

土壤环境中微塑料的研究进展

王非宇

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年1月8日; 录用日期: 2024年1月23日; 发布日期: 2024年2月29日

摘要

微塑料是一种由高分子聚合物在外力作用下形成的不规则固体颗粒, 具有很强的团聚性, 可以在土壤、水体、大气中广泛分布, 对生态环境和人类健康造成危害。近年来, 农田土壤微塑料成为热点研究领域。本文从微塑料的来源、分类、环境行为和生态风险等方面综述了农田土壤微塑料的研究进展, 分析了当前土壤微塑料研究中存在的问题, 并对未来土壤微塑料的研究方向进行了展望。

关键词

农田土壤, 微塑料, 污染现状, 生态风险

Research Progress on Microplastics in Soil Environment

Feiyu Wang

School of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Jan. 8th, 2024; accepted: Jan. 23rd, 2024; published: Feb. 29th, 2024

Abstract

Microplastic is a kind of irregular solid particles formed by polymer under the action of external force, with strong agglomeration, which can be widely distributed in soil, water body and atmosphere, and cause harm to ecological environment and human health. In recent years, agricultural soil microplastics have become a hot research area. This paper reviews the research progress of farmland soil microplastics from the aspects of microplastic sources, classification, environmental behaviour and ecological risks, analyzes the current problems in the research of farmland soil microplastics, and looks forward to the future research direction of farmland soil microplastics.

文章引用: 王非宇. 土壤环境中微塑料的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(1): 167-172.

DOI: 10.12677/aep.2024.141023

Keywords

Agricultural Soil, Microplastics, Pollution Status, Ecological Risk

Copyright © 2024 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

塑料广泛应用于工业生产、农业生产以及日常生活等领域。调查报告指出, 2018 年世界塑料年生产量近 3.6 亿吨, 但回收利用塑料只占总生产量的 6%~26%。其他塑料最后作为污染物进入了环境。常用的塑料有聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚碳酸酯(PC)、聚乳酸(PLA)等。塑料制品在生产使用至废弃过程中都会受到多种因素影响而向环境排放出大量颗粒、纤维、薄膜及其他形式微塑料, 致使微塑料污染已成为世界范围内最为严重的环境问题。2022 年国务院发布的《新污染物治理行动方案》将微塑料列为重点新污染物, 与持久性有机物、内分泌干扰物、抗生素一起成为四大类新污染物。

微塑料(MPs)是指粒径在 5 mm 以下的塑料碎片。全球范围内, 海洋环境、空气环境、淡水环境和土壤环境中均有微塑料的检出。1972 年微塑料第一次发现于海洋环境, 但是陆地作为塑料制品产生及重要汇集地其污染丰度可达海洋的 4~23 倍。微塑料已遍布全球的每个角落。据近年研究资料显示, 科学家发现高海拔珠穆朗玛峰峰顶附近以及全球最深海沟马里亚纳海沟存在微塑料污染现象, 甚至人迹罕至的南极洲生态系统都未能免受微塑料污染。微塑料污染已成为当前环境科学领域中一个重要的研究热点。农田土壤中微塑料不但能影响土壤质量, 而且还能通过食物链, 最终影响人类健康。本文在总结国内外研究动态的基础上, 从农田土壤微塑料来源与分布特点, 对土壤质量的影响和对人体健康存在的危害等方面进行了分析。并以此为基础提出今后农田土壤中微塑料的研究应该着重考虑微塑料环境行为和生态风险、农田土壤微塑料和污染物间相互作用。旨在为农田土壤微塑料污染的进一步研究奠定理论基础和进行农田土壤微塑料的污染控制提供科学依据。

