

DOI: 10.5846/stxb202104191019

李敏, 杨磊, 赵方凯, 陈利顶. 城乡景观中土壤生态系统微塑料的来源、迁移特征及其风险. 生态学报, 2022, 42(5): 1693-1702.

Li M, Yang L, Zhao F K, Chen L D. Identifying the sources, migration and risks of microplastics in soil ecosystem along urban-rural landscape. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1693-1702.

城乡景观中土壤生态系统微塑料的来源、迁移特征及其风险

李 敏^{1, 2}, 杨 磊^{1, 2}, 赵方凯^{1, 2}, 陈利顶^{1, 2, *}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 土壤微塑料污染的持久性、复杂性及其对土壤生态系统的影响受到越来越广泛的关注, 但对其来源、迁移过程等仍有许多问题尚未理清。从复合生态系统的角度, 通过对城乡景观中土壤微塑料的来源、迁移过程及其风险等相关研究进展进行了系统梳理, 分析了城乡不同景观中土壤微塑料的主要来源和特点, 讨论了土壤微塑料在城乡景观中的迁移特征及其驱动力, 探讨了土壤微塑料在城乡景观中的生态和健康风险。今后需进一步明确城乡景观中土壤微塑料污染的物质流过程与环境归趋特征, 加强微塑料对土壤生态系统的作用过程及生态系统服务影响的研究, 揭示土壤微塑料对人类健康的直接或间接影响, 建立城乡复合生态系统土壤微塑料污染预测模型, 以维护土壤生态安全与人居环境健康。

关键词: 土壤微塑料; 城乡景观; 来源识别; 迁移过程; 土壤生态安全

Identifying the sources, migration and risks of microplastics in soil ecosystem along urban-rural landscape

LI Min^{1, 2}, YANG Lei^{1, 2}, ZHAO Fangkai^{1, 2}, CHEN Liding^{1, 2, *}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Microplastics, as an emerging pollutant, have been widely concerned by public and science community because of its persistence, complexity in environment and significant influences on soil ecosystem. Identifying the sources, migration and risks of soil microplastics along urban-rural landscape has becoming an urgent issue. Based on recent published literatures on soil microplastics, this study reviewed the sources, migration characteristics and ecological risks of soil microplastics in urban-rural environment by considering the dynamics of urban-rural complex ecosystem. The main sources and input characteristics of soil microplastics in different landscapes along urban-rural landscape were analyzed. The migration characteristics and driving forces of soil microplastics in urban-rural landscape were demonstrated. Furthermore, effects of soil microplastics on ecological and healthy risks were discussed. This study suggested that the impacts of soil microplastics on terrestrial ecosystem should be clearly explored as a critical issue for current studies and identifying the material flow process and environmental fate of soil microplastics in urban-rural environment can provide effective solutions. The direct and indirect impacts of microplastics on human health in different landscape patterns are widely concerned by public and are also an urgent issue to be explored. Furthermore, modelling on soil microplastics contamination based on its spatial and temporal variability in urban-rural complex ecosystem is another critical issue and should be highlighted for future study.

基金项目: 中国科学院青年创新促进会项目(2018057); 国家自然科学基金(41590841)

收稿日期: 2021-04-19; 网络出版日期: 2021-08-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@rcees.ac.cn

Key Words: soil microplastics; urban-rural landscape; source identification; migration process; soil ecological security

塑料制品被广泛应用于生产生活的同时也产生了大量塑料垃圾,报道显示全球塑料垃圾仅有 9% 被回收利用,12% 被焚烧,绝大部分则被堆积在垃圾填埋场或自然环境中,并且预测表明至 2050 年全球约有 12000 Mt 塑料垃圾将被排放到环境中^[1]。大量塑料废弃物在环境中经过各种物理、化学或生物作用形成微塑料颗粒,可以通过多种途径直接或间接地危害生态系统安全和人类健康^[2]。目前微塑料对海洋、淡水、河口等水生生态系统的影响受到了较为普遍的关注^[3-5]。然而海洋环境中的大部分塑料颗粒(约每年 4.8—12.7 Mt)来源于陆地生态系统^[6],并且排放到陆地生态系统中的微塑料约为排放到海洋中的 4—23 倍^[7]。微塑料在土壤中具有普遍性和持久性^[8],但目前对土壤生态系统中微塑料的研究却相对较为有限^[2]。

