



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：微塑料上生物膜的形成及其环境行为
作者：阎波，张玥，郭安
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20250085
收稿日期：2025-05-09
网络首发日期：2026-07-09
引用格式：阎波，张玥，郭安. 微塑料上生物膜的形成及其环境行为[J/OL]. 天津科技大学学报. <https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250085>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250085

微塑料上生物膜的形成及其环境行为

阎波^{1,2}, 张玥¹, 郭安¹

(1. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457; 2. 海洋资源化学与食品技术教育部重点实验室, 天津 300457)

摘要: 微塑料目前已在多种环境介质中被发现。因其特殊的物理化学特性, 进入水体后, 可为微生物附着提供有利条件, 在其表面形成生物膜结构。本文围绕微塑料表面生物膜的形成过程及相关影响因素进行了系统梳理。微塑料被生物膜覆盖后形成的复合体对水体中重金属和有机污染物的吸附行为发生变化, 对病原微生物的附着与富集也有所促进。复合体还可能通过干扰生物摄食、增强水平基因转移等方式, 增加微塑料引发的生态风险及潜在健康风险。本文对微塑料-生物膜复合体的环境管理研究进展也进行了总结, 以为微塑料污染控制提供参考。

关键词: 微塑料; 生物膜; 水环境; 环境行为

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510 (2026)00-0000-00

Biofilm Formation on Microplastics and Their Environmental Behaviour

YAN Bo^{1,2}, ZHANG Yue¹, GUO An¹

(1. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Key Laboratory of Marine Resource Chemistry and Food Technology (TUST), Ministry of Education, Tianjin 300457, China)

Abstract: Microplastics have been detected in a variety of environmental media. Because of their unique physicochemical properties, they provide favourable conditions for microbial attachment in aquatic environments, resulting in the formation of biofilms on their surfaces. This review focuses on the main stages of biofilm formation on microplastics and the factors that influence this process. Microplastics colonized by biofilms form complexes in aquatic environments. These complexes alter the adsorption behavior of heavy metals and organic pollutants. In addition, they promote the attachment and accumulation of pathogenic microorganisms. They may also increase ecological risks and potential health hazards by interfering with organism feeding or enhancing horizontal gene transfer. In response to the environmental management challenges posed by these complexes, this review outlines recent research advances, with the aim of supporting the control of microplastic pollution.

Key words: microplastics; biofilm; aquatic environment; environmental behavior

塑料在工业生产和日常生活中已得到广泛使用^[1], 据统计, 塑料的年产量已从 1950 年的 170 万吨增至 2023 年的 413.8 万吨^[2-3]。随之而来的塑料垃圾也引发了一系列环境挑战^[4]。大多数塑料材料在自然环境中很难发生有效降解, 可以在机械磨损、紫外

辐射等多种作用下破碎形成微塑料(microplastics, MPs)。调查发现, 微塑料在海洋中的检查量超过 3.5 万吨^[5-6], 淡水湖^[7]、河流^[8]和饮用水^[9]中同样频繁检出。微塑料的环境危害远超其物理存在本身。一方面, 微塑料进入水体后, 可以促进微生物在其表面

收稿日期: 2025-05-09; 修回日期: 2026-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42207425); 海洋资源化学与食品技术教育部重点实验室开放基金项目(EMTUST-24-03)

作者简介: 阎波(1973—), 女, 河南安阳人, 副教授, yanbo@tust.edu.cn

聚集形成生物膜结构,从而改变微塑料作为污染物潜在载体的特性,显著增强其对污染物的吸附能力。另一方面,生物膜中的微生物也会通过分泌降解酶,促进微塑料的降解,最终改变微塑料在环境中的持久性和迁移行为。这些相互作用增加了微塑料的环境风险,还可能由于食物链的传递,对水生生物和人类健康产生潜在威胁^[10]。因此,微塑料上生物膜的形成及其环境行为已成为当前环境领域研究的热点之一。

本文旨在对微塑料表面生物膜的形成机制及其环境行为方向相关研究成果进行梳理,以期对微塑料污染管理和生态风险评估提供理论支撑。

1 微塑料表面生物膜的定植

1.1 微塑料表面生物膜的形成过程

微塑料具有颗粒细小、比表面积大等特点,进入水体后,各种微生物会迅速聚集和附着在其表面^[11],形成生物膜。微生物群落在微塑料表面形成生物膜是一个时间演替过程^[12],如图1所示。

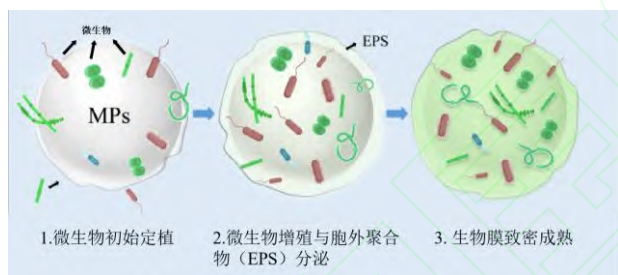


图1 微塑料表面生物膜的形成过程

Fig. 1 Formation process of biofilm on microplastic surfaces

微塑料表面生物膜的形成过程主要包括3个阶段。首先,环境中的生物物质和生物群落由于范德华力、静电引力或鞭毛运动附着于微塑料表面,形成生物有机质层。随后,微生物群落释放出胞外聚合物(EPS),形成对微塑料上的微生物群落具有保护作用的胞外聚合物层,此时微生物已经不可逆地附着在微塑料表面。最终,生物膜逐渐成熟,形成由微生物细胞、胞外聚合物、水和有机物质组成的复杂三维结构。生物膜可为微生物提供物理保护,也有利于微生物之间的协同作用和信号传递。

1.2 生物膜的主要成分与功能

生物膜的主要成分包括多种微生物及其产生的胞外聚合物,在定植过程中,微生物按照一定顺序附着在微塑料表面。变形菌门和拟杆菌门内的物种已被确定为海洋中塑料表面最初定植的关键类群^[13]。

胞外聚合物是微生物(主要是细菌和真菌)分泌到细胞环境中的大分子物质,是生物膜的重要组成部分,占生物膜干质量的90%以上。胞外聚合物对生物膜的形成和稳定起着关键作用,对微生物群落的结构和功能也有重要影响。可溶性胞外聚合物和结合性胞外聚合物共存于生物膜中;胶体、黏液和可溶性大分子属于可溶性胞外聚合物,而鞘、荚膜和黏液层等则属于结合性胞外聚合物^[13]。实验室中常使用激光扫描共聚焦显微镜(CLSM),通过多重荧光标记技术实现塑料颗粒表面生物膜的原位三维成像,并利用其空间分布、荧光强度等信息,解析生物膜中胞外聚合物的结构^[14]。

