

微塑料在农田土壤中的污染现状与环境效应

杨歆宇¹, 李巧云¹, 杨 婵¹, 吴娟娟¹, 宋凤敏^{1,2*}

¹陕西理工大学化学与环境科学学院, 陕西 汉中

²秦巴生物资源与生态环境国家重点实验室(培育), 陕西 汉中

收稿日期: 2023年5月11日; 录用日期: 2023年6月13日; 发布日期: 2023年6月21日

摘 要

微塑料作为一种新型污染已成为全世界广泛关注的重点污染问题之一。本文对目前农田土壤中微塑料污染现状与环境效应进行了综述。阐述了我国南北地区的微塑料污染程度进行总结并且微塑料来源, 分析了微塑料对于土壤的理化性质和土壤动植物所产生的环境效应, 并对未来土壤微塑料的研究方向展望。

关键词

微塑料, 农田土壤, 污染现状, 来源, 生态效应

Pollution Status and Environmental Effects of Microplastics in Agricultural Soil

Xinyu Yang¹, Qiaoyun Li¹, Chan Yang¹, Juanjuan Wu¹, Fengmin Song^{1,2*}

¹School of Chemistry and Environmental Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong Shaanxi

²Key Laboratory of Qinba Biological Resources and Eco-Environment (Cultivation), Hanzhong Shaanxi

Received: May 11th, 2023; accepted: Jun. 13th, 2023; published: Jun. 21st, 2023

Abstract

As a new type of pollution, microplastics have become one of the vital pollution issues of widespread concern worldwide. In this paper, the current status and environmental effects of microplastic pollution in agricultural soils have been reviewed. The degree of microplastic pollution in the north and south regions of China has been summarized, with emphasis on the physical and chemical properties of microplastics on soil and the environmental effects of soil plants and animals. The future research directions of soil microplastics has been discussed.

*通讯作者。

文章引用: 杨歆宇, 李巧云, 杨婵, 吴娟娟, 宋凤敏. 微塑料在农田土壤中的污染现状与环境效应[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(3): 618-625. DOI: 10.12677/aep.2023.133076

Keywords

Microplastic, Agricultural Soil, Pollution Status, Sources, Ecological Effects

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“微塑料”是塑料垃圾在多种自然现象的作用下由大块废弃物逐渐分解形成粒径小于 5 mm 的塑料碎片、颗粒、纤维或薄膜,这一概念是由英国物理学家汤普森在 2004 年《科学》杂志中首次提出[1],概念中微塑料主要化学成分包括:聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酰胺(PA)及聚酯(PES)等[1]。目前国际上重点关注的四类新型污染物分别是:持久性有机污染物、内分泌干扰物、抗生素和微塑料,微塑料则作为其中重要的组成部分,对环境的污染引起了科学界的极大关注。

截至到目前,早期微塑料研究集中在海洋系统,而土壤微塑料研究尚处于起步发展阶段。海洋微塑料的相关文献最早出现于 2004 年,而对土壤的研究直到 2012 年在 Rilling 呼吁下才引起全世界的广泛关注,在 2016 年后逐渐成为热点课题,据相关资料显示,截止到 2020 年前对于农田土壤微塑料的研究占比不足海洋的 35%。直到在近年来的研究中不断发现农田土壤中存在大量微塑料[2],并且会对土壤环境产生较大影响,进而使土壤微塑料研究成为热点课题。

现有文献显示目前国内外对于土壤微塑料的了解十分有限,尽管有相关的分析检测方法,但都未形成标准化体系。多数土壤微塑料研究仅指向国内外的耕地类型,对于其他类型的土壤暂时无法精确分析。而微塑料存在于土壤中的迁移转化规律也尚不清晰,是否会危机到城市或乡村的地下水系统也需进一步分析研究,总而言之,土壤微塑料研究任重而道远。本文将综述中国部分地区的微塑料污染现状、主要来源和已知的环境效应以便对后续更详细的研究给予一定参考。

2. 农田土壤微塑料污染现状

由于地理位置以及农田类型的差异会导致土壤微塑料的分布、丰度、颜色以及类型会有所不同,我国南北地区气候、土壤、经济发展对农田土壤中微塑料的污染都有明显的影响,下面对我国不同地区农田土壤微塑料污染状况做综合分析。

