物质、微量元素和腐殖质的再次利用,原则上是一种环境友好的农业生产方式。然而,大多数有机废弃物都受到了塑料的污染,堆肥前后通过筛分和分拣等方法并不能够去除其中所含的所有塑料^[31]。此外,在有机肥料的生产过程中,大多数国家允许存在一定量的其他物质,例如塑料。德国是世界上对堆肥质量规定最严格的国家之一,其允许的有机肥料中塑料的质量分数高达0.1%,并且未考虑粒径小于2 mm的塑料颗粒^[32]。例如,Bläsing等^[33]在德国波恩有机肥加工厂生产的有机肥产品中发现了微塑料的存在,并且肉眼可见的塑料碎片(粒径 $>0.5\text{ mm}$)含量为 $2.38\sim 180\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Edo等^[34]的调查发现西班牙东北部城市的固体废物堆肥产品中也存在微塑料,并且其丰度范围为 $5\sim 20\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$ 。由此可见,有机肥料的长期施用是农田土壤中微塑料不容忽视的来源之一,并且随着有机肥料产量和施用量的逐年增加,通过有机肥料施用而进入农田土壤中的微塑料量也逐渐升高。例如,Yang等^[35]的研究发现猪粪样品中微塑料的平均丰度为 $(1\,250\pm 640)\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$,连续施用猪粪有机肥料($1.69\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)22 a后农田土壤中微塑料的丰度可达 $(43.8\pm 16.2)\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于未施用猪粪有机肥料的农田土壤 $[(16.4\pm 2.7)\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 。

污水处理厂排放的污泥富含有机质及N、P、K等营养元素,可以提高土壤肥力,增加作物产量,因此常被当作肥料或土壤改良剂施用到农田土壤中^[36]。但

有研究指出,经污水处理厂处理后污水中90%的微塑料会通过沉降富集在污泥中,这些沉降的微塑料会导致污泥中微塑料含量的增加^[37]。虽然污水处理厂的污泥会经后续的处理方法进行处理,但是这其中的技术并不能够有效去除活性污泥中的微塑料,因此污泥农用也会导致大量微塑料进入农田土壤^[38]。据估算,每年通过污泥农用进入欧洲和北美农田土壤的微塑料量分别为 $6.3\times 10^4\sim 4.3\times 10^5\text{ t}$ 和 $4.4\times 10^4\sim 3.0\times 10^5\text{ t}$,远高于目前全球海洋和地表水中微塑料的总量($9.30\times 10^4\sim 2.36\times 10^5\text{ t}$)^[8]。Li等^[39]对采集自我国11个省份28个污水处理厂的79份污泥样品中微塑料的丰度进行了调查,发现污泥样品中微塑料的丰度为 $1.60\times 10^3\sim 5.64\times 10^4\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均丰度为 $(2.27\pm 1.21)\times 10^4\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$,以此估算我国每年约有 1.56×10^{14} 个微塑料通过污泥而排放进入环境。

2.2 农田土壤中微塑料的赋存特征

国内外不同用地类型土壤中微塑料的赋存特征如表2所示。从表2可以看出,工业用地、内陆滩涂、沿海滩涂、园地、公园绿地及林地等不同用地类型土壤中普遍存在微塑料污染。例如,Fuller等^[40]关于澳大利亚悉尼某工业区土壤中微塑料赋存特征的调查表明,该工业区土壤中微塑料丰度高达 $300\sim 67\,500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,主要成分为PE、PVC和PS。Scheurer等^[41]关于瑞士洪泛平原土壤中微塑料赋存特征的调查则表明,该地区90%的土壤样品中存在微塑料污染,微塑料丰度最高可达 $55.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除上述用地类型外,国内外农田土壤中也普遍存在微塑料污染,并且农业生产活动(如地膜覆盖、有机肥料施用、污泥农用等)会加剧农田土壤微塑料污染(表2)。例如,在我国上海、陕西、山东、辽宁、四川以及黄土高原等多地有地膜覆盖史的农田土壤中均检测出了微塑料,微塑料丰度最高可达 $12\,650\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$,并且部分地区农田土壤中微塑料的丰度随着覆膜年限的增加而升高^[23-24,42-46]。在西班牙以及我国西南地区有污泥农用史和有机肥料施用史的农田土壤中同样检测出了微塑料,其丰度分别为 $(960\pm 420)\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $7\,100\sim 42\,960\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[47-48]。

由于不同文献描述土壤中微塑料丰度所用的单位及计数方法不同,不同文献之间比较存在困难。但总体而言,土壤中微塑料的丰度因用地类型的不同而存在差异,并且农田土壤中微塑料的丰度相对较高。此外,微塑料是一个概括性术语,涉及到不同的类型(PE、PP、PS、PVC、PET、PA等)、粒径(小型微塑料、中

型微塑料和大型微塑料)、形状(纤维、碎片、薄膜、颗粒和泡沫等)和颜色(白色、黑色、黄色、蓝色、红色和无色等)等。从表2中可以看出,不同用地类型土壤中检测到的微塑料类型多样,粒径和形状也各异。其中,PE、PP和PS是农田土壤中最常见的微塑料类型,形状以薄膜、碎片和纤维为主。农田土壤中微塑料的种类与常见塑料制品的组成成分相吻合,但不同地区以及不同种植模式农田土壤中微塑料的形态、尺寸、

分布存在很大差异。

3 微塑料在农田土壤中的迁移行为

农田土壤中的微塑料可以通过非生物机制(风力作用、土壤侵蚀、地表径流、淋溶和重力作用等)和生物机制(土壤动物、植物、微生物活动等)进行横向或纵向迁移^[58-59]。风力作用、土壤侵蚀以及地表径流对农田土壤表层微塑料的横向迁移起到了重要作

表2 不同用地类型土壤中微塑料的赋存特征

Table 2 Occurrence characteristics of microplastics in different land types of soil

