

农田微塑料及混合污染物对蚯蚓影响的研究进展



高佳楠^{1,2} 张硕^{1,2} 吕绍旗^{1,2} 张志伟^{1*} 肖能文^{2*}

(1. 山西农业大学林学院, 太谷 030801; 2. 中国环境科学研究院,
国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012)

摘要: 微塑料作为一种新兴污染物, 其污染已成为全球广泛关注的热点环境问题。特别是农田土壤中微塑料污染对食物链和陆生生态系统构成了潜在威胁, 微塑料及其与其他污染物的混合作用对蚯蚓造成了一系列不利影响, 包括体重减轻、运动能力下降、生存率降低和免疫力减弱等。此外, 微塑料与污染物的混合暴露干扰了蚯蚓的肠道微生物平衡, 引发其细胞水平上的氧化应激和DNA损伤。该文从研究对象、试验设计、微塑料及混合污染物的类型和浓度等方面综述了关于微塑料及混合污染物对蚯蚓生长和生理影响的研究进展。同时, 提出了未来研究需进一步标准化研究方法以增强结果的可比性, 加强田间条件下对微塑料污染的系统评估, 关注微塑料对蚯蚓的长期影响, 以期为环境保护和土壤污染治理提供参考依据。

关键词: 蚯蚓; 微塑料; 农业土壤; 复合污染

Progress in researches on the influence of microplastics and mixed pollutants on earthworms

Gao Jianan^{1,2} Zhang Shuo^{1,2} Lü Shaoqi^{1,2} Zhang Zhiwei^{1*} Xiao Nengwen^{2*}

(1. Collage of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi Province, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Ecological Processes and Functions Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Microplastics (MPs), as an emerging pollutant, is one of hot environmental issues and receives global concerns. The pollution of MPs in farmland soil poses potential threats to the food chain and terrestrial ecosystems. MPs and mixed pollutant with other pollutants have caused a range of negative impacts on earthworms, such as weight loss, reduced mobility, lower survival rates, and weakened immunity. Moreover, the mixed exposure to MPs and other pollutants disrupt the balance of intestinal microorganisms in earthworms, leading to oxidative stress and DNA damage at the cellular level. This study summarizes the effects of single pollutant MPs and mixed pollution with heavy metals and organic pollutants on the growth and physiology of earthworms, in terms of the study subjects, experimental design, and the types and concentrations of pollutants. This review highlights the need in standardizing research methods to enhance the comparability of results from different studies, strengthening systematic assessment under field conditions, and paying attention to the long-term effects of MPs on earthworms, so as to provide a scientific basis for environmental protection and soil pollution management.

Key words: earthworms; microplastic; agricultural soil; mixed pollution

塑料是一种高分子化合物, 通过加聚或缩聚反应将单体聚合而成, 通常添加合成树脂、增塑剂、稳定剂和染色剂等化学物质。由于塑料废物管理系统不完善, 大多数塑料废物仍滞留在环境中, 仅有约20%

基金项目: 生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006), 北京市生物多样性调查及评估项目

*通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: nmgzhiwei@163.com, xiaonw@163.com

收稿日期: 2023-09-04

的塑料废物被回收和焚烧(Klemeš et al., 2021)。塑料废物一般难以降解,可能存在于环境中长达数十年至数百年(Geyer et al., 2017)。环境中的大型塑料会通过物理(机械作用、温度效应或紫外线辐射)和化学(氧化、水解)作用破碎降解,导致新兴污染物微塑料的形成。微塑料一般是指粒径小于5 mm的塑料碎片(Cole et al., 2011),微塑料污染已成为世界各地主要关注的环境问题之一,并且微塑料和土壤中其他有机物复合形成混合污染物,均可能对环境生态系统和生物多样性产生负面影响。农田土壤中的微塑料主要来源于复合有机肥、农用地膜、农田灌溉用水、垃圾填埋和废物处理等,也包括农业肥料和农药等包装废弃物(Tian et al., 2022)。这些塑料废物分解成微塑料,对土壤生态系统产生影响,如对土壤的理化性质和土壤中的生物群落产生影响(Li et al., 2020; Qi et al., 2020)。微塑料还能通过间接影响植物生长从而对农业可持续性发展和粮食安全造成潜在的不良后果(Rochman et al., 2015; Hoellein et al., 2017)。