2.1. 我国北方地区

北方地区作为我国地膜用量最大和覆盖面积最广区域,因覆膜的使用导致农田中大量检测出微塑料,在 Cheng 等[3]的研究中发现甘肃和陕北地区的微塑料分布具有不规则性,通过计算其均值发现在 0~30 cm 的土壤中丰度为 $(5.09 \pm 1.21) \times 10^3 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在此项研究中还发现微塑料在土壤中粒径 $< 1 \text{ nm}$ 的所占比例最高[4],西北地区的土壤中微塑料此部分可达到 57.8%左右[5],覆膜长期存留于土壤中,随着时间的变化粒径变小进入土壤深层。这类丰度高、粒径小的微塑料需要给予关注,防止其给土壤带来更大的危害。

对沈阳周边的农田土壤取样后发现东北地区的黑土中 PE 微塑料的占比最高,可达到 81.40%,其次还检测出较高含量的 PP 和 PS,同时在 Shi 等[5]的研究中还发现在沈阳地区的农田土壤中未发现含有 PVC

以及 PET 的微塑料。在东北的其他地区：哈尔滨市的表层黑土土壤中微塑料丰度为 $89 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ [6]，沈阳周边的大辽流域附近的农田土壤中微塑料丰度为 $(273.33 \pm 327.65) \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ [7]，而黑龙江地区农田土壤的丰度最高可达 $800 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ [8]，这与当地的耕种特点以及在黑土地地区的覆膜使用量较小有一定的关系。

北京作为我国北方地区现代化水平较高的地区，在 Wu 等的研究[9]北京农业土壤微塑料的整体污染平均丰度为 $(1405.19 \pm 584.30) \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，微塑料类型主要集中在薄膜、碎片、纤维三种，检测出的微塑料按含量高低发现有白色、透明、蓝色、黄色、绿色、黑色几种，在与其他地区的比对发现，北京地区的污染处于中等偏低水平，与其现代化程度高密不可分。

2.2. 我国中部地区

中部的研究目前来看还较少，已有研究里分析了中部具有代表性的省市—武汉市的城郊和长沙市湿地以及山西汾河流域附近，发现在发展较好中部城市的微塑料污染较为严重。

Chen 等的研究中[10]，通过对所有采样点的分析计算，发现武汉市城郊的农田土壤中微塑料丰度平均值高达 $2450 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，因城郊区域农田临近公路使微塑料的扩散面广、流动性增强。在检测中的微塑料中发现粒径小于 0.2mm 的占比最大，微塑料也多带有颜色以纤维和微珠为主，这与当地的生活习惯和污泥常被用作农田肥料等因素有关。

在长沙市主城区及周边区县的研究中发现其土壤中微塑料污染丰度的范围为 $47\sim 1369 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ [11]，之所以呈现出较大的丰度差，可能因为近年来长沙市主城区的旅游发展迅速相应的微塑料污染也较为严重。在此地区检测出的微塑料中粒径 $< 0.1 \text{ mm}$ 为主导，纤维及碎片为主要组成部分，颜色以黑色、绿色和透明色为主。

在 Zhu 等的对汾河沿岸农田土壤中微塑料的分析研究中[12]，得出沿岸的微塑料总丰度达到 $(290.5 \pm 15.1) \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中主要发现的微塑料类型也以纤维类、碎片类为主，颜色主要为黑色、白色、黄色、透明。比对其他中部近年来发展较好的城市发现在山西汾河沿岸的污染状况处于较轻水平。

2.3. 我国南方地区

目前我国南方地区农田土壤微塑料污染整体呈现出较轻的污染程度，极少数地区污染较为严重。Liu 等[13]对广元地区的植烟土壤的多个采样点进行分析研究，计算出此地的植烟土壤中微塑料丰度均值为 $(4.81 \pm 3.53) \times 10^2 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，在这些采样点中丰度最小值为 $1.20 \times 10^2 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，峰值为 $8.90 \times 10^2 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，两者存在较大差异，与当地种植不同类型作物产生的影响有关。在此地区发现了 4 种微塑料类型，其中薄膜占比最高，可到 86.53%，纤维占比最小，仅有 0.02%。其他研究计算了上海城郊地区的农田土壤中的微塑料丰度仅为 $78 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ [14]，与四川地区所得结果差距较大，这可能与地区的城市化和现代化程度有着密不可分的关系。

