



农业资源与环境学报

Journal of Agricultural Resources and Environment

ISSN 1005-4944, CN 12-1437/S

《农业资源与环境学报》网络首发论文

题目: 土壤微塑料污染研究进展与展望
作者: 徐湘博, 孙明星, 张林秀, 薛颖昊, 李畅, 马劭越
DOI: 10.13254/j.jare.2020.0024
收稿日期: 2020-01-15
网络首发日期: 2020-02-11
引用格式: 徐湘博, 孙明星, 张林秀, 薛颖昊, 李畅, 马劭越. 土壤微塑料污染研究进展与展望. 农业资源与环境学报. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0024>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

土壤微塑料污染研究进展与展望

徐湘博^{1,2}, 孙明星^{1,2}, 张林秀^{1,2}, 薛颖昊^{3,4*}, 李畅^{1,5}, 马劭越^{1,5}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, CERN 综合研究中心, 北京 100101; 2. 联合国环境署国际生态系统管理伙伴计划, 北京 100101; 3. 农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125; 4. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 微塑料污染已成为全世界广泛关注的环境问题之一。近年来, 土壤微塑料污染问题格外受到关注。本文从土壤微塑料污染防治体系构建的角度, 综述了微塑料定义、土壤微塑料检测方法、土壤微塑料的赋存分布与主要来源、微塑料对土壤生物的毒性效应以及土壤微塑料污染防治等方面的研究进展, 最后根据现有研究基础提出进一步加强土壤微塑料基础问题研究和开展土壤微塑料污染防控技术和宏观决策体系研究的具体研究路径展望, 为今后土壤微塑料的研究提供了研究思路。

关键词: 土壤; 微塑料; 来源; 分布; 毒性效应; 污染防治

doi: 10.13254/j.jare.2020.0024

Research progress and prospect of soil microplastic pollution

XU Xiang-bo^{1,2}, SUN Ming-xing^{1,2}, ZHANG Lin-xiu^{1,2}, XUE Ying-hao^{3,4*}, LI Chang^{1,5}, MA Shao-yue^{1,5}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. International Ecosystem Management Partnership, United Nations Environment Programme, Beijing 100101, China; 3. Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 4. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Microplastic pollution has become one of the global environmental concerns. In recent years, soil microplastic pollution has attracted considerable attention. From the perspective of soil microplastic pollution prevention and control, this study summarizes the research progress in the definition, detection methods, distribution characteristics, sources, toxic effect on soil organisms, and pollution prevention of microplastic in soil. Furthermore, the findings of existing studies were used to propose two research prospects: basic scientific research on microplastics and specific research paths for the prevention and control and decision-making for soil microplastic. These research prospects might stimulate new ideas for future research on soil microplastic.

收稿日期: 2020-01-15

作者简介: 徐湘博(1988—), 男, 山东昌邑人, 博士, 助理研究员, 主要从事环境效应与风险评估、环境经济研究。E-mail: ydxu.ccap@igsrr.ac.cn

***通信作者:** 薛颖昊 E-mail: yhxue010@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901255); 农业农村部农业生态环境保护专项(2110402)

Project supported: The National Science Foundation of China (41901255); Ministry of Agriculture and Rural Affairs "Agricultural Ecological Environmental Protection Specialization"(2110402)

Key words: soil; microplastic; source; distribution; toxic effect; pollution prevention and control

微塑料是一种新的环境污染物,微塑料污染已成为全球性的环境问题。在过去的接近 60 年时间里,从两极到赤道的栖息地中经常有塑料碎片检出的报道^[1,2],并于 2004 年首次报道了微塑料广泛存在于海洋中^[3]。一般认为,微塑料是指直径小于 5 mm 的塑料碎片或颗粒,包括碎片、纤维、颗粒、发泡、薄膜等不同形貌类型^[4,5],由于其稳定的化学性质,可在环境中存在数百年到几千年^[6],并且微塑料粒径小、数量多、分布广等物理性质,极易被生物吞食,在食物链中积累^[7],同时可进一步降解至纳米级威胁人体健康^[8],已受到国内外的广泛关注。自 2011 年起,联合国环境规划署(UNEP)开始关注海洋中的塑料污染问题,尤其是微塑料污染。2016 年联合国第二次环境大会报告进一步从国际法规和政策层面推动海洋微塑料的管理和控制。根据对微塑料研究文献的检索统计,有关微塑料的研究主要集中发表在近十年,并呈逐年增长的趋势。

目前,关于微塑料污染问题的研究大都集中在海洋和陆地水环境污染。关于微塑料在水环境中的赋存与分布研究主要集中于海洋^[9]、海岸^[10]、河口^[11]、河流^[12]和湖泊^[13]等,而且也广泛存在于沉积物中^[14];关于微塑料的水生生物生态毒性效应研究主要集中在贻贝、斑马鱼等海洋生物物种^[15,16]。关于微塑料土壤污染问题的研究还相对缺乏^[17],但是有研究表明微塑料能够改变土壤性质,影响植物生长性状^[18],陆地尤其是土壤中微塑料污染也应该引起足够重视^[7]。有研究表明,陆地中存在的微塑料丰度可能是海洋中的 4-23 倍,并且农地土壤中的微塑料输入量远超海洋中的微塑料输入量^[19]。迄今,有多项研究表明陆地土壤环境中广泛存在微塑料污染^[20,21]。