国家或地区 Nation or area	土地利用现状 Land use status	丰度 Abundance	类型 Type	粒径 Particle size	形状 Shape	背景 Background	文献 Reference
澳大利亚	工业用地	300~67 500 mg·kg ⁻¹	PE、PVC、PS	<1 mm	—	工业区附近土壤,该工业 区有氯化塑料生产史	[40]
墨西哥	园地	(870±190)个·kg ⁻¹	PE	10~50 μm	颗粒	家庭花园土壤,有家庭 废弃物输入	[49]
瑞士	内陆滩涂	0~55.5 mg·kg ⁻¹	PE、PP	<2 mm	—	洪泛区土壤	[41]
尼日利亚	沿海滩涂	342.4个·kg ⁻¹	PE、PP、PS、PA、PVC、PET	1~5 mm	微球、碎片、纤维	—	[50]
美国	公园绿地	334~3 068个·kg ⁻¹	PE、PS	<5 mm	纤维	城市潮汐淡水湿地土壤	[51]
伊朗	风蚀区农田和 牧场	67~400个·kg ⁻¹	PE	40~740 μm	碎片	农田有塑料薄膜覆盖史	[52]
西班牙	农田	(960±420)个·kg ⁻¹	PVC、PP	150~250 μm	碎片、纤维、薄膜	部分农田有污泥农用史	[47]
韩国	森林、城郊、农 业用地	(700±75)个·kg ⁻¹	PE、PP、PS、PVC	0~5 mm	碎片、薄膜、纤 维、颗粒	部分农业用地有塑料 薄膜覆盖史	[53]
中国山东	沿海滩涂	1.3~14 712.5个·kg ⁻¹	PE、PP、PS	<5 mm	泡沫、碎片	研究区域内均匀分布有裸露 的老化塑料管以及零星散布 的工程塑料编织袋等	[54]
中国广东	红树林	108~486个·kg ⁻¹	PE、PP、PET	200~500 μm	纤维	红树林土壤(接纳了来自 陆源和海洋的微塑料)	[55]
中国广东	果园	188~279个·kg ⁻¹	PE、PP、PS、PVC	0~5 mm	碎片、纤维	有塑料薄膜覆盖史	[56]
中国黄土高原	果园	1 750~6 550个·kg ⁻¹	PET、PU、ALK、PVC、PP、 PVC	0.02~0.5 mm	碎片	有反光膜、水果袋等塑料 制品使用史	
中国黄土高原	农田	1 900~12 650个·kg ⁻¹	PET、PU、ALK、ACR、PP	0.02~0.5 mm	纤维、碎片、颗粒	有塑料薄膜覆盖史	[44]
中国西南地区	温室	7 100~42 960个·kg ⁻¹	—	0.05~1 mm	纤维、碎片、薄膜	有无机肥料和有机 改良剂(污泥)施用史	[48]
中国上海	农田	(78.00±12.91)个·kg ⁻¹	PP、PE	20 μm~5 mm	纤维、碎片	稻鱼共生系统,田脊有 塑料薄膜覆盖史	[42]
中国陕西	农田	1 430~3 410个·kg ⁻¹	PVC、PP、PET、PE、HPPE	0~5 mm	纤维、碎片、薄 膜、颗粒	部分研究区域有塑料 薄膜覆盖史	[43]
中国新疆	农田	(80.3±49.3)、(308.0± 138.1)个·kg ⁻¹ 和 (1 075.6±346.8)个·kg ⁻¹	PE	—	薄膜	有塑料薄膜覆盖史(连续 覆膜种植5、15、24 a)	[23]
中国辽宁	农田	(10 586±3 560)个·kg ⁻¹ (覆膜)、(7 183±1 633) 个·kg ⁻¹ (未覆膜)	PE及其共聚物、PP、人造 丝、聚酯对苯二甲酸、聚 (聚对苯二甲酸乙酯)和 聚酯对苯二甲酸	—	薄膜、纤维、颗粒	有塑料薄膜覆盖史、 氮肥施用史	[24]
中国山东	农田、温室	310~5 698个·kg ⁻¹	PP、乙烯-丙烯共聚物、PE	<0.5 mm	碎片、薄膜	部分农田有塑料薄 膜覆盖史	[57]
中国辽宁	农田、温室	217.30~2 512.18 μg·g ⁻¹	PE、PP、PS	<5 mm	薄膜、碎片、纤 维、颗粒	部分农田有塑料薄 膜覆盖史	[45]
中国四川	植烟土壤	1.2×10 ² ~8.9×10 ² 个·kg ⁻¹	—	0~5 mm	薄膜、碎片、泡 沫、纤维	有塑料薄膜覆盖史	[46]

用^[60-61]。由于土壤是一种疏松多孔的介质,具有毫米级的大孔和中孔,从而导致微塑料在淋溶和重力作用下可以通过土壤孔隙发生纵向迁移^[62-63]。土壤动物的摄食、掘穴、消化、排泄等活动以及微塑料在土壤动物身体表面的附着行为也会对农田土壤中微塑料的纵向迁移与分布产生重要影响。关于蚯蚓的研究已表明,蚯蚓(*Lumbricus terrestris*)可通过摄食和掘穴活动使存在于土壤表层的微塑料向土壤深层迁移,并且粒径越小的微塑料向土壤深层迁移的程度越大^[64-65];蚯蚓(*L. terrestris*)掘穴活动也可以通过增加土壤孔隙度和水分渗透率进而促进水携带微塑料向土壤更深层迁移^[66]。关于跳虫的研究也表明,土壤中的微塑料可以通过跳虫(*Folsomia candida* and *Proisotoma minuta*)的活动进行迁移和再分布,并且土壤中微塑料的迁移能力与微塑料大小以及跳虫体型大小密切相关^[67]。植物一般都具有发达的根系,植物的根系运动、根系扩张和根系吸水等活动也会对农田土壤中微塑料的迁移与分布产生重要影响。有研究表明,植物根系在生长过程中会使土壤产生大量孔隙,而植物根系的衰老和腐烂也会在土壤中留下较大的孔隙,这些孔隙会加快水分的渗透,进而促进微塑料的随水迁移^[63,68]。与淋溶和土壤动物活动导致的微塑料向下迁移不同,植物根系活动更倾向于使微塑料向上迁移或保持在原有土层中^[69]。除土壤动物和植物外,土壤微生物也可以通过改变微塑料的结构与性质(粒径、密度和表面特性等),进而影响微塑料在农田土壤中的迁移行为^[7,70-72]。

微塑料在农田土壤中的迁移行为受土壤类型、微塑料结构与性质(密度、粒径、形状、表面电荷等)以及土壤环境条件[离子强度、阳离子类型、pH、溶解性有机质(DOM)、土壤矿物质等]等多种因素的影响^[63,73]。例如,Yan等^[74]的研究表明微塑料表面电荷是控制土壤中微塑料迁移行为的重要因素,土壤矿物质与微塑料结合能导致微塑料密度增加进而促进微塑料在土壤中的纵向迁移。Machado等^[75]的研究发现颗粒状微塑料和纤维状微塑料能够与土壤团聚体产生不同的相互作用,表明微塑料的形态会影响其在土壤中的迁移行为。张晓婷^[63]的研究表明粒径越小的微塑料越容易在土壤中迁移,密度较大的微塑料越容易向土壤深层迁移,并且与颗粒状和泡沫状微塑料相比,纤维状和薄膜状微塑料更易流向径流水体。值得注意的是,纳米塑料作为微塑料进一步破碎的产物具有更强的迁移能力,甚至能够通过淋溶过程迁移至地下水

