

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.1121

冯裕栋, 杨杰, 涂晨, 等. 土壤中微/纳塑料的生物健康效应和食物链传递风险[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(5): 661-674.

FENG Yu-dong, YANG Jie, TU Chen, et al. Biological Health Effects and Food-chain Transfer Risks of Micro/Nano Plastics in Soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(5): 661-674.

## 土壤中微/纳塑料的生物健康效应和食物链传递风险

冯裕栋<sup>1,2</sup>, 杨杰<sup>1,2</sup>, 涂晨<sup>1,2</sup>, 李连祯<sup>3</sup>, 李瑞杰<sup>1,2,4</sup>, 潘响亮<sup>5</sup>, 骆永明<sup>1,2①</sup> [1. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 江苏南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 青岛大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266071; 4. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃兰州 730000; 5. 浙江工业大学环境学院, 浙江杭州 310000]

**摘要:** 微/纳塑料污染已成为亟待解决的全球性环境问题。微/纳塑料进入土壤后会长期累积在土壤中, 并对土壤生态系统健康产生不良影响。该文从土壤生物健康效应和食物链传递风险角度综述了近年来国内外土壤微/纳塑料调查研究进展, 分类介绍了土壤中微/纳塑料对植物、动物和微生物的影响及在陆地生物和食物链中的传递, 并展望了土壤中微/纳塑料的未来研究方向。该文指出, 微/纳塑料广泛存在于不同功能的土壤中, 可以被植物吸收和动物摄食, 通过食物链传递进入人体。未来需要加强土壤中微/纳塑料污染过程与生物健康效应研究, 加强对微/纳塑料在土壤生态系统和食物链中传递的风险评估, 为土壤中微/纳塑料的监测、管控和治理提供科学指导和技术方法参考。

**关键词:** 微/纳塑料; 土壤生态系统; 生物健康效应; 食物链传递; 生态风险评估

**中图分类号:** X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2023)05-0661-14

**Biological Health Effects and Food-chain Transfer Risks of Micro/Nano Plastics in Soil.** FENG Yu-dong<sup>1,2</sup>, YANG Jie<sup>1,2</sup>, TU Chen<sup>1,2</sup>, LI Lian-zhen<sup>3</sup>, LI Rui-jie<sup>1,2,4</sup>, PAN Xiang-liang<sup>5</sup>, LUO Yong-ming<sup>1,2①</sup> (1. CAS Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Environmental Sciences and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 4. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 5. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Micro/nano plastics (MNPs) pollution has evolved into a global environmental issue that must be addressed. MNPs can enter the soil and accumulate in the soil for long-term and thus pose a potential risk to soil ecosystem health. From the perspectives of soil biological health effects and food chain risks, this paper reviews the research progress in the investigation of soil MNPs, discusses the effects of soil MNPs on plants, animals, and microorganisms, and summarizes the transport of MNPs in terrestrial organisms and the food chains. In addition, the future research directions of MNPs in soils are also prospected. MNPs exist widely in soils with different functions, and can be absorbed by plants, ingested by animals, and thus entering the human body through the terrestrial food chain. In the future, it is necessary to strengthen the research on the pollution process and biological health effects of MNPs in soil, and to strengthen the risk assessment of MNPs in the soil eco-system and the food chain transmission, so as to provide scientific guidance and technical methodological reference for the monitoring, control and management of MNPs in soils.

**Key words:** micro/nano plastic; soil ecosystem; biological health effect; food-chain transfer; ecological risk assessment

微/纳塑料污染已成为严重的全球性生态环境问题。通常微塑料是指粒径小于 5 mm 的塑料颗粒, 纳塑料是指粒径小于 100 nm 的塑料颗粒, 但也有学者认为纳塑料的粒径上限应该设置为 1 000 nm<sup>[1]</sup>。据统计, 1950—2015 年间, 全球共产生 6.3 亿 t 塑料垃圾, 其中 79% 的塑料垃圾会进入垃圾填

埋场或自然环境中, 只有 9% 被回收利用<sup>[2]</sup>。据估

收稿日期: 2022-10-27

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41991330); 国家自然科学基金面上项目(42177039, 41877142); 中国科学院前沿科学重点项目(QYZDJ-SSW-DQC015)

① 通信作者 E-mail: ymluo@issas.ac.cn



比性差。近年来,研究者使用一致的方法进行大范围土壤微/纳塑料调查,可以进一步揭示不同地区土壤中微/纳塑料的赋存特征。例如HU等<sup>[38]</sup>首次揭示全国范围内农业土壤中微塑料的赋存特征,微塑料丰度范围为25.56~2 067.78个·kg<sup>-1</sup>,转换成平均质量含量约为6.78 mg·kg<sup>-1</sup>,结果表明中国北部干旱或半干旱地区微塑料丰度较高,西南温和地区相对较低。REN等<sup>[6]</sup>调查了全国19个省农田土

壤中的农用地膜源微塑料[PE和聚氯乙烯(PVC)]后发现,农业大省山东、河南和安徽贡献了全国50%以上的农田地膜源微塑料。土壤中微/纳塑料丰度在地区间差异大,并会在局部地区大量累积。这主要是由于农用土壤的利用方式不同,例如长期使用农膜、长期施用生活污水和有机肥都会导致大量微/纳塑料在土壤中累积。

表1 基于2020—2022年发表文献的微/纳塑料在土壤中的分布研究结果<sup>[6,25-37]</sup>

Table 1 Distribution of micro/nano plastics in the soil based on literature published in 2020-2022

土壤利用类型	地理位置	来源(贡献率)	丰度	粒径/ $\mu\text{m}$	形状	类型	鉴定方法	来源文献
农田土壤	中国19个省	农膜(10%~30%)	6~108 g·t <sup>-1</sup>	<5 000	纤维、薄膜、碎片	PE、PVC	$\mu$ -FTIR	[6]
农田土壤	中国19个省	农膜	0.1~324.5 kg·hm <sup>-2</sup>	>7	/	/	$\mu$ -FTIR	[26]
耕地土壤	云南	农膜	0.9×10 <sup>3</sup> ~40.8×10 <sup>3</sup> 个·kg <sup>-1</sup>	<500(89.3%)	碎片(78.3%)、纤维	/	显微镜	[27]
农田土壤	江苏无锡	农膜、大气沉降、灌溉	春季土: 56.67~180.33个·kg <sup>-1</sup> 冬季土: 206.15~890.49个·kg <sup>-1</sup>	0~500(72.45%) 500~1 000(17.63%) 1 000~5 000(9.92%)	纤维、薄膜、碎片、泡沫、颗粒	PET、PP、PE、PS、PU、PVC、PMMA、丙烯酸酯、PA	$\mu$ -FTIR	[28]
农业土壤	山东寿光	农膜、洪水、施肥和塑料垃圾	310~5 698个·kg <sup>-1</sup>	<500(65.2%) 500~1 000(19.2%) 1 000~2 000(9.7%) 2 000~5 000(5.9%)	碎片(46.3%)、薄膜(25.4%)、纤维(15.1%)、颗粒、泡沫	PP&EPC(45.0%)、PE(39.7%)、PS(7.9%)、PES	$\mu$ -FTIR	[29]
农业土壤	新疆石河子	农膜	10.10~61.05 mg·kg <sup>-1</sup>	800~3 000	薄膜	PE	ATR-FTIR	[30]
菜地土壤	武汉	人为活动	320~12 560个·kg <sup>-1</sup>	<200(70%), 500~1 000(13%), 200~5 000(9%), 1 000~3 000(7%)	纤维(37%)、碎片(15%)、微球(48%)、泡沫	PA(32.5%)、PP(28.8%)、PS(16.9%)、PVC、PE	Raman	[31]
湿地土壤	黄河三角洲	大气沉降,人为活动	80~4 640个·kg <sup>-1</sup>	100~1 000(84.4%)	颗粒(16.67%)、纤维(33.33%)、碎片(50%)	PE(23%)、PS(42%)、PET(35%)	FTIR	[32]
红树林沉积物土壤	东南沿海	人为活动	8.3~5 738.3个·kg <sup>-1</sup>	50~5 000	纤维、泡沫、碎片、微球、薄膜	PS(75.2%)、PP(11.7%)、尼龙(4.6%)	$\mu$ -FTIR	[33]
淡水潮汐湿地	美国华盛顿	大气沉降,地表径流	334~3 068个·kg <sup>-1</sup>	<5 000	纤维、碎片	PS(29%)、PE(8%)	ATR-FTIR	[34]
海岸沉积物	尼日利亚	沙滩沉积	342.2个	1 000~5 000	橡胶(8%)、碎片(58%)、泡沫(33%)、纤维(4%)	PE、PP、PS	ATR-FTIR	[35]
森林、城市和农业土壤	韩国	人类活动,地膜,大气沉降,轮胎磨损	(700±75)个·kg <sup>-1</sup>	<5 000	碎片(66.1%)、薄膜(19.2%)、纤维(14.6%)	PE、PP、SBR	FTIR	[36]
家庭院落土壤	澳大利亚	人类活动	28.6个·kg <sup>-1</sup> (100~5 000 $\mu\text{m}$ )	0.8~5 000	/	PP、PE	Raman	[37]
农业土壤	突尼斯	有机肥,农膜,化肥,生活污水	(13.21±0.89)~(852.24±124.2)个·kg <sup>-1</sup>	300~5 000	纤维(>75%)、碎片	PE、PP、PBAT	FTIR	[25]