蚯蚓作为土壤中的一种重要生物,对土壤有着至关重要的作用。土壤中的蚯蚓数量众多,通过进食、排泄、挖洞及日常活动等行为,对土壤结构、其他生物数量和功能以及整个土壤环境均可产生影响(Xiao et al., 2006)。蚯蚓还能调节土壤的物理和化学性质,有助于改良退化土壤、提高养分效率以及促进植物生长(Hodson et al., 2023)。蚯蚓对微塑料、重金属、农药和多氯联苯等多种污染物敏感,是土壤污染的指示生物,在毒理学试验中被大量应用(杜军辉等,2013; 张鹏等,2014; Zhou et al., 2020)。目前,蚯蚓已被广泛应用于评价微塑料对土壤生态系统的影响(Cui et al., 2022)。作为土壤模式动物之一,蚯蚓常被用于研究生物扰动下土壤中微塑料的迁移。Huerta Lwanga et al.(2018)研究结果显示,土壤中聚乙烯(polyethylene, PE)-微塑料会随着蚯蚓的运动而迁移至其洞穴中,而在蚯蚓的排泄物中也发现了PE-微塑料颗粒(粒径小于150 μm),表明蚯蚓可吞食PE-微塑料。土壤中微塑料对蚯蚓生长、繁殖和免疫系统均能产生不利影响,并通过食物链影响至下一级营养水平(Hartmann et al., 2017)。目前,国内外研究主要集中在不可降解微塑料,而对于可降解微塑料及其混合物对蚯蚓的影响研究还较缺乏。本文从微塑料在土壤中的来源、种类及其分布特征等方面综述微塑料对蚯蚓的影响,为理解微塑料的生态影响提供新的视角,也为农田蚯蚓的生态保护

提供重要参考。

1 土壤微塑料对蚯蚓生理生态影响的研究现状

目前,国内外学者对蚯蚓生态毒理学进行了大量研究,结果表明微塑料对蚯蚓生长、繁殖和免疫系统均有负面影响(Cao et al., 2021)。土壤微塑料对蚯蚓的影响一般分为单一暴露于微塑料和复合暴露于微塑料与其他化学物质2种,具体如表1和表2所示。如PE-微塑料对赤子爱胜蚓*Eisenia fetida*可造成皮肤损伤,并在其体内引发细胞氧化应激;但蚯蚓同时暴露于PE-微塑料和镉中可引起蚯蚓的死亡率升高和生物量减少,说明复合暴露对蚯蚓具有叠加影响(Zhou et al., 2020)。

