

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020083102

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 Baowei, ZHANG Jian, et al. Research progress on pollution status and ecological risk of microplastics in soil [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(4): 1100-1111.

土壤中微塑料污染现状及其生态风险研究进展*

郝爱红 赵保卫** 张 建 马锋锋 段凯祥 刘 辉 张 鑫 冉富霖

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州, 730070)

摘 要 微塑料是一种粒径小于 5 mm 的塑料颗粒污染物, 对土壤生态系统构成严重威胁. 近年来, 微塑料的污染问题已愈加受到国内外学者的广泛关注. 当前对微塑料的研究多集中于水环境中, 而对土壤环境中的研究较少. 本文对土壤中微塑料的来源、分类、分布、迁移、污染情况及生态风险等方面的研究进展进行了评述. 微塑料主要来源于地膜覆盖、灌溉、堆肥、有机肥料施用及大气沉降等, 其分布以农田为主, 在农田土壤中存在不同丰度; 表层土壤的微塑料可通过淋溶、生物扰动和农业活动等迁移到深层土壤中; 微塑料本身含有有害物质, 且它可以吸附重金属、有机污染物和抗生素等产生复合污染; 微塑料给土壤生态系统带来毒性影响, 本文重点分析了微塑料污染对土壤生态系统的生态风险, 包括对土壤理化性质、土壤动物、植物和微生物的影响; 最后, 在总结国内外最新研究进展的基础上, 对今后土壤微塑料的研究重点进行了展望.

关键词 土壤, 微塑料, 污染, 来源, 分布, 迁移, 生态风险.

Research progress on pollution status and ecological risk of microplastics in soil

HAO Aihong ZHAO Baowei** ZHANG Jian MA Fengfeng DUAN Kaixiang
LIU Hui ZHANG Xin RAN Fulin

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, 730070, China)

Abstract: Microplastics are a kind of plastic particle pollutants with size less than 5 mm, which pose a serious threat to soil ecosystem. In recent years, the pollution problem of microplastics has been paid more and more attention by scholars at home and abroad. At present, the research on microplastics is mostly focused on aqueous environment, but less on soil environment. In this paper, the source, classification, distribution, migration, pollution and ecological risk of microplastics in soil were reviewed. Microplastics mainly come from plastic film mulching, irrigation, composting, organic fertilizer application and atmospheric deposition, which are mainly distributed in farmland, and have different abundances in farmland soil; microplastics in surface soil can migrate to deep soil through leaching, biological disturbance and agricultural activities; microplastics themselves contain harmful substances, and they can adsorb heavy metals, organic pollutants and antibiotics to produce compound pollution. Microplastics have toxic effects on soil ecosystem. This paper focuses on the ecological risks of microplastics pollution on soil ecosystem, including the impact on soil physical and chemical properties, soil animals, plants and microorganisms. Finally, on the basis of summarizing the latest research progress at home and abroad, the future research focus of soil

2020 年 8 月 31 日收稿 (Received: August 31, 2020).

* 国家自然科学基金 (51766008) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51766008).

** 通讯联系人 Corresponding author, Tel: 13993163262, E-mail: zhbw2001@sina.com

microplastics was prospected.

Keywords: soil, microplastics, pollution, source, distribution, migration, ecological risk.

塑料是一种化学稳定性高、可塑性强的有机合成高分子材料,其耐用性、低成本、优异的防潮性能和重量轻等优势使其用途极为广泛,主要应用于包装、医药、纺织及农业生产等行业^[1-3].塑料是从石油产品中制得的,它是由多种合成或半合成有机物组成的聚合物材料,最常见的有:聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)、聚丙烯(PP)、聚酰胺(PA)和聚酯类(PET)^[4-5].据统计,40年以来全球塑料生产和使用总量增加了约25倍,但回收比例却不足5%^[2,6].我国是世界上最大的塑料生产国,据环境保护部统计,2011年我国废弃塑料总量为 2×10^8 t,仅回收了 1.5×10^7 t,回收比例不到10%^[4].因此,有高达90%的塑料垃圾最终被填埋,或由于管理和回收不善而释放到环境中,造成了严重的污染问题,危害生态环境^[6-9].

进入环境中的塑料垃圾会受到紫外线照射和机械磨损等作用而逐渐破碎,将大塑料转化为无数更小的塑料颗粒^[7].2004年, Richard等在海洋水体和沉积物中发现了塑料碎片,首次提出了“微塑料”的概念^[10].与较大的塑料碎片相比,微塑料由于具有更大的比表面积、高丰度、微小的粒径、在环境中可长距离运输,所导致的危害更大^[1,3,7,11].微塑料具有不同的形貌特征,其尺寸较小,疏水性强,具有稳定的化学性质,可在环境中存在数百年^[4,12-14].微塑料的主要来源有两种,一是直接释放到环境中的塑料颗粒如洗涤剂和化妆品中添加的磨料,二是间接来自于大块塑料垃圾的破碎和降解^[3,15].自德国科学家 Rillig 最早发现土壤中微塑料污染问题以来,土壤中的微塑料越来越受到关注^[16-21].作为海洋微塑料的主要来源,土壤微塑料污染问题已被列为环境与生态领域的第二大科学问题^[16].海洋中80%的塑料垃圾来自陆地,陆地中存在的微塑料丰度是海洋的4—23倍^[3,16].

与陆地生态系统相关的微塑料研究近两年增长较快,但仍落后于水环境中的研究. Horton等^[16]总结了土壤中微塑料的来源和危害,他们指出微塑料可能通过食物被人类吸收.微塑料本身含有多种添加剂,如邻苯二甲酸酯(PAEs)等增塑剂是农业中常用塑料薄膜的主要添加剂,且微塑料会吸附有机污染物、重金属和抗生素等产生复合污染,复合污染物会随微塑料迁移或沿食物链传递对土壤生物和人类健康构成潜在风险^[22-24].进入到土壤环境中的微塑料会对土壤功能、土壤理化性质及生物多样性产生影响^[18].有研究探讨PS在生菜体内的吸收、运移和分布情况,结果发现生菜不仅可以吸收微塑料,且可以将其运输到茎叶之中^[25].一项研究使蚯蚓暴露于浓度为0.2%—1.2%的PE微塑料中,结果发现其生长受到抑制,随后死亡^[17].目前,对微塑料潜在机制的影响存在不确定性,但现有研究表明,土壤中存在的微塑料会给土壤动物成长、植物性能和微生物活动等带来生态风险^[21].然而,微塑料对土壤生态系统影响的研究还很有限,需要不断总结最新研究进展,了解目前的研究现状,以指导今后对这一问题的研究.

本文总结了国内外有关土壤微塑料污染的最新研究进展,概括了土壤中微塑料的来源、分类和分布情况,对土壤中微塑料的迁移与污染情况进行了总结,重点分析了微塑料对土壤生态系统的生态风险.最后,针对当前研究存在的不足,对今后土壤微塑料的研究重点进行了展望.以期为土壤微塑料污染的生态风险研究提供有价值的参考.