来源、粒径、形状和类型括号中数据为相应比例。PE为聚乙烯;PVC为聚氯乙烯;PET为聚对苯二甲酸乙二酯;PP为聚丙烯;PS为聚苯乙烯;PU为聚氨酯;PMMA为聚甲基丙烯酸甲酯;PA为聚酰胺;EPC为乙丙共聚物;PES为聚醚砜树脂;SBR为丁苯橡胶;PBAT为聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯; $\mu$ -FTIR为显微傅里叶红外光谱;FTIR为傅里叶红外光谱;ATR-FTIR为衰减全反射-傅里叶红外光谱;Raman为拉曼光谱。“/”表示无此项。



城市土壤中微/纳塑料的赋存特征与农业土壤有所不同,城市土壤中微塑料形状主要是纤维(70%),因为纤维易从纺织品、地毯及其他软家具表面脱落并进入环境中<sup>[39-40]</sup>。城市土壤中还存在大量轮胎磨损颗粒(tire wear particles, TWPs), TWPs 主要分布在道路两边的土壤中,其丰度随着距道路的距离增加而减小<sup>[41]</sup>。因此,需要明确不同地区或类型土壤中微/纳塑料的赋存特征,为评估微/纳塑料的陆地生态风险提供数据支撑。

土壤中的微/纳塑料不仅存在地区差异,不同深度土壤中微/纳塑料的赋存特征也不同。微/纳塑料大多累积在表层土壤中,随着土壤深度增加而减少。一项对我国农业土壤的研究表明,0~5、5~10 和 >10~15 cm 不同深度土壤中微塑料平均丰度分别为 435.67、367.44 和 272 个·kg<sup>-1</sup>,微塑料丰度随土壤深度的增加呈下降趋势<sup>[38]</sup>。微塑料还会向更深层的土壤移动,最近的调查报告显示,在新疆连续 10 年有地膜覆盖的土壤深度 40~80 cm 处微塑料丰度为 112 个·kg<sup>-1</sup><sup>[42]</sup>。连续 32 年有地膜覆盖的土壤深度 >80~100 cm 处微塑料丰度可达 2 268~3 529 个·kg<sup>-1</sup><sup>[43]</sup>。深层土壤也不可避免地受到微/纳塑料的污染,而且相比表层土壤中微/纳塑料更难以从土壤中清除,甚至会进入地下水<sup>[44]</sup>。土壤微/纳塑料向地下深层迁移的因素主要有农业活动(开垦)、自然条件(降雨)或土壤生物(蚯蚓)等。此外,微/纳塑料的粒径和形状,以及土壤类型和理化性质也会影响塑料颗粒迁移的距离。因此,需要进一步调查微/纳塑料在深层土壤中的分布,特别是在植物根系周边和土壤动物活动范围内的土壤。虽然在土壤中可检测到大量微塑料,但因目前尚无有效的方法检测土壤中的纳塑料,导致纳塑料在土壤中的赋存特征尚不清楚。纳塑料具有粒径小、比表面积大等特性,更容易在土壤中发生迁移,而且具有更大的生物毒性。

## 2 土壤中微/纳塑料的食物链传递与风险

陆地植物和动物能否吸收微/纳塑料一直是研究重点,这是研究微/纳塑料在食物链中传递的基础。有研究最早发现水培生菜(*Lactuca sativa*)和小麦(*Triticum aestivum*)可通过侧根间隙吸收 0.2 和 2 μm 的 PS 颗粒,且在砂质土壤生长的植物根系也能吸收 PS 颗粒<sup>[15,45-46]</sup>。随后,LIU 等<sup>[47]</sup>观察到水培水稻幼苗(Xiuzhan-15)可以吸收粒径为 80 nm 和 1 μm 的 PS 微球,而 AUSTEN 等<sup>[48]</sup>观察到土培桦树的根系可以吸收 5~10 μm 的微塑料颗粒。植物根

系对微/纳塑料的吸收不仅与塑料粒径有关,还与塑料表面电荷有关。拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)根系更易吸收带负电荷的纳塑料<sup>[49]</sup>。一旦微/纳塑料被植物根系吸收,便会从根部转移到其他植物器官中。目前的研究表明,植物体内的微/纳塑料主要集中在根部,只有少量微/纳塑料会转移到植物地上部分。据研究估算,黄瓜(*Cucumis sativus*)幼苗根系吸收的纳塑料向茎叶的转移系数分别为 0.02 和 0.16<sup>[50]</sup>,而生菜和小麦根部微/纳塑料向地上部分的转移系数为 0.14 和 0.09<sup>[45]</sup>。虽然目前采用的微/纳塑料暴露浓度高于实际环境,且形状为规则球形,但是从侧面证实在自然环境中存在植物吸收土壤微/纳塑料的途径,更有可能通过土壤-植物-动物食物链传递(图 2)。目前,有关微/纳塑料在土壤动物体内吸收和累积的研究还较少,但是已有研究证实土壤无脊椎动物会摄食微/纳塑料。蚯蚓是一种常见的毒性实验模式生物。已有较多研究表明,蚯蚓会摄食不同粒径和类型的微/纳塑料。CHENG 等<sup>[51]</sup>证实蚯蚓(*Metaphire guillelmi*)会摄食 25 μm 的高密度聚乙烯(HDPE)颗粒和 13 μm 的 PP 颗粒;CHEN 等<sup>[52]</sup>证实蚯蚓(*Eisenia fetida*)会摄食粒径 <400 μm 的低密度聚乙烯(LDPE)颗粒;蚯蚓(*Enchytraeus crypticus*)还会摄食长达 3 254 μm 的 PE 纤维<sup>[53]</sup>。其他土壤无脊椎动物也会摄食微/纳塑料,例如等足类动物(*Porcellio scaber*)会摄食 50~2 653 μm 的 PE 纤维<sup>[54]</sup>,蜗牛(*Achatina fulica*)则会啃食大块 EPS 泡沫<sup>[55]</sup>。但是微/纳塑料在无脊椎动物体内的吸收和累积的量目前尚不清楚。研究者还在鸡的砂囊和羊的粪便中检测到微/纳塑料,说明微/纳塑料已经进入陆地脊椎动物体内<sup>[18,56]</sup>。

微/纳塑料能在海洋食物链中传递,从浮游植物到浮游动物,甚至到更高级的哺乳动物,并会在高等捕食者中富集<sup>[57-60]</sup>。目前,关于微/纳塑料在陆地食物链中传递的研究还相当有限。PANEBIANCO 等<sup>[61]</sup>首次从自然和养殖的可食用蜗牛(*Helix aspersa* 和 *Helix pomatia*)中发现微塑料的存在,每只蜗牛体内大约含有(0.92±1.21)个塑料颗粒,说明蜗牛中的微塑料很有可能是通过土壤-植物-蜗牛这条食物链进入蜗牛体内。HUERTA LWANGA 等<sup>[18]</sup>通过调查家庭院落中土壤和动物体内的微塑料丰度发现,微塑料可以在家庭院落食物链中传递,即通过土壤-蚯蚓、土壤-鸡和土壤-蚯蚓-鸡食物链传递,且从土壤到蚯蚓粪、鸡粪和砂囊的富集系数分别为 12.7、105 和 5.1。鸡的砂囊是人常吃的食物,这使得微塑料可能通过鸡-人食物

链进入人体。微/纳塑料污染的食物可能会对捕食者产生影响。已有研究表明蜗牛 (*Achatina fulica*) 摄食纳塑料污染的绿豆 (*Vigna radiata*) 会降低蜗牛的生长速度和摄食速度,不利于蜗牛生长<sup>[62]</sup>。特别值得注意的是像生菜这类直接被广大人群食用的蔬菜。2022年的文献报道,生菜暴露在微塑料含量为  $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的土壤中,最终生菜地上部分(以干重计)微塑料含量可达  $15.2 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[45]</sup>。按中国生菜人均消耗量为  $171.94 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$ ,生菜含水量  $w$  为  $95.6\%$ <sup>[63]</sup>,估计中国每人每天通过生菜摄食的微塑料可达  $115 \text{ } \mu\text{g}$ 。微/纳塑料很有可能通过陆地食物链传递到人体,最终在人体内累积。人类已经不可避免地暴露在微/纳塑料污染的食物中。微塑料已经在人体排泄物和组织中检测到。ZHANG 等<sup>[64]</sup>研究发现人体粪便中微塑料检出率达  $95.8\%$ ,其含量为  $1 \sim 36 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ ,粒径为  $20 \sim 800 \text{ } \mu\text{m}$ 。

