

郭佳宝, 黄艺. 水体微塑料表面生物膜特征及影响因素[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(6): 221-227. Guo Jiabao, Huang Yi. Characteristics and influencing factors of biofilm on the surface of water microplastics[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46(6): 221-227.

水体微塑料表面生物膜特征及影响因素

郭佳宝, 黄艺*

(北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871)

摘要: 微塑料作为一种新兴污染物存留在水体和陆地的各种不同环境中。环境中的微生物附着在这些微塑料表面, 形成特定的生物膜, 使得环境微塑料成为了微生物的新生态位。受到水体类型和环境因素等影响, 微塑料表面微生物群落的多样性、物种组成和结构, 与环境中的游离微生物具有显著差异, 并可富集潜在致病菌和潜在塑料降解菌, 对生态环境产生一定影响。水体微塑料表面生物膜在形成过程中, 首先形成以 γ -变形菌为主的先锋群落, 进而演替为 α -变形菌和黄杆菌为主的微生物群落, 最终形成适应环境条件的复杂微生物群落。目前对微塑料表面生物膜形成的影响因素研究, 主要集中在水环境条件和微塑料聚合物类型、粒径大小等微塑料物化性质。该文在综述水体微塑料表面生物膜已有研究基础上, 提出了对微塑料表面生物膜的特点和形成机制, 以及其对生态环境和人体健康的潜在威胁进行系统研究的建议。

关键词: 水体微塑料; 微生物; 群落组成结构; 生物膜

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.2213.22.338 **文章编号:** 1003-6504(2023)06-0221-07

Characteristics and Influencing Factors of Biofilm on the Surface of Water Microplastics

GUO Jiabao, HUANG Yi*

(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: As an emerging pollutant, microplastics have been found at various environment like water body and soil. Microorganisms in the environment can colonize on the surface of microplastics and form biofilms, which makes environmental microplastics a new niche of microorganisms. Influenced by water type and environmental factors, the diversity, species composition and structure of microbial communities on the surface of microplastics are significantly different from free microorganisms in the environment, and can be enriched with potential pathogenic bacteria and potential plastic degrading bacteria, which have a certain impact on the ecological environment. In the formation process of microplastic surface biofilm, a pioneer community dominated by γ -Proteobacteria forms firstly, and then the majority of community becomes α -Proteobacteria and Flavobacteriia, finally forms a complex microbial community to adapt environmental conditions. At present, the research on the influencing factors of biofilm formation on the microplastic surface mainly focuses on the physical and chemical properties of microplastics, such as polymer type and particle size of microplastics, and water environmental conditions where microplastes located. Based on the review of the existing research on biofilm of microplastic in water, this paper puts forward some priority of research suggestions such as to research systematically on the characteristics and formation mechanism of microplastic biofilm and its potential threat to ecological environment and human health.

Key words: water microplastics; microorganisms; community composition and structure; biofilm

微塑料为粒径在5 mm以下的塑料颗粒和碎片^[1]。环境中的微塑料主要来自人类制造的微小塑料制品(粒径<5 mm), 以及大块废弃塑料经过碎裂或降解形

成的微塑料颗粒^[2]。自从2004年Thompson在Science上首次提出微塑料的概念^[1], 至今已经在水体、土壤和大气等环境界面中发现了大量微塑料, 如海洋中微塑

《环境科学与技术》编辑部: (网址)http://tjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2022-12-27; 修回 2023-03-20

基金项目: 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室项目(8102000268); 中国博士后科学基金(2022M720280); 广东省基础与应用基础研究粤深联合青年基金(2022A1515110814)

作者简介: 郭佳宝(1997-), 男, 博士, 研究方向为水体微塑料污染, (电子信箱)jbguo@pku.edu.cn; *通讯作者, (电子信箱)yhuang@pku.edu.cn.