微塑料不仅能改变土壤的物理、化学性质,还能与土壤生物(动物、植物和微生物)相互作用并影响其生态功能^[2]。土壤微塑料作为城乡景观中的一种新型污染物,其来源、迁移特征及其对生态系统和人类健康的影响已成为当前公众和科学研究共同关注的焦点,但目前还有诸多问题有待系统和深入地探讨。土壤作为一个复杂的综合体,受到自然、社会、经济等多重因素的共同影响,特别是在快速城市化过程中,人类活动不断加剧,人类活动范围不断扩张,形成了城市—城郊—乡村这一具有复杂格局和环境梯度的城乡复合生态系统,进一步影响了土壤生态过程及其功能^[9]。现有研究表明,土壤环境中微塑料的来源及其组成与城乡景观环境特征、人类活动以及社会、经济格局密切相关。例如,对全国 19 个省份的农业土壤微塑料研究发现,土壤微塑料的组成与农田覆膜基本一致^[10];对武汉城郊地区土壤微塑料的调查发现,这一区域土壤微塑料的丰度为 320—12560 个/kg,交通、生活垃圾和农业活动是城郊地区土壤微塑料污染的主要来源^[11]。从复合生态系统的角度来识别土壤微塑料在城乡景观中的分布、来源、迁移特征、污染状况及其生态和环境健康风险对于维护土壤健康、提升土壤生态系统服务具有重要的科学意义。基于此,本文梳理了城乡景观中土壤微塑料的来源、迁移过程及其特征,分析了土壤微塑料的生态风险,并对未来研究方向进行了展望,以期城乡复合生态系统土壤生态安全与人居环境健康提供科学参考。

1 城乡不同景观中土壤微塑料的来源及其特点

城乡复合生态系统中土壤微塑料的来源、分布及其迁移过程受到自然因素和人类活动的共同作用,尤其是社会、经济因素的影响,使得城乡景观中土壤微塑料的来源及其特点存在较大的差异。

1.1 城市区域

城市土壤中微塑料主要来源于生活废水再利用、大气沉降^[12]、轮胎磨损^[13]等。在城市环境中,经济发展水平较高,人口数量大,产生了大量生活废水,而生活废水中包含着大量微塑料颗粒。研究表明,人造合成纤维纺织品在洗衣过程中受到机械和化学作用会释放出微纤维^[14],家用洗衣机对衣物进行洗涤的过程中,每公斤衣物释放的微纤维量在 124—308 mg^[15]。另外,球形、螺纹或者不规则形状的微塑料颗粒常被添加到个人护理用品中,再通过洗涤等途径进入生活废水中^[16]。城市生活废水经过一定的处理后被用于灌溉土地^[17],对上海市大型污水处理厂的研究表明,其对生活污水中微塑料的去除率仅为 60% 左右^[18],这些残留的微塑料会通过废水再利用这一途径进入到城市土壤环境中。大气沉降也是微塑料进入城市土壤的重要方式^[12]。研究发现每年通过大气沉降到巴黎的纤维类微塑料大约有 3—10t,并且城市中微纤维的沉降量要比城郊高^[19]。在东莞、上海、汉堡等城市大气沉降物中也检测到了微塑料的存在^[20-21]。城市街尘中也普遍存在微塑料颗粒,例如伊朗 Asaluyeh(60000 个/kg)^[22]、Bushehr(21000—165800 个/kg)^[23]、Tehran(2766—20166 个/kg)^[24]等地区的街尘中均发现了微塑料,并且丰度较大,而其他地区如澳大利亚 Victoria(21—529 个/kg)^[25]、日本 Kusatsu(2500 个/kg)、尼泊尔 Kathmandu(3900 个/kg)、越南 Da Nang(4100 个/kg)^[26]等地区街尘中检测到的微塑料丰度则相对较低。道路上轮胎磨损产生的橡胶微粒可通过大气沉降或地表径流等形式进入道路及其周边土壤环境中^[26-27],并且受城乡交通流量差异的影响城市街尘中微塑料的丰度要远高于乡村街尘,使得城

市土壤中通过地表径流迁移导致的微塑料负荷要高于乡村土壤^[25]。以上研究可以看出,建立社会、经济活动的格局特征与土壤微塑料的关系,是土壤微塑料的来源识别和风险评估的科学基础。

1.2 城郊区域

城郊是城市生态系统与乡村/自然生态系统的交错地带,景观类型多样,结构复杂,使得土壤中微塑料污染较为复杂。城郊地区分布有一定面积的农田,并且靠近人类密集活动区,通常会有垃圾随意丢弃和堆积、污水灌溉、废弃物再利用等现象,成为微塑料进入土壤生态系统的主要途径。例如,有研究发现农用地膜及城市污泥施用是城郊菜地土壤微塑料的主要来源,在 0—3 cm 和 3—6 cm 土壤中微塑料的丰度分别为 (78.00 ± 12.91) 个/kg 和 (62.50 ± 12.97) 个/kg,主要形态为纤维、碎片和薄膜,多为黑色或透明色^[28]。还有研究证实城郊菜地土壤普遍受到微塑料的污染,并且微塑料丰度高于城市居民区土壤^[11]。城郊地区大量存在的垃圾填埋场也被认为是土壤中微塑料的重要来源。He 等^[29]在上海、无锡、苏州和常州四个地区城市固体废弃物堆填区的渗滤污水样本中发现了 17 种不同类型的微塑料,浓度为 0.42—24.58 个/L,99.36% 的微塑料来自垃圾填埋场的塑料垃圾碎片。然而需要注意的是,垃圾填埋场并不是微塑料的最终归宿,而是向土壤释放微塑料的一个潜在来源。城郊地区处于城市与乡村的交界地带,工业和农业活动同时存在使得城郊地区面临较高的土壤微塑料污染风险,对城郊用地进行合理规划和布局,有效降低土壤微塑料污染风险。

