

土壤微塑料对蚯蚓的生态毒理影响

夏 雨

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10月21日；录用日期：2024年11月25日；发布日期：2024年12月13日

摘 要

本研究聚焦土壤中的微塑料对蚯蚓的影响。研究发现，土壤中的微塑料会影响蚯蚓的体重、存活率及表现出回避特征。蚯蚓在接触含微塑料的土壤时，体重可能出现下降趋势，存活率也受到一定程度影响。同时，蚯蚓对微塑料表现出不同程度的回避行为。此外，研究还深入探讨了微塑料对蚯蚓肠道微生物功能的影响，揭示了微塑料可能通过改变肠道微生物群落结构和功能，进一步影响蚯蚓的生长发育和生存状态，为土壤生态系统的保护提供了重要依据。

关键词

土壤，微塑料，蚯蚓

The Ecotoxicological Effects of Soil Microplastics on Earthworms

Yu Xia

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Oct. 21st, 2024; accepted: Nov. 25th, 2024; published: Dec. 13th, 2024

Abstract

This study focuses on the effect of microplastics in soil on earthworms. The study found that the microplastics in the soil affect the weight, survival rate and avoidance characteristics of earthworms. When earthworms come into contact with microplastic-containing soil, their weight may decline, and their survival rate is also affected to a certain extent. At the same time, earthworms show different degrees of avoidance behavior towards microplastics. In addition, the study also deeply explores the impact of microplastics on the intestinal microbial function of earthworms, revealing that microplastics may further affect the growth, development and survival of earthworms by changing the structure and function of intestinal microbial communities, which provides an important basis for the protection of soil ecosystems.

Keywords

Soil, Microplastics, Earthworm

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

通常将粒径小于等于 5 毫米的塑料纤维、颗粒或者薄膜称为微塑料(microplastics, MPs) [1], 实际上很多微塑料可达微米乃至纳米级。塑料可以在自然环境中持续很长时间, 进入自然环境后经历的机械摩擦、化学氧化等过程, 会使其表面粗糙度、电负性及官能团组成等理化性质发生变化, 进而影响其稳定性, 导致微塑料的形成。农业生产中大量使用的塑料制品, 如农用薄膜、农药化肥包装袋等, 在自然环境中逐渐破碎分解, 成为土壤中微塑料的重要来源。Nizzetto 等人研究发现, 土壤环境中微塑料含量是海洋环境中的 4~23 倍, 可能是一个更大的塑料仓储库[2]。此外, 城市垃圾的不合理处置、工业排放以及污水灌溉等也使得大量微塑料进入土壤环境[3], 对土壤生态系统产生影响, 例如土壤理化性质的改变、土壤中生物群落变化、土壤动植物生长发育等。

蚯蚓对土壤环境变化极为敏感, 它们通过挖掘洞穴, 改善土壤的通气性和透水性, 促进土壤中水分和养分的循环。同时, 蚯蚓粪富含有机物质, 能够提高土壤肥力, 为植物生长创造良好条件[4]。因此, 蚯蚓的存在与否以及其活动强度可以作为衡量土壤健康状况的重要指标, 它们的生存和活动状况能够直观地反映土壤的质量, 因此被视为土壤的指示物[5], 在土壤生态系统中具有重要地位。国内外对土壤微塑料影响蚯蚓的生态毒理研究逐步深入。研究发现, 微塑料会改变蚯蚓的生长发育, 如体重减轻、体长变短。其还会影响蚯蚓的繁殖能力和行为模式。此外, 微塑料可能改变土壤性质, 间接对蚯蚓产生毒性, 危害生态平衡。

2. 土壤微塑料的污染现状及危害

不同地区的土壤微塑料污染水平差异较大。在一些农业发达地区和工业集中区域, 土壤中的微塑料含量相对较高。研究表明, 部分土壤样品中每千克土壤可含有数千甚至上万个微塑料颗粒。微塑料主要成分为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)等常见塑料成分, 例如人类用于个人洗护(牙膏、磨砂膏等)中含有的塑料微珠, 以及衣物清洗、摩擦所释放的塑料纤维, 排放水中经由土壤最终停留在土壤环境中, 以及一次性使用制品, 如餐盒、包装袋等。MPs 的形态主要以纤维、薄膜、碎片、泡沫状等形式存在。据估算, 人类使用的一次性用品约占有塑料制品的 50% [6]。大气微塑料污染经雨水裹挟最终的归宿也是土壤环境, 并且伴随着重金属等其他污染物, 与微塑料形成复合污染。