料丰度最高可达每立方米海水 1×10^5 个^[3]。环境中大量且持久存在的微塑料成为不可忽视的新兴环境污染物,其对生态环境和人类健康的影响受到学者和公众的广泛关注。

由于微塑料的主要组成元素为碳,且比表面积大,疏水性强,为环境中微生物提供了理想的生态位^[4]。实际上早在1972年Carpenter等就发现,漂浮在北大西洋的Sargasso Sea区域中的小片塑料,附着了硅藻等微小生物^[5]。近年来的研究发现,无论是存在水体还是土壤中的微塑料,表面都有大量微生物定殖,形成了由特定微生物组成的生物膜。微塑料表面生物膜,可能富集特殊微生物组,比如抗生素耐药菌、致病微生物和塑料降解微生物组等,对环境微生态过程产生影响;还可能增加微塑料的表面生物性,使其更容易被生物吞噬而进入食物链,增加微塑料对生态系统的负面影响^[6]。

因此,微塑料及其表面生物膜的研究,受到了广泛关注。在WOS中以检索式“TS=(microplastic* & water* & biofilm*)”进行检索,采用VOSviewer1.6.18绘制WOS中大气微塑料研究的关键词网络图(图1)。分析关键词网络图可知,现有水体微塑料表面生物膜研究主要集中在不同水体微塑料的赋存情况(蓝色)、水体微塑料表面微生物群落组成和结构(黄色)、水体微塑料表面细菌群落研究(绿色)和水体微塑料表面生物膜的形成(红色)。本文将从聚焦微塑料表面生物膜,综述微塑料表面的微生物种类和特性、影响微塑料表面生物膜的物化因素及微塑料表面生物膜形成过程,为厘清微塑料的生态效应和环境影响提供科学依据。

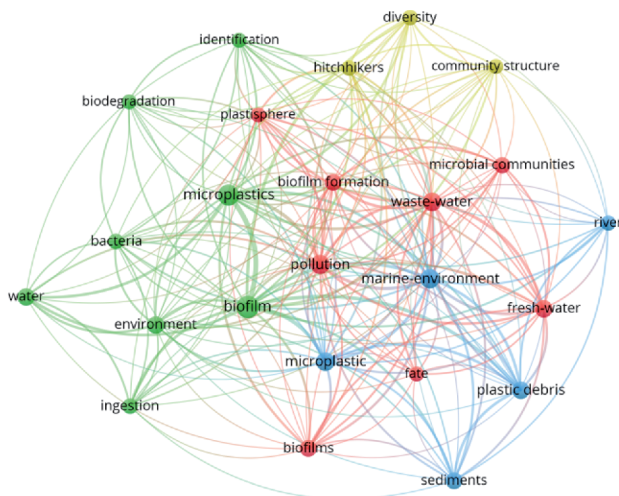


图1 基于WOS核心数据库中水体微塑料生物膜研究的关键词网络图

Fig.1 Keyword network diagram of water microplastic biofilm research based on WOS core database

1 水体微塑料表面微生物群落结构特征

1.1 水体微塑料微生物群落丰富度和多样性

与水环境中的浮游细菌相比,水体微塑料表面生物膜微生物群落的结构特征,如丰富度、均匀度及多样性等具有显著不同。在河流和其他淡水生态系统中的微塑料表面,细菌的类群丰富度、多样性和均匀度都低于水体中浮游细菌^[7]。海水中的微塑料表面微生物群,则具有相反的特征,Wang等^[8]在杭州湾的研究表明,水体中浮游细菌的丰富度、多样性均低于微塑料表面微生物群;布雷斯特湾微塑料表面生物膜的研究也表明,与自由生活和颗粒附着细菌相比,微塑料生物膜具有更高的多样性和物种丰富度^[9]。Li等^[10]在一项对于淡水和海水生态系统中微塑料和水生环境之间微生物群落组成和多样性差异的研究中,清晰地展示了塑料际和水生环境微生物群落特征的不同。他们发现,在淡水和海水生态系统中,微塑料表面细菌群落的丰富度显著高于水生环境,而真菌群落的丰富度相对较低。这一结果表明,与水生环境相比,微塑料富集了更多的细菌物种,排斥了环境中的一些真菌物种^[10]。

上述这些结果表明,微塑料表面生物膜的群落特征,与周围水体环境中的自由微生物的群落特征存在显著差异。不同环境中微塑料表面生物膜与环境微生物差异的矛盾结果,意味着微塑料表面微生物多样性和丰富度,可能受到水体类型等环境因素的影响。

