

微塑料老化特征及吸附特性研究进展

吕昊楠

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年12月11日; 录用日期: 2025年1月6日; 发布日期: 2025年1月15日

摘要

微塑料作为环境污染物的重要载体, 对于重金属的迁移、转化和毒理的影响是不可忽视的, 微塑料在环境中会受到老化作用, 导致其物理结构或化学特性进一步改变, 既而影响其在环境中的吸附行为, 本文系统地介绍了微塑料在自然环境中的老化行为, 并在此基础上总结了老化后微塑料对各类污染物的吸附特性变化, 进一步探究微塑料老化后的研究方向, 以便后期能更为全面地评估微塑料在环境中的风险, 为学者们提供科学指导。

关键词

微塑料, 老化特征, 吸附特性

Aging Characteristics and Adsorption Properties of Microplastics: Research Progress

Haonan Lv

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Dec. 11th, 2024; accepted: Jan. 6th, 2025; published: Jan. 15th, 2025

Abstract

As important carriers of environmental pollutants, microplastics play a significant role in the migration, transformation, and toxicological effects of heavy metals. Microplastics undergo aging processes in the environment, leading to changes in their physical structures and chemical properties, which in turn affect their adsorption behavior. This paper systematically reviews the aging behavior of microplastics in natural environments, summarizes the changes in the adsorption characteristics

文章引用: 吕昊楠. 微塑料老化特征及吸附特性研究进展[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(1): 21-27.

DOI: 10.12677/aep.2025.151004

of various pollutants by aged microplastics, and further explores future research directions. The aim is to provide a more comprehensive assessment of the environmental risks posed by microplastics and to offer scientific guidance for researchers.

Keywords

Microplastics, Aging Characteristics, Adsorption Properties

Copyright © 2025 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

一般而言,微塑料(MPs)被定义为直径小于 5 mm 的塑料颗粒或碎片,其广泛存在于海洋、淡水、土壤、大气、河流沉积物以及各类生命体中[1],已有研究显示微塑料可以通过呼吸吸入、口腔摄入以及皮肤接触等方式进入人体内,对人体健康造成威胁。微塑料通常来源于通用塑料、工程塑料以及特种塑料的破碎和降解,由于其尺寸小、比表面积大、分布广泛、在环境中不容易降解等特征,在全球范围内受到广泛关注,成为环境污染问题之一。近年来,国际上对微塑料污染及其生态影响的研究取得了显著进展,欧美等国家较早开展了微塑料的监测与生态风险评估研究,主要集中在海洋和淡水生态系统中微塑料的分布、来源及迁移机制。例如,Andrady 等人指出较大的比表面积、孔隙率和粗糙的表面形貌通过提供更多潜在的吸附位点来提高微塑料的吸附能力[2]。而国内学者研究主要集中在微塑料的环境分布、来源解析及生态毒性等方面。随着塑料在环境中的不断累积和降解,微塑料逐渐成为环境污染物的“载体”,能够吸附和富集重金属、有机污染物等有害物质,从而对生态系统和人体健康构成潜在威胁。微塑料极易吸附环境中的有机和无机污染物,比如 PAHs、四环素、溶解性有机质以及重金属,进而形成复合污染,在吸附过程中,微塑料会作为载体富集环境中的污染物,并将其转移至其他生物体内,这可能会导致更加严重的毒理学效应[3]。而老化后的微塑料表面粗糙度和官能团会发生显著变化,使其吸附性能增强。目前存在的问题和挑战分为以下三点:微塑料老化机制不明确、污染物吸附特性研究不足以及生态风险评估缺乏系统性。本文以微塑料老化过程及其污染物吸附特性为出发点,系统总结国内外微塑料老化机制、污染物吸附特征及其生态影响方面的研究进展,分析当前研究存在的不足,提出未来研究方向和重点领域。通过对微塑料在不同环境介质中的老化行为及污染物吸附特性的深入探讨,全面评估微塑料的环境风险,为制定微塑料污染防控措施提供科学依据和理论支撑。

2. 微塑料老化

2.1. 微塑料老化方式

微塑料进入自然环境后,会经历一系列复杂的老化过程[4]。老化过程中,塑料材料受到多种老化方式的作用,其中包括物理老化、化学老化以及生物老化[5]。物理老化是微塑料在自然环境中经受的最常见的老化方式之一。暴露于紫外线辐射、风化、冲击、摩擦等作用下,微塑料的表面逐渐发生损伤,表现为颗粒形态的变化、微裂纹的形成以及表面粗糙度的增加。紫外线辐射会导致塑料材料中的高分子链断裂,减少其分子量,进而影响其力学性能和化学稳定性。随着物理老化的进一步推进,微塑料颗粒的表面可能出现更多的微孔和裂缝,这为污染物的附着提供了更多的表面位点[6];化学老化过程主要通过氧

