

土壤微塑料污染的生态效应

周雨苗^{1,2}, 何刚辉^{1,2}, 马绍峰^{1,2}, 邵方雷^{1,2}, 费禹凡^{1,2}, 黄顺寅^{1,2}, 章海波^{1,2}

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要: 土壤环境中微塑料积累量大且不易降解, 因此微塑料长期残留对土壤生态系统的影响已引起广泛关注。通过收集近年来有关土壤微塑料污染及其效应相关的文献, 全面系统介绍了土壤微塑料积累后, 土壤物理环境的变化、土壤动物摄入及其肠道微生物的响应、土壤微生物和土壤酶活性响应、以及植物对微塑料的吸收及其效应等方面的最新研究进展。现有研究表明: 微塑料污染对土壤容重、团聚体组成和持水性等土壤物理性质有明显改变, 而这些改变是影响土壤酶活性、微生物群落组成、甚至植物生长的关键因素。也有一些研究关注土壤无脊椎动物 (如蚯蚓 *Lumbricus terrestris*、跳虫 *Folsomia candida* 等) 对微塑料在土壤中迁移的影响。同时, 微塑料也会被这些土壤动物所摄食, 并导致土壤动物体内肠道微生物群落组成的变化以及对其生长产生影响。此外, 微塑料在陆地生态系统食物链中的积累及其效应也受到关注, 比如, 被蚯蚓摄食的微塑料可通过鸡 *Gallus gallus domesticus* 摄食蚯蚓进入鸡体内积累。在系统介绍土壤微塑料污染生态效应的研究进展基础上, 结合微塑料组成与性质的复杂性以及当前研究的不足, 提出 4 个未来研究方向: ①建立土壤微塑料污染毒理学诊断的标准化方法体系; ②研究土壤微塑料与微生物、植物和土壤动物之间的作用机理; ③揭示微塑料与物质转化之间的关键微生物学机制; ④开展不同土壤生态系统中的“塑料圈”研究。这些研究成果可为评估土壤微塑料污染的生态效应提供科学支撑。参 80

关键词: 微塑料; 土壤动物; 微生物; 植物; 生态效应

中图分类号: X53; S15 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)05-1040-10

Ecological effects of microplastics contamination in soils

ZHOU Yumiao^{1,2}, HE Ganghui^{1,2}, MA Shaofeng^{1,2}, SHAO Fanglei^{1,2},
FEI Yufan^{1,2}, HUANG Shunyin^{1,2}, ZHANG Haibo^{1,2}

(1. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Large amounts of microplastics have been accumulated in soils and their degradation is relatively slow. The residual time of microplastics in soils could be extended to decades or even over a hundred years. Therefore, the ecological effects of long-term residual of the microplastics in soils has been of concerned widely in recent years. Published papers related to the microplastics and their effects in soils were collected and introduced in order to make a full review in the field. The research advances were presented based on the different ecological receptors, which included change of soil physical environment due to the accumulation of microplastics, ingestion of microplastics by invertebrates from soils and their effects on the enteric

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41771351, 41877142, 41991330); 浙江省自然科学基金资助项目 (LZ19D10001); 浙江农林大学人才启动项目 (2017FR021)

作者简介: 周雨苗 (ORCID: 0000-0003-2575-6560), 从事土壤污染研究。E-mail: 1143896378@qq.com。通信作者: 章海波 (ORCID: 0000-0003-2041-2259), 教授, 博士生导师, 从事土壤环境与污染修复研究。E-mail: hzbzhang@zafu.edu.cn

microorganism, response of soil microbial community and soil enzyme to microplastics pollution, plant uptake of microplastics and their effects. The studies of effects on soil physical environment in the present of microplastics mainly focus on soil density, soil aggregate composition and water hold capacity. Such effects were supposed to have further impacts on soil enzyme activity, microbial community composition and even plant growth based on current limited studies. Many other studies at present were also concentrated on the migration of microplastics induced by soil invertebrates e.g. earthworm, springtail. Meanwhile, microplastics in the soil might be ingested by soil invertebrates and subsequently caused some negative effects and influence on the gut microorganism community of the soil invertebrates. There were also some studies focusing on the microplastics accumulation through food chain regarding the effects of microplastics on soil animals. For example, microplastics might be accumulated in chicken through the predation of earthworm by chicken. After the introduction of current studies, several research proposal were put forward based on the complication of microplastic's properties and the shortage of current researches. These proposal contained four aspects: (1) development of standard protocols for the study of ecotoxicology of soil microplastics pollution, (2) studying the interaction mechanism between microplastics and microorganisms, plants and invertebrates, (3) revealing microbiological mechanisms that regulation of the transformation of materials and microplastics in soils, (4) exploring plastisphere in soils of different ecosystems. All these researches are expected to be supportive to assessment of the ecological effects of soil microplastics pollution. [Ch, 80 ref.]

