

DOI: 10.11766/trxb202102240040

刘鑫蓓, 董旭晟, 解志红, 马学文, 骆永明. 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 Xinbei, DONG Xusheng, XIE Zhihong, MA Xuewen, LUO Yongming. Ecological Effects and Biodegradation of Microplastics in Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (2): 349–363.

土壤中微塑料的生态效应与生物降解*

刘鑫蓓¹, 董旭晟², 解志红^{1†}, 马学文³, 骆永明⁴

(1. 山东农业大学资源与环境学院土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271018; 2. 山东农业大学动物科技学院反刍动物营养与生理实验室, 山东泰安 271018; 3. 山东农大肥业科技有限公司, 山东泰安 271000; 4. 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), 南京 210008)

摘要: 塑料污染已成为环境污染治理中重要的一部分, 其生态效应和防治一直是近几年污染防治的关注点。由于塑料在环境中较难降解, 经过环境中风化等物理作用, 这些难以降解的塑料最终形成了直径小于 5 mm 的微塑料。微塑料作为近几年全球重点研究的污染物, 其生态效应和降解方法一直备受关注。除了塑料垃圾污染外, 一次性塑料产品、地膜等农用材料的使用, 也会造成土壤中微塑料的污染。土壤中的微塑料会通过发生横向和纵向迁移扩大污染范围, 加大微塑料在土壤中的污染程度, 给土壤微塑料治理带来了很大的挑战。本文从土壤环境、土壤微生物、植物体、食物链等方面综述了微塑料的生态效应, 总结了近几年微塑料的危害, 探讨了微塑料在植物和食物链中的积累, 并且对微塑料沿食物链富集的风险进行分析。土壤微塑料的生态效应主要来自三个方面: 塑料的主要成分、塑料合成过程中的添加剂、微塑料在环境中吸收挟带的污染物。微塑料能直接改变土壤的理化性质, 影响土壤微生物群落的功能和结构多样性, 并且会在植物体内积累, 影响植物体健康。微塑料可能会通过饮食、饮水和呼吸等方式进入动物体和人体。除了通过沿食物链传递外, 土壤微塑料还能通过扬尘的方式扩散到空气中, 从而被食物链中不同层次的动物通过呼吸吸入到体内。一旦微塑料进入生物体内后, 可能会进入生物体内的循环系统, 从而在动物体内各处积累。还对微塑料的生物降解方法进行了论述, 尤其是对真菌和细菌的降解机制进行了详细的讨论。研究发现土壤中的昆虫、细菌和真菌均具有降解微塑料的能力, 这些生物也均能成为解决土壤微塑料污染很好的对策。考虑到微塑料在环境中的生态效应和持久性, 结合现有的微塑料降解方法, 本文对未来土壤微塑料的研究方向和重点进行了分析和展望。

关键词: 土壤; 微塑料; 生态效应; 食物链; 微生物; 生物降解

中图分类号: X53; S154 **文献标志码:** A

Ecological Effects and Biodegradation of Microplastics in Soils

LIU Xinbei¹, DONG Xusheng², XIE Zhihong^{1†}, MA Xuewen³, LUO Yongming⁴

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment,

* “美丽中国”生态文明科技工程专项(XDA23050102)、国家自然科学基金(NSFC)-山东省联合基金重点支持项目(U1806206)和山东农业大学引进人才科研启动基金资助 Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA23050102), the NSFC-Shandong Joint Fund Key Projects (No. U1806206), and the Scientific Research Foundation of Shandong Agricultural University

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhihongxie211@163.com

作者简介: 刘鑫蓓(1999—), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源与环境土壤学。E-mail: 962020970@qq.com

收稿日期: 2021-02-24; 收到修改稿日期: 2021-04-24; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-08-11

Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Laboratory of Ruminant Nutrition and Physiology, College of Animal Science and Technology, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 3. Shandong Agricultural University Fertilizer Science and Technology Co., Ltd., Tai'an, Shandong 271000, China; 4. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Ecological effects mainly refer to the damage to the environment caused by various anthropogenic activities. These usually cause structural and functional change in the ecosystem. With the increased use of plastics, plastic pollution has become a very important part of environmental pollution management. Their ecological effects and prevention have been the focus of pollution prevention in recent years. Plastics are difficult to degrade in the environment, and after the physical effects of weathering, they eventually form plastic particles less than 5 mm in diameter called microplastics. This has led to the ecological effects and degradation methods of microplastics receiving much attention in recent years. In addition to plastic waste pollution, the use of disposable plastic products, plastic film, and other plastic agricultural materials can also cause microplastic pollution in the soil. Microplastics in the soil will expand the pollution scope by lateral and vertical migration. Lateral migration mainly refers to the diffusion of microplastics in the surface layer of soil through wind and surface water, while vertical migration refers to the diffusion of microplastics to deeper layers of soil through soil organisms, water or various enrichment methods. The migration of microplastics increases the degree of microplastic pollution in soil and creates a great challenge for soil microplastic management. In this review, the ecological effects of microplastics are reviewed in terms of soil environment, soil microorganisms, plant, and food chain. The deposition of microplastics in plants and food chain is discussed, and the risk of microplastic enrichment along the food chain is analyzed. The ecological effects of soil microplastics come from three main sources: the main components of the plastic, additives in the plastic synthesis process, and the pollutants that the microplastic absorbs from the environment. Microplastics can directly change the physicochemical properties of soil, affect the function and structure of soil microbes, and accumulate in plants, thereby affecting their health. Also, microplastics can enter the animal and human bodies through diet, drinking water, and respiration. Additionally, soil microplastics can be dispersed into the air by way of dust lifting and thus be inhaled by animals at different levels of the food chain through respiration. Once inside the organism, microplastics may enter the circulatory system of the organism and thus accumulate in various parts of the organism. Microplastics have been found in many livestock products, but their entry channels into animals still need to be studied. Even though the content is very low, these microplastics may accumulate in the human body in large quantities through the food chain. The biodegradation methods of microplastics, especially the degradation mechanisms of fungi and bacteria are discussed in detail. Currently, studies have found that insects, bacteria and fungi in soil can degrade microplastics, and all of these organisms could also be good countermeasures to deal with soil microplastic pollution. Finally, based on the summary of the existing research on ecological effects and biodegradation of microplastics, the review analyzes and outlooks the future research directions and priorities of soil microplastics.

