

朱永官, 朱冬, 许通, 等. (微)塑料污染对土壤生态系统的影响: 进展与思考[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 1-6.

ZHU Yong-guan, ZHU Dong, XU Tong, et al. Impacts of (micro) plastics on soil ecosystem: Progress and perspective[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 1-6.



开放科学(资源服务)标识码(OSID)

(微)塑料污染对土壤生态系统的影响: 进展与思考

朱永官, 朱冬, 许通, 马军

(中国科学院城市环境研究所 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 塑料已经成为现代社会不可或缺的产品而被广泛应用, 塑料污染也成了一个全球性的环境污染问题。近年来, 土壤塑料污染的问题也开始受到关注。本文针对近几年来国内外关于塑料污染对土壤生态系统的影响进行综述, 主要包括以下几个方面: (1) 微塑料对土壤物理化学性质的影响; (2) 微塑料对土壤微生物群落的影响; (3) 微塑料与土壤动物的相互作用。最后, 本文对未来关于土壤微塑料研究的重点方向进行了展望。

关键词: 塑料; 污染; 土壤微生物; 生态系统服务; 土壤动物; 肠道微生物

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)01-0001-06 doi:10.11654/jaes.2018-1427

Impacts of (micro) plastics on soil ecosystem: Progress and perspective

ZHU Yong-guan, ZHU Dong, XU Tong, MA Jun

(Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: Plastics and their derived products are widely used in modern society, hence they are becoming indispensable. However, their wide and intensive use has caused global environmental contamination of plastics. In recent years, soil pollution with microplastics has also received increasing attention. This paper aims to provide a review on recent developments in understanding the impacts of microplastic pollution on soil ecosystem, and it will cover: (1) effects of microplastics on soil physiochemical properties; (2) effects of microplastics on soil microbial communities; and (3) the interactions between microplastics and soil fauna. Finally, future research directions are discussed.

Keywords: plastics; pollution; soil microbiota; ecosystem services; soil fauna; gut microbiome

我们现在身处一个“塑料”的时代, 塑料产品被广泛应用于各领域, 其产量和废弃量逐年递增。在欧洲, 包装领域需求塑料最多, 占总重量的40%, 其次为建筑、汽车、电器、农业等领域^[1]。全球塑料产量从1950年的200万t增加到2015年的3.8亿t, 总产量达78亿t(中国产量约占28%), 其中9%的塑料被回收, 79%的塑料被填埋或者遗弃在自然界中^[2-3]。自1992年至2016年, 全球生活源废塑料贸易量为2.4亿t, 中国进口量占72%, 对全球的废塑料回收做出了巨大贡献。

塑料的大量使用已经导致环境中塑料及其衍生品对大气、海洋和陆地环境造成污染^[4-5]。2012年全球因生产和使用塑料产品而排放的二氧化碳(不包括填埋和焚烧)达3.9亿t^[6]。大量塑料被随意丢入湖泊、河流并汇入海洋, 并通过运动的洋流在世界五个地区集中, 形成世界的“海洋垃圾带”。这些塑料碎片已对海洋生态造成威胁, 甚至将可能产生不可逆的影响^[7]。研究表明, 2010年沿海国家和地区共产生约2.8亿t塑料垃圾, 其中480万~1270万t塑料流入海

收稿日期: 2018-11-14 录用日期: 2018-12-12

作者简介: 朱永官(1967—), 男, 研究员, 长期从事环境土壤学和微生物生态学研究。E-mail: ygzhu@iue.ac.cn

洋,中国的排放量远高于全球其他地区,约为美国的30倍^[8]。尽管我们对Jambeck等^[8]研究的模型和方法持怀疑态度,但研究的结论已成为发达国家对我国进行指责与攻击的依据,给我国造成巨大压力。

大块塑料经紫外线照射、碰撞磨损或工业生产等方式,形成粒径小于5 mm的固体颗粒被称为微塑料^[9],也有学者提出粒径小于1 mm才称为微塑料^[3]。微塑料具有不溶性和持久性,根据形态主要分为球形颗粒、薄膜、碎片和纤维。随着研究的深入,微塑料的分类将越来越精细,粒径更小的微塑料也将被重新定义。汽车轮胎磨损、日常生活和洗衣、工业过程(如打磨)、表面磨损和塑料涂料(如人造草皮和聚合物涂料)是微塑料的主要产生方式,因其能够进入食物链,进而可引发严重的环境和健康问题^[10]。海洋受微塑料影响最为直接,在牡蛎等海洋生物体内已发现微塑料颗粒^[11],人类粪便中也已发现微塑料。土壤中(微)塑料的污染也十分普遍,主要通过农膜的大量使用和废弃物的循环利用等途径进入。德国科学家Rillig是世界上最早关注土壤微塑料污染的学者之一^[12],他指出微塑料进入土壤后,积累到一定程度则会影响土壤性质、土壤功能及生物多样性。随后,一些学者进行了相对深入的研究,发现土壤中的微塑料对水分、养分的运输和作物生长均有不良影响^[13-14]。