福建地区的试样点中发现该地微塑料类型主要为碎片、纤维和泡沫，其中泡沫类型的丰度最大，且基本呈透明色[15]，这和福建地区处于沿海城市，生活主要方式为捕鱼等因素密切相关。对其两个码头的土壤计算分析后发现其丰度分别为 $102 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $172 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，两者存在明显差异，这与当地的不同生活方式息息相关。在南部其他地区如：江苏省徐州市的土壤微塑料丰度为 $1300\sim 3400 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ [16]，浙江杭州沿海地区的土壤中发现微塑料丰度为 $571.2 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ [17]。以上数据均呈现出发展较好的城市污染严重，其余地区污染较轻。

上述研究和其他文献结论均说明我国北部、中部、南部地区土壤中均存在不同程度的微塑料污染，并且由于土壤类型以及人们生活习惯、方式的不同，微塑料的丰度、种类、颜色均存在较明显差异，已有研究可以发现无论在南方还是北方现代化程度较高的城市如北京、上海土壤微塑料污染程度较小。其

余北方地区因农膜的使用导致大多数城市微塑料污染严重，南方的多数地区因沿海产生的污染较轻，而在中部地区呈现出明显的发展影响污染水平的规律。

3. 我国农田微塑料的来源

农田土壤中微塑料的来源有以下几大类：农业生产及耕种方式所带来的塑料残留；轮胎磨损所带来的生活废弃塑料；降水灌溉如大气沉降、污水灌溉及地表径流所带入土壤的塑料残留品。农业生产所带来的影响是土壤中微塑料的最主要来源，这部分包括了塑料农膜的使用、农业塑料包装的不当处置、污泥的利用以及有机肥料的使用。

3.1. 农业生产与农田微塑料污染

农业生产所带来的塑料碎片是我国农田土壤中微塑料的主要来源，尤其是农用塑料薄膜的使用。我国是全球农膜覆盖面积最大的国家，覆盖面积现已达到 2000 万 hm^2 [18]农膜的主要化学成分为 PE 和 PVC，覆膜和地膜的使用在我国农耕生产中起到了不可或缺的作用，又因农膜的厚度仅有 8~50 μm [19]，给回收造成了巨大困难，目前对其的回收处置工艺还不完善导致其回收率较低。农膜塑料长期残留在土壤系统中形成微塑料，存在时间越长，微塑料含量越高，进而对土壤环境造成一定的影响[20]。在我国北方使用覆膜的地区土壤微塑料平均丰度明显高于未使用的部分，进一步证明农膜的使用是农田土壤微塑料的主要来源。

有机肥和污泥的利用也是造成农田土壤中微塑料的富集的重要因素。污泥中富含大量作物所需营养元素，在国内外的很多地区通常会作为肥料在农业上使用。我国每年因有机肥使用而产生的土壤微塑料大约为 1.56×10^{14} 个[21]，显然污泥农用所造成的微塑料污染不容小觑。我国每年的有机肥使用量位于全球前列，有机肥料被广泛运用于果菜和茶园中。根据现有数据的估算，我国每年因有机肥料的使用导致农田土壤中造成微塑料污染的峰值可到达 26,400 吨，目前因没有明确的粒径小于 0.5 mm 的微塑料丰度数据，仅知道其含量在逐年增长，从而进入农田土壤中的微塑料含量也会逐年增长，因此有机肥的使用应有一套完备的管理方法从源头上减少微塑料对农田土壤的危害。

3.2. 大气降水与农田灌溉

微塑料通过降水和灌溉进入土壤也是一个重要来源。微塑料可以通过地表径流、大气沉降这些环境因素进入农田土壤中，也可以通过污水浇灌此类人为因素进入农田土壤中。ALLEN 等[22]的研究中估算出微塑料通过大气沉降这种方式的传播距离为 95 km，通过这种方式微塑料可以被传输至很多偏僻和人烟稀少的地区，在我国人口稀少的青藏高原地区也发现土壤中存在微塑料污染，这些都表明了微塑料在大气中的传播能力极强。