Key words: Soil; Microplastics; Ecological effect; Food chain; Microbe; Biodegradability

生态效应主要指各种人为活动对环境造成的污染和破坏,引起的生态系统结构和功能的转变。自然环境对污染物存在一定的抵抗力,但是当污染程度超过自然环境的承受能力,污染物就会引起各种生态效应,危及整个环境。生活中常见的污染包括气体污染、重金属污染、石油类产品污染、塑料污染等,其中塑料作为一种用途广泛、价格低廉、品种繁多的材料,给日常生活带来了巨大的变革的同时也造成严重的环境污染。

塑料污染物的种类繁多,其产生的微塑料也并非单一的有机化合物,而是包含很多化学成分不同的塑料聚合物,例如聚乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚氨酯和聚对苯二甲酸乙二醇酯等有机化合物。虽然一些塑料垃圾能及时地被回收利用,但大多数最终通过垃圾填埋场、污水处理厂等渠道进入环境中,而其中很大一部分会富集到土壤中。此外,微塑料在土壤中的污染与一次性塑料产品、地膜等农用材料的使用是密不可分的,灌溉和水培

系统、温室的塑料膜、土壤改良剂中也都有塑料的使用^[1-3]。一旦这些难降解的塑料进入到土壤中，它们就会慢慢地被粉碎成更小的颗粒，从而加剧污染程度^[4]。在自然环境下，土壤中累积的塑料能通过光降解和热氧化降解等降解作用被破碎分解，但是这些破碎分解过程不能完全分解塑料碎片^[5]，而塑料作为新型污染物，土壤的自净能力对其分解能力极其有限，无法更进一步对塑料进行降解，最终这些塑料垃圾会成为直径小于 5 mm 的塑料颗粒，称为微塑料^[6]。土壤中的微塑料会通过横向和纵向迁移扩大其污染范围^[7]，横向迁移主要指微塑料通过风、地表水等方式在土壤表层进行扩散，而纵向迁移是指微塑料通过土壤中的生物、水或者各种富集方式向更深层的土壤中进行扩散的过程。目前的研究表明，微塑料已广泛分布在世界各地的土壤中，并且有研究表明在 30 cm 深的土壤中能发现微塑料的存在^[7-8]。微塑料广泛的分布面积和较大的环境累积量导致了很严重的生态效应，但目前还没有提出很有效的微塑料降解方法可以应对环境中的微塑料污染。因此本文从土壤环境、土壤微生物、植物体、食物链等方面综述了微塑料的生态效应，并且分析了近几年研究比较火热的微塑料生物降解方法，希望能提供一个对土壤微塑料生态效应的详细描述，并为微塑料的生物降解提供思路和参考。

1 土壤微塑料的生态效应

微塑料因为其本身的持久性、多样性和丰富性会对土壤环境造成很大的影响^[9]。土壤微塑料的生态效应主要来自三个方面：塑料的主要成分、塑料合成过程中的添加剂、在环境中吸收的污染物^[10]。由于颗粒大小不一且密度与土壤颗粒不同，微塑料会直接改变土壤的物理性质。小颗粒的微塑料可以很轻易地被土壤中的生物群体吸收，甚至有可能在食物链中累积。此外，微塑料较大的表面积也提供了吸附土壤中污染物的媒介，从而使污染物在这些颗粒上富集。因此，土壤中微塑料既可以被认为是环境污染物，也可以被认为是环境污染物的媒介^[11]。

1.1 微塑料对土壤理化性质的影响

研究表明微塑料会直接影响土壤的密度、无机盐含量和保水的能力等，较大尺寸(100 nm~5 mm)

的微塑料颗粒甚至可以直接破坏土壤结构^[9]。由于微塑料的类型不同，每种塑料化合物的密度不同，因此其在土壤中的分布以及对土壤密度的影响也不同。通常，相比于土壤颗粒，微塑料具有更低的密度，微塑料的加入会降低土壤容重^[12]。微塑料颗粒的介入也会使土壤的团聚性发生改变，研究表明土壤中 72% 的微塑料参与了土壤团聚体的形成^[13]。土壤团聚体的形成大大增加了土壤的通气性和孔隙度，研究表明聚酯纤维与周围的土壤结合后，其形成的团聚体还将影响土壤的保水能力^[9]。微塑料颗粒及其团聚性也会为水分的运动创造一个通道，从而加速土壤水分的蒸发，导致土壤表面干裂甚至还可能破坏土壤结构的完整性^[14]。植物根系周围通常会富集很多微塑料颗粒，而这些颗粒可能会通过改变植物根系周围微生物群落的丰度来影响植物根系周围的土壤肥力^[15]。此外，微塑料还会影响土壤的 pH，有研究表明高密度聚乙烯塑料会降低土壤 pH^[16]，但是其他研究表明聚乳酸和低密度聚乙烯这两种微塑料能增加土壤 pH^[15, 17]。目前，不同种类微塑料对土壤 pH 产生不同影响的原因还存在争议，需要更进一步的试验研究。

总之，微塑料的存在可能导致土壤理化参数的变化，如土壤结构、容重、持水能力、pH 值和养分含量^[14, 18-19]。这些土壤中的变化可能会通过植物的根系间接影响到植物体的根系发育、生长情况和养分吸收等过程^[20-21]。

1.2 微塑料的吸附性对土壤健康的影响

微塑料具有较大的表面积和疏水性，它能够将重金属和疏水性有机污染物等有毒化学品集中在其表面，成为这些污染物的载体，从而对土壤中的动植物造成更进一步的危害^[4, 22-24]。由于微塑料种类较多，且每种材料的化学和物理特性不同，不同塑料材质的表面积和分子极性，也会影响微塑料对重金属的吸附能力^[25-26]。自然情况下在土壤中放置时间越久的微塑料，会吸附越多的重金属，比如老化的聚氯乙烯颗粒中积累了更多的铜和锌^[25]。暴露在阳光中越久，阳光中的紫外线照射越会增加土壤表面微塑料对重金属的吸附作用^[27]，因此微塑料在土壤中存在的时间越长，其构成的生态危害就越大。塑料制造过程中为了增加其韧性和强度会添加额外的有机或无机添加剂^[28]，这些添加剂可能包括除酸

剂、润滑剂、光稳定剂、热稳定剂、颜料、抗静电剂、抗氧化剂和增塑剂^[29]。这些人工添加剂以及这些添加剂在土壤中吸收富集的有机污染物也会对土壤环境和生物造成很大的影响^[2]。微塑料的吸附能力与吸附剂的疏水性密切相关, 极易吸附疏水性的有机物^[30-31]。土壤中的疏水性有机物主要包括多环芳烃、多氯联苯、有机农药, 这些疏水性有机化合物被吸附到微塑料表面后, 通常会导致严重的复合污染^[4, 32]。由于较强的吸附性, 在研究土壤微塑料的过程中, 有必要检测土壤中含量较高的农药、重金属等其他污染物, 来判断微塑料是否会与其他污染物形成复合污染, 从而加剧土壤的污染程度。

在畜牧业中存在抗生素大量使用的现象, 而过量的抗生素则随动物粪便一起排放到了土壤中^[33]。微塑料较大的表面积, 多孔结构也使其对抗生素有很强的吸附能力^[34]。最近研究表明四环素类抗生素可以与土壤中的微塑料形成复合物, 并能在微塑料周围土壤微生物群落中产生抗药性^[35]。微塑料是否会驱动抗性基因增加细菌的耐药性目前尚无定论, 需要进行深入探讨^[36]。

1.3 微塑料对土壤微生物的影响

微塑料能改变土壤的理化性质、土壤粒度和土壤环境, 而这些改变会直接影响土壤微生物群落的功能和结构多样性, 从而导致更严重的土壤环境问题^[37-38]。微塑料还可以通过吸收太阳辐射来提高土壤的温度, 在寒冷的地区, 土壤温度的细微升高很可能会改变其中的微生物群落^[9]。与周围的土壤颗粒相比, 由于微塑料颗粒凹凸不平的表面和表面附着的各种物质, 会使微塑料周围会形成与土壤中完全不同的微生物群落^[39], 而塑料周围的群落形成的生态系统通常被称为塑料圈 (Plastisphere)。塑料圈, 是一个最近被命名的人造生态系统, 这个术语最初是指从北大西洋亚热带环流收集的微塑料上的生物群落^[40]。微塑料进入环境后, 环境中的细菌或其他原核生物会通过可逆附着率先黏附在微塑料的表面, 这些生物会在微塑料表面形成诸如菌毛、黏附蛋白和胞外多聚物等机制促进不可逆的附着, 然后随着各种微生物的附着和增殖生长, 生物之间产生更多样化的协同和竞争关系, 最终形成了一个复杂的生物群落, 即为“塑料圈”^[41]。在海洋中, 塑料圈由一些光养生物、原生物、共生菌落