关于土壤塑料污染今年已有综述论文^[15-16],他们比较全面地论述了相关的研究进展,总体比较宏观。本文主要结合最新的国内外研究进展,从土壤生物学的视角综述了微塑料污染对土壤生态系统的影响,并提出了未来的一些研究重点和方向,为开展微塑料污染的土壤生态效应的相关研究提供参考。

1 微塑料对土壤物理化学性质的影响

微塑料通过长期的农用地膜残留、有机肥和污泥的施用、地表水灌溉和大气沉降等方式^[17]进入土壤环境。在我国上海城郊浅表层(0~3 cm)和深表层(3~6 cm)土壤中,分别发现粒径为20~5 mm的微塑料丰度达到78.00个·kg⁻¹土和62.50个·kg⁻¹土,而粒径为5~2 cm的塑料丰度达到6.75个·kg⁻¹土和3.25个·kg⁻¹土,且有48.79%和59.81%的塑料粒径小于1 mm^[18]。在滇池周边的农田和河岸森林土壤中也发现微塑料丰度达7100~42 960个·kg⁻¹土(平均18 760个·kg⁻¹土),且95%的微塑料粒径在0.05~1 mm之间^[19]。在欧洲农田中,污泥施用使得土壤中微塑料颗粒达到1000~4000个·kg⁻¹土^[20]。在澳大利亚悉尼工业区土壤中微

塑料含量高达0.03%~6.7%^[21]。这些进入土壤中的微塑料,在长期的风化作用、紫外照射及其与土壤中其他组分的相互作用下^[22],表面逐步老化、粗糙,颗粒或碎片裂解,粒径变小,比表面积增大,吸附位点增加,表面官能团增多,疏水性增强,辛醇/水分配系数升高,在土壤pH、盐度、有机质和离子交换等复杂因素的调控下,对土壤中重金属和多环芳烃、多氯联苯、农药、抗生素等有机污染物的吸附能力显著增强^[22-23],从而改变土壤的理化性质,影响土壤生态系统健康。

微塑料进入土壤可以影响土壤的结构及其他物理性质。de Souza Machado等^[24]研究发现,在环境相关浓度下,微塑料可以影响土壤容重、水力特征以及团聚体的变化。此外,不同微塑料的影响存在较大差异,如聚酯显著降低土壤水稳性团聚体,而聚乙烯则可以显著提高土壤水稳性团聚体的量^[24]。一项云南的野外调查研究^[19]发现,70%以上的微塑料颗粒和土壤团聚体相结合,特别是和微团聚体结合。但是目前还缺乏有关塑料污染与土壤团聚体相互作用的长期和原位研究,因此尚无法判断塑料污染对土壤水分运移和水土保持的影响。

1.1 微塑料对重金属的吸附

近年来,一些研究已经证明:微塑料进入土壤环境会与重金属发生地球化学作用^[25-26]。耕地、林地是农用地膜使用和施肥灌溉的主要区域,Hodson等^[25]研究了高密度聚乙烯对农林用地土壤中Zn²⁺的吸附行为,他们发现,在含有更加丰富的有机质林地土壤中,高密度聚乙烯对Zn²⁺的吸附能力更强,且吸附行为符合Langmuir和Freundlich方程。土壤中微塑料的老化对其吸附重金属也有显著的影响,Nicole等^[26]将高密度聚乙烯、聚氯乙烯和聚苯乙烯(微米级的再生塑料颗粒)暴露在人工老化条件(2000 h;光氧化和热氧化)下模拟它们在户外的老化过程后,用柱渗滤试验研究发现了微塑料老化不仅明显增加了其对TOC、Cl、Ca、Cu、Zn的吸附,而且也减弱了重金属的解吸和释放作用,表明老化的微塑料对重金属具备更强的固定能力。Turner等^[27]利用新鲜和老化的微塑料小球吸附痕量金属的研究也表明,金属对老化塑料具备更强的亲和力。此外,土壤中的官能团吸附到微塑料表面,可能对其吸附重金属有一定影响,Kim等^[28]对官能团包被的聚苯乙烯吸附Ni的研究表明,官能团改变微塑料和重金属表面的疏水性,从而影响其对重金属的吸附。因此,微塑料一旦进入土壤且被风化老化,在土壤复杂环境的影响下,其将成为重金属的有

