

DOI:10.7524/AJE.1673-5897.20190923002

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[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(1): 44-55

Pu S Y, Zhang Y, Lv X. Review on the environmental behavior and ecotoxicity of microplastics in soil-groundwater [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(1): 44-55 (in Chinese)

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

蒲生彦^{1,2,3,*}, 张颖^{1,2}, 吕雪^{1,2}

1. 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059
2. 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室, 成都 610059
3. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

收稿日期: 2019-09-23 录用日期: 2019-10-29

摘要: 微塑料已成为一类新型污染物遍布全球各个角落, 由此产生的环境问题日趋严峻。第二届联合国环境大会上将微塑料污染列为环境与生态科学研究领域的第二大科学问题。目前大多数研究集中在海洋环境方面, 有关土壤-地下水系统中微塑料的环境行为及生态毒性相关研究还较为薄弱。本文基于大量文献调研, 较系统地回顾梳理了有关土壤-地下水中微塑料的来源、迁移归趋及其生态毒理效应的研究成果, 并对未来研究做出评述和展望, 旨在促进土壤-地下水系统中微塑料污染的相关研究。

关键词: 微塑料; 土壤-地下水; 生态毒性; 迁移归趋; 环境行为

文章编号: 1673-5897(2020)1-044-12 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Review on the Environmental Behavior and Ecotoxicity of Microplastics in Soil-Groundwater

Pu Shengyan^{1,2,3,*}, Zhang Ying^{1,2}, Lv Xue^{1,2}

1. School of Ecological and Environmental Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. State Environmental Protection Key Laboratory of Synergetic Control and Joint Remediation for Soil & Water Pollution, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, China Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Received 23 September 2019 accepted 29 October 2019

Abstract: As a new type of pollutant, microplastics have spread all over the world. Microplastic pollution was listed as the second largest scientific issue in the field of environmental and ecological science research at the Second United Nations Environment Conference. At present, most of the relevant researches mainly focused on the marine environment. However, the studies on microplastics pollution cycle in soil-groundwater systems are not well under-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772264)

作者简介: 蒲生彦(1981—), 男, 博士(后), 教授, 研究方向为生态环境基准与风险评估、土壤地下水污染协同修复, E-mail: pushengyan@gmail.com; pushengyan13@cdut.edu.cn

stood. This review summarizes the recent research progress of microplastics pollution sources, migration process and eco-toxicological effects in soil-groundwater systems. In addition, this article provides comments and perspectives to future study of microplastic pollution in soil-groundwater systems.

Keywords: microplastics; soil-groundwater; ecotoxicity; migration; environmental behavior

塑料因其质轻、化学性质稳定、不会锈蚀和耐磨耗性等特点,广泛应用于个人护理品、服装和医药等领域^[1],在为人类生活带来便捷的同时,因其在环境中难以自然分解导致了严重的环境问题。通常,<5 mm的塑料聚合物颗粒被定义为微塑料(microplastics, MPs)^[2]。1972—2012年期间,合成聚合物的产量增长了5~6倍,全球产量达2.88亿t^[3]。Carpenter等^[4]于1972年首次报道环境中存在塑料垃圾的存在,并在生物体中观察到了粒径<0.5 mm的球形微塑料。微塑料的分布已经遍布地球的各个角落,从海洋到饮用水,从赤道到南北极,从河流到地下水,都发现了它的存在。2016年召开的第二届联合国环境大会上,微塑料污染被列入环境与生态科学研究领域的第二大科学问题。这引起了国内外公众和媒体对微塑料健康影响的高度关注。有关海洋环境中塑料污染方面的研究已经较为成熟,有调查显示,目前全世界范围内有超过5万亿个塑料碎片漂浮在海面上,重约25万t^[5]。但相比之下,对其他环境介质(如大气、土壤和地下水)中类似的数据是缺乏的^[6]。有研究指出,每年存在于陆地环境中的微塑料质量可能超过40万t,远远超过了海洋和淡水环境中的微塑料总量^[7]。土壤地下水中微塑料污染情况及其生态毒性、健康风险逐渐成为一个新的全球性研究热点。

通常,根据化学组成将微塑料分为:聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚酰胺(PA)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)^[8],根据外貌形状不同又可分类为小球、碎片、颗粒、纤维、薄膜和聚苯乙烯泡沫塑料等。其中,微塑料纤维因其独特的形状而被大量集中研究^[1]。微塑料一般分为2种,初级微塑料和次生微塑料^[9-10]。初级微塑料是指带有目的性的由工业生产出来的尺寸<5 mm的塑料微粒,并作为工业所需的原料添加到生活用品中^[11]。存在于陆地、淡水和海洋等环境中的较大块塑料经太阳紫外线(UV)辐射而发生光氧化降解以及各种形式的物理磨损等作用碎裂成更小块的塑料残渣,称之为次生微塑料^[1]。初级微塑料到次生微塑料的转变,实质是颗粒尺寸的减小,更容易被

生物摄入,增加了对生物及人类健康的潜在影响。随着人们生活质量的提高,初级微塑料的来源也变得越来越复杂,更不易被识别。有研究者指出,对于微塑料的研究重点不是评估塑料颗粒的发生率和丰度,而是要分析评估颗粒上的污染物负荷^[1]。相比于沙滩、淡水和海洋等介质,从土壤中提取和分析微塑料等小型塑料的技术尚不成熟。微塑料在环境中不易降解,大部分最终会富集在环境中^[12],进入土壤中的微塑料可能会成为有机物和矿物替代品复杂混合物中的一部分,存留数百年或更长时间。一旦进入食物链将会严重影响陆生生态系统的健康和可持续发展,威胁到人类的食品安全和公众健康^[13]。地下水也会因为土壤中的微塑料输入和迁移而受到污染。迄今为止,关于土壤地下水中微塑料的来源、定量分析、迁移分布及生态毒性的研究很有限,具有巨大的挑战性^[14]。