目前针对微塑料污染综述研究的主要环境介质为水环境,并且主要综述内容为微塑料在水环境中的分布、检测方法与水生生物毒性等方面的研究进展^[22,23]。关于土壤中微塑料污染的研究本身就相对缺乏,而土壤微塑料污染的综述研究就更加缺乏,仅有的综述文章也仅从微塑料在土壤中的分布、检测方法、对土壤生态系统的影响等方面进行了单方面的综述^[24-26]。再者,微塑料研究日新月异,文献发表量每年呈倍数增长,新的研究发现不断涌现,新的认知不断迭代,需要不断总结最新研究进展。针对任何一种污染物研究的最终目标是一致的,即科学预防和治理污染物对环境带来的损害。本文从土壤微塑料污染防治的整体视角综述了土壤微塑料的定义、检测方法与发展、微塑料在土壤中的赋存分布与来源及其土壤生物毒性效应,进一步综述了土壤微塑料的污染防治措施,并基于此展望了未来的研究重点与方向,旨在为土壤微塑料污染防治体系构建提供有价值的参考。

1. 微塑料的定义与土壤微塑料的检测方法

具体地,微塑料指的是尺寸在 100 nm - 5 mm 之间的塑料碎片或颗粒,微塑料会进一步分解成纳米级塑料(<100 nm),又称纳米塑料^[27]。研究发现,微(纳米)塑料的主要组成成分为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、聚乳酸(PLA)及聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等聚合物^[26]。

土壤微塑料检测方法的发展晚于其他介质,比如海水、淡水、沉积物、生物体等^[24]。目前土壤微塑料检测方法主要包括两步,即土壤微塑料的分离、土壤微塑料的检测。土壤微塑料的分离方法又包括筛分-分选-移除有机质及其他土壤成分、提取微塑料,其中筛分-分选-移除有机质及其他土壤成分的方法主要有酸处理法(HNO_3 、 HCl 、 $\text{HNO}_3+\text{HClO}_4$)、碱处理法(NaOH 、 KOH)、酶消解法(蛋白酶 K、蛋白酶 A-01、脂肪酶、纤维素酶(与 H_2O_2 处理联用))、氧化法(H_2O_2)、静电分离法;提取微塑料的方法主要有加压流体萃取法^[17,24]。微塑料的定量检测方法主要有傅立叶红外光谱法(FT-IR)、拉曼光谱法及 Pyr-GCMS 热解

分析法,但是以上方法的应用都受到土壤成分复杂程度以及方法本身发展阶段的限制,亟需加强土壤微塑料检测方法与标准的研究^[17, 24]。

2. 土壤微塑料的赋存与分布

大部分塑料垃圾最终流入海洋或被丢弃在陆地上。有研究表明,在 1950-2015 年间,全球大约产生了 63 亿吨塑料垃圾,其中接近 50 亿吨塑料垃圾被填埋或者滞留在环境中^[28]。由于历史排放原因,次生微塑料会不断被降解产生,同时初生微塑料仍不断产生,造成了土壤环境中微塑料的不断累积。有证据表明,低温、低氧环境、覆盖于水下或埋于土壤中等环境将阻碍塑料的碎片化,土壤环境中光氧化途径的塑料碎片化过程将极其缓慢,所以普遍认为土壤是微塑料的储存库^[29]。关于土壤微塑料赋存和分布情况的研究还相对匮乏。如图 1 所示,通过标题关键词“microplastic、marine (river/soil/estuary/beach/lake)”检索 Web of Science 数据库文献检索发现,海洋微塑料污染是最受研究者关注的领域,土壤微塑料研究是起步最晚的。与其研究热度相反的是,土壤中微塑料的含量可能是海洋的 4-23 倍,并且每年向土壤中输入的微塑料量也高于海洋^[19]。

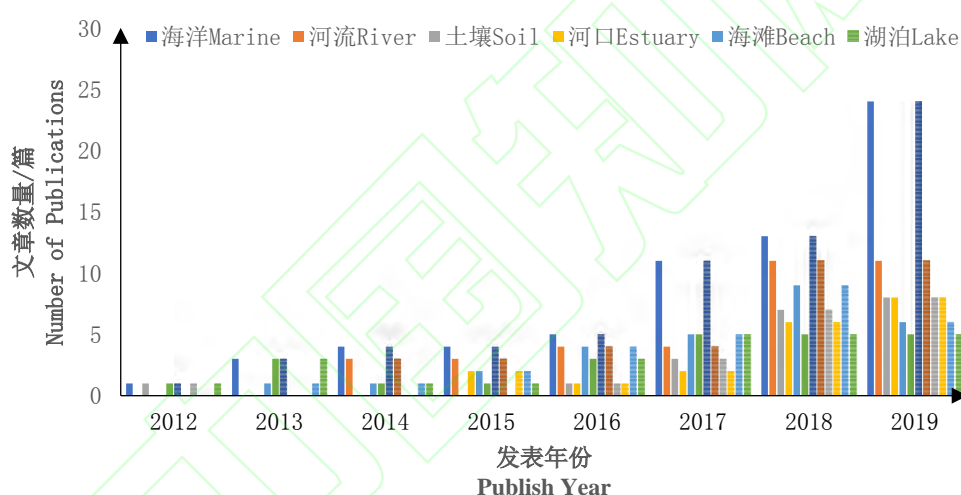


图 1 基于 Web of Science 数据库的微塑料赋存介质研究情况统计

Figure 1 Statistics on research of the occurrence of microplastics medium based on Web of Science database