效载体固定在土壤环境中,可能损害土壤生态系统健康。

1.2 微塑料对有机污染物的吸附

多环芳烃、多氯联苯、杀虫剂、除草剂和抗生素等有机污染物是影响土壤生态系统健康的另一类重要因素。近年来,学者们普遍认为微塑料在环境中扮演着污染物迁移载体的角色。Heskett等^[29]对太平洋、大西洋、印度洋和加勒比海区域的孤岛微塑料吸附有机污染物的研究发现,即使是不同环境背景浓度的PCBs、DDTs、HCHs也可被微塑料吸附。污染物的疏水性直接影响其在微塑料表面的吸附,Hüffer等^[30]研究了4种微塑料(PE、PA、PS和PVC)对7种脂肪族和芳香族有机物的吸附作用,他们发现PE的吸附主要在于固液相的分配平衡,而PA、PS和PVC对有机污染物的吸附以表面吸附为主导,并发现微塑料的吸附能力与污染物的疏水性紧密相关,揭示了疏水作用是影响微塑料吸附性的主要因素。Sven等^[31]在pH=4、7、10的条件下,用两种微塑料颗粒(聚乙烯和聚苯乙烯)吸附19种不同的污染物(农药、药品和个人护理产品),结果也证明相比于中性物质,疏水化合物更易于吸附到塑料颗粒。环境中微塑料的老化风化对有机污染物的吸附也有很重要的影响,Zhang等^[32]将环境中风化老化的发泡聚苯乙烯作为吸附剂对土霉素的吸附进行研究,相比于新鲜塑料,环境中发泡微塑料对抗生素的吸附能力更易受pH的影响,有机质的存在影响抗生素与微塑料之间的静电作用,并且能够调控两者的吸附。此外,氢键和多价阳离子桥接、 π - π 作用对微塑料吸附抗生素具有重要的调控能力。综上,土壤中的有机污染物会被微塑料所吸附,并且复杂的土壤环境条件对微塑料的吸附具有很强的调控能力。

1.3 微塑料对微生物的吸附

微生物对土壤生态系统健康至关重要。随着研究的逐步深入,人们开始担忧微塑料可能成为致病菌等有害微生物的运输载体,影响土壤生态系统健康。已有研究表明^[33-34],微塑料可为微生物提供吸附位点,使其长期吸附在微塑料表面,形成生物膜,影响土壤微生物的生态功能。而且,伴随微塑料的迁移,微生物会扩散到其他生态系统,改变生态系统的菌群和功能。Oberbeckmann等^[35]研究了不同环境条件(包括营养水平)对聚苯乙烯、聚乙烯表面细菌群落的组成和特异性的影响,发现虽然大部分致病菌没有被微塑料吸附,但表明了污水处理厂中微塑料是抗生素抗性

基因水平转移的载体。但总体来说,目前关于土壤中微塑料对微生物的吸附和微生物在微塑料表面生长的研究还很少,有待进一步拓展和深入。

2 微塑料对土壤微生物群落的影响

在海洋塑料污染方面,Zettler等^[33]提出塑料际的概念。他们利用电子扫描电镜和下一代高通量测序等手段揭示了塑料表面存在复杂的微生物群落,甚至存在一些潜在的病原菌。在陆地生态系统中目前还缺乏类似的研究。他们的测序数据显示,不同塑料表面的微生物类群与海水的微生物组成具有很大的差异。关于塑料污染对土壤微生物群落影响的研究还较少,目前主要集中在塑料覆膜对微生物群落的影响以及微生物对塑料的降解上。如Jin等^[36]长期定位研究表明,塑料覆膜显著提高玉米秸秆的降解,提高土壤有机碳的积累。Sun等^[37]研究设施栽培土壤中表面活性剂和微塑料污染对土壤细菌和噬菌体相关的抗生素抗性基因的影响,发现这种影响还没有明确的规律性。塑料污染是如何驱动抗性基因的传播也缺乏机理性的研究,需要深入的探讨。Qian等^[38]近期的研究显示,覆膜塑料的残留可以显著降低土壤中碳氮循环相关基因的表达,从而降低土壤碳氮含量,影响土壤肥力。