污水灌溉也是潜在的携带者将微塑料带入农田土壤中，目前市面上大量的日用品中添加有塑料微珠这种传统的清洁剂[23]，这些含有塑料微珠的废水经污水处理厂处理后无法完全被去除会产生塑料残留，每年由此类护理品所带来的微塑料高达 39 吨[24]。除此之外，洗衣服所带来的生活污水也是污水灌溉的重要来源，每件衣服因洗涤脱落所产生的纤维在 1900 根以上[25]，再由农业灌溉进入土壤中，尤其是在我国农村地区现代化水平低，直接将洗涤废水不经处理对农田进行灌溉导致大量纤维进入土壤。

3.3. 轮胎磨损

轮胎的磨损颗粒也是微塑料的潜在来源，随着农业生产的机械化水平的提高以及汽车数量的增加，发现部分农田土壤中的微塑料来源于车辆轮胎的磨损[26]，通过数学模型估算出全球因轮胎磨损所产生的

微塑料含量已达到 0.81 kg/人[27], 并且在 Sieber 的研究中[28]证实了有大约 74%磨损后的颗粒可直接进入 5 m 之内的农田中, 其余颗粒最远可扩散至周围 100 m 的土壤中[29]。以上发现均可证明近年来轮胎的磨损颗粒也成为了农田土壤中微塑料的一大来源, 但对于其影响因素、后续转化及治理办法仍未发现详细的报道, 未来还需填补这一空白。

除此之外, 塑料垃圾在进入垃圾填埋厂后无法实现百分百的处理效率, 因此塑料垃圾渗流也是导致农田土壤中富含微塑料的潜在成因之一。据资料显示, 在我国多处垃圾填埋厂的塑料垃圾渗滤液中检测到的微塑料丰度最高可达到 $24.58 \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$, 其主要化学成分为 PE 和 PP [30], 如果这些渗滤液不经过有效处理可直接将塑料碎片带入土壤中[31], 如何减少生活塑料碎片随着渗滤液进入土壤环境应成为治理微塑料污染的研究方向之一。

4. 农田土壤微塑料的生态环境效应

微塑料和它自身拥有的有毒物质通过直接或者间接的方式进入土壤环境后, 经过长期的积累, 可能会破坏土壤理化性质, 也可能影响土壤中动物的生长繁殖问题, 对于植物而言微塑料通过影响土壤内部环境进而间接的对植物造成影响。

4.1. 微塑料对土壤理化性质的影响

微塑料在土壤中长期积累, 会改变土壤的容重、持水能力和结构等物理性质, 还可能会造成土地干裂[32], 水分养分运输的显著变化[33]。在 Wang 等的调查研究中发现[34], 农膜微塑料明显的降低了土壤的有机质、速效磷和钾等对土壤肥力影响较大的物质。微塑料对土壤的 pH 值有不同的影响, PE 会导致 pH 值的降低[35]。同时微塑料具有很强的吸附能力, 它与土壤中的某些物质结合, 从而重金属在土壤中吸附与释放[36], 可能会造成土壤重金属加重或减轻。所以微塑料作为一些污染物的载体在进入土壤后会对土壤环境产生较大影响甚至造成土壤生态的动态稳定。

4.2. 微塑料对土壤动植物的影响

土壤动物对于微塑料而言, 作为消费者通过食用微塑料而产生影响。土壤动物是土壤系统的重要组成部分, 可以影响土壤的多重方面, 例如结构、养分、有机质、植物的生长发育等方面[37]。以土壤食物链中最重要的动物蚯蚓为例, 蚯蚓以土壤有机质为生, 容易在体内检测出微塑料。微塑料中的聚乙烯和聚苯乙烯分别会影响蚯蚓的体壁并且产生氧化应激反应, 长期积累还会引起肠细胞的病变和 DNA 的变化[38]。进入蚯蚓消化道的微塑料则会使其产生虚假的饱腹感而减少食物的摄取, 进而引起的结果是抑制其生长繁殖、降低代谢水平, 严重的可能导致死亡[39]。蚯蚓摄取微塑料后除了会影响自身功能外, 其还会在土壤中活动时, 将微塑料转运至土壤更深层, Rillig 在研究中证明了[40]蚯蚓可以促进微塑料在土壤内的转移, 并且粒径越小, 转移越容易越可到达土壤更深层。当然除蚯蚓外, 众多研究指向微塑料会对绝大多数土壤动物产生危害, 具体影响每种动物的哪种方面与微塑料的种类、含量、大小以及存留时间均有一定的关系, 还可能与土壤动物本身对于塑料制品的敏感度有关。