2. 土壤微塑料的来源

2.1. 农业活动

2.1.1. 农用膜覆盖

调查显示, 国内农用膜在 2019 年的使用量相比于 1981 年的 60 万吨增长了近 230 倍, 但是整体回收率不足 60%。这就导致大量废弃农用膜进入到农田土壤环境中, 农用膜在使用过程中经紫外线长期照射和生物降解作用下容易破碎成更小的碎片、纤维、颗粒进入土壤环境。徐征鑫调查了新疆棉田土壤残留地膜碎片分布特征, 研究发现覆膜种植回收不完全会为土壤带来大量的残膜碎片, 而且不同覆膜年限农田土壤中的塑料残膜含量差异较大[1]。

2.1.2. 农业灌溉

农业灌溉水源中也可能含有微塑料, 农业灌溉水源包括地表水以及通过污水处理厂处理后达标排放的生活污水、工业污水, 米家辉在呼和浩特市污水处理厂为例布置 17 个采样点, 并对污水处理厂按月取样对出水进行全年检测分析, 发现出水中存在大量微塑料[2]。

2.2. 大气沉降

土壤微塑料也可能来自大气中悬浮的塑料颗粒，其通过大气沉降以及风力传输，沉积在陆地表面，甚至传输到更偏远的区域。大气沉降是微塑料非主动陆地输入的重要途径。乐永宣分析昆明市大气微塑料的平均沉降通量范围为 $468\sim 2238 \text{ n}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ [3]。

3. 农田土壤中微塑料国内外研究现状

目前，国内外对于土壤微塑料的研究依旧处于起步阶段，土壤中微塑料的普遍存在已被证实。先前研究简单报道塑料在某一地点的存在或浓度。通过文献阅读我们可以了解到，Pim van den Berg 等人发现未施用污水污泥的土壤平均含有轻密度微塑料 $930 \pm 740 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和重密度微塑料 $1100 \pm 570 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。施用污水污泥的土壤平均含有轻密度微塑料 $2130 \pm 950 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和重密度微塑料 $3060 \pm 1680 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对于两种塑料密度，施用过污泥的土壤和未施用污泥的土壤之间 MP 含量差异显著 ($p < 0.05$) [4]。中国黄土丘陵沟壑区延安市典型农业区的微塑料的平均丰度为 $4505 \pm 435 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中粒径 $< 100 \mu\text{m}$ 的微塑料占 $> 90\%$ 。粒径越小，微塑料含量越高。排名前三的聚合物分别为聚乙烯 (PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 和乙烯醋酸乙烯酯 (EVA)。我国辽宁地区农田土壤中微塑料丰度为 $3605 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，主要包括纤维状、颗粒状、块状和薄膜状 4 种形状，其中纤维状最多，颗粒状和块状次之，薄膜状最少 [5]。目前研究重点已经从发现微塑料转变为探究理解微塑料在土壤内部转运、归趋及微塑料对土壤环境或环境适当组成部分的影响。

4. 农田土壤中微塑料的分析方法

4.1. 土壤微塑料样品预处理

土壤样本采集后需要进行预处理。因为微塑料通常包裹在土壤团聚体中，难以分离，因此需要通过预消化处理将其释放出来。预处理可在萃取步骤之前或之后进行。针对不同的样品、微塑料类型和有机物含量，可选择氧化剂、酶、酸和碱进行消化预处理，以提高微塑料的分离效率。研究发现利用芬顿试剂进行处理是最佳方案，可以解决微塑料颗粒在消化过程中容易被这些化学试剂破坏或降解的问题 [6]。一些研究表明，在一般应用浓度下，这些试剂对聚合物的影响有限或没有影响。土壤微塑料的预处理方法并没有统一的标准，科学家们仍在寻找针对不同土壤微塑料预处理的最佳方法。