目前土壤中微塑料已经广泛分布在深浅层土壤中, 同时也伴随着横向迁移。研究发现蚯蚓、跳虫等通过挖掘摄食、消化和排泄等、挖洞以及附着动物体表等行为使微塑料发生纵向迁移, Huerta Lwanga 等人研究发现土壤中聚乙烯微塑料会随着蚯蚓的生命活动迁移至洞穴处, 且发现了蚯蚓吞食微塑料颗粒的证据[7]。而鸟类、蚂蚁、鼯鼠等迁徙动物可以起到微塑料横向迁移的载体作用。对土壤植物根系的生长和对水分、养分的吸收, 导致植物生长缓慢、植株矮小、叶片发黄等现象, 对土壤动物误食会磨损它们的肠道组织, 轻则生长发育迟缓, 体重减轻, 重则死亡。

3. 土壤微塑料对蚯蚓生态毒理研究现状

目前,国内外研究学者发表了大量微塑料与蚯蚓的研究,结果表明微塑料对蚯蚓的生长繁殖以及肠道微生物均有抑制作用。采用单一暴露的方式,结合微塑料的特性,选取不同类型的塑料种类,或调整塑料粒径、浓度等因素对蚯蚓的生存生活进行相关研究。复合暴露指的是选取微塑料及其他化学物质等2种或2种以上的污染物,研究其对蚯蚓的符合影响。宋言发现,赤子爱胜蚓暴露再 PLA-MPs 四周后死亡率显著增加,比对照组增加了 30.84%,而威廉环毛蚓的死亡率与对照组无明显差异[8]。目前最常用的蚯蚓研究品种是赤子爱胜蚓,赤子爱胜蚓对环境相关浓度污染土壤的响应较为明显,因其繁殖速度快、适应力强,体型相对较小且易于实验室环境饲养,于是成为了实验室的理想实验对象。

4. 微塑料暴露对蚯蚓的影响

4.1. 蚯蚓的生长发育

4.1.1. 体重损失

研究对蚯蚓的影响通过控制微塑料的种类、浓度以及粒径大小,体重变化的指标可以直接反映蚯蚓接触微塑料污染物的生理变化。众多研究表明,当赤子爱胜蚓暴露在一定浓度的微塑料环境中时,可能会出现体重下降的情况。Boots 等人发现,0.1%的高密度 PE 微塑料与对照组相比显著降低了蚯蚓的生物量[9]。微塑料体积小、分布广泛,容易被蚯蚓误食。当大量微塑料进入蚯蚓的消化道后,可能会在其肠道内堆积,阻碍了食物的正常通过和消化,使蚯蚓无法正常摄取和吸收营养物质。例如,一些直径较大或形状不规则的微塑料颗粒,难以被蚯蚓的消化系统分解或排出,长时间积累在肠道中,影响了蚯蚓的进食和消化功能,从而导致体重减轻;Choi 等人研究表明微塑料的边缘可能比较尖锐,在通过蚯蚓的消化道时,会划伤肠道内壁,引起肠道炎症和损伤,受伤的肠道不仅影响了营养物质的吸收,还可能导致蚯蚓体内的水分和营养物质流失,进而影响体重[10]。而且,肠道的损伤还可能引发感染等并发症,进一步加重蚯蚓的健康问题,使其体重下降;PLA 塑料自身可能会散发一些特殊的气味,或者其在土壤中会吸附一些化学物质,这些气味和化学物质可能会干扰蚯蚓对食物的感知。蚯蚓通常依靠嗅觉和味觉来寻找和识别食物,微塑料产生的异味可能会让蚯蚓误以为土壤中的有机物质减少或质量下降,从而降低它们的进食欲望,导致长期摄入食物量不足。

4.1.2. 死亡率

微塑料对蚯蚓的存活具有不利影响。研究发现微塑料不规则的外表和边缘会使蚯蚓表皮划伤撕裂,引起蚯蚓死亡。同时,特定微塑料例如聚乳酸(PLA)微塑料由于其自身散发的特殊气味,会吸引蚯蚓误食[11],划伤肠道组织,产生虚假饱腹感,身体长期得不到能量贮存,这是导致蚯蚓死亡的原因之一。研究发现,蚯蚓暴露在高浓度微塑料污染环境时,死亡率大大提升,特别是延长暴露时间后,死亡率进一步提高。Keyi Chen 研究发现浓度为 0.02%的 PP 和 PE 组,14 天之后死亡率与对照组没有显著差异,可能是因为微塑料暴露浓度较低[12],但较高浓度(0.4%~1.2%)的 PE 处理组蚯蚓的死亡率上升,同时影响了蚯蚓的体重。研究发现微塑料粒径大小也是影响蚯蚓生命活动的重要因素,极小或较大粒径的微塑料都可能对蚯蚓有更大的伤害。较大粒径及较高浓度(250 μm ~200 mg/kg)的 PS-MPs 能够显著抑制蚯蚓的生存,且暴露 28 天与暴露 14 天相比,蚯蚓的存活率整体有轻微的下降[13]。这些结果都表明后续仍需更深入地探究不同种类微塑料以及粒径、浓度、暴露时长对蚯蚓的影响。