迄今,为数不多的几项研究表明,土壤环境中存在相当高丰度的微塑料。Fuller 和 Gautam 对澳大利亚悉尼某工业区土壤调查表明,微塑料含量最高可达 6.7%^[30];在瑞士平原地区也发现 90%的土壤样品存在微塑料污染^[31];墨西哥东南部的传统家庭菜园中也检测到微塑料污染,丰度为 2770 个/kg,主要成分以聚乙烯和聚苯乙烯为主^[32];有些热点地区土壤中微塑料含量甚至高达 60%^[32]。我国土壤环境中同样也检测到了微塑料污染。上海郊区菜地中微塑料的主要成分为聚丙烯和聚乙烯,表层土(0-3 cm)和深层土(3-6 cm)的含量分别为(78.00±12.91)个/kg 和(62.50±12.97)个/kg^[20];我国黄土高原检出微塑料含量为 <0.54 mg/kg^[33];我国云南省西南滇池河岸森林缓冲带中检测到主要成分以聚乙烯和聚丙烯为主的微塑料污染,丰度为(7100-42960)个/kg^[34]。已有证据表明,我国土壤环境中存在着微塑料污染,但是现有研究仍较为缺乏而不足以刻画微塑料污染的分布特征。

3. 土壤微塑料的来源

土壤环境中微塑料的来源主要包括塑料薄膜和地膜等在农业生产上的使用、作物种植施肥、灌溉用水、污泥的使用以及大气沉降等。

3.1 塑料薄膜和地膜

塑料薄膜和地膜主要成分为聚氯乙烯和聚乙烯，因其显著的经济效益，如高产、早收、提高果实质量和提高水利用效率，已成为一种全球应用的农业生产方式，然而作物收获后残留在土壤中可能会破碎成微塑料，尤其是不合格地膜的使用，对土壤造成了严重的污染和损害^[35]。塑料薄膜和地膜进入土壤以后，会经历物理破碎、化学分解和生物降解等多个过程，并最终转化为微塑料。近年来，全球农用薄膜的市场应用增长迅速，我国塑料薄膜和地膜的使用量也逐年增加，根据《中国农村统计年鉴》统计数据显示，我国 2017 年农用塑料薄膜使用量达到 252.8 万吨，其中地膜使用量为 143.7 万吨，与 2000 年相比分别增加了 89.31% 和 98.92%。有研究表明，我国塑料薄膜和地膜使用量不断增加，大量的残留物滞留在土壤中^[36,37]，逐步破碎、分解、降解为微塑料，土壤微塑料含量达到 72 公斤/公顷至 260 公斤/公顷^[38]，成为土壤微塑料的一个主要来源。

3.2 有机肥料

通常地，有机废弃物经过堆肥、发酵后作为营养物质被施用到农田中，实现了营养物质、微量元素和腐殖质的再次利用，原则上是一种环保的农业生产方式。然而，在有机肥料的生产过程中，大多数国家允许一定数量的其他物质存在，比如微塑料，例如德国是世界上对肥料质量规定最严格的国家之一，它允许肥料中含有占总重量不超过 0.1% 的塑料，并且对于直径小于 2 mm 的塑料颗粒并未考虑在内^[39]。因此，施用有机肥料可能是一种不容忽视的土壤微塑料来源之一。虽然有机肥中微塑料的研究报道较少，但已有相关研究表明有机肥料中含有微塑料。Weithmann 等研究发现虽然有机肥料的不同生产方式和生产环节微塑料含量有所差别，但生物废弃物发酵和堆肥产生的有机肥料普遍含有微塑料，其中粒径大于 1 mm 的约有 14—895 个/kg^[40]。堆肥在全世界被广泛应用，近十年欧盟的使用量不断增加^[41]，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使用量就均在 2000 万吨以上，有研究保守估算我国通过有机肥每年投入到农田土壤中的微塑料总量在 52.4-26400 吨^[5]，微塑料通过有机肥进入土壤中的途径值得警惕。

3.3 灌溉用水

大部分农作物在生长过程中对水资源都有较高的要求，灌溉用水是农业种植过程中十分重要的资源。就全球范围看，灌溉用水的主要来源有地表水、地下水和净化后的污水，我国的灌溉用水也主要来源于以上三种，但部分水资源匮乏地区存在农田污灌现象。关于海洋水体中微塑料含量的研究已开展较多，研究结果大都呈现出较高的微塑料丰度^[42,43]。同样地，微塑料在我国被调查的内陆水系中也普遍存在，在发达地区微塑料含量较高，其中次生微塑料是主要来源^[44]。Luo et al.在长江三角洲调查发现，淡水水体中微塑料的丰度（1800-2400 个/m³）高于河口和近岸水体（900 个/m³），小型淡水水体中微塑料污染比河口和沿海水域更严重^[45]。灌溉用水的地表水来源主要有河流和湖泊。在我国，有多条河流检测出微塑料的存在，长江口表层水中微塑料的平均丰度为 4137 个/m³，长江、汉江武汉段微塑料丰度分别为（2516.7±911.7）个/m³ 和（2933±305.5）个/m³，台风前后闽江口微塑料丰度分别为（1170.8±953.1）个/m³ 和（1245.8±531.5）个/m³，椒江和瓯江表层水微塑性丰度分别为（680±284.6）个/m³ 和（955.6±848.7）个/m³，甚至在青藏高原的河流表层水中也检测到微塑料的存在，丰度为 483 个/m³ 至 967 个/m³^[46-49]；我国湖泊中也有大量的微塑料检出，已有的研究报道包括太湖、鄱阳湖和系列小型湖泊等，太湖地表水样品中微塑料的丰度为 3400-25800 个/m³，长江中下游的鄱阳湖、巢湖、高邮湖等湖泊表层水中微塑料丰度为 500-3100