4.2. 土壤微塑料分离方法

提取微塑料的目的是将其从土壤中分离出来，以便于之后进行鉴定和定量分析。从之前的研究中可以看出，土壤中微塑料的丰度范围很广，造成这种结果的原因之一可能是各研究采用的提取方法不同 [7]。一般来说，微塑料的密度远小于土壤的密度。因此，通过浮选法微塑料可以浮到上清液中，与沉到底部的土壤分离 [8]。常用浮选溶液有 NaCl、CaCl₂、ZnCl₂、NaBr 和 NaI 的饱和溶液，但是由于微塑料聚合物种类不同导致密度也不同，密度较低的浮选溶液不能有效提取土壤中潜在的高密度微塑料。研究表明，随着溶液密度的增加，微塑料的回收率也会增加。饱和氯化钠溶液是常用的溶液，虽然它便宜且环保，但在提取高密度微塑料时可能会出现偏差。除密度分离外，目前土壤微塑料的分离方法还包括静电分离、染色分离、油分离和磁分离。由于土壤通常具有导电性，非导电微塑料可根据导电介质与非导电介质之间的静电差进行有效分离。静电分离具有自动化、操作简单、效率高、成本低、无二次污染问题、精度高等优点，但其设备一般比较笨重。研究人员利用静电分离法去除了 99% 的原始样品质量，且未损失任何微塑料。用油分离微塑料的方法比较少见。其原理是大多数土壤颗粒是亲水性的，而塑料聚合物是亲脂性的。萃取过程中可使用分离漏斗并且必须充分摇动漏斗，以确保所有微塑料都转移到上层油层，而土壤则在下层水层。但有研究表明，这种方法可能会导致有机物附着在部分微塑料上，从而导致最终的

微塑料提取率降低。油分离法具有耗时相对较少、环境友好的特点，但效率和准确性相对较低。通过染色法跟踪微塑料在显微镜下可快速找到它们。染色分离法的优点是操作简单，缺点是染色不稳定。染色微塑料不仅易于分离，而且易于识别和量化[8] [9]。

4.3. 土壤微塑料鉴定方法

土壤微塑料的识别方法与海洋微塑料类似，主要包括视觉、光谱和热分析技术。在现有的土壤微塑料分析中，肉眼识别和光谱识别相结合的方法被广泛使用。用于视觉鉴定的仪器通常是体视显微镜。扫描电子显微镜也可用于观察微塑料的表面形态。视觉技术操作简单，成本低廉。然而，它也有误判率高、工程量大、耗时长和无法确定成分(PA、PS 和 PE)等缺点。光谱鉴定技术有很多，如傅立叶变换红外光谱(FTIR)、拉曼光谱(Raman)和近红外光谱(NIR)，其中傅立叶变换红外光谱和拉曼光谱被广泛使用。热分析包括热重分析 - 质谱法(TGA-MS)、热解 - 气相色谱 - 质谱法(Pyr-GC-MS)和热萃取解吸 - 气相色谱 - 质谱法(TED-GC-MS) [10] [11]。与水环境中的微塑料分析技术相比，土壤环境中的 MPs 分析技术相对落后。海洋和淡水中微塑料的分析方法已得到广泛认可，但水生微塑料的分析方法并不一定适用于土壤。土壤与水生沉积物一样，是一种复杂的固体基质。因此，土壤中微塑料的分析程序可参照水生沉积物的分析程序，包括样品预处理、提取和鉴定。从土壤和沉积物中分离微塑料的方法在不断更新，系统的总结有助于该领域的发展。

5. 微塑料对土壤环境的影响

5.1. 微塑料对土壤物理性质的影响

研究表明微塑料进入土壤可能会引起土壤容重、团聚、孔隙度和持水能力的改变，这些改变具体与 MPs 的类型、浓度、尺寸和形状有关，可能是积极的也可能是消极的。研究发现绝大多数 MPs 的密度均比土壤颗粒要小，因此 MPs 进入土壤后，土壤容重会降低[12]。土壤团聚体的形成和稳定性对土壤空气、水分和生物养分利用具有重要影响。MPs 与土壤团聚体间表现出相关性可以表明 MPs 的暴露很可能会引起土壤团聚体发生变化。MPs 的形态、种类对土壤团聚体稳定性产生的影响不同。此外，MPs 对土壤团聚体的影响受其它共存因素的影响。例如 MPS 单独存在对土壤团聚体稳定性没有影响，但和有机质共存时显著影响土壤团聚体稳定性[13] [14]。MPs 污染会导致土壤孔隙度发生变化，进一步影响土壤氧含量和水分。MPs 还被发现可以通过改变土壤粒径和孔径分布来中断水流的垂直运输，大型 MPs 膜和碎片也被认为会阻碍土壤中的水平水流，这可能改变土壤养分和污染物在土壤中的转运。