1.2 水体微塑料表面微生物群落组成

1.2.1 水体微塑料表面优势微生物类群

细菌群落组成是微塑料表面生物膜研究主要关注的类群。在微塑料表面最常检测出的是拟杆菌门(Bacteroides)、变形菌门(Proteobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)和放线菌门(Actinomycetes)^[11]。其中在海洋水体和淡水水体微塑料表面,拟杆菌门占比最高(0.176,0.175),且海洋水体和淡水水体微塑料表面的各细菌分布占比不尽相同;在陆地微塑料表面,绿弯菌门占比最高(0.193)。相较于陆地,水体微塑料表面特有的主要细菌类群包括浮霉菌门(Planctomycetes)、疣微菌门(Verrucomicrobia)、装甲菌门(Armatimonadetes)和硝化螺旋菌门(Nitrospirae)(表1)^[12]。

真菌被发现可定殖在水体微塑料表面。Stramenopiles是聚苯乙烯和聚对苯二甲酸乙二醇酯生物膜上的主要真核微生物,Viridiplantea和Stramenopiles是聚乙烯生物膜上的主要真核类群^[13]。子囊菌纲(Ascomycetes)和担子菌纲(Basidiomycetes)是北海和波罗的海塑料碎片上的主要真菌类群^[14]。

表1 不同环境中微塑料表面定殖细菌分布占比(门水平)
Table 1 Distribution proportion of colonized bacteria on the surface of microplastics in different environments (phylum level)

门类	海洋	淡水	陆地
拟杆菌门(Bacteroides)	0.176	0.175	0.132
变形菌门(Proteobacteria)	0.110	0.068	0.146
浮霉菌门(Planctomycetes)	0.103	0.065	/
放线菌门(Actinomycetes)	0.090	0.087	0.170
疣微菌门(Verrucomicrobia)	0.089	0.052	/
蓝藻菌门(Cyanobacteria)	0.076	0.054	0.032
厚壁菌门(Firmicutes)	0.034	0.041	0.045
酸杆菌门(Acidobacteria)	0.014	0.056	0.085
绿弯菌门(Chloroflexi)	0.026	0.066	0.193
芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)	0.011	0.015	0.153
装甲菌门(Armatimonadetes)	/	0.050	/
硝化螺旋菌门(Nitrospirae)	0.033	0.048	/

这些研究表明,微塑料生物膜为水生微生物提供了一个独特而新颖的生态位,进而可能对水生食物网、生物地球化学过程和动植物致病性具有潜在的影响。

1.2.2 微塑料表面生物膜中的致病菌及其影响

在微塑料生物膜存在的物种中,病原体微生物正受到越来越多的关注。最早在波罗的海的一项研究发现,弧菌属作为具有较强致病性的菌可附着在塑料碎片上^[15]。其他潜在致病微生物也陆续在微塑料表面生物膜的研究中被报道,如研究者在世界各地的温带^[15,16]和热带^[17]海洋环境微塑料样品中,发现了弯曲杆菌科(*Campylobacter jejuni*)、杀鲑气单胞菌(*Salmonicida*)和弧菌属(*Vibrio*);在淡水微塑料样品中也发现了类似的菌群^[18]。研究者认为,因为塑料的结构和表面特性,微塑料生物膜对某些细菌病原体具有选择性富集作用^[7,19]。而病原微生物群在微塑料表面的定殖和富集,增加了环境致病菌密度,加大了微塑料的生态风险。比如研究证明在微塑料生物膜中富集的弧菌属(*Vibrio*),是海洋环境特有的微生物。尽管该属的多数菌种是无害的,但其中部分种如霍乱弧菌(*Vibrio cholerae*)、副溶血性弧菌(*Vibrio Parahaemolyticus*)等,可引起野生动物和人类疾病^[9]。

由于微塑料本身具有疏水性、硬质特性、难自然降解和强漂浮能力等理化特性,比海洋中常见的自然漂浮或悬浮有机物,如植物枯枝落叶等,可以更长时间地存在于环境之中。经过自然老化的微塑料表面,褶皱程度高,比表面积较大,有利于微生物的生长和生物膜的形成,可能成为病毒、细菌等微生物的优良生态栖息地^[20]。