本文基于现有研究微塑料的相关文献进行了回顾和总结,梳理了微塑料进入土壤-地下水系统的可能途径,讨论了土壤-地下水中微塑料的聚集沉积、迁移输送和降解转化,归纳了微塑料对有毒有害物质的吸附作用以及生态毒性相关研究,并在此基础上探讨了现有研究中存在的问题,展望了未来研究的发展方向。

1 微塑料在土壤-地下水中的主要来源(Main sources of microplastics in soil-groundwater)

研究人员最初是在海洋环境中发现了大量的微塑料^[15],之后相继在淡水^[16]、沉积物^[17]、大气^[18]、土壤^[6]以及地下水环境^[19]中都均检测到了微塑料的存在。土壤-地下水中微塑料主要有以下3个来源。

(1)城市源。污水处理厂被认为是最重要也最直接的微塑料污染入口路径^[11]。据报道,通过污水处理厂三级处理后的水中仍有大量不同类型的微塑料颗粒存在(每天可达 2.2×10^7 颗),其中聚丙烯最为丰富,主要以纤维(67%)和薄膜(18%)的形式存在^[20]。此外,垃圾填埋场也被证明是微塑料的潜在来源,在12个渗滤液样本中共检测到了17种微塑料类型,其中99.36%的微塑料是由埋在垃圾填埋场

的塑料垃圾碎片形成的^[21]。这些微塑料主要来自个人护理品或清洁剂中的塑料微珠^[22]、工厂和运输过程中塑料颗粒的意外损失^[23]、纺织品在洗涤过程中纤维损失^[24]等。

(2)农业源。废水灌溉、塑料地膜覆盖、农药径流以及土壤改良剂(如堆肥、污泥)也是微塑料输入的重要途径^[6,25]。经研究发现,农田废水灌溉中含有大量的微塑料颗粒^[26],农业生产中残留的塑料地膜会导致土壤中的微塑料不断富集^[25]。土壤改良剂中含有植物养分和有机碳,虽然大部分的塑料在堆肥前、后都可以通过筛分和人工分拣等方法去除,而且在堆肥过程中也可能被微生物降解部分塑料,但堆肥环节依然是不可忽略的重要输入途径^[27]。此外,经污水处理厂处理后的污泥中含有大量微塑料,大部分来自汽车轮胎磨损碎片和个人护理产品中的微塑料颗粒,即使污泥的施用受到限制,但也有研究报道每年通过施用污泥进入农田的微塑料可达4.4~43万t^[7]。

(3)大气源。大气微塑料的来源包括工业烟尘的排放、合成纺织品、合成橡胶轮胎的磨损腐蚀、建筑材料的塑料碎片、垃圾焚烧以及垃圾填埋场的暴

露^[18]。在针对巴黎的一项研究指出,在总的大气沉降物中,微塑料数量最高,每天每平方米可达280颗^[28]。在室内空气中也发现了微塑料的存在,且与人类呼吸道疾病密切相关^[29]。大气源微塑料污染受城市地形、当地气象学和热循环等因素影响,其相关研究十分有限。

2 微塑料在土壤-地下水中的迁移归趋行为 (Transport and fate behavior of microplastics in soil-groundwater)

微塑料在淡水、海洋和生物体中的迁移分布已有大量文献报道,超过80%的研究集中在海洋沙滩中的微塑料^[1],而关于其在土壤-地下水中迁移归趋的研究相对较少。实际上,每年向陆地释放的塑料量是向海洋释放量的4~23倍^[17]。微塑料能通过改变土壤保持水分的方式或者吸附其他污染物(如杀虫剂)来影响土壤的健康。如果微塑料分解得足够小,农作物就能吸收;如果蚯蚓等土壤生物吞食了微塑料,就可通过食物链向上传播;如果微塑料向下迁移就能进入地下水系统。微塑料在土壤-地下水中可能的环境行为如图1所示。