化反应来发生,微塑料在空气中的氧气、臭氧、氮氧化物等化学物质作用下,发生氧化降解,产生含氧官能团(如羧基、醇基、酮基等) [7]。这些官能团能够增加微塑料表面的亲水性,从而改变其与环境中污染物的相互作用。化学老化不但能够改变微塑料的表面物理结构和化学特性,还可以影响其在自然环境条件下的寿命以及稳定性;生物老化是指微塑料在生物体内或在微生物、真菌等生物的作用下发生降解。生物降解作用通过微生物的酶促反应、真菌的分解等途径,将塑料分子降解成较小的单体或低聚物,这些低分子物质可能进一步被微生物利用。在自然环境中,微生物与微塑料的相互作用显著增加了微塑料的老化速度,使其更容易与环境中的其他污染物发生相互作用[8]。

2.2. 微塑料老化过程的影响

微塑料老化会影响其物理结构和化学性质。研究表明,通过不同方式得到的老化后的微塑料(MPs)表面褶皱、比表面积以及粗糙度发生改变,会使得微塑料整体的吸附性能得到显著增强。通过对比不同老化阶段微塑料的表面特性,可以发现随着老化程度的增加,微塑料对水溶性有机物(如溶解性有机质)、无机物(如重金属)的吸附能力也会相应增加。特别是经过紫外线辐射或化学降解后,微塑料表面的极性官能团大量增加,这些官能团具有较强的亲水性,可以更有效地与水中的污染物发生结合。

3. 微塑料的吸附特性

3.1. 污染物的种类

微塑料成为各类环境污染物的“载体”,能够吸附多种类型的污染物,主要包括以下几类:重金属、有机污染物和溶解性有机物。微塑料的吸附特性对于重金属的迁移、转化和毒性效应具有重要意义。由于微塑料表面官能团的存在,它能够通过静电作用、配位作用等方式吸附环境中的重金属离子。研究表明,老化后的微塑料对重金属铜(Cu)、镉(Cd)、铅(Pb)以及铬离子(Cr)等的吸附能力有显著提升,尤其是在有机化学基团的形成和增加之后,这种效应更为明显。而对于有机污染物如多环芳烃(PAHs)、农药、药物残留等,微塑料表面通过增加疏水性或增加亲油性官能团的数量,有助于吸附这些具有脂溶性的有机物质[9]。而微塑料在老化之后其表面物理结构和化学性质的显著变化,使其能够吸附更多的有机污染物如溶解性有机质(DOM)、氨基酸、溶解性蛋白质等。这些有机污染物通常具有较高的毒性,并且能够在食物链中传递,造成更大的生态风险。老化微塑料的亲水性增加,使得它对这些水溶性有机物的吸附能力增强。溶解性有机物不仅对水体生态有重要影响,而且某些有机物质可能是微生物的能量来源,进一步影响微生物的生长和生态平衡。值得注意的是,微塑料在老化过程中吸附的污染物往往表现出协同效应。例如,微塑料表面同时吸附重金属和有机污染物时,这些污染物之间可能发生复杂的相互作用,使得其毒性效应更加显著。重金属可能改变有机污染物的化学稳定性,增加其在环境中的生物利用度;而有机污染物则可能通过改变微塑料表面的物理化学性质,进一步促进重金属的吸附。这种复合污染对生态系统和人类健康的潜在威胁需要进一步深入研究。

总的来说,微塑料对污染物的吸附特性及其在老化后的变化,不仅影响污染物在环境中的迁移和转化,还加剧了污染物的持久性和生物毒性。这种特性使得微塑料在环境中成为重要的污染物载体,其研究对污染治理和环境风险评估具有重要意义。未来的研究应进一步探讨不同类型微塑料的吸附机制,以及老化过程中表面特性变化对污染物吸附行为的具体影响。

3.2. 吸附行为的影响因素

微塑料的吸附行为受到多种因素的影响,其中最关键的包括微塑料的物理化学性质、环境条件和污染物的特性。首先,微塑料的粒径、比表面积、表面电荷和官能团种类直接决定其吸附能力。较小的粒