1.3 乡村/自然区域

乡村地区农田中的微塑料污染及其对土壤生态系统的影响是当前研究的热点。目前普遍认为农业生产活动(包括农用薄膜的使用、有机肥施用及污水灌溉等)是造成乡村地区农田土壤微塑料污染的主要驱动因素^[30]。农用薄膜具有保温、保湿、防虫和抑制杂草等作用,能大幅提高农作物产量,我国近几年农用薄膜使用量大大增加,从 2000 年的 1.33×10^6 t 增长到 2018 年的 2.47×10^6 t^[31],但残留在土壤中的地膜会逐步破碎裂解为微塑料颗粒,直接进入农田土壤中^[32]。

农田土壤中的微塑料还有一部分来自于土壤改良剂。污泥和以城市废弃物和畜禽粪便等加工而成的有机肥因其能为植物提供养分、改善土壤质量,增加土壤碳库等优势而被许多国家地区大力推广,但这些土壤改良剂中存在大量的微塑料,并且很难被去除^[33]。Li 等^[34]在我国 11 个省份 28 个污水处理厂采集污泥样本发现,干污泥中微塑料平均含量为 $22.7 \pm 12.1 \times 10^3$ 个/kg,按此估算我国每年大约有 1.56×10^{14} 个微塑料颗粒通过污泥进入到自然环境中。有机肥中也存在一定数量的微塑料,并且容易被忽视。Weithmann 等^[35]研究发现有机肥中直径大于 1mm 的塑料碎片在 14—895 个/kg,并以此保守估计德国每年有 350 亿—2.2 万亿个直径大于 1mm 塑料碎片通过有机肥施用进入到土壤中。我国是有机肥生产和使用的大国,经估算每年有机肥的施用将会导致 $52.4—2.64 \times 10^4$ t 微塑料进入到土壤中,若考虑粒径更小的微塑料颗粒,则土壤承接的微塑料将会更多^[36]。因此有机肥施用作为土壤微塑料的一个重要来源需要引起关注。污水灌溉也会导致农田生态系统土壤微塑料丰度的增加。有报道表明目前全球约有 3.59×10^5 km² 的农田灌溉都是使用未处理或者部分处理的城市污水^[37]。地表水灌溉农田也存在微塑料污染的风险,目前已有较多关于地表水中微塑料污染的研究,在我国河流湖泊中普遍检测到微塑料的存在^[38—40],甚至地下水中也存在一定的微塑料颗粒^[41]。通过以上案例可以看出,乡村、自然土壤同样受到微塑料的污染,特别是农田生态系统中土壤微塑料污染已经成为一个重要的环境问题,解析微塑料污染的源头、明确其在土壤—植物系统中的传输过程及其生态风险是保障农田生态系统可持续发展的关键(表 1)。

2 城乡景观中土壤微塑料的迁移特征

塑料作为一种完全由人类制造的材料,是由社会的需求驱动了生产,经济和社会因素又决定了其使用及其在空间上的布局,最后经人类活动释放到环境中的,微塑料在城乡景观中的组成、迁移及其驱动机制复杂且多样,并且受到社会经济因素影响下人类活动的强烈驱动(图 1)。微塑料在城乡景观中通过人为运输、大气输送和地表径流等途径进行迁移,其自身在土壤中也存在迁移现象,其中通过人类运输活动进行迁移是微塑料在城乡景观中迁移的主要特点。

表 1 不同景观中土壤微塑料的主要来源和特征

Table 1 The main sources and characteristics of soil microplastics in different urban-rural landscapes