SCHWABL 等<sup>[65]</sup>在所有人体粪便样品中都检测到微塑料,其含量为  $1.8 \sim 17.2 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ ,粒径为  $50 \sim 500 \text{ } \mu\text{m}$ ,多为 PP 和 PET 塑料。人体摄入的微塑料大部分会被排泄出来,又进入到环境中。另一小部分则会残留在肠道中,IBRAHIM 等<sup>[66]</sup>在人结肠中检测到 PP、聚碳酸酯(PC)和聚酰胺(PA)塑料颗粒,96.1%为纤维状微塑料,纤维似乎更容易残留在肠道内,含量达  $(28.1 \pm 15.4) \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ 。更小的一部分微/纳塑料会穿透肠道屏障,进入血液循环,最终会在人体器官中累积<sup>[67-68]</sup>。微/纳塑料可能已经广泛存在于陆地食物网中,有必要对食物链中的不同营养级生物体内微/纳塑料丰度进行调查,以评估微塑料的污染程度,特别是微/纳塑料在食物链中的富集效应,进而评估微/纳塑料对陆地生命体的健康风险。

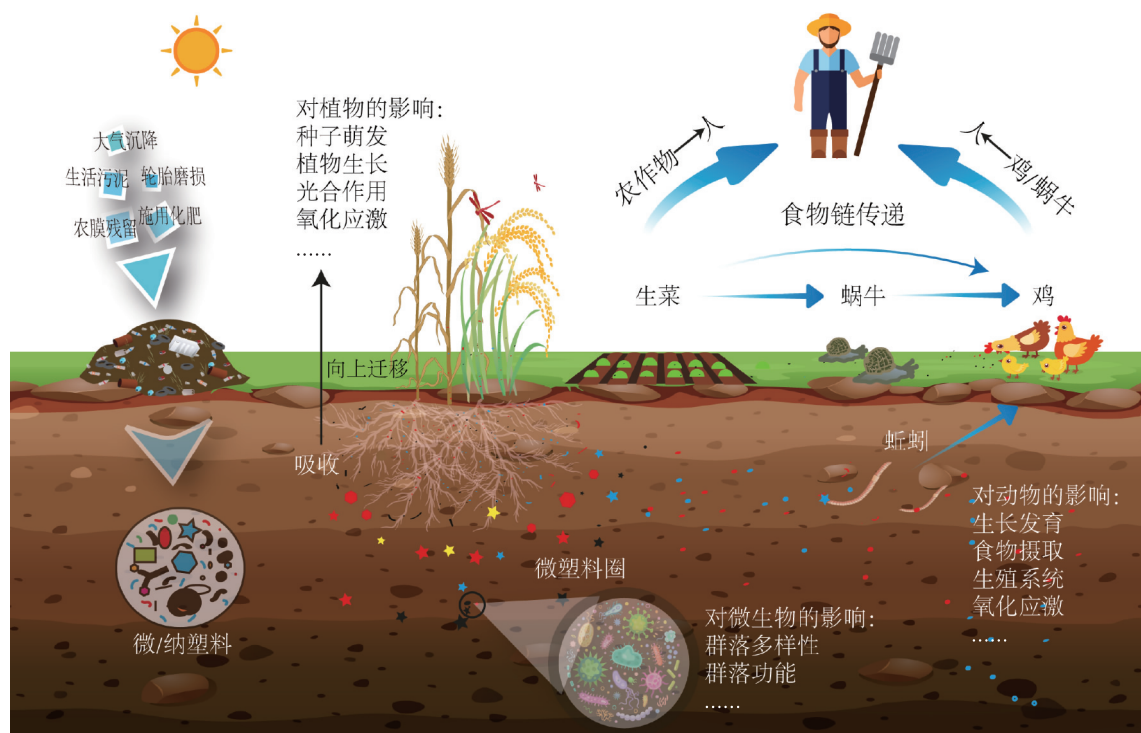


图2 土壤中微/纳塑料的生物健康效应和食物链传递风险

Fig. 2 Biological health effects and food-chain transfer risks of micro/nano plastics in soil

### 3 微/纳塑料对土壤生物的影响

#### 3.1 微/纳塑料对陆地植物的影响

微/纳塑料一旦在土壤中积累,就会影响植物的生长发育,例如发芽率、生物量和光合作用(表2<sup>[15,17,25,55,69-87]</sup>)。出芽率是衡量微/纳塑料对种子毒害的重要指标,塑料的粒径、含量和类型都会影

响植物种子发芽率。BOSKER 等<sup>[74]</sup>研究显示不同粒径( $0.05$ 、 $0.5$  和  $4.8 \text{ } \mu\text{m}$ )塑料均会推迟水芹 (*Lepidium sativum*) 种子发芽。此外, $1\ 000 \text{ } \mu\text{m}$  PE 颗粒对大豆 (*Glycine max*) 种子发芽的抑制率比  $500 \text{ } \mu\text{m}$  PE 颗粒高  $22\%$ ,且土壤中微塑料丰度增加  $4\%$ ,大豆出芽率减少  $30\%$ <sup>[76]</sup>。微/纳塑料抑制植物种子发芽可能是由于微/纳塑料颗粒累积在种子表面,堵

塞种子表面气孔,从而减少种子吸收水分和营养物质<sup>[25]</sup>。但是 LIAN 等<sup>[88]</sup>观察到当小麦 (*Triticum aestivum*) 种子暴露在 100 nm 的 PS 颗粒下时,种子发芽率没有受到影响,这可能是由于纳塑料在溶液中容易聚集沉淀,在种子表面吸附的纳塑料颗粒减

少。此外,小麦 (*Triticum aestivum*) 种子发芽率还与微塑料类型有关,不同微塑料类型对发芽的抑制率由大到小依次为 HDPE、聚乳酸 (PLA) 和聚丙烯 (PP)<sup>[70]</sup>。不同类型塑料在水溶液或土壤中会释放不同的添加剂从而影响种子发芽。

表 2 微/纳塑料对土壤关联的生物和食物链的影响<sup>[15,17,25,55,69-87]</sup>

Table 2 Effects of micro/nano plastics on soil associated organisms and food chain

物种	塑料类型	粒径/ μm	暴露浓度	暴露 时间	生物效应	来源 文献
小麦 ( <i>Triticum aestivum</i> )	PS 微球	0.5	100 mg · L <sup>-1</sup>	8 d	PS 对小麦幼苗生长、光合作用和活性氧含量无显著影响	[69]
	PP、HDPE、PLA 微球	150、1 000、4 000	0.1、0.5、1 g · kg <sup>-1</sup>	7、30 d	不同类型塑料会影响小麦发芽率和生长	[70]
	PS 微球	0.04、1	0.029 g · L <sup>-1</sup>	5 d	PS 微球积累在根表面和根冠细胞中	[71]
生菜 ( <i>Lactuca sativa</i> )	PS 微球	0.25、2.3	0.5、5、50 mg · L <sup>-1</sup>	水培 10 d, 土培 21 d	纳米和微米级 PS 颗粒可以通过植物侧根间缝进入植物体内	[15]
水稻 ( <i>Oryza sativa</i> II You 900, <i>Oryza sativa</i> Xiushui 123)	不规则 PS	135.9~530	0.01%、0.5% (以鲜重计)	142 d	PS 对不同的水稻影响不同,会使 Y900 减产,而使 XS123 增产;还会影响籽粒中淀粉含量	[72]
水稻 ( <i>Oryza sativa</i> )	PS、PTFE	10	0.04、0.1、0.2 g · L <sup>-1</sup>	7 d	PS 和 PTFE 主要通过抑制根系活力来影响水稻幼苗的蒸腾作用和气孔	[73]
水芹 ( <i>Lepidium sativum</i> )	塑料微球	0.05、0.5、4.8	103~107 个 · mL <sup>-1</sup>	8、24、48、72 h	3 种不同尺寸塑料在暴露 8 h 后,其发芽率均显著降低,且不良影响随塑料尺寸的增加而增加,但 24 h 后发芽率无明显差别	[74]
绿豆 ( <i>Vigna radiata</i> )	鞋底碎片	57~229	1% (以鲜重计)	28 d	鞋底碎片会影响植物生长和光合作用	[75]
大豆 ( <i>Glycine max</i> ) (中黄 37)	不规则 PS	500、1 000	1%、5% (以鲜重计)	/	PS 塑料使大豆发芽率下降,1 000 μm PS 颗粒对大豆发芽率影响更大;500 μm PS 颗粒对大豆株高和鲜重表现出更强的抑制作用	[76]
蚕豆 ( <i>Vicia faba</i> )	PS 微球	0.1、5	10、50、100 mg · L <sup>-1</sup>	48 h	5 μm PS 微球会影响蚕豆的酶活性,使其生物量降低;100 nm PS 微球对蚕豆的遗传毒性和氧化损伤高于 5 μm PS 微球	[77]
玉米 ( <i>Zea mays</i> L. var. Jubilee)	PE 微球	3	0.012 5、100 mg · mL <sup>-1</sup>	10、15 d	根际塑料积累导致玉米蒸腾作用、氮含量和生长显著下降	[78]
胡萝卜 ( <i>Daucus carota</i> )	PS 微球	252.1、4 012.4	10、20 mg · L <sup>-1</sup>	7 d	PS 微球可以从水培溶液中迁移到胡萝卜根部	[79]
拟南芥 ( <i>Arabidopsis thaliana</i> )	PS 微球	0.04、1	0.029 g · L <sup>-1</sup>	12 d	PS 微球积累在根表面和根冠细胞中	[71]
洋葱 ( <i>Allium fistulosum</i> )	PA、HDPE、PES、PET、PP、PS 颗粒	PA: 15~20 HDPE: 643 PET: 222~258 PP: 647~754 PS: 547~555 PES: 5 000	PES (0.2%) 其他塑料 2.0%	60 d	微塑料的添加导致土壤物理参数改变,进而影响水动力学和微生物活性;不同类型微塑料对植物生长的影响不同	[80]
赤子爱胜蚓 ( <i>Eisenia andrei</i> )	不规则塑料	<100	100 μg · kg <sup>-1</sup>	7、14 d	微塑料会在蚯蚓体内累积,蚯蚓暴露于微塑料可导致氧化应激	[25]
	PE 微球	180~212 250~300	1 000 mg · kg <sup>-1</sup>	21 d	微塑料会影响蚯蚓体腔细胞的活力,并对雄性生殖器官造成损害,而对雌性生殖器官的影响可以忽略不计	[81]