中。例如,Wu等^[76]关于土壤理化性质、离子强度和阳离子类型对纳米PS塑料在不同类型土壤中迁移影响的研究表明,土壤矿物质和pH能够改变纳米PS塑料的表面电荷进而影响纳米PS塑料与土壤之间的静电相互作用,从而显著影响纳米PS塑料在土壤中的迁移行为,同时指出纳米PS塑料在高pH和低Fe/Al氧化物含量土壤中具有较强的迁移能力,可能会对深层土壤和地下水环境构成潜在风险。耕作、化肥施用、农田有机产品投入(秸秆还田、有机肥施用、生物炭改良土壤等)等农业生产活动也会对农田土壤中微塑料的迁移行为产生重要影响^[63]。已有研究表明,不同耕作方式会影响农田土壤中微塑料纵向迁移的深度。例如,传统耕作方式(翻耕)能够促进微塑料向深层土壤迁移,而浅耕、旋耕和耙地则导致微塑料分布在耕作层中^[77]。也有研究指出,秸秆、有机肥、生物炭等农田有机产品释放的DOM易吸附在黏土矿物、铁氧化物和纳米颗粒表面,进而显著改变水-砂-纳米颗粒体系的表面化学特性以及保留-排斥特性,从而改变纳米颗粒在农田土壤中的迁移行为^[78-80]。例如, Ma等^[80]研究了生物炭DOM、小麦秸秆DOM和猪粪DOM与纳米塑料在饱和针铁矿(GT)覆膜砂柱中的共迁移行为,结果表明GT、DOM和纳米塑料(50 nm)能够形成GT-DOM-纳米塑料复合物,进而导致纳米塑料(50 nm)与DOM产生共沉积;DOM吸附在GT-覆膜砂和纳米塑料(400 nm)表面,导致表面电荷发生变化,产生静电斥力,进而促进了纳米塑料(400 nm)的迁移。此外,气候变化所导致的土壤干湿交替、冻融循环等过程也会影响微塑料在农田土壤中的迁移行为^[81-82]。例如,O'Connor等^[82]研究发现土壤干湿交替次数与微塑料纵向迁移深度呈显著正相关,表明频繁的干湿交替显著促进了微塑料在土壤中的纵向迁移。

4 微塑料对农田土壤生态系统的影响

微塑料在农田土壤中会逐渐累积,当累积到一定量后将会对土壤动物、植物、微生物产生直接不利影响^[83-84],经食物链累积和传递后甚至可能会影响人类健康^[49]。土壤中微塑料的存在也会改变土壤的理化性质,进而改变土壤动物、植物、微生物的生存环境,从而对其造成间接危害^[85-86]。微塑料对农田土壤生态系统产生的上述影响不仅可以由其自身引起,而且其也可与共存污染物形成复合污染,进而对农田土壤生态系统产生重要影响。微塑料具有尺寸小、比表面

积大、疏水性强等特性,因此能够吸附多环芳烃、多氯联苯、重金属、农药、抗生素等多种污染物^[1,87-88]。污染物在微塑料上的吸附行为以及随后发生的解吸行为可能会改变污染物在农田土壤环境中的赋存状态、迁移行为和生物有效性,进而对农田土壤生态系统产生正面或负面的影响^[87,89-90]。已有大量研究报道,微塑料尺寸较小,易被多种土壤动物(蚯蚓、变形虫、纤毛虫和鞭毛虫等)摄取从而进入土壤动物消化道内^[84,91-92],并且土壤动物消化液能够促进微塑料上吸附态污染物的解吸^[93-94]。因此,微塑料可以作为共存污染物的载体,将其转移至土壤动物体内,并在消化液作用下重新解吸下来,进而增加其与土壤动物的接触,从而增强其在土壤动物体内的积累及毒性^[95-97]。与此相反,微塑料也可通过吸附/结合作用降低土壤环境中污染物的含量,进而降低共存污染物的生物有效性^[98-99]。此外,微塑料进入农田土壤环境后,在风化、紫外照射、机械破碎、微生物降解等共同作用下会发生老化,导致其理化性质发生显著改变,例如粒径变小、比表面积增大、表面产生新的含氧官能团等,进而影响其与共存污染物的相互作用^[100-101]。同时,在塑料制品的生产与加工过程中,为了改善塑料制品的性能常需要添加稳定剂、阻燃剂、增塑剂、发泡剂、着色剂等多种添加剂^[102]。微塑料自身所含的添加剂在老化过程中会逐渐释放进入农田土壤,从而对土壤动物、植物以及微生物产生不利影响^[103-104]。也有研究报道动物消化液能够促进微塑料自身所含添加剂的

释放^[104-105],因此微塑料也可以通过载体作用而增加自身所含添加剂对土壤动物的暴露风险。

4.1 微塑料对土壤理化性质的影响

微塑料常以不同粒径的物理颗粒或碎片的形式在农业生产过程中不同程度地嵌入到土壤团聚体中,进而对土壤团聚体产生一定程度的影响,从而引起土壤容重、渗透性、孔隙度以及持水能力等理化性质的改变^[106-108]。例如,胡旭凯等^[109]的研究发现向土壤中添加0.5%、10%、20%和25%(m/m)的PE微塑料能够改变土壤团聚体粒径组成,从而提高土壤团聚体的稳定性,并且能够增加团聚体中总有机碳的含量,从而降低团聚体的可溶性和易氧化有机碳的含量。王志超等^[110]通过室内土柱模拟试验研究了向土壤中添加0.5%、1%和2%不同类型(PP、PVC和PE)微塑料对土壤水分累积入渗时间、土壤含水率、湿润锋和蒸发特性等的影响,发现相同类型不同丰度微塑料赋存条件下,随着微塑料丰度的增大,累积入渗时间显著增加;不同类型相同丰度微塑料赋存条件下,累积入渗时间则呈现出PP>PVC>PE>CK的规律;不同类型不同丰度微塑料赋存均显著减缓了土壤湿润锋的运移速度,并且对土壤水分蒸发产生了抑制作用。Zhang等^[108]的研究则发现在田间试验和室内培养试验中添加聚酯微纤维(0.1%和0.3%,m/m)均未对土壤容重以及饱和导水率产生显著影响,但添加聚酯微纤维显著提高了土壤>30 μm的孔隙数量,并降低了土壤中<30 μm的孔隙数量;而与田间试验不同的是,在室内试验



图4 微塑料对土壤生态系统的影响

Figure 4 The effects of microplastics on soil ecosystem

中添加聚酯微纤维也显著提高了土壤中 >2 mm水稳性团聚体的含量。残留在土壤中的微塑料还能改变土壤pH、电导率、有机质含量、阳离子交换量以及养分有效性^[111-113]。例如, Li等^[112]的研究表明, 向土壤中添加1%(m/m)的PE和PP微塑料(<1 mm和1~5 mm)均能够导致土壤中有效磷含量显著降低, 并且PP微塑料还能够导致土壤中铵态氮含量显著升高, 但两种微塑料并未导致土壤pH发生显著变化。Yang等^[113]的研究表明向土壤中添加高密度聚乙烯(HDPE)或通用聚苯乙烯(GPPS)微塑料能够导致土壤pH升高, 有效磷和有效钾含量降低, 并且影响程度与微塑料种类、粒径和含量密切相关。Yu等^[114]则发现, 向不同土壤团聚体组分(大团聚体组分、微团聚体组分以及非团聚体粉砂和黏土组分)中添加28%(m/m)的PE微塑料($100\text{ }\mu\text{m}$)均导致3种土壤团聚体组分营养元素含量(TN、TP和K)、总有机碳含量、溶解性有机碳含量以及阳离子交换量显著降低, 并且不同土壤团聚体组分的降低程度不同; 同时, 添加微塑料也导致非团聚体粉砂和黏土组分和微团聚体组分的pH显著降低, 但未对大团聚体组分的pH产生显著影响。综上所述, 微塑料对土壤理化性质的影响受微塑料含量、微塑料结构与性质(如类型、粒径、形状等)以及土壤类型等多种因素的影响, 而现有研究尚未得到统一结论, 并且产生影响的内在机制也尚不清晰。此外, 由于土壤是由固-液-气-生物构成的多介质综合体, 其中理化和生物性质的改变会影响整个土壤生态系统。