植物作为食物链中的初级生产者, 微塑料对于植物的影响大多数是间接产生的, 微塑料进入土壤后由于长期积累和某些化学成分导致理化性质的改变和对土壤微生物影响对植物产生一定的危害[35]。微塑料在土壤中的存在会对植物产生有以下几方面的影响: 微塑料会延长种子的发芽时间[41]、降低发芽率和成活率[42]、改变根际形状甚至组织的组成元素[43]。研究表明, PLA 会显著降低发芽率[44]; LDPE 可以阻碍植物对养分的吸收进而降低植物的成活率[42]; PS 会影响植物的养分吸收分[45]; PA 处理下的植物茎秆生物量明显低于平均值[46]。目前, 关于微塑料对植物的影响方面的研究还比较少, 有些研究资料

显示某些微塑料进入植物后会带来正向的影响,在 de Souza Machado 的研究中发现 PES 处理后的大葱茎秆生物量是平均值的两倍,在 PE、PET、PP 处理后的大葱茎秆生物量无明显变化。所以微塑料对于植物生长的具体影响并不绝对,其中的机理还需要进一步探究。

5. 农田土壤微塑料污染的研究展望

当前微塑料污染呈现出北方城市较于南方城市污染严重,南方城市较现代化程度高的城市污染严重,但此规律不绝对,某些南方经济发展较好的城市污染程度高于某些北方地区。后续需要为每个地区每种不同类型土壤建立相应的微塑料数据库以便更好的分析相关迁移规律。

现阶段对于我国而言土壤微塑料的最主要来源是地膜的使用,我国作为农业大国,农业生产所带来的微塑料数量占比之大,其中包括污水灌溉、化肥的施用、农业用具塑料包装等都会带来大量塑料残余。随着研究的深入,近年来国内外所已知的微塑料来源基本已囊括了所有可能性,今后需在此基础上进一步研究其在土壤内部的转化作用。微塑料作为持久性有机污染物长期存留在土壤中对于土壤的危害不言而喻,目前已知的危害主要集中在对土壤的理化性质和土壤动植物及土壤微生物中,对于人体的危害尚处于猜想验证阶段,后续需将研究重点集中于此。

近年来,土壤微塑料的研究作为新兴污染问题成为热点课题,多数研究指向其分布、来源、污染现状、自身危害、提取与检测方法等方面,以上问题研究尚不充足,依旧处于探索阶段,其他研究方向仍处于空白,今后的研究在以下几个方面还需进一步发展:

1) 建立数据库:由于微塑料这种持久性有机污染物,其可长期在农田土壤中积累并且很难完全去除,因此应当根据不同类型的微塑料建立数据库,研究对于植物、土壤动物以及人体的安全数值范围,以便更好的对于微塑料污染制定方法;

2) 探究迁移转化规律:根据微塑料的来源探求其在土壤中迁移转化的规律,建立其在农田土壤中变化的数学模型,以达到预测其在土壤中的污染行为变化;

3) 全方位的评估其危害:现有的研究指向微塑料对于动植物、微生物、土壤理化性质和人体均会产生一定影响但尚不完备处于起步阶段,尤其是对人体的危害未来应作为重点研究方向。

基金项目

陕西理工大学秦巴生物资源与生态环境重点实验室“市校共建”科研专项(SXJ-2016);陕西理工大学大学生创新创业项目(S202210720091)。

参考文献

- [1] Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., *et al.* (2004) Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science*, **304**, 838-838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- [2] Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C., *et al.* (2009) Accumulation and Fragmentation of Plastic Debris in Global Environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **364**, 1985-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- [3] 程万莉, 樊廷录, 王淑英, 等. 我国西北覆膜农田土壤微塑料数量及分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2561-2568.
- [4] Song, Y.K., Hong, S.H., Jang, M., *et al.* (2014) Large Accumulation of Microsized Synthetic Polymer Particles in the Sea Surface Microlayer. *Environmental Science & Technology*, **48**, 9014-9021. <https://doi.org/10.1021/es501757s>
- [5] 时馨竹, 孙丽娜, 李珍, 等. 沈阳周边农田土壤中微塑料组成与分布[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1498-1508.
- [6] Zhang, S.L., Wang, J.Q., Liu, X., *et al.* (2019) Microplastics in the Environment: A Review of Analytical Methods, Distribution and Biological Effects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **111**, 62-72.