续表 2 Table 2 (Continued)

物种	塑料类型	粒径/ $\mu\text{m}$	暴露浓度	暴露 时间	生物效应	来源 文献
	PS 微球	0.1、1.3	$100、1\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	14 d	PS 微球会损坏蚯蚓肠道细胞;PS 微球会引起蚯蚓氧化应激,而且诱导 DNA 损伤	[82]
秀丽隐杆线虫 ( <i>Caenorhabditis elegans</i> )	轮胎磨损颗粒	34~265	1、10、100、1 000、 $10\ 000\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	2、10 d	轮胎磨损颗粒的毒性具有时间依赖性,毒性效应会随着暴露时间的延长而逐渐升高	[83]
	PS 微球	1、5	$1、10、100\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	36 h、15 d	PS 长期暴露可以改变线虫的饮食习惯;线虫饮食习惯改变主要是由于相关功能基因调控	[84]
白符蚱 ( <i>Folsomia candida</i> )	PE 颗粒	2、34、66	$10\ \text{mg}/90\ \text{mg}$ 干 酵母	7 d	跳虫可以摄食 $<66\ \mu\text{m}$ 的塑料颗粒;跳虫摄食微塑料后,其运动速度和距离显著下降	[85]
果蝇 ( <i>Drosophila</i> )	PET 颗粒	2	$1、10、20\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	6、20 d	PET 颗粒增加雄性果蝇的自发活动,减少能量储备,并影响雌性果蝇的繁殖	[86]
蚕 ( <i>Bombyx mori</i> )	PS 微球	0.5	$0.25\ \text{mg}/0.5\ \text{g}$ 食物	10、21 d	蚕幼虫会摄取 PS 塑料颗粒,PS 微球暴露没有改变蚕的个体和群体适应度,但是不稳定运动和趋化性缺陷增加	[87]
蜗牛 ( <i>Cantareus asperses</i> )	LDPE 微球	120、292、340、 560	体积分数为 10%、 25%、50%	28 d	小粒径 LDPE 颗粒会引起蜗牛氧化应激,而没有引起可量化的细胞或基因毒性效应	[17]
蜗牛 ( <i>Achatina fulica</i> )	EPS 泡沫	/	/	28 d	蜗牛会摄取 EPS,并通过排泄产生大量微塑料;蜗牛摄入 EPS 会改变肠道微生物群落	[55]

PS 为聚苯乙烯;PP 为聚丙烯;PE 为聚乙烯;PA 为聚酰胺;HDPE 为高密度聚乙烯;PLA 为聚乳酸;LDPE 为低密度聚乙烯;PTFE 为聚四氟乙烯;PES 为聚醚砜;PET 为聚对苯二甲酸乙二酯;EPS 为可发性聚苯乙烯。“/”表示无此项。

微/纳塑料也会影响植物地下和地上部分生物量。塑料颗粒会影响水芹根系生长,50 nm 的塑料颗粒对水芹根的生长具有抑制作用,而 500 nm 的塑料颗粒则对根生长有促进作用<sup>[74]</sup>。此外,100 nm PS 颗粒对小麦根生长有极显著正效应 ( $P < 0.01$ ), 比对照组根生长提高 1.9~2.2 倍<sup>[88]</sup>。植物根系生物量还与塑料类型有关。暴露在 HDPE 塑料颗粒下黑麦草 (*Lolium perenne*) 根的生物量比暴露在 PLA 下的高 45%<sup>[89]</sup>。微/纳塑料对根生长的抑制作用一方面是由于微/纳塑料颗粒易吸附在根系表面,可能堵塞细胞壁气孔,破坏营养物质的运输;另一方面,微/纳塑料的胁迫可对植物根系造成氧化损伤,甚至产生遗传毒性<sup>[77]</sup>。微/纳塑料促进植物地下部分生长的部分原因可能是塑料改变了土壤的物理性质(容重和含水量),从而促进根系生长<sup>[80]</sup>,其微观机制仍需进一步探明。微/纳塑料还会影响植物幼苗和茎的生物量,高质量浓度 ( $200\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) PS 塑料颗粒会抑制水稻幼苗和小麦茎的生长,其抑制率分别为 10.2% 和 13.7%<sup>[73]</sup>。低质量浓度 ( $50\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) PS 微球对小麦茎生长则有促进作用<sup>[90]</sup>。小麦幼苗生长还受塑料聚合物类型的影

响,PLA 塑料对小麦幼苗抑制作用比 HDPE 和 PE 更大,这可能是由于 PLA 容易在土壤中降解释放出单体或添加剂从而影响小麦生长<sup>[70]</sup>。目前,有关微/纳塑料对植物生长发育的影响研究有待深入,多数还只通过水培试验、高剂量短时间暴露来揭示微/纳塑料对植物的影响,因而不能反映微/纳塑料对土壤中植物的实际影响。

微/纳塑料会进一步对植物光合作用造成影响。光合色素含量和光合速率可以反映植物光合作用的强弱。土培试验中 PS 塑料在低浓度 ( $0 \sim 50\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 条件下明显促进小麦 (*Triticum aestivum*) 叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量的增加,而在高浓度 ( $100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 条件下则会抑制光合色素含量<sup>[90]</sup>。类似地,土培试验中南瓜 (*Cucurbita pepo*) 叶片中光合色素含量和光合效率会随着微塑料(PVC 和 PE)浓度增加而显著降低<sup>[91]</sup>。另一项研究表明小粒径 ( $100\ \text{nm} \sim 18\ \mu\text{m}$ ) PVC 颗粒会促进生菜叶片中类胡萝卜素合成,而大粒径 ( $18 \sim 150\ \mu\text{m}$ ) PVC 则会抑制类胡萝卜素合成<sup>[92]</sup>。以上结果表明微/纳塑料会破坏植物的光合作用,进一步影响光吸收或者电子传递,降低光能的利用效

率。这可能是由于微/纳塑料会抑制植物根系水分的吸收、堵塞叶片气孔或者影响相关蛋白的合成从而影响光合作用。

微/纳塑料还会与其他污染物联合对植物生长产生复合效应。微/纳塑料会影响植物对重金属的吸收,从而影响植物生长。PS 塑料颗粒会减少小麦对铜(Cu)和镉(Cd)的吸收,降低重金属对小麦的毒害,同时提高小麦叶绿素含量,增强光合作用<sup>[69]</sup>。PVC 塑料颗粒也能缓解 Cd 对黄瓜幼苗的毒性,缓解 Cd 对根系活力的影响<sup>[93]</sup>。微/纳塑料主要通过吸附或络合重金属,使生物有效态金属向有机结合态转变,从而降低重金属对植物的毒性<sup>[94]</sup>。但 WANG 等<sup>[95]</sup>研究表明,PLA 和 PE 塑料的存在并不影响 Cd 在玉米(*Zea mays*)根中的累积。PE 塑料会吸附土壤中的菲,使小麦根系中菲的积累量增加,叶片中菲浓度减少,但是 PE 和菲在土壤中混合污染处理比单一污染物处理对小麦的毒性更大<sup>[96]</sup>。实际环境中植物的表现是多种污染物共同影响的结果,因而需要进一步研究微/纳塑料在其中所起的作用是抑制还是促进。

### 3.2 微/纳塑料对土壤动物的影响

据报道,超过 690 种海洋物种和超过 50 种淡水物种会摄入塑料<sup>[97]</sup>,但是有关微/纳塑料对土壤动物的影响研究仍比较匮乏。目前的研究主要关注微/纳塑料对土壤无脊椎动物的影响。微/纳塑料对土壤动物的毒性研究表明,土壤动物对微/纳塑料不会表现出摄食回避,进而会引起土壤动物运动障碍、氧化应激、DNA 损伤、生长抑制和生殖毒性,甚至会导致死亡(表 2)。

KIM 等<sup>[98]</sup>观察到在微塑料含量仅为  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的土壤中跳虫(*Lobelia sokamensis*)活动指数会显著降低。微/纳塑料颗粒可以进入土壤的生物孔隙,从而压缩土壤动物的活动空间。而跳虫摄入微塑料( $<66 \mu\text{m}$ )会导致其运动速度和运动距离降低<sup>[85]</sup>,说明微塑料对跳虫有明显的负面影响。此外,多项研究表明土壤中微/纳塑料浓度和颗粒大小是影响蚯蚓、跳虫或者蜗牛生长发育的关键因素。JU 等<sup>[99]</sup>将白符跳(*Folsomia candida*)暴露在 1% 的 PE 塑料颗粒环境中时,其死亡率增加 28%,繁殖率则下降 70.2%。这与 HUERTA LWANGA 等<sup>[100]</sup>的研究结果类似,随着土壤中微塑料浓度的增加,蚯蚓的生长速率会明显降低,死亡率增加。即使土壤中 PS 塑料含量  $\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  也会对蚯蚓(*Eisenia fetida*)造成氧化应激和 DNA 损伤<sup>[82]</sup>。上述研究表明微/纳塑料大多会对动物造成不同程度