和病原体组成^[42]。近 5 年塑料圈在海洋中的研究有了一定的进展^[43], 但在土壤中塑料圈的研究还比较少。通常塑料圈的生物群落与周围环境有显著差异, 一些细菌群, 如弧菌科 (Vibrionaceae) 或假交替单胞菌科 (Seudoalteromonadaceae), 能够在塑料圈中大量繁殖, 但在塑料圈周围环境中很少发现^[4]。在土壤的微塑料颗粒表面中, 研究人员发现了绿弯菌门 (Chloroflexi)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes)、节杆菌属 (*Arthrobacter*)、链霉菌属 (*Streptomyces*)、诺卡氏菌属 (*Nocardia*)、气微菌属 (*Aeromicrobium*)、两面神菌属 (*Janibacter*) 和分枝杆菌属 (*Mycobacterium*) 的一些细菌^[44-45]。

1.4 土壤微塑料对植物体的直接影响

在农用地土壤中生长的植物, 通常会使用覆盖地膜、施用有机肥等措施, 而这些措施也增加了农业作物接触微塑料的机会^[10]。由于其颗粒本身具有较强的黏附性, 较小颗粒的微塑料极易被植物根系分泌的多糖黏液黏附从而被植物根系吸收, 此外小颗粒的微塑料在受到挤压力的作用下能够进入到狭小的根部质外体空间, 会进一步渗透进入根系皮层组织甚至到达植物的导管组织中^[46]。进入植物根部后, 这些塑料颗粒能从植物根部运输到植物的地上部分, 蒸腾作用可能是塑料颗粒在植物体内运动的主要驱动力, 并且蒸腾作用的加快会加速这一过程^[46]。

这些较小颗粒的微塑料进入或者接触植物体后, 会影响植物体的健康。研究表明, 土壤中的微塑料会减弱葱根部的生物量和根的伸张情况, 甚至会影响菌根真菌在植物根系的定殖^[18]。不同粒度的聚苯乙烯均会造成生菜根和叶的氧化应激, 并且损害根和叶的生长发育^[47]。其他的研究也表明微塑料对土壤-植物之间均具有潜在的威胁^[48]。由于微塑料种类较多, 不同材质的微塑料会在土壤和植物中引起不同的反应^[18-19], 此外不同植物种类和土壤环境对微塑料的响应也不一样, 因此在研究微塑料对植物体的危害时应该将土壤环境作为一个整体去考虑, 进一步研究应该包括更多类型的塑料颗粒、植物种类和土壤条件, 以便系统地评估土壤微塑料污染对植物体的影响。

土壤微塑料早期的研究主要集中在微塑料对种子发芽率的影响。Bosker 等^[49]的试验表明, 微塑料颗粒会堵塞种子的气孔, 从而降低 78% 的种子的发

芽率。一些细长的微塑料纤维也会缠绕幼苗的根系，阻碍幼苗的生长^[9]。微塑料在植物体内富集的研究正在进行，若微塑料能在植物体内通过根部的导管系统分散到整个植物体，就会实现微塑料从土壤到植物体中的转移，造成更严重的危害，甚至可能进入食物链。研究发现 3 μm 的聚乙烯颗粒能在水培的玉米根际区域检测出，但是由于颗粒较大无法继续到达植株的地上部分^[3]。小麦与生菜在含有微塑料的水培试验和废水灌溉沙土中生长时，研究人员在这两种植物的根、茎、叶中均发现了微塑料颗粒^[46]。

水培条件下的研究表明，0.2 μm 的聚苯乙烯微球能被生菜的根部吸收并能转移到生菜的茎中积累，而 1 μm 聚苯乙烯微球未能被生菜根部吸收^[50]。土壤中的聚苯乙烯微球能够转移到绿豆的叶片中，然后还会在该环境下的蜗牛体内富集^[51]。因此，土壤微塑料能够在植物体内富集，甚至是通过食草动物和昆虫在食物链流动。不同微塑料在植物体内的情况见表 1。微塑料在植物体内的富集能力与其颗粒大小密切相关，颗粒越小的微塑料，越容易进入植物根系并且在叶片中积累。

表 1 不同微塑料类型和粒径在植物体内的富集情况

Table 1 Accumulation of different microplastic types and particle sizes in plants

微塑料类型	粒径	植物	培养条件	富集部位	参考文献
Types of microplastics	Grain diameter	Plant	Cultivation method	Accumulation site	Reference
聚苯乙烯 Polystyrene	0.2 μm	生菜	水培	根部、叶片	[50]
聚苯乙烯 Polystyrene	0.2 μm	小麦幼苗	河砂基质砂培	根部、茎	[52]
聚苯乙烯 Polystyrene	0.1 μm	蚕豆	水培	根部	[53]
聚苯乙烯 Polystyrene	0.2 μm	小麦	水培	根部、茎、叶片	[54]
聚苯乙烯 Polystyrene	0.02 μm	绿豆	土培	叶片	[51]
聚苯乙烯 Polystyrene	2 μm 、0.2 μm	生菜、小麦	水培 土培	根部、茎、叶片 根部	[46]
聚甲基丙烯酸甲酯 Polymethyl Methacrylate	2 μm 、0.2 μm	生菜	水培	根部、叶片	[46]
聚乙烯 Polyethylene	3 μm	玉米	水培	根际	[3]

1.5 土壤微塑料对陆地食物链的影响

塑料和相关污染物的营养转移已在水产食物网中得到证实^[55]，与水生环境相比，关于陆地上微塑料对生物健康风险的研究仍处于起步阶段^[12]。在水生环境中，水中聚苯乙烯纳米颗粒（24 nm）能通过淡水食物链从藻类到大型浮游动物体内，然后会继续通过采食进入金鱼体内^[56]。但是在土壤中，富集到植物体内的微塑料是否会在动物体内富集或者沿食物链传递的研究还比较少。

最近试验表明，微塑料可能会通过饮食、饮水和呼吸等方式进入动物体和人体^[57]。除了通过沿食物链层级传递外，土壤微塑料还能通过扬尘的方式扩散到空气中^[58]，从而被食物链中不同层次的动物通过呼吸吸入到体内。一旦微塑料进入生物体内后，可能会进入生物体内的循环系统，从而在动物体内各处积累。尽管在哺乳动物上微塑料进入机体循环

系统的研究较少，但是在贝类的研究上，已经证明微塑料可以进入生物体的循环系统^[59]。

在畜牧生产中很多研究已经表明，微塑料可能会污染动物产品，如蜂蜜、牛奶等^[60]。在对墨西哥家庭散养鸡的调查中，微塑料已经在家禽的砂囊中被检测到，同时在周围的土壤和蚯蚓中也能检测到微塑料的存在，但在当地的植物内并未检测到微塑料，推测鸡可能通过啄食蚯蚓或者吞食土壤颗粒帮助消化的过程中将微塑料摄入到了体内^[61]。人类若在食用这样的砂囊时冲洗不干净，其内容物中的微塑料将直接进入人体消化道。在其他经济动物产品中，牛奶和蜂蜜中也发现了聚乙烯、聚丙烯和聚丙烯酰胺这三种材质的微塑料^[60]。但是微塑料是在动物体内富集后转移到这些动物产品中，还是在包装、加工、运输的过程中对这些产品造成的污染仍然未知。这些微塑料污染畜牧产品的途径，是通过饲料