4.2 微塑料对土壤微生物的影响

土壤微生物在整个土壤生态系统中占据着重要的地位, 被认为是土壤组成中的核心组分。已有研究表明, 微塑料进入土壤后会对土壤酶活性、微生物生物量、微生物群落结构与多样性等与土壤微生物相关的特性产生影响, 并且影响程度与微塑料类型、粒径、含量、形状等因素密切相关^[115-116]。例如, Zang等^[117]的研究表明PE和PVC微塑料能够抑制土壤 β -葡萄糖苷酶活性, 但并未对其他碳氮循环相关酶活性产生影响; PE和PVC微塑料也能够导致土壤微生物生物量显著增加, 并改变土壤微生物群落的结构和代谢状态。Fan等^[118]的研究表明PE、PS和PVC微塑料均能够提高土壤过氧化氢酶、脲酶和碱性磷酸酶活性, 增加土壤中变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)和子囊菌门(Ascomycota)的丰度, 降低酸杆菌门(Acidobacteria)、担子菌门(Basidiomycota)和壶菌门(Chytridiomycota)的丰度, 并且上述微塑料对土

壤微生物群落的影响取决于微塑料的类型和含量, 另外细菌和真菌受微塑料的影响也不同。很多土壤微生物可以附着在微塑料上, 随着时间的推移, 微塑料上的微生物种类和数量不断增加, 进而可以形成较为稳定的生物膜, 在微塑料和生物膜形成的微环境中它们之间可以互相影响。例如, 已有研究表明微塑料上聚集的微生物的种类和结构组成与周围环境中的不同, 其上甚至会有一些致病微生物的存在, 这些微生物会借助微塑料而进行迁移^[119-120]。定殖在微塑料表面的微生物对微塑料也具有一定的降解能力。例如, Zhang等^[119]发现采集自我国新疆棉田的微塑料表面附着细菌的群落结构与周围土壤中细菌的群落结构存在显著差异, 并且微塑料表面特异性富集了放线菌门、拟杆菌门(Bacteroidetes)和变形菌门等与PE降解相关的细菌。然而, 对于大多数不可降解塑料而言, 其化学性质稳定, 在土壤中的降解过程十分缓慢。此外, 微塑料自身所含的添加剂会在降解过程中被释放进入土壤, 进而对土壤中的微生物产生影响^[103-104]。总体而言, 农田土壤中的微塑料很难与土壤微生物孤立来看, 必须将其作为一个相互作用的关联体系来研究, 但目前关于微塑料和土壤微生物互作关系及驱动因素的研究较少, 相关研究值得进一步推进。

4.3 微塑料对土壤动物的影响

土壤动物是农田土壤生态系统的重要组成部分, 其在维持土壤健康、改善土壤质量、促进作物生长等方面发挥着重要作用。目前, 关于微塑料对土壤动物的影响已有诸多报道, 并取得了一定的进展, 涉及到的土壤动物包括蚯蚓、变形虫、纤毛虫和鞭毛虫等。已有研究表明, 微塑料粒径微小, 可以被土壤动物在摄食过程中误食, 进而在个体、组织、分子等不同水平上对土壤动物产生不利影响, 如造成组织损伤、营养和能量短缺、生长率和繁殖率降低、死亡率升高、炎症反应、免疫反应、氧化损伤、神经毒性以及肠道微生物群落结构与多样性变化等^[92, 121-123], 部分微塑料还会在土壤动物体内累积, 并通过食物链(如土壤-蚯蚓-鸡)传递, 从而对不同营养级的动物产生影响, 甚至能够威胁人体健康^[49], 并且微塑料对土壤动物的影响结果与程度因微塑料粒径、浓度及类型等的不同而存在差异。以土壤动物蚯蚓为例, Huerta Lwanga等^[124]的研究表明, 暴露于0.4%、0.5%和1.2%(m/m)的低密度聚乙烯(LDPE)微塑料($<150\text{ }\mu\text{m}$)中, 蚯蚓(*L. terrestris*)的存活率和生长率显著降低; Chen等^[125]关于不同浓度(0.1、0.25、0.5、1.0、1.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) LDPE微

塑料(<400 μm)暴露对蚯蚓(*E. fetida*)毒性效应的研究表明,高浓度($\geq 1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)LDPE微塑料暴露能够对蚯蚓造成表皮损伤,并诱导蚯蚓产生氧化胁迫和神经毒性;Jiang等^[126]的研究则表明,100 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和1 000 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的PS微塑料(1.3 μm)暴露能够诱导蚯蚓产生明显的氧化胁迫,并使蚯蚓肠道组织受到损伤。微塑料被土壤动物摄食后,其自身所含的添加剂也能够能够在土壤动物消化道中释放出来,进而对土壤动物产生毒害作用。Li等^[104]的研究表明,发泡PS微塑料(<830 μm 和830~2 000 μm)中所含的溴代阻燃剂六溴环十二烷能够被土壤溶液和蚯蚓消化液浸出,释放进入土壤环境或蚯蚓消化道内,进而被蚯蚓富集。除了误食摄入微塑料所造成的不良影响外,微塑料还可以通过改变土壤动物的栖息地进而对土壤动物产生间接影响。例如,微塑料能够进入并堵塞土壤孔隙空间,从而影响土壤动物的活动,甚至对土壤动物生存产生威胁^[127]。