- <https://doi.org/10.1021/es501757s>
- [7] 韩丽花, 李巧玲, 徐笠, 等. 大辽河流域土壤中微塑料的丰度与分布研究[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(1): 174-185.
- [8] 刘旭. 典型黑土区耕地土壤微塑料空间分布特征[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019: 19-20.
- [9] 吴亚梅, 王育鹏, 王康, 等. 北京市设施农业土壤微塑料的污染特征及潜在来源[J]. 生态毒理学报, 17(4): 333-344.
- [10] 陈玉玲. 微塑料在武汉城郊菜地土壤中的污染现状及其对赤子爱蚯蚓的生态毒理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [11] 雷俊杰. 长沙市湿地土壤微塑料的空间趋同与分异研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中国林业科技大学, 2021.
- [12] 朱宇恩, 文瀚萱, 李唐慧娟, 等. 汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3894-3903.
- [13] 刘琳琳, 王鹏, 孙曙光, 等. 四川广元植烟土壤微塑料分布状况分析[J]. 中国烟草学报, 2023, 29(1): 46-54.
- [14] Liu, M., Lu, S., Song, Y., et al. (2018) Microplastic and Mesoplastic Pollution in Farmland Soils in Suburbs of Shanghai, China. *Environmental Pollution*, **242**, 855-862. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.051>
- [15] 邓加聪, 陈晓凤, 张志鹏, 等. 福建漳浦近岸海域表层土壤中微塑料的赋存特征[J]. 福建师大清分校学报, 2019(2): 75-83.
- [16] Li, Q.L., Zeng, A.R., Jiang, X., et al. (2021) Are Microplastics Correlated to Phthalates in Facility Agriculture Soil? *Journal of Hazardous Materials*, **412**, Article ID: 125164. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125164>
- [17] Zhou, B.Y., Wang, J.Q., Zhang, H.B., et al. (2020) Microplastics in Agricultural Soils on the Coastal Plain of Hangzhou Bay, East China: Multiple Sources other than Plastic Mulching Film. *Journal of Hazardous Materials*, **388**, Article ID: 121814. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121814>
- [18] Liu, E.K., He, W.Q. and Yan, C.R. (2014) 'White Revolution' to 'White Pollution': Agricultural Plastic Film Mulch in China. *Environmental Research Letters*, **9**, Article ID: 091001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/091001>
- [19] Abduwaiti, A., Liu, X.W., Yan, C.R., et al. (2021) Testing Biodegradable Films as Alternatives to Plastic-Film Mulching for Enhancing the Yield and Economic Benefits of Processed Tomato in Xinjiang Region. *Sustainability*, **13**, Article 3093. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/9/091001>
- [20] Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., et al. (2016) Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for longterm soil degradation? *Science of the Total Environment*, **550**, 690-705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153>
- [21] Li, X., Chen, L., Mei, Q., et al. (2018) Microplastics in Sewage Sludge from the Wastewater Treatment Plants in China. *Water Research*, **142**, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.034>
- [22] Allen, S., Allen, D., Phoenix, V.R., Roux, G.L., Jiménez, P.D., Simonneau, A., Binet, S. and Galop, D. (2019) Atmospheric Transport and Deposition of Microplastics in a Remote Mountain Catchment. *Nature Geoscience*, **12**, 339-344. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>
- [23] 贾涛, 薛颖昊, 靳拓, 等. 土壤微塑料的来源、分布及其对土壤潜在影响的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(5): 202-216.
- [24] 桑文静, 王晓霞, 王夏姝, 等. 土壤中微塑料的来源、赋予特征及迁移行为[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11): 1361-1367.
- [25] Brownem, A., Crump, P., Nivens, J., et al. (2011) Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environmental Science & Technology*, **45**, 9175-9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- [26] 方芹, 牛司平, 陈予东, 等. 城市路面积尘微塑料污染特征[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 189-198.
- [27] Wagner, S., Hiffer, T., Klöckner, P., Wehrhahn, M., Hofmann, T. and Reemtsma, T. (2018) Tire Wear Particles in the Aquatic Environment—A Review on Generation, Analysis, Occurrence, Fate and Effects. *Water Research*, **139**, 83-100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.051>
- [28] Sieber, R., Kawecki, D. and Nowack, B. (2020) Dynamic Probabilistic Material Flow Analysis of Rubber Release from Tires into the Environment. *Environmental Pollution*, **258**, Article ID: 113573. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113573>
- [29] Miller, A., Kocher, B., Altmann, K. and Braun, U. (2022) Determination of Tire Wear Markers in Soil Samples and Their Distribution in a Roadside Soil. *Chemosphere*, **294**, Article ID: 133653 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133653>
- [30] He, P., Chen, L., Shao, L., Zhang, H. and Lü, F. (2019) Municipal Solid Waste (MSW) Land Fill: A Source of Micro-