采食还是水或者空气的污染也有待进一步的研究。

尽管目前进行的土壤微塑料富集到植物体后是否会通过食物链传递到动物体内的研究还比较少,但在人体上微塑料的研究表明,调查的 6 名女性中有 4 名女性胎盘中检测出微塑料,且在母体侧、胎儿侧和绒毛膜三个部分均检测出了 5~10 μm 大小不等的微塑料,这些微塑料很可能是通过食物链或者呼吸的方式进入母体循环系统从而到达胎盘^[62],这个结果足以引起人们对微塑料的重视。有关微塑料的动物和细胞的添加试验表明,微塑料可以在人的肠道上皮细胞中积累^[63],在小鼠的肠道、肝脏和肾脏中也均能发现微塑料的累积^[64-65]。累积在体内的微塑料会给动物机体造成不同的损伤,研究表明小鼠口服微塑料后,会减轻小鼠的体重,并且会影响小鼠肝脏中氧化应激和脂代谢过程^[64, 66]。此外,塑料在制作过程中添加的有害化学添加剂,在其成为微塑料进入生物体后,也能对生物体产生更进一步的影响。尽管尚没有直接证据表明植物体内的微塑料会通过采食传递到动物体内,但是目前的大多数研究均表明,很多畜牧业产品已经受到微塑料的污染,即使含量很微小,但是这些微塑料通过食物链不断富集后,可能在人体内大量累积,最终可能会对机体造成很大的损害。

2 土壤微塑料的生物降解

目前针对体积较大的塑料的处理方法包括回收利用、填埋、热降解、机械降解和生物降解等^[67]。土壤中微塑料的颗粒较小,已经广泛融入土壤环境中的各处,无法进行回收或者富集。由于微塑料分布的广泛性,很难使用热降解等简单的方法对其进行无害化处理。因此,研究人员主要关注使用生物降解的方法对土壤中的微塑料进行降解,利用土壤中生物自身的运动和繁殖能力,也可以实现较大范围的微塑料降解。和其他方式相比,生物降解也更加安全、环保,有利于增强土壤环境对污染的自洁能力。目前研究发现,土壤中的昆虫、细菌和真菌均具有降解微塑料的能力,这些生物也都能成为解决土壤微塑料污染很好的对策。

2.1 微塑料的动物降解

有些昆虫能够咀嚼和采食蜂蜡或塑料制品,并且将这些物质用作唯一的碳源,能为微塑料的生物

降解提供强大的生物资源^[68]。目前已有 8 种昆虫被报道具有采食、降解塑料的能力,大部分的研究集中在黄粉虫、大麦虫和蜡螟幼虫上^[69]。幼虫期的黄粉虫、蚯蚓和蜡螟,已经被证明能吞食并在他们体内微生物的帮助下降解各种塑料聚合物^[67]。这些土壤中的昆虫通常起到富集土壤中微塑料的作用,它们能通过咀嚼的过程将微塑料磨碎并通过肠道中的微生物进一步分解微塑料。这些昆虫能降解微塑料的本质是其体内微生物的降解作用,因此除了直接从塑料圈分离可降解微塑料的微生物外,从这些昆虫肠道中进行微塑料降解菌的筛选也成为了一种可行的途径(表 2)。

2.2 微塑料的微生物降解

塑料圈可以为很多微塑料降解菌等特殊微生物群落提供栖息地,这些微生物群落可以改变土壤生态系统的生态功能,并在微塑料降解过程中发挥作用,这也为微塑料的微生物降解提供了新的思路^[77]。虽然微塑料可以在环境中持续存在并具有一定的抗降解能力,但它们仍可以被一些微生物降解^[78],其中细菌和真菌均能参与微塑料的降解作用^[79],但仅仅靠一种单一的菌株很难完全降解微塑料,需要几种菌类形成复合物才能有效的降解微塑料^[80]。除了广泛分布于塑料圈中,这些能降解微塑料的微生物也存在于一些土壤动物的消化道内^[69, 71, 77]。微生物降解微塑料是一种安全、清洁、高效的微塑料降解方法,能在不破坏环境的情况下降解微塑料,利用微生物分布广泛的特点,也能很好地进行大面积微塑料的降解,因此微塑料的微生物降解,在近几年受到很多关注^[79, 81]。

想要通过微生物降解微塑料,首先需要解决的是高分子量的微塑料很难进入微生物细胞的问题,而微塑料的化学结构也较为稳定,缺少微生物酶可以破坏的官能团,微塑料碳骨架的较高疏水性和结晶度也会给微生物附着产生影响^[70]。目前研究发现紫外光照射、热处理或化学处理,能在微塑料的碳链上产生各种官能团(羰基、酮基、硝基等)来降低疏水性^[82],从而能促进微塑料的分解。微塑料完整的生物降解过程,首先要通过附着在微塑料表面的微生物或者土壤中的成分在微塑料的碳链上加入能被微生物结合和降解的官能团,然后通过微生物分泌的各种酶将微塑料分解为分子量低的单体或者脂肪酸、酮、醛、醇等物质,这些分子量较低的产

表 2 微塑料降解昆虫及其体内参与降解的微生物

Table 2 Microplastic degrading insects and their internal microorganisms

昆虫名 Insect	降解塑料种类 Degraded plastic types	降解效果 Degradation effect	功能微生物 Functional microorganisms	参考文献 Reference
蜡螟、印度谷螟 Waxworms, Indian Mealmoths	聚乙烯 Polyethylene	咀嚼、采食聚乙烯, 体内微生物降解	<i>Enterobacter asburiae</i> YT1, <i>Bacillus</i> sp. YP1	[70]
大麦虫 Zophobas Morio	聚苯乙烯 Polystyrene	用聚苯乙烯作为碳源, 粪便中重 均分子量和数均分子量减少, 体内 微生物降解	<i>Klebsiella</i> , <i>Citrobacter</i>	[71]
黄粉虫 Mealworms	聚乙烯、聚苯乙烯 Polyethylene, Polystyrene	用这两种微塑料作为碳源, 肠道 内存在微生物降解, 且具有联合 效应	<i>Citrobacter</i> sp., <i>Kosakonia</i> sp.	[72]
黑粉虫 Dark Mealworms	聚苯乙烯 Polystyrene	用聚苯乙烯作为碳源, 肠道内发 现聚苯乙烯解聚, 黑粉虫的降解 效果优于黄粉虫	<i>Enterococcaceae</i> , <i>Spiroplasmataceae</i> , <i>Enterobacteriaceae</i>	[73]
黄粉虫 Yellow Mealworms	聚乙烯 Polyethylene	肠道内筛选出微生物降解菌	<i>Enterobacter</i> sp. D1	[74]
黄粉虫 Yellow Mealworms	聚苯乙烯 Polystyrene	肠道内和粪便中筛选出微生物降 解菌	<i>Aspergillus niger</i> KHJ-1	[75]
蚯蚓 Earthworm	低密度聚乙烯 Low density polyethylene	肠道内筛选出微生物降解菌	<i>Microbacterium awajiense</i> , <i>Rhodococcus jostii</i> , <i>Mycobacterium</i> <i>vanbaalenii</i> , <i>Streptomyces fulvissimus</i>	[76]