Key words: microplastics; soil animals; microorganism; plant; ecological effects

微塑料 (MPs) 是指环境中粒径小于 5 mm 的塑料 (包括碎片、纤维、颗粒、发泡、薄膜等)^[1]。初级微塑料 (生产于化妆品和各种工业) 和次级微塑料 (各种大塑料分解破碎产生) 均普遍存在^[2]。近年来, 农田生态系统中的微塑料污染及其生态效应问题引起了全世界的广泛关注^[3-4]。全球每年土壤中输入的微塑料数量远超海洋, 陆地生态系统中微塑料的输入量是海洋输入量的 4~23 倍^[5], 而农田土壤输入的微塑料更多^[6]。据估计, 欧洲和北美洲每年通过污泥输入到农田土壤中的微塑料分别高达 63 000~430 000 和 44 000~300 000 t·a⁻¹^[7]。ZHANG 等^[8]从中国云南地区的 50 个农田土壤样品中提取塑料颗粒 (10.00~0.05 mm), 塑料颗粒的丰度为 7 100~42 960 个·kg⁻¹, 95% 的塑料颗粒粒径为 1.00~0.05 mm。对杭州湾周边设施农田土壤中的微塑料调查发现: 覆膜农田土壤中微塑料达 20~1 560 个·kg⁻¹, 包括聚乙烯薄膜、聚丙烯碎片和聚酯纤维类等^[9]。土壤中微塑料来源复杂、积累量大。塑料地膜覆盖是一种全球性农业技术, 它在保温、保水、保肥及土壤改良中具有很好的效果^[10]。HE 等^[11]调查发现: 上海郊区 20 个菜地和农田土壤中微塑料丰度分别为 (78.00±12.91) 和 (62.50±12.97) 个·kg⁻¹, 大多数微塑料为聚丙烯 (50.51%) 和聚乙烯 (43.43%), 表明土壤微塑料污染主要来源于农田地膜。近年来, 全球的塑料薄膜覆盖面积迅速增加, 中国是使用塑料地膜的主要国家之一, 2006 年, 中国的塑料地膜使用面积已占全球地膜覆盖率的 80%, 每年近 70 万 t 低密度聚乙烯地膜投入使用^[12], 但农田地膜回收率却不足 60%^[13]。对杭州湾周边农田土壤的调查发现: 设施农田土壤中微塑料的平均丰度是一般农田土壤的 2 倍以上^[14]。除了农用地膜残留导致土壤微塑料污染外, 污泥农用、大气沉降也是农田土壤中微塑料的重要来源。污泥中含有大量的合成纤维微塑料, 可达 1 000~4 000 个·kg⁻¹^[15]; 根据中国污泥总产量, 预计通过污泥进入土壤的微塑料可达 1.56×10¹⁴ 个·a⁻¹^[16]。而大气中微塑料的沉降通量可达 1.46×10⁵ 个·m⁻²·a⁻¹, 其中纤维类占 95%^[17]。但微塑料进入土壤后的生态效应研究目前还相对较少^[18]。本研究对微塑料相关研究进行系统梳理, 综合分析微塑料进入土壤后对物理环境、土壤微生物或酶、土壤动植物等的影响, 探讨微塑料污染对土壤生态系统的综合效应, 并为系统开展土壤微塑料的生态风险评估提出科学展望。

1 微塑料对土壤物理环境的影响

1.1 微塑料对土壤容重和持水性能的影响

微塑料在土壤中降解非常缓慢,可能达上百年之久^[19],并作为土壤的外来组分改变土壤物理特性^[20]。通过向肥沃的砂土中添加微塑料后显示:培养5周后,4种不同暴露量(最高达2%)的常见微塑料(聚丙烯纤维、聚酰胺微珠、聚酯纤维和聚乙烯碎片)均能显著降低土壤容重,改变土壤结构和水分动态,并且聚酯纤维对土壤理化性质的影响最为明显,随着聚酯纤维含量的增加,土壤持水量也相应增加^[21]。与此类似,壤质砂土中添加聚乙烯、对苯二甲酸聚酯、聚丙烯和聚苯乙烯等微塑料,土壤容重降低,但根际土壤容重、持水量均增加^[3]。但ZHANG等^[22]通过田间和盆栽试验均表明:添加质量分数为0.3%的聚酯微纤维对土壤容重没有明显改变。因此,微塑料对土壤容重的影响可能与微塑料类型、丰度等多种因素有关,也与土壤本身的性质以及是否种植植物有关。

微塑料进入土壤后,通过改变土壤水分运移影响土壤的持水性能。例如,土壤中添加1%暴露量的聚乙烯微塑料薄膜(2 mm)可显著提高土壤水分蒸发速率,因而有可能加剧土壤水分短缺^[23]。微塑料也可能对土壤孔隙度有直接影响。如聚酯微纤维显著降低了土壤孔隙度 $<30\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙体积,而增加 $>30\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙体积,由于持水能力与小孔隙体积呈正相关,因此,超细聚酯纤维的进入降低了土壤的持水能力^[22]。

1.2 微塑料对土壤团聚体组成的影响

土壤团聚体是土壤结构体的重要组成部分,也是提供土壤生物生长的重要物理条件。微塑料对土壤团聚体组成的影响程度与微塑料类型、粒径大小以及土壤中是否存在植物都有密切关系。一般土壤中,水稳性团聚体的比例会随着聚酰胺微珠、聚酯纤维和聚丙烯纤维含量增加而呈显著降低趋势^[21],但在根际区域,加入微塑料反而呈较高比例的水稳性团聚体,这可能与微塑料和植物根系存在交互作用有关^[3]。土壤中加入可生物降解聚乳酸、高密度聚乙烯和微塑料合成纤维等不同类型的微塑料,其水稳性团聚体及团聚体的粒径分布均有显著改变,并进而影响土壤的可侵蚀性^[24]。微塑料对土壤水稳性团聚体的影响也可能是通过影响微生物生长而间接作用的。有研究表明:土壤中添加暴露量为0.4%的聚丙烯酸纤维微塑料后,土壤腐生真菌的活性增加,从而促进了水稳性团聚体的形成^[25]。

2 微塑料与陆生动物的相互作用及其生态效应

2.1 土壤动物影响下的微塑料转运与迁移

土壤动物在土壤生态系统中发挥关键作用,影响生物多样性维持、凋落物分解、养分循环和能量转移。微塑料与土壤动物的相互作用,一方面会改变土壤孔隙度、有机物含量等;另一方面,土壤微塑料也可通过土壤动物的运动发生纵向迁移,使微塑料进入深层土壤。如土壤中的蚯蚓 *Lumbricus terrestris* 暴露于一定暴露量的微塑料后,会产生更致密的蚯蚓洞穴,并将微塑料转运至洞穴中保存^[26]。蚯蚓通过摄食、皮肤黏液的黏附等方式将微塑料从土壤表层搬运至深层^[27]。微型节肢动物也会搬运土壤中的微塑料,并且不同的微型节肢动物对微塑料搬运的距离显著不同^[28]。土壤表层的微塑料不仅可以通过节肢动物进入到土壤孔隙,还参与地下食物网的转运。ZHU等^[29]研究表明:微型节肢动物利用其体积小特点,将土壤微塑料搬运至土壤孔隙中,并进一步在跳虫 *Folsomia candida*—螨 *Hypoaspis aculeifer* 的食物链中进行转运,利用这一食物链内的捕食关系,可以使节肢动物对土壤微塑料的搬运量增加40%。此外,微生物也可以成为微塑料迁移的载体。如真菌菌丝可以作为微塑料在小范围内转运的载体^[30]。当微塑料进入土壤孔隙或地下水时,它们就更容易迁移至更深层土壤,或与植物根系和其他生物发生相互作用^[26]。