2 微塑料单独暴露对蚯蚓的影响

2.1 微塑料单独暴露对蚯蚓的急性毒性

2.1.1 体重损失率

微塑料对蚯蚓生长的影响因素主要包括微塑料的浓度及颗粒大小,体重变化是蚯蚓生长受影响的重要指标。研究表明,将赤子爱胜蚓置于质量百分比28%、45%和60%的高剂量微塑料中,蚯蚓的生长速度减缓,体重下降,这些影响可能是由于微塑料在蚯蚓肠道和胃中积累,损害蚯蚓免疫系统,进而影响蚯蚓的摄食行为和发育(Rist et al., 2017; Yin et al., 2019)。微塑料会对蚯蚓肠道产生损伤,如堵塞、磨损和撕裂(Jiang et al., 2020),由于微塑料限制了蚯蚓吸收和利用营养物质,从而导致蚯蚓体重下降(Wang L et al., 2022)。即使在低浓度下,例如1% PE-微塑料和10%聚乳酸(polylactic acid, PLA)-微塑料也能导致赤子爱胜蚓体重降低,张书武等(2023)发现10% PLA-微塑料暴露导致赤子爱胜蚓的体重损失率升高。Adhikari et al.(2023)探索了微塑料对农业土壤生态系统的影响,特别关注了聚己二酸丁二酯(polybutylene adipate, PBAT)-微塑料和PE-微塑料对赤子爱胜蚓健康的潜在影响,将25 μm微塑料添加至土壤表层,并观察了20 d的暴露效果,发现赤子爱胜蚓并未出现体重下降或活力减弱等健康恶化迹象。导致这种结果的原因可能是赤子爱胜蚓仅暴露在土壤表面的微塑料中,蚯蚓只有在土壤表面觅食时才会接触到微塑料,减少了接触微塑料的时长。综上所述,在符合环境要求的浓度和较短的暴露时间下,微塑料对赤子爱胜蚓的体重没有不利影响。

土壤微塑料中,显著抑制了其体内SOD的活性,并引起DNA损伤。Wang et al.(2019)研究发现暴露于PE-微塑料或PS-微塑料环境的蚯蚓体内SOD活性会受到抑制,而CAT和POD的活性则出现显著升高的现象。目前,微塑料对蚯蚓体内氧化应激反应的影响结果均是在含量较高的控制试验中得到的,而在较低含量的微塑料环境中,蚯蚓的大多数生化指标则没有受到明显的影响。因此,在多数正常的外部环境中,微塑料可能不会对蚯蚓的氧化应激产生较大的负面影响。

2.5 肠道微生物群落与功能

肠道菌群在宿主健康、病原体防御、免疫和代谢等方面发挥着重要作用。蚯蚓肠道菌群的变化是指示土壤污染的重要指标(Sun et al., 2020)。Xu & Yu (2021)研究表明,微塑料会破坏蚯蚓的肠道菌群,但目前微塑料对蚯蚓肠道菌群的影响机制仍不清晰。Lei et al.(2018)研究发现微塑料可引起土壤动物肠道损伤,主要是由于微塑料对消化道内表面的堵塞和物理作用。此外,微塑料还可以改变蚯蚓的肠道菌群和消化功能等(Fackelmann & Sommer, 2019)。Yang et al.(2022)将蚯蚓暴露于含0.1、10和100 μm三种不同粒径的PS-微塑料土壤中21 d,发现10 μm PS-微塑料使蚯蚓肠道细菌群落组成发生改变,其中变形杆菌门Proteobacteria和拟杆菌门Bacteroidetes的种类相对丰度高于对照组。Yu et al.(2022)研究结果显示,质量百分比0.5%~14%的PE-微塑料和PLA-微塑料对蚯蚓肠道主要微生物群没有影响,但调整了放线菌门等特定微生物的丰度。因此,蚯蚓肠道内不同微生物门对微塑料的响应存在差异。

3 微塑料和其他污染物复合暴露对蚯蚓的影响

3.1 微塑料与重金属复合暴露对蚯蚓的影响

微塑料和重金属经常共存于自然环境中,常见的重金属如镉和锌被广泛用于塑料制品中的稳定剂和颜料,并且其质量百分比分别高达1%和10%(Lin et al., 2012)。关于重金属与微塑料对蚯蚓共同影响的研究还很少(Cao et al., 2021),其复合暴露会对蚯蚓产生更复杂的影响。与单独暴露相比,同时暴露于微塑料和重金属环境中,会加剧对蚯蚓的不利影响(Hartmann et al., 2017)。Baeza et al.(2020)试验结果表明,镉和微塑料复合暴露会显著降低蚯蚓的生长速率和死亡率,并且加剧了微塑料