物可以被微生物的细胞吸收, 最终在细胞内进行分解代谢, 产生 CO₂、N₂ 等气体, 从而实现微塑料的无害降解^[83-84]。

目前在微生物对微塑料降解的研究指标主要是微塑料的质量改变、拉伸强度和光谱学分析等^[85]。在微生物分解的微塑料研究主要集中在聚乙烯上, 其他类型的微塑料降解菌也有研究, 但是相对较少(表 3)。对单一菌种的降解效果研究表明, 真菌对微塑料的降解效果优于细菌^[86]。因为相比于细菌, 真菌的菌丝能更牢固地附着在微塑料的表面, 并且可能穿透到塑料颗粒内部, 真菌也可以促进微塑料中羰基、羧基和酯基等化学键的形成, 从而降低微塑料的疏水性, 因此真菌在减少塑料污染对环境影响的方面具有很大的潜力^[79, 87]。但无论是细菌还是真菌, 单一菌株对微塑料的降解效果一般情况均比

较有限, 而由多种真菌和细菌的混合菌群, 由于存在菌种间的协作关系, 对微塑料往往有更好的降解效果^[84, 88]。即使是同一塑料颗粒, 颗粒不同位置的生物降解效果也不同, 具体取决于该位置的微生物组成, 往往单一的真菌和细菌的降解效果较差^[46, 86]。尽管目前有大量的研究致力于微塑料降解菌的筛选, 但是目前筛选出的微生物其降解速率均较慢, 微生物与微塑料之间的相互作用尚不清楚, 不同菌群之间的协作关系也较为复杂, 想要通过微生物降解土壤中的微塑料还有很长的路要走。

2.3 微塑料的酶降解

无论真菌还是细菌, 微生物降解微塑料的本质是分泌各种降解酶, 因此很多学者着手于通过直接的酶合成的方式进行微塑料的降解^[82, 105]。微塑料降解酶按照其作用位置可以分为胞外酶和胞内酶, 胞

表 3 土壤中微塑料降解微生物

Table 3 Microplastics degrading microbes

微塑料降解微生物 Microplastics degrading microbes	来源 Source	降解塑料种类 Degraded plastic types	降解效果 Degradation effect	参考文献 Reference
细菌				
纺锤形赖氨酸芽孢杆菌, 蜡样芽孢杆菌 <i>Lysinibacillus fusiformis</i> , <i>Bacillus cereus</i>	现成菌株	聚乙烯 Polyethylene	观察到降解副产物	[89]
纺锤形赖氨酸芽孢杆菌 <i>Lysinibacillus fusiformis</i>	现成菌株	聚乙烯 Polyethylene	质量减轻, 相对分子质量变低	[90]
阿氏肠杆菌 YT1, 芽孢杆菌 YT1 <i>Enterobacter asburiae</i> YT1, <i>Bacillus</i> sp. YP1	蜡螟肠道	聚乙烯 Polyethylene	表面变粗糙, 相对分子质量减少, 表面形成疏水膜, 降低聚乙烯疏水性	[70]
肠杆菌 D1 <i>Enterobacter</i> sp. D1	蜡螟肠道	聚乙烯 Polyethylene	表面出现凹陷, 检测到羰基和醚基, 醇、酯和酸的含量有所增加	[74]
芽孢杆菌和类芽孢杆菌混合 <i>Bacillus</i> , <i>Paenibacillus</i>	垃圾场土壤	聚乙烯 Polyethylene	质量降低, 颗粒体积减小	[84]
蜡样芽孢杆菌、波茨坦短芽孢杆菌 <i>Bacillus cereus</i> , <i>Brevibacillus borstelensis</i>	垃圾场土壤	低密度聚乙烯 Low density polyethylene	质量减轻	[86]
嗜麦芽窄食单胞菌, 无色杆菌 <i>Stenotrophomonas</i> , <i>Achromobacter</i>	垃圾场土壤和较深土层钻探	低密度聚乙烯 Low density polyethylene	表面变粗糙, 出现裂痕, 羰基、双键和末端双键增加	[82]
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	塑料堆肥	线性低密度聚乙烯 Linear low-density polyethylene	质量减轻, 塑料表面破碎, 表面黏附微生物	[91]
绿脓杆菌 <i>Pseudomonas</i>	垃圾场土壤	聚苯乙烯 Polystyrene	观察到降解副产物	[92]
艾德昂菌 sakaiensis 201-F6 <i>Ideonella sakaiensis</i> 201-F6	垃圾场土壤	聚对苯二甲酸乙二醇酯 Polyethylene terephthalate	将聚对苯二甲酸乙二醇酯用作其主要碳源, 并且能产生水解酶	[80]
芽孢杆菌和类芽孢杆菌混合 <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i>	海岸线土壤	聚对苯二甲酸乙二醇酯 Polyethylene terephthalate	表面变粗糙, 提取到分解酶	[88]
努比卤地无氧芽孢杆菌 <i>Anoxybacillus rupiensis</i>	碳氢化合物污染土壤	聚酰胺-6 Polyamide-6	能在以聚酰胺-6 作为唯一碳源和氮源的培养基中生长	[93]

续表

微塑料降解微生物 Microplastics degrading microbes	来源 Source	降解塑料种类 Degraded plastic types	降解效果 Degradation effect	参考文献 Reference
真菌				
土曲霉、聚多曲霉 <i>Aspergillus terreus</i> , <i>Aspergillus sydowii</i>	海榄雌根际 土壤	聚乙烯 Polyethylene	质量降低, 表面出现 裂纹、裂缝	[94]
土曲霉、聚多曲霉 <i>Aspergillus terreus</i> , <i>Aspergillus sydowii</i>	现成菌株	聚乙烯 Polyethylene	表面变形	[95]
黄曲霉 <i>Aspergillus flavus</i>	饲喂聚氯乙烯 的蜡螟肠道	高密度聚乙烯 High density polyethylene	被降解成相对分子 质量较低的微塑料	[96]
绿色木霉、红绶曲霉 <i>Trichoderma viride</i> , <i>Aspergillus nomius</i>	垃圾场土壤	低密度聚乙烯 Low density polyethylene	质量降低、拉伸强度 降低、薄膜表面变得 粗糙有凹陷	[97]
米曲霉、烟曲霉、小巢状曲菌 <i>Aspergillus oryzae</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus nidulans</i>	垃圾场土壤	低密度聚乙烯 Low density polyethylene	质量减轻, 光谱分析 发现聚乙烯中间产 物中间产物醛和 酮	[86]
草酸青霉、产黄青霉 <i>Penicillium oxalicum</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i>	垃圾场土壤	高密度聚乙烯、低密度聚 乙烯 High density polyethylene, Low density polyethylene	质量降低、表面粗糙 出现裂缝	[98]
红曲霉 <i>Monascus</i> sp.	垃圾场土壤	聚氨酯 Polyurethane	红曲霉吸附在聚氨 酯上形成络合物, 检 测到蛋白酶、酯酶和 脂肪酶	[99]
塔宾曲霉 <i>Aspergillus tubingensis</i>	垃圾场土壤	聚氨酯 Polyurethane	表面粗糙, 内部化学 键断裂, 形成更小的 碎片	[100]
曲霉菌 S45 <i>Aspergillus</i> sp. strain S45	垃圾场土壤	聚氨酯 Polyurethane	表面粗糙出现裂缝、 酯酶活性增加	[101]
头孢霉 NCIM 1251, 毛霉菌 NCIM 881 <i>Cephalosporium</i> sp.(NCIM 1251), <i>Mucor</i> sp.(NCIM 881)	现成菌株	聚苯乙烯 Polystyrene	质量减轻、表面粗 糙、热稳定性的降低	[102]
球毛壳菌 <i>Chaetomium globosum</i>	现成菌株	聚氯乙烯、聚己内酯 Polyvinyl chloride, Polycaprolactone	质量降低, 塑料表面 形态改变	[103]
枝状枝孢菌 <i>Cladosporium cladosporioides</i>	花园土壤、垃圾 场土壤	PE-PU 固体泡沫 Polyester polyurethanes	质量降低	[104]