2.2 土壤动物对微塑料的摄食

微塑料可被蚯蚓、蚜虫 Aphidoidea、线虫 Aschelminthes 等土壤动物摄食进入体内,并产生效应。蚯蚓排泄物中发现微塑料的存在,表明微塑料可被蚯蚓摄入体内^[31]。土壤中的短纤维(12.00~2.87 mm)也可被土壤无脊椎动物摄食,这也为微塑料通过土壤无脊椎动物摄食进入陆地食物网提供了证据^[32]。蚯蚓对微塑料的摄食有粒径选择性。研究发现:蚓粪中90%的聚乙烯微塑料粒径小于 $50\text{ }\mu\text{m}$,而摄入的聚乙

烯颗粒有 50% 的粒径大于 50 μm , 这表明小颗粒微塑料优先被蚯蚓摄食^[33]。CHEN 等^[34] 研究也发现: 蚯蚓粪中微塑料的粒径分布与摄入时的微塑料粒径相比有明显变化, 蚓粪中小粒径的微塑料比例更高。土壤动物摄入微塑料后, 其生长受到影响。如供试土壤中添加一定量的微塑料进行蚯蚓培养时, 蚯蚓的生物量降低, 尤其受高密度聚乙烯微塑料暴露时, 蚯蚓生物量下降最为严重^[24]。当聚乙烯微塑料 (粒径 < 150 μm) 的暴露量达到一定阈值时, 蚯蚓的生长速度和死亡率也受到显著影响^[33]。当聚乙烯微塑料暴露量达 0.1% 时, 跳虫生长和生殖会受到聚乙烯微塑料的抑制, 当暴露量上升至 1.0% 时, 生殖率降低 70.2%^[35]。不同类型的微塑料对土壤动物的影响也不同, 土壤蠕虫 *Lobelia sokamensis* 在受尼龙微塑料暴露后繁殖率下降程度要比聚氯乙烯微塑料暴露更大^[36]。除了生长和繁殖受影响外, 土壤动物的运动轨迹也可以作为微塑料暴露的评价指标, 如低质量分数 (8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 聚苯乙烯微塑料暴露就会影响土壤跳虫的运动轨迹^[37]。此外, 土壤中微塑料的“载体效应”也可能使其富集农田环境中的农药而影响蚯蚓等土壤动物的生存^[38]。

2.3 土壤动物及其肠道微生物对微塑料暴露的效应

土壤动物对微塑料暴露呈现不同的应激效应。如大于 1.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的低密度聚乙烯微塑料暴露引起蚯蚓表面损伤、诱导氧化应激, 并刺激神经毒性反应^[34]。蚯蚓肠内积累聚苯乙烯微塑料后, 损伤蚯蚓肠细胞, 并增加了谷胱甘肽水平, 抑制超氧化物歧化酶活性^[39]。高暴露量 (20%) 的聚乙烯 ($\leq 300\ \mu\text{m}$) 或聚苯乙烯 ($\leq 250\ \mu\text{m}$) 颗粒显著增加了蚯蚓体内过氧化氢酶、过氧化物酶活性和脂质过氧化水平, 显著抑制了超氧化物歧化酶和谷胱甘肽 S-转移酶的活性; 且过氧化物酶活性随微塑料暴露量的增加而增加, 但其他酶活性在 $\leq 10\%$ 的暴露量下没有显著影响^[31]。

肠道微生物对土壤动物的健康、代谢和免疫具有关键作用, 微塑料暴露会改变土壤动物肠道微生物的组成^[40]。跳虫在暴露聚氯乙烯微塑料后, 其新陈代谢和碳氮吸收受干扰, 肠道微生物群落中细菌多样性增加^[41]。但也有研究表明: 0.5% 的聚乙烯微塑料暴露量会显著降低跳虫肠道细菌多样性^[35]。另一方面, 土壤动物的肠道微生物也可参与微塑料的降解。从广州、泰安和深圳等地采集的粉虫 *Tenebrio molitor* 均可以利用肠道微生物将聚苯乙烯、聚氯乙烯、低密度聚苯乙烯微塑料降解, 并且不同地区的粉虫由于其体内肠道微生物的差异, 对微塑料的代谢能力也不同^[42]。

2.4 陆生动物食物链中微塑料的积累与生态效应

土壤中微塑料可能通过陆地生态系统的食物链在不同动物体内传递、积累并产生效应^[43]。土壤中微塑料可以在库蚊 *Culex pipiens* 的幼虫、蛹和成虫中积累, 积累量受到初始暴露量的显著影响^[44]; 但幽蚊 *Chaoborus flavicans* 在微塑料暴露量较高时, 依然能够产卵^[45]。LWANGA 等^[46] 以墨西哥东南部的热带家庭花园为例, 发现土壤、蚯蚓、鸡 *Gallus gallus domesticus* 粪中的微塑料依次递增, 这表明微塑料可以在土壤—蚯蚓—鸡这条食物链中传递、积累和放大。在上海某地收集的陆生死亡鸟类消化道中发现的微塑料粒径要远远小于这些鸟类的食物粒径, 由于鸟类的觅食行为具有多样化, 由此推测鸟类摄入微塑料可能是通过食物链传递的结果^[47-48]。