微塑料是一种能长时间稳定存在的浮动基质,可以在水环境中长距离传播,且可能被海洋动物摄取,是病原体理想的载体。随着环境中微塑料数量的增加,暴露量也在增加,进而可能导致鱼、甲壳类和软体动物的微生物疾病增加,加大水产养殖损失^[21]。研究发现,在低密度聚乙烯微塑料生物膜中,植物病原体农杆菌(*Agrobacterium*)、鱼类病原体黄杆菌(*Flavo-*

bacterium)等,具有比环境中更高的丰度^[19]。另外,附着在微塑料上的人类病原体,通过废水处理厂富集后排出至自然水体,可能是致病菌的潜在来源之一。McCormick等^[18]揭示,弯曲杆菌科(*Campylobacter jejuni*)在污水处理厂排水中的微塑料上具有较高丰度,该弯曲杆菌科被证实可引起人的胃肠道感染。

因此,微塑料所具有的这种成为病原体微生物潜在繁殖介质的特性,以及携带病原体微生物随水体扩散迁移的特性,有可能对淡水及海洋水体的环境基因库产生一定影响,进而对生态系统和人类健康产生潜在威胁。

1.2.3 微塑料表面生物膜中的降解菌

对塑料垃圾生物降解的需求,使得微塑料生物膜的降解菌成为研究热点之一^[22]。代谢途径分析表明,嵌入在微塑料生物膜中的微生物具有较大的“异源生物降解和代谢”潜力^[16]。Curren等^[17]发现,微塑料生物膜中的红杆菌属(*Erythrobacter*)能降解碳氢化合物;Morohoshi等^[23]对羟基己酸酯(PHBH)微塑料的研究表明,生物膜中的伯克霍尔德菌属(*Burkholderia cepacia*)是能够降解羟基己酸酯的主要细菌类群。此外,对于聚酰胺、聚对苯二甲酸乙二醇酯等可水解的微塑料,微生物中原本存在的降解途径(例如参与纤维素和蛋白质降解的细胞外水解酶)会影响其水解过程。PETase是一种在细菌*Ideonella sakaiensis*中被发现可以水解塑料聚合物(如PET)的酶^[24]。研究者认为,各环境微塑料样品中发现的相关降解酶表明,环境对PET的降解影响可能无处不在^[25]。

上述研究多基于对微塑料表面生物膜的基因分析,对微塑料生物膜中的可培养降解菌的信息还非常少。然而,微塑料表面生物膜对塑料降解菌的富集,为采取自然的方式解决微塑料污染提供了科学依据。从环境中老化的微塑料表面筛选高效降解菌,以降解环境中滞留的微塑料,可能是解决微塑料污染的可行技术之一。

2 水体微塑料生物膜形成的影响因素

研究证明,在环境水和微塑料原始表面第一次接触后的几秒钟内,微生物可通过细胞壁和微塑料基之间的相互作用与微塑料表面产生联系。微塑料的材料种类和特定表面性质,直接影响最初定殖的微生物先锋物种和群落结构。而生物膜的形成过程,是不同环境条件下微生物的定殖和微生物-微塑料表面相互作用的过程。因此,影响水生环境中这一过程的因素可以分为微塑料暴露时间、环境因素和微塑料基质本身。

2.1 微塑料暴露时间

微生物群落在微塑料表面定殖并形成生物膜的过程,是其微生物群落的演替过程和动态平衡结果。与所有生物群落的演替过程一样,在微塑料生物膜的形成过程中,可分为早期、中期和晚期3个阶段,且在不同时期具有不同的微生物群落组成特征。一般来说,海洋和河口微塑料生物膜中的早期先锋群落属于 γ -变形菌和 α -变形菌菌群的成员^[4]。随着微塑料暴露时间的增加, α -变形菌、 β -变形菌以及黄杆菌在群落中的相对丰度逐渐增加,与之对应的 γ -变形菌相对丰度则逐渐减少;此外,弧菌属是海洋环境中聚乙烯和聚苯乙烯微塑料的早期定殖者^[26]。在定殖后期,黄杆菌科、红杆菌科、浮霉菌科和叶状杆菌科在微塑料上的相对丰度较高^[27]。此外,从演替时间上看,微塑料生物膜中的微生物演替速度显著大于水环境中的微生物^[8]。

尽管微塑料上的微生物膜通常具有与该环境中的浮游细菌显著不同的群落组成,但其发育在很大程度上取决于周围的微生物群落^[28]。虽然对其演替过程还不是特别清楚,根据现有的研究我们可以得出,微塑料表面生物的演替模式可能为:以 γ -变形菌为主的先锋菌群演替向以水环境中主要微生物为主的微生物群落演替(图2),且演替速率远高于水体中浮游微生物群落的演替速率。