5.2. 微塑料对土壤化学性质的影响

从组成性质来看。MPs 是以碳基为主体构成的高分子聚合物，微塑料进入土壤会直接导致土壤表观总有机碳含量的增加。在探究外源污染物的对土壤的生态效应时，溶解性有机质(DOM)是一种常用的土壤参数，因为它是土壤中较为活跃的物质，与土壤养分循环和生物利用息息相关。已经有许多文献报道了微塑料对土壤 DOM 含量的显著性影响。MPs 自身特性，其中的化学添加剂更容易浸出进入土壤环境，对土壤化学性质产生直接影响。除了 MPs 本身对土壤化学成分的直接影响外，MPs 还可以吸附其他污染物对土壤化学性质产生影响[15]。

土壤 pH 值是土壤最重要化学的性质之一。研究表明微塑料可以显著提高或降低土壤 pH 值，不同类型的 MPs 会对壤 pH 值产生不同甚至相反的影响。微塑料对土壤中氮、磷等营养元素的影响也是一个重要的研究方向。MPs 可能通过以下几种机制影响土壤养分含量：(1) 一些 MPs (聚丙烯睛和聚芳纶)本身就含有一部分营养物质，在进入土壤环境后随着时间的推移逐渐释放出来。(2) MPs 可能直接吸附营养物

质, 从而改变其可用性。特别是长时间的风化和氧化的 MPs 拥有更大的吸附容量。(3) MPs 可以通过改变土壤中相关酶活性、特殊微生物群落、植物根系对磷的吸收利用等生物学性质来影响土壤营养元素含量[16]。

5.3. 微塑料对土壤微生物性质的影响

微塑料本身就可以作为载体为土壤微生物提供新的栖息环境。同时因为微塑料对土壤物理和化学特性的影响也会对土壤微生物特性产生影响。微生物生物量和微生物活性可以反映土壤微生物的总体健康状况。几项研究探索了 MPs 对土壤微生物生物量的影响有增加、无影响和减少多种情况。可生物降解 MPs 容易被微生物分解利用, 它们通常可增加土壤微生物生物量。但是当微塑料的尺寸小到一定程度时, 它们可以直接穿透细胞膜对土壤微生物造成物理损伤并影响细胞内环境, 从而抑制微生物活性。微塑料和其他污染物的复合作用也可能导致土壤微生物活性发生显著变化[17] [18]。

6. 结论与展望

微塑料作为新兴污染物, 目前对于农田土壤微塑料的研究主要集中于来源、分析检测等方面, 但相关研究尚不充足, 仍处于探索积累阶段。此外对于源头防治和污染修复的研究寥寥无几。目前缺少土壤微塑料污染现状和特征的研究和数据, 无法有效支撑环境管理和风险防控工作。因此, 亟需建立准高效、简便的土壤微塑料检测方法, 解决因土壤复杂性及微塑料尺寸微小造成的技术问题, 并以此为基础开展行业场地微塑料污染水平和特征研究, 为后续风险管控和污染治理提供基础数据。