径和较大的比表面积通常会增强微塑料的吸附能力，因为它们提供了更多的表面位点与污染物发生相互作用。老化后的微塑料由于表面官能团的增加(如羧基、醇基等)，亲水性和疏水性变化，能够吸附更多种类的污染物[10]。此外，环境因素如 pH 值、温度和离子强度等也会影响吸附过程[11]。例如，较低的 pH 值可能促进重金属离子的溶解，进而增强其与微塑料表面官能团的结合；而温度升高则可能加快吸附速率，或通过影响微塑料的化学稳定性改变吸附行为。最后，污染物的性质也是一个重要因素。疏水性较强的有机污染物通常能与微塑料的疏水性表面发生较强的相互作用，而亲水性较强的污染物则可能通过微塑料表面的亲水官能团被吸附[12]。因此，微塑料的吸附能力不仅依赖于其自身的物理化学特性，还与外部环境和污染物的种类密切相关。

3.3. 复合污染

微塑料不仅能够吸附单一污染物，还能与其他污染物发生复合污染现象[13]。微塑料作为污染物的载体，能够在环境中吸附并富集多种污染物，如重金属、有机污染物等，这些污染物通过食物链进入水生生物和陆生动物体内，最终可能影响到人类健康。微塑料吸附的污染物可能在其降解过程中被释放，进一步加剧环境污染的负面效应。

4. 微塑料老化后的研究方向

随着微塑料污染问题日益严重，了解其在环境中的老化过程及其带来的生态风险，成为当前研究的一个重要方向。尽管已有研究揭示了微塑料的老化行为及其对污染物吸附特性的影响，但在微塑料老化后的综合性研究仍存在诸多空白，特别是在微塑料对生态系统、物种及人类健康的长期影响方面。未来的研究方向可以从以下几个方面展开。

4.1. 微塑料在环境中的迁移与转化

微塑料进入环境后，经过长时间的降解与老化，可能会表现出不同的物理化学性质，如表面粗糙度的变化和极性官能团的增加，这些变化会显著影响其在水体、土壤和大气中的迁移与转化。当前的研究主要集中在微塑料的物理化学特性及其在环境中的分布，而对于微塑料的动态迁移、溶解、沉降和转化过程的长期跟踪研究仍然缺乏[14]。因此，未来应重点关注微塑料在不同环境条件下的迁移路径、转化速率及其与其他污染物的交互作用，以全面评估其对生态环境的影响。

4.2. 微塑料的生物降解与生态修复

随着微塑料污染问题的日益严峻，开发有效的生物降解和修复技术显得尤为重要。微塑料的生物降解不仅依赖于环境中的微生物、真菌和其他生物的降解能力，也受限于其化学性质和老化过程[15]。当前，虽然已有一些微生物能够降解某些类型的塑料材料，但微塑料的生物降解速度较慢，尤其是在海洋和土壤等自然环境中[16]。未来研究需要加强微塑料降解菌株的筛选与优化，探索微生物与其他生物降解途径相结合的综合治理方法。此外，开发新的环保材料，减少一次性塑料的使用，亦是减少微塑料污染源的有效途径[17]。

4.3. 微塑料的生态毒理学效应

微塑料对生态系统的影响不仅体现在其对污染物的吸附作用上，还涉及其对水生生物、土壤生物、植物以及人体的毒性效应[18]。尤其是在老化后的微塑料颗粒由于表面性质的改变，其对生物毒性效应可能更加严重。微塑料可以被生物误食，并通过食物链传递，导致其对水生生态系统和陆生生态系统的潜在威胁。此外，微塑料在生物体内的积累效应、迁移路径及其对物种多样性和群落结构的长期影响仍