4.4 微塑料对植物的影响

土壤植物作为土壤生态系统的重要组成部分,其生长不可避免地受到土壤微塑料污染的影响。目前已有研究报道了微塑料对小麦、洋葱、蚕豆、黑麦草、拟南芥等陆生植物的影响。通常微塑料暴露会对植物产生多种不良影响,且该影响会贯穿植物的整个生长过程,包括延缓种子萌发,降低种子发芽率、幼苗成活率以及植物生物量,阻碍根的生长和发育,改变植物组织元素组成,诱导植物产生氧化胁迫效应,对植物造成遗传毒性等^[16,121]。例如,Qi等^[128]的研究表明1%(m/m)的LDPE和淀粉基地膜源微塑料暴露对小麦生长均具有明显的抑制作用(抑制株高、减少产量等),并且淀粉基可降解地膜源微塑料对小麦生长的抑制作用较LDPE地膜源微塑料更加显著。Bosker等^[129]的研究也表明不同浓度(10^3 、 10^4 、 10^5 、 10^6 、 10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$)的绿色荧光微塑料(50、500、4 800 nm)暴露均能够抑制水芹种子的萌发,并且随着微塑料粒径的增大其对种子萌发的抑制作用更加明显。廖苑辰等^[130]的研究表明在水培试验中高浓度($200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)PS微塑料会显著抑制小麦根、茎的伸长,并且5 μm PS微塑料较100 nm PS微塑料对小麦根、茎伸长的抑制作用更强。但也有研究指出,1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ HDPE微塑料会导致黑麦草(*Lolium perenne*)的根系生物量显著增加^[106]。由此可见,微塑料对植物的影响受微塑料类型、暴露浓度、粒径以及形状等的综合影响,但研究结论尚不统一,亟待进一步研究以揭示微塑料毒性效应

及其作用机制。值得注意的是,亚微米或纳米塑料可被植物根系吸收并在植物体内积累,其还可利用根和茎的维管系统的蒸腾拉力转移至植物的地上部分,进而对食物链构成潜在威胁^[131]。李连祯等^[132]的研究表明生菜(*Lactuca sativa*)根部对0.2 μm 的PS微球有较强的吸收和富集能力,被生菜根部吸收后的PS微球还会从生菜的根部迁移到地上部,并积累和分布在生菜的可食部位(茎和叶)中。同时,植物也能够能够在群落水平上对土壤微塑料污染产生响应^[133]。此外,微塑料进入土壤后能够引起土壤理化性质、水分条件、微生物组成和功能活性的改变,或在老化过程中释放自身所含的添加剂进入土壤,进而对植物生长和发育产生间接的负面作用^[85-86]。

5 农田土壤中微塑料污染研究存在的问题与展望

5.1 存在的问题

农田土壤微塑料污染已逐渐引起国内外学者的关注,并成为现今的研究热点。目前,相关研究主要集中在土壤中微塑料的来源、分布、迁移、对土壤生态系统的影响以及与其他共存污染物的复合污染效应等方面。然而,很多研究才刚起步,没有深入开展,研究内容相对分散、缺乏系统性,一些具体机制也尚不清晰。(1)农田土壤中微塑料来源广泛,残留量大,尽管已有研究对农田土壤中微塑料的污染现状进行了报道,但由于土壤介质中微塑料的准确定性很难,并且定量方法及计数单位尚不统一,导致农田土壤中微塑料的污染程度及特征等相关信息仍十分匮乏,亟需建立一套完善的农田土壤微塑料污染监测技术和方法。(2)已有的关于微塑料对土壤生态系统影响的研究多采用未经老化的聚合物颗粒,但其理化性质与实际土壤环境中的微塑料存在一定差异,并且实际土壤环境中微塑料老化过程对其生态效应的影响也尚不清晰。(3)关于微塑料对重金属、农药、抗生素等农田土壤典型污染物环境行为、生物有效性影响的研究还不够系统,微观机制尚不清晰,并且不同土壤环境条件、微塑料老化过程对上述污染物环境行为及生物有效性的影响及微观机制仍需进一步研究。(4)农田土壤中的微塑料可以通过非生物机制和生物机制进行横向或纵向迁移,且迁移过程受土壤理化性质、微塑料结构与性质等多种因素的影响。然而,关于微塑料在实际农田土壤中的迁移行为以及驱动因素仍认识不足。(5)已有研究表明微塑料可在土壤动物、植物体

内富集,从而通过陆地食物链对人体健康构成潜在威胁,但相关研究仍处在初级阶段,尚缺乏基础数据,难以对农田土壤中微塑料的健康风险进行准确评估。(6)鉴于微塑料在环境中的持久性及其对生态系统的影响,已有多项研究提出关于微塑料污染的治理,其中源头控制是目前的重点,世界多国已针对微塑料制定相应管控措施,但还缺乏较为有效的农田微塑料污染修复技术。

5.2 展望

目前已有的农田土壤微塑料污染研究中还有很多有待探讨的内容,本文总结了以下几点,为后续的研究提供思路。

(1)建立相对统一、完善、规范的土壤微塑料分离、检测和定量技术和方法,并基于建立的标准技术和方法,对农田土壤中的微塑料污染展开调查和评估,明确其污染程度和特征。(2)加强微塑料对土壤生态系统影响的研究,重点关注实际土壤环境中微塑料老化过程中自身理化性质的变化及其对微塑料生态效应的影响及内在机理。(3)微塑料易与农田土壤中存在的其他污染物形成复合污染,进而对土壤生态系统产生新的威胁,因此应进一步深入研究微塑料与共存污染物的复合污染效应及其内在机制,特别是不同土壤环境条件(pH、盐度、溶解性有机质等)下微塑料对共存污染物环境行为及生物有效性的影响。(4)深入探讨微塑料在实际农田土壤中的迁移行为,并系统揭示土壤理化性质、微塑料结构与性质以及农业生产活动对农田土壤中微塑料迁移行为的影响及内在机制。(5)纳米塑料作为微塑料进一步破碎的产物具有更强的迁移能力、更复杂的生态效应和更大的健康风险,相较于微塑料污染,人们对农田土壤纳米塑料污染的了解仍十分有限,应进一步开展农田土壤中纳米塑料生态效应研究,并重点关注其在土壤动植物体内的富集及沿陆生食物链的传递。(6)加快可降解塑料的研发进程,并深入研究可降解塑料降解过程中生态效应的变化,以期研发出绿色、友好的不可降解塑料替代品,同时全面加强塑料生产、销售和使用的管理,建立健全的废弃农用塑料制品管理和回收体系,完善农村生活垃圾集中处理和处置,进而从源头上缓解农田土壤塑料污染问题。

参考文献:

[1] MEI W P, CHEN G E, BAO J Q, et al. Interactions between microplastics and organic compounds in aquatic environments: a mini review[J].

Science of the Total Environment, 2020, 736: 139472.

[2] OKEKE E S, OKOYE C O, ATAKPA E O, et al. Microplastics in agroecosystems—impacts on ecosystem functions and food chain[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2022, 177: 105961.

[3] YANG Y, ZHANG X, JIANG J, et al. Which micropollutants in water environments deserve more attention globally? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56: 13–29.

[4] ZHANG Z, GAO S H, LUO G, et al. The contamination of microplastics in China's aquatic environment: occurrence, detection and implications for ecological risk[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 296: 118737.

[5] KHALID N, AQEEL M, NOMAN A, et al. Linking effects of microplastics to ecological impacts in marine environments[J]. *Chemosphere*, 2021, 264: 128541.

[6] KUMAR R, SHARMA P, MANNA C, et al. Abundance, interaction, ingestion, ecological concerns, and mitigation policies of microplastic pollution in riverine ecosystem: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 782: 146695.