微塑料在陆生动物体内的积累影响其生长与繁殖。环境质量分数 (0.71 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 下对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 微塑料纤维可显著减少蜗牛 *Achatina fulica* 取食和排泄, 引起氧化应激反应, 降低还原型谷胱甘肽过氧化物酶和总抗氧化能力^[49]。聚乙烯微塑料会影响小鼠肠道微生物的组成和多样性, 当浓度达到一定水平时会引起小鼠小肠炎症^[50]。聚苯乙烯微塑料可在小鼠肠道内积累, 减少小鼠肠道黏液分泌, 损害肠屏障功能, 诱导小鼠肠道微生物区系失调和代谢紊乱^[51], 并诱发肝脏脂质紊乱^[52]。聚苯乙烯微塑料对雄性小鼠生殖系统也有影响, 导致精子数量、活力显著下降, 精子畸形率显著提高和精子代谢相关的酶活性下降^[53]。而母体小鼠在妊娠期和哺乳期暴露于聚苯乙烯微塑料下, 微塑料可以导致母体肠道菌群紊乱和代谢失调, 还有代际效益, 对后代造成长期代谢后果^[54]。但也有研究表明: 通过聚丙烯喂养鸟类, 对鸟类的死亡率、发病率、生育能力等并没有明显影响, 只发现雄性鸟类生殖囊肿频率增加, 雏鸟生长和性成熟的轻微延迟等现象^[55]。

3 微塑料对土壤酶活性和土壤微生物的影响

3.1 微塑料对土壤酶活性的影响

土壤酶活性代表微生物群落的总体活性和微生物摄取底物的有效性,而荧光素二乙酸酯酶(FDase)代表整个微生物代谢活动的活力,是土壤质量短期变化的有效指标^[56]。例如,随着塑料薄膜暴露量的增加,邻苯二甲酸酯类含量增加,土壤微生物碳和氮含量、荧光素二乙酸酯酶和脱氢酶的活性,以及微生物群落结构多样性显著降低^[57],这与塑料释放的邻苯二甲酸酯类污染物有关,它可通过破坏细胞膜的流动性影响土壤微生物活性、多样性和代谢活性。有研究利用中国黄土为供试土壤,添加微塑料观测土壤酶活性的变化,发现添加微塑料增强了荧光素二乙酸酯酶和酚氧化酶的活性^[58]。低密度聚乙烯微塑料($2\,000\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$)碎片暴露后土壤脲酶、过氧化氢酶活性显著提高^[59]。聚苯乙烯纳米塑料暴露后土壤亮氨酸氨基肽酶、碱性磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶和细胞水解酶的活性显著降低^[60]。通过在酸性土壤中添加暴露量为1%和5%低密度聚乙烯和聚氯乙烯微塑料研究发现:微塑料的添加显著刺激了土壤脲酶和酸性磷酸酶活性,但降低了荧光素二乙酸酯酶活性。这些不同试验观测到的微塑料暴露对土壤酶活性影响的差异可能与土壤性质和微塑料种类及其暴露量都有关系^[61]。

3.2 微塑料对微生物群落的影响

土壤微塑料对微生物群落的丰富度和多样性受土壤类型、微塑料类型、暴露量等因素影响。低密度聚乙烯微塑料碎片($2\,000\text{个}\cdot\text{kg}^{-1}$)暴露对土壤中微生物 α 多样性(丰富度、均匀度和多样性)没有明显影响;但微塑料碎片上微生物的多样性指数明显低于对照和微塑料添加土壤;同时在微塑料碎片上形成了一个与供试土壤明显不同的微生物区系,表现在放线菌显著富集,包括塑料降解细菌和病原体更加丰富^[59]。土壤中添加5%的聚乙烯微塑料后,放线菌取代蛋白质细菌成为微塑料暴露土壤中的优势门,表明微塑料对微生物具有选择作用,改变微生物群落的多样性和丰富度^[62]。研究发现:1%和5%的低密度聚乙烯和5%的聚氯乙烯显著降低了细菌群落丰富度和多样性,但显著增加了 β -变形菌,其中包括与土壤固氮密切相关的伯克氏菌科Burkholderiaceae,这表明微塑料可能影响土壤中的氮素循环^[9,61]。微塑料与微生物群落组成的相互影响可能对微生物参与的地球生物化学循环存在潜在影响,其中微生物异化铁还原是最早具有全球意义的微生物呼吸过程之一。金属假单胞菌*Geobacter metallireducens* GS15是一种异化铁还原菌,是生物地球化学铁循环关键调节因子,研究发现聚氯乙烯微塑料对GS15以不溶性铁水化合物为末端电子受体铁循环过程表现出潜在的抑制作用。聚对苯二甲酸丁二酯微塑料和聚氯乙烯均能延迟GS15的电活性^[63]。同时,微塑料也是环境微生物的新型栖息地,也被称为“塑料圈”^[64-65]。微塑料表面定殖的微生物群落与周围土壤中、植物凋落物中的微生物群落具有显著差异,富集了一些具有降解塑料聚合物的微生物种群,如酸杆菌门Acidobacteria、绿弯菌门Chloroflexi、芽单胞菌门Gemmatimonadetes和拟杆菌门Bacteroidetes等^[66]。

4 植物对微塑料的吸收与效应

4.1 植物对微塑料的吸收

目前关于植物吸收微塑料的相关研究极其缺乏。通过水培试验发现:小麦*Triticum aestivum*种子在萌发时会吸收入纳米聚苯乙烯(100 nm)塑料小球并传输到根部^[67],也可以在蚕豆*Vicia faba*根部积累,并可能阻断细胞连接或细胞壁孔运输营养物质^[68]。通过土培试验也可发现:绿豆*Vigna radiata*可以吸收入纳米塑料聚苯乙烯,并积累在叶片中^[69]。对于更大粒径的亚微米级和微米级微塑料的植物吸收,目前的相关报道更少。李连祯等^[70]利用荧光标记和扫描电镜观测,发现水培试验中的粒径为 $0.2\,\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微塑料小球不仅可在生菜*Lactuca sativa* var. *ramosa*根部大量富集,并可被进一步转运至茎叶等可食部位积累。最近,又通过土培试验进一步证实:粒径为 0.2 和 $2.0\,\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯塑料小球可以通过小麦和生菜侧根位置的裂隙进入植物体内部,并随蒸腾作用从根部转运到地上部^[71]。