胞外聚合物的成分主要有脂质、蛋白质、糖类以及各种小分子代谢产物,它们分别在微生物生存和环境行为中发挥着重要作用。脂质分子具有两亲性,其亲水性头部朝向水相,疏水性尾部彼此聚集,形成稳定的双分子层结构,为生物膜提供了物理屏障,保护微生物免受外界环境的影响。蛋白质附着在膜上,实现信号转导、物质转运和细胞识别等各种功能。糖类通常通过共价键结合在脂质或蛋白质上,参与细胞识别和信号传导。胞外聚合物的存在增加了生物膜的孔隙率,促进营养物质和代谢产物的运输,保护微生物免受环境压力的胁迫,如砂石磨损、水剪切应力和光降解等^[15-16]。

2 影响微塑料表面生物膜形成的因素

在水生环境中,微生物在微塑料表面的定植是一个非常复杂的过程,主要受到时间、微塑料自身的物理化学性质以及环境等因素的影响。不同条件下微塑料表面微生物定植的研究结果比较,见表1。

表1 不同条件下微塑料表面微生物定植的研究比较

Tab. 1 Comparison of studies on microbial colonization on microplastic surfaces under different conditions

研究区域	环境条件	微塑料类型	微塑料特性 (粒径/形貌)	定植时长	定植微生物优势类群	文献来源
意大利拉文纳 Piallassa Baiona 海域	实验室模拟海洋 沉积物环境	PE PS PVC	2~3 mm 颗粒状	2、 28 周	2 周: 热厌氧杆菌科(Thermoanaerobacteraceae) 28 周: 消化链球菌科(Peptostreptococcaceae) 2 周: 消化链球菌科(Peptostreptococcaceae) 28 周: 消化链球菌科(Peptostreptococcaceae) 2 周: 消化链球菌科(Peptostreptococcaceae) 28 周: 厌氧绳菌科(Anaerolineaceae)	[17]
中国广东湛江 珊瑚珊瑚礁		PVC PET	3~5 mm 颗粒状	2 周	α -变形菌纲(Alphaproteobacteria) γ -变形菌纲(Gammaproteobacteria) α -变形菌纲(Alphaproteobacteria) 拟杆菌纲(Bacteroidia)	[18]
美国新泽西州: 1. 拉里坦河水 2. 污水处理厂进 水	1.COD=46 mg/L, pH=8.08; 2.COD=332±24 mg/L, pH=7.79, 实 验室培养	PE PS	125~ 250 μ m 不规则 形状 106~ 125 μ m 规则球 形	48 h	河水: γ -变形菌纲(Gammaproteobacteria)、 β -变形菌纲 (Betaproteobacteria)、黄杆菌纲(Flavobacteriia) 污水: γ -变形菌纲(Gammaproteobacteria)、 β -变形菌纲 (Betaproteobacteria)、腐螺旋菌纲(Saprospirae) 河水: β -变形菌纲(Betaproteobacteria) 污水: γ -变形菌纲(Gammaproteobacteria)、黄杆菌纲 (Flavobacteriia)	[19]
波罗的海	盐度 3.5, 温度: 22℃, 光/暗比 16:8 , 实验室培养	PE PP PS	2000~ 2400 μ m 颗 粒状 2500 μ m 颗粒状 2000 μ m 颗粒状	2 周	鞘脂单胞菌科(Sphingomonadaceae) 鞘脂单胞菌科(Sphingomonadaceae) 丛毛单胞菌科(Comamonadaceae)	[20]
法国布列塔尼布 雷斯特湾 沿岸表层海水	10 月: 水温 14.8℃, 盐度 35.3 12 月: 水温 12.8℃, 盐度 34.7	PE PS	碎片状 泡沫碎 片状	自然 定植, 无 受 控 时 长	黄杆菌科(Flavobacteriaceae)、红杆菌科(Rhodobacteraceae)、 假单胞菌科(Pseudomonadaceae) (10 月); 海洋螺菌科 (Oceanospirillaceae)、丙酸螺菌属(<i>Propionispira</i>) (12 月) 黄杆菌科(Flavobacteriaceae)、红杆菌科(Rhodobacteraceae); 红螺菌科(Rhodospirillaceae)、玫瑰变色菌属(<i>Roseovarius</i>)	[21]
以色列雅孔河口	水温 29.8℃ 盐度 39.46	PE、PP、 TPE		自然 定植,	顶丝藻属菌株 PCC-7375(<i>Acrophormium</i> PCC-7375)、短小盒 菌属(<i>Parvularcula</i>)、线状微菌属(<i>Filomicrobium</i>)	
葡萄牙萨多河口	水温 18.0℃ 盐度 37	PE、PP、 PS	$\geq 300\mu$ m 碎片状	自然 定植, 无 受 控 时 长	假交替单胞菌属(<i>Pseudoalteromonas</i>)、交替单胞菌属 (<i>Alteromonas</i>)	[22]
东地中海以色列 荷兹利亚沿岸海	冬季: 水温 17℃, 盐度 38.5~39.0	混合微塑 料	薄膜状 纤维状	自然	红杆菌目(Rhodobacterales)	[23]

域		定植, 无受控时长		噬几丁质菌目(Chitinophagales)
夏季: 水温 29.4 °C, 盐度 39.1~39.4				
渤海湾海河入海口 站点 S1、S9	S1: 盐度 11.12, TN 3.21 mg/L, TP 0.36 mg/L	PVC、PP、PE、PU、PS	50.0mm ×50.0 mm ×1.0 mm 碎片状	拟杆菌属(<i>Bacteroides</i>)
	S9: 盐度 29.34, TN 2.14 mg/L, TP: 0.09 mg/L		6 周	拟杆菌属(<i>Bacteroides</i>)、假交替单胞菌属(<i>Pseudoalteromonas</i>)、希瓦氏菌属(<i>Shewanella</i>)

注: 表中 PS 为聚苯乙烯, PVC 为聚氯乙烯, PET 为聚对苯二甲酸乙二醇酯, PP 为聚丙烯, TPE 为热塑性弹性体, PU 为聚氨酯(聚氨基甲酸酯)。