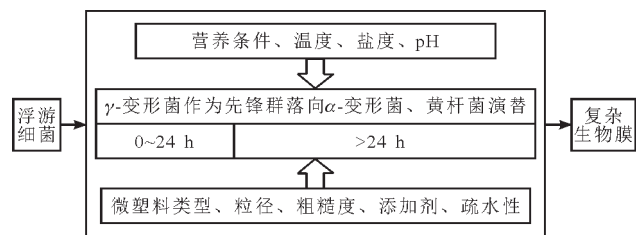


图2 水体微塑料表面微生物生物膜形成过程
Fig.2 Formation process of microbial biofilm on the surface of water microplastics

2.2 环境因素

影响微塑料表面膜形成的环境条件主要包括生物生长水体的盐度、pH、营养条件、污染程度等。环境条件是控制微塑料上微生物定殖、演替并形成生物膜的关键因素。

在湖水中,温度、营养水平和悬浮颗粒浓度决定了各种塑料上的微生物群落组成。Arias-Andres等关于微生物功能的研究^[28]表明,与环境水相比,在寡中营养型湖泊中形成的微塑性生物膜具有更高的功能丰富度。研究证明,不断降低的营养水平(总氮和总磷)和不断增加的环境胁迫(盐度)的水体条件会使特定细菌群落在由河水迁移到海水的过程中紧密附着在微塑料基质上^[26,29]。这些结果表明,营养机制、pH

值和盐度等因素是导致各种水生环境中特定微生物群落的重要环境驱动因素。陈涛的研究也表明水温、光强、pH和溶解氧等基本水文参数会对微塑料表面生物膜群落结构产生影响^[30]。

同时,自然环境中微塑料上生物膜的微生物群落组成,与微塑料所在水体中的微生物具有密切关系,如废水处理厂等各种高含菌量的水源排入自然水生生态系统后,改变了水体中微生物组成,进而显著影响水体中微塑料表面微生物膜结构和功能^[16]。因此,需要更多地了解控制微生物群落结构的环境因素,以及其对微塑料生物膜形成过程的影响。

综上所述,水体微塑料的非生物和生物环境条件,可在很大程度上塑造微塑料表面微生物群,对水环境的微生物生态结构和功能产生潜在影响。

2.3 微塑料聚合物类型

塑料的聚合物类型直接影响其表面定殖微生物的碳源,因此是最常被研究的内容之一。对布莱斯特湾中微塑料表面生物膜的研究发现,聚乙烯(PE)和聚丙烯塑料(PP)表面的微生物群落组成与聚苯乙烯上显著不同^[9]。在大西洋和太平洋进行的早期研究中,也发现聚苯乙烯(PS)在群落组合和结构方面与PE和PP不同^[31]。然而,Di Pippo等的研究表明,微塑料聚合物类型对其表面微生物群落组成和结构并无显著影响^[32]。因此,对微塑料聚合物类型对微塑料表面微生物群落影响的探究仍需继续深入。

现在大多数研究都集中在水生环境中传统的不可降解塑料类型对生物膜形成的影响^[33]。然而,根据现有塑料管理的发展趋势,可降解塑料将成为比较重要的一类塑料。根据国家《降解塑料的定义、分类、标志和降解性能要求》(GB/T 20197-2006),可降解塑料为在规定环境条件下,经过一段时间和包含一个或多个步骤,导致材料化学结构的显著变化而损失某些性能(如完整性、分子量、结构或机械强度)和发生破碎的塑料。现在市场上的主要可降解塑料为聚乳酸(PLA)和聚羟基烷酸酯(PHA)为基础的塑料产品。应关注可生物降解微塑料对微生物生物膜形成和微生物特性的影响,以更好地了解可生物降解塑料聚合物在水生环境中的行为、潜在毒性和其他环境影响。