4.2 微塑料对植物生长的影响

微塑料对植物生长的影响既有抑制也有促进作用。有研究把6种常见微塑料加入土壤混合进行洋葱*Allium fistulosum*培养试验后发现:微塑料添加对洋葱的叶片性状、总生物量、元素组成、根系性状等均

有显著影响^[3]。添加 1% 的微塑料对小麦的地上部分和地下部分生长均有影响，并且可生物降解的微塑料比低密度聚乙烯微塑料表现出更强的抑制效果^[72]。纤维或可生物降解的聚乳酸微塑料会抑制黑麦草 *Lolium multiflorum* 种子的发芽率，聚乳酸微塑料还会导致芽长降低。但与聚乳酸微塑料的影响不同，高密度聚乙烯却发现能增加根系生物量^[24]。此外也发现地膜残留物会长期影响陆地棉 *Gossypium hirsutum* 产量^[73]。微塑料对植物生长的影响也表现在一些植物生理指标上。如阻碍生菜的光合作用、干扰其抗氧化防御系统等^[74]。蚕豆在 10~100 mg·L⁻¹ 的聚苯乙烯微塑料暴露下，过氧化氢酶活性降低，超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性显著升高，表现氧化应激反应；当微塑料粒径减小至纳米级时，进一步表现出遗传毒性和氧化损伤毒性^[68]。

微塑料对植物的促进作用最近也有报道。如添加 0.4% 的聚酯纤维微塑料增加了植物群落根、茎的质量，提高植物群落的生物量，可能是土壤中的微塑料降低了土壤容重，增加了土壤大孔隙比例，改善了土壤通气性和渗透性，从而改善了植物生长环境^[75]。同时，研究也发现：不同种类植物生长受微塑料的影响不同，最终会体现在植物群落结构组成上的差异，减少植物群落的多样性^[75]。

4.3 植物根际环境中的微塑料效应

植物根际环境中微塑料污染的效应研究非常有限。微塑料对根际环境的效应是土壤物理化学性质、根系分泌物与根际微生物之间相互作用的结果^[76]。植物根系也是微塑料向土壤内部迁移的动力之一，因此，微塑料可能在根际环境中富集并对根际环境产生影响^[30]。当小麦根系暴露在 1% 低密度聚乙烯微塑料时，根际的细菌群落与对照相比有显著差异，说明土壤中微塑料污染对小麦根际环境中细菌群落的组成有显著影响^[77]。微塑料与一般的化学污染物质不同，它是一种物理颗粒，对土壤生态系统的效应可能是通过影响土壤物理化学性质^[77]、养分转化^[58, 78-79]、污染物质释放^[80]等，并进而影响土壤微生物组成与功能多样性等综合作用的结果。

5 研究展望

土壤微塑料污染的生态效应研究才刚起步，相关的基础数据积累少，还无法认识微塑料对不同生物体的效应机制。目前的研究存在如下问题：①相关研究中还存在暴露量与实际环境浓度相差较大、剂量-效应关系不确定、供试土壤性质单一等突出问题；②微塑料的生态效应不仅受暴露量的影响，也受到其粒径大小、形状、聚合物类型等因素共同作用，目前许多研究仅仅考虑暴露量的效应而忽视了其他性质的作用，导致研究结果之间缺乏可比性；③微塑料含有多种添加剂，并会在土壤中富集农药、抗生素、抗性基因等污染物质，在一定条件下，这些添加剂和污染物质会重新释放到土壤或生物体中，影响土壤生态系统。因此，开展土壤微塑料污染的生态效应研究，必须在认识环境微塑料的粒径、化学、结构、表面等基本特性基础上，围绕土壤生态安全相关的生物受体，从多学科角度开展系统研究，具体包括以下几个方面：①加强土壤微塑料污染生态效应方法学的研究，筛选模式生物与敏感的生物标志物，探究环境暴露剂量下，不同性质微塑料的生物作用机制与效应，建立土壤微塑料污染的生态风险评估方法体系；②加强土壤微塑料及其负载污染物对物质转化关键功能微生物的影响研究，阐明土壤微塑料与养分元素、重金属、有机污染物之间相互作用的微生物学机制；③加强研究土壤微塑料及其负载污染物的植物吸收、转运及在植物体内的积累机制，探讨植物根际环境中微塑料与根系分泌物、微生物、养分元素之间的相互作用机制，明确土壤微塑料污染的植物反馈机制；④加强微塑料及其负载污染物在地下食物网系统的传递、积累机制研究，探明微塑料及其负载污染物在不同营养层生物间的传递、转化与生物富集过程，揭示土壤微塑料污染的地下—地上生物联动效应及其机制；⑤加强土壤“塑料圈”研究，探究不同类型土壤生态系统条件下微塑料表面生物膜和微生物组成与功能特征，及其对土壤中微塑料降解、污染物和养分转化的作用机制。

6 参考文献

- [1] ROCHA-SANTOS T, DUARTE A C. A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behavior of microplastics in the environment [J]. *Trends Anal Chem*, 2015, 65: 47 – 53.
- [2] DUIS K, COORS A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care