的负面影响,这主要是因为微/纳塑料耐腐蚀,可以在生物体内长时间存在,进而会影响动物摄食、消化和吸收。

微/纳塑料对土壤动物的毒性还具有大小依赖性。LI 等<sup>[101]</sup>研究发现不同粒径微塑料都会改变赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)体内超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和谷胱甘肽 S 转移酶活性,综合生物反应值表明小粒径微塑料对蚯蚓的氧化应激影响更大。小粒径( $120 \mu\text{m}$ )塑料颗粒会引起蜗牛(*Cantareus aspersus*)消化腺氧化应激<sup>[17]</sup>。因为小粒径微/纳塑料更易被土壤生物摄取,少量的小粒径微/纳塑料则会被吸收进入其体内。PARENTI 等<sup>[87]</sup>观察到  $0.5 \mu\text{m}$  纳塑料能够通过蚕(*Bombyx mori*)的肠道屏障到达内部组织、器官和循环系统。而 JIANG 等<sup>[82]</sup>则观察到  $1.3 \mu\text{m}$  的 PS 塑料颗粒比  $0.1 \mu\text{m}$  的 PS 塑料颗粒在蚯蚓体内有更多的累积,并对蚯蚓显示出更大的毒性。目前,微/纳塑料对土壤动物的影响研究还只关注单一粒径的影响。有关不同粒径塑料在土壤动物体内的吸收、转移和分布研究还十分匮乏,特别是不同粒径对土壤动物的综合影响。

同时,微/纳塑料还会和其他环境污染物联合对土壤动物产生复合效应。有研究表明,土壤中添加 PP 和 PE 塑料会增加赤子爱胜蚓体内 Cd 的累积,增加对蚯蚓的毒性,抑制酶的活性,降低生长速率和增加死亡率<sup>[102-103]</sup>。这可能是由于吸附在塑料表面的 Cd 在蚯蚓体内容易解吸,导致 Cd 在其体内累积增加。但是微塑料与 Cd 的复合作用,在一定程度上能够缓解蚯蚓的急性致死效应<sup>[104]</sup>。土壤中的微/纳塑料也会导致有机污染物在生物体内累积增加,微塑料和农药共同暴露会增加农药在蚯蚓体内的生物累积量,并增加蚯蚓的氧化损伤,改变其代谢途径<sup>[105]</sup>。微/纳塑料由于表面疏水性强会吸附疏水性有机物(HOCs:多环芳烃、多氯联苯和邻苯二甲酸盐),降低土壤中 HOCs 的生物有效性,减少生物累积<sup>[106]</sup>。因此,微/纳塑料究竟是促进还是抑制 HOCs 的生物积累,不仅取决于微塑料与土壤之间 HOCs 的浓度梯度,还取决于塑料和污染物的极性<sup>[107-108]</sup>。

### 3.3 微/纳塑料对土壤微生物的影响

土壤蕴藏着巨大的微生物多样性,土壤微生物在主要元素(C、N、P)循环、废物回收和环境污染物的解毒等方面发挥着重要作用<sup>[109]</sup>。微/纳塑料会对土壤微生物群落结构及多样性造成影响。XIAO 等<sup>[110]</sup>观察到 PE 塑料暴露水稻田中细菌的辛普森多样性指数先下降后上升,说明塑料暴露初期会



对土壤微生物造成较大压力。WANG 等<sup>[111]</sup>研究表明,LDPE 塑料暴露下土壤中酸杆菌门、装甲菌门、拟杆菌门、芽单胞菌门和变形菌门丰度明显增加,而且加快了土壤中微生物群落演替,降低了土壤微生物群落的稳定性。这表明微生物群落会通过调整其组成来适应微/纳塑料的胁迫。其他研究也表明土壤微生物群落还具有一定的抗干扰能力,将土壤中添加 2% 和 7% 的 LDPE 塑料颗粒(150~250  $\mu\text{m}$ )培养 90 d 后,发现土壤中细菌多样性会因为 LDPE 塑料颗粒的加入而受到轻微影响<sup>[112]</sup>。LDPE 塑料薄膜对土壤微生物  $\alpha$  多样性(丰富度、均匀度和多样性)没有明显影响<sup>[113]</sup>。

微/纳塑料还会对土壤微生物酶活性造成影响。研究表明土壤中 PE 颗粒含量为 100 和 1 000  $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$  时会明显减弱土壤脱氢酶、亮氨酸-氨基肽酶和碱性磷酸酶等活性,同时会增加其基础呼吸速率和代谢熵<sup>[114]</sup>。而 LIU 等<sup>[115]</sup>添加 PP 塑料(7% 和 28%)至土壤后观察到低浓度微塑料对土壤酶活性无影响,而高浓度微塑料则会促进土壤中荧光素二乙酸水解酶活性,有利于土壤中有有机碳、氮和磷的溶解,增加植物可利用营养成分的来源。此外,LDPE 塑料碎片也会增加土壤中脲酶和过氧化氢酶活性<sup>[113]</sup>。这主要是由于微/纳塑料累积在土壤中会改变土壤性质,如土壤孔隙、容重、通气性和透水性,间接影响土壤酶活性。土壤酶活性改变则会进一步影响农业生态系统中 C、N 和 P 的循环。

微/纳塑料由于比表面积大、表面疏水且坚硬,在土壤环境中为微生物创造了一个新的生态位<sup>[116]</sup>。ZETTLER 等<sup>[117]</sup>首次将微塑料与附着的微生物联合称为“微塑料圈(plastisphere)”。WRIGHT 等<sup>[118]</sup>通过收集和重新分析 35 项研究中 2 229 个样本的所有原始 16S rRNA 基因测序和元数据,确定了水环境中塑料上形成的生物膜中具有生物降解能力的海洋螺杆菌(*Oceanospirillales*)和交替单胞菌(*Alteromonadales*)始终比对照环境生物膜中更丰富。在土壤环境中,ZHANG 等<sup>[119]</sup>观察到薄膜微塑料的凹槽和分裂处易于生长各种微生物,成为微生物群落的一个独特的栖息地,微生物群落在微塑料上的结构与周围土壤、枯枝落叶和大塑料上有着明显不同,在塑料上富集了一些可降解 PE 的微生物群落,如放线菌门、拟杆菌门和变形菌门。ZHU 等<sup>[13]</sup>研究也观察到变形菌(51.3%)和放线菌(30.1%)在塑料菌群中占主导地位。在电子垃圾拆解区土壤微塑料的微生物群落也与周围环境有着明显不同,在微塑料上也发现了菌丝单胞菌科<sup>[120]</sup>。这些微生

物可以利用微/纳塑料作为新的营养来源,使其在微/纳塑料环境中具有相对的生存优势<sup>[121]</sup>。微/纳塑料还是土壤中一些致病菌的载体。GKOUTSELIS 等<sup>[122]</sup>在塑料上观察到可在土壤中传播的致病菌如尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、互链链孢菌(*Alternaria alternata*)和葡萄茎枯病菌(*Didymella glomerata*)。ZHU 等<sup>[13]</sup>检测出微塑料上潜在细菌致病菌占总细菌比例比土壤细菌群落高 12.4 倍。这些致病菌会给生物带来轻微或严重的疾病,因而迫切地需要评估携带致病菌的微塑料对生物健康的潜在风险。

#### 4 土壤微/纳塑料的生态风险评估框架

微/纳塑料作为一种新型污染物,其对土壤生态系统的风险评估尚处于初步探索阶段。由于水环境中微/纳塑料研究起步早,且水环境相对土壤环境更为简单,已有风险评估模型可用于评估微/纳塑料对水环境的生态风险,如物种敏感性分布(SSD)<sup>[123-124]</sup>。SSD 主要用于生态风险评估,一般是利用有限的实验室生态毒性数据计算得出环境中污染物的最大可接受浓度。但是目前不同实验室得出的微/纳塑料毒性数据缺乏可比性,因为不同实验室采用的微/纳塑料的粒径、形状和浓度不一致,采用的风险受体也不一样,因而利用 SSD 得到的微/纳塑料阈值效应浓度相差很大<sup>[123-125]</sup>。ZHANG 等<sup>[54]</sup>认为微/纳塑料与人类活动密切相关,因而需要综合考虑人类活动和自然因素,再基于层次分析法评估微/纳塑料的生态风险。此模型主要的流程可分为 3 大部分:第 1 部分是确定需要评估的区域;第 2 部分是建立风险评估指标库,主要分为压力、状态和响应 3 个指标,然后通过专家打分法确定每个指标的权重,最后通过查阅文献来评估指标状态;第 3 部分是使用加权平均模型和最大隶属度原则综合判断风险等级。但是不同研究所得到的微/纳塑料丰度可比性差,而且各个指标确定的权重人为主观性较大,因而无法准确地评估微/纳塑料的生态风险。总体而言,目前尚缺乏土壤环境中微/纳塑料的生态风险评估框架和模型。但 KOELMANS 等<sup>[126]</sup>认为微/纳塑料具有连续的特性,提出了一个适用于环境或人类健康的微/纳塑料风险评估通用框架,其大致分为 3 个部分:(1)首先要明确需要保护的目标(一个种群或单个旗舰物种),然后在质量控制与保障的基础上指导危害和暴露评估的设计,以获得可靠的数据;(2)基于效应机理的剂量测定,微/纳塑料会对生物造成细胞毒性、氧化应