2.4 微塑料粒径大小

微塑料的颗粒大小和形状决定微塑料的比表面积,影响微生物接触微塑料的机会,在理论上可影响生物膜微生物类型和形成过程。现有报道中,野外获取的微塑料粒径范围通常在 10^{-6} ~ 10^{-3} m。然而在布莱斯特湾的一项研究中,尺度为0.3~1 mm、1~2 mm和2~5 mm的3个实验组上,未发现OTU(oper-

tional taxonomic unit)组成和结构之间的显著差异^[9],表明微塑料大小和表面积并没有影响微生物细菌群落构成。Parrish等在室内生物膜培养实验中,将微塑料分为 $\leq 250\ \mu\text{m}$ 和 $250\sim 500\ \mu\text{m}$ 2组,结果表明在实验尺度范围内,微生物群落相似度达89%以上($P>0.08$)^[34],表明微塑料生物膜中的微生物群落组成未受粒径的显著影响。此外,Setälä等比较了 $106\sim 125\ \mu\text{m}$ 与 $355\sim 425\ \mu\text{m}$ 微球状聚苯乙烯, $125\sim 250\ \mu\text{m}$ 与 $250\sim 500\ \mu\text{m}$ 的聚乙烯微颗粒,发现同一材料不同粒径之间的微生物群落OTU组成无显著差异^[35]。但当比较微塑料和粒径更大的塑料碎片时,结论则相反。Debroas等的研究证明,尺寸为 $5\ \text{mm}\sim 20\ \text{cm}$ 的PE板和 $300\ \mu\text{m}\sim 5\ \text{mm}$ 的PE微塑料表面微生物的群落结构,具有显著差异^[13],表明微塑料(直径 $<5\ \text{mm}$)和大块塑料(直径 $>5\ \text{mm}$)表面微生物的群落结构具有显著差异,进而表明不同粒径微生物群落组成和结构的相似性仅适用于微塑料。

对于纳米级的塑料而言,由于大部分细菌本身的大小约为 $2\ \mu\text{m}$,大于纳米塑料粒径,因此这种粒径大小的微塑料表面并不能形成生物膜,而是通过与微生物聚合的方式显著改变水体中生物膜的微生物种类。Okshevsky等研究了聚苯乙烯纳米颗粒对细菌群落的影响,观察到聚苯乙烯纳米颗粒上,海洋细菌在生物膜上的形成受聚苯乙烯纳米颗粒浓度的影响。研究者认为,纳米塑料的表面特性和浓度是决定海洋细菌生物膜形成的因素^[36]。Okshevsky还发现,实验组中最高浓度(200×10^{-6} (体积分数); $20\ \text{nm}$;5 d)的带有酰胺基的聚苯乙烯纳米颗粒,可导致所有研究物种的聚集增加,生长速率和光密度(OD 600)降低,并促使水体中除克氏杆菌外所有细菌种类的生物膜的形成减少^[36]。另一方面,最高浓度(200×10^{-6} (体积分数); $20\ \text{nm}$;5 d)的带有羟基的聚苯乙烯纳米颗粒,促进了海杆菌的粘附以及藻酸海洋杆菌、海洋盐单胞菌等菌种生物膜形成,同时导致其他细菌的生物膜减少^[36]。这个研究说明,单个分离的纳米塑料颗粒,可能对生物膜的形成影响不大,只有达到一定浓度后,才可能通过促进环境微生物聚合的方式,形成与微塑料相关的微生物膜。因此,纳米塑料的环境影响,不应该与微塑料混合一起研究,而应该单独进行系统研究。

2.5 微塑料其他物化特性对其表面生物膜的影响

除聚合物类型和粒径大小外,环境微塑料性质还包括老化程度、颜色、疏水性、化学添加物等。这些物化特性对生物膜的影响,还只有一些零散的研究。例如, Mercier等发现,微塑料的粗糙度和疏水性是控制微塑料表面性能最突出的参数,不同的粗糙度和疏水

性可导致微塑料表面微生物群落的香农指数和物种均匀度呈现显著差异^[37]。塑料颗粒中的某些色素可以解释细菌定殖的差异^[38]。Wen等发现不同颜色的微塑料之间存在明显不同的细菌群落组成,蓝色微塑料具有更多独特的物种,比如伯克霍尔德菌科(*Burkholderia cepacia*)和鞘单胞菌科(*Sphingomonas*)等,表明微塑料上生物膜的形成可能受塑料颜色驱动。虽然不同颜色微塑料在群落多样性上没有显著差异,但生物膜结构和功能表达方面存在显著差异,如蓝色微塑料上的生物膜比透明色和黄色微塑料上的生物膜具有更高的功能多样性^[39]。暴露于紫外光或在水中孵育几周而产生的老化微塑料,通常会增加比表面积、粗糙度和极性,利于生物膜的形成^[40]。Cai等发现微塑料表面硬度是决定细菌在微塑料表面定殖的关键因素^[41]。在生产过程中添加的增塑剂、阻燃剂、颜料、抗菌剂和热稳定剂等添加剂,可以改变特定的微塑料性能,进而改变生物膜结构^[42]。此外,生物膜的生长可能会受到基材表面纹理的影响,因为不规则形状的表面可能会为生物膜提供更多的附着点^[43]。