- products), fate and effects[J]. *Environ Sci Eur*, 2016, **28**(1): 2. doi: [10.1186/s12302-015-0069-y](https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y).
- [3] de SOUZA MACHADO A A, LAU C W, KLOAS W, *et al.* Microplastics can change soil properties and affect plant performance [J]. *Environ Sci Technol*, 2019, **53**(10): 6044 – 6052.
- [4] RILLIG M C, LEHMANN A. Microplastic in terrestrial ecosystems [J]. *Science*, 2020, **368**(6498): 1430 – 1431.
- [5] 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]. *Sci Total Environ*, 2017, **586**: 127 – 141.
- [6] FULLER S, GAUTAM A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, **50**(11): 5774 – 5780.
- [7] NIZZETTO L, FUTTER M, LANGAAS S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, **50**(20): 10777 – 10779.
- [8] ZHANG G S, LIU Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China [J]. *Sci Total Environ*, 2018, **642**: 12 – 20.
- [9] 费禹凡, 黄顺寅, 王佳青, 等. 设施农业土壤微塑料污染及其对细菌群落多样性的影响[J]. *科学通报*, 2021, **66**(13): 1592 – 1601.
- FEI Yufan, HUANG Shunyin, WANG Jiaqing, *et al.* Microplastics contamination in the protected agricultural soils and its effects on bacterial community diversity [J]. *Chin Sci Bull*, 2021, **66**(13): 1592 – 1601.
- [10] LAMONT W J. Plastics: modifying the microclimate for the production of vegetable crops [J]. *HortTechnology*, 2005, **15**(3): 477 – 481.
- [11] HE Defu, LUO Yongming, LU Shibo, *et al.* Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks [J]. *TrAC Trends Anal Chem*, 2018, **109**: 163 – 172.
- [12] ESPÍ E, SALMERÓN A, FONTECHA A, *et al.* Plastic films for agricultural applications [J]. *J Plast Film Sheet*, 2016, **22**(2): 85 – 102.
- [13] 赵岩, 陈学庚, 温浩军, 等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2017, **48**(6): 1 – 14.
- ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, *et al.* Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2017, **48**(6): 1 – 14.
- [14] ZHOU Bianying, WANG Jiaqing, ZHANG Haibo, *et al.* Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: multiple sources other than plastic mulching film [J]. *J Hazard Mater*, 2020, **388**: 121814. doi: [10.1016/j.jhazmat.2019.121814](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121814).
- [15] BLÄSING M, AMELUNG W. Plastics in soil: analytical methods and possible sources [J]. *Sci Total Environ*, 2018, **612**: 422 – 435.
- [16] LI Xiaowei, CHEN Lubei, MEI Qingqing, *et al.* Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China [J]. *Water Res*, 2018, **142**: 75 – 85.
- [17] ZHOU Qian, TIAN Chongguo, LUO Yongming. Various forms and deposition fluxes of microplastics identified in the coastal urban atmosphere [J]. *Chin Sci Bull*, 2017, **62**(33): 3902 – 3909.
- [18] SCHEURER M, BIGALKE M. Microplastics in swiss floodplain soils [J]. *Environ Sci Technol*, 2018, **52**(6): 3591 – 3598.
- [19] ZALASIEWICZ J, WATERS C N, IVAR DO SUL J A, *et al.* The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene [J]. *Anthropocene*, 2016, **13**: 4 – 17.
- [20] JIANG Xiaojin, LIU Wenjie, WANG Enheng, *et al.* Residual plastic mulch fragments effects on soil physical properties and water flow behavior in the Minqin Oasis, northwestern China [J]. *Soil Till Res*, 2017, **166**: 100 – 107.
- [21] MACHADO A, LAU C W, TILL J, *et al.* Impacts of microplastics on the soil biophysical environment [J]. *Environ Sci Technol*, 2018, **52**(17): 9656 – 9665.
- [22] ZHANG G S, ZHANG F X, LI X T. Effects of polyester microfibers on soil physical properties: perception from a field and a pot experiment [J]. *Sci Total Environ*, 2019, **670**: 1 – 7.
- [23] WAN Yong, WU Chenxi, XUE Qiang, *et al.* Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil [J]. *Sci Total Environ*, 2019, **654**: 576 – 582.
- [24] BOOTS B, RUSSELL C W, GREEN D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground [J].