2.1 时间因素的影响

时间是生物膜从形成到成熟的关键动态因素。Tu 等^[25]研究了暴露时间对微塑料表面生物膜形成及其性能的影响, 发现随着暴露时间的延长, 聚乙烯(PE)膜表面的生物膜总量显著增加, 其核心微生物组与优势细菌指标也呈现动态更替。在生物膜形成早期, 黄杆菌科和红杆菌科等率先附着于 PE 表面, 启动生物膜的构建。中期时, 芽孢杆菌科和莫拉克斯菌科加入核心菌群, 与早期菌群协同降解 PE 表面有机质。进入晚期阶段, 黄杆菌科再度成为优势菌科, 同时红杆菌科、微毛菌科和浮霉菌科等数量显著上升, 最终形成一个多类群共存的稳定共生群落。

2.2 微塑料自身性质的影响

微生物在微塑料表面的定植很大程度上取决于微塑料的性质和定植微生物的独特结构特征^[18]。聚合物类型对生物膜的附着和微生物的群落类型产生影响。

Rosato 等^[17]研究发现, 所有微塑料均能快速被微生物定植, 但不同的塑料类型导致生物膜组成不同, 尤其是优势菌的定植存在显著差异。如表 1 所示, 培养两周后, PS 上的生物膜由占群落 42.4% 的消化链球菌科(*Peptostreptococcaceae*)主导。热厌氧杆菌科(*Thermoanaerobacteraceae*) 在不同塑料的分布呈现明显差异: 其在 PE 生物膜中相对丰度为 29%, 为优势菌, 而在 PS 上丰度较低, 仅为 5.6%, 在 PVC 上则未检测到。实时定量聚合酶链式反应(qPCR)分析显示, PVC 表面的微生物定植密度远超其他塑料, 高出约一个数量级。另一项研究^[20]通过对比 PE、PP、PS 表面形成的微生物群落, 发现 PE 与 PP 的微生物群落组成极为相似, 仅在 1 个操作分类单元(OTU)上存在差异。而 PS 因分子结构中含有芳香苯基, 整体化学结构更为复杂, 其微生物群落组成与二者相比呈现出显著差异。Parrish 等^[19]和 Frère^[21]

等的研究同样表明, 材料类型会影响生物膜的形成和组成。除材料性质外, 微塑料粒径也会影响生物膜的定植情况。较小(75 μm)微塑料表面生物膜量显著高于 4 mm 颗粒, 且易与生物膜形成异质聚集体^[26]。纤维状微塑料由于其较大的比表面积和复杂的表面结构, 更容易为微生物提供附着位点, 从而促进生物膜的快速形成^[27]。

塑料的生产过程中通常会使用添加剂以确保其应用性能, 但添加剂的存在可能会影响微生物在微塑料表面的定植。有研究^[28]指出, 紫外线稳定剂诱导微生物细胞内产生活性氧(ROS), 促进微塑料表面生物膜的早期形成, 虽然其毒性会导致早期定植微生物层的死亡, 但死亡层可以抑制紫外线稳定剂的渗出, 减轻毒性, 为后续微生物附着提供条件, 促进生物膜的复苏。此外, 生物膜中的微生物群落结构会因增塑剂、阻燃剂、色素、热稳定剂等添加剂的存在而发生变化^[29]。Gulizia 等^[30]研究发现含有邻苯二甲酸二乙基己酯(DEHP)或双酚 A(BPA)的 PS 和 PVC 在生物膜形成后, 其表面附着的潜在降解细菌的相对丰度显著增加。

2.3 环境因素的影响

环境因素如地理位置、季节变化、温度、营养水平、盐度、pH 以及环境微生物群落的多样性等显著影响微塑料上生物膜的形成和发展, 这些条件会调节微生物的附着、生长和代谢活动。

地理位置和季节变化对微塑料的物理组成及其附着的细菌群落结构有显著影响。如表 1 所示, 在以色列雅孔河口的样本中, 顶丝藻属菌株 PCC-7375(*Acrophormium* PCC-7375)和短小盒菌属(*Parvularcula*)更加丰富, 而葡萄牙萨多河口的样本中, 假交替单胞菌属(*Pseudoalteromonas*)和交替单胞菌属(*Alteromonas*)更为丰富^[22]。Davidov 等^[23]发现东地中海近海微塑料上生物群落具有明显的季节特

征,但与海水相比,微塑料群落季节性波动不那么明显,这一结果也凸显了这种新的生态系统的相对稳定性。

水体盐度与氮、磷等生物膜生长必需的营养物质共同影响生物膜的发育。Li 等^[24]在渤海湾海河口布设不同点位,发现生物膜平均生长速率与总氮和总磷呈正相关,与盐度呈负相关。由河入海的过程中,近岸海河入海口站点(总氮 3.21 mg/L,总磷 0.36 mg/L)生物膜平均生长速率显著高于渤海海域站点(总氮 2.14 mg/L,总磷 0.09 mg/L),盐度由 11.12 增至 29.34;随着盐度的升高,微塑料生物量减少了 41%,优势类群也存在显著差别,这个结果与 Jin 等^[31]的研究一致。

环境微生物群落的多样性和相互作用决定了生物膜的复杂性和稳定性。Reisoglu 等^[32]采用 16S rRNA 和 18S rRNA 测序进行基因组分析,结果显示,在长达数月暴露后,海洋和淡水样品上的生物膜之间的群落组成有所不同。此外,通过对比污水与淡水环境的生物膜群落,研究者发现两者群落组成与 16S rRNA 基因拷贝数均有较大差异^[19]。这些结果表明环境微生物的多样性越高,微塑料生物膜的群落结构越复杂,功能越多样。

3 生物膜对微塑料环境行为的影响

3.1 生物膜对微塑料迁移行为的影响

生物膜的形成显著影响了微塑料的环境行为。在实验室模拟污水澄清池的实验中^[33],生物膜对不同密度微塑料沉降动力学的影响程度不一,轻质微塑料(如低密度聚乙烯(HDPE)、PP)的沉降比例提升 0~16%,密度较大的微塑料(PS 和 PET)的沉降比例增至原来的 1.03~5.15 倍。这主要是由于生物膜增加了颗粒密度,且其分泌的胞外聚合物促进了微塑料颗粒的聚集,使微塑料表面亲水性增强、浮力减小^[34]。Leiser 等^[35]也通过对比 PE、PET 和 PS 微塑料在夏季营养水库中生物膜形成后的沉降速率,得到微塑料的沉降不仅与生物膜的形成有关,还与金属吸附和颗粒聚集密切相关的结论。这些过程共同作用,改变了微塑料在水体中的分布和迁移路径,影响微塑料的环境归趋和生态风险。