4.1.3. 回避行为

蚯蚓的回避行为是指当蚯蚓感受到周围环境中存在对其生存不利的因素(如微塑料等污染物)时,所

表现出的主动躲避、逃离该环境区域，趋向于更适宜生存环境的行为。这种行为是蚯蚓对潜在威胁的一种本能反应，目的是减少不利因素对自身的伤害。

通常回避试验会使用一个二室型装置，该装置中间有可活动的隔板将其分为两个腔室。具体试验过程如下：首先将测试土壤(含有微塑料的土壤)和对照土壤(无污染的清洁自然土壤)分别装入二室型装置的两室中，两种土壤中间用塑料隔板隔开；然后将健康成年的蚯蚓放入原先隔板的位置，抽离隔板使蚯蚓可以自由进入两个腔室；经过一段时间的培养后，再将塑料隔板重新插回原位；最后分别检查隔板两边土壤中的蚯蚓数量，用于计算回避率。

一般采用的蚯蚓回避率计算公式为： $NR = (C - T) / (C + T) * 100\%$ 。

其中，NR 为回避率，C 为对照土壤(清洁土壤)中的蚯蚓数目，T 为测试土壤(含有微塑料等污染物的土壤)中的蚯蚓数目。当值为负数时，值认定为 0，视为蚯蚓无回避效应；当 NR 为正数，计算回避率[14]。

一般来说，随着微塑料浓度的增加，蚯蚓的回避率也会逐渐升高。当微塑料浓度较低时，可能对蚯蚓的生存环境影响较小，蚯蚓的回避行为不明显；但当微塑料浓度达到一定程度后，蚯蚓会明显感觉到环境的不适，从而表现出较高的回避率。

4.1.4. 繁殖能力

当蚯蚓暴露在微塑料污染的环境中，评价蚯蚓的繁殖能力的指标主要有繁殖数量和繁殖周期。繁殖数量包括蚓茧数量和幼蚓数量。目前研究大多采用观察蚓茧数量的方法，蚓茧是蚯蚓繁殖的重要产物，通过统计一定时间内蚯蚓产生的蚓茧数量，可以直接了解蚯蚓的繁殖活性。例如，在无污染的对照环境中，蚯蚓在一个繁殖周期内可能产生数十个蚓茧，而在微塑料污染环境下，蚓茧数量可能明显减少。幼蚓的出现代表了蚯蚓繁殖的成功。观察并统计一定时间内新生幼蚓的数量，可以评估微塑料对蚯蚓繁殖能力的影响程度。如果微塑料对蚯蚓繁殖产生负面影响，幼蚓数量会显著低于正常环境下的数量。

蚯蚓的繁殖周期长短也能反映其繁殖能力的强弱。通常情况下，蚯蚓的繁殖周期受到多种因素的影响，包括环境条件、食物供应等。当暴露于微塑料环境中时：观察蚯蚓从交配到产生蚓茧以及幼蚓孵化所需的时间。如果微塑料干扰了蚯蚓的生理过程，可能会延长繁殖周期。例如，在正常环境下，蚯蚓的繁殖周期可能为几个月，而在微塑料污染环境下，繁殖周期可能会延长至数月甚至更久。对比不同微塑料浓度下蚯蚓的繁殖周期变化。一般来说，微塑料浓度越高，对蚯蚓繁殖周期的影响可能越大。