对蚯蚓造成的氧化损伤。这也在Huerta Lwanga et al.(2017)研究中得到验证,其认为微塑料和重金属的共同作用导致了蚯蚓的运动能力和感知行为受损,并进一步影响其生活史。Wang QL et al.(2022)研究发现共同暴露于微塑料和重金属环境中可能会对蚯蚓的行为产生更大的影响,在镉污染的土壤中添加微塑料后,蚯蚓的回避率显著提高。Zhou et al.(2020)在含有PE-微塑料和镉的土壤中,蚯蚓受到微塑料和镉的叠加效应,致使蚯蚓死亡率升高、体重减少和生殖能力下降。微塑料增加了蚯蚓摄入更多污染物的可能性,而镉破坏了蚯蚓的生长和免疫系统。上述研究表明,与单独暴露相比,同时暴露于微塑料和重金属环境中可能会加剧对蚯蚓的不利影响,这是因为粒径较大的微塑料比粒径较小的微塑料具有更大的比表面积,可吸附更多的重金属,使蚯蚓中重金属的浓度增加。

3.2 微塑料与有机污染物复合暴露对蚯蚓的影响

微塑料可以促进有机污染物的积累,并加剧对蚯蚓生长的抑制作用。微塑料是疏水有机污染物的强吸附剂,表面可以吸附有机污染物,充当污染物进入蚯蚓体内的载体。土壤颗粒是蚯蚓吸收有机化合物的主要途径,当有机化合物的辛醇-水分配系数Kow>5时,蚯蚓可以通过皮肤吸收有机化合物(Liu et al., 2019; 2022)。Liu et al.(2019)研究表明,微塑料在被蚯蚓摄入体内后会直接积累而不会排出,这会引起附着在微塑料表面或内部的有机污染物在蚯蚓体内富集。Besseling et al.(2013)发现在沙蠋*Arenicola marina*(海蚯蚓)体内,低剂量的PS-微塑料会增加其对多氯联苯的积累。Xu et al.(2022)研究发现PS-微塑料可以显著增加赤子爱胜蚓体内菲的积累,其中,粒径较大的微塑料(10 μm和100 μm)在第1周内促进了蚯蚓对菲的积累,而粒径100 μm的微塑料则抑制了蚯蚓对菲的消除,纳米级微塑料和菲共同暴露对蚯蚓具有更高的遗传毒性。Liu et al.(2022)研究发现聚丁二酸丁二醇酯(polybutylene-succinate, PBS)-微塑料能显著增强菲在赤子爱胜蚓体内的积累(Liu et al., 2022)。此外,纳米级微塑料颗粒还可以降低蚯蚓肠道中降解芘所必需的细菌的相对丰度,从而抑制芘的降解,导致芘在蚯蚓体内积累(Boughattas et al., 2022)。

除以上提到的有机污染物,微塑料的存在也会促进农药在蚯蚓体内的积累。农田土壤中主要有机污染物是化学农药和地膜,地膜残留物中农药残留的总浓度比土壤中农药残留的总浓度高出约20倍,