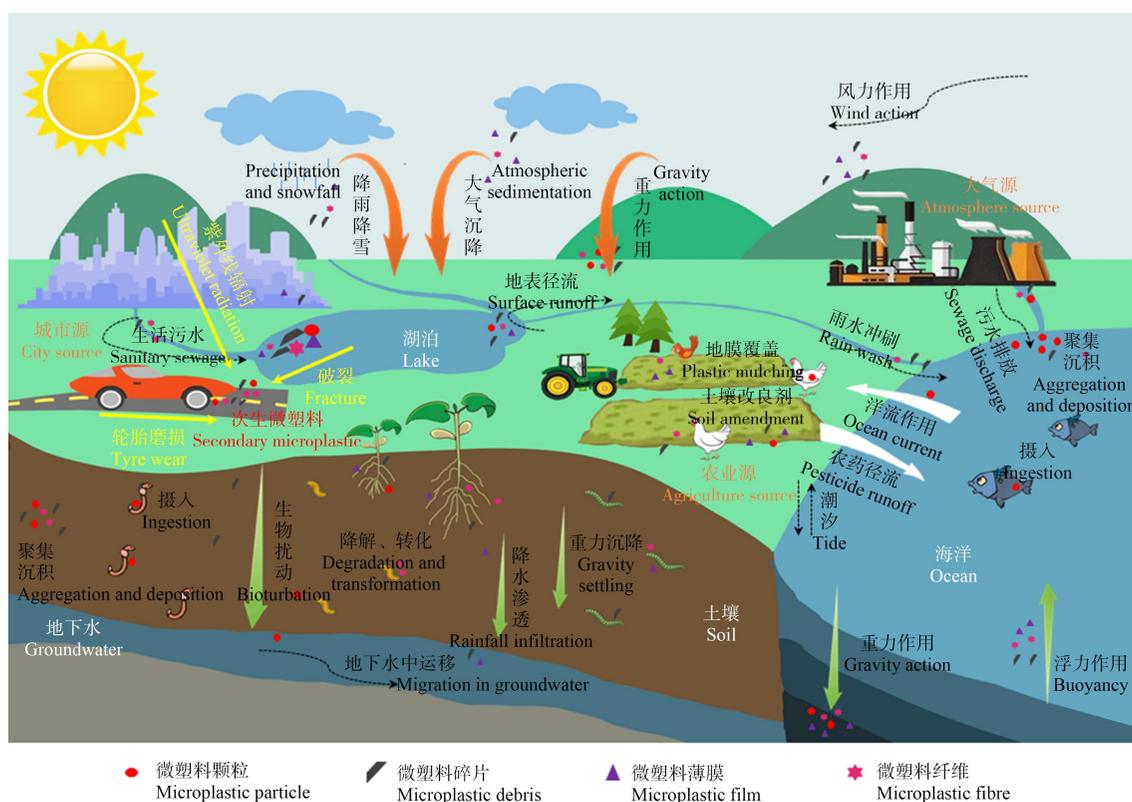


图1 微塑料在土壤-地下水中环境行为概念示意图

Fig. 1 Conceptual schematic diagram of environmental behavior of microplastics in soil-groundwater

2.1 聚集与沉积

聚集是指在一定条件下,相同或不同类型的微塑料颗粒之间相互碰撞,然后附着在一起形成尺寸更大颗粒的过程。微塑料的聚集将直接影响其沉积、迁移运输和降解转化^[8],其环境行为主要取决于周围介质中电解质的离子强度、价态控制以及其表面涂层。有研究报道,被微生物生物膜覆盖的微塑料显著加速了其和海洋生物颗粒的聚集速率^[30]。Alimi 等^[8]也证实了关于胶体稳定性 DLVO 理论同样适用于微塑料的聚集行为,主要起作用的是颗粒之间的范德华吸引力和静电排斥力。

不同聚合材料聚合而成的微塑料虽然具有相似的特性(如稳定性、耐磨性等),但由于其塑性和密度则不尽相同,影响了微塑料颗粒在水中的分配方式以及在陆地上的运输及其聚集沉积程度^[31]。土壤中微塑料因其环境流动性差,而大大减少了颗粒之间的相互碰撞,只有在外力作用下(如湿沉降、水径流和生物扰动等),才能促进微塑料在土壤中的聚集行为,关于该方面的研究有待未来详细讨论。实验室中通常以玻璃微珠、沙子和土壤作为填充物的柱体用于模拟实验研究颗粒的迁移和沉积行为,但很难代表复杂的自然环境。Quevedo 和 Tufenkji^[32]的研究表明,在农业壤土砂中聚苯乙烯颗粒(PS)的保留率远远高于在石英砂中。另有研究发现,沉积物中密度低的微塑料更倾向于悬浮在表面,而高密度塑料更容易沉淀并进入沉积物中^[1]。存在于土壤表面的微塑料会在重力作用或生物活动的影响下沉积到土壤中,而一部分则会停留在土壤表面,且微塑料的数量与土壤深度成负相关关系。Liu 等^[33]对浅层(0~3 cm)和深层(3~6 cm)土壤中的微塑料进行了检测,发现浅层土壤微塑料浓度为 (78.00 ± 12.91) 颗·kg⁻¹,比深层土壤的 (62.50 ± 12.97) 颗·kg⁻¹浓度更高,且微塑料尺寸更大,尺寸小的微塑料更容易沉积到土壤深层。

微塑料进入到环境(无论是在水中,还是在沉积物中,亦或是在土壤中),其存在均被认为是持久的。随着土壤中微塑料数量日益增多,由此引发生物累积,并可能向地下水的迁移。

2.2 迁移与输送

沿着裂缝或大型生物矿石内的浸出,以及通过小型动物的生物扰动,将稳定的颗粒状土壤有机质残留物输送到更深的地方,这种输送途径也适用于土壤中的微塑料^[6]。土壤表层的微塑料可以通过土

壤中的无脊椎动物以及各种微生物的活动渗入土壤底层,如图 1 所示。有研究指出,蚯蚓的挖洞活动也能促进土壤表层的微塑料集中向更深层土壤的输送^[34]。Lwanga 等^[35]在研究中也证实了这一现象,高达 73.5% 的土壤表面微塑料被蚯蚓引入洞穴,并可能通过洞穴的形成增加向深层土壤的优先浸出。