地区 Region	研究区域 Research area	来源 Sources	丰度 Richness	特征 Characteristics	参考文献 References
城市 Urban	Yeoju(韩国)	道路旁	轮胎磨损,道路油漆,道路设施	以黑色橡胶碎片为主	[42]
		居民区	轮胎磨损,废水再利用	以黑色碎片和纤维为主	[42]
	London(英国)	街尘	大气沉降	主要形态为纤维,其次为薄膜,共检出 15 种聚合物,PAN 检出最多	[12]
	天津	城市绿地	—	以白色和绿色碎片为主,主要材质为 PP	[43]
	上海	菜地	农用地膜,城市污泥	主要形态为纤维、碎片和薄膜,多为黑色或透明色,主要材质为 PP 和 PE	[43]
城郊 Peri-urban	武汉	菜地	轮胎磨损,生活垃圾,农业活动	主要形态为微珠和纤维,颜色复杂,PA、PP、PS 占比最大。靠近道路菜地中微塑料丰度是靠近居民区菜地的 1.8 倍	[11]
	武汉	林地(靠近工厂)、空地、菜地	废物废水废气,农用地膜,生活垃圾,污水灌溉	PA、PE、PP 在不同类型土地中均普遍存在,主要形态为碎片和纤维	[44]
	Sydney(澳大利亚)	工业用地	塑料加工	微塑料主要材质为 PE、PS、PVC,微塑料的丰度与样点和工厂之间的距离有关	[45]
	Yeoju(韩国)	农业用地	地膜覆盖,一次性塑料使用	园地微塑料丰度最高,以碎片和薄膜为主,主要材质为 PP 和 PE	[42]
乡村/自然 Rural/nature	Yeoju(韩国)	森林	—	微塑料丰度较低,以黑色碎片为主	[42]
	杭州湾滨海平原	农田	污水灌溉、堆肥,塑料废弃物,地膜覆盖	微塑料以碎片型为主,其次为纤维型和薄膜型,材质以 PE、PP 为主	[46]
	Franconia(德国)	农田	农业设备、农业垃圾、有机肥,农用地膜	最常见的材质为 PE,形状以薄膜状居多,颜色多样	[47]
	Pyrenees mountainous(法国)	原始山区	大气沉降	主要形态为纤维和碎片,微塑料的材质以 PS、PE 和 PP 为主,微塑料在大气中的运输可以达到 95km	[48]

PAN: 聚丙烯腈 polyacrylonitrile; PP: 聚丙烯 polypropylene; PE: 聚乙烯 polyethylene; PA: 聚酰胺 Polyamide; PS: 聚苯乙烯 Polystyrene; PVC: 聚氯乙烯 Polyvinyl chloride

土壤微塑料会影响土壤的结构和性质,威胁土壤生物和植物的生长发育和繁殖,对土壤生态功能的维持产生不利影响。研究表明微塑料进入土壤后能够对土壤的结构、pH、有机质和团聚体等产生影响^[64],还会影响水分迁移过程^[65],改变土壤的营养成分^[66],对土壤结构和性质产生诸多负面影响。土壤生物(动物、植物和微生物)不仅会受到微塑料污染的直接威胁,而且还会由于土壤理化性质的改变,间接影响动物、植物、微生物的生长发育和繁殖。例如,有研究发现微塑料能够显著抑制蚯蚓的生长,并且能够观察到蚯蚓组织的病理学损伤,在暴露浓度在 1%—2% 时有致死效应^[67],微塑料还会阻塞土壤动物的洞穴,使其生存困难^[68]。有研究表明微塑料会阻塞植物种子的种孔和吸附在根毛上,从而影响植物种子的萌发和根的生长^[69],并且微塑料能够被植物根部吸收和富集,进而迁移到茎叶中^[70]。Bosker 等^[69]研究发现微塑料会使维管植物 *Lepidium sativum* 的发芽率显著下降,并且抑制根的生长。微塑料为微生物提供了新的生态位^[71],有研究发现微塑料能够富集病原菌^[72]从而带来较高的生态风险,微塑料引起的土壤理化性质变化会改变土壤微生物的生存环境,导致微生物群落结构和多样性的变化^[73]。

塑料在加工过程中通常会加入多种化学添加剂,如阻燃剂、增塑剂、染色剂等来增强塑料制品的应用性,因此塑料本身含有一些污染物^[74]。进入到土壤中的塑料制品,经过长期风化、紫外线照射、破碎裂解等变成微塑料颗粒,在这个过程中塑料中的有毒物质可能会释放到土壤中^[75]。有研究表明 PS^[76]、PVC^[77] 和聚碳酸酯(PC)^[78] 可以释放有毒单体,而这些单体可以导致人类、啮齿动物和无脊椎动物的癌症和生殖异常。另外,土壤微塑料由于比表面积大、吸附位点多、表面官能团多等原因,在复杂的土壤环境中容易吸附重金属、多环芳烃、农药、抗生素、抗生素抗性基因等污染物^[2],从而使土壤污染加剧和复杂化,增加人类健康风险。此外,研究发现微塑料表面尤其是凹坑和薄片,易被各种土壤微生物定植^[79],使得微塑料可能成为致病菌的载体^[80],成为传播和富集病原体的媒介。

土壤微塑料可以通过食物链的传递和富集由乡村和城郊地区迁移至城市地区,从而给人类带来较高的健康风险,这一传输过程与微塑料人为运输的方向恰恰相反(图 2)。例如有研究揭示了食物链(土壤—蚯蚓—鸡)中微塑料的传递与富集状况,发现在土壤、蚯蚓、鸡的嗦囊和鸡粪中微塑料的浓度分别为 (0.87 ± 1.9) 个/g、 (14.8 ± 28.8) 个/g、 (10.2 ± 13.8) 个/g 和 (129.8 ± 82.3) 个/g^[81],微塑料从土壤到蚯蚓的富集系数为 12.7,从土壤到鸡粪的富集系数高达 105,从土壤到鸡的砂囊中的富集系数为 5.1^[36],证明了微塑料可以在食物链中进行传递和积累,从而通过食物摄取进入到人体中。李连祯