- Environ Sci Technol*, 2019, **53**(19): 11496 – 11506.
- [25] LIANG Yun, LEHMANN A, BALLHAUSEN M B, *et al.* Increasing temperature and microplastic fibers jointly influence soil aggregation by saprobic fungi [J]. *Front Microbiol*, 2019, **10**. doi: [10.3389/fmicb.2019.02018](https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02018).
- [26] LWANGA E H, GERTSEN H, GOOREN H, *et al.* Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris* [J]. *Environ Pollut*, 2017, **220**: 523 – 531.
- [27] RILLIG M C, ZIERSCH L, HEMPEL S. Microplastic transport in soil by earthworms [J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1). doi: [10.1038/s41598-017-01594-7](https://doi.org/10.1038/s41598-017-01594-7).
- [28] MAAB S, DAPHI D, LEHMANN A, *et al.* Transport of microplastics by two collembolan species [J]. *Environ Pollut*, 2017, **225**: 456 – 459.
- [29] ZHU Dong, BI Qingfang, XIANG Qian, *et al.* Trophic predator-prey relationships promote transport of microplastics compared with the single *Hypoaspis aculeifer* and *Folsomia candida* [J]. *Environ Pollut*, 2018, **235**: 150 – 154.
- [30] RILLIG M C, INGRAFFIA R, DE SOUZA MACHADO A A. Microplastic incorporation into soil in agroecosystems [J]. *Front Plant Sci*, 2017, **8**: 01805. doi: [10.3389/fpls.2017.01805](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805).
- [31] WANG Jie, COFFIN S, SUN Chengliang, *et al.* Negligible effects of microplastics on animal fitness and HOC bioaccumulation in earthworm *Eisenia fetida* in soil [J]. *Environ Pollut*, 2019, **249**: 776 – 784.
- [32] SELONEN S, DOLAR A, JEMEC KOKALJ A, *et al.* Exploring the impacts of plastics in soil-The effects of polyester textile fibers on soil invertebrates [J]. *Sci Total Environ*, 2020, **700**: 134451. doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.134451](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134451).
- [33] HUERTA LWANGA E, GERTSEN H, GOOREN H, *et al.* Microplastics in the terrestrial ecosystem: implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae) [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, **50**(5): 2685 – 2691.
- [34] CHEN Yuling, LIU Xiaoning, LENG Yifei, *et al.* Defense responses in earthworms (*Eisenia fetida*) exposed to low-density polyethylene microplastics in soils [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, **187**: 109788. doi: [10.1016/j.ecoenv.2019.109788](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109788).
- [35] LAHIVE E, WALTON A, HORTON A A, *et al.* Microplastic particles reduce reproduction in the terrestrial worm *Enchytraeus crypticus* in a soil exposure [J]. *Environ Pollut*, 2019, **255**: 113174. doi: [10.1016/j.envpol.2019.113174](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113174).
- [36] KIM S W, AN Y J. Soil microplastics inhibit the movement of springtail species [J]. *Environ Int*, 2019, **126**: 699 – 706.
- [37] JU Hui, ZHU Dong, QIAO Min. Effects of polyethylene microplastics on the gut microbial community, reproduction and avoidance behaviors of the soil springtail, *Folsomia candida* [J]. *Environ Pollut*, 2019, **247**: 890 – 897.
- [38] RODRÍGUEZ-SEIJO A, SANTOS B, FERREIRA DA SILVA E, *et al.* Low-density polyethylene microplastics as a source and carriers of agrochemicals to soil and earthworms [J]. *Environ Chem*, 2019, **16**(1): 8 – 17.
- [39] JIANG Xiaofeng, CHANG Yeqian, ZHANG Tong, *et al.* Toxicological effects of polystyrene microplastics on earthworm (*Eisenia fetida*) [J]. *Environ Pollut*, 2019, **259**: 113896. doi: [10.1016/j.envpol.2019.113896](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113896).
- [40] HUERTA LWANGA E, THAPA B, YANG Xiaomei, *et al.* Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: a potential for soil restoration [J]. *Sci Total Environ*, 2018, **624**: 753 – 757.
- [41] ZHU Dong, CHEN Qinglin, AN Xinli, *et al.* Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition [J]. *Soil Biol Biochem*, 2018, **116**: 302 – 310.
- [42] WU Qingqing, TAO Huchun, WONG M H. Feeding and metabolism effects of three common microplastics on *Tenebrio molitor* L. [J]. *Environ Geochem Health*, 2019, **41**(1): 17 – 26.
- [43] PANEBIANCO A, NALBONE L, GIARRATANA F, *et al.* First discoveries of microplastics in terrestrial snails [J]. *Food Control*, 2019, **106**: 106722. doi: [10.1016/j.foodcont.2019.106722](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106722).
- [44] AL-JAIBACHI R, CUTHBERT R N, CALLAGHAN A. Examining effects of ontogenic microplastic transference on *Culex* mosquito mortality and adult weight [J]. *Sci Total Environ*, 2019, **651**: 871 – 876.
- [45] CUTHBERT R N, AL-JAIBACHI R, DALU T, *et al.* The influence of microplastics on trophic interaction strengths and oviposition preferences of dipterans [J]. *Sci Total Environ*, 2019, **651**: 2420 – 2423.
- [46] LWANGA H E, VEGA J M, QUEJ V K, *et al.* Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain [J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 14071. doi: [10.1038/s41598-017-14588-2](https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2).
- [47] ZHAO Shiye, ZHU Lixin, LI Daoji. Microscopic anthropogenic litter in terrestrial birds from Shanghai, China: not only plastics but also natural fibers [J]. *Sci Total Environ*, 2016, **550**: 1110 – 1115.
- [48] BOYERO L, LÓPEZ-ROJO N, BOSCH J, *et al.* Microplastics impair amphibian survival, body condition and function [J].

