

微塑料在水体环境中的迁移特征与界面吸附行为研究

杜衡

桂林学院, 广西 桂林 541006

[摘要] 微塑料具有粒径小、环境持久性强和界面活性明显等特点, 其在水体中可发生悬浮、沉降、再悬浮及水平输移, 并通过吸附作用改变重金属、抗生素等污染物的环境归趋。文章分析微塑料粒径、密度和表面性质对迁移状态的影响, 探讨疏水作用、静电作用、氢键、表面络合及孔隙填充等界面吸附机制, 并结合典型公开试验数据分析聚合物类型、老化程度、pH、盐度和溶解性有机质的调节作用。研究表明, 微塑料迁移与吸附具有明显耦合性, 环境老化和生物膜附着进一步增加其复合污染行为的不确定性。

[关键词] 微塑料; 水体迁移; 界面吸附; 复合污染

DOI: 10.64635/ja.2026.1474

中图分类号: X52

文献标识码: A

Research on Migration Characteristics and Interfacial Adsorption Behavior of Microplastics in Aquatic Environments

Du Heng

Guilin College, Guilin, Guangxi 541006, China

Abstract: Microplastics are characterized by small particle size, strong environmental persistence, and obvious interfacial activity. In aquatic environments, they can undergo suspension, sedimentation, resuspension, and horizontal transport, and can alter the environmental fate of pollutants such as heavy metals and antibiotics through adsorption. This paper analyzes the effects of particle size, density, and surface properties of microplastics on their migration states, explores interfacial adsorption mechanisms such as hydrophobic interaction, electrostatic interaction, hydrogen bonding, surface complexation, and pore filling, and examines the regulatory effects of polymer type, aging degree, pH, salinity, and dissolved organic matter in combination with typical publicly available experimental data. The study shows that microplastic migration and adsorption are obviously coupled, while environmental aging and biofilm attachment further increase the uncertainty of their combined pollution behavior.

Keywords: microplastics; aquatic migration; interfacial adsorption; combined pollution

引言

微塑料通常是指粒径小于 5mm 的塑料颗粒, 其来源包括大型塑料制品破碎形成的次生微塑料, 以及工业生产和生活消费过程中直接产生的纤维、颗粒与微珠。进入河流、湖泊、水库和近岸水体后, 微塑料并不固定停留于某一环境介质, 而是在水动力、重力、浮力、颗粒碰撞及生物附着等共同作用下持续迁移。

微塑料的环境意义还体现在其表面能够富集其他污染物。塑料具有疏水表面和一定比表面积, 环境老化后还会出现裂纹、孔洞以及羟基、羧基等含氧官能团, 从而为有机污染物和金属离子提供更多吸附位点。相关研究将微塑料负载重金属并共同迁移的现象概括为“木马效应”, 认为这种载体行为可能改变重金属原有迁移范围和生物暴露方式^[1]。

微塑料由此同时具有“颗粒迁移”和“污染物载体”两种属性。其吸附状态会随着水化学条件改变而发生解吸, 迁移位置变化又会使其经历不同 pH、盐

度和有机质环境。因此, 分析微塑料环境归趋需要把物理迁移与界面吸附联系起来。

1 水体环境中微塑料的迁移基础

1.1 颗粒性质与垂向迁移

微塑料在水体中的垂向位置首先受到材料密度控制。聚乙烯和聚丙烯密度通常低于水, 未经明显改性的颗粒更容易漂浮于水面或上层水体。聚氯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯等材料密度较高, 更容易向下沉降。实际环境中的迁移状态并不能完全根据原始聚合物密度判断。

粒径和形状会改变颗粒所受阻力。粒径较小的微塑料具有较高比表面积, 沉降速度较低, 更容易在湍流作用下保持悬浮。纤维状颗粒的水动力行为又不同于规则球形颗粒, 其取向变化会影响阻力和沉降轨迹。

生物膜附着可以显著改变颗粒表现密度。水体中的细菌、藻类及胞外聚合物逐渐附着在微塑料表面后, 颗粒质量增加, 并可能与悬浮颗粒形成聚集体, 使原

本漂浮的低密度塑料向中下层水体迁移。沉积到底部的微塑料在洪水、船舶扰动或流速增加条件下又可能重新悬浮,形成周期性的“沉降一再悬浮”。

1.2 水动力作用下的水平输移

河流和湖库中的微塑料水平迁移受流速、流向、岸线条件及水体交换控制。粒径较小、密度接近水体的颗粒可以随水流长距离输送,高密度或已经形成大尺寸聚集体的颗粒则更容易在低流速区沉积。

河湾、湖湾、植被带和水工建筑物附近的局部流场会形成微塑料滞留区。强降雨和洪水期间,岸边堆积塑料以及沉积物中的微塑料又可能重新进入主河道。由此形成的空间分布并不等同于污染源分布,高浓度区域既可能靠近排放源,也可能是水动力长期聚集形成的结果。