3.2 生物膜对微塑料污染物载体功能的调控

3.2.1 微塑料-生物膜对重金属的吸附

生物膜的定植改变了微塑料的表面结构和化学性质,所形成的复合体通过表面官能团及胞外聚合

物的配位作用增强了对金属离子等污染物的负载能力。与天然基质相比,微塑料-生物膜复合体对铅(Pb)的吸附量更高,吸附速率也有明显提升^[36]。在模拟海水环境条件下,生物膜的形成使 PS 对于痕量重金属镉的吸附容量增至 2.0 $\mu\text{g/g}$,而无生物膜 PS 的吸附量始终维持在 0.4 $\mu\text{g/g}$ 左右^[37]。对美国旧金山湾浸泡 28 d 的聚乳酸(PLA)和低密度聚乙烯(LDPE)颗粒的研究也得到了类似的结果,吸附在微塑料生物膜上的金属量与生物膜量呈正相关^[38]。Sun 等^[39]将原始微塑料在特定的水生环境中浸泡一定时间制备 B-MPs,并在实验室条件下进行重金属吸附,得到与原位实验结果一致的趋势。但过量的重金属也会对生物膜中微生物群落产生抑制作用。微塑料-生物膜复合体对 Pb(II)的最大吸附容量可达约 44.88 $\mu\text{mol/g}$,是原始微塑料的 1.8 倍左右,而在 0.05 mmol/L Pb(II)的胁迫下,生物膜微生物多样性指数(Shannon)由 4.75 降至 4.46,长期或更高浓度的胁迫可能进一步导致生物膜活性丧失^[40-41]。

吸附能力的增强意味着生物膜定植后的微塑料在迁移过程中可携带更多污染物,最终可能增加生态系统及人类健康风险。

3.2.2 微塑料-生物膜对有机污染物的吸附

生物膜覆盖后,微塑料对有机污染物的吸附行为发生改变。持久性有机污染物在微塑料上的吸附,并不只取决于材料本身的性质,膜内微生物的吸收过程和代谢活动也参与其中。

有机污染物的典型特征是疏水性和亲脂性。Wang 等^[42]研究生物膜在 PE 微塑料上对四环素(TC)的吸附,发现生物膜可有效地增强 TC 在 PE 微塑料上的吸附(吸附量从 237.5 $\mu\text{g/g}$ 提至 762.2 $\mu\text{g/g}$),这种增强作用主要归因于生物膜中丰富的官能团(如羟基、羧基)通过静电作用和疏水作用促进了吸附,且生物膜中的微生物群落结构复杂,能够通过代谢作用进一步降解四环素,从而影响其在微塑料表面的吸附行为。同样,在形成生物膜后,聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯(PBAT)微塑料对土霉素的最大吸附量由 692.05 $\mu\text{g/g}$ 升至 1396.21 $\mu\text{g/g}$,胞外聚合物中的含氧官能团,可以使抗生素吸附在微塑料表面更加牢固^[43]。抗生素在微塑料上的吸附主要受到一系列机制控制,包括氢键、疏水作用和静电相互作用等^[44]。

多氯联苯是微塑料中最常见的持久性有机污染物之一。有研究表明生物膜在 HDPE 颗粒上的存在显著增强了对多氯联苯(PCBs)、多溴联苯醚(PBDEs)

等有机污染物的吸附能力^[45]。Bhagwat 等^[27]得到相似结论,不同纤维状微塑料由于生物膜的覆盖表现出更大的比表面积,导致吸附全氟辛酸磺酸浓度分别提高 20%~85%。

3.3 病原微生物的定植与富集

微塑料表面可以附着众多微生物,其中也包括各种有害藻类、芽孢杆菌和弧菌等^[46],这些微生物以微塑料为载体,获取能量和碳源。Mas ó 等^[47]首次在塑料碎片上发现了有害藻华(HAB)的存在,提出塑料碎片可能是 HAB 的潜在扩散载体的观点。Casabianca 等^[48]采用 qPCR 技术对地中海塑料碎片表面的附着微生物进行定量分析,发现拟菱形藻(*Pseudo-nitzschia* spp.)和蛎甲藻(*Ostreopsis* cf. *ovata*)附着丰度分别可达 $6.6 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 和 259 cm^{-2} ,并检出相应生物毒素。这进一步证实了塑料碎片可作为有害藻类及其毒素的传播载体。

弧菌是导致养殖双壳类动物疾病的主要原因之一,常造成幼体大量死亡,有时甚至会导致成年群体的死亡^[49]。Zettler 等^[50]不仅在北大西洋采样的 PP 微塑料颗粒上检测到高丰度的弧菌,还在海滩塑料上检出弧菌。生物膜的形成显著促进了微塑料表面致病菌的富集,生物膜通过分泌胞外聚合物形成物理屏障,保护病原菌免受紫外线辐射、抗生素等环境胁迫,并且微塑料表面吸附的有机质(如脂类、蛋白质)及金属离子为致病菌提供了关键营养源。弧菌在微塑料上的定植 1 h 内即可被检测,是微塑料的早期定植菌^[51]。王帆等^[52]基于生态模型与实验数据说明微塑料生物膜对人类病原菌具有选择性富集作用,其中巴尔通氏体、伯克霍尔德氏菌属和布鲁氏菌属等机会性病原菌以及铜绿假单胞菌等致病性抗生素耐药菌的选择性富集,可能会加剧水体环境中致病性和抗生素耐药性菌的共传播风险。

微塑料可以看作是一种新的微生物生态位,以载体形式进入环境,生物膜则通过提供生长条件,驱动致病菌在微塑料表面选择性富集,成为生态与健康风险的放大器。

4 微塑料-生物膜复合体的生态风险

微塑料几乎无处不在,它们在水生生态系统中的迅速积累,引起了人们对因食用受污染的海产品而造成的潜在健康风险的关注。微塑料-生物膜复合体的生态风险示意图如图 2^[44]所示。微塑料在被生物摄入后,可进入动物内脏,造成健康危害^[53]。复合体还通过伪装摄食信号、富集重金属、病原菌及促