[7] WANG J L, GUO X, XUE J M. Biofilm—developed microplastics as vectors of pollutants in aquatic environments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55: 12780–12790.

[8] NIZZETTO L, FUTTER M, LANGAAS S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50: 10777–10779.

[9] HE D F, LUO Y M, LU S B, et al. Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2018, 109: 163–172.

[10] DA COSTA J P, PACO A, SANTOS P S M, et al. Microplastics in soils: assessment, analytics and risks[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 16: 18–30.

[11] ZHANG B, YANG X, CHEN L, et al. Microplastics in soils: a review of possible sources, analytical methods and ecological impacts[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2020, 95: 2052–2068.

[12] 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: 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: 1021–1030.

[13] 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. DENG A Q, ZHAO B W, ZHU Z Y, et al. Research progress on sources and ecotoxicological effects of microplastics in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(2): 345–357.

[14] 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. JIA T, XUE Y H, JIN T, et al. Research progress on sources, distribution and potential effects of microplastics in soil[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17(5): 202–216.

[15] JIN T, TANG J, LYU H, et al. Activities of microplastics (MPs) in agricultural soil: a review of MPs pollution from the perspective of agricultural ecosystems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,

- 2022, 70:4182-4201.
- [16] 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. LI P F, HOU D Y, WANG L W, et al. (Micro)plastics pollution in agricultural soils: sources, transportation, ecological effects and preventive strategies[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 314-330.
- [17] 吕一涵, 周杰, 杨亚东, 等. 微塑料对农田生态系统的影响: 研究现状与展望[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(1): 1-14. LÜ Y H, ZHOU J, YANG Y D, et al. Microplastics in agroecosystem: Research status and future challenges[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(1): 1-14.
- [18] SHAN X, ZHANG W, DAI Z L, et al. Comparative analysis of the effects of plastic mulch films on soil nutrient, yields and soil microbiome in three vegetable fields[J]. *Agronomy-Basel*, 2022, 12: 1-16.
- [19] 中国农村统计年鉴委员会. 2020中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. China Rural Statistical Yearbook Committee. 2020 China rural statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [20] XUE Y H, GUO J B, LI C, et al. Influencing factors of farmers' cognition on agricultural mulch film pollution in rural China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 787: 147702.
- [21] QI R, JONES D L, LI Z, et al. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: a critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134722.
- [22] STEINMETZ Z, WOLLMANN C, SCHAEFER M, et al. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 690-705.
- [23] HUANG Y, LIU Q, JIA W Q, et al. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114096.
- [24] LI S, DING F, FLURY M, et al. Macro- and microplastic accumulation in soil after 32 years of plastic film mulching[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 300: 118945.
- [25] WONG J K H, LEE K K, TANG K H D, et al. Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: prevalence, fates, impacts and sustainable solutions[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719: 137512.
- [26] XIONG X, ZHANG K, CHEN X, et al. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake: Qinghai Lake[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 899-906.
- [27] VIAROLI S, LANCIA M, RE V. Microplastics contamination of groundwater: current evidence and future perspectives. A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 824: 153851.
- [28] PANNO S, KELLY W, SCOTT J, et al. Microplastic contamination in karst groundwater systems[J]. *Groundwater*, 2019, 57: 189-196.
- [29] MU H, WANG Y, ZHANG H, et al. High abundance of microplastics in groundwater in Jiaodong Peninsula, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 839: 156318.
- [30] GATIDOU G, ARVANITI O S, STASINAKIS A S. Review on the occurrence and fate of microplastics in sewage treatment plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 367: 504-512.
- [31] WEITHMANN N, MOLLER J N, LODER M G J, et al. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment[J]. *Science Advances*, 2018, 4: 1-7.
- [32] 徐湘博, 孙明星, 张林秀, 等. 土壤微塑料污染研究进展与展望[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 1-9. XU X B, SUN M X, ZHANG L X, et al. Research progress and prospect of soil microplastic pollution[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 1-9.
- [33] BLÄSING M, AMELUNG W. Plastics in soil: analytical methods and possible sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 422-435.
- [34] EDO C, FERNANDEZ-PINAS F, ROSAL R. Microplastics identification and quantification in the composted organic fraction of municipal solid waste[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 151902.
- [35] YANG J, LI R, ZHOU Q, et al. Abundance and morphology of microplastics in an agricultural soil following long-term repeated application of pig manure[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 116028.
- [36] 李渊. 市政污泥直接施用农田对土壤理化性质的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019. LI Y. Effects of direct application of municipal sludge to farmland on soil physical and chemical properties [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [37] REDDY A S, NAIR A T. The fate of microplastics in wastewater treatment plants: an overview of source and remediation technologies[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 28: 102815.
- [38] 吴世磊, 徐安明, 周杰, 等. 污水处理过程中微塑料去除的现状与发展趋势[J]. 生物工程学报, 2022, 38(7): 2410-2422. WU S L, XU A M, ZHOU J, et al. Microplastics in wastewater treatment: current status and future trends[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022, 38(7): 2410-2422.
- [39] LI X, CHEN L, MEI Q, et al. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China[J]. *Water Research*, 2018, 142: 75-85.
- [40] FULLER S, GAUTAM A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5774-5780.
- [41] SCHEURER M, BIGALKE M. Microplastics in swiss floodplain soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(6): 3591-3598.
- [42] LV W Q, ZHOU W Z, LUB S B, et al. Microplastic pollution in rice-fish co-culture system: a report of three farmland stations in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1209-1218.
- [43] DING L, ZHANG S Y, WANG X Y, et al. The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137525.
- [44] 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 等. 黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4748-4755. HAO Y L, HU Y X, BAI X X, et al. Abundances and morphology patterns of microplastics under different land use types on the Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(9): 4748-4755.
- [45] 时馨竹, 孙丽娜, 李珍, 等. 沈阳周边农田土壤中微塑料组成与分布[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1498-1508. SHI X Z, SUN L N, LI Z, et al. Composition and distribution of microplastics in farmland soil around Shenyang[J]. *Journal of Agro-Environment Sci-*