1 土壤中微塑料的来源和分类(Source and classification of microplastics in soil)

1.1 土壤中微塑料的来源

1.1.1 农业地膜的广泛使用

塑料地膜的主要成分为PVC和PE,地膜覆盖是促进农业生产的一项重要技术,它可以使作物产量提高20%—50%^[26].据调查,我国是世界上最大的农用地膜使用国,1991年至2017年,各类农作物地膜覆盖量从 3×10^5 t增加到 14.7×10^5 t,增幅达66%.长期使用塑料地膜会导致严重的土壤环境污染.由于塑料地膜薄(厚度约8—50 mm),当农作物生长结束后,从土壤中提取困难^[12].另外,农民缺乏废弃塑料薄膜的回收意识,导致农田中大量塑料残膜的积累.残留在农田中的塑料薄膜在紫外线照射和耕作机械磨损等作用下逐渐破碎,从塑料地膜转化为微塑料地膜.微塑料残膜的积累会对农作物生长产生负面影响,如:破坏土壤结构、阻碍根系发育、减少微生物的养分可用性等^[26-28].据调查,黄土高原、西北内陆土

壤中的塑料残膜量达 71.9—259.1 kg·ha⁻¹[29]. 残膜量在 0—240 kg·ha⁻¹之间对农作物产量无显著影响, 但产量随残膜用量和积累时间的增加而逐渐降低, 残膜量为 240 kg·ha⁻¹时, 作物产量显著下降[29].

1.1.2 农业灌溉用水

在许多发展中国家, 灌溉用水的主要来源是净化后的污水、地表水和地下水, 部分水资源匮乏的国家使用未经净化的污水直接灌溉农田[4,30]. 据统计, 全球目前已有 2×10⁷ ha 的农田使用未经处理或部分处理的污水进行灌溉[31]. 污水中含有大量的微塑料, 由于微塑料粒径小, 经污水处理厂处理后也不能完全拦截去除[32], 出水水样中仍含有 1000 个·m⁻³ 的微塑料[33]. 因此, 净化后的污水灌溉农田会导致微塑料进入土壤, 造成土壤中微塑料的积累. 灌溉用水的地表水主要来自河流和湖泊. 汉江武汉段微塑料丰度约为 2933 个·m⁻³, 青藏高原的河流表层水中检测到微塑料丰度约为 725 个·m⁻³[34-35]; 长江中下游的巢湖、鄱阳湖等湖泊表层水中微塑料丰度约为 1300 个·m⁻³[36]; Mintenig 等[33] 研究表明地下水中微塑料浓度可达 0—7 个·m⁻³. 研究已证明, 农业灌溉用水是土壤中微塑料污染的来源之一.

1.1.3 污泥堆肥

污水处理厂的污水主要来源于工业废水、生活污水和雨水. 洗涤剂和日常洗护用品是生活污水中微塑料的主要来源, 各种品牌的牙膏、洗面奶和肥皂中都含有微塑料, 来自洗衣机的废水含有纺织纤维材料. Horton 等[16] 调查到英国雨水中携带大量合成纤维, 是污水中微塑料的主要来源之一[37-38]. 研究者们发现, 污水处理厂可有效去除废水中近 99% 的微塑料, 但去除的微塑料并没有得到真正的降解, 而是积累在污泥中[39-41]. 污泥中含有 N、P、K 等营养元素, 能够增加土壤肥力, 有利于农作物的生长, 因此可作为肥料通过堆肥工艺应用于农田中[4]. Mahon 等[42] 检测到爱尔兰污水处理厂污泥中的微塑料平均丰度为 9.8×10⁶ 个·t⁻¹. Gatidou 等[43] 综合多项研究结果推算出污泥中微塑料的平均丰度约为 1.7×10⁸ 个·t⁻¹. 据报道, 约 50% 的污泥应用于农田中[44]. Li 等[40] 调查了我国污泥中微塑料的平均含量约为 2.9×10⁷ 个·t⁻¹. 目前, 常规的污泥预处理方法很难有效去除微塑料[42]. 因此, 将污泥作为肥料会导致土壤中微塑料的积累, 污泥堆肥是土壤中微塑料的一种来源.

1.1.4 有机肥料

有机废弃物如人和家畜的粪便、农作物秸秆、动植物残体等, 经过堆肥、发酵后可作为肥料施用到农田中[45]. 有研究发现在畜禽粪便中存在微塑料, 其浓度在 2.4—180 mg·kg⁻¹ 之间[46]. 堆肥在全世界被广泛应用, Franck 等[47] 调查到欧盟 2008 年生产了约 1.8×10⁷ t 堆肥产品. 我国是有机肥生产和使用大国, 仅商品有机肥年生产量和年施用量就均在 2×10⁷ t 以上[14]. 但目前关于有机肥中微塑料的研究报道较少. Weithmann 等[48] 研究发现有机肥中微塑料粒径大于 1 mm 的约有 14—895 个·kg⁻¹. 因此, 施用有机肥会导致微塑料在农田中积累, 成为土壤中微塑料污染的来源之一.

1.1.5 大气沉降

据研究, 大气沉降也是微塑料进入土壤的方式之一[16]. 周倩等[49] 首次报道了我国滨海城市大气中微塑料沉降通量约为 1.5×10⁵ 个·(m² a)⁻¹, 其中纤维类最高, 约 1.38×10⁵ 个·(m² a)⁻¹. Dris 等[50-51] 检测了巴黎附近的大气环境, 发现大气中每天沉降的微塑料含量约为 29—280 个·m⁻², 类型多为纤维状, 其中粒径大于 1000 μm 的占 50%. 有研究在巴黎、东莞、上海等城市的大气沉降物中都检测到了微塑料, 以纤维状为主[52-53]. 但关于大气沉降中微塑料的研究较少, 为了更好地研究土壤中的微塑料, 对大气沉降物中微塑料的时空分布、大气迁移特征及影响因素还需更加深入的研究.

1.2 土壤中微塑料的分类

微塑料按其原加工粒度大小可分为初级微塑料和次级微塑料[12]. 初级微塑料指在生产过程中被制成微米级的塑料微球和纳米塑料, 作为原料用于工业洗涤剂和化妆品的生产[15,54]. 次级微塑料是由大型塑料制品如生活垃圾、塑料薄膜等通过紫外线照射、物理磨损和生物降解等作用而产生的塑料碎片[3,7,10,15]. 根据微塑料的形状, 可将其分为纤维、微珠、薄膜、花状物、球形、颗粒、泡沫和碎片等[55]. 根据粒径大小, 微塑料可分为宏观塑料(>25 mm)、中等塑料(5—25 mm)、微塑料(0.1—5 mm)和纳米塑料(<100 nm)[1,7,9]; 对微塑料粒径进行分类很重要, 粒径会影响微塑料在土壤中的迁移潜力; 粒径>150 mm 的微塑料不太可能被大多数植物和土壤生物(中生动物除外)所吸收, 且不会对人类健康构成风险[56].