个/ m^3 ^[50, 51]。地下水是灌溉用水的另一个主要来源, 也有研究报道了地下水微塑料的污染, 其中美国的伊利诺伊州地下水中微塑料污染的最高丰度为 15200 个/ m^3 , 另有研究发现盐井来源的食用盐中检测出了大量的微塑料, 综上, 地下水受到了一定程度的微塑料污染^[52]。虽然污水处理过程能处理大量的微塑料, 但净化后的污水中仍存在浓度较高的微塑料, 日化用品中添加的微塑料和次生微塑料是污水中微塑料的主要来源, 有研究表明污水原水和处理后的水中微塑料含量分别高达 3160000 个/ m^3 和 125000 个/ m^3 , 显著高于已报道的地表水和地下水微塑料丰度水平^[53]。综上, 灌溉用水可能是土壤中微塑料污染的一个重要来源。

3.4 污泥

污泥是污水处理厂的终端产物, 其中富含有机质和微量元素, 因而通常被当作肥料施用到农田中。污水处理厂的来水主要包括工业废水、生活废水、雨水等, 污水中大部分微塑料通过污水处理的沉降过程分离出来, 最终夹带在污泥中^[54]。A. M. Mahon 等检测了爱尔兰的七个污水处理厂污泥中微塑料含量发现, 其丰度为 4196 个/kg 至 15385 个/kg^[54]。另有研究表明, 欧洲每年每百万居民大约产生 125-850 吨的微塑料通过污泥排入到农田土壤中^[55], 同样的污泥中含有微塑料的证据也在美国、澳大利亚、芬兰、德国、法国、智利被发现^[56, 57]。综合多项研究结果推知污泥中的微塑料平均含量约为 170900 个/kg^[53]。在我国, 污泥中微塑料含量的研究报道也屡见不鲜。Xiaowei Li 等在我国 11 个省份 28 个污水处理厂采集了污泥样本, 检测结果显示全部样本污泥中微塑料平均含量为 (22700 ± 12100) 个/kg (干污泥) 并核算了我国每年大约有 1.56×10^{14} 个微塑料颗粒通过污泥进入环境中^[58]。据计算, 2015 年我国污泥总产生量约为 4000 万吨 (含水率 80%), 随着污水处理能力提高和污水处理厂数量增加, 污泥总产生量也稳步增长, 年增长量约为 13%, 根据预测 2020 年污泥产生量将约为 6000 万吨^[58]。我国城镇污水处理厂污泥处理技术标准 (征求意见稿) 规定: 污泥土地利用可分为园林绿化、农用、土地改良、林地利用等, 污水处理厂的污泥被用作肥料施到农田中, 此外研究表明有部分污泥倾倒不当, 更加加剧了土壤微塑料污染问题^[54]。

3.5 大气沉降

大气传输是微塑料在偏远地区沉积的重要途径, 密度较小的大塑料颗粒和微塑料颗粒会被风带入到土壤环境中^[59]。在偏远地区, 包括极地、青藏高原和马里亚纳海沟最深处, 已经检测到了微塑料的存在, 并且海冰中的微塑料含量特别高^[49, 60], 大气传输成为微塑料向偏远地区尤其是人迹罕至地区迁移的主要途径。最近的研究显示, 在巴黎、东莞、上海、汉堡等城市的大气沉降物中检测到了微塑料, 纤维通常是大气微塑料的主要形状, 在汉堡, 碎片被发现是相对于纤维的主要形状^[61, 62], 这些大气微塑料有可能从城市源头(城市)运输到其他地区, 特别是人类活动和工业稀少的偏远地区。现有研究已证实大气沉降是土壤微塑料的主要来源之一, 但关于大气沉降中微塑料的研究还相对缺乏, 也有研究提出需进一步加强微塑料的大气传输范围、沉降通量、源解析等方面的研究^[63]。

4. 微塑料对土壤生物的毒性效应

目前, 研究者已对微塑料毒性效应和环境影响开展了较为广泛的研究, 但是大多数研究主要集中在微塑料对水生生物的影响研究上^[55]。土壤中的微塑料可以被土壤动物摄入和转移, 对土壤动物自身产生不利影响并随食物链传递、富集, 微塑料对土壤生物影响的研究还相对缺乏^[24]。一般地, 土壤生物包括生活在土壤中的微生物、动物和植物。进一步细分, 土壤微生物包括细菌、真菌、放线菌和藻类, 土壤动物主要为无脊椎动物包括环节动物、节肢动物、软体动物、线形动物和原生动物。当前已报道的研究已经涉及多门类土壤生物, 但对于土壤生态系统影响描述的基础数据仍显不足^[64]。基于土壤微塑料研究的文献计量分析结果显示, 微塑料的毒性效应研究越来越多地关注微塑料和其他毒性物质的联合毒性效应, 出