参考文献

- [1] 徐征鑫. 典型覆膜区域棉田土壤微塑料分布特征研究[D]: [硕士学位论文]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
- [2] 米家辉, 卢俊平, 刘廷玺, 等. 城镇污水厂微塑料赋存形态、组分及去除效率全流程分析与归趋行为[J/OL]. 环境科学, 1-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202305177>, 2023-12-12.
- [3] 乐永宣, 史正涛, 罗淘源, 等. 昆明市大气微塑料的沉降特性及呼吸暴露风险[J/OL]. 环境化学, 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20231128.1328.046.html>, 2024-01-21.
- [4] van den Berg, P., Huerta-Lwanga, E., Corradini, F. and Geissen, V. (2020) Sewage Sludge Application as a Vehicle for Microplastics in Eastern Spanish Agricultural Soils. *Environmental Pollution*, **261**, Article ID: 114198. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114198>
- [5] 王展, 陈春羽, 苏沛瑶, 等. 辽宁地区农田土壤中微塑料丰度及其在团聚体中的分布特征[J/OL]. 农业环境科学学报, 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.s.20230911.1645.004.html>, 2024-01-08.
- [6] 吕心言, 刘琦, 李彦奇, 等. 土壤微塑料污染领域研究现状和发展趋势——基于 CiteSpace 分析[J/OL]. 地学前缘, 1-14. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.11.41>, 2024-01-08.
- [7] 周洁, 仲蕾, 赵松建, 等. 微塑料污染的成因、危害及其防治技术分析[J/OL]. 现代化工, 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2172.TQ.20231129.1759.040.html>, 2024-01-08.
- [8] Jia, Z.F., Wei, W., Wang, Y.H., Chang, Y.J., Lei, R. and Che, Y.H. (2024) Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Agricultural Soils in the Loess Hilly Gully Area of Yan'an, China. *Science of the Total Environment*, **912**, Article ID: 169627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169627>
- [9] Fan, W.X., Qiu, C.S., Qu, Q., Hu, X.G., Mu, L., Gao, Z.W. and Tang, X. (2023) Sources and Identification of Microplastics in Soils. *Soil & Environmental Health*, **1**, Article ID: 100019. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100019>
- [10] 朱丽萍, 陶雪晴, 万愉快, 等. 陆地地质环境微塑料污染研究现状与展望[J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 233-241. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkt.tb20220353>
- [11] 高硕欣, 刘璐璐, 张凯旋, 等. 土壤微塑料的来源及分离鉴定方法[J]. 山东化工, 2023, 52(20): 136-138+142. <https://doi.org/10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2023.20.013>
- [12] Yang, H., Yumeng, Y., Yu, Y., Yinglin, H., Fu, B. and Wang, J. (2022) Distribution, Sources, Migration, Influence and Analytical Methods of Microplastics in Soil Ecosystems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **243**, Article ID: 114009. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114009>

- [13] 黄硕霏, 谭长银, 涂晨, 等. 土壤微塑料与重金属复合污染机理及其植物生理效应研究进展[J/OL]. 湖南师范大学自然科学学报, 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1542.n.20231011.1629.002.html>, 2024-01-08.
- [14] 韦婧, 涂晨, 杨杰, 等. 微塑料对农田土壤理化性质、土壤微生物群落结构与功能的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(5): 644-652. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2023.0112>
- [15] 李霜, 邓悦, 李永芳, 等. 土壤中微塑料对植物的影响研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(6): 924-935.
- [16] He, L.-X., Cao, X.-X., Roiloa, S.R., Zhang, X.-M., Xue, W., Lei, J.-P. and Yu, F.-H. (2023) Increasing Soil Microplastic Diversity Decreases Community Biomass via Its Impact on the Most Dominant Species. *Ecological Indicators*, **155**, Article ID: 111010. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111010>
- [17] 梁榕, 何娇, 孙飞虎, 等. 聚乙烯微塑料对土壤养分和酶活性的影响[J/OL]. 环境科学, 1-13. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202306183>, 2024-01-08.
- [18] 谢彦. 土壤微塑料污染及微生物降解研究进展[J/OL]. 化工环保, 1-6. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2215.X.20231116.1035.004.html>, 2024-01-08.