粒径的大小是微塑料能否进入地下水的一个必要的条件,尺寸大的微塑料碎片可能会经过过滤截留在土壤中^[6];尺寸小的微塑料以及纳米级的颗粒或胶体范围内的非常小的塑料碎片,可通过大孔隙和较粗的土壤进入地下水。这与对土壤中其他物质迁移输送规律相似(如银纳米粒子^[36]、磷通量^[37])。此外,如若遇到降雨降雪,沉积在土壤中支离破碎的微塑料受重力沉降作用,可进一步运送到地下含水层。不仅是颗粒大小,土壤的理化性质、含水层孔隙以及颗粒本身的形状、表面涂层等都会直接影响微塑料在土壤中的迁移^[38]。Panno 等^[19]观察到连接地下水流动系统的岩溶含水层中含有大量微塑料纤维(<1.5 mm),最大浓度为 15.2 颗·L⁻¹,其迁移过程可能有 2 个:(1)从地表流向地下时,迅速进入了地下含水层的裂缝;(2)在土壤中,因沿裂缝和裂隙的不规则表面的过滤作用,只有较小粒径的微塑料才能到达岩溶含水层并迁移。关于这一方面的调查研究尚未充足,有待加强不同因素对土壤-地下水中微塑料迁移的影响以及特征的研究。

微塑料在环境中的迁移不仅是从土壤到地下水的单一方向,还有通过淡水和大气环境在陆地与海洋环境之间的双向迁移。停留在土壤表面的微塑料可能会继续降解为尺寸更小的微塑料或受季节、气流的影响,被横向运送到更远的地方,甚至是偏远的湖泊^[38]。在中国西藏挑选了 4 个人类活动非常少的湖泊进行检测,发现了 5 种主要微塑料,由于研究区常年多风,微塑料的大气运输成为主要途径^[39]。Rezaei 等^[40]研究了风力侵蚀作用对微塑料的影响,与原始土壤相比,风蚀沉积物中含有丰富的微塑料,这可能是因为沉积在土壤表层的微塑料比土壤颗粒更轻,它们很容易被风蚀吹动。另外,经城市和工业废水进入土壤-地下水的微塑料也是潜在危害源,河流中检测到高浓度微塑料也将会汇入土壤-地下水环境中^[41]。

2.3 降解与转化

存在于土壤-地下水中的微塑料会历经各种各

样的转化(如降解、被大分子包裹),从而影响其聚集沉积、迁移输送过程。降解是一种降低聚合物平均分子量的化学变化,物理、化学和生物过程降低了塑料碎片结构的完整性,使塑料变得十分脆弱,从而导致碎片化^[10,42]。Horton 等^[17]认为,在表层土壤中的塑料会受到紫外线辐射和高温的破坏,使之成为微塑料碎片。太阳的紫外线辐射使聚合物基体氧化,从而导致键的断裂^[9]。一旦开始降解,就可以在一段时间内自催化降解,不需要进一步暴露在紫外线辐射下,只要系统中有氧气^[42]。

与水体中微塑料的最大区别是,聚集在土壤中的微塑料可能会被包裹形成土壤团聚体。有研究报道,土壤团聚体中的微塑料含量达到 7 100 ~ 42 960 颗·kg⁻¹,严重影响土壤结构水稳性团聚体^[43]。它们由于缺失紫外线辐射和物理磨损作用,不会轻易降解,只有通过微生物的生物降解作用发生降解。聚合物中的碳被转化为二氧化碳,当聚合物中所有的有机碳被转化,称为完全矿化,其更容易停留在土壤中^[42]。例如,在聚乙烯生物降解方面的研究表明,无论是使用纯菌株还是复杂的微生物群落,降解过程现实存在但十分缓慢^[44]。此外,在聚丙烯的生物降解中也观察到了同样的现象,未经处理的聚丙烯在土壤中存放 12 个月,仅失重 0.4%^[45]。Ali 等^[46]在土壤中发现了具有生物降解聚氯乙烯潜力的真菌,但在实际土壤条件中并不普遍存在。然而,这 3 项研究都认为,土壤中的微塑料几乎没有或是只有一小部分会被微生物进一步降解,而大多数的微塑料会在土壤中存留数年、数十年,甚至可能长期地沉积在土壤中,这与 Rillig^[34]提出的观点相符合。一旦这些碎片沉入土壤深层或地下水环境中,随着温度降低、紫外线减弱,其分解会更为缓慢。

综上所述,微塑料的聚集与沉积、迁移与输送、降解与转化等环境迁移转化行为的影响下,无论是纵观土壤-地下水系统,还是横观整个生态环境系统,其所导致的环境问题都无处不在。加之由于纳米级尺寸的微塑料的检测技术尚未发展成熟,学者们报道的微塑料污染情况可能比实际情况轻微。

3 微塑料在土壤-地下水中的生态毒理效应 (Ecotoxicological effects of microplastics in soil-groundwater)

微塑料由于组成成分不同,其在土壤-地下水中的生态毒理效应和作用机理也不同。目前,微塑料对土壤生物影响的相关研究已经开始,用于研究的主要是各类蚯蚓、线虫等。其中,常见于表层土壤(0 ~ 5 cm)的微节肢动物因其体型小,能够进入土壤孔隙,通过它们的行为移动微塑料,从而影响其他土壤生物对微塑料的暴露^[47]。