等^[70]发现 PS 微球($0.2 \mu\text{m}$) 可被生菜根部大量吸收和富集,并可以从根部迁移到地上部分,积累和分布在可被直接食用的茎叶之中。微塑料可以通过摄食、呼吸和皮肤接触等途径进入到人体中^[82],当微塑料颗粒进入到人体后,可能会通过颗粒毒性、化学毒性以及病原体 and 寄生虫媒介对人类健康造成不利影响^[83]。目前研究发现,微塑料进入人体后会被积累到肠道中,但也有少数微塑料通过肠道屏障进入到循环系统中^[84]。肠道中的微塑料可能会引起局部炎症,扰乱内分泌调节,影响人类正常的胃肠功能;另一方面,微塑料在肠道中的积累会破坏肠道微生物的群落组成和多样性,引起肠道微生物群落失调^[85–86],从而影响人类健康。有生理学研究表明,PS 纳米颗粒会影响人胃腺癌上皮细胞的活力、炎症基因表达和形态^[87]。此外,当上皮细胞暴露于微塑料或纳米塑料中时可能会出现氧化应激反应^[88]。还有研究发现 44nm 的 PS 纳米粒子进入胃腺癌细胞后会抑制细胞活力,强烈诱导 IL-6 和 IL-8 基因的上调,使细胞产生毒力基因^[87]。因此推测微塑料污染可能会使人体基因组或者行为方面产生不可预测的变化^[86]。土壤环境中微塑料污染通过食物、呼吸和接触等途径传递引起的呼吸道刺激、哮喘、肥胖、胃肠病及心血管疾病等^[89]都对人类健康造成严重威胁。

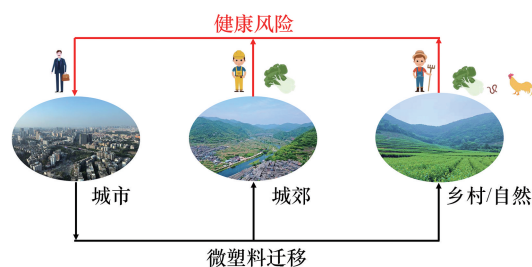


图 2 土壤微塑料的健康风险在城乡景观中的传递

Fig.2 The health risks transport of soil microplastics in urban-rural environment

4 未来研究展望

微塑料在土壤环境中的不断积累与迁移,会对土壤生态系统和人居环境产生深远的影响,但当前关于土壤微塑料的研究还处于探索和积累阶段。微塑料在土壤生态系统中的运移规律、对生态安全与环境健康的影响、土壤微塑料的时空模拟与风险评估等问题亟需深入研究,未来研究可以从以下几个方面重点开展:

(1) 阐明微塑料在城乡复合生态系统土壤中的分布特征和迁移规律。受城乡复合生态系统中景观格局、功能区划、人类活动、环境背景等多重因素的影响,土壤微塑料的来源广泛,在空间上的运移过程复杂,目前尚没有系统的没有研究揭示其迁移过程,特别是野外实验缺乏。未来研究中应该进一步明确不同尺度土壤微塑料的“源”、“流”、“汇”景观,考虑不同环境条件下社会、经济格局特征及其动态过程对环境中微塑料的产生、迁移过程的影响,明确城乡景观中微塑料的物质流过程及其在土壤环境中的富集特征,建立社会、经济、生态格局与微塑料产生和迁移过程的联系。

(2) 进一步明确土壤微塑料对土壤生态系统的作用机制及其对人类健康的影响。微塑料对多个重要土壤生态过程的影响并不十分清楚,微塑料进入土壤以及在土壤中长时间的富集对土壤生态功能的影响还需要进一步明确。未来研究中更需要进一步揭示土壤微塑料富集及其迁移过程对关键土壤生态服务的影响,明确其作用过程、机制与关键影响因素。微塑料对人类健康影响的研究也处于起步阶段,以研究模式生物和细胞为主,并且类型单一、剂量高,下一步应该更加全面和准确地评价微塑料的毒性效应,明确其健康影响机制。特别是在城乡复合生态系统中,微塑料常与其他污染物形成复合污染,具有多源头和复杂的迁移过程,使其生态风险和健康风险较高,城乡复合生态系统中土壤微塑料污染对人类健康的作用过程及其风险亟需进一步明确。

(3) 建立土壤微塑料迁移过程及其风险预测模型。目前还未建立科学的土壤微塑料污染风险评价体系,应基于土壤微塑料在城乡景观中的来源、迁移特征及其健康风险,结合城乡格局、功能分区、社会经济活动的空间布局及其流动特征,充分考虑环境背景构建土壤微塑料迁移过程及其污染风险预测模型,开展土壤微塑料污染的模拟预测,以更有针对性地减少土壤微塑料污染,充分考虑社会、经济、生态等因素的协同与权衡关系进行管控和治理,以提升城乡复合生态系统土壤安全、维护人居环境健康。