外酶参与了微塑料聚合物的长碳链的解离,使其形成低聚物或二聚体从而能被微生物吸收到细胞内,被吸收到微生物体内后,胞内酶会进一步将这些低聚物进行分解^[67]。但由于微塑料降解酶的研究还刚刚起步,只有为数不多的研究对微生物降解过程中的酶进行了调查,而且关注的重点也主要集中在胞外酶^[87]。

目前发现在微塑料降解过程中起重要作用的酶有蛋白酶、脂肪酶、角质酶、虫漆酶、锰过氧化物酶、木质素过氧化物酶和烷烃羟化酶等^[82, 106]。不同类型的微生物产生的降解酶也不尽相同,比如杆菌属或芽孢杆菌属的细菌主要通过分泌蛋白酶的方式对塑料进行降解,而有些真菌则是通过分泌虫漆酶催化芳香族化合物的氧化来完成降解过程^[106]。这些胞外酶首先会与微塑料底物相结合,然后才能进行降解^[107],因此酶与微塑料聚合物底物的结合对于维持酶生物催化剂的结构稳定性至关重要。酶的结合效果和催化活性受外界环境影响较大,由于土壤环境的多变性和复杂性,会直接影响胞外酶与底物的结合效果。目前很多研究仅关注了实验室环境理想情况下的酶降解,降解酶在土壤中真实的降解效果仍然有待研究。相比于微生物的研究,参与微塑料降解的酶更多且更复杂。酶制剂通常很难大面积地对土壤中微塑料实现降解,但降解酶作为微生物降解微塑料的本质,仍然不能忽视,在后续的研究中,应该得到足够的重视。

3 展 望

随着国家政策的颁布和环保意识的提高,微塑料作为新型污染物受到了越来越多的关注^[108],其治理也在我国“十四五”的污染防治工作中占很重要的地位。越来越多的学者也开始关注微塑料的问题,土壤中微塑料的分布、土壤微塑料在动植物体内的积累、土壤微塑料的危害等方向的研究也逐渐增多,未来在对微塑料进行相关研究时,应该着重关注以下几个方面。

3.1 综合考虑土壤微塑料的生态效应

与海洋环境相比,土壤的环境和成分更加多样,微塑料在土壤中的扩散和分布程度也更加复杂^[109-110]。目前由于缺乏田间和实验室研究,关于微塑料在土壤中的转移和生物学影响的争论越来越

多^[4]。在评估土壤中微塑料的影响时还要额外考虑到微塑料对土壤中其他污染物的吸附作用,以及微塑料是否会同这些物质产生联合效应,因此分析土壤微塑料的生态效应时要综合考虑微塑料对土壤可能产生的影响。

3.2 将土壤中生物与非生物部分作为整体进行研究

为了更好地评价土壤微塑料在时空变化条件下对土壤生物群的作用,需要更好地理解土壤中的塑料圈以及土壤微塑料对微生物区系的调控过程。应将土壤中的生物部分和非生物部分以及两者之间的相互作用作为整体去研究,从而能更好地研究不同部分之间的互作关系。不同类型的微塑料对污染物的吸附过程是不同的,微塑料类型是否会影响其对周围物质的吸附能力以及对塑料圈的影响也需要更进一步的研究。

3.3 分离培养微塑料高效降解菌

不同材质和粒度的微塑料周围可能会存在不一样的塑料圈和微生物群落,其降解菌之间也存在不同的互作关系。而不同农作物的根系往往也有其特有的微生物群落,这些微生物群落也会更进一步地和塑料圈中的微生物相融合,形成更复杂的互作关系。想要更好地分离微塑料降解菌,就要弄清不同菌属之间的互作关系,筛选高效的分解菌组合。目前分离得到的降解微生物效率普遍较低,因此,参与塑料降解过程的微生物和酶仍需要被进一步揭示。

3.4 土壤微塑料研究应更接近真实的自然条件

未来土壤微塑料的研究还应考虑微塑料的浓度。目前大部分的试验采用较高浓度的微塑料,以便显著观察到微塑料对植物体或土壤的影响,但在自然环境下土壤中微塑料含量往往低于试验中的添加量。除特别极端情况外,自然环境中受到污染的土壤中的微塑料含量通常不到土壤 0.1% (按质量计)^[4],且自然条件下的土壤环境往往更复杂,因此需要用更接近自然状态下的研究环境去进行微塑料的研究。随着全球塑料垃圾的大量产生,土壤中微塑料的浓度预计会持续增加,因此,未来的研究应该关注不同浓度的土壤微塑料对土壤和植物之间、土壤生物和土壤性质的影响。

3.5 结合不同学科,共同研究微塑料对食物链的影响

微塑料累积是否会沿着食物链富集到食草动物或者是人类体内仍然未知。食草动物及其畜牧产品是

人类很重要的食物来源,但对其采食的饲料中微塑料的含量和研究却比较少。若畜牧动物采食的饲草中存在微塑料污染,对肉、蛋、奶等畜牧产品中微塑料含量的评估,将会是一个很有意义的研究方向,这需要畜牧、土壤、环境学等多方面学科的合作。

参考文献 (References)

- [1] Ng E L, Huerta Lwanga E, Eldridge S M, et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 1377—1388.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Wang J, Liu X H, Li Y, et al. Microplastics as contaminants in the soil environment: A mini-review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 691: 848—857.
- [5] Wang W F, Ge J, Yu X Y, et al. Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: Progress and perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 134841.
- [6] Wright S, Mudway I. The ins and outs of microplastics[J]. *Annals of Internal Medicine*, 2019, 171 (7): 514—515.
- [7] Yang J, Li L Z, Zhou Q, et al. Microplastics contamination of soil environment: Sources, processes and risks[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (2): 281—298. [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.]
- [8] Wang Z C, Meng Q, Yu L H, et al. Occurrence characteristics of microplastics in farmland soil of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36 (3): 204—209. [王志超, 孟青, 于玲红, 等. 内蒙古河套灌区农田土壤中微塑料的赋存特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36 (3): 204—209.]
- [9] 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.
- [10] Watteau F, Dignac M F, Bouchard A, et al. Microplastic detection in soil amended with municipal solid waste composts as revealed by transmission electronic microscopy and pyrolysis/GC/MS[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2018, 2: 81. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00081>.
- [11] Danopoulos E, Jenner L C, Twiddy M, et al. Microplastic contamination of seafood intended for human consumption: A systematic review and meta-analysis[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2020, 128 (12): 126002.
- [12] de Souza Machado A A, Kloas W, Zarfl C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24 (4): 1405—1416.
- [13] 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.
- [14] Wan Y, Wu C X, Xue Q, et al. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 576—582.
- [15] Qi Y L, Ossowicki A, Yang X M, et al. Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 387: 121711.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] de Souza Machado A A, Lau C W, Till J, et al. Impacts of microplastics on the soil biophysical environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52 (17): 9656—9665.
- [20] Qi Y L, Yang X M, Pelaez A M, et al. Macro- and microplastics 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.
- [21] Rillig M C, Lehmann A, de Souza Machado A A, et al. Microplastic effects on plants[J]. *New Phytologist*, 2019, 223 (3): 1066—1070.
- [22] Fendall L S, Sewell M A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58 (8): 1225—1228.
- [23] Frias J P G L, Sobral P, Ferreira A M. Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese Coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60 (11): 1988—1992.