通常塑料聚合反应不能完全发生,聚合物中可能会存在残留的有毒单体。当微塑料进入土壤-地下水环境中时,其添加剂中的有毒物质(如多溴二苯醚、双酚 A 和邻苯二甲酸酯等)也会随之释放出来,不仅会改变土壤理化性质,影响植物生长发育,还会抑制土壤微生物活性^[48],甚至具有“三致”作用和内分泌紊乱的特性^[49],潜在危害人类健康^[50-51]。Lwanga 等^[52]已经在鸡粪和人类排泄物中检测到了微塑料的存在,由此证明了环境中的微塑料已经能够并正在通过食物链的传递转移给人类。

近年,微塑料与污染物之间相互作用形成的复合污染问题备受研究者关注。有研究指出,微塑料能够吸附环境中的污染物,并长期携带或迁移至其他环境系统中再二次分解释放出来^[53]。微塑料除了本身在制造过程中添加的有毒化学物质外,由于其具有表面带电荷、高比表面积和疏水性等特性,能吸附很多有害物质,也可以作为载体运输不同类型的污染物,如重金属^[54]、多氯联苯(PCBs)^[53]和多环芳烃(PAHs)(菲、芘、荧蒽和蒽等)^[55]等。由于微塑料具有高毒、持久、亲脂性、疏水性和生物积累性等特点,在低浓度时也可能对生物体造成伤害。但相较于微塑料复合污染在海洋环境中的研究而言,针对土壤-地下水的相关研究甚少。

表 1 梳理了微塑料暴露在不同土壤中的生态毒性效应的相关研究,其中包括了复合污染的生态毒理效应。通常来讲,微塑料进入生物体后,会对不同生物体的繁殖、生长和生存产生一定程度的负面影响,被认为是有害的土壤污染物^[56]。然而, Hodson 等^[57]于 2017 年在一次研究中发现,陆正蚓摄入负载 Zn²⁺ 的微塑料后不仅没有死亡,反而增加了 Zn²⁺ 的生物可利用性,这可能是因为在实验中摄入微塑料的浓度低于致死浓度限值。随后, Wang 等^[58]的研究表明,在砷污染土壤中,蚯蚓的肠道和身体组织可以生物积累砷,从而导致砷对肠道细菌群落产生不利影响。但当蚯蚓暴露在砷污染的微塑料时,体内的总砷浓度反而明显降低,且微塑料对肠道细菌群落几乎没有影响。

表 1 梳理了微塑料暴露在不同土壤中的生态毒性效应的相关研究,其中包括了复合污染的生态毒理效应。通常来讲,微塑料进入生物体后,会对不同生物体的繁殖、生长和生存产生一定程度的负面影响,被认为是有害的土壤污染物^[56]。然而, Hodson 等^[57]于 2017 年在一次研究中发现,陆正蚓摄入负载 Zn²⁺ 的微塑料后不仅没有死亡,反而增加了 Zn²⁺ 的生物可利用性,这可能是因为在实验中摄入微塑料的浓度低于致死浓度限值。随后, Wang 等^[58]的研究表明,在砷污染土壤中,蚯蚓的肠道和身体组织可以生物积累砷,从而导致砷对肠道细菌群落产生不利影响。但当蚯蚓暴露在砷污染的微塑料时,体内的总砷浓度反而明显降低,且微塑料对肠道细菌群落几乎没有影响。

表 1 微塑料暴露在不同土壤中的生态毒性效应研究
Table 1 Study on ecotoxic effects of microplastics exposed to different soils

测试生物体 Test organism	微塑料 Microplastics		接触条件 Contact conditions				生态毒性效应 Ecotoxic effect	参考文献 References	
	类型 Type	尺寸范围 Range of sizes	来源 Source	研究类型 Study type	土壤类型 Agrotype	微塑料及其他 污染物浓度 Microplastics and other pollutant concentrations			接触时间 Duration
跳虫 Collembolans	PVC	80 ~ 250 μm	购买 Purchased	实验室 Laboratory	公园土壤 Park soil	MPs: 127 ~ 135 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$	1, 3, 5, 7 d	均可携带微塑料迁移, 迁移深度: 甲螨 > 捕食螨 > 跳虫 (有回避微塑料的行为) They all carry MPs for migration by their behavior. Depth: oribatid mite < predatory mite < Collembolans (showed clear avoidance behavior in respect of the MPs)	[47]
捕食螨 Predatory mite									
甲螨 Oribatid mite									
弹尾虫 <i>Lobella sokamensis</i>	PS	<45 μm , 45 ~ 200 μm , >200 μm	—	实验室 Laboratory	农业土壤 Agricultural soils	MPs: 1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	<1 d	弹尾虫的行为遭到破坏, 运动指数显著降低 The behavior of <i>Lobella sokamensis</i> is destroyed, and the exercise index is significantly reduced	[59]
蚯蚓 <i>Lumbricus terrestris</i>	HDPE	<5 mm	塑料袋 Plastic bags	实验室 Laboratory	壤质土 Loam soil	MPs: 0.35% w/w Zn ²⁺ : 236, 1 261, 4 505 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	28 d	蚯蚓没有死亡, 肠道中无微塑料; 微塑料提高了 Zn ²⁺ 的生物利用性 <i>Lumbricus terrestris</i> did not die, and there was no microplastics in the intestines. MPs could increase Zn ²⁺ bioavailability	[57]
陆正蚓 <i>Lumbricus terrestris</i>	MFs	(361.6 ± 387.0) μm	市管垫子 的填充物 Commercially available cushion	实验室 Laboratory	农场可耕土壤 Arable cambisol	MPs: 0, 0.1%、 1.0% w/w	35 d	在 35 d 内不致死, 但以 0.1% 和 1.0% w/w 施用则会 引起与一般应激相关的转录反应 <i>Lumbricus terrestris</i> survived for 35 days, but administration at 0.1% and 1.0% w/w induced transcriptional responses associated with general stress	[60]