进水平基因转移,加剧了微塑料的生态与健康风险^[54]。

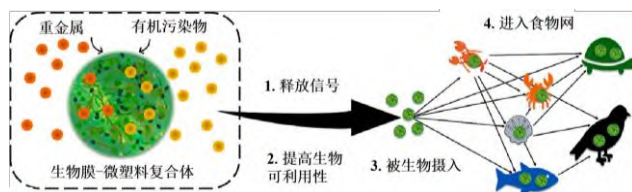


图 2 微塑料-生物膜复合体的生态风险示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the ecological risks of biofilm-microplastic complexes

4.1 微塑料-生物膜复合体对摄食风险的放大效应及食物链的传递风险

生物膜的存在增强了环境中塑料颗粒的营养转移^[55]。水生生物,尤其是浮游生物摄食者,对覆盖生物膜的微塑料表现出明显的摄食偏好^[56]。生物膜通过释放胞外聚合物中的多糖、蛋白质等化学信号,增加了微塑料对生物的吸引力,从而提升其进入食物链的风险。悬浮在水体中的大部分微塑料可以被浮游生物和底栖生物捕获并直接摄入,而生物膜覆盖的微塑料能被更多的个体或更高的速率摄入^[57]。对长纺锤水蚤(*Acartia longiremis*)这种浮游动物而言,摄取老化微塑料的比例(76%)显著高于摄取原始微塑料比例(56%),摄入的微塑料可能对浮游生物生存率、摄食能力和繁殖能力产生负面影响^[58]。

Fabra 等^[59]研究发现欧洲原生牡蛎(*Ostrea edulis*)对大肠杆菌包覆微塑料的吸收量明显高于原生微塑料,尽管微塑料在短期内不会在牡蛎组织中发生显著的生物积累,但是牡蛎对被包裹的微塑料的摄取可能会使其中的微生物转移到更高营养级的生物中,从而引发潜在的生态风险。Zhang 等^[60]通过毒代动力学模型揭示了微塑料及其负载污染物在沼虾中的摄入、迁移、积累和清除规律,也得到了一致的结论。Setälä 等^[61]通过分析波罗的海几种浮游动物类群对 $10 \mu\text{m}$ 荧光聚苯乙烯微球的摄入情况,揭示了微塑料通过浮游生物从低营养水平转移到更高水平的潜力。人类通过食用污染海产品暴露于这些微塑料复合体,可能导致氧化应激、内分泌干扰及耐药基因水平转移等健康风险,凸显了生物膜在微塑料生态毒理效应中的放大器作用。

4.2 复合污染的协同毒性

微塑料是优良的污染物载体,而生物膜的存在进一步加速了金属离子、有机污染物等在微塑料表面的积累。Liu 等^[62]研究发现,胞外聚合物与 Pb^{2+} 发生配位络合后,所形成的复合物在模拟胃酸条件

下解吸率可达 71.60%;这意味着微塑料吸附的铅可在此类环境中大量释放为生物可利用的游离态,从而更易于构成潜在的毒性风险。此外,重金属(如 Cu、Fe、Pb)通过产生活性氧(ROS)、破坏线粒体功能、干扰神经递质平衡等引发神经毒性,这可能会改变神经传递,最终导致行动障碍、学习障碍等^[63]。外来微生物和化学聚合物随微塑料一同被摄入生物体后,直接影响肠道微生物群。Liu 等^[64]研究发现,在模拟消化道中,被生物膜覆盖的聚丙烯(PP)更容易解吸磺胺二甲嘧啶,被生物膜覆盖的微塑料解吸量和解吸速率远大于原始 PP。在生物膜的介导下,微塑料表面吸附的抗生素浓度显著高于周围水体,这种抗生素-微塑料-生物膜复合物的形成会抑制抗生素的迁移与降解,提升其环境持久性^[65-66]。

4.3 抗性基因传播与公共卫生威胁

微塑料-生物膜复合体通过增强抗生素抗性基因(ARGs)的环境扩散与跨物种转移,对公共卫生安全构成重大威胁。在微塑料生物膜这一特定生态位中,致病性细菌的富集已被证明是 ARGs 传播的潜在因素^[67]。当环境中存在抗生素时,抗生素会对微生物群落施加选择压力。携带 ARGs 的病原体因其对抗生素的耐药性,难以被治疗药物杀死。生物膜的存在提供更大的特异性表面和附着位点,微塑料上较高的细菌丰度和密度以及胞外聚合物含量促进了胞外抗生素抗性基因(eARGs)的自然转化,从而加速了 ARGs 的增殖和传播^[68]。

Kruglova 等^[69]研究发现,污水处理厂的工艺对微塑料生物膜中的核心潜在致病菌和 ARGs 的影响较小。部分微塑料难以被完全截留,会携带致病菌和 ARGs 随出水排入自然水体,成为自然环境中此类污染物的重要来源。这与 Galafassi 等^[70]研究结果一致,臭氧消毒过程对细菌群落的组成以及微塑料上 ARGs 的丰度没有影响,同时微塑料作为 ARGs 的载体,其携带的耐药基因传播会对人类健康构成威胁。此外,微塑料表面的生物膜进一步增加了其环境致病性风险,并加剧了抗生素耐药性的传播,这对生态环境和公共健康构成了潜在威胁^[46]。

尽管当前研究已初步揭示了微塑料-生物膜复合体带来的巨大生态与健康风险,但该领域仍存在诸多认知空白和挑战。目前大多数实验都采用单一品类、固定尺寸的全新微塑料和较为基础的生物膜培育过程,这与自然环境中,塑料经自然老化形成的微塑料-生物膜复合体仍存在较大差异。所以,今后的研究有必要直接采用从实际水体、沉积物等环

境中采集的微塑料-生物膜复合体样本,开展基于真实自然环境的复合体的相关研究。加强从环境污染到人体健康的全方面风险评估,深入解析微塑料生物膜促进抗性基因传播的机制。同时,关注可降解塑料微颗粒的相关潜在风险,以作为制定环境标准与治理政策的科学依据。