- ence, 2021, 40(7):1498–1508.
- [46] 刘琳琳, 王鹏, 孙曙光, 等. 四川广元植烟土壤微塑料分布状况分析[J]. 中国烟草学报, 2023, 29(1):46–54. LIU L L, WANG P, SUN S G, et al. Distribution of micro plastics in tobacco planting soil in Guangyuan, Sichuan Province[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2023, 29(1):46–54.
- [47] VAN DEN BERG P, HUERTA-LWANGA E, CORRADINI F, et al. Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 261:114198.
- [48] ZHANG G S, LIU Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642:12–20.
- [49] HUERTA LWANGA E, MENDOZA VEGA J, KU QUEJ V, et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:14071.
- [50] FRED-AHMADU O H, AYEJUYO O O, BENSON N U. Microplastics distribution and characterization in epipsammic sediments of tropical Atlantic Ocean, Nigeria[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, 38:101365.
- [51] HELCOSKI R, YONKOS L T, SANCHEZ A, et al. Wetland soil microplastics are negatively related to vegetation cover and stem density[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256:113391.
- [52] REZAEI M, RIKSEN M J P M, SIRJANI E, et al. Wind erosion as a driver for transport of light density microplastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669:273–281.
- [53] CHOI Y R, KIM Y N, YOON J H, et al. Plastic contamination of forest, urban, and agricultural soils: a case study of Yeosu City in the Republic of Korea[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(5):1962–1973.
- [54] 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. ZHOU Q, ZHANG H B, ZHOU Y, et al. Separation of microplastics from a coastal soil and their surface microscopic features[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(14):1604–1611.
- [55] 李一璠, 毕然, 赵普晖, 等. 红树林环境中微塑料污染分布特征及生态风险研究进展[J]. 生态学杂志, 2022, 41(9):1835–1844. LI Y F, BI R, ZHAO P H, et al. Research progress on distribution characteristics and environmental behaviors of microplastics in mangrove forests[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(9):1835–1844.
- [56] 胡佳妮. 农田土壤中微塑料污染特征和典型塑料地膜的环境行为研究[D]. 上海:华东师范大学, 2021. HU J N. A study on pollution characteristics of microplastics in agricultural soils and environmental behaviors of typical mulching films[D]. Shanghai: East China Normal University, 2021.
- [57] YU L, ZHANG J D, LIU Y, et al. Distribution characteristics of microplastics in agricultural soils from the largest vegetable production base in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756:143860.
- [58] XI B B, WANG B, CHEN M, et al. Environmental behaviors and degradation methods of microplastics in different environmental media[J]. *Chemosphere*, 2022, 299:134354.
- [59] 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.
- [60] BULLARD J E, OCKELFORD A, O'BRIEN P, et al. Preferential transport of microplastics by wind[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 245:118038.
- [61] HAN N P, ZHAO Q C, AO H Y, et al. Horizontal transport of macro- and microplastics on soil surface by rainfall induced surface runoff as affected by vegetations[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 831:154989.
- [62] ZHANG X T, CHEN Y X, LI X Y, et al. Size/shape-dependent migration of microplastics in agricultural soil under simulative and natural rainfall[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815:152507.
- [63] 张晓婷. 微塑料在表层土壤中的迁移及其影响因素研究[D]. 上海:华东师范大学, 2022. ZHANG X T. Study on migration of microplastics in topsoil and related factors[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [64] RILLIG M C, ZIERSCH L, HEMPEL S. Microplastic transport in soil by earthworms[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:1362.
- [65] LWANGA E H, GERTSEN H, GOOREN H, et al. Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220:523–531.
- [66] YU M, VAN DER PLOEG M, LWANGA E H, et al. Leaching of microplastics by preferential flow in earthworm (*Lumbricus terrestris*) burrows[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 16(1):31–40.
- [67] MAASS S, DAPHI D, LEHMANN A, et al. Transport of microplastics by two collembolan species[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 225:456–459.
- [68] RILLIG M C, INGRAFFIA R, MACHADO A A D. Microplastic incorporation into soil in agroecosystems[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8:1805.
- [69] LI H X, LU X Q, WANG S Y, et al. Vertical migration of microplastics along soil profile under different crop root systems[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 278:116833.
- [70] PETE A J, BRAHANA P J, BELLO M, et al. Biofilm formation influences the wettability and settling of microplastics[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2022, 10(2):159–164.
- [71] HE S Y, JIA M Y, XIANG Y P, et al. Biofilm on microplastics in aqueous environment: physicochemical properties and environmental implications[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424:127286.
- [72] HE L, RONG H F, WU D, et al. Influence of biofilm on the transport and deposition behaviors of nano- and micro-plastic particles in quartz sand[J]. *Water Research*, 2020, 178:115808.
- [73] 董姝楠, 夏继红, 王为木, 等. 土壤-地下水中微塑料迁移的影响因素及机制研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14):1–8. DONG S N, XIA J H, WANG W M, et al. Review on impact factors and mechanisms of microplastic transport in soil and groundwater[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(14):1–8.
- [74] YAN X Y, YANG X Y, TANG Z, et al. Downward transport of naturally-aged light microplastics in natural loamy sand and the implication to the dissemination of antibiotic resistance genes[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262:114270.
- [75] MACHADO A A D, LAU C W, TILL J, et al. Impacts of microplastics

- on the soil biophysical environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(17):9656–9665.
- [76] WU X L, LYU X Y, LI Z Y, et al. Transport of polystyrene nanoplastics in natural soils: effect of soil properties, ionic strength and cation type[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 136065.
- [77] 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.
- [78] KELLER A S, JIMENEZ-MARTINEZ J, MITRANO D M. Transport of nano- and microplastic through unsaturated porous media from sewage sludge application[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(2):911–920.
- [79] QIAN X, MA J, WENG L, et al. Influence of agricultural organic inputs and their aging on the transport of ferrihydrite nanoparticles: from enhancement to inhibition[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719:137440.
- [80] MA J, QIU Y, ZHAO J Y, et al. Effect of agricultural organic inputs on nanoplastics transport in saturated goethite-coated porous media: particle size selectivity and role of dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(6):3524–3534.
- [81] JING G, SHIZHEN P, PENGFEI L, et al. Vertical migration of microplastics in porous media: multiple controlling factors under wet-dry cycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 419: 126413.
- [82] O'CONNOR D, PAN S, SHEN Z, et al. Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249:527–534.
- [83] CHAE Y, AN Y J. Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240:387–395.
- [84] YA H B, JIANG B, XING Y, et al. Recent advances on ecological effects of microplastics on soil environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 798:149338.
- [85] DE SOUZA MACHADO 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.
- [86] KHALID N, AQEEL M, NOMAN A. Microplastics could be a threat to plants in terrestrial systems directly or indirectly[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267:115653.
- [87] TORRES F G, DIOSES-SALINAS D C, PIZARRO-ORTEGA C I, et al. Sorption of chemical contaminants on degradable and non-degradable microplastics: recent progress and research trends[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 757:143875.
- [88] TOURINHO P S, KOCI V, LOUREIRO S, et al. Partitioning of chemical contaminants to microplastics: sorption mechanisms, environmental distribution and effects on toxicity and bioaccumulation[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252:1246–1256.
- [89] XIANG Y, JIANG L, ZHOU Y, et al. Microplastics and environmental pollutants: key interaction and toxicology in aquatic and soil environments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 422:126843.
- [90] CHANG J, FANG W, LIANG J, et al. A critical review on interaction of microplastics with organic contaminants in soil and their ecological risks on soil organisms[J]. *Chemosphere*, 2022, 306:135573.
- [91] RILLIG M C, BONKOWSKI M. Microplastic and soil protists: a call for research[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241:1128–1131.
- [92] CUI W Z, GAO P P, ZHANG M Y, et al. Adverse effects of microplastics on earthworms: a critical review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 850:158041.
- [93] FAN X L, GAN R, LIU J Q, et al. Adsorption and desorption behaviors of antibiotics by tire wear particles and polyethylene microplastics with or without aging processes[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 771:145451.
- [94] YOU H M, HUANG B Q, CAO C L, et al. Adsorption-desorption behavior of methylene blue onto aged polyethylene microplastics in aqueous environments[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167:112287.
- [95] BARBOZA L G A, VIEIRA L R, BRANCO V, et al. Microplastics increase mercury bioconcentration in gills and bioaccumulation in the liver, and cause oxidative stress and damage in *Dicentrarchus labrax* juveniles[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8:15655.
- [96] ZHOU Y F, LIU X N, WANG J. Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 392:122273.
- [97] WARDROP P, SHIMETA J, NUGEGODA D, et al. Chemical pollutants sorbed to ingested microbeads from personal care products accumulate in fish[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7):4037–4044.
- [98] YANG W, GAO X, WU Y, et al. The combined toxicity influence of microplastics and nonylphenol on microalgae *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 195:110484.
- [99] WANG H T, DING J, XIONG C, et al. Exposure to microplastics lowers arsenic accumulation and alters gut bacterial communities of earthworm *Metaphire californica*[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 251:110–116.
- [100] WANG Y, LIU C Q, WANG F F, et al. Behavior and mechanism of atrazine adsorption on pristine and aged microplastics in the aquatic environment: kinetic and thermodynamic studies[J]. *Chemosphere*, 2022, 292:133425.
- [101] GAO L, FU D D, ZHAO J J, et al. Microplastics aged in various environmental media exhibited strong sorption to heavy metals in seawater[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 169:112480.
- [102] 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[J]. *生态学报*, 2021, 41(8):3315–3324. CHEN L, GAO S X, XU Y L. Progress on release and migration of plastic additives to ecological environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(8):3315–3324.
- [103] BRIDSON J H, GAUGLER E C, SMITH D A, et al. Leaching and extraction of additives from plastic pollution to inform environmental risk: a multidisciplinary review of analytical approaches[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414:125571.
- [104] LI B, LAN Z H, WANG L, et al. The release and earthworm bioaccumulation of endogenous hexabromocyclododecanes (HBCDDs) from expanded polystyrene foam microparticles[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255:113163.
- [105] TANAKA K, TAKADA H, YAMASHITA R, et al. Facilitated leach-