续表1

测试生物体 Test organism	微塑料 Microplastics			接触条件 Contact conditions			生态毒性效应 Ecotoxic effect	参考文献 References	
	类型 Type	尺寸范围 Range of sizes	来源 Source	研究类型 Study type	土壤类型 Agrotype	微塑料及其他 污染物浓度 Microplastics and other pollutant concentrations			接触时间 Duration
加州腔蚓 Earthworm <i>Metaphire californica</i>	PVC	—	购买 Purchased	实验室 Laboratory	农田 Farmland	MPs: 2 000 mg·kg ⁻¹ As(V): 40 mg·kg ⁻¹	28 d	蚯蚓肠道和身体组织总神经度降低,减轻了神对肠道菌群的影响,从而降低对蚯蚓的毒性 The total arsenic concentration in the gut and body tissues of earthworm <i>Metaphire californica</i> was significantly decreased. MPs alleviated the effect of arsenic on the gut microbiota, which resulted in a lower toxicity on the earthworm.	[58]
秀丽隐杆线虫 <i>Caenorhabditis elegans</i>	PET		饮料瓶 Drink bottles			MPs: 0.1%、0.25%、 0.5%、1% w/w		3个月后毒性增加, 9个月未观察到存活率降低 The toxicity of <i>Caenorhabditis elegans</i> increased after 3 months, and no decrease in survival was observed after 9 months	
秀丽隐杆线虫 <i>Caenorhabditis elegans</i>	PVC	<2 mm	桌布 Tablecloth	实验室 Laboratory	混合有机 废物添加剂 Improved soil with organic waste additives	MPs: 0.01%、0.1%、 0.25%、0.5%、1% w/w	0.3、9个月 0.3、9 months	3个月后线虫繁殖被抑制了 55%,9个月后无抑制作用 After 3 months, the reproduction of <i>Caenorhabditis elegans</i> was inhibited by 55%, and after 9 months, there was no inhibition	[61]
	HDPE		购物袋 Shopping bags			MPs: 0.1%、0.25%、 0.5%、1% w/w		线虫繁殖受到69%的抑制 The reproduction of <i>Caenorhabditis elegans</i> was inhibited by 69%	

续表1

测试生物体 Test organism	微塑料 Microplastics			接触条件 Contact conditions			生态毒性效应 Ecotoxic effect	参考文献 References	
	类型 Type	尺寸范围 Range of sizes	来源 Source	研究类型 Study type	土壤类型 Agrotype	微塑料及其他 污染物浓度 Microplastics and other pollutant concentrations			接触时间 Duration
褐云玛瑙蜗牛 <i>Achatina fulica</i>	PET	1.3 mm	购买 Purchased	实验室 Laboratory	耕作土壤 Cultivated soil	MPs: 0.014、0.14、 0.71 g·kg ⁻¹	14、28 d	蜗牛的消化过程会加速 微塑料纤维的分解 The digestion process of <i>Achatina fulica</i> can accelerate the decomposition of microplastic fibers	[62]
赤子爱胜蚓 <i>Eisenia fetida</i>	PU	<75 μm	购买 Purchased	实验室 Laboratory	生物固体改良土壤 Biosolid artificial soil	MPs: 1 :2 000 w/w Σ PBDEs: 83 mg·kg ⁻¹ dw	7、14、28 d	赤子爱胜蚓吞含有 生物油脂或微塑料的土壤, PBDEs可在体中积累 PBDEs can accumulate in the body of the <i>Eisenia fetida</i> that devours soil containing biosolid or MPs	[63]
	LDPE	250 ~ 1 000 μm	购买 Purchased	实验室 Laboratory	OECD人工土壤 OECD artificial soil	MPs: 62、125、250、 500、1 000 mg·kg ⁻¹	28 d	微塑料暴露可引起氧化应激 反应和能量代谢的变化 MPs exposure can cause oxidative stress and changes in energy metabolism	[64]

注: PVC 为聚氯乙烯; HDPE 为高密度聚乙烯; MFs 为聚酯微纤维; PET 为聚对苯二甲酸乙二醇酯; PU 为聚氨酯; LDPE 为低密度聚乙烯; MPs 表示微塑料; PBDEs 为多溴二苯醚。
Note: PVC stands for polyvinyl chloride; HDPE stands for high-density polyethylene; MFs stands for microplastic fibers; PET stands for polyethylene terephthalate; PS stands for polystyrene; PU stands for polyurethane; LDPE stands for light-density polyethylene; MPs stands for microplastics; PBDEs stands for polybrominated diphenyl ether.