- Chemosphere*, 2020, **244**: 125500. doi: [10.1016/j.chemosphere.2019.125500](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125500).
- [49] SONG Yang, CAO Chengjin, QIU Rong, *et al.* Uptake and adverse effects of polyethylene terephthalate microplastics fibers on terrestrial snails (*Achatina fulica*) after soil exposure [J]. *Environ Pollut*, 2019, **250**: 447 – 455.
- [50] LI Boqing, DING Yunfei, CHENG Xue, *et al.* Polyethylene microplastics affect the distribution of gut microbiota and inflammation development in mice [J]. *Chemosphere*, 2020, **244**: 125492. doi: [10.1016/j.chemosphere.2019.125492](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125492).
- [51] JIN Yuanxiang, LU Liang, TU Wenqing, *et al.* Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice [J]. *Sci Total Environ*, 2019, **649**: 308 – 317.
- [52] LU Liang, WAN Zhiqin, LUO Ting, *et al.* Polystyrene microplastics induce gut microbiota dysbiosis and hepatic lipid metabolism disorder in mice [J]. *Sci Total Environ*, 2018, **631/632**: 449 – 458.
- [53] XIE Xiaoman, DENG Ting, DUAN Jiufei, *et al.* Exposure to polystyrene microplastics causes reproductive toxicity through oxidative stress and activation of the p38 MAPK signaling pathway [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, **190**: 110133. doi: [10.1016/j.ecoenv.2019.110133](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110133).
- [54] LUO Ting, WANG Caiyun, PAN Zihong, *et al.* Maternal polystyrene microplastic exposure during gestation and lactation altered metabolic homeostasis in the dams and their F₁ and F₂ offspring [J]. *Environ Sci Technol*, 2019, **53**(18): 10978 – 10992.
- [55] ROMAN L, LOWENSTINE L, PARSLEY L M, *et al.* Is plastic ingestion in birds as toxic as we think? Insights from a plastic feeding experiment [J]. *Sci Total Environ*, 2019, **665**: 660 – 667.
- [56] MUSCOLO A, SETTINERI G, ATTINÀ E. Early warning indicators of changes in soil ecosystem functioning [J]. *Ecol Ind*, 2015, **48**: 542 – 549.
- [57] WANG Jun, LÜ Shenghong, ZHANG Manyun, *et al.* Effects of plastic film residues on occurrence of phthalates and microbial activity in soils [J]. *Chemosphere*, 2016, **151**: 171 – 177.
- [58] LIU Hongfei, YANG Xiaomei, LIU Guobin, *et al.* Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil [J]. *Chemosphere*, 2017, **185**: 907 – 917.
- [59] HUANG Yi, ZHAO Yanran, WANG Jie, *et al.* LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil [J]. *Environ Pollut*, 2019, **254**: 112983. doi: [10.1016/j.envpol.2019.112983](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112983).
- [60] AWET T T, KOHL Y, MEIER F, *et al.* Effects of polystyrene nanoparticles on the microbiota and functional diversity of enzymes in soil [J]. *Environ Sci Eur*, 2018, **30**(1): 11. doi: [10.1186/s12302-018-0140-6](https://doi.org/10.1186/s12302-018-0140-6).
- [61] FEI Yufan, HUANG Shunying, ZHANG Haibo, *et al.* Response of soil enzyme activities and bacterial communities to the accumulation of microplastics in an acid cropped soil [J]. *Sci Total Environ*, 2020, **707**: 135634. doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.135634](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135634).
- [62] REN Xinwei, TANG Jingchun, LIU Xiaomei, *et al.* Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and the microbial community in fertilized soil [J]. *Environ Pollut*, 2020, **256**: 113347. doi: [10.1016/j.envpol.2019.113347](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113347).
- [63] LI Jiajia, LIU Fanghua, YANG Cuiyun, *et al.* Inhibition effect of polyvinyl chloride on ferrihydrite reduction and electrochemical activities of *Geobacter metallireducens* [J]. *J Basic Microbiol*, 2020, **60**(1): 37 – 46.
- [64] TU Chen, CHEN Tao, ZHOU Qian, *et al.* Biofilm formation and its influences on the properties of microplastics as affected by exposure time and depth in the seawater [J]. *Sci Total Environ*, 2020, **734**. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.139237](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139237).
- [65] RUMMEL C D, JAHNKE A, GOROKHOVA E, *et al.* Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment [J]. *Environ Sci Technol Lett*, 2017, **4**(7): 258 – 267.
- [66] ZHANG Mengjun, ZHAO Yanran, QIN Xiao, *et al.* Microplastics from mulching film is a distinct habitat for bacteria in farmland soil [J]. *Sci Total Environ*, 2019, **688**: 470 – 478.
- [67] LIAN Jiapan, WU Jiani, XIONG Hongxia, *et al.* Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *J Hazard Mater*, 2020, **385**: 121620. doi: [10.1016/j.jhazmat.2019.121620](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121620).
- [68] JIANG Xiaofeng, CHEN Hao, LIAO Yuanchen, *et al.* Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba* [J]. *Environ Pollut*, 2019, **250**: 831 – 838.
- [69] CHAE Y, AN Y J. Nanoplastic ingestion induces behavioral disorders in terrestrial snails: trophic transfer effects via vascular plants [J]. *Environ Sci Nano*, 2020, **7**(3): 975 – 983.

- [70] 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 Lianzhen, ZHOU Qian, YIN Na, *et al.* Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant [J]. *Chin Sci Bull*, 2019, **64**(9): 928 – 934.
- [71] LI Lianzhen, LUO Yongming, LI Ruijie, *et al.* Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode [J]. *Nat Sust*, 2020, **3**(11): 929 – 937.
- [72] QI Yueling, YANG Xiaomei, 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]. *Sci Total Environ*, 2018, **645**: 1048 – 1056.
- [73] DONG Hegan, LIU Tong, HAN Zhiquan, *et al.* Determining time limits of continuous film mulching and examining residual effects on cotton yield and soil properties [J]. *J Environ Biol*, 2015, **36**(3): 677 – 684.
- [74] GAO Minling, LIU Yu, SONG Zhengguo. Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-*n*-butyl phthalate in lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort) [J]. *Chemosphere*, 2019, **237**: 124482. doi: [10.1016/j.chemosphere.2019.124482](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124482).
- [75] LOZANO Y M, RILLIG M C. Effects of microplastic fibers and drought on plant communities [J]. *Environ Sci Technol*, 2020, **54**(10): 6166 – 6173.
- [76] RILLIG M C, de SOUZA MACHADO A A, LEHMANN A, *et al.* Microplastic effects on plants [J]. *New Phytol*, 2019, **223**(3): 1066 – 1070.
- [77] QI Yueling, OSSOWICKI A, YANG Xiaomei, *et al.* Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties [J]. *J Hazard Mater*, 2020, **387**: 121711. doi: [10.1016/j.jhazmat.2019.121711](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121711).
- [78] LIU Hongfei, YANG Xiaomei, LIANG Chutao, *et al.* Interactive effects of microplastics and glyphosate on the dynamics of soil dissolved organic matter in a Chinese loess soil [J]. *Catena*, 2019, **182**: 104177. doi: [10.1016/j.catena.2019.104177](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104177).
- [79] CHEN Huiping, WANG Yuhuang, SUN Xi, *et al.* Mixing effect of polylactic acid microplastic and straw residue on soil property and ecological function [J]. *Chemosphere*, 2020, **243**: 125271. doi: [10.1016/j.chemosphere.2019.125271](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125271).
- [80] WANG Jiao, LIU Xianhua, DAI Yexin, *et al.* Effects of co-loading of polyethylene microplastics and ciprofloxacin on the antibiotic degradation efficiency and microbial community structure in soil [J]. *Sci Total Environ*, 2020, **741**: 140463. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.140463](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140463).