塑料的化学成分在塑料降解过程中释放,从而造成土壤污染,其中比较典型的是邻苯二甲酸酯。Kong等^[39]研究表明,随着土壤中二丁基邻苯二甲酸酯含量的提高,土壤微生物多样性下降。Wang等^[40]研究了土壤中二甲基邻苯二甲酸酯污染对黑土中微生物功能的影响,他们发现这类污染物增加了土壤中一些功能基因,包括信号传导基因和与二甲基邻苯二甲酸酯降解有关的一些基因的表达,并认为这些基因表达的增加可能导致土壤中碳氮循环的加快,可能不利于黑土肥力的维持。

3 微塑料与土壤动物的相互作用

3.1 微塑料对土壤动物的影响

微塑料污染能在多个方面影响土壤动物。首先,由于微塑料微小的尺寸,它能够被土壤动物摄食,因此可能在土壤食物链中累积,从而影响各营养级的土壤动物^[12]。多项关于蚯蚓的研究已经表明,微塑料能够被蚯蚓取食,且影响其成长、存活和造成肠道的损伤^[41-43]。Rillig等^[44]总结早期的研究发现,土壤原生动物如纤毛虫、鞭毛虫和变形虫等能够摄食微塑料颗

粒,且提议微塑料对其的影响需要得到更大的关注。特别值得注意的是,变形虫是滤食动物,其可能误食土壤孔隙水中的微塑料颗粒。在对土壤跳虫的研究中,Zhu等^[45]发现,28 d土壤微塑料暴露($1\text{ g微塑料}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干土)显著减少跳虫的繁殖率和成长率,增加其体内碳氮同位素的分馏。值得关注的是,近期对线蚓的研究表明,低浓度纳米塑料急性饮食暴露(0.5% 纳米塑料/麦片)可显著增加其繁殖率,但随着暴露浓度的增加,繁殖率随之下降且其生物量显著降低^[46]。对秀丽隐杆线虫的研究表明,微塑料能够影响其神经毒性、氧化损伤、繁殖率、成长和存活率,且微塑料粒径的影响大于微塑料种类的影响^[47-48]。但这些研究主要集中于微塑料对模式动物的影响,对实际土壤动物影响的关注还不足。最近,微塑料对土壤动物肠道微生物的影响引起了大家的关注。一项关于跳虫的研究表明,微塑料的土壤暴露破坏了其肠道微生物的群落结构,但显著增加了其肠道微生物的多样性^[45]。Zhu等^[46]关于线蚓肠道微生物的研究也发现低浓度纳米塑料的饮食暴露可增加其肠道微生物的多样性,但随着暴露浓度的增加,多样性随之下降且肠道微生物的群落结构被改变。由于纳米塑料的暴露,在线蚓肠道中与氮循环和有机质分解相关的微生物(根瘤菌科和黄色杆菌科等)的相对丰度也显著下降。一项对墨西哥东南部传统玛雅家庭花园的调查研究^[49]发现,微塑料浓度在土壤($0.87\pm 1.9\text{ 个}\cdot\text{g}^{-1}$)、蚓粪($14.8\pm 28.8\text{ 个}\cdot\text{g}^{-1}$)和鸡粪($129.8\pm 82.3\text{ 个}\cdot\text{g}^{-1}$)中逐级增加,这暗示微塑料能够进入陆生食物链并在其中累积。Rillig^[12]也认为土壤微型/中型动物能够取食微塑料并在其土壤碎屑食物链中传递累积。但由于检测手段的限制,关于微塑料在土壤食物链中传递的认识仍十分有限。而且,微塑料通过改变土壤动物的栖息环境间接影响土壤动物的活动。微塑料可能堵塞土壤的孔隙,从而影响土壤中型动物的活动^[12]。凋落物中混杂微塑料将影响大型土壤动物(如蚯蚓等)的取食。一项室内模拟实验^[41]表明,微塑料污染的凋落物将影响凋落物对蚯蚓的适口性。此外,微塑料表面吸附的一些污染物质也会增强它们对土壤动物的影响,如Hodson等^[50]研究发现,微塑料提高了蚯蚓体内锌的生物有效性。