2 微塑料在土壤中的分布和迁移 (Distribution and migration of microplastics in soil)

2.1 土壤中微塑料的分布情况

目前,只有少数研究报告了土壤中微塑料的丰度和分布情况(表 1).由表 1 可知,土壤中存在高丰度的微塑料,世界上不同国家、不同地区的土壤都受到了不同程度的微塑料污染.目前,描述微塑料丰度的单位,各个研究之间不统一,在计数时存在微塑料数量与质量的区别,导致不同研究结果之间难以比较.从表 1 可知,土壤中存在的大多数为粒径<5 mm 微塑料,微塑料主要成分以 PP 和 PE 为主.比较表格中使用相同测量单位的研究,可看出不同研究地区之间微塑料丰度存在较大差异.在澳大利亚悉尼某地中^[57],微塑料的丰度范围为 300—67500 mg·kg⁻¹;瑞士漫滩土壤样本中发现了浓度可达约55.5 mg·kg⁻¹的微塑料^[19].两研究之间丰度相差较大是由于两研究所选择的采样点不同,悉尼采样点是工业区附近,微塑料污染更为严重;瑞士采样点是漫滩,微塑料污染相对较轻.在我国调查的几个地区中,云南省农田土壤中微塑料丰度显著高于其他地区^[64],这可能与云南使用污泥堆肥和废水灌溉农田有关,另外云南是我国旅游资源丰富的省份,也会增加微塑料污染土壤的风险.农用地膜污染也是导致土壤中微塑料丰度较高的原因之一,陕西土壤中微塑料含量普遍低于农用地膜污染菜地中的微塑料含量^[67],土壤中微塑料浓度为 1430—3410 个·kg⁻¹,农用地膜污染菜地中微塑料浓度为 6×10⁵个·kg⁻¹;武汉郊区地膜污染菜地中^[68]微塑料丰度为 320—12560 个·kg⁻¹.

表 1 世界部分地区土壤微塑料分布情况

Table 1 Distribution of soil microplastics in some parts of the world				
国家地区 Countries and regions	尺寸范围 Size range	组成 Form	丰度 Abundance	参考文献 Reference
瑞士	<2 mm	PE、PS、PVC	55.5 mg·kg ⁻¹	[19]
中国新疆	0.9—2.0 mm	PE	91.2—308.5 mg·kg ⁻¹	[66]
澳大利亚悉尼	<1 mm	PVC、PE、PS	300—67500 mg·kg ⁻¹	[57]
中国广东	<1 mm	PS、PP、PVC	0—34100 N·kg ⁻¹	[69]
中国山东	<5 mm	PE、PP、PS	1.3—14.7 个·kg ⁻¹	[59]
中国黄土高原	>100 μm	PE、PP	40—100 个·kg ⁻¹	[62]
			120—320 个·kg ⁻¹	
			80—100 个·kg ⁻¹	
中国上海	<5 mm	PE、PP、PVC	(78.0±12.9) 个·kg ⁻¹	[60]
			(10.3±2.2) 个·kg ⁻¹	[61]
中国河北	(1.6±0.6) mm	PE、PP、PVC	634 个·kg ⁻¹	[63]
西班牙	<5 mm	PE	2000 个·kg ⁻¹	[65]
墨西哥	5—150 mm	PE、PS	2770 个·kg ⁻¹	[58]
中国陕西	0—0.49 mm	PE、PP、PVC、PS、 HDPE、PET	1430—3410 个·kg ⁻¹	[67]
中国武汉	<0.2 mm	PP、PA	320—12560 个·kg ⁻¹	[68]
智利梅利皮拉	<1 mm	PE、PP	18000—41000 个·kg ⁻¹	[39]
中国云南	0.05—10 mm	PE、PP	7100—42960 个·kg ⁻¹	[64]
			8180—18100 个·kg ⁻¹	
			27310 个·kg ⁻¹	
			53090 个·kg ⁻¹	

另外,农用地膜污染的土壤中微塑料丰度也会因地膜覆盖年限的增加而增加,如表 1 中新疆的地膜覆盖期从 5 年增加到 30 年时,土壤中微塑料含量也从 91.2 mg·kg⁻¹增加到 308.5 mg·kg⁻¹.目前,还没有标准统一的土壤中微塑料分离提取方法,各种分析方法引起的差异也是不可忽视的.

从表 1 中的研究可以看出,微塑料在空间分布上呈现不均匀的现象,这可能与国家或地区的发展程度、人口密度和自然地理特点等相关,具体影响微塑料分布与丰度的因素仍需进一步研究.目前,我国土

壤生态系统中微塑料分布情况的研究仍处于起步阶段,亟需建立规范化的土壤中微塑料分析方法,使微塑料丰度单位保持统一,更有利于不同研究结果之间的比较。

2.2 微塑料在土壤中的迁移

微塑料在土壤中的迁移行为很复杂,据研究,地表土壤上的微塑料会随地表径流和风力的作用而在不同环境介质之间发生水平迁移,如从陆地迁移至水体中^[20]。陆地上的部分微塑料会在生物活动和重力的作用下进入到深层土壤中,发生土壤中的垂直迁移^[70]。目前已有研究证实了土壤中微塑料可通过食物链进行迁移^[4]。有研究发现,蚯蚓会选择性地摄取低密度聚乙烯(LDPE)并在体内积聚,且培养 60 d 后发现 28% 的微塑料组蚯蚓的死亡率高于 7% 组和对照组(0%),蚯蚓被土壤中的生物摄食后,微塑料会通过食物链进一步迁移到其他生物体中^[17]。李连祯等^[25]研究 PS 在生菜体内的吸收和运移情况,结果发现生菜不仅可以吸收微塑料,且可将微塑料运输到茎叶之中,而生菜的茎叶可被人们食用,因此微塑料很有可能通过食物链进入到人体。

2.2.1 迁移途径

土壤是一种多孔介质,在毫米范围内具有中孔隙和大孔隙^[46]。土壤孔隙的几何形态大小是影响土壤中溶质运移和水分运动的关键因素之一^[71]。土壤中孔隙和大孔隙的存在使溶解性化学物质和小颗粒在土壤中迁移成为可能。Grayling 等^[72]的研究表明,粒径范围为 0.1—6 mm 的颗粒可通过淋溶作用沿土壤孔隙迁移,在土柱中发生垂直移动;农业耕作和生物扰动等外力作用会导致土壤中较大粒径的微塑料迁移。Rillig 等^[73]研究发现微塑料可以粘附在蚯蚓(*Oligochaeta Lumbricidae*)上,蚯蚓促进了微塑料在土壤中的垂直迁移,且微塑料粒径越小,越易于迁移。Maaß 等^[74]研究两种弹尾虫(*Folsomia candida* 和 *Proisotoma minuta*)对不同粒径微塑料的迁移情况,结果表明,两种弹尾虫都可以移动和分布微塑料,且不同物种之间微塑料的迁移距离存在显著差异。植物根系的生物扰动如根系移动、根系膨胀、根系吸水也会影响微塑料的运移^[75]。当根生长时,在土壤中会留下与根差不多大小的孔隙,有助于微塑料在土壤中的迁移,这只是一个推论,未来的研究应该揭示植物根系对微塑料迁移的影响^[1]。