需要进一步深入研究。未来应加强对微塑料长期暴露下生物毒性的评估,特别是对水生物、底栖生物和土壤动物的影响。对水生物来说,它们是最容易受到微塑料污染影响的群体。微塑料颗粒可以通过水体中的食物链进入水生生物体内,影响其生长、繁殖和生存。例如,鱼类、贝类和浮游生物等常常误食微塑料颗粒,造成机械性损伤或内脏堵塞,严重时甚至导致死亡。此外,微塑料在水生生物体内的积累还可能影响其免疫系统、内分泌系统以及代谢过程,进一步削弱其对环境变化的适应能力。某些研究表明,微塑料通过摄食或吸附有害化学物质(如重金属、有机污染物)进入生物体内,从而导致毒性效应的加剧。这些有害物质在生物体内的积累可能通过食物链的传递影响其他物种,最终导致生态系统的失衡;微塑料不仅在水生环境中对生物造成威胁,在土壤生态系统中也具有潜在的毒性效应。随着农业和工业活动的增加,微塑料进入土壤的途径逐渐增多。土壤生物(如蚯蚓、昆虫等)可能通过摄食或与土壤中的微塑料颗粒直接接触而受到影响。研究发现,微塑料颗粒可能对土壤生物的生长、繁殖及其生理功能造成损害。例如,微塑料在土壤中的沉积可能影响土壤的物理性质,如水分保持能力、透气性及营养物质的流动,从而间接影响植物的生长和土壤生物的生存。此外,微塑料对土壤微生物群落的影响也日益受到关注,某些微塑料颗粒可能成为微生物的载体或栖息地,进而改变土壤中的微生物群落结构和功能,影响土壤的生物多样性和生态服务功能,更加值得注意的是,微塑料通过食物链最终可能影响到人类健康,尤其是通过食物链中水生生物的摄食和污染。鱼类、贝类等水生生物容易摄入微塑料,这些生物通过食物链的传递最终可能被人类消费。微塑料的摄入可能会对人体健康造成危害,包括物理损伤、毒性积累以及炎症反应等。虽然目前对于微塑料在人体内的积累和影响仍缺乏足够的研究,但已有研究表明,微塑料中所携带的有害化学物质(如持久性有机污染物、重金属等)可能对人体的免疫系统、神经系统以及内分泌系统产生影响,甚至可能导致慢性疾病的发生。随着微塑料污染的日益严重,微塑料对人类健康的潜在威胁必须引起重视,尤其是对长期暴露的影响尚需深入研究。

4.4. 微塑料与其他污染物的联合作用

微塑料不仅仅是单一污染物,其与环境中其他污染物(如重金属、有机污染物、农药等)之间的联合作用已成为一个重要的研究课题[19]。微塑料能够通过其表面吸附作用,将多种污染物聚集并传递给生物体,进而加剧复合污染的风险。微塑料与重金属、持久性有机污染物(POPs)等的联合作用可能导致毒性效应的协同作用,甚至增强污染物的生物可利用性,使其更容易进入食物链。此外,微塑料的降解过程中可能释放出新的化学物质,这些物质可能具有毒性或促使环境中其他污染物的活性。未来研究应侧重探讨微塑料与其他污染物的联合作用机制及其对生态系统的复合影响,尤其是通过多组分毒理学实验,评估其在不同环境条件下的协同效应。

4.5. 微塑料的环境风险评估与监测

微塑料的环境风险评估与监测是当前研究中的一大挑战。尽管现有的监测方法能够较好地评估微塑料的污染分布,但对于微塑料污染的长期监控、老化过程中的风险变化及其对生态系统的长期影响评估仍显不足[20]。未来应加强微塑料在不同环境介质(如海水、淡水、土壤等)中的监测,开发高效、低成本的微塑料监测技术,并结合生态模型,评估微塑料对不同生态环境的潜在风险。随着微塑料污染的日益严重,完善的环境风险评估体系将有助于及时发现问题并采取有效措施应对。

5. 结论与展望

本文总结了微塑料的老化特征及其对吸附污染物特性的影响。结果表明老化过程通过物理、化学和生物机制导致微塑料表面粗糙度增加、孔隙结构增多和极性官能团显著增加,提升了对重金属(无机污染物)和有机污染物的吸附能力,尤其在复合污染条件下表现出污染物之间的协同吸附作用,可能加剧环境

风险。老化微塑料不仅加剧了污染物在环境中的富集,还可能通过食物链传递,导致生态系统和人类健康的长期风险。因此,微塑料的长期环境行为、降解机制及其与其他污染物的联合作用仍需进一步研究。与前人研究侧重单一污染物的吸附特性不同,本文进一步探讨了微塑料在不同环境介质中的动态迁移、转化及吸附机制,揭示了复合污染对生态系统和生物毒性的潜在加剧效应。未来研究应侧重微塑料在不同环境中的迁移、转化及其生态毒理效应,为制定有效的治理措施和环境风险评估提供科学依据。此外,开发微生物降解和修复技术,减少微塑料污染源的输入,亦是当前亟待解决的关键问题。通过综合性的研究和技术创新,能够更好地应对全球日益严峻的微塑料污染挑战。