激和炎症等毒害作用,因而需要为这些机制选择相应的剂量指标,如颗粒的比表面积、粒径和纵横比等,最后确定微/纳塑料对生物产生毒害的相应剂量;(3)通过对数据的分析以获得适用于微/纳塑料的概率密度函数,通过使用概率密度函数来调整和量化暴露和影响阈值,以便一致地描述风险。该通用框架为微/纳塑料对土壤生态系统风险评估提供了可参考的基础。然而,土壤环境中的微/纳塑料是复杂的,其本身既会释放塑料添加剂,又会负载有害物质,因此在评估微/纳塑料的生态风险时还需要对这些成分进行评估。此外,由于现阶段土壤微/纳塑料丰度调查数据可比性差,微/纳塑料对土壤生物的毒性影响研究较少,并且许多相关实验设计存在缺陷,因而当前尚难以科学评估微/纳塑料对土壤生态系统的风险。

## 5 未来研究展望

微/纳塑料如何影响陆地生态系统是全球性问题。目前,陆地土壤环境中微/纳塑料的赋存状态及其对植物、动物和微生物影响研究总体上处于初始阶段,许多科学与方法学问题需要探索与解决。微/纳塑料的土壤生物健康效应与食物链传递风险的未来研究需要着重关注以下几个方面。

(1) 建立既能提升科学认知又能业务化普及的土壤微塑料精准鉴定、检测与监测技术标准,使数据具有可比性和用于质量化表示,特别是更细小的纳塑料,以定量指示不同粒径微/纳塑料在土壤中赋存状况和迁移转化规律。

(2) 加强土壤中微/纳塑料低剂量、长时间的环境-生物暴露模拟试验研究,以揭示微/纳塑料对土壤生物的毒性作用及机制。开展多生态位的微宇宙生态模拟试验,研究阐明微/纳塑料与其所携带的添加剂和污染物对土壤生物的复合毒性及机制,建立微/纳塑料对土壤生物生态系统的风险评估方法。

(3) 定量指示微/纳塑料在陆生食物链中不同营养级生物体内的吸收,探明陆地食物网中微/纳塑料富集过程和循环效应,以评估微/纳塑料食物链传递健康风险。

(4) 借鉴化学品和人工纳米材料的生态风险评估技术路线以构建土壤中微/纳塑料的生态风险评估框架和模型,并逐步区分微/纳塑料颗粒的毒性效应与化合物毒性效应,不断改进优化微/纳塑料的生态风险评估方法。

## 参考文献:

- [1] GIGAULT J, TER HALLE A, BAUDRIMONT M, *et al.* Current Opinion: What Is a Nanoplastic? [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235:1030-1034.
- [2] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made [J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700782.
- [3] HORTON A A, WALTON A, SPURGEON D 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, 586:127-141.
- [4] MACLEOD M, ARP H P H, TEKMAN M B, *et al.* The Global Threat from Plastic Pollution [J]. *Science*, 2021, 373(6550): 61-65.
- [5] 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 Yong-ming, ZHOU Qian, ZHANG Hai-bo, *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.]
- [6] REN S Y, KONG S F, NI H G. Contribution of Mulch Film to Microplastics in Agricultural Soil and Surface Water in China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 291:118227.
- [7] DISSANAYAKE P D, KIM S, SARKAR B, *et al.* Effects of Microplastics on the Terrestrial Environment: A Critical Review [J]. *Environmental Research*, 2022, 209:112734.
- [8] ZHAO T T, LOZANO Y M, RILLIG M C. Microplastics Increase Soil pH and Decrease Microbial Activities as a Function of Microplastic Shape, Polymer Type, and Exposure Time [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9:675803.
- [9] 郝爱红, 赵保卫, 张建, 等. 土壤中微塑料污染现状及其生态风险研究进展 [J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1100-1111. [HAO Aihong, ZHAO Bao-wei, ZHANG Jian, *et al.* Research Progress on Pollution Status and Ecological Risk of Microplastics in Soil [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(4): 1100-1111.]
- [10] FAUSER P, VORKAMP K, STRAND J. Residual Additives in Marine Microplastics and Their Risk Assessment: A Critical Review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 177:113467.
- [11] LITHNER D, LARSSON Å, DAVE G. Environmental and Health Hazard Ranking and Assessment of Plastic Polymers Based on Chemical Composition [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(18): 3309-3324.
- [12] PRAJAPATI A, VAIDYA A N, KUMAR A R. Microplastic Properties and Their Interaction with Hydrophobic Organic Contaminants: A Review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(33): 49490-49512.
- [13] ZHU D, MA J, LI G, *et al.* Soil Plastispheres as Hotspots of Antibiotic Resistance Genes and Potential Pathogens [J]. *The ISME Journal*, 2022, 16(2): 521-532.
- [14] 朱永官, 朱冬, 许通, 等. (微)塑料污染对土壤生态系统的影响: 进展与思考 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(1): 1-6.

- [ZHU Yong-guan, ZHU Dong, XU Tong, *et al.* Impacts of (Micro) Plastics on Soil Ecosystem: Progress and Perspective [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2019, 38(1): 1-6.]
- [15] LI L Z, LUO Y M, LI R J, *et al.* Effective Uptake of Submicrometre Plastics by Crop Plants via a Crack-entry Mode [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(11): 929-937.
- [16] LI Z X, LI Q F, LI R J, *et al.* The Distribution and Impact of Polystyrene Nanoplastics on Cucumber Plants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(13): 16042-16053.
- [17] COLPAERT R, GRÉZÉRIAT L P D, LOUZON M, *et al.* Polyethylene Microplastic Toxicity to the Terrestrial Snail *Cantareus aspersus*: Size Matters [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(20): 29258-29267.
- [18] 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(1): 1-7.
- [19] WANG J, COFFIN S, SUN C L, *et al.* Negligible Effects of Microplastics on Animal Fitness and HOC Bioaccumulation in Earthworm *Eisenia fetida* in Soil [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 776-784.
- [20] 胡晓婧, 刘俊杰, 王浩, 等. 微塑料污染对土壤环境质量和微生物生态学特性的影响研究进展 [J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1479-1485. [HU Xiao-jing, LIU Jun-jie, WANG Hao, *et al.* Impacts of Microplastics on Soil Environmental Quality and Microbial Ecological Characteristics: A Review [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(6): 1479-1485.]
- [21] 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 Yi, JIA Weiqian, LI Kang, *et al.* Interaction between Soil Microplastics and Microorganisms [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(4): 64-74.]
- [22] 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. [LIU Xin-bei, DONG Xu-sheng, XIE Zhi-hong, *et al.* Ecological Effects and Biodegradation of Microplastics in Soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 349-363.]
- [23] 杨杰, 李连祯, 周倩, 等. 土壤环境中微塑料污染: 来源、过程及风险 [J]. *土壤学报*, 2021, 58(2): 281-298. [YANG Jie, LI Lianzhen, ZHOU Qian, *et al.* Microplastics Contamination of Soil Environment: Sources, Processes and Risks [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 281-298.]
- [24] GUO J J, HUANG X P, XIANG L, *et al.* Source, Migration and Toxicology of Microplastics in Soil [J]. *Environment International*, 2020, 137: 105263.
- [25] BOUGHATTAS I, HATTAB S, ZITOUNI N, *et al.* Assessing the Presence of Microplastic Particles in Tunisian Agriculture Soils and Their Potential Toxicity Effects Using *Eisenia andrei* as Bioindicator [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796: 148959.
- [26] 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.
- [27] HUANG B, SUN L Y, LIU M R, *et al.* Abundance and Distribution Characteristics of Microplastic in Plateau Cultivated Land of Yunnan Province, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(2): 1675-1688.
- [28] JIANG X F, YANG Y, WANG Q, *et al.* Seasonal Variations and Feedback from Microplastics and Cadmium on Soil Organisms in Agricultural Fields [J]. *Environment International*, 2022, 161: 107096.
- [29] 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.
- [30] LI W F, WUFUER R, DUO J, *et al.* Microplastics in Agricultural Soils: Extraction and Characterization after Different Periods of Polythene Film Mulching in an Arid Region [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 749: 141420.
- [31] CHEN Y L, LENG Y F, LIU X N, *et al.* Microplastic Pollution in Vegetable Farmlands of Suburb Wuhan, Central China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113449.
- [32] 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 等. 不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布 [J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 204-210. [YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, *et al.* Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 204-210.]
- [33] ZHOU Q, TU C, FU C C, *et al.* Characteristics and Distribution of Microplastics in the Coastal Mangrove Sediments of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134807.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] SOBHANI Z, LUO Y, GIBSON C T, *et al.* Collecting Microplastics in Gardens: Case Study (i) of Soil [J/OL]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9. [2022-10-27]. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.739775>.
- [38] HU J N, HE D F, ZHANG X T, *et al.* National-scale Distribution of Micro (Meso) Plastics in Farmland Soils across China: Implications for Environmental Impacts [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424(Pt A): 127283.
- [39] NEMATOLLAHI M J, KESHAVARZI B, MOHIT F, *et al.* Microplastic Occurrence in Urban and Industrial Soils of Ahvaz Metropolis: A City with a Sustained Record of Air Pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 819: 152051.
- [40] LIU X D, HE S H, TONG Y B, *et al.* Microplastic Pollution in Urban Green-belt Soil in Shihezi City, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(39): 59403-59413.