5 治理与资源化利用

5.1 微塑料-生物膜复合体污染治理

微塑料-生物膜复合体污染的治理需遵循“源头减量—过程阻断—末端治理”的层级化策略。在源头控制方面,亟需通过政策法规约束塑料生产、使用和废弃的全生命周期。《“十四五”塑料污染治理行动方案》提出到 2025 年,白色污染得到有效遏制,重点领域不合理使用一次性塑料制品的现象大幅减少,塑料废弃物回收利用和处置水平显著提升,促进了更多可降解塑料的使用。2024 年政府工作报告将“塑料污染治理”作为一项独立、明确的任务,纳入生态环境综合治理的重点任务之一。当前可生物降解塑料的规模化应用仍受限于成本高、降解条件苛刻(如高温堆肥)等问题,仍需进一步优化材料性能与环境兼容性。

微塑料上的生物膜会增加微塑料的环境风险、生态风险,为实现微塑料-生物膜复合体的污染治理,在减少源头微塑料产生的同时,也应控制微塑料上生物膜的形成。通过改变微塑料表面特性或干扰微生物附着,可抑制生物膜的形成。在生物医药方面,Donelli 等^[71]在聚氨酯中引入聚乙二醇(PEG)作为致孔剂,有效促进了抗真菌药物氟康唑的释放,从而抑制了白色念珠菌在医疗器械表面的定植及生物膜形成,降低了相关感染风险。另有研究者^[72]提出利用群体感应抑制剂靶向干扰生物膜中微生物的通信,通过抑制细菌的群体通讯机制(而非直接杀菌),直接阻断生物膜的形成,减少对宿主微生态的破坏。此外,将海洋藻类多囊马尾藻(*Sargassum myriocystum*)提取物合成银纳米颗粒,作为抗菌剂、抗生物膜制剂、杀幼虫剂及光催化剂,为医疗、环保和工业领域提供了经济可行的多功能纳米材料方案^[73]。但在目前实际环境治理层面,关于微塑料表面生物膜的去除研究仍存在明显不足。

5.2 微塑料-生物膜复合体的资源化利用

生物膜在加剧微塑料生态风险的同时,其高代

谢活性与微生物负载能力也为资源化利用提供了新思路。

生物膜中功能菌可以通过分泌的酶类解聚塑料分子链。Sekiguchi 等^[74]从深海海水中分离出的假单胞菌等具有降解聚己内酯的潜力。现代基因工程技术的出现为实现任何形式的微生物基因操作铺平了道路,微生物是微塑料周围生物膜联合体的一部分,未来可以通过工程设计将有害的微塑料颗粒降解为代谢产物,提升生物膜对微塑料的降解效率^[75]。通过增强细菌在塑料表面的附着能力和生物膜形成能力,可提高酶在目标底物周围的局部浓度,并通过将酶截留在生物膜基质中延长其作用时间,从而整体提升塑料降解速率^[76]。

虽然生物膜及其胞外聚合物在废水处理与土壤修复等领域已有较为成熟的应用^[77],但微塑料—生物膜复合体的应用尚存在缺陷。微塑料由于在污水处理过程中的高滞留性,成为生物膜的理想载体。与原始微塑料相比,被生物膜覆盖的微塑料对污染物的吸附能力更强。在生物膜反应器中,微塑料的积累与生物膜增厚过程相互促进,也易引发载体孔隙堵塞,对系统的污染物去除效率与运行稳定性产生不利影响^[78]。因此,在实际应用中还需要综合考虑生物膜的积极作用与潜在问题,优化废水处理工艺。

后续的研究可更加关注生物膜中能够降解污染物且抑制病原体生长的微生物群落的变化,并将生物膜的代谢性能与微塑料的载体属性相结合,提高微塑料的去除效率并减少其生态毒性风险,实现微塑料上生物膜的资源利用化。

6 结 语

微塑料—生物膜复合体作为一种新型复合污染物,尽管相关研究已对生物膜对环境的影响进行探究,但对于其复杂内部机制,仍缺乏深入认识。当前,微塑料的污染治理仍存在较多挑战,微塑料表面生物膜的资源化利用可以为后续的研究提供一个新视角。虽然生物膜的存在可能加强微塑料的生态毒性,促进污染物、病原体的传播,但其在污染物降解、污水处理等领域的潜在应用又为微塑料的治理提供了新的思路。今后的研究可以从微生物群落演替、生物膜功能特性入手,关注微塑料与生物膜相互作用的动态变化,综合评估复合体的环境风险与资源化利用潜力。

参考文献:

- [1] Da Costa J P, Santos P S M, Duarte A C, et al. (Nano) plastics in the environment: sources, fates and effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566: 15-26.
- [2] Duis K, Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2016, 28(1): 2.
- [3] Barnes D K A, Galgani F, Thompson R C, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 364(1526): 1985-1998.
- [4] Plastics Europe. Plastics: the fast facts 2024 [R/OL]. <https://plasticseurope.org/es/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>.
- [5] Eriksen M, Lebreton L C M, Carson H S, et al. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea[J]. *PLOS One*, 2014, 9(12): e111913.
- [6] Isobe A, Uchiyama-Matsumoto K, Uchida K, et al. Microplastics in the southern ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 623-626.
- [7] Moore M V, Yamamuro M, Timoshkin O A, et al. Lake-wide assessment of microplastics in the surface waters of Lake Baikal, Siberia[J]. *Limnology*, 2022, 23(1): 265-274.
- [8] Nihei Y, Ota H, Tanaka M, et al. Comparison of concentration, shape, and polymer composition between microplastics and mesoplastics in Japanese river waters[J]. *Water Research*, 2024, 249: 120979.
- [9] Sun Xiangying, Zhu Yunjie, An Lihui, et al. Microplastic transportation in a typical drinking water supply: from raw water to household water[J]. *Water*, 2024, 16(11): 1567.
- [10] Dong Xusheng, Liu Xinbei, Hou Qiuling, et al. From natural environment to animal tissues: a review of microplastics (nanoplastics) translocation and hazards studies[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855: 158686.
- [11] McCormick A, Hoellein T J, Mason S A, et al. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(20): 11863-11871.
- [12] Moyal J, Dave P H, Wu M, et al. Impacts of biofilm