3.2 土壤动物对微塑料的影响

在土壤生态系统中,土壤动物能够影响微塑料的二次分解与迁移扩散。在大型食土动物蚯蚓的胃中,误食的塑料碎片可能被磨碎成微塑料^[12]。多项研究

表明^[41,43],相比于土壤或食物,在蚓粪中能检测到更小粒径和更高浓度的微塑料颗粒。随着蚯蚓的活动,其取食的微塑料颗粒能通过表面附着、排泄和死亡躯体等形式扩散到其他区域。比如,土壤表面的微塑料被蚯蚓取食后将会通过蚯蚓的活动带入深层的土壤中^[51]。此外,蚯蚓活动所形成的土壤孔隙也将有利于微塑料随着水分向下层土壤迁移。跳虫、螨虫等其他中型土壤动物也可以通过表面附着、抓、推等形式加速微塑料在土壤中的迁移。Maaß等^[52]研究发现,跳虫能够加速微塑料的扩散,且不同种类跳虫移动微塑料的能力不同。Zhu等^[53]的研究表明,相比于跳虫与捕食螨,甲螨具有更强的移动微塑料的能力。此外,个体小于 0.2 cm 的土壤微节肢动物能够移动微塑料颗粒到 9 cm 以外的区域。由于跳虫与螨虫个体较小,能够进入土壤孔隙中,随着它们的活动也将把微塑料颗粒带入土壤孔隙中,从而可能影响土壤水分和养分的迁移,同时增加微塑料进入地下水的风险。值得注意的是,一项涉及跳虫与捕食螨的研究^[53]表明,土壤食物链中捕食与被捕食的联系可以增加跳虫与捕食螨移动微塑料的能力,暗示了在复杂土壤食物网中,土壤动物对微塑料的影响需要更多地考虑动物之间的联系。

4 结论与未来研究方向

塑料污染是一个全球性的问题,但目前的研究还比较分散,未来还需要一些系统性的思考。关于塑料污染对土壤生态系统的影响,未来需要特别关注以下问题:

(1)塑料污染对土壤生态系统功能的影响。尽管目前已经开展了土壤塑料污染的研究,但是尚未深层次地探索塑料污染对土壤过程和功能的影响。未来需要探明塑料污染对土壤养分循环和土壤健康的影响,探明微塑料及其成分对土壤微生物功能群和功能基因的影响。

(2)土壤生物对塑料降解的影响及其机理,特别是微生物以及土壤动物肠道微生物对塑料降解的影响。在生物降解研究的基础上,未来需要发展生物修复技术,以缓解陆地生态系统塑料污染的问题。

(3)需要关注塑料制品中其他化学品对土壤生态系统的影响,包括塑化剂和阻燃剂等。这些化学物质在塑料降解过程中被释放出来,需要探明这些化学物质的行为、毒理效应以及在食物链中的积累机制等。

(4)塑料在土壤中作为微生物生长的载体,形成

生物膜。未来需要探明塑料表面的微生物群落和功能,以及塑料生物膜对土壤微生物群落和过程的影响。

参考文献:

- [1] PlasticsEurope. Annual review[Z]. Brussels.2017-2018.
- [2] PlasticsEurope. Plastics: The facts[Z]. Brussels.2016.
- [3] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, 3(7):e1700782.
- [4] Wagner M, Scherer C, Alvarez-Muñoz D, et al. Microplastics in freshwater ecosystems:What we know and what we need to know[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2014, 26(1):12.
- [5] Dris R, Gasperi J, Mirande C, et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 221:453-458.
- [6] Ellen-MacArthur-Foundation. The new plastics economy: Rethinking the future of plastics[J]. *World Economic Forum*, 2016.
- [7] Rochman C M, Browne M A, Underwood A J, et al. The ecological impacts of marine debris: Unraveling the demonstrated evidence from what is perceived[J]. *Ecology*, 2016, 97(2):302-312.
- [8] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, et al. Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347(6223):768-771.
- [9] Law K L, Thompson R C. Oceans. Microplastics in the seas[J]. *Science*, 2014, 345(6193):144-145.
- [10] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(20):10777-10779.
- [11] Sussarellu R, Suquet M, Thomas Y, et al. Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(9):2430-2435.
- [12] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(46):6453-6454.
- [13] 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(9): 091001.
- [14] Nizzetto L, Bussi G, Futter M N, et al. A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments[J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2016, 18(8):1050-1059.
- [15] Ng E L, Lwanga E H, Eldridge S M, et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627:1377-1388.
- [16] Chae Y, An Y J. Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 387-395.
- [17] Blasing M, Amelung W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 422-435.
- [18] Liu M T, Lu S B, Song Y, et al. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 855-862.
- [19] 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.
- [20] Zubris K A V, Richards B K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 138(2):201-211.
- [21] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50(11): 5774-5780.
- [22] Horton A A, Walton A, Spurgeon D J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 127-141.
- [23] 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.
- [24] de Souza Mochado 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.
- [25] Hodson M E, Duffus-Hodson C A, Clark A, et al. Plastic bag derived microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(8): 4714-4721.
- [26] Nicole B, Verena W, Volker W, et al. Contaminant release from aged microplastic[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 14(6): 394-405.
- [27] Turner A, Holmes L A. Adsorption of trace metals by microplastic pellets in fresh water[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 12(5): 600-610.
- [28] Kim D, Chae Y, An Y J. Mixture toxicity of nickel and microplastics with different functional groups on *Daphnia magna*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(21):12852-12858.
- [29] Heskett M, Takada H, Yamashita R, et al. Measurement of persistent organic pollutants (POPs) in plastic resin pellets from remote islands: Toward establishment of background concentrations for International Pellet Watch[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(2):445-448.
- [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] Sven S, Peter G, Jonas L, 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: 30.
- [32] Zhang H B, Wang J Q, Zhou B Y, et al. Enhanced adsorption of oxytetracycline to weathered microplastic polystyrene: Kinetics, isotherms and influencing factors[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 243:1550-1557.
- [33] Zettler E R, Mincer T J, Amaralzettler L A. Life in the "plastisphere" microbial communities on plastic marine debris[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(13): 7137-7146.
- [34] Harrison J P, Schratzberger M, Sapp M, et al. Rapid bacterial colonization of low-density polyethylene microplastics in coastal sediment