- [24] Holmes L A, Turner A, Thompson R C. Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 160: 42—48.
- [25] Brennecke D, Duarte B, Paiva F, et al. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 178: 189—195.
- [26] Teuten E L, Rowland S J, Galloway T S, et al. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41 (22): 7759—7764.
- [27] Bandow N, Will V, Wachtendorf V, et al. Contaminant release from aged microplastic[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 14 (6): 394—405.
- [28] Kwon J H, Chang S, Hong S H, et al. Microplastics as a vector of hydrophobic contaminants: Importance of hydrophobic additives[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, 13 (3): 494—499.
- [29] Hahladakis J N, Velis C A, Weber R, et al. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 179—199.
- [30] Hüffer T, Hofmann T. Sorption of non-polar organic compounds by micro-sized plastic particles in aqueous solution[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 194—201.
- [31] Seidensticker S, Grathwohl P, Lamprecht J, et al. A combined experimental and modeling study to evaluate pH-dependent sorption of polar and non-polar compounds to polyethylene and polystyrene microplastics[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2018, 30 (1): 30.
- [32] Song D D. Biosurfactant compounding behavior and application in remediation of hydrophobic organic pollution[D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2013. [宋丹丹. 生物表面活性剂复配行为及在疏水性有机污染修复中的应用[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2013.]
- [33] Xu B L, Liu F, Brookes P C, et al. Microplastics play a minor role in tetracycline sorption in the presence of dissolved organic matter[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 87—94.
- [34] Li J, Zhang K N, Zhang H. Adsorption of antibiotics on microplastics[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 237: 460—467.
- [35] Ma J, Sheng G D, O'Connor P. Microplastics combined with tetracycline in soils facilitate the formation of antibiotic resistance in the *Enchytraeus crypticus* microbiome[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 264: 114689.
- [36] Zhu Y G, Zhu D, Xu T, et al. Impacts of (micro)plastics on soil ecosystem: Progress and perspective[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38 (1): 1—6. [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.]
- [37] Rillig M C, Bonkowski M. Microplastic and soil protists: A call for research[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 1128—1131.
- [38] Rillig M C, Ryo M, Lehmann A, et al. The role of multiple global change factors in driving soil functions and microbial biodiversity[J]. *Science*, 2019, 366(6467): 886—890.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Ji M R, Ma Y N, Ji R. Plastisphere: the vector effects of microplastics on microbial communities[J]. *Environmental Protection*, 2020, 48 (23): 19—27. [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.]
- [42] Amaral-Zettler L A, Zettler E R, Mincer T J. Ecology of the plastisphere[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2020, 18 (3): 139—151.
- [43] Ivar do Sul J A, Tagg A S, Labrenz M. Exploring the common denominator between microplastics and microbiology: A scientometric approach[J]. *Scientometrics*, 2018, 117 (3): 2145—2157.
- [44] Yi M L, Zhou S H, Zhang L L, et al. The effects of three different microplastics on enzyme activities and microbial communities in soil[J]. *Water Environment Research*, 2021, 93 (1): 24—32.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Gao M L, Xu Y L, Liu Y, et al. Effect of polystyrene on di-butyl phthalate (DBP) bioavailability and DBP-induced phytotoxicity in lettuce[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115870.
- [48] Meng F R, Yang X M, Riksen M, et al. Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) growth to soil contaminated with microplastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142516.

- [49] 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.
- [50] 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. [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.]
- [51] 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.
- [52] Li R J, Li L Z, Zhang Y C, et al. Uptake and accumulation of microplastics in a cereal plant wheat[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65 (20): 2120—2127. [李瑞杰, 李连祯, 张云超, 等. 禾本科作物小麦能吸收和积累聚苯乙烯塑料微粒[J]. *科学通报*, 2020, 65 (20): 2120—2127.]
- [53] 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.
- [54] Li L Z, Luo Y M, Peijnenburg W J G M, et al. Confocal measurement of microplastics uptake by plants[J]. *MethodsX*, 2020, 7: 100750.
- [55] Carbery M, O'Connor W, Palanisami T. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health[J]. *Environment International*, 2018, 115: 400—409.
- [56] Cedervall T, Hansson L A, Lard M, et al. Food chain transport of nanoparticles affects behaviour and fat metabolism in fish[J]. *PLoS One*, 2012, 7 (2): e32254.
- [57] Wright S L, Kelly F J. Plastic and human health: A micro issue?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51 (12): 6634—6647.
- [58] Liu C G, Li J, Zhang Y L, et al. Widespread distribution of PET and PC microplastics in dust in urban China and their estimated human exposure[J]. *Environment International*, 2019, 128: 116—124.
- [59] Browne M A, Dissanayake A, Galloway T S, et al. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (13): 5026—5031.
- [60] Diaz-Basantes M F, Conesa J A, Fullana A. Microplastics in honey, beer, milk and refreshments in Ecuador as emerging contaminants[J]. *Sustainability*, 2020, 12(14): 5514.
- [61] 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): 14071.
- [62] Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta[J]. *Environment International*, 2021, 146: 106274.
- [63] Wu B, Wu X M, Liu S, et al. Size-dependent effects of polystyrene microplastics on cytotoxicity and efflux pump inhibition in human Caco-2 cells[J]. *Chemosphere*, 2019, 221: 333—341.
- [64] Deng Y F, Zhang Y, Lemos B, et al. Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 46687.
- [65] Jin Y X, Lu L, Tu W Q, et al. Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 308—317.
- [66] Deng Y F, Yan Z H, Shen R Q, et al. Enhanced reproductive toxicities induced by phthalates contaminated microplastics in male mice (*Mus musculus*) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 406: 124644.
- [67] Amobonye A, Bhagwat P, Singh S, et al. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 759: 143536.
- [68] Kannan M, Mubarakali D, Thiyonila B, et al. Insect gut as a bioresource for potential enzymes - an unexploited area for industrial biotechnology[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2019, 18: 101010.
- [69] Guo H Q, Luo L P, Yang Y H, et al. Research progress on plastic degradation by worms[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26 (6): 1546—1553. [郭鸿钦, 罗丽萍, 杨宇航, 等. 利用昆虫取食降解塑料研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26 (6): 1546—1553.]
- [70] Yang J, Yang Y, Wu W M, et al. Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic-eating waxworms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (23): 13776—13784.
- [71] Yang L, Liu Y, Gao J, et al. Biodegradation of expanded polystyrene foams in *Zophobas morio*: Effects of gut microbiota[J]. *Environmental Science*, 2020, 41 (12): 5609—5616. [杨莉, 刘颖, 高婕, 等. 大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解[J]. *环境科学*, 2020, 41 (12): 5609—5616.]
- [72] Brandon A M, Gao S H, Tian R M, et al. Biodegradation of polyethylene and plastic mixtures in mealworms (larvae of *Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52 (11): 6526—6533.
- [73] Peng B Y, Su Y M, Chen Z B, et al. Biodegradation of polystyrene by dark (*Tenebrio obscurus*) and yellow (*Tenebrio molitor*) mealworms (coleoptera: Tenebrionidae)