- ing of additive-derived PBDEs from plastic by seabirds' stomach oil and accumulation in tissues[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(19):11799–11807.
- [106] BOOTS B, RUSSELL C W, GREEN D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(19):11496–11506.
- [107] MACHADO A A D, KLOAS W, ZARFL C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(4):1405–1416.
- [108] 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, 670:1–7.
- [109] 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 Minzu University (Natural Science Edition)*, 2021, 39(4):476–480.
- [110] 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 等. 微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(8):4394–4401. WANG Z C, ZHANG B W, NI J X, et al. Effect of microplastics on soil water infiltration and evaporation[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8):4394–4401.
- [111] LIU H, YANG X, LIU G, et al. Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil[J]. *Chemosphere*, 2017, 185:907–917.
- [112] LI H, LIU L. Short-term effects of polyethylene and polypropylene microplastics on soil phosphorus and nitrogen availability[J]. *Chemosphere*, 2022, 291:132984.
- [113] YANG M, HUANG D Y, TIAN Y B, et al. Influences of different source microplastics with different particle sizes and application rates on soil properties and growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 222:112480.
- [114] YU H, FAN P, HOU J, et al. Inhibitory effect of microplastics on soil extracellular enzymatic activities by changing soil properties and direct adsorption: an investigation at the aggregate-fraction level[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267:115544.
- [115] 鞠志成, 金德才, 邓晔. 土壤中塑料与微生物的相互作用及其生态效应[J]. 中国环境科学, 2021, 41(5):2352–2361. JU Z C, JIN D C, DENG Y. The interaction between plastics and microorganisms in soil and their ecological effects[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(5):2352–2361.
- [116] 黄艺, 贾薇茜, 李康, 等. 土壤微塑料与微生物的相互作用关系[J]. 环境科学学报, 2022, 42(4):64–74. HUANG Y, JIA W Q, LI K, et al. Interaction between soil microplastics and microorganisms[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(4):64–74.
- [117] ZANG H, ZHOU J, MARSHALL M R, et al. Microplastics in the agroecosystem: are they an emerging threat to the plant-soil system? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148:107926.
- [118] FAN P, TAN W, YU H. Effects of different concentrations and types of microplastics on bacteria and fungi in alkaline soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 229:113045.
- [119] ZHANG M, ZHAO Y, QIN X, et al. Microplastics from mulching film is a distinct habitat for bacteria in farmland soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688:470–478.
- [120] WU X, PAN J, LI M, et al. Selective enrichment of bacterial pathogens by microplastic biofilm[J]. *Water Research*, 2019, 165:114979.
- [121] ZHAO S, ZHANG Z, CHEN L, et al. Review on migration, transformation and ecological impacts of microplastics in soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 176:104486.
- [122] ZHANG Y, ZHANG X, LI X, et al. Interaction of microplastics and soil animals in agricultural ecosystems[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2022, 26:100327.
- [123] TIAN L, CHENG J, JI R, et al. Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2022, 25:100311.
- [124] HUERTA LWANGA E, GERTSEN H, GOOREN H, et al. Microplastics in the terrestrial ecosystem: implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(5):2685–2691.
- [125] CHEN Y, LIU X, LENG Y, et al. Defense responses in earthworms (*Eisenia fetida*) exposed to low-density polyethylene microplastics in soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 187:109788.
- [126] JIANG X, CHANG Y, ZHANG T, et al. Toxicological effects of polystyrene microplastics on earthworm (*Eisenia fetida*) [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 259:113896.
- [127] KIM S W, AN Y J. Soil microplastics inhibit the movement of spring-tail species[J]. *Environment International*, 2019, 126:699–706.
- [128] QI Y, YANG X, PELAEZ A M, et al. Macro- and micro- plastics in soil-plant system: effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645:1048–1056.
- [129] BOSKER T, BOUWMAN L J, BRUN N R, et al. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum* [J]. *Chemosphere*, 2019, 226:774–781.
- [130] 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 等. 微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(10):4661–4667. LIAO Y C, NAZYGUL J, LI M, et al. Effects of microplastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10):4661–4667.
- [131] LUO Y, LI L, FENG Y, et al. Quantitative tracing of uptake and transport of submicrometre plastics in crop plants using lanthanide chelates as a dual-functional tracer[J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17(4):424–431.
- [132] 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. LI L Z, ZHOU Q, YIN N, et al. Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(9):928–934.
- [133] LOZANO Y M, RILLIG M C. Effects of microplastic fibers and drought on plant communities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(10):6166–6173.

(责任编辑:李丹)