2.2.2 影响迁移的因素

影响土壤中微塑料迁移的因素有:土壤孔隙和理化性质、微塑料本身特性(如形状、尺寸和密度)、土壤生物、外部气候(风、雨)、其他外力(机械扰动)等。微塑料向下迁移要求其尺寸小于土壤孔隙的直径,否则微塑料将被土壤捕获。在孔隙度较高的土壤中,更易发生微塑料的迁移。土壤质地直接影响微塑料的运输,土壤质地通过影响土壤孔隙的分布、沉积、过滤和吸附等,使微塑料在土壤中迁移变得复杂^[76]。有研究表明微塑料的尺寸和疏水性会影响其在土壤中的迁移^[77]。Rillig 等^[73]指出,粒径较小的微塑料向下移动的幅度最大,可以到达深层土壤。目前,相关研究中最常用的微塑料的形状为球体和颗粒^[58,73],这两种形状的微塑料易迁移到深层土壤中。微塑料进入土壤后,会经历分离、附着、沉积或并入土壤团聚体等过程,这些过程会限制微塑料的移动^[64]。O'Connor 等^[77]表明低密度的微塑料很难向下迁移。目前还没有研究能解释形状对微塑料在土壤中迁移的影响,微塑料表面结构和类型对其在土壤中迁移的影响需进一步研究。

3 土壤中微塑料的污染(Pollution of microplastics in soil)

3.1 自身存在的污染

塑料本身含有有害物质如邻苯二甲酸酯(PAEs)、双酚-A、多溴二苯醚(PBDEs)及用于着色的重金属等^[78-79]。这些有害物质在紫外线辐射、土壤温度变化和土壤酸碱性等的影响下,可通过淋溶作用进入土壤,对土壤微生物活性产生抑制作用,也可通过植物吸收进入食物链从而威胁人类健康^[80]。PAEs 目前已广泛应用于个人护理品、食品包装及医疗产品的生产^[81],农业地膜的使用及家禽粪便是土壤 PAEs 的主要来源^[24]。有研究对天津城郊农田、果园、菜地和废弃土壤中 PAEs 进行了分析,发现总 PAEs 约为 5.22 μg·g⁻¹,4 种土壤中 PAEs 浓度依次为菜地>废弃土壤>农田>果园^[82]。目前,缺少对其余有害物质如 PBDEs 和用于着色重金属的影响研究,未来研究应包含其余有害物质,以便更加全面地了解微塑料自身存在的污染情况。

3.2 复合污染

微塑料由于比表面积大、疏水性强和粒径小等特点,可作为环境污染物的载体^[83]。目前已在微塑料

表面检测到了持久性有机污染物、重金属和抗生素等.微塑料会负载这些物质产生复合污染,间接对土壤生物产生毒害作用.

3.2.1 微塑料对持久性有机污染物的吸附作用

微塑料具有很强的疏水性,是有机物理想的载体,可吸附负载土壤中的疏水性有机物如多氯联苯(PCBs)、多环芳烃(PAHs)、有机氯杀虫剂、PBDEs 和除草剂等.土壤中有有机污染物不是单一存在的,多数化合物间存在拮抗或协同作用.当它们被微塑料吸附时,会出现不同的吸附顺序,可能会发生竞争性吸附^[84].Huffer 等^[85]研究了这种竞争,因微塑料具有疏水性,所以微塑料对疏水性有机物具有较强的吸附能力,增加了疏水性有机污染物在土壤中的流动性.另一研究发现土壤微塑料吸附的有机污染物浓度远高于土壤中所含的有机污染物^[86].吸附作用包括物理吸附和化学吸附,微塑料的比表面积和范德华力是影响物理吸附的主要因素,持久性有机污染物对微塑料的亲合力是影响其化学吸附的关键因素^[54].影响微塑料吸附的环境因素有温度、pH 值和含水率等^[22],环境因素对微塑料吸附有机污染物的影响不容忽视.

3.2.2 微塑料对重金属的吸附作用

微塑料在自然环境中破碎、风化、分解的过程会使其表面带有电荷,可吸附金属离子而达到电荷平衡,微塑料对金属阳离子具有吸附作用,吸附动力学符合非线性吸附方程,且微塑料作为载体增加了陆地环境中重金属吸附的潜力^[87].不同类型微塑料的化学和物理特性存在差异,使其对土壤中重金属的吸附速率不同^[86].Massos 等^[88]研究发现微塑料对土壤中镉(Cd)和铅(Pb)的吸附率分别为 6.9% 和 7.5%.微塑料在紫外线照射过程中降解,使其对重金属的吸附能力发生变化.有研究发现紫外线照射微塑料 2000 h 后,增加了微塑料对铜和锌的吸附量,说明老化的微塑料可能会吸收更高浓度的重金属,给土壤生态系统带来威胁^[89].此外,土壤 pH 值和微塑料在环境中的停留时间也是影响微塑料对金属离子吸附能力的重要因素.但其他因素对微塑料吸附重金属的影响研究较少,对微塑料吸附重金属的机制值得进一步研究.

3.2.3 微塑料对抗生素的吸附作用

抗生素广泛应用于畜牧业中,可作为生长促进剂添加到牲畜的饲料中.过量的抗生素会随动物粪便一起排泄到土壤中^[90],农民使用牲畜粪便作为有机肥料可促进水果和蔬菜的生长.Sun 等^[91]提出有机肥料施用到盖有塑料温室的土壤中,可能会导致抗生素和微塑料的复合污染.Li 等^[92]研究了抗生素在不同微塑料上的吸附情况,结果发现 PA 对抗生素的吸附能力最强.微塑料对抗生素吸附水平的影响因素有:微塑料的橡胶状态^[78]、极性相互作用^[93]和结晶度等^[94].Shen 等^[95]研究了温度、pH 值和离子强度等对微塑料吸附四环素能力的影响,结果表明影响不显著.土壤中微塑料与抗生素同时存在可能会导致两者的复合效应,即相互影响它们在自然条件下的降解,给土壤生态系统带来更大的危害.有报道称,微塑料的存在会抑制抗生素在自然条件下的降解.目前有关这方面的研究很少,不应忽视微塑料与抗生素之间的相互作用,潜在的生态风险也应该引起关注.

4 微塑料对土壤生态系统的生态风险(Ecological risk of microplastics to soil ecosystem)

4.1 对土壤结构和理化性质的影响

农业残留地膜会破坏土壤团聚体的结构,降低土壤通气性和透水性,从而影响了根系生长和植物的生产能力^[96].Machado 等^[21,97]研究了 4 种常见微塑料对土壤结构的影响,结果发现聚酯降低了土壤水稳性团聚体,而 PE 提高了土壤水稳性团聚体的量.若土壤水稳性团聚体减少会降低土壤微环境的多样性,是土壤结构贫化的一种表现.

微塑料吸附其他污染物产生的复合污染会改变土壤的理化性质,危害土壤生态系统健康.Liu 等^[98]研究微塑料对土壤有机氮(DON)、可溶性有机碳(DOC)、有机磷(DOP)和 FDA 水解酶活性的影响,结果表明高浓度微塑料显著影响 DOP、DON、DOC 的浓度.微塑料的密度小于土壤矿物,可能是微塑料污染导致土壤体积密度变化的原因^[21].微塑料一旦融入土壤基质中,就会改变土壤的孔隙度,影响土壤水分动态和土壤团聚体.有研究表明,在黏性土壤中添加聚酯超细纤维后,水稳性大团聚体和大孔隙体积显著增加^[99].微塑料对土壤有机碳、氮循环、土壤微生物活性和养分转移具有负面影响^[18,73].土壤微生物

生物量中碳、氮含量随农业残膜量的增加而显著降低,微塑料存在也可能破坏土壤结构的完整性,导致土壤表面干燥开裂^[100-101].目前,微塑料污染对土壤理化性质的潜在影响研究仍处于起步阶段,微塑料与土壤团聚体之间相互作用的研究很有限,还需要进一步的深入研究.