参考文献

- [1] Rochman, C.M., Hoh, E., Kurobe, T. and Teh, S.J. (2013) Ingested Plastic Transfers Hazardous Chemicals to Fish and Induces Hepatic Stress. *Scientific Reports*, **3**, Article No. 3263. <https://doi.org/10.1038/srep03263>
- [2] Andrady, A.L. (2017) The Plastic in Microplastics: A Review. *Marine Pollution Bulletin*, **119**, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- [3] Zhao, L., Rong, L., Xu, J., Lian, J., Wang, L. and Sun, H. (2020) Sorption of Five Organic Compounds by Polar and Nonpolar Microplastics. *Chemosphere*, **257**, Article 127206. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127206>
- [4] Mao, R., Lang, M., Yu, X., Wu, R., Yang, X. and Guo, X. (2020) Aging Mechanism of Microplastics with UV Irradiation and Its Effects on the Adsorption of Heavy Metals. *Journal of Hazardous Materials*, **393**, Article 122515. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122515>
- [5] Guo, C., Wang, L., Lang, D., Qian, Q., Wang, W., Wu, R., et al. (2023) UV and Chemical Aging Alter the Adsorption Behavior of Microplastics for Tetracycline. *Environmental Pollution*, **318**, Article 120859. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120859>
- [6] Yang, J., Cang, L., Sun, Q., Dong, G., Ataul-Karim, S.T. and Zhou, D. (2019) Effects of Soil Environmental Factors and UV Aging on Cu²⁺ Adsorption on Microplastics. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 23027-23036. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05643-8>
- [7] Yang, Z., Li, Y. and Zhang, G. (2024) Degradation of Microplastic in Water by Advanced Oxidation Processes. *Chemosphere*, **357**, Article 141939. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141939>
- [8] Thakur, B., Singh, J., Singh, J., Angmo, D. and Vig, A.P. (2023) Biodegradation of Different Types of Microplastics: Molecular Mechanism and Degradation Efficiency. *Science of the Total Environment*, **877**, Article 162912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162912>
- [9] 杜钰赞, 孙姣霞, 付江, 等. 聚酰胺微塑料对磺胺类全氟烷基化合物在水-土界面吸附的影响研究[J]. 中国环境科学: 1-13. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20241104.001>, 2025-01-08.
- [10] Liu, G., Zhu, Z., Yang, Y., Sun, Y., Yu, F. and Ma, J. (2019) Sorption Behavior and Mechanism of Hydrophilic Organic Chemicals to Virgin and Aged Microplastics in Freshwater and Seawater. *Environmental Pollution*, **246**, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.100>
- [11] 陈浩然, 李昊, 林雨男, 等. 生物老化微塑料对重金属铜的吸附特性研究[J]. 海洋环境科学, 2024, 43(6): 963-972.
- [12] 李凯贺, 门聪, 程世昆, 等. 土壤中微塑料与抗生素吸附、迁移及复合毒性研究进展[J]. 环境科学: 1-19. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202405030>, 2025-01-08.
- [13] 曹艳晓, 陈诺, 徐鑫宇, 等. 生物炭修复塑料-铜复合污染土壤潜力与机制研究[J]. 中国环境科学: 1-15. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20241122.001>, 2025-01-08.
- [14] Guo, M., Noori, R. and Abolfathi, S. (2024) Microplastics in Freshwater Systems: Dynamic Behaviour and Transport Processes. *Resources, Conservation and Recycling*, **205**, Article 107578. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107578>
- [15] Liu, L., Xu, M., Ye, Y. and Zhang, B. (2022) On the Degradation of (Micro) Plastics: Degradation Methods, Influencing Factors, Environmental Impacts. *Science of the Total Environment*, **806**, Article 151312. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151312>
- [16] 寇诗棋, 关卓, 鲁旭阳, 等. 土壤中微塑料迁移及其对有机污染物的影响研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(3): 457-470.
- [17] Zhang, K., Hamidian, A.H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J.K.H., Wu, C., et al. (2021) Understanding Plastic Degradation and Microplastic Formation in the Environment: A Review. *Environmental Pollution*, **274**, Article 116554. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>

-
- [18] 王娜, 张士瑾. 水产动物中的微塑料及其对人健康的潜在危险性[J]. 海洋科学, 2023, 47(6): 124-129.
- [19] 张哥, 邹亚丹, 徐擎擎, 等. 微塑料与水中污染物的联合作用研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2019(2): 59-69.
- [20] 胡洪营, 夏军, 陈卓, 等. 新污染物的水环境伦理问题及对策[J/OL]. 环境工程: 1-12.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2097.X.20241206.1348.002>, 2025-01-08.