参考文献 (References):

- [1] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700782.
- [2] 朱永官, 朱冬, 许通, 马军. (微)塑料污染对土壤生态系统的影响: 进展与思考. *农业环境科学学报*, 2019, 38(1): 1-6.
- [3] 刘强, 徐旭丹, 黄伟, 徐晓群, 寿鹿, 曾江宁. 海洋微塑料污染的生态效应研究进展. *生态学报*, 2017, 37(22): 7397-7409.
- [4] Wang S M, Chen H Z, Zhou X W, Tian Y Q, Lin C, Wang W L, Zhou K W, Zhang Y B, Lin H. Microplastic abundance, distribution and composition in the mid-west Pacific Ocean. *Environmental Pollution*, 2020, 264: 114125.
- [5] Horton A A, Svendsen C, Williams R J, Spurgeon D J, Lahive E. Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK - Abundance, sources and methods for effective quantification. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 218-226.
- [6] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, Siegler T R, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law K L. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 2015, 347(6223): 768-771.
- [7] Horton A A, Walton A, Spurgeon D J, Lahive E, Svendsen C. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 127-141.
- [8] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 12-20.
- [9] 赵方凯, 杨磊, 陈利顶, 李刚, 孙龙, 李守娟. 城郊生态系统土壤安全: 问题与挑战. *生态学报*, 2018, 38(12): 4109-4120.
- [10] Huang Y, Liu Q, Jia W Q, Yan C R, Wang J. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114096.
- [11] Chen Y L, Leng Y F, Liu X N, Wang J. Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113449.

- [12] Wright S L, Ulke J, Font A, Chan K L A, Kelly F J. Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport. *Environment International*, 2020, 136: 105411.
- [13] Gieré R. Tire abrasion as a major source of microplastics in the environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, 18(8): 2014-2028.
- [14] Hernandez E, Nowack B, Mitrano D M. Polyester Textiles as a source of microplastics from households; a mechanistic study to understand microfiber release during washing. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(12): 7036-7046.
- [15] De Falco F, Di Pace E, Cocca M, Avella M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 6633.
- [16] Duis K, Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 2016, 28(1): 2.
- [17] Qadir M, Wichelns D, Raschid-Sally L, McCormick P G, Drechsel P, Bahri A, Minhas P S. The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(4): 561-568.
- [18] 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建锋. 大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除. *环境科学*, 2019, 40(9): 4105-4112.
- [19] Dris R, Gasperi J, Saad M, Mirande C, Tassin B. Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 104(1/2): 290-293.
- [20] Liu C G, Li J, Zhang Y L, Wang L, Deng J, Gao Y, Yu L, Zhang J J, Sun H W. Widespread distribution of PET and PC microplastics in dust in urban China and their estimated human exposure. *Environment International*, 2019, 128: 116-124.
- [21] Klein M, Fischer E K. Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 96-103.
- [22] Abbasi S, Keshavarzi B, Moore F, Turner A, Kelly F J, Dominguez A O, Jaafarzadeh N. Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran. *Environmental Pollution*, 2019, 244: 153-164.
- [23] Abbasi S, Keshavarzi B, Moore F, Delshab H, Soltani N, Sorooshian A. Investigation of microrubbers, microplastics and heavy metals in street dust: a study in Bushehr city, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(23): 798.
- [24] Dehghani S, Moore F, Akhbarizadeh R. Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(25): 20360-20371.
- [25] Su L, Nan B X, Craig N J, Pettigrove V. Temporal and spatial variations of microplastics in roadside dust from rural and urban Victoria, Australia: implications for diffuse pollution. *Chemosphere*, 2020, 252: 126567.
- [26] Yukioka S, Tanaka S, Nabetani Y, Suzuki Y, Ushijima T, Fujii S, Takada H, Van Tran Q, Singh S. Occurrence and characteristics of microplastics in surface road dust in Kusatsu (Japan), Da Nang (Vietnam), and Kathmandu (Nepal). *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113447.
- [27] Knight L J, Parker-Jurd F N F, Al-Sid-Cheikh M, Thompson R C. Tyre wear particles: an abundant yet widely unreported microplastic? *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(15): 18345-18354.
- [28] Liu M T, Lu S B, Song Y, Lei L L, Hu J N, Lv W W, Zhou W Z, Cao C J, Shi H H, Yang X F, He D F. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 855-862.
- [29] He P J, Chen L Y, Shao L M, Zhang H, Lü F. Municipal solid waste (MSW) landfill: a source of microplastics? -Evidence of microplastics in landfill leachate. *Water Research*, 2019, 159: 38-45.
- [30] 李鹏飞, 侯德义, 王刘炜, 吴唯民, 潘仕镇. 农田中的(微)塑料污染: 来源、迁移、环境生态效应及防治措施. *土壤学报*, 2021, 58(2): 314-330.
- [31] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴 2020. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [32] Liu E K, He W Q, Yan C R. 'White revolution' to 'white pollution'-agricultural plastic film mulch in China. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(9): 091001.
- [33] Zubris K A V, Richards B K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environmental Pollution*, 2005, 138(2): 201-211.
- [34] Li X W, Chen L B, Mei Q Q, Dong B, Dai X H, Ding G J, Zeng E Y. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China. *Water Research*, 2018, 142: 75-85.
- [35] Weithmann N, Möller J N, Löder M G J, Piehl S, Laforsch C, Freitag R. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science Advances*, 2018, 4(4): eaap8060.
- [36] 骆永明, 周倩, 章海波, 潘响亮, 涂晨, 李连祯, 杨杰. 重视土壤中微塑料污染研究 防范生态与食物链风险. *中国科学院院刊*, 2018, 33(10): 1021-1030.
- [37] Thebo A L, Drechsel P, Lambin E F, Nelson K L. A global, spatially-explicit assessment of irrigated croplands influenced by urban wastewater flows. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(7): 074008.