4.2 对土壤动物的影响

微塑料对土壤动物生态风险的研究有限,大多数是在实验室中进行的(表4).目前研究的土壤动物主要有:蚯蚓、弹尾虫、线虫、蜗牛、等足动物和老鼠,其中蚯蚓是主要的试验物种.微塑料暴露对蚯蚓的生态风险有肠道损伤、免疫反应、生长抑制、体重下降、繁殖及肠道微生物群落的变化,甚至死亡^[17,102].有研究使蚯蚓暴露于0.25%—0.5%的PS微塑料中,结果对蚯蚓(*E.Foetida*)的适应性没有明显影响,在较高的暴露浓度(>1%)时才出现生长抑制^[103].许多动物无法消化微塑料碎片,从而阻止食物通过肠道^[58].土壤微塑料会导致弹尾虫(*Lobella sokamensis*)运动减少^[104],弹尾虫(*Collembolan Folsomia candida*)对微塑料表现出明显的回避行为^[105].微塑料会使土壤线虫(*C. elegans*)^[106]、蜗牛(*Achatina fulica*)^[107]、老鼠(ICR)^[108]的代谢紊乱,影响它们的健康成长.微塑料对土壤等足动物(*P. scaber*)的摄食和能量储备无显著影响^[109].对小鼠(ICR)的研究表明微塑料可能会给陆地哺乳动物带来健康风险^[108].最近的两项研究发现,微塑料可减少蚯蚓肠道和身体组织中As(V)、PAHs和PCBs的积累,这是一个重要的发现,表明了微塑料可增加有毒污染物的生物利用度^[110-111].为了评估微塑料污染对土壤生态系统的整体影响,建议进一步开展研究工作,使更多种类的土壤动物参与进来.

表 2 微塑料对土壤生物群的生态风险影响研究
Table 2 Ecological risk impact of microplastics on soil biota

物种 Species	微塑料 Microplastic			生物效应 Biological effect	参考文献 Reference
	类型 Type	尺寸 Size	浓度 Concentration		
蚯蚓(<i>Oligochaeta Lumbricidae</i>)	PE	<150 μm	0.2%—1.2% (干土中)	死亡率增加;增长率下降	[17]
蚯蚓(<i>Eisenia fetida</i>)	LDPE,PS	<300 μm	1%—20% (干土中)	过氧化氢酶和过氧化物酶活性增加;脂质过氧化水平升高;超氧化物歧化酶和谷胱甘肽S-转移酶活性降低	[110]
蚯蚓(<i>M. californica</i>)	PVC	—	2 g·kg ⁻¹ (干土中)	总砷积累减少,砷向亚砷酸盐转化	[111]
蚯蚓(<i>Enchytraeus crypticus</i>)	PS	0.05—0.1 μm	0.025%—10% (进料中)	体重下降;肠道微生物群的变化	[102]
土弹尾(<i>Lobella sokamensis</i>)	PE,PS	0.47—1155 μm	4—1000 mg·kg ⁻¹ (干土中)	运动减少	[104]
土壤线虫(<i>C. elegans</i>)	PS	0.05—0.2 μm	1 μg·L ⁻¹ —86.8 mg·L ⁻¹	能量代谢紊乱;氧化损伤;减少运动和生殖	[106]
陆生蜗牛(<i>Achatina fulica</i>)	PET	1257.8 μm	0.01—0.71 g·kg ⁻¹ (干土中)	食物摄入和排泄减少;肠壁绒毛损伤;肝组织谷胱甘肽过氧化物酶和总抗氧化能力的降低;肝脏丙二醛水平升高	[107]
陆生等足动物(<i>P. scaber</i>)	PE	60—800 μm	4 mg·g ⁻¹ (食物)	对摄食行为和能量储备无显著影响	[109]
土壤弹尾虫(<i>Collembolan Folsomia candida</i>)	PVC	80—250 μm	5000 粒子/盘	对微塑料表现回避行为	[105]
老鼠(ICR)	PS	5 μm	100—1000 μg·L ⁻¹ (水中)	肠粘液分泌减少,肠屏障受损;肠道微生物群失调;代谢紊乱	[108]
小麦(<i>Triticum aestivum</i>)	LDPE	<1 mm	1% (干土中)	地上部和根系生物量减少;对小麦营养生长和生殖生长的不利影响	[115]
葱(<i>Allium fistulosum</i>)	PA,HDPE,PP,PS	15—5000 μm	0.2%—2.0% (新鲜土壤中)	根、叶性状和生物量的变化	[97]
土壤酶	PP	<180 μm	7%—28% (干土中)	增加 FDA 水解酶活性	[98]
土壤酶	PA,HDPE,PP,PET	15—5000 μm	0.2%—2.0% (新鲜土壤中)	通过添加 PA 和 HDPE 提高 FDA 水解酶活性;	[97]

注:%指微塑料浓度占土壤干重的百分比.
Note: % refers to the percentage of microplastic concentration in soil dry weight.

4.3 对土壤植物的影响

植物在维持健康的土壤生态系统中起着重要的作用.在受污染的土壤中,植物可通过吸收、转运、代谢等作用在地上部大量积累污染物,或释放出几种解毒酶对污染物进行解毒,利用植物修复土壤^[112-113].植物生长与根系定殖微生物有关如病原体、固氮剂和菌根真菌等^[114];还与微型动物有关如纤毛虫、蚯蚓、螨虫和线虫等,它们会参与中间产物的利用.微塑料会通过影响土壤微生物和动物来间接影响植物的生长.如表 2 所示,有研究把农业薄膜残留物以 1%的比例添加到干燥土壤中,结果表明小麦在营养期和生殖期的生长均受到负面影响,这可能是由于微塑料掺入引起的土壤性质变化^[115].Machado 等^[97]研究微塑料对大葱生产性能的影响,结果发现微塑料可引起植物总生物量、组织元素组成和根系性状的变化,且影响因微塑料类型而异.有研究证明了 PS 对小麦生长会产生毒性影响^[116].Li 等^[117-118]研究发现,PS 微塑料可在生菜根部被吸收和富集,并从根部迁移到地上部.

如上所述,微塑料的存在可能导致土壤物理化学参数的变化,如容重、土壤结构、营养成分和持水量等^[21,97-101].这些变化会通过改变植物生长状态、根系特征和养分吸收过程影响植物的生长^[97,115,119].另外,土壤性质的变化也会影响土壤微生物群落的组成和生物活性^[21,119],从而间接影响植物的性能.未来研究应包括更多类型的微塑料、植物种类和土壤条件,以便系统地评估土壤微塑料污染对陆地生态系统的潜在影响.