现频次较高的其他毒性物质关键词有持久性有机污染物、重金属和抗生素等^[25]。总体而言，关于微塑料毒性效应的研究，目前可大致分为自身毒性效应研究和负载毒性效应研究^[26]。

4.1 自身毒性效应

目前，关于微塑料对土壤细菌和真菌的关键影响和具体机制还不清楚，但是有研究表明微塑料会成为微生物群落的新栖息地，而且依附在微塑料上的微生物群落与周边环境中的微生物群落存在显著差异，并有独特于周边环境的细菌群落出现^[65]。微塑料被土壤中的变形虫、纤毛虫和鞭毛虫等原生动物摄入也已得到研究证实，就生物效应而言，根据已有研究可推测微塑料对原生动物的影响主要通过影响它们摄食对象（细菌、真菌以及其他原生动物）的特征实现^[64]。土壤生态系统是土壤生物的重要栖息地，土壤生物无意识摄入微塑料后无法消化，将阻碍其肠道的食物吸收功能^[66]，并产生其他的生物效应。通过设置食物链模型研究了以白符跳(*Folsomia candida*)、尖狭板螨(*Hypoaspis aculeifer*)、珠甲螨(*Damaeus exspinosus*)为代表的土壤节肢动物对微塑料的生物效应，结果显示三种节肢动物均促进了微塑料颗粒在土壤生态系统中的扩散，并且观察到了白符跳(*Folsomia candida*)对微塑料的回避行为^[67]。另一项研究也再次证实了白符跳(*Folsomia candida*)对微塑料的回避行为，并进一步揭示了微塑料对白符跳(*Folsomia candida*)的生长和生殖毒性效应并能改变他们的肠道微生物菌群^[68]，类似生物效应也被其他研究证实^[69]。

蚯蚓是微塑料土壤动物毒性效应研究关注的最为广泛的模式物种之一，目前已有较多研究报道。Esperanza Huerta Lwanga 等以陆正蚓(*Lumbricus terrestris*)为受试物种通过设置系列微塑料浓度梯度量化研究了蚯蚓对微塑料的运输和沉积特征，证实了蚯蚓对小粒径微塑料的向地下运输作用^[70]，同时有研究显示高浓度的微塑料会显著降低陆正蚓(*Lumbricus terrestris*)的生长速度^[71]。然而，以赤子爱胜蚓(*Eisenia andrei*)为受试物种、微塑料浓度区间为 0-1000 mg/kg 的研究显示，虽然微塑料导致了蚯蚓的肠道组织损伤和激发了免疫系统，但是直至培养 28 天后也未观察到微塑料对蚯蚓的存活、幼体数量和体重有显著影响^[72]。除了蚯蚓以外，微塑料对土壤寡毛类环节动物(*Enchytraeus crypticus*)的毒性效应也被证实，微塑料明显抑制了它们的生长并且显著地改变了它们的肠道微生物菌群^[73]。对于植物而言，有研究证实土壤微塑料阻碍植物根系对水分和养分的吸收并显著改变植物生物量、组织元素组成、根系性状和土壤微生物活性^[25]。因此，系列研究结果显示微塑料自身对土壤生物具有一定的毒性效应。

4.2 负载毒性效应

研究表明微塑料在其环境行为上扮演着环境污染物载体的角色，目前已经在微塑料表面检测到持久性有机污染物（邻苯二甲酸酯类、多溴联苯醚、多环芳烃等）、重金属（As、Cu、Zn 等）、抗生素（四环素、阿莫西林、环丙沙星等）等环境污染物，间接对土壤生物产生毒性影响^[74, 75]。相较于微塑料毒性效应研究进展，微塑料上负载的污染物毒性效应的研究已经展开了多物种、多技术、多层次的广泛研究，并已证实这些类负载污染物分别具有一定的毒性效应，因此，微塑料负载毒性效应成为目前研究的关注重点，并且研究主要集中在微塑料与负载污染物的吸附行为与复合作用下的毒性效应研究上。

微塑料具有比表面积大和疏水性等物理性质。迄今为止，已有较多研究报道微塑料对土壤中不同类型环境污染物具有不同的吸附行为。Huffer 等研究表明微塑料的疏水性与脂肪族物质的吸附系数密切相关^[76]，另有研究证实土壤中塑料上的有机污染物浓度高于周围土壤环境^[77]，说明塑料颗粒对有机污染物具有较强的吸附能力。但有研究将蚯蚓(*Eisenia fetida*)分别暴露于仅含有多溴联苯醚的土壤和同时添加微塑料和多溴联苯醚污染的土壤中，实验结果显示添加微塑料对蚯蚓体内多溴联苯醚浓度没有明显影响^[78]。虽然重金属元素的物理和