- [38] Su L, Xue Y G, Li L Y, Yang D Q, Kolandhasamy P, Li D J, Shi H H. Microplastics in Taihu lake, China. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 711-719.
- [39] Su L, Cai H W, Kolandhasamy P, Wu C X, Rochman C M, Shi H H. Using the Asian clam as an indicator of microplastic pollution in freshwater ecosystems. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 347-355.
- [40] Wang W F, Ndungu A W, Li Z, Wang J. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 1369-1374.
- [41] Panno S V, Kelly W R, Scott J, Zheng W, McNeish R E, Holm N, Hoellein T J, Baranski E L. Microplastic contamination in karst groundwater systems. *Groundwater*, 2019, 57(2): 189-196.
- [42] Choi Y R, Kim Y N, Yoon J H, Dickinson N, Kim K H. Plastic contamination of forest, urban, and agricultural soils: a case study of Yeosu City in the Republic of Korea. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(5): 1962-1973.
- [43] Han X X, Lu X Q, Vogt R D. An optimized density-based approach for extracting microplastics from soil and sediment samples. *Environmental Pollution*, 2019, 254: 113009.
- [44] Zhou Y F, Liu X N, Wang J. Characterization of microplastics and the association of heavy metals with microplastics in suburban soil of central China. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133798.
- [45] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5774-5780.
- [46] Zhou B Y, Wang J Q, Zhang H B, Shi H H, Fei Y F, Huang S Y, Tong Y Z, Wen D S, Luo Y M, Barceló D. Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: multiple sources other than plastic mulching film. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 121814.
- [47] Piehl S, Leibner A, Löder M G J, Dris R, Bogner C, Laforsch C. Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 17950.
- [48] Allen S, Allen D, Phoenix V R, Le Roux G, Jiménez P D, Simonneau A, Binet S, Galop D. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 2019, 12(5): 339-344.
- [49] Mahon A M, O'connell B, Healy M G, O'connor I, Officer R, Nash R, Morrison L. Microplastics in sewage sludge: effects of treatment. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(2): 810-818.
- [50] Zhang L S, Xie Y S, Liu J Y, Zhong S, Qian Y J, Gao P. An overlooked entry pathway of microplastics into agricultural soils from application of sludge-based fertilizers. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(7): 4248-4255.
- [51] Cai L Q, Wang J D, Peng J P, Tan Z, Zhan Z W, Tan X L, Chen Q Q. Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: preliminary research and first evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(32): 24928-24935.
- [52] Zhang Y L, Gao T G, Kang S C, Sillanpää M. Importance of atmospheric transport for microplastics deposited in remote areas. *Environmental Pollution*, 2019, 254: 112953.
- [53] Liu F, Vianello A, Vollertsen J. Retention of microplastics in sediments of urban and highway stormwater retention ponds. *Environmental Pollution*, 2019, 255: 113335.
- [54] Liu F, Olesen K B, Borregaard A R, Vollertsen J. Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 992-1000.
- [55] Zhang S L, Liu X, Hao X H, Wang J Q, Zhang Y. Distribution of low-density microplastics in the mollisol farmlands of northeast China. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 135091.
- [56] Rillig M C, Ingrassia R, de Souza Machado A A. Microplastic incorporation into soil in agroecosystems. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1805.
- [57] Rillig M C, Ziersch L, Hempel S. Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1362.
- [58] Lwanga E H, Gertsen H, Gooren H, Peters P, Salánki T, van der Ploeg M, Besseling E, Koelmans A A, Geissen V. Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 523-531.
- [59] Maaß S, Daphi D, Lehmann A, Rillig M C. Transport of microplastics by two collembolan species. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 456-459.
- [60] Gabet E J, Reichman O J, Seabloom E W. The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2003, 31: 249-273.
- [61] Li J, Song Y, Cai Y B. Focus topics on microplastics in soil: analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113570.
- [62] Cey E E, Rudolph D L, Passmore J. Influence of macroporosity on preferential solute and colloid transport in unsaturated field soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 107(1/2): 45-57.
- [63] 蒲生彦, 张颖, 吕雪. 微塑料在土壤-地下水中的环境行为及其生态毒性研究进展. *生态毒理学报*, 2020, 15(1): 44-55.