4.4 对土壤微生物的影响

微塑料对土壤微生物影响的研究包括:对土壤微生物群落的影响、微生物对微塑料的降解及微塑料存在下土壤酶活性的变化(表 2).微塑料通过影响土壤微环境间接影响微生物群落,微塑料添加剂对土壤微生物活性有抑制作用,影响微生物的繁殖发育^[78-79,100].微塑料复合污染物会影响附着在微塑料上的微生物.微塑料可作为土壤微生物的一种新的生态栖息地.在 PE 和 PS 颗粒上的寄生真菌和腐生真菌在微塑料生物膜中均有大量繁殖^[107];含有某些致病菌的弯曲杆菌可依附于微塑料对微生物造成危害^[109].微塑料上的微生物群落与周围环境有显著差异,Tender 等^[120]发现弧菌科和假交替门菌科,在微塑料上检测到很多,但在周围环境中发现得很少.微生物对微塑料降解贡献很大^[121],研究发现细菌和真菌都能促进微塑料的降解^[122];博氏短杆菌是一种 PE 降解菌^[123].Machado 等^[97]研究不同类型微塑料对土壤酶的影响,结果发现添加 PA 和 HDPE 提高了 FDA 水解酶的活性,PET、PA、PS 等使微生物活性降低.然而,目前微塑料及其相关污染物对土壤微生物的综合影响研究较少,应成为今后研究的重点.

5 未来研究展望(Future research prospects)

微塑料在土壤环境中广泛分布和积累,已经引起了研究者们对其来源、分布迁移和生态风险的关注.但由于相关研究方法和分类标准的不完善,导致对微塑料在土壤中环境行为的研究缺乏一致性.微塑料对土壤结构和理化性质、土壤植物、动物、微生物等的生态风险研究仍处于探索积累阶段,尚未形成完整的理论方法体系,未来需要从以下几个方面开展深入研究:

- (1) 建立统一的微塑料样品采集、分类标准及分离检测方法,规范微塑料丰度的表示方法.目前土壤中微塑料的分离检测方法有限,不足以分析土壤中微塑料的来源和分布情况,亟需使微塑料分离检测方法体系规范化.
- (2) 微塑料能吸附土壤中的重金属、有机污染物和抗生素等,需进一步研究微塑料的复合污染,这对于了解这些污染物在土壤中迁移的风险、生物转化和生物累积有很大作用.
- (3) 微塑料对土壤生物的生态风险研究.未来研究应包括更多类型的微塑料、动植物种类和土壤条件等,微塑料及其相关污染物所带来的综合影响需深入研究,需进一步研究微塑料与土壤微生物的相互作用,包括微生物群落结构、微生物活性等;应开展更多的野外实验,进一步研究微塑料暴露对环境现实情景下土壤动物的影响.

参考文献 (References)

[1] JIA L, YANG S, YONG B C. Focus topics on microplastics in soil: Analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks[J]. Environmental Pollution, 2020, 257: 1-12.

[2] DE SOUZA MACHADO A A, WERNER K, CHRISTIANE Z, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. Global

- Change Biology, 2017, 24: 1405-1416.
- [3] ANDRADY A L. Microplastics in the marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62: 1596-1605.
- [4] 候军华, 檀文炳, 余红, 土壤中微塑料的污染现状及其影响研究进展[J]. 环境工程, 2019, 38(2): 16-27.
- HOU J H, TAN W B, YU H, et al. Pollution status and impact of micro plastics in soil environment[J]. Environmental Engineering, 2019, 38(2): 16-27 (in Chinese).
- [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: 134841-134850.
- [6] WILLIAM J S, MICK C, ISABELLE M C, et al. A horizon scan of global conservation issues for 2010[J]. Cell Press, 2010, 25(1): 2-7.
- [7] DAVID K A B, FRANCOIS G, RICHARD C. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments[J]. Biological Science, 2009, 364: 1985-1998.
- [8] OLUBUKOLA S A, JEFFREY F B, LAURA M H, et al. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52: 1704-1724.
- [9] JULIE C, ANDERSON A, BRADLEY J, et al. Microplastics in aquatic environments: Implications for Canadian ecosystems[J]. Environmental Pollution, 2016, 74: 1-12.
- [10] RICHARD C T, YLVA O, RICHARD P M, et al. Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. Science, 2004, 304: 1-2.
- [11] 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.
- [12] QI R M, DAVEY L J, ZHEN L, et al. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134722-134733.
- [13] LAW K L, THOMPSON R C. Microplastics in the seas[J]. Science, 2014, 345(6193): 144-145.
- [14] 骆永明, 周倩, 章海波, 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(3): 1021-1030.
- LUO Y M, ZHOU Q, ZHANG H B, et al. Pay attention to the study of micro plastic pollution in soil and prevent ecological and food chain risks[J]. Journal of Chinese Academy of Sciences, 2018(3): 1021-1030 (in Chinese).
- [15] COLE M, LINDEQUE P, HALSBAND C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62: 2588-2597.
- [16] HORTON 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.
- [17] HUERTA L E, GERTSEN H, GOOREN H, et al. Microplastics in the terrestrial ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae)[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50: 2685-2691.
- [18] RILLIG M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46: 6453-6454.
- [19] SCHEURER, BIGALKE M. Microplastics in Swiss floodplain soils[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52, 3591-3598.
- [20] NIZZETTO L, FUTTER M, LANGAAS S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50: 2685-2691.
- [21] De SOUZA MACHADO A A, LAU C W, et al. Impacts of microplastics on the soil biophysical environment[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52: 9656-9665.
- [22] ELLEN B, ANNA W, EDWIN M F, et al. Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the Lugworm *Arenicola marina* (L.) [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 10: 1-8.
- [23] YINI M, ANNA H, SIQI C, et al. Effects of nanoplastics and microplastics on toxicity, bioaccumulation, and environmental fate of phenanthrene in fresh water[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 166-173.
- [24] WANG J, LUO Y M, TENG Y, et al. Soil contamination by phthalate esters in Chinese intensive vegetable production systems with different modes of use of plastic film[J]. Environmental Pollution, 2013, 180: 265-273.
- [25] 李连祯, 周倩, 尹娜, 食用蔬菜能吸收和积累微塑料[J]. 科学通报, 2019, 64: 1-7.
- LI L Z, ZHOU Q, YIN N, et al. Microplastics can be absorbed and accumulated by edible vegetables[J]. Science Bulletin, 2019, 64: 1-7 (in Chinese).
- [26] LIU E K, HE W Q, YAN C R. 'White revolution' to 'white pollution' - agricultural plastic film mulch in China[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(091001): 1-3.
- [27] GIACOMO S M, CARMELA S, GIOVANNI R. Plastic materials in European agriculture: Actual use and perspectives[J]. Journal of Agriculture Engineering, 2011, 3: 15-28.
- [28] LIU J L, BU L D, ZHU L, et al. Optimizing plant density and plastic film mulch to increase maize productivity and water-use efficiency in semiarid areas[J]. Agronomy Journal, 2014, 106: 1138-1146.
- [29] GAO H H, YAN C R, LIU Q, et al. Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 484-492.
- [30] WANG W F, ANNE W N, LI Z, et al. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1369-1374.
- [31] MATEO S J, MEDLICOTT K, QADIR M, et al. Proceedings of the UN-water project on the safe use of wastewater in agriculture[J]. American Heart Journal, 2013, 161(6): 1114-1124.
- [32] CHANG M. Reducing microplastics from facial exfoliating cleaners in wastewater through treatment versus consumer product decisions[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 101(1): 330-333.
- [33] MINTENIG S, LODER M, PRIMPKE S, et al. Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources[J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 631-635.