4.2. 蚯蚓肠道微生物功能

微塑料对蚯蚓肠道微生物群落功能产生多方面的影响，对微生物组成成分的变化门水平上，原位土壤和蚯蚓肠道的细菌群落原本以变形菌门为主，但随着土壤中微塑料丰度的增加，蚯蚓肠道中拟杆菌门的相对丰度增加，而厚壁菌门相对丰度减少。这意味着微塑料的存在改变了蚯蚓肠道微生物原本的群落结构组成。属水平上，暴露于微塑料可能会影响到一些特定属的微生物。例如，一些原本在蚯蚓肠道中处于相对稳定状态的微生物属，可能因微塑料的影响而发生数量或比例的改变，但具体哪些属受到显著影响还需要进一步深入研究。微生物相对丰度的变化，总体上，微塑料的存在会导致蚯蚓肠道微生物的多样性降低，一些微生物的相对丰度发生变化。这是因为微塑料可能会对某些微生物产生抑制作用，而对另一些微生物的生长和繁殖产生促进作用。例如，微塑料进入蚯蚓肠道后可能会改变肠道内的环境条件，如氧气含量、pH 值等，从而影响微生物的生存和繁殖。一些能够适应这种变化的微生物可能会逐渐增多，而那些对环境变化敏感的微生物则会减少。Boots 等人对蚯蚓肠道做了组织病理学检查，结果显示暴露于 PP 和 PE 微塑料的蚯蚓肠道中肠上皮和纤维组织有不同程度的损伤[9]。

5. 结论

土壤微塑料问题日益凸显, 其对蚯蚓的影响不容小觑。在生态毒理层面, 微塑料可改变蚯蚓的栖息环境。当蚯蚓误食微塑料后, 会在其体内累积, 干扰消化系统正常运作, 致使营养吸收受阻, 生长发育减缓。长期处于含微塑料的土壤中, 蚯蚓的繁殖能力也会下降, 后代数量减少、质量降低。而且, 微塑料可能影响蚯蚓的肠道微生物, 改变其正常的行为模式, 如觅食、钻土等活动。这些影响破坏了蚯蚓在土壤生态系统中的平衡作用, 对整个生态系统的稳定产生威胁。

参考文献

- [1] Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., *et al.* (2004) Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science*, **304**, 838-838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- [2] Nizzetto, L., Futter, M. and Langaas, S. (2016) Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin? *Environmental Science & Technology*, **50**, 10777-10779. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>
- [3] 丁凡, 严昌荣, 汪景宽. 黑土地保护中不容忽视的一个问题: 地膜残留及其污染[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 234-240.
- [4] 刘一凡, 杨丽娟, 王红, 等. 蚯蚓粪肥在农业生产中的应用效果及研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 474-484.
- [5] Boughattas, I., Hattab, S., Zitouni, N., Mkhinini, M., Missawi, O., Bousserhine, N., *et al.* (2021) Assessing the Presence of Microplastic Particles in Tunisian Agriculture Soils and Their Potential Toxicity Effects Using *Eisenia Andrei* as Bioindicator. *Science of The Total Environment*, **796**, Article ID: 148959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148959>
- [6] Hopewell, J., Dvorak, R. and Kosior, E. (2009) Plastics Recycling: Challenges and Opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **364**, 2115-2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- [7] Huerta Lwanga, E., Thapa, B., Yang, X., Gertsen, H., Salánki, T., Geissen, V., *et al.* (2018) Decay of Low-Density Polyethylene by Bacteria Extracted from Earthworm's Guts: A Potential for Soil Restoration. *Science of The Total Environment*, **624**, 753-757. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.144>
- [8] 宋言. 聚乳酸微塑料(PLA-MPs)对两种生活型蚯蚓的生态毒理效应[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [9] 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>
- [10] Choi, D., Bang, J., Kim, T., Oh, Y., Hwang, Y. and Hong, J. (2020) In Vitro Chemical and Physical Toxicities of Polystyrene Microfragments in Human-Derived Cells. *Journal of Hazardous Materials*, **400**, Article ID: 123308. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123308>
- [11] Wang, L., Peng, Y., Xu, Y., Zhang, J., Liu, C., Tang, X., *et al.* (2022) Earthworms' Degradable Bioplastic Diet of Polylactic Acid: Easy to Break down and Slow to Excrete. *Environmental Science & Technology*, **56**, 5020-5028. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08066>
- [12] Chen, K., Tang, R., Luo, Y., Chen, Y., El-Naggar, A., Du, J., *et al.* (2022) Transcriptomic and Metabolic Responses of Earthworms to Contaminated Soil with Polypropylene and Polyethylene Microplastics at Environmentally Relevant Concentrations. *Journal of Hazardous Materials*, **427**, Article ID: 128176. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128176>
- [13] 谢凌莉. 聚苯乙烯微塑料介导赤子爱胜蚓肠道应激响应特征研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [14] 徐甦, 周玲珠, 潘辰苑, 等. 蚯蚓对多菌灵污染土壤回避行为的研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(2): 810-812.