化学性质多样,但微塑料在自然环境中风化、破碎、分解的过程中会使其表面带有电荷,普遍认为微塑料对金属阳离子具有吸附作用^[79]。研究发现微塑料对重金属 Zn 有较强的吸附作用,虽然在自然环境中微塑料和土壤对 Zn 的解析量都很小,但是在陆正蚓(*Lumbricus terrestris*)的肠道中微塑料对 Zn 的解析量(40%-60%)高于土壤(2%-15%),微塑料可以显著地提高 Zn 在蚯蚓体内的生物利用率,但是进一步的研究并没有发现微塑料会造成蚯蚓体内 Zn 累积、死亡和体重变化等证据^[80]。抗生素被广泛应用于医疗和畜禽养殖业,最终可能随着生活垃圾与生活污水等介质渗入到土壤环境中,抗生素和微塑料同时存在于土壤环境中,抗生素在微塑料上的吸附可能导致抗生素的远程迁移并且可能导致环境影响复合效应。研究发现微塑料的多孔结构和氢键导致各类抗生素对微塑料存在广泛的吸附行为,在淡水系统中 5 种微塑料(PE、PS、PP、PA、PVC)对 5 种抗生素(磺胺嘧啶、阿莫西林、四环素、环丙沙星、甲氧苄啶)的分布系数(K_d)值范围从(7.36±0.257)至(756±48.0)升/千克不等^[81],土壤中也可能存在相似的吸附机制。进一步地,有研究表明微塑料的不同老化程度对抗生素的吸附能力没有影响^[82],但是微塑料可以显著降低抗生素的降解速率^[83]。需要提及的是,关于微塑料与其他污染物的复合效应机理尚不明确,未来需要开展更多的复合效应机理研究。

5. 土壤微塑料的污染防治

鉴于土壤微塑料的赋存和分布特征,土壤微塑料的直接污染控制技术难度和经济成本较大,控制措施也鲜有研究关注。在土壤微塑料的间接污染控制方面,已有较多的技术研究和政策实践。在污水处理过程中,针对水体微塑料污染创新污水处理技术,降低出水中的微塑料含量,降低了灌溉水来源微塑料进入土壤中的风险^[84,85]。土壤微塑料的另一个主要来源是残存在土壤中塑料垃圾的破碎、分解和降解,针对塑料垃圾本身已经发展出了焚烧技术、填埋技术、分类回收和化学处理技术等多维度处理技术,从根源上减少了微塑料在土壤中的累积。在政策方面,2015 年联合国环境规划署倡议在化妆品和个人护理产品中逐步停止或禁止添加微塑料,意大利政府也宣布将从 2020 年 1 月起禁止化妆品行业添加微塑料颗粒。我国针对塑料污染也制定了系列政策,2007 年发布“限塑令”,2018 年禁止进口洋垃圾。2016 年《土壤污染防治行动计划》“土十条”和 2018 年 8 月颁布的《中华人民共和国土壤污染防治法》都对农膜利用和垃圾回收做出了规定。2018 年 11 月我国生态环境部、农业农村部联合印发的《农业农村污染治理攻坚战行动计划》指出,加强农村生产生活垃圾污染防治,试点地膜生产者责任延伸制度,力争到 2020 年实现 90%以上的村庄生活垃圾得到治理,农膜回收率达到 80%以上。综上,虽然已有系列技术和政策措施通过间接的方式降低微塑料的产生,但是鲜有直接从微塑料污染防控角度制定的环境保护政策。

6. 未来研究展望

近几年,土壤微塑料的研究增长迅速,研究主要集中于土壤微塑料的赋存与分布、来源以及自身和负载毒性效应等方面,但相关研究并不充分,仍不能明确解答所研究的科学问题。从微塑料污染防治框架的角度来看,目前微塑料污染防控的技术体系和宏观决策体系的研究仍为空白。综上,未来关于微塑料的研究应主要集中在以下两方面:

(1) 继续加强在土壤微塑料赋存与分布、来源以及自身毒性效应和负载毒性效应等方面的研究。该类研究为准确诊断微塑料对土壤环境的影响提供数据与证据,但是目前研究的广度和深度仍不够,主要表现在以下方面:一是微塑料检测方法多样,亟需加强微塑料检测标准制定的研究,统一检测方法;二是在研究对象方面,鲜有研究关注农用地膜对土壤微塑

料的贡献,而农用地膜使用广泛并且是土壤微塑料的直接来源;三是微塑料在土壤系统中的迁移机制是亟需回答的科学问题,而其物理、化学或生物过程主导的迁移机制研究较少;四是微塑料对土壤生物的毒性效应仍不明确,需继续加强模式生物毒性效应的标准化研究,并加强微塑料与其他污染物的复合污染毒性效应与机理研究。

(2) 加强微塑料污染防控技术和宏观决策体系研究。基于研究演化路径,需要依托于土壤微塑料的基础研究数据和证据的研究结果,目前基础研究数据库已初步成型,可以开展该方面研究以支撑决策制定,主要研究路径有以下几个方面:一是微塑料治理技术体系的构建,需要基于微塑料的物质特征与已相对成熟的塑料垃圾处理技术,针对性地建立和发展微塑料治理的技术体系;二是开展土壤微塑料的全链条物质流分析(Material Flow Analysis, MFA),通过构建物质流模型,定量研究土壤微塑料在环境中的源汇及各环节贡献,并且基于毒性学研究结果与全生命周期评价方法(Life Cycle Assessment, LCA),分环节分类别定量核算土壤微塑料的环境影响;三是基于以上研究结论和环境经济学原理,开展土壤微塑料产生的驱动因素分析和因果关系推断研究,为土壤微塑料污染治理防控的环境经济与管理政策制定提供科学参考。