- [34] ZHAO S Y, ZHU L X, WANG T, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze estuary system, China: First observations on occurrence, distribution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 86(1): 562-568.
- [35] SEDAT G D, CEM Ç, EVSEN G, et al. Microplastics in municipal wastewater treatment plants in Turkey: A comparison of the influent and secondary effluent concentrations[J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 2018, 190: 626.
- [36] MURPHY F, EWINS C, CARBONNIER F, et al. Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5800-5808.
- [37] NAPPER I E, BAKIR A, ROWLAND S J, et al. Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 99: 178-185.
- [38] NAPPER I E, THOMPSON R C. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 112: 39-45.
- [39] CORRADINI F, MEZA P, EGUILUZ R, et al. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 411-420.
- [40] LI X W, CHEN L B, MEI Q Q, et al. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China[J]. *Water Research*, 2018, 142: 75-85.
- [41] SUN J, DAI X, WANG Q, et al. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal[J]. *Water Research*, 2019, 152: 21-37.
- [42] MAHON A M, CONNELL B, HEALY M G, et al. Microplastics in sewage sludge: Effects of treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(2): 810-818.
- [43] GATIDOU G, ARVANITI O S, STASINAKIS A S. Review on the occurrence and fate of microplastics in Sewage Treatment Plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 367: 504-512.
- [44] EPA. Urban Waste Water Treatment in 2014-A Report for the Year 2014[R]. Environmental Protection Agency, 2015.
- [45] 徐湘博, 孙明星, 张林秀, 等. 土壤微塑料污染研究进展与展望[J]. *农业资源与环境学报*, 2020(24): 1-13.
- [45] XU X B, SUN M X, ZHANG L X, et al. Research progress and Prospect of soil micro plastic pollution[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020(24): 1-13 (in Chinese).
- [46] BLASING M, AMELUNG W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 422-435.
- [47] FRANCKX L, Van ACOLEYEN M, HOGG D. Assessment of the options to improve the management of biowaste in the European Union [S]. 2010.
- [48] WEITHMANN N, MOLLER J N, LODER M G J, et al. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment[J]. *Science Advances*, 2018, 4(4): 1-7.
- [49] 周倩, 田崇国, 骆永明. 滨海城市大气环境中发现多种微塑料及其沉降通量差异[J]. *科学通报*, 2017, 62: 3902-3909.
- [49] ZHOU Q, TIAN C G, LUO Y M. A variety of micro plastics were found in the atmospheric environment of coastal cities and their deposition flux differences[J]. *Scientific Bulletin*, 2017, 62: 3902-3909 (in Chinese).
- [50] DRIS R, GASPERI J, SAAD M, et al. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 104(1): 290-293.
- [51] DRIS R, GASPERI J, MIRANDE G, et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 221: 453-458.
- [52] KLEIN M, FISCHER E K. Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 96-103.
- [53] 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.
- [54] 任欣伟, 唐景春, 袁子, 等. 土壤微塑料污染及生态效应研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(6): 1045-1058.
- [54] REN X W, TANG J C, CHEN Y, et al. Research progress of soil microplastics pollution and ecological effects[J]. *Journal of Agricultural Environmental Sciences*, 2018, 37(6): 1045-1058 (in Chinese).
- [55] HIDALGO R V. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 3060-3075.
- [56] Microplastics in drinking-water[M]. Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, 2019.
- [57] FULLER S, GAUTAM A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5774-5780.
- [58] HUERTA L E, VEGA J M, QUEJ V K, et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain [J]. *Science Report*, 2017, 7: 14071.
- [59] ZHOU Q, ZHANG H, FU C, et al. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 201-208.
- [60] LIU M, LU S, SONG Y, et al. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 855-862.
- [61] LV W, ZHOU W, LU S, et al. Microplastic pollution in rice-fish co-culture system: a report of three farmland stations in Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1209-1218.
- [62] ZHANG S, YANG X, GERTSEN H, et al. A simple method for the extraction and identification of light density microplastics from soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616: 1056-1065.
- [63] ZHOU Q, ZHANG H, ZHOU Y, et al. Separation of microplastics from a coastal soil and their surface microscopic features[J]. *Chinese*

- Science Bulletin, 2016, 61 (14): 1604-1611.
- [64] 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.
- [65] 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, 2020(142653): 3-15.
- [66] LI W F, WUFUER R H M J, 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.
- [67] DING L, ZHANG S Y, WANG X Y, et al. The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 720: 137525.
- [68] 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.
- [69] CHAI B W, WEI Q, SHE Y Z, et al. Soil microplastic pollution in an e-waste dismantling zone of China[J]. Waste Management, 2020, 118: 291-301.
- [70] 刘沙沙, 付建平, 郭楚玲. 微塑料的环境行为及其生态毒性研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 957-969.
- LIU S S, FU J P, GUO C L, et al. Research progress on environmental behavior and ecotoxicity of microplastics[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2019, 38(5): 957-969 (in Chinese).
- [71] 程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构定量化研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 988-994.
- CHENG Y N, LIU J L, ZHANG J B. Progress in quantitative study of soil pore structure [J]. 2012, 43 (4): 988-994.
- [72] GRAYLING K M, YOUNG S D, ROBERTS C J, et al. The application of X-ray micro computed tomography imaging for tracing particle movement in soil[J]. Geoderma, 2018, 321: 8-14.
- [73] RILLIG M C, INGRAFFIA R, De SOUZA MACHADO A A. Microplastic incorporation into soil in agroecosystems[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1805-1809.
- [74] MAAß S, DAPHI D, LEHMANN A, et al. Transport of microplastics by two collembolan species[J]. Environmental Pollution, 2017, 225: 456-459.
- [75] GABET E J, REICHMAN O J, SEABLOOM E W. The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport[J]. Annual Review Earth Planetary Science, 2003, 31: 249-273.
- [76] RAHMATPOUR S, MOSADDEGHI M R, SHIRVANI M, et al. Transport of silver nanoparticles in intact columns of calcareous soils: The role of flow conditions and soil texture[J]. Geoderma, 2018, 322: 89-100.
- [77] O'CONNOR D, PAN S Z, SHEN Z T, et al. Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles[J]. Environment Pollution, 2019, 249: 527-534.
- [78] TEUTEN E L, SAQUING J M, KNAPPE D R U, et al. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2009, 364(1526): 2027-2045.
- [79] ROCHMAN C M, MANZANO C, HENTSCHEL B T, et al. Polystyrene plastic: A source and sink for polycyclic aromatic hydrocarbons in the marine environment[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(24): 13976-13984.
- [80] SUN J Q, WU X Q, GAN J. Uptake and metabolism of phthalate esters by edible plants[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(14): 8471-8478.
- [81] XIA X H, YANG L Y, BU Q W, et al. Levels, distribution, and health risk of phthalate esters in urban soils of Beijing, China[J]. Journal of Environment Quality, 2011, 40(5): 1643-1651.
- [82] KONG S F, JI Y Q, LIU L L, et al. Diversities of phthalate esters in suburban agricultural soils and wasteland soil appeared with urbanization in China[J]. Environmental Pollution, 2012, 170: 161-168.
- [83] HARTMANN N B, RIST S, BODIN J, et al. Microplastics as vectors for environmental contaminants: Exploring sorption, desorption, and transfer to biota[J]. Integrated Environmental Assessment Management, 2017, 13(3): 488-493.
- [84] BAKIR A, ROWLAND S J, THOMPSON R C. Competitive sorption of persistent organic pollutants onto microplastics in the marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(12): 2782-2789.
- [85] HUFFER T, METZELDER F, SIGMUND G, et al. Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil[J]. Science of Total Environment, 2019, 657: 242-247.
- [86] TEUTEN E L, ROWLAND S J, GALLOWAY T S, et al. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41: 7759-7764.
- [87] BANDOW N, WILL V, WACHTENDORF V, et al. Contaminant release from aged microplastic[J]. Environmental Chemistry, 2017, 14: 394.
- [88] MASSOS A, TURNER A. Cadmium, lead and bromine in beached microplastics[J]. Environment Pollution, 2017, 227: 139-145.
- [89] 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.
- [90] XU B, LIU F, BROOKES P C, et al. Microplastics play a minor role in tetracycline sorption in the presence of dissolved organic matter [J]. Environment Pollution, 2018, 240: 87-94.
- [91] SUN M, YE M, JIAO W, et al. Changes in tetracycline partitioning and bacteria/phage-mediated ARGs in microplastic-contaminated greenhouse soil facilitated by sophorolipid[J]. Hazard Materials, 2018, 345: 131-139.
- [92] LI J, ZHANG K, ZHANG H. Adsorption of antibiotics on microplastics[J]. Environment Pollution, 2018, 237: 460-467.
- [93] WANG F, SHIH K M, LI X Y. The partition behavior of perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanesulfonamide (FOSA) on microplastics[J]. Chemosphere, 2015, 119: 841-847.