- formation on the physicochemical properties and toxicity of microplastics: a concise review[J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2023, 261(1): 8.
- [13] Mishra S, Ren Y L, Sun X N, et al. Microplastics-biofilm in aquatic ecosystem: formation, pollutants complexation, greenhouse gas emission and ecotoxicology[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122930.
- [14] Sturm M T, Schuhen K, Horn H. Method for rapid biofilm cultivation on microplastics and investigation of its effect on the agglomeration and removal of microplastics using organosilanes[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 151388.
- [15] Saharan B S, Beniwal N, Duhan J S. From formulation to function: a detailed review of microbial biofilms and their polymer-based extracellular substances[J]. *The Microbe*, 2024, 5: 100194.
- [16] Fulaz S, Vitale S, Quinn L, et al. Nanoparticle-biofilm interactions: the role of the EPS matrix[J]. *Trends in Microbiology*, 2019, 27(11): 915-926.
- [17] Rosato A, Barone M, Negroni A, et al. Microbial colonization of different microplastic types and biotransformation of sorbed PCBs by a marine anaerobic bacterial community[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135790.
- [18] Feng Limin, He Lei, Jiang Shiqi, et al. Investigating the composition and distribution of microplastics surface biofilms in coral areas[J]. *Chemosphere*, 2020, 252: 126565.
- [19] Parrish K, Fahrenfeld N L. Microplastic biofilm in fresh-and wastewater as a function of microparticle type and size class[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2019, 5(3): 495-505.
- [20] Ogonowski M, Motiei A, Ininbergs K, et al. Evidence for selective bacterial community structuring on microplastics[J]. *Environmental Microbiology*, 2018, 20(8): 2796-2808.
- [21] Frère L, Maignien L, Chalopin M, et al. Microplastic bacterial communities in the Bay of Brest: influence of polymer type and size[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 614-625.
- [22] Marsay K S, Ambrosino A C, Kouchеров Y, et al. The geographical and seasonal effects on the composition of marine microplastic and its microbial communities: the case study of Israel and Portugal[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1089926.
- [23] Davidov K, Marsay K S, Itzhari S, et al. Community composition and seasonal dynamics of microplastic biota in the Eastern Mediterranean Sea[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 26131.
- [24] Li Wenjie, Zhang Ying, Wu Nan, et al. Colonization characteristics of bacterial communities on plastic debris influenced by environmental factors and polymer types in the Haihe Estuary of Bohai Bay, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(18): 10763-10773.
- [25] Tu Chen, Chen Tao, Zhou Qian, et al. Biofilm formation and its influences on the properties of microplastics as affected by exposure time and depth in the seawater[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 734: 139237.
- [26] Wu Chen, Tanaka K, Tani Y, et al. Effect of particle size on the colonization of biofilms and the potential of biofilm-covered microplastics as metal carriers[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153265.
- [27] Bhagwat G, Tran T K A, Lamb D, et al. Biofilms enhance the adsorption of toxic contaminants on plastic microfibers under environmentally relevant conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(13): 8877-8887.
- [28] Tarafdar A, Lim J Y, Kwon J H. UV stabilizers can foster early development of biofilms on freshwater microplastics[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 315: 120444.
- [29] Yang Yuyi, Liu Wenzhi, Zhang Zulin, et al. Microplastics provide new microbial niches in aquatic environments[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104(15): 6501-6511.
- [30] Gulizia A M, Bell S C, Kuek F, et al. Biofilm development as a factor driving the degradation of plasticised marine microplastics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 487: 136975.
- [31] Jin Zhihui, Chen Keyi, Zhu Qing, et al. Non-degradable microplastic promote microbial colonization: a meta-analysis comparing the effects of microplastic properties and environmental factors[J]. *Environmental Research*, 2025, 270: 121053.
- [32] Reisoglu Ş, Cati C, Yurtsever M, et al. Evaluation of prokaryotic and eukaryotic microbial communities on microplastic-associated biofilms in marine and freshwater

- environments[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2024, 24(6): 2300249.
- [33] Lee S Y, An J, Kim J, et al. Enhanced settling of microplastics after biofilm development: a laboratory column study mimicking wastewater clarifiers[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 311: 119909.
- [34] Chen Xianchuan, Xiong Xiong, Jiang Xiaoming, et al. Sinking of floating plastic debris caused by biofilm development in a freshwater lake[J]. *Chemosphere*, 2019, 222: 856-864.
- [35] Leiser R, Wu G M, Neu T R, et al. Biofouling, metal sorption and aggregation are related to sinking of microplastics in a stratified reservoir[J]. *Water Research*, 2020, 176: 115748.
- [36] Qi Kun, Lu Nan, Zhang Shunqing, et al. Uptake of Pb (II) onto microplastic-associated biofilms in freshwater: adsorption and combined toxicity in comparison to natural solid substrates[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411: 125115.
- [37] Ning Zigong, Zhou Shuang, Li Pengxiang, et al. Exaggerated interaction of biofilm-developed microplastics and contaminants in aquatic environments[J]. *Chemosphere*, 2023, 345: 140509.
- [38] Richard H, Carpenter E J, Komada T, et al. Biofilm facilitates metal accumulation onto microplastics in estuarine waters[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 683: 600-608.
- [39] Sun Ying, Peng Boyu, Wang Yuan, et al. Evaluating the adsorption and desorption performance of poly (butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT) microplastics towards Cu (II): the roles of biofilms and biodegradation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 464: 142714.
- [40] Wang Qiongjie, Zhang Yong, Zhang Yangyang, et al. Effects of biofilm on metal adsorption behavior and microbial community of microplastics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127340.
- [41] Wang Binliang, Wang Chufan, Hu Yiwei. Sorption behavior of pb(II) onto polyvinyl chloride microplastics affects the formation and ecological functions of microbial biofilms[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 832: 155026.
- [42] Wang Yuan, Wang Xuejiang, Li Yuan, et al. Biofilm alters tetracycline and copper adsorption behaviors onto polyethylene microplastics[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 392: 123808.
- [43] Sun Ying, Peng Boyu, Wang Xuejiang, et al. Adsorption and desorption mechanisms of oxytetracycline on poly (butylene adipate-co-terephthalate) microplastics after degradation: the effects of biofilms, Cu (II), water pH, and dissolved organic matter[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 863: 160866.
- [44] Wang Jianlong, Guo Xuan, Xue Jianming. Biofilm-developed microplastics as vectors of pollutants in aquatic environments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(19): 12780-12790.
- [45] Cui Wenxuan, Hale R C, Huang Yichao, et al. Sorption of representative organic contaminants on microplastics: Effects of chemical physicochemical properties, particle size, and biofilm presence[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 251: 114533.
- [46] Oberbeckmann S, Labrenz M. Marine microbial assemblages on microplastics: diversity, adaptation, and role in degradation[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2020, 12(1): 209-232.
- [47] Masó M, Garcés E, Pagès F, et al. Drifting plastic debris as a potential vector for dispersing harmful algal bloom (HAB) species[J]. *Scientia Marina*, 2003, 67(1): 107-111.
- [48] Casabianca S, Capellacci S, Giacobbe M G, et al. Plastic-associated harmful microalgal assemblages in marine environment[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 244: 617-626.
- [49] Beaz-Hidalgo R, Balboa S, Romalde J L, et al. Diversity and pathogenicity of *Vibrio* species in cultured bivalve molluscs[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2010, 2(1): 34-43.
- [50] Zettler E R, Mincer T J, Amaral-Zettler L A. Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(13): 7137-7146.
- [51] Keszy K, Labrenz M, Scales B S, et al. *Vibrio* colonization is highly dynamic in early microplastic-associated biofilms as well as on field-collected microplastics[J]. *Microorganisms*, 2020, 9(1): 76.
- [52] 王帆,胡志勋,王万军,等. 典型微塑料生物膜上病原菌的富集特征与生态风险预测[J]. *环境科学*, 2024, 45(10): 6129-6138.
- [53] Oberbeckmann S, Löder M G J, Labrenz M. Marine microplastic-associated biofilms: a review[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 12(5): 551-562.
- [54] Wu Xiaohan, He Fei, Xu Xueran, et al. Environmental