参考文献

- [1] Carpenter E J, Anderson S J, Harvey G R, et al. Polystyrene Spherules in Coastal Waters[J]. *Science*, 1972, 178(4062): 749-750.
- [2] Barnes D K, Walters A, Gonçalves L. Macroplastics at sea around Antarctica[J]. *Marine environmental research*, 2010, 70(2): 250-252.
- [3] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at Sea: Where Is All the Plastic? [J] *Science*, 2004, 304(5672): 838-838.
- [4] Law K L, Thompson R C. Microplastics in the seas[J]. *Science*, 2014, 345(6193): 144-145.
- [5] 骆永明, 周倩, 章海波, 等. 重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险[J]. 中国科学院院刊, 2018.
LUO Yong-ming, ZHOU Qian, ZHANG Hai-bo, et al. Attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018.
- [6] Andrés C, Echevarría F, González-Gordillo J I, et al. Plastic debris in the open ocean[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(28): 10239-10244.
- [7] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J] *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(46): 6453-6454.
- [8] Jambeck J R, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347(6223): 768-771.
- [9] Lusher A L, Burke A, Connor I, et al. Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: validated and opportunistic sampling[J]. *Marine pollution bulletin*, 2014, 88(1-2): 325-333.
- [10] Carlos E, Miguel T B, Sergio M C, et al. Occurrence and identification of microplastics along a beach in the Biosphere Reserve of Lanzarote[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 143: 220-227.
- [11] Li H X, Ma L S, Lin L, et al. Microplastics in oysters *saccostrea cucullata* along the pearl river estuary, china[J]. *Environmental pollution*, 2018, 236: 619-625.
- [12] Hurley R J, Woodward, Rothwell J J. Microplastic contamination of river beds significantly reduced by catchment-wide flooding[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(4): 251.
- [13] Wang W F, Yuan W K, Chen Y L, et al. Microplastics in surface waters of dongting lake and hong lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 539-545.

- [14] Mani T, Primpke S, Lorenz C, et al. Microplastic pollution in benthic mid-stream sediments of the Rhine River[J]. *Environmental science & technology*, 2019.
- [15] Cole M, Coppock R, Lindeque P K, et al. Effects of Nylon Microplastic on Feeding, Lipid Accumulation, and Moulting in a Coldwater Copepod[J]. *Environmental science & technology*, 2019.
- [16] Carrasco A, José P, Diego Q A, et al. The influence of microplastics pollution on the feeding behavior of a prominent sandy beach amphipod, *Orchestoidea tuberculata* (Nicolet, 1849)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 145: 23-27.
- [17] 任欣伟, 唐景春, 于 宸, 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.
Ren Xin-wei, Tang Jing-chun, Yu Chen, et al. Advances in research on the ecological effects of microplastic pollution on soil ecosystems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1045-1058.
- [18] de Souza M A A, Lau C W, Kloas W, et al. Microplastics can change soil properties and affect plant performance[J]. *Environmental science & technology*, 2019.
- [19] Nizzetto L M F, Langaas S. Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin [J]? *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(20): 10777-10779.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Li J, Liu H, Chen J P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection[J]. *Water Research*, 2018, 137: 362-374.
- [23] Shahabaldin R, Junboun P, Mohd F M D, et al. Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies[J]. *Marine pollution bulletin*, 2018, 133: 191-208.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 杨婧婧, 徐笠, 陆安祥, 等. 环境中微 (纳米) 塑料的来源及毒理学研究进展[J]. *环境化学*, 2018, 37(3): 383-396.
Yang Jing-jing, Xu Li, Lu An-xiang, et al. Research progress on the sources and toxicology of micro (nano) plastics in environment[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(3): 383-396.
- [27] Chain E P. Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood[J]. *EFSA Journal*, 2016, 14(6): e04501.
- [28] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science advances*, 2017, 3(7): e1700782.
- [29] Duis K, Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2016, 28(1): 2.
- [30] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction[J]. *Environmental science & technology*, 2016, 50(11): 5774-5780.
- [31] Scheurer M, Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils[J]. *Environmental science & technology*, 2018, 52(6): 3591-3598.
- [32] Huerta L E, Mendoza V J, Ku Q V, et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 14071.
- [33] Zhang S L, Yang X M, Gertsen H, et al. A simple method for the extraction and identification of light density