- [41] KNIGHT L J, PARKER-JURD F N F, AL-SID-CHEIKH M, *et al.* Tyre Wear Particles: An Abundant yet Widely Unreported Microplastic? [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(15): 18345–18354.
- [42] HU C, LU B, GUO W S, *et al.* Distribution of Microplastics in Mulched Soil in Xinjiang, China [J]. *International Journal Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(2): 196–204.
- [43] LI S T, 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.
- [44] SAJJAD M, HUANG Q, KHAN S, *et al.* Microplastics in the Soil Environment: A Critical Review [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 27: 102408.
- [45] LUO Y M, LI L Z, FENG Y D, *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.
- [46] 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 Lian-zhen, ZHOU Qian, YIN Na, *et al.* Uptake and Accumulation of Microplastics in an Edible Plant [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(9): 928–934.]
- [47] LIU Y Y, GUO R, ZHANG S W, *et al.* Uptake and Translocation of Nano/Microplastics by Rice Seedlings: Evidence from a Hydroponic Experiment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421: 126700.
- [48] AUSTEN K, MACLEAN J, BALANZATEGUI D, *et al.* Microplastic Inclusion in Birch Tree Roots [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 808: 152085.
- [49] SUN X D, YUAN X Z, JIA Y B, *et al.* Differentially Charged Nanoplastics Demonstrate Distinct Accumulation in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(9): 755–760.
- [50] LI C J, GAO Y, HE S, *et al.* Quantification of Nanoplastic Uptake in Cucumber Plants by Pyrolysis Gas Chromatography/Mass Spectrometry [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2021, 8(8): 633–638.
- [51] CHENG Y L, SONG W H, TIAN H M, *et al.* The Effects of High-density Polyethylene and Polypropylene Microplastics on the Soil and Earthworm *Metaphire guillelmi* Gut Microbiota [J]. *Chemosphere*, 2021, 267: 129219.
- [52] CHEN Y L, LIU X N, LENG Y F, *et al.* Defense Responses in Earthworms (*Eisenia fetida*) Exposed to Low-density Polyethylene Microplastics in Soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 187: 109788.
- [53] SELONEN S, DOLAR A, KOKALJ A J, *et al.* Exploring the Impacts of Plastics in Soil: The Effects of Polyester Textile Fibers on Soil Invertebrates [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 700: 134451.
- [54] ZHANG F, PENG G Y, XU P, *et al.* Ecological Risk Assessment of Marine Microplastics Using the Analytic Hierarchy Process: A Case Study in the Yangtze River Estuary and Adjacent Marine Areas [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 425: 127960.
- [55] SONG Y, QIU R, HU J N, *et al.* Biodegradation and Disintegration of Expanded Polystyrene by Land Snails *Achatina fulica* [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 746: 141289.
- [56] BERIOT N, PEEK J, ZORNOZA R, *et al.* Low Density-microplastics Detected in Sheep Faeces and Soil: A Case Study from the Intensive Vegetable Farming in Southeast Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755(Pt 1): 142653.
- [57] CARBERY M, O'CONNOR W, THAVAMANI P. Trophic Transfer of Microplastics and Mixed Contaminants in the Marine Food Web and Implications for Human Health [J]. *Environment International*, 2018, 115: 400–409.
- [58] SALEY A M, SMART A C, BEZERRA M F, *et al.* Microplastic Accumulation and Biomagnification in a Coastal Marine Reserve Situated in a Sparsely Populated Area [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 54–59.
- [59] SETÄLÄ O, FLEMING-LEHTINEN V, LEHTINIEMI M. Ingestion and Transfer of Microplastics in the Planktonic Food Web [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185: 77–83.
- [60] WANG W F, GAO H, JIN S C, *et al.* The Ecotoxicological Effects of Microplastics on Aquatic Food Web, from Primary Producer to Human: A Review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 173: 110–117.
- [61] PANEBIANCO A, NALBONE L, GIARRATANA F, *et al.* First Discoveries of Microplastics in Terrestrial Snails [J]. *Food Control*, 2019, 106: 106722.
- [62] CHAE Y, AN Y J. Nanoplastic Ingestion Induces Behavioral Disorders in Terrestrial Snails: Trophic Transfer Effects *via* Vascular Plants [J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, 7(3): 975–983.
- [63] MOK H F, HAMILTON A J. Exposure Factors for Wastewater-irrigated Asian Vegetables and a Probabilistic Rotavirus Disease Burden Model for Their Consumption [J]. *Risk Analysis*, 2014, 34(4): 602–613.
- [64] ZHANG N, LI Y B, HE H R, *et al.* You Are What You Eat: Microplastics in the Feces of Young Men Living in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 144345.
- [65] SCHWABL P, KÖPPEL S, KÖNIGSHOFER P, *et al.* Detection of Various Microplastics in Human Stool: A Prospective Case Series [J]. *Annals of Internal Medicine*, 2019, 171(7): 453–457.
- [66] IBRAHIM Y S, ANUAR S T, AZMI A A, *et al.* Detection of Microplastics in Human Colectomy Specimens [J]. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 2020, 5(1): 116–121.
- [67] LESLIE H A, VAN VELZEN M J M, BRANDSMA S H, *et al.* Discovery and Quantification of Plastic Particle Pollution in Human Blood [J]. *Environment International*, 2022, 163: 107199.
- [68] RAGUSA A, SVELATO A, SANTACROCE C, *et al.* Plasticenta: First Evidence of Microplastics in Human Placenta [J]. *Environment International*, 2021, 146: 106274.
- [69] ZONG X Y, ZHANG J J, ZHU J W, *et al.* Effects of Polystyrene Microplastic on Uptake and Toxicity of Copper and Cadmium in Hydroponic Wheat Seedlings (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 217: 112217.
- [70] 张彦, 黎明, 邹磊, 等. 不同微塑料赋存环境对小麦萌发与幼苗生长影响研究 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(8): 3867–3877. [ZHANG Yan, DOU Ming, ZOU Lei, *et al.* Effects of Different Microplastics Occurrence Environment on Seed Germination and