迁移过程中颗粒还会经历紫外辐射、机械磨损和化学氧化,表面逐渐粗糙并形成新的官能团。这种变化一方面影响聚集与沉降,另一方面直接改变其对其他污染物的吸附能力。

2 微塑料界面吸附的主要作用机制

2.1 疏水分配与孔隙填充

疏水作用是微塑料吸附非极性或弱极性有机污染物的重要机制。聚乙烯、聚丙烯和聚苯乙烯等材料具有疏水表面,疏水性较强的污染物倾向由水相向塑料相分配。

微塑料表面裂纹、凹槽和微孔还能提供孔隙填充空间。已有研究整理结果显示,150~200 μm 聚氨酯颗粒对菲的吸附量可达到 $1.06 \times 10^{-4} \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,13.2 μm 聚氯乙烯对双酚类物质的吸附量约为 $0.241 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,不同污染物和聚合物之间表现出明显差异^[2]。

这种差异说明,不能简单以“微塑料比表面积较大”解释全部吸附过程。聚合物自身极性、玻璃化状态、结晶度和孔隙结构都会影响污染物向塑料内部或表面的分配。

2.2 静电作用及表面络合

微塑料表面电荷会随着 pH 和老化状态改变。水环境中的金属离子、离子型抗生素等污染物与微塑料之间可发生静电吸引或排斥,从而改变平衡吸附量。

环境老化会强化这一过程。紫外辐射和氧化作用能够在聚合物表面产生羧基、羟基和羰基等含氧官能团,这些位点可以与 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 等金属离子发生络合。2026 年的重金属吸附综述指出,极性聚酰胺对 Cu^{2+} 的吸附能力可达到非极性聚乙烯的约

2~3 倍,老化聚苯乙烯对 Cd^{2+} 的吸附能力可提高约 40%~60%,体现了聚合物化学结构和表面氧化的重要作用。

2.3 多种作用力共同参与的复合吸附

真实水环境中的吸附通常不是单一机制。氢键、 $\pi-\pi$ 相互作用、疏水作用、静电吸引、表面络合和范德华力可以同时存在,其相对贡献取决于污染物结构和水化学状态。

芳香族污染物与聚苯乙烯之间可能存在 $\pi-\pi$ 相互作用,带有羧基、羟基或氨基的污染物又能够与老化微塑料形成氢键。抗生素自身还可能在不同 pH 下发生质子化或去质子化,因此同一种微塑料对同一种污染物的吸附能力也会随环境变化。

这一特征决定了实验室获得的单一吸附常数不能直接用于所有天然水体。微塑料界面实际上处于持续演化状态,吸附和解吸具有明显动态性。

3 微塑料迁移与污染物共迁移特征

3.1 重金属负载及“载体效应”

重金属本身不能降解,其环境风险高度依赖赋存形态和迁移能力。微塑料吸附金属离子后形成复合颗粒,可能改变金属在水体和沉积物之间的分配。

针对高密度聚乙烯和聚苯乙烯的实验表明,在单一污染体系中,两种微塑料对 Cu^{2+} 和四环素表现出不同选择性。GPPS 和 HDPE 对 Cu^{2+} 的饱和吸附量分别为 0.178 和 0.257 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,对四环素分别为 0.334 和 0.194 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。 Cu^{2+} 和四环素共存时,相应吸附量提高至 0.529、0.411、0.471 和 0.341 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$,表现出明显协同吸附特征^[3]。

微塑料携带重金属迁移后,污染物原来的空间分布可能发生变化。颗粒被水生生物摄食后,消化液环境还可能诱发污染物解吸,从而形成新的暴露途径。

3.2 抗生素等有机污染物的共迁移

抗生素与微塑料共同存在于污水、河流和近岸水环境中。微塑料吸附抗生素后,可延缓部分化合物在水相中的迁移或降解,同时又可能将其携带至其他区域。

相关综述表明,环境风化可使部分微塑料的抗生素吸附能力提高最高约 171%,而盐度增加在部分实验中可使吸附量下降接近 100%,说明表面老化和离子环境对抗生素—微塑料界面作用具有较强调节能力^[5]。

抗生素与微塑料结合还涉及生物膜。附着生物膜可提供更多有机官能团和吸附位点,也可能改变抗生

素降解以及耐药菌和耐药基因的富集条件。因此,微塑料不仅改变污染物物理迁移,还可能参与水体微生物过程。

4 迁移与界面吸附的主要影响因素

4.1 聚合物类型、粒径与老化程度

不同聚合物具有不同分子结构、结晶度和表面极性。聚酰胺含有较多极性基团,与离子型或极性污染物之间更容易形成氢键和络合作用。聚乙烯和聚丙烯极性较低,对疏水有机污染物则具有较明显分配作用。