- [64] Boots B, Russell C W, Green D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(19): 11496-11506.
- [65] Wan Y, Wu C X, Xue Q, Hui X M N. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 576-582.
- [66] Yan Y Y, Chen Z H, Zhu F X, Zhu C Y, Wang C, Gu C. Correction to: effect of polyvinyl chloride microplastics on bacterial community and nutrient status in two agricultural soils. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 106(2): 236-236.
- [67] Cao D D, Wang X, Luo X X, Liu G C, Zheng H. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 61: 012148.
- [68] Kim S W, An Y J. Soil microplastics inhibit the movement of springtail species. *Environment International*, 2019, 126: 699-706.
- [69] Bosker T, Bouwman L J, Brun N R, Behrens P, Vijver M G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere*, 2019, 226: 774-781.
- [70] 李连祯, 周倩, 尹娜, 涂晨, 骆永明. 食用蔬菜能吸收和积累微塑料. *科学通报*, 2019, 64(9): 928-934.
- [71] Yang Y Y, Liu W Z, Zhang Z L, Grossart H P, Gadd G M. Microplastics provide new microbial niches in aquatic environments. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104(15): 6501-6511.
- [72] Wu X J, Pan J, Li M, Li Y, Bartlam M, Wang Y Y. Selective enrichment of bacterial pathogens by microplastic biofilm. *Water Research*, 2019, 165: 114979.
- [73] Guo J J, Huang X P, Xiang L, Wang Y Z, Li Y W, Li H, Cai Q Y, Mo C H, Wong M H. Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 2020, 137: 105263.
- [74] Hong S H, Shim W J, Hong L. Methods of analysing chemicals associated with microplastics: a review. *Analytical Methods*, 2017, 9(9): 1361-1368.
- [75] Kumar M, Xiong X N, He M J, Tsang D C W, Gupta J, Khan E, Harrad S, Hou D Y, Ok Y S, Bolan N S. Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114980.
- [76] Garrigós M C, Marín M L, Cantó A, Sánchez A. Determination of residual styrene monomer in polystyrene granules by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 2004, 1061(2): 211-216.
- [77] Marcilla A, Garcia S, Garcia-Quesada J C. Study of the migration of PVC plasticizers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2004, 71(2): 457-463.
- [78] vom Saal F S, Hughes C. An extensive new literature concerning low-dose effects of bisphenol A shows the need for a new risk assessment. *Environmental Health Perspectives*, 2005, 113(8): 926-933.
- [79] Zhang M J, Zhao Y R, Qin X, Jia W Q, Chai L W, Huang M K, Huang Y. Microplastics from mulching film is a distinct habitat for bacteria in farmland soil. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 470-478.
- [80] Kirstein I V, Kirmizi S, Wichels A, Garin-Fernandez A, Erler R, Löder M, Gerdt G. Dangerous hitchhikers? Evidence for potentially pathogenic *Vibrio* spp. on microplastic particles. *Marine Environmental Research*, 2016, 120: 1-8.
- [81] Lwanga E H, Vega J M, Quej V K, de los Angeles Chi J, del Cid L S, Chi C, Segura G E, Gertsen H, Salánki T, van der Ploeg M, Koelmans A A, Geissen V. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, 2017, 7: 14071.
- [82] 张羽西, 缪爱军. 微塑料对人体健康的影响概述. *南京大学学报: 自然科学*, 2020, 56(5): 729-736.
- [83] Vethaak A D, Leslie H A. Plastic debris is a human health issue. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(13): 6825-6826.
- [84] 杨婧婧, 徐笠, 陆安祥, 罗维, 李君逸, 陈伟. 环境中微(纳米)塑料的来源及毒理学研究进展. *环境化学*, 2018, 37(3): 383-396.
- [85] Fackelmann G, Sommer S. Microplastics and the gut microbiome: how chronically exposed species may suffer from gut dysbiosis. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 143: 193-203.
- [86] Teles M, Balasch J C, Oliveira M, Sardans J, Peñuelas J. Insights into nanoplastics effects on human health. *Science Bulletin*, 2020, 65(23): 1966-1969.
- [87] Forte M, Iachetta G, Tussellino M, Carotenuto R, Prisco M, De Falco M, Laforgia V, Valiante S. Polystyrene nanoparticles internalization in human gastric adenocarcinoma cells. *Toxicology in Vitro*, 2016, 31: 126-136.
- [88] Schirizzi G F, Pérez-Pomeda I, Sanchís J, Rossini C, Farré M, Barceló D. Cytotoxic effects of commonly used nanomaterials and microplastics on cerebral and epithelial human cells. *Environmental Research*, 2017, 159: 579-587.
- [89] Karbalaei S, Hanachi P, Walker T R, Cole M. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(36): 36046-36063.