- health and safety implications of the interplay between microplastics and the residing biofilm[J]. *Environment & Health*, 2024, 3(2): 118-132.
- [55] Shen Maocai, Song Biao, Zhou Chengyun, et al. Recent advances in impacts of microplastics on nitrogen cycling in the environment: a review[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 815: 152740.
- [56] Stabnikova O, Stabnikov V, Marinin A, et al. Microbial life on the surface of microplastics in natural waters[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(24): 11692.
- [57] Polhill L, De Bruijn R, Amaral-Zettler L, et al. *Daphnia magna's* favorite snack: biofouled plastics[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2022, 41(8): 1977-1981.
- [58] Vroom R J E, Koelmans A A, Besseling E, et al. Aging of microplastics promotes their ingestion by marine zooplankton[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 987-996.
- [59] Fabra M, Williams L, Watts J E M, et al. The plastic Trojan horse: biofilms increase microplastic uptake in marine filter feeders impacting microbial transfer and organism health[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797: 149217.
- [60] Zhang Leibo, Lu Guanghua, Ling Xin, et al. Toxicokinetics of microplastics in *Macrobrachium nipponense* and their impact on the bioavailability of loaded pollutants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 478: 135610.
- [61] Setälä O, Fleming-Lehtinen V, Lehtiniemi M. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185: 77-83.
- [62] Liu Si, Huang Jinhui, Zhang Wei, et al. Microplastics as a vehicle of heavy metals in aquatic environments: a review of adsorption factors, mechanisms, and biological effects[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 302: 113995.
- [63] Pan I, Umapathy S, Issac P K, et al. The bioaccessibility of adsorbed heavy metals on biofilm-coated microplastics and their implication for the progression of neurodegenerative diseases[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(11): 1264.
- [64] Liu Peng, Dai Jiamin, Bie Chunyao, et al. Bioaccessibility of microplastic-associated antibiotics in freshwater organisms: highlighting the impacts of biofilm colonization via an in vitro protocol[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(17): 12267-12277.
- [65] Guo Jiayi, Jin Xinbai, Zhou Yi, et al. Microplastic and antibiotics in waters: Interactions and environmental risks[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 371: 123125.
- [66] Zhou Ranran, Huang Xirong, Ni Yongtao, et al. Physicochemical behavior and ecological risk of biofilm-mediated microplastics in aquatic environments[J]. *Aquatic Toxicology*, 2025, 279: 107209.
- [67] Yang Kai, Xu Fei, Xing Xinyu, et al. Microplastics pose an elevated antimicrobial resistance risk than natural surfaces via a systematic comparative study of surface biofilms in rivers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(22): 11216-11228.
- [68] Wang Huixiang, Xu Kaiwen, Wang Jing, et al. Microplastic biofilm: an important microniche that may accelerate the spread of antibiotic resistance genes via natural transformation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 459: 132085.
- [69] Kruglova A, Muñoz-Palazán B, Gonzalez-Martinez A, et al. The dangerous transporters: a study of microplastic-associated bacteria passing through municipal wastewater treatment[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 314: 120316.
- [70] Galafassi S, Sabatino R, Sathicq M B, et al. Contribution of microplastic particles to the spread of resistances and pathogenic bacteria in treated wastewaters[J]. *Water Research*, 2021, 201: 117368.
- [71] Donelli G, Francolini I, Ruggeri V, et al. Pore formers promoted release of an antifungal drug from functionalized polyurethanes to inhibit candida colonization[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2006, 100(3): 615-622.
- [72] Imchen M, Anju V T, Busi S, et al. Metagenomic insights into taxonomic, functional diversity and inhibitors of microbial biofilms[J]. *Microbiological Research*, 2022, 265: 127207.
- [73] Balaraman P, Balasubramanian B, Kaliannan D, et al. Phyco-synthesis of silver nanoparticles mediated from marine algae *Sargassum myriocystum* and its potential biological and environmental applications[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 11(10): 5255-5271.
- [74] Sekiguchi T, Saika A, Nomura K, et al. Biodegradation of

aliphatic polyesters soaked in deep seawaters and isolation of poly (ϵ -caprolactone)-degrading bacteria[J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96(7): 1397-1403.

- [75] Okeke E S, Ezeorba T P C, Chen Y, et al. Ecotoxicological and health implications of microplastic-associated biofilms: a recent review and prospect for turning the hazards into benefits[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(47): 70611-70634.
- [76] Howard S A, Mccarthy R R. Modulating biofilm can potentiate activity of novel plastic-degrading enzymes[J]. npj Biofilms and Microbiomes, 2023, 9(1): 72.
- [77] Siddharth T, Sridhar P, Vinila V, et al. Environmental

applications of microbial extracellular polymeric substance (EPS): a review[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 287: 112307.

- [78] Huang Yaning, Hu Tanqiu, Lin Bincheng, et al. Microplastics-biofilm interactions in biofilm-based wastewater treatment processes: a review[J]. Environmental Pollution, 2024, 361: 124836.