粒径减小通常会提高单位质量微塑料的有效表面积,并增加可利用吸附位点。表面老化则进一步形成裂纹和含氧基团,两种变化共同提高微塑料与污染物接触机会。

针对 PP 和 PE 吸附普萘洛尔与阿替洛尔的研究发现,PP 比表面积达到 $2.6252\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、结晶度为 51.44%,其对两种 β 阻断剂的吸附量整体高于 PE。疏水性较强的普萘洛尔 $\log K_{ow}$ 约为 3.48,在 PP 上的吸附表现更加明显^[4]。

4.2 pH、盐度及溶解性有机质

pH 能够同时改变微塑料表面电荷和污染物离子状态,是控制界面吸附的重要环境参数。相关试验中,普萘洛尔在 pH 3~9 范围内的吸附量随 pH 升高明显增加,pH 超过 9 以后变化趋缓,表明主导作用由静电作用逐步向疏水作用转换。

盐度影响吸附的机制更加复杂。 Na^+ 、 Ca^{2+} 等离子可竞争表面位点,并通过电荷屏蔽改变静电作用。二价 Ca^{2+} 的影响通常强于单价 Na^+ 。对于部分抗生素体系,盐离子增加会明显降低吸附能力^[5]。

溶解性有机质具有双向影响。低浓度腐殖质可通过桥联作用连接微塑料和污染物,高浓度条件下则可能竞争表面位点。前述 β 阻断剂研究显示,腐殖酸浓度低于 100mg/L 时可促进普萘洛尔吸附,高于 150mg/L 后吸附量下降。

4.3 生物膜与真实水环境复杂性

天然水体中的微塑料表面通常不会长期保持“原始塑料”状态。微生物定殖形成生物膜后,颗粒表面出现多糖、蛋白质和胞外聚合物,其亲疏水性、电荷及粗糙程度均会发生改变。

生物膜增加颗粒质量后可能加速低密度微塑料沉降,也可能通过黏附作用促进颗粒聚集。与此同时,生物膜中的官能团可以提供新的污染物结合位点。已有综述指出,相较原始微塑料,老化颗粒通常能够吸附更多种类和数量的抗生素,生物膜进一步增强部分

吸附过程,并可能参与抗生素生物降解^[6]。

实验室吸附试验通常采用单一污染物、恒定 pH 和较纯水体,实际河流和湖泊中却同时存在悬浮颗粒、天然有机质、多种离子及多种污染物。不同组分可能发生竞争、桥联或协同作用,因此需要谨慎将单体系吸附参数直接外推到实际环境。

5 结语

微塑料在水体中的迁移行为受颗粒密度、粒径、形状、水动力条件及生物附着共同控制,可在水面、水体和沉积物之间形成动态交换。低密度颗粒并不始终停留于水面,生物膜、无机颗粒附着和聚集过程能够增加表观密度,已经沉降的颗粒又可能在扰动条件下重新悬浮。

微塑料的环境迁移还伴随明显界面吸附。疏水分配、静电作用、氢键、表面络合、 $\pi-\pi$ 相互作用及孔隙填充共同决定其对重金属、抗生素和其他有机污染物的负载能力。聚合物种类和环境老化决定基本界面性质,pH、盐度、溶解性有机质及污染物共存关系进一步改变吸附平衡。由此形成的复合颗粒可能扩大污染物迁移范围,也可能在环境条件改变或生物摄食后重新释放污染物。

微塑料环境风险分析应进一步加强迁移与吸附过程的联合研究,尤其需要关注长期老化、生物膜形成、吸附-解吸循环以及多污染物共存条件。以真实水体中的动态界面代替理想化原始塑料表面,并结合水动力输运研究污染物共迁移过程,能够更加准确地认识微塑料在河流、湖泊和近岸水环境中的实际归趋及复合污染风险。

【参考文献】

- [1] 赵伟高,田一梅,赵鹏,等.淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展[J].环境科学,2023,44(3):1198-1208.
- [2] 王霞美,肖璐瑞,徐世宏,等.土壤中微塑料的来源、赋存特征及迁移行为[J].生态与农村环境学报,2021,37(11):1403-1413.
- [3] 王颖,张昱,杨敏,等.微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为[J].环境科学,2020,41(8):3675-3683.
- [4] 陈丹妮,邓月华,王文姬,等.微塑料对水中典型 β 阻断剂的吸附行为研究[J].生态与农村环境学报,2026.
- [5] Stapleton M J, Ansari A J, Hai F I. Antibiotic sorption onto microplastics in water: A critical review of

-
- the factors, mechanisms and implications[J]. Water Research, 2023, 233: 119790.
- [6] Zhang Q, Xu E G, Li J, et al. Interaction between antibiotics and microplastics: Recent advances and perspective[J]. Science of the Total Environment, 2023, 897: 165414.