- Seedling Growth of Wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8): 3867–3877.]
- [71] TAYLOR S E, PEARCE C I, SANGUINET K A, *et al.* Polystyrene Nano- and Microplastic Accumulation at Arabidopsis and Wheat Root Cap Cells, but No Evidence for Uptake into Roots [J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, 7(7): 1942–1953.
- [72] WU X, HOU H J, LIU Y, *et al.* Microplastics Affect Rice (*Oryza sativa* L.) Quality by Interfering Metabolite Accumulation and Energy Expenditure Pathways: A Field Study [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 422: 126834.
- [73] DONG Y M, GAO M L, SONG Z G, *et al.* Microplastic Particles Increase Arsenic Toxicity to Rice Seedlings [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 259: 113892.
- [74] 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.
- [75] LEE T Y, KIM L, KIM D, *et al.* Microplastics from Shoe Sole Fragments Cause Oxidative Stress in a Plant (*Vigna radiata*) and Impair Soil Environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 429: 128306.
- [76] 许学慧, 胡海娜, 陈颖. 聚乙烯微塑料对大豆生长的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 262–268. [XU Xue-hui, HU Hai-na, CHEN Ying. Study on the Effect of Polyethylene Microplastics on Soybean Growth [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(6): 262–268.]
- [77] JIANG X F, CHEN H, LIAO Y C, *et al.* Ecotoxicity and Genotoxicity of Polystyrene Microplastics on Higher Plant *Vicia faba* [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 831–838.
- [78] URBINA M A, CORREA F, ABURTO F, *et al.* Adsorption of Polyethylene Microbeads and Physiological Effects on Hydroponic Maize [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140216.
- [79] DONG Y M, GAO M L, QIU W W, *et al.* Uptake of Microplastics by Carrots in Presence of As (III): Combined Toxic Effects [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411: 125055.
- [80] CHAE Y, AN Y J. Nanoplastic Ingestion Induces Behavioral Disorders in Terrestrial Snails: Trophic Transfer Effects *via* Vascular Plants [J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, 7(3): 975–983.
- [81] KWAK J I, AN Y J. Microplastic Digestion Generates Fragmented Nanoplastics in Soils and Damages Earthworm Spermatogenesis and Coelomocyte Viability [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402: 124034.
- [82] JIANG X, CHANG Y, ZHANG T, *et al.* Toxicological Effects of Polystyrene Microplastics on Earthworm (*Eisenia fetida*) [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 259: 113896.
- [83] KIM S W, LEIFHEIT E F, MAAß S, *et al.* Time-dependent Toxicity of Tire Particles on Soil Nematodes [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 744668.
- [84] 黄萌, 程思, 李嘉琪, 等. 聚苯乙烯微塑料对秀丽隐杆线虫取食偏好的影响 [J]. *土壤*, 2022, 54(1): 47–54. [HUANG Meng, CHENG Si, LI Jia-qi, *et al.* Effects of Polystyrene Microplastics on Feeding Preference of *C. elegans* [J]. *Soils*, 2022, 54(1): 47–54.]
- [85] KIM S W, AN Y J. Edible Size of Polyethylene Microplastics and Their Effects on Springtail Behavior [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266(Pt 1): 115255.
- [86] SHEN J, LIANG B Y, ZHANG D K, *et al.* Effects of PET Microplastics on the Physiology of *Drosophila* [J]. *Chemosphere*, 2021, 283: 131289.
- [87] PARENTI C C, BINELLI A, CACCIA S, *et al.* Ingestion and Effects of Polystyrene Nanoparticles in the Silkworm *Bombyx mori* [J]. *Chemosphere*, 2020, 257: 127203.
- [88] LIAN J P, WU J N, XIONG H X, *et al.* Impact of Polystyrene Nanoplastics (PSNPS) on Seed Germination and Seedling Growth of Wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 385: 121620.
- [89] 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.
- [90] 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 Yuan-chen, NAZYGUL Jahitbek, LI Mei, *et al.* Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4661–4667.]
- [91] COLZI I, RENNA L, BIANCHI E, *et al.* Impact of Microplastics on Growth, Photosynthesis and Essential Elements in *Cucurbita pepo* L [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127238.
- [92] LI Z X, LI Q F, LI R J, *et al.* Physiological Responses of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) to Microplastic Pollution [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(24): 30306–30314.
- [93] 李贞霞, 李庆飞, 李瑞静, 等. 黄瓜幼苗对微塑料和镉污染的生理响应 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5): 973–981. [LI Zhen-xia, LI Qing-fei, LI Rui-jing, *et al.* Physiological Response of Cucumber Seedlings to Microplastics and Cadmium [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2020, 39(5): 973–981.]
- [94] YU H, ZHANG Z, ZHANG Y, *et al.* Metal Type and Aggregate Microenvironment Govern the Response Sequence of Speciation Transformation of Different Heavy Metals to Microplastics in Soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141956.
- [95] 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.
- [96] LIU S Q, WANG J W, ZHU J H, *et al.* The Joint Toxicity of Polyethylene Microplastic and Phenanthrene to Wheat Seedlings [J]. *Chemosphere*, 2021, 282: 130967.
- [97] JÂMS I B, WINDSOR F M, POUDEVIGNE-DURANCE T, *et al.* Estimating the Size Distribution of Plastics Ingested by Animals [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1594.
- [98] KIM S W, AN Y J. Soil Microplastics Inhibit the Movement of Springtail Species [J]. *Environment International*, 2019, 126: 699–706.
- [99] JU H, ZHU D, QIAO M. Effects of Polyethylene Microplastics on the Gut Microbial Community, Reproduction and Avoidance Behaviors of the Soil Springtail, *Folsomia candida* [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 247: 890–897.
- [100] HUERTA LWANGA E, GERTSEN H, GOOREN H, *et al.* Micro-

- plastics in the Terrestrial Ecosystem; Implications for *Lumbricus terrestris* (*Oligochaeta*, *Lumbricidae*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(5):2685-2691.
- [101] LI B, SONG W H, CHENG Y L, *et al.* Ecotoxicological Effects of Different Size Ranges of Industrial-grade Polyethylene and Polypropylene Microplastics on Earthworms *Eisenia fetida* [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 783:147007.
- [102] HUANG C D, GE Y, YUE S Z, *et al.* Microplastics Aggravate the Joint Toxicity to Earthworm *Eisenia fetida* with Cadmium by Altering Its Availability [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753:142042.
- [103] 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.
- [104] 廖苑辰, 王倩, 蒋小峰, 等. 聚苯乙烯微塑料和重金属镉对蚯蚓的联合毒性效应 [J]. *生态毒理学报*, 2022, 17(2):216-226. [LIAO Yuan-chen, WANG Qian, JIANG Xiao-feng, *et al.* Combined Toxic Effects of Polystyrene Microplastics and Cadmium on Earthworms [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17(2):216-226.]
- [105] SUN W, MENG Z Y, LI R S, *et al.* Joint Effects of Microplastic and Dufulin on Bioaccumulation, Oxidative Stress and Metabolic Profile of the Earthworm (*Eisenia fetida*) [J]. *Chemosphere*, 2021, 263:128171.
- [106] WANG J, LI J, WANG Q, *et al.* Microplastics as a Vector for HOC Bioaccumulation in Earthworm *Eisenia fetida* in Soil; Importance of Chemical Diffusion and Particle Size [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(19):12154-12163.
- [107] WANG J, COFFIN S, SCHLENK D, *et al.* Accumulation of HOCs via Precontaminated Microplastics by Earthworm *Eisenia fetida* in Soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(18):11220-11229.
- [108] XU J P, ZHANG K, WANG L, *et al.* Strong but Reversible Sorption on Polar Microplastics Enhanced Earthworm Bioaccumulation of Associated Organic Compounds [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423:127079.
- [109] AISLABIE J, DESLIPPE J R, DYMOND J. Soil Microbes and Their Contribution to Soil Services [M] // *Ecosystem Services in New Zealand: Conditions and Trends*. Lincoln, New Zealand: Manaaki Whenua Press, 2013.
- [110] XIAO M L, DING J N, LUO Y, *et al.* Microplastics Shape Microbial Communities Affecting Soil Organic Matter Decomposition in Paddy Soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 431:128589.
- [111] WANG J, HUANG M K, WANG Q, *et al.* LDPE Microplastics Significantly Alter the Temporal Turnover of Soil Microbial Communities [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726:138682.
- [112] RONG L L, ZHAO L F, ZHAO L C, *et al.* LDPE Microplastics Affect Soil Microbial Communities and Nitrogen Cycling [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 773:145640.
- [113] HUANG Y, ZHAO Y R, WANG J, *et al.* LDPE Microplastic Films Alter Microbial Community Composition and Enzymatic Activities in Soil [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254:112983.
- [114] AWET T T, KOHL Y, MEIER F, *et al.* Effects of Polystyrene Nanoparticles on the Microbiota and Functional Diversity of Enzymes in Soil [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2018, 30(1):11.
- [115] LIU H F, YANG X M, LIU G B, *et al.* Response of Soil Dissolved Organic Matter to Microplastic Addition in Chinese Loess Soil [J]. *Chemosphere*, 2017, 185:907-917.
- [116] 季梦如, 马旖旎, 季荣. 微塑料圈: 环境微塑料对微生物的载体作用 [J]. *环境保护*, 2020, 48(23):19-27. [JI Meng-ru, MA Yini, JI Rong. *Plastisphere: The Vector Effects of Microplastics on Microbial Communities* [J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(23):19-27.]
- [117] ZETTLER E R, MINCER T J, AMARAL-ZETTLER L A. Life in the "Plastisphere": Microbial Communities on Plastic Marine Debris [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(13):7137-7146.
- [118] WRIGHT R J, LANGILLE M G I, WALKER T R. Food or Just a Free Ride? A Meta-analysis Reveals the Global Diversity of the Plastisphere [J]. *The ISME Journal*, 2021, 15(3):789-806.
- [119] ZHANG M J, ZHAO Y R, 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] CHAI B W, LI X, LIU H, *et al.* Bacterial Communities on Soil Microplastic at Guiyu, an E-waste Dismantling Zone of China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 195:110521.
- [121] RILLIG M C, DE SOUZA MACHADO A A, LEHMANN A, *et al.* Evolutionary Implications of Microplastics for Soil Biota [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 16(1):3-7.
- [122] GKOUTSELIS G, ROHRBACH S, HARJES J, *et al.* Microplastics Accumulate Fungal Pathogens in Terrestrial Ecosystems [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):1-13.
- [123] COFFIN S, WEISBERG S, ROCHMAN C, *et al.* Risk Characterization of Microplastics in San Francisco Bay, California [R]. [s. l.]: [s. n.], 2022.
- [124] KOELMANS A A, REDONDO-HASSELERHARM P E, MOHAMED NOR N H, *et al.* Solving the Nonalignment of Methods and Approaches Used in Microplastic Research to Consistently Characterize Risk [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(19):12307-12315.
- [125] 陈锦灿, 方超, 郑榕辉, 等. 应用物种敏感性分布评估微(纳米)塑料对水生生物的生态风险 [J]. *生态毒理学报*, 2020, 15(1):242-255. [CHEN Jin-can, FANG Chao, ZHENG Rong-hui, *et al.* Assessing Ecological Risks of Micro(Nano)Plastics to Aquatic Organisms Using Species Sensitivity Distributions [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(1):242-255.]
- [126] KOELMANS A A, REDONDO-HASSELERHARM P E, MOHAMED NOR N H, *et al.* Risk Assessment of Microplastic Particles [J]. *Nature Reviews Materials*, 2022, 7(2):138-152.

作者简介: 冯裕栋(1993—), 男, 浙江湖州人, 博士生, 主要研究方向为微塑料的生物积累与食物链风险研究。E-mail: fengyudong@issas.ac.cn

(责任编辑: 李祥敏)