3 展望

随着对微塑料的了解,人们越来越关注微塑料污染对环境、生态和健康(人类和其他动物)影响的研究。来自不同环境的微塑料,通过不同的途径进入水环境。由于其环境持久性,微塑料可以在水环境中存活数十年甚至百年。在这个期间,环境微生物在微塑料表面定殖,并形成生物膜。本文综述了不同水体环境中微塑料表面微生物的组成和分布上的差异,进一步说明微塑料生物膜可以作为微生物的一种新型生态位,形成与环境中游离微生物显著不同的微生物群落,对于水生生态系统和人体健康具有潜在危险;同时,对影响水体环境中微塑料表面生物膜的形成过程的微塑料暴露时间、环境因素、微塑料聚合物类型以及粒径大小等因素进行了归纳总结。为了进一步了解并控制这些威胁,还需从以下几方面进行系统深入的研究,为管控水体微塑料污染提供可行依据。

(1)在对于微塑料表面生物膜的群落组成和结构研究的基础上,深入研究生物膜的功能,研究微塑料表面生物膜对塑料降解、重金属吸附、抗性基因传播等方面的影响。

(2)目前从原位实验中获得的数据,为水生系统中不同塑料基质上微生物生物膜的发展提供了基础。水中的微塑料表面可以迅速被微生物定殖,并受到基质特性以及环境因素的影响。为了更好地理解这些相互作用,需要进一步进行室内控制实验及微生物膜

培养实验等。

(3) 在了解微塑料聚合物类型及颗粒大小影响生物膜结构功能基础上,进一步研究微塑料的表面特性、塑料老化程度、颜色等因素对生物膜群落组成及结构具有重要影响。拓展研究不同物理化学特性的微塑料对生物膜的影响,以期通过控制和改变微塑料载体的性质,来改变微塑料表面生物膜的结构和功能。

[参考文献]

- [1] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic[J]. *Science*, 2004,304(5672):838.
- [2] Teuten E L, Saquing J M, Knappe D R U, et al. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2009,364(1526):2027–2045.
- [3] Zhou Q A, Zhang H B, Fu C C, et al. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Geoderma*, 2018,322:201–208.
- [4] Oberbeckmann S, Löder M G J, Labrenz M. Marine microplastic-associated biofilms: a review[J]. *Environmental Chemistry*, 2015,12(5):551.
- [5] Carpenter E J, Anderson S J, Harvey G R, et al. Polystyrene spherules in coastal waters[J]. *Science*, 1972,178(4062):749–750.
- [6] Rios L M, Moore C, Jones P R. Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007,54(8):1230–1237.
- [7] McCormick A R, Hoellein T J, London M G, et al. Microplastic in surface waters of urban rivers: concentration, sources, and associated bacterial assemblages[J]. *Ecosphere*, 2016,7(11).
- [8] Sun Y Z, Zhang M J, Duan C X, et al. Contribution of stochastic processes to the microbial community assembly on field-collected microplastics[J]. *Environmental Microbiology*, 2021,23(11):6707–6720.
- [9] 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.
- [10] Li C C, Gan Y D, Zhang C, et al. “Microplastic communities” in different environments: differences, links, and role of diversity index in source analysis[J]. *Water Research*, 2021,188:116574.
- [11] Delacuvellerie A, Cyriaque V, Gobert S, et al. The plastisphere in marine ecosystem hosts potential specific microbial degraders including *Alcanivorax borkumensis* as a key player for the low-density polyethylene degradation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019,380:120899.
- [12] Wright R J, Langille M G I, Walker T R. Food or just a free ride—a meta-analysis reveals the global diversity of the plastisphere[J]. *The ISME Journal*, 2021,15(3):789–806.
- [13] Debroas D, Mone A, Ter Halle A. Plastics in the North Atlantic garbage patch: a boat-microbe for hitchhikers and plastic degraders[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017,599/600:1222–1232.
- [14] De Tender C, Devriese L I, Haegeman A, et al. Temporal dynamics of bacterial and fungal colonization on plastic debris in the North Sea[J]. *Environmental Science and Technology*, 2017,51(13):7350–7360.
- [15] Kirstein I V, Kirmizi S, Wichels A, et al. Dangerous hitchhikers—evidence for potentially pathogenic *Vibrio* spp. on microplastic particles[J]. *Marine Environmental Research*, 2016,120:1–8.
- [16] Jiang P L, Zhao S Y, Zhu L X, et al. Microplastic-associated bacterial assemblages in the intertidal zone of the Yangtze Estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,624:48–54.
- [17] Curren E, Leong S C Y. Profiles of bacterial assemblages from microplastics of tropical coastal environments[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,655:313–320.
- [18] 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 and Technology*, 2014,48(20):11863–11871.
- [19] Gong M T, Yang G Q, Zhuang L, et al. Microbial biofilm formation and community structure on low-density polyethylene microparticles in lake water microcosms[J]. 2019,252:94–102.
- [20] Harrison J P, Sapp M, Schratzberger M, et al. Interactions between microorganisms and marine microplastics: a call for research[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2011,45(2):12–20.
- [21] Lafferty K D, Harvell C D, Conrad J M, et al. Infectious diseases affect marine fisheries and aquaculture economics[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2015,7:471–496.
- [22] Jacquin J, Cheng J G, Odobel C, et al. Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the plastisphere[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019,10:865.
- [23] Morohoshi T, Oi T, Aiso H, et al. Biofilm formation and degradation of commercially available biodegradable plastic films by bacterial consortiums in freshwater environments[J]. *Microbes and Environments*, 2018,33(3):332–335.
- [24] Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, et al. Response to comment on “a bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)”[J]. *Science*, 2016,353(6301):759.
- [25] Danso D, Schmeisser C, Chow J, et al. New insights into the