- worm (*Eisenia fetida*). Chemosphere, 263: 128171
- Tang RG, Ying MS, Luo YM, El-Naggar A, Palansooriya KN, Sun T, Cao YT, Diao ZH, Zhang YX, Lian YC, et al. 2023. Microplastic pollution destabilized the osmoregulatory metabolism but did not affect intestinal microbial biodiversity of earthworms in soil. Environmental Pollution, 320: 121020
- Tian LL, Cheng JJ, Ji R, Ma YN, Yu XY. 2022. Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate. Current Opinion in Environmental Science & Health, 25: 100311
- Wang HT, Ding J, Zhu D, Li G, Jia XY, Xue XM. 2019. Exposure to microplastics lowers arsenic accumulation and alters gut bacterial communities of earthworm *Metaphire californica*. Environmental Pollution, 251: 110–116
- Wang J, Li J, Wang Q, Sun YZ. 2020. Microplastics as a vector for HOC bioaccumulation in earthworm *Eisenia fetida* in soil: importance of chemical diffusion and particle size. Environmental Science & Technology, 54(19): 12154–12163
- Wang L, Peng YW, Xu YL, Zhang JJ, Liu CG, Tang XJ, Lu Y, Sun HW. 2022. Earthworms' degradable bioplastic diet of polylactic acid: easy to break down and slow to excrete. Environmental Science & Technology, 56(8): 5020–5028
- Wang QL, Adams CA, Wang FY, Sun YH, Zhang SW. 2022. Interactions between microplastics and soil fauna: a critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 52(18): 3211–3243
- Xiao NW, Jing BB, Ge F, Liu XH. 2006. The fate of herbicide aceto-chlor and its toxicity to *Eisenia fetida* under laboratory conditions. Chemosphere, 62(8): 1366–1373
- Xu GH, Yu Y. 2021. Polystyrene microplastics impact the occurrence of antibiotic resistance genes in earthworms by size-dependent toxic effects. Journal of Hazardous Materials, 416: 125847
- Xu JP, Zhang K, Wang L, Yao YM, Sun HW. 2022. Strong but reversible sorption on polar microplastics enhanced earthworm bioaccumulation of associated organic compounds. Journal of Hazardous Materials, 423: 127079
- Yang Y, Xu GH, Yu Y. 2022. Microplastics impact the accumulation of metals in earthworms by changing the gut bacterial communities. Science of the Total Environment, 831: 154848
- Yin LY, Liu HY, Cui HW, Chen BJ, Li LL, Wu F. 2019. Impacts of polystyrene microplastics on the behavior and metabolism in a marine demersal teleost, black rockfish (*Sebastes schlegelii*). Journal of Hazardous Materials, 380: 120861
- Yu H, Shi LL, Fan P, Xi BD, Tan WB. 2022. Effects of conventional versus biodegradable microplastic exposure on oxidative stress and gut microorganisms in earthworms: a comparison with two different soils. Chemosphere, 307: 135940
- Zhang MY, Zhang YT, Wang WT, Cui WZ, Wang L, Sun HW, Liu CG. 2022. Combined effects of microplastics and other contaminants on earthworms: a critical review. Applied Soil Ecology, 180: 104626
- Zhang P, Chen CY, Li H, Liu F, Mu W. 2014. Selective toxicity of seven neonicotinoid insecticides to fungus gnat *Bradysia odoriphaga* and earthworm *Eisenia foetida*. Journal of Plant Protection, 41(1): 79–86 (in Chinese) [张鹏, 陈澄宇, 李慧, 刘峰, 慕卫. 2014. 七种新烟碱类杀虫剂对韭菜迟眼蕈蚊幼虫及蚯蚓的选择毒力. 植物保护学报, 41(1): 79–86]
- Zhang SW, Ren S, Pei L, Sun YH, Wang FY. 2023. Toxicological effects of polyethylene and polylactic acid microplastics on earthworms. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 29(2): 322–327 (in Chinese) [张书武, 任珊, 裴磊, 孙玉焕, 王发园. 2023. 聚乙烯和聚乳酸微塑料对蚯蚓的毒性效应. 应用与环境生物学报, 29(2): 322–327]
- Zhong HY, Yang S, Zhu L, Liu C, Zhang Y, Zhang YZ. 2021. Effect of microplastics in sludge impacts on the vermicomposting. Biore-source Technology, 326: 124777
- Zhou YF, Liu XN, Wang J. 2020. Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida*. Journal of Hazardous Materials, 392: 122273
- Zicsi A, Szlavecz K, Csuzdi C. 2011. Leaf litter acceptance and cast decomposition by peregrine and endemic European *lumbricids* (Oligochaeta: Lumbricidae). Pedobiologia, 54(S): 145–152

(责任编辑:王璇)