目前,大多数研究是在实验室内通过短期暴露实验进行的,往往存在局限,并不能真实反映其实际的生态毒性。其原因:(1)实验周期过短(从几天到几个月)以至于不能观察到生物体的变化过程;(2)实验室中模拟的土壤污染物比较单一,而实际土壤环境中的污染物更为复杂、多变;(3)实验过程中没有外来污染物,而实际情况往往会伴随着污水径流、降雨降雪等。因此,关于微塑料在环境中的生态毒性效应不能一概而论,今后应加强不同微塑料导致生物体器官受损或死亡的浓度阈值研究。总的来说,如果不消除塑料对土壤的输入,就不能先验地排除塑料对土壤生物、土壤肥力和人体健康的潜在威胁。

4 结论与展望 (Conclusion and prospect)

综上所述,土壤-地下水中的微塑料主要来源于城市源、农业源和大气源,其吸附的有害物有向生物体转移的潜在能力。微塑料污染实质是一个无国界的环境问题,不仅威胁生态安全及人类健康,还涉及污染跨界跨境流动、各国产业结构调整和国际协同治理等问题,加强相关研究可为我国在国际微塑料污染问题处理上的主动权和话语权提供研究基础与技术支撑。

当前,关于微塑料在土壤-地下水系统中的迁移转化和生态毒理效应研究仍然没有引起足够的重视,特别是有关微塑料的生态毒性和机理报道甚少,微塑料及复合污染物对生物的致毒机理,以及对生物多样性、群落结构和生态系统功能的影响方面也缺乏深入研究。未来研究中应该重视以下几个方面。

(1)重视微塑料对农业可持续性和环境健康风险影响的研究。目前尚未见针对不溶解物质的毒性测试规范,剂量-效应关系也不清楚,其环境风险评估也缺乏足够的支撑,相关研究应为微塑料的环境基准值确定及相关标准的制定提供基础数据。

(2)加强微塑料及其携带污染物的复合污染与生物体之间关联性的研究。以往生态毒理研究大多数在实验室中模拟,不能完整反映真实的自然条件,建议未来可在现实场地中开展相关实验,通过剂量-效应关系及暴露风险量化微塑料在土壤-地下水中的生态毒理效应。

(3)由于微塑料污染分布广泛,是全球性的环境

问题,应该加强国际研究合作。推动在全球范围内建立统一的微塑料样品采集和分类标准,并建立分离、提取、检测和鉴定方法,规范微塑料丰度/浓度的表示方法,加强同位素示踪、指纹图谱等技术在微塑料源解析中的应用。

通讯作者简介:蒲生彦(1981—),男,博士(后),教授,香江学者,四川省千人计划特聘专家,主要研究方向为生态环境基准与风险评估、土壤地下水污染协同修复。

参考文献 (References):

- [1] Van Cauwenberghe L, Devriese L, Galgani F, et al. Microplastics in sediments: A review of techniques, occurrence and effects [J]. *Marine Environmental Research*, 2015, 111: 5-17
- [2] Peng G, Xu P, Zhu B, et al. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: A case study of risk assessment in mega-cities [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 448-456
- [3] Thompson R C, Swan S H, Moore C J, et al. Our plastic age [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 364(1526): 1973
- [4] Carpenter E J, Anderson S J, Harvey G R, et al. Polystyrene spherules in coastal waters [J]. *Science*, 1972, 178(4062): 749-750
- [5] Eriksen M, Lebreton L C M, Carson H S, et al. Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea [J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(12): e11913
- [6] Blasing M, Amelung W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 422-435
- [7] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(20): 10777-10779
- [8] Alimi O S, Budarz J F, Hernandez L M, et al. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4): 1704-1724
- [9] Auta H S, Emenike C U, Fauziah S H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions [J]. *Environment International*, 2017, 102: 165-176
- [10] 王彤, 胡献刚, 周启星. 环境中微塑料的迁移分布、生

- 物效应及分析方法的研究进展 [J]. 科学通报, 2018, 63(4): 385-395
- Wang T, Hu X G, Zhou Q X. The research progress in migration, distribution, biological effects and analytical methods of microplastics [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(4): 385-395 (in Chinese)
- [11] Mintenig S M, Int-Veen I, Löder M G J, et al. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging [J]. Water Research, 2017, 108: 365-372
- [12] Barnes D K, Galgani F, Thompson R C, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2009, 364(1526): 1985-1998
- [13] Kögel-Knabner I, Amelung W. Dynamics, chemistry, and preservation of organic matter in soils [J]. Treatise on Geochemistry, 2014, 13(8): 157-215
- [14] 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
- [15] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. Science, 2004, 304(5672): 838
- [16] Dris R, Imhof H, Sanchez W, et al. Beyond the ocean: Contamination of freshwater ecosystems with (micro-) plastic particles [J]. Environmental Chemistry, 2015, 12(5): 539-550
- [17] 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
- [18] 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(1-2): 290-293
- [19] Panno S V, Kelly W R, Scott J, et al. Microplastic contamination in Karst groundwater systems [J]. Groundwater, 2019, 57(2): 189-196
- [20] Blair R M, Waldron S, Gauchotte-Lindsay C. Average daily flow of microplastics through a tertiary wastewater treatment plant over a ten-month period [J]. Water Research, 2019, 163: 114909
- [21] He P J, Chen L Y, Shao L M, et al. Municipal solid waste (MSW) landfill: A source of microplastics? -Evidence of microplastics in landfill leachate [J]. Water Research, 2019, 159: 38-45
- [22] Eriksen M, Mason S, Wilson S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 77(1-2): 177-182
- [23] Lechner A, Keckeis H, Lumesberger-Loisl F, et al. The Danube so colourful: A potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river [J]. Environmental Pollution, 2014, 188: 177-181
- [24] Hernandez E, Nowack B, Mitrano D M, et al. Polyester textiles as a source of microplastics from households: A mechanistic study to understand microfiber release during washing [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(12): 7036-7046
- [25] Steinmetz Z, Wollmann C, Schaefer M, et al. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? [J]. Science of the Total Environment, 2016, 550: 690-705
- [26] Majewsky M, Bitter H, Eiche E, et al. Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA-DSC) [J]. Science of the Total Environment, 2016, 568: 507-511
- [27] Mercier A, Gravouil K, Aucher W, et al. Fate of eight different polymers under uncontrolled composting conditions: Relationships between deterioration, biofilm formation, and the material surface properties [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(4): 1988-1997
- [28] Dris R, Gasperi J, Rocher V, et al. Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris [J]. Environmental Chemistry, 2015, 12(5): 592-599
- [29] Prata J C. Airborne microplastics: Consequences to human health? [J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 115-126
- [30] Michels J, Stippkugel A, Lenz M, et al. Rapid aggregation of biofilm-covered microplastics with marine biogenic particles [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2018, 285(1885): 20181203
- [31] Zylstra E R. Accumulation of wind-dispersed trash in desert environments [J]. Journal of Arid Environments, 2013, 89: 13-15
- [32] Quevedo I R, Tufenkji N. Mobility of functionalized quantum dots and a model polystyrene nanoparticle in saturated quartz sand and loamy sand [J]. Environmental