- [94] GUO X, WANG X, ZHOU X, et al. Sorption of four hydrophobic organic compounds by three chemically distinct polymers: Role of chemical and physical composition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(13): 7252-7259.
- [95] SHEN X C, LI D C, SIMA X F, et al. The effects of environmental conditions on the enrichment of antibiotics on microplastics in simulated natural water column[J]. *Environment Research*, 2018, 166: 377-383.
- [96] ZHANG M, DONG B, QIAO Y, et al. Effects of sub-soil plastic film mulch on soil water and salt content and water utilization by winter wheat under different soil salinities[J]. *Field Crop Research*, 2018, 225: 130-140.
- [97] 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: 6044-6052.
- [98] LIU H, YANG X, LIU G, et al. Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil[J]. *Chemosphere*, 2017, 185: 907-917.
- [99] ZHANG G S, ZHANG F X, LI X T. Effects of polyester microfibers on soil physical properties: perception from a field and a pot experiment[J]. *Science of Total Environment*, 2019, 670: 1-7.
- [100] WANG J D, TAN Z, PENG J P, et al. The behaviors of microplastics in the marine environment[J]. *Marine Environmental Research*, 2016, 113: 7-17.
- [101] WAN Y, WU C, XUE Q, et al. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil[J]. *Science of Total Environment*, 2018, 654: 576-582.
- [102] ZHU B K, FANG Y M, ZHU D, et al. Exposure to nanoplastics disturbs the gut microbiome in the soil oligochaete *Enchytraeus crypticus* [J]. *Environment Pollution*, 2018, 239: 408-415.
- [103] CAO D, WANG X, LUO X, et al. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil[J]. *IOP Conference Series: Earth Environment Science*, 2017, 61: 012148.
- [104] KIM S W, AN Y J. Soil microplastics inhibit the movement of springtail species[J]. *Environment International*, 2019, 126: 699-706.
- [105] ZHU D, BI Q F, XIANG Q, et al. Trophic predator-prey relationships promote transport of microplastics compared with the single *Hypoaspis aculeifer* and *Folsomia candida* [J]. *Environment Pollution*, 2018, 235: 150-154.
- [106] KIM H M, LEE D K, LONG N P, et al. Uptake of nanopolystyrene particles induces distinct metabolic profiles and toxic effects in *Caenorhabditis elegans* [J]. *Environment Pollution*, 2019, 246: 578-586.
- [107] SONG Y, CAO C, QIU R, et al. Uptake and adverse effects of polyethylene terephthalate microplastics fibers on terrestrial snails (*Achatina fulica*) after soil exposure[J]. *Environment Pollution*, 2019, 250: 447-455.
- [108] JIN Y, LU L, TU W, et al. Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice[J]. *Science of Total Environment*, 2019, 649: 308-317.
- [109] JEMEC K A, HORVAT P, SKALAR T, et al. Plastic bag and facial cleanser derived microplastic do not affect feeding behaviour and energy reserves of terrestrial isopods[J]. *Science of Total Environment*, 2018, 615: 761-766.
- [110] WANG J, COFFIN S, SUN C, et al. Negligible effects of microplastics on animal fitness and HOC bioaccumulation in earthworm *Eisenia fetida* in soil[J]. *Environment Pollution*, 2019, 249: 776-784.
- [111] WANG H T, DING J, XIONG C, et al. Exposure to microplastics lowers arsenic accumulation and alters gut bacterial communities of earthworm *Metaphire californica* [J]. *Environment Pollution*, 2019, 251: 110-116.
- [112] ROMHELD G N V. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus deficient plants[J]. *Plant Soil*, 1999, 211: 121-130.
- [113] VERKLEIJ J A C, GOLAN G A, ANTOSIEWISZ D M, et al. Dualities in plant tolerance to pollutants and their uptake and translocation to the upper plant parts[J]. *Environmental Experimental Botany*, 2009, 67(1): 10-22.
- [114] POWELL J R, RILLIG M C. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function[J]. *New Phytol*, 2018, 220: 1059-1075.
- [115] QI Y, YANG X, PELAEZ A M, et al. Macro- and micro- plastics in soil-plant system: effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth[J]. *Science of Total Environment*, 2018, 645: 1048-1056.
- [116] LIAO Y C, NAZYGUL J, LI M, et al. Effects of microplastics on the growth, physiological and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Environment Science*, 2019, 10: 1-11.
- [117] LI L Z, ZHOU Q, YIN N, et al. Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64: 928-934.
- [118] LI Y, JONES D L, CHEN Q, et al. Slurry acidification and anaerobic digestion affects the speciation and vertical movement of particulate and nanoparticulate phosphorus in soil after cattle slurry application[J]. *Soil Tillage Research*, 2019, 189: 199-206.
- [119] RILLIG M C, LEHMANN A, De SOUZA MACHADO A A, et al. Microplastic effects on plants[J]. *New Phytologist*, 2019, 223: 1066-1070.
- [120] TENDER D C A, DEVRIESE L I, HAEGEMAN A, et al. Bacterial community profiling of plastic litter in the Belgian part of the North Sea[J]. *Environmental Science & Techno*, 2015, 49(16): 9629-9638.
- [121] CARSON H S, NERHEIM M S, CARROLL K A, et al. The plastic-associated microorganisms of the North Pacific Gyre[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 75(1-2): 126-132.
- [122] SHAH A A, HASAN F, HAMEED A, et al. Biological degradation of plastics: A comprehensive review[J]. *Biotechnology Advance*, 2008, 26(3): 246-265.
- [123] HADAD D, GERESH S, SIVAN A. Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis* [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 98(5): 1093-1100.