- microplastics from soil. *Science of the Total Environment*, 2018, 616: 1056-1065.
- [34] Zhang G, Liu Y. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China[J]. *Science of the total environment*, 2018, 642: 12-20.
- [35] Ng E L, Esperanza H L, Simon M.E, et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 627: 1377-1388.
- [36] 薛颖昊, 曹肆林, 徐志宇, 等. 地膜残留污染防治技术现状及发展趋势. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1595-1600.
- Xue Ying-hao, Cao Si-lin, Xu Zhi-yu, et al. Status and trends in application of technology to prevent plastic film residual pollution[J]. *Journal of Agro-Envi —ronment Science*, 2017, 36(8): 1595-1600.
- [37] 严昌荣, 何文清, 薛颖昊, 等. 生物降解地膜应用与地膜残留污染防治. 生物工程学报, 2016, 32(6): 748-760.
- Yan Chang-rong, He Wen-qing, Xue Ying-hao, et al. Application of biodegradable plastic film to reduce plastic film residual pollution in Chinese agriculture. *Chin J Biotech*, 2016, 32(6): 748 – 760.
- [38] 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.
- [39] Kehres B, Aktuell H K, Änderung der Düngemittelordnung[J]. *BGK eV*, 2015.
- [40] Nicolas W, Julia N M, Martin G J L, et al. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment[J]. *Science Advances*, 2018, 4(4): eaap8060.
- [41] Bläsing M, Amelung W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 612: 422-435.1
- [42] Galloway T S, Cole M, Lewis C. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem[J]. *Nature ecology & evolution*, 2017, 1(5): 0116.
- [43] Saley A M, Smart A C, Bezerra M F, et al. Microplastic accumulation and biomagnification in a coastal marine reserve situated in a sparsely populated area[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 54-59.
- [44] Zhang K, Shi H H, Peng J P, et al. Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 630: 1641-1653.
- [45] Luo W Y, Su L, Nicholas C, et al. Comparison of microplastic pollution in different water bodies from urban creeks to coastal waters[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 174-182.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] Zhao S, Zhu L, Li D. Microplastic in three urban estuaries, China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 597-604.
- [49] Jiang C B, Yin L S, Li Z W, et al. Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 91-98.
- [50] Su L, Xue Y G, Li L Y, et al. Microplastics in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 711-719.
- [51] Su L, Cai H W, Prabhu K, et al. Using the Asian clam as an indicator of microplastic pollution in freshwater ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 347-355.
- [52] Panno S V, Kelly W R, Scott J, et al. Microplastic Contamination in Karst Groundwater Systems[J]. *Groundwater*, 2019, 57(2): 189-196.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin[J]? *ACS Publications*, 2016.
- [56] Corradini F, Pablo M, Raúl E, et al. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 411-420.
- [57] Browne M A, Crump P, Niven S J, et al. Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21): 9175-9179.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] Peeken I, Primpke S, Beyer B, et al. Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1505.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 侯军华, 檀文炳, 余红, 等. 土壤环境中微塑料的污染现状及其影响研究进展. 环境工程, 2019. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20191030.0915.002.html>.
HOU Jun-hua, TAN Wen-bing, YU Hong. Microplastics in soil ecosystem:a review on sources fate,and ecological[J]. *Environmental Engineering*, 2019. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20191030.0915.002.html>.
- [64] Rillig M C, Bonkowski M. Microplastic and soil protists: A call for research[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 1128-1131.
- [65] De Tender 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 & Technology*, 2015, 49(16): 9629-9638.
- [66] Peng J, Wang J, Cai L. Current understanding of microplastics in the environment: Occurrence, fate, risks, and what we should do[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, 13(3): 476-482.
- [67] 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.
- [68] Ju H, Zhu D, Qiao M. Effects of polyethylene microplastics on the gut microbial community, reproduction and avoidance behaviors of the soil springtail, *Folsomia candida*[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 247: 890-897.
- [69] 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 and Biochemistry*, 2018, 116: 302-310.
- [70] Huerta Lwanga E, Gertsen H, Gooren H, et al. Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 523-531.
- [71] 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.
- [72] Rodriguez-Seijo A, Lourençoet J, Rocha-Santos T A P, et al. Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 495-503.

- [73] 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.
- [74] Liu F F, Liu Z G, Zhu Z L, et al. Interactions between microplastics and phthalate esters as affected by microplastics characteristics and solution chemistry[J]. *Chemosphere*, 2019, 214: 688-694.
- [75] Wang J, Coffin S, Sun C L, et al. Negligible effects of microplastics on animal fitness and HOC bioaccumulation in earthworm *Eisenia fetida* in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 776-784.
- [76] 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.
- [77] Teuten E L, Rowland S J, et al. Potential for Plastics to Transport Hydrophobic Contaminants[J]. *Environmental Science & Technology*. 41(22): 7759-7764.
- [78] Gaylor M O, Harvey E, Hale R C. Polybrominated Diphenyl Ether (PBDE) Accumulation by Earthworms (*Eisenia fetida*) Exposed to Biosolids-, Polyurethane Foam Microparticle-, and Penta-BDE-Amended Soils[J]. *Environmental Science & Technology*. 47(23): 13831-13839.
- [79] Badow N, Will V, Wachtendorf V, et al. Contaminant release from aged microplastic[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 14: 394.
- [80] 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*. 51(8): 4714-4721.
- [81] Li J, Zhang K, Zhang H. Adsorption of antibiotics on microplastics[J]. *Environmental Pollution*. 237: 460-467.
- [82] 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]. *Environmental Research*. 166: 377-383.
- [83] Sun M M, Ye M, Jiao W T, et al. Changes in tetracycline partitioning and bacteria/phage-mediated ARGs in microplastic-contaminated greenhouse soil facilitated by sophorolipid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 345: 131-139.
- [84] Talvitie J, Mikola A, Koistinen A, et al. Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies[J]. *Water Research*, 2017, 123: 401-407.
- [85] Sun J, Dai X H, Wang Q L, et al. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal[J]. *Water Research*, 2019, 152: 21-37.