- Science & Technology, 2012, 46(8): 4449-4457
- [33] 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
- [34] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(12): 6453-6454
- [35] Lwanga E H, Gertsen H, Gooren H, et al. Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris* [J]. Environmental Pollution, 2017, 220: 523-531
- [36] Hoppe M, Mikutta R, Utermann J, et al. Remobilization of sterically stabilized silver nanoparticles from farmland soils determined by column leaching [J]. European Journal of Soil Science, 2015, 66(5): 898-909
- [37] Bol R, Julich D, Brodlin D, et al. Dissolved and colloidal phosphorus fluxes in forest ecosystems—An almost blind spot in ecosystem research [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2016, 179(4): 425-438
- [38] Pachapur V L, Larios A D, Cledon M, et al. Behavior and characterization of titanium dioxide and silver nanoparticles in soils [J]. Science of the Total Environment, 2016, 563: 933-943
- [39] Zhang K, Su J, Xiong X, et al. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet Plateau, China [J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 450-455
- [40] Rezaei M, Riksen M J P M, Sirjani E, et al. Wind erosion as a driver for transport of light density microplastics [J]. Science of the Total Environment, 2019, 669: 273-281
- [41] McCormick A, Hoellein T J, London M G, et al. Microplastic in surface waters of urban rivers: Concentration, sources, and associated bacterial assemblages [J]. Ecosphere, 2016, 7(11): e01556
- [42] Andrady A L. Microplastics in the marine environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(8): 1596-1605
- [43] 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
- [44] Restrepo-Florez J M, Bassi A, Thompson M R. Microbial degradation and deterioration of polyethylene—A review [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 88: 83-90
- [45] Arkatkar A, Arutchelvi J, Bhaduri S, et al. Degradation of unpretreated and thermally pretreated polypropylene by soil consortia [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2009, 63(1): 106-111
- [46] Ali M I, Ahmed S, Robson G, et al. Isolation and molecular characterization of polyvinyl chloride (PVC) plastic degrading fungal isolates [J]. Journal of Basic Microbiology, 2014, 54(1): 18-27
- [47] 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
- [48] Sun J, Wu X, Gan J. Uptake and metabolism of phthalate esters by edible plants [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(14): 8471-8478
- [49] Erkekoglu P, Kocer-Gumusel B. Genotoxicity of phthalates [J]. Toxicology Methods, 2014, 24(9): 616-626
- [50] Engler R E. The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(22): 12302-12315
- [51] Hauser R, Calafat A M. Phthalates and human health [J]. Occupation & Environmental Medicine, 2005, 62(11): 806-818
- [52] 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, 7(1): 14071
- [53] Mato Y, Isobe T, Takada H, et al. Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(2): 318-324
- [54] Ashton K, Holmes L, Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(11): 2050-2055
- [55] Bouhroum R, Boulkamh A, Asia L, et al. Concentrations and fingerprints of PAHs and PCBs adsorbed onto marine plastic debris from the Indonesian Cilacap coast and the North Atlantic gyre [J]. Regional Studies in Marine Science, 2019, 29: 100611
- [56] Rodriguez-Seijo A, Lourenco J, Rocha-Santos T A P, et al. Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché [J]. Environmental Pollution, 2017, 220(Part A): 495-503
- [57] 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
- [58] 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]. En-

- vironmental Pollution, 2019, 251: 110-116
- [59] Kim S W, An Y J. Soil microplastics inhibit the movement of springtail species [J]. Environment International, 2019, 126: 699-706
- [60] Prendergast-Miller M T, Katsiamides A, Abbass M, et al. Polyester-derived microfibre impacts on the soil-dwelling earthworm *Lumbricus terrestris* [J]. Environmental Pollution, 2019, 251: 453-459
- [61] Judy J D, Williams M, Gregg A, et al. Microplastics in municipal mixed-waste organic outputs induce minimal short to long-term toxicity in key terrestrial biota [J]. Environmental Pollution, 2019, 252(Part A): 522-531
- [62] 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]. Environmental Pollution, 2019, 250: 447-455
- [63] 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, 2013, 47(23): 13831-13839
- [64] Rodriguez-Seijo A, da Costa J P, Rocha-Santos T, et al. Oxidative stress, energy metabolism and molecular responses of earthworms (*Eisenia fetida*) exposed to low-density polyethylene microplastics [J]. Environmental Science Pollution Research, 2018, 25(33): 33599-33610 ◆