- plastics?—Evidence of Microplastics in Landfill Leachate. *Water Research*, **159**, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.060>
- [31] 杨杰, 李连祯, 周倩, 等. 土壤环境中微塑料污染: 来源、过程及风险[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 281-298.
- [32] Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. and Hui, X. (2019) Effects of Plastic Contamination on Water Evaporation and Desiccation Cracking in Soil. *Science of the Total Environment*, **654**, 576-582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>
- [33] Li, Y., Zhao, C., Yan, C., *et al.* (2020) Effects of Agricultural Plastic Film Residues on Transportation and Distribution of Water and Nitrate in Soil. *Chemosphere*, **242**, Article ID: 125131. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125131>
- [34] Wang, J., Lv, S., Zhang, M., *et al.* (2016) Effects of Plastic Film Residues on Occurrence of Phthalates and Microbial activity in Soils. *Chemosphere*, **151**, 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.076>
- [35] Boots, B., Russell, C.W. and Green, D.S. (2019) Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. *Environmental Science & Technology*, **53**, 11496-11506. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304>
- [36] 李玉婷, 张亮. 微塑料对土壤环境的污染及生态效应研究进展[J]. 南方农业, 2021, 15(5): 202-203, 205.
- [37] Coleman, D.C., Jr Callahan, M.A. and Jr Crossley, D.A. (2017) Fundamentals of Soil Ecology. 3rd Edition, Academic Press, London. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805251-8.00004-1>
- [38] Chen, Y., Liu, X., Leng, Y. and Wang, J. (2020) Defense Responses in Earthworms (*Eisenia fetida*) Exposed to Low-Density Polyethylene Microplastics in Soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **187**, Article ID: 109788. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109788>
- [39] Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., *et al.* (2016) Microplastics in the Terrestrial Ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science & Technology*, **50**, 2685-2691. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05478>
- [40] Rillig, M.C., Ziersch, L. and Hempel, S. (2017) Microplastic Transport in Soil by Earthworms. *Scientific Reports*, **7**, Article ID: 1362. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01594-7>
- [41] Bosker, T., Bouwman, L.J., Brun, N.R., Behrens, P. and Vijver, M.G. (2019) Microplastics Accumulate on Pores in Seed Capsule and Delay Germination and Root Growth of the Terrestrial Vascular Plant *Lepidium Sativum*. *Chemosphere*, **226**, 774-781. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- [42] Qi, Y., Yang, X., Pelaez, A.M., *et al.* (2018) Macro- and Micro- Plastics in Soil-Plant System: Effects of Plastic Mulch Film Residues on Wheat (*Triticum aestivum*) Growth. *Science of the Total Environment*, **645**, 1048-1056. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- [43] Sun, X., Yuan, X., Jia, Y., *et al.* (2020) Differentially Charged Nanoplastics. Demonstrate Distinct Accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nature Nanotechnology*, **15**, 755-760 <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>
- [44] Silva, C.J., Patrício, S.A.L., Campos, D., *et al.* (2020) *Lumbriculus variegatus* (oligochaeta) Exposed to Polyethylene Microplastics: Biochemical, Physiological and Reproductive Responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **207**, Article ID: 111375. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111375>
- [45] Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M. and Klobučar, G. (2019) Ecotoxicity and Genotoxicity of Polystyrene Microplastics on Higher Plant *Vicia faba*. *Environmental Pollution*, **250**, 831-838. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.055>
- [46] de Souza Machado, A.A., Lau, C.W., Kloas, W., *et al.* (2019) Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environmental Science & Technology*, **53**, 6044-6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>