- microcosms[J]. *BMC Microbiology*, 2014, 14(1): 1–15.
- [35] Oberbeckmann S, Kreikemeyer B, Labrenz M. Environmental factors support the formation of specific bacterial assemblages on microplastics[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 2709.
- [36] Jin X, Filley T R. Enhanced conversion of newly-added maize straw to soil microbial biomass C under plastic film mulching and organic manure management[J]. *Geoderma*, 2018, 313:154–162.
- [37] Sun M, Ye M, Jiao W, et al. Changes in tetracycline partitioning and bacteria / phage-mediated ARGs in microplastic-contaminated greenhouse soil facilitated by sphorolipid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 345: 131–139.
- [38] Qian H, Zhang M, Liu G, et al. Effects of soil residual plastic film on soil microbial community structure and fertility[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2018, 229(8): 261.
- [39] Kong X, Jin D, Jin S, et al. Responses of bacterial community to dibutyl phthalate (DBP) pollution in a soil-vegetable ecosystem[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 353:142–150.
- [40] Wang Z G, You Y M, Xu W H, et al. Dimethyl phthalate altered the microbial metabolic pathways in a Mollisol[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3): 439–449.
- [41] Huerta Lwanga E, Gertsen H, Gooren H, et al. Microplastics in the terrestrial ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(5): 2685–2691.
- [42] Cao D, Wang X, Luo X, et al. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017:012148.
- [43] Rodriguez-Seijo A, Lourenco J, Rocha-Santos, et al. Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 495–503.
- [44] Rillig M C, Bonkowski M. Microplastic and soil protists: A call for research[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 1128–1131.
- [45] Zhu D, Chen Q L, An X L, et al. Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 116: 302–310.
- [46] Zhu B K, Fang Y M, Zhu D, et al. Exposure to nanoplastics disturbs the gut microbiome in the soil oligochaete *Enchytraeus crypticus*[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 408–415.
- [47] Le L L, Liu M T, Song Y, et al. Polystyrene(nano)microplastics cause size-dependent neurotoxicity, oxidative damage and other adverse effects in *Caenorhabditis elegans*[J]. *Environmental Science-Nano*, 2018, 5(8):2009–2020.
- [48] Lei L, Wu S, Lu S, et al. Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,619/620:1–8.
- [49] Lwanga E H, Vega J M, Quej V K, et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain[J]. *Scientific Reports*, 2017. Doi: 10.1038/S41598-017-14588-2.
- [50] Hodson M E, Duffus-Hodson C A, Clark A, et al. Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(8):4714–4721.
- [51] Rillig M C, Ziersch L, Hempel S. Microplastic transport in soil by earthworms[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1362.
- [52] Maaß S, Daphi D, Lehmann A, et al. Transport of microplastics by two collembolan species[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 456–459.
- [53] 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]. *Environmental Pollution*, 2018, 235:150–154.