- [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(9): 5256—5265.
- [74] Ren L, Men L N, Zhang Z W, et al. Biodegradation of polyethylene by *Enterobacter* sp. D1 from the guts of wax moth *Galleria mellonella*[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(11): 1941.
- [75] Kong F, Hong K J, Xu H, et al. Evidence of polystyrene biodegradation by gut microbiota of Styrofoam-feeding yellow mealworms(larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus) [J]. *Microbiology China*, 2018, 45(7): 1438—1449. [孔芳, 洪康进, 徐航, 等. 基于嗜食泡沫塑料黄粉虫肠道菌群中聚苯乙烯生物降解的探究[J]. *微生物学通报*, 2018, 45(7): 1438—1449.]
- [76] Huerta Lwanga E, Thapa B, Yang X M, et al. Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: A potential for soil restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 753—757.
- [77] 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.
- [78] Krueger M C, Harms H, Schlosser D. Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(21): 8857—8874.
- [79] Yuan J H, Ma J, Sun Y R, et al. Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 715: 136968.
- [80] Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, et al. A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate)[J]. *Science*, 2016, 351(6278): 1196—1199.
- [81] Qi X, Ren Y W, Wang X Z. New advances in the biodegradation of Poly (lactic) acid[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 117: 215—223.
- [82] Dey A S, Bose H, Mohapatra B, et al. Biodegradation of untreated low-density polyethylene (LDPE) by *Stenotrophomonas* sp. and *Achromobacter* sp., isolated from waste dumpsite and drilling fluid[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 603210.
- [83] Delacuvellerie A, Cyriaque V, Gobert S, et al. The plastisphere in marine ecosystem hosts potential specific microbial degraders including *Alcanivorax borkumensis* as a key player for the low-density polyethylene degradation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 380: 120899.
- [84] Park S Y, Kim C G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site[J]. *Chemosphere*, 2019, 222: 527—533.
- [85] Matjašič T, Simčič T, Medvešek N, et al. Critical evaluation of biodegradation studies on synthetic plastics through a systematic literature review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141959.
- [86] Muhonja C N, Makonde H, Magoma G, et al. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya[J]. *PLoS One*, 2018, 13(7): e0198446.
- [87] Sánchez C. Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: An overview of macro- and microplastics biodegradation[J]. *Biotechnology Advances*, 2020, 40: 107501.
- [88] Roberts C, Edwards S, Vague M, et al. Environmental consortium containing *Pseudomonas* and *Bacillus* species synergistically degrades polyethylene terephthalate plastic[J]. *mSphere*, 2020, 5(6): 01151—20.
- [89] Shahnawaz M, Sangale M K, Ade A B. Bacteria-based polythene degradation products: GC-MS analysis and toxicity testing[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(11): 10733—10741.
- [90] Mukherjee S, RoyChaudhuri U, Kundu P P. Anionic surfactant induced oxidation of low density polyethylene followed by its microbial bio-degradation[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 117: 255—268.
- [91] Novotný Č, Malachová K, Adamus G, et al. Deterioration of irradiation/high-temperature pretreated, linear low-density polyethylene (LLDPE) by *Bacillus amyloliquefaciens*[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, 132: 259—267.
- [92] Umamaheswari S, Subramani M. Gems analysis of *Pseudomonas* sp., mediated degradation of polystyrene[J]. *Annals of Biological Research*, 2017, 8(3): 8—11.
- [93] Mahdi M S, Ameen R S, Ibrahim H K. Study on degradation of Nylon 6 by thermophilic bacteria *Anoxybacillus rupiensis* Ir3 (JQ912241)[J]. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 2016, 3(9): 200—209.
- [94] Sangale M K, Shahnawaz M, Ade A B. Potential of fungi isolated from the dumping sites mangrove rhizosphere soil to degrade polythene[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 5390.
- [95] Sangale M K, Shahnawaz M, Ade A B. Gas chromatography-Mass Spectra analysis and deleterious potential of fungal based polythene-degradation products[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1599.
- [96] Zhang J Q, Gao D L, Li Q H, et al. Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth *Galleria mellonella*[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135931.
- [97] Munir E, Harefa R M, Priyani N, et al. Plastic degrading fungi *Trichoderma viride* and *Aspergillus nomius* isolated from local landfill soil in Medan[J]. *IOP Conference*

- Series: Earth and Environmental Science, 2018, 126: 012145.
- [98] Ojha N, Pradhan N, Singh S, et al. Evaluation of HDPE and LDPE degradation by fungus, implemented by statistical optimization[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 39515.
- [99] El-Morsy E M. Biodegradative activities of fungal isolates from plastic contaminated soils[J]. Mycosphere, 2017, 8 (8): 1071—1087.
- [100] Khan S, Nadir S, Shah Z U, et al. Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis*[J]. Environmental Pollution, 2017, 225: 469—480.
- [101] Osman M, Satti S M, Luqman A, et al. Degradation of polyester polyurethane by *Aspergillus* sp. strain S45 isolated from soil[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2018, 26 (1): 301—310.
- [102] Chaudhary A K, Vijayakumar R P. Studies on biological degradation of polystyrene by pure fungal cultures[J]. Environment, Development and Sustainability, 2020, 22 (5): 4495—4508.
- [103] Vivi V K, Martins-Franchetti S M, Attili-Angelis D. Biodegradation of PCL and PVC: *Chaetomium globosum* (ATCC 16021) activity[J]. Folia Microbiologica, 2019, 64 (1): 1—7.
- [104] Álvarez-Barragán J, Domínguez-Malfavón L, Vargas-Suárez M, et al. Biodegradative activities of selected environmental fungi on a polyester polyurethane varnish and polyether polyurethane foams[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, 82 (17): 5225—5235.
- [105] Kawai F, Kawabata T, Oda M. Current knowledge on enzymatic PET degradation and its possible application to waste stream management and other fields[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103 (11): 4253—4268.
- [106] Ahmed T, Shahid M, Azeem F, et al. Biodegradation of plastics: Current scenario and future prospects for environmental safety[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25 (8): 7287—7298.
- [107] Ganesh KA, Anjana K, Hinduja M, et al. Review on plastic wastes in marine environment - biodegradation and biotechnological solutions[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 150: 110733.
- [108] Zhou Q, Zhang H B, Li Y, et al. Progress on microplastics pollution and its ecological effects in the coastal environment[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60 (33): 3210—3220. [周倩, 章海波, 李远, 等. 海岸环境中微塑料污染及其生态效应研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60 (33): 3210—3220.]
- [109] Feng X Y, Sun Y H, Zhang S W, et al. Ecological effects of microplastics on soil-plant systems[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (2): 299—313. [冯雪莹, 孙玉焕, 张书武, 等. 微塑料对土壤-植物系统的生态效应[J]. 土壤学报, 2021, 58 (2): 299—313.]
- [110] 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. [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.]

(责任编辑: 卢 萍)