- function and global distribution of polyethylene terephthalate (PET)–degrading bacteria and enzymes in marine and terrestrial metagenomes[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2018.
- [26] Kesý K, Oberbeckmann S, Kreikemeyer B, et al. Spatial environmental heterogeneity determines young biofilm assemblages on microplastics in Baltic Sea mesocosms[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019,10:1665.
- [27] Pinto M, Langer T M, Hüffer T, et al. The composition of bacterial communities associated with plastic biofilms differs between different polymers and stages of biofilm succession[J]. *PLoS One*, 2019,14(6):e0217165.
- [28] Arias-Andres M, Kettner M T, Miki T, et al. Microplastics: new substrates for heterotrophic activity contribute to altering organic matter cycles in aquatic ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,635:1152–1159.
- [29] Li W J, Zhang Y, Wu N, 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 and Technology*, 2019,53(18):10763–10773.
- [30] 陈涛. 近海微塑料表面生物膜的形成及其对微塑料理化性质的影响[D]. 烟台:中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2018.
- Chen Tao. Formation of Biofilm on Microplastics and Its Influences on Physicochemical Properties of Microplastics in the Coastal Sea[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [31] Amaral-Zettler L A, Zettler E R, Slikas B, et al. The biogeography of the plastisphere: implications for policy[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015,13(10):541–546.
- [32] Di Pippo F, Venezia C, Sighicelli M, et al. Microplastic-associated biofilms in lentic Italian ecosystems[J]. *Water Research*, 2020,187:116429.
- [33] Akdogan Z, Guven B. Microplastics in the environment: a critical review of current understanding and identification of future research needs[J]. *Environmental Pollution*, 2019,254:113011.
- [34] 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.
- [35] Setälä O, Fleming-Lehtinen V, Lehtiniemi M. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web[J]. *Environmental Pollution*, 2014,185:77–83.
- [36] Okshevsky M, Gautier E, Farner J M, et al. Biofilm formation by marine bacteria is impacted by concentration and surface functionalization of polystyrene nanoparticles in a species-specific manner[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2020,12(2):203–213.
- [37] Mercier A, Gravouil K, Aucher W, et al. Fate of eight different polymers under uncontrolled composting conditions: relationships between deterioration, biofilm formation, and the material surface properties[J]. *Environmental Science and Technology*, 2017,51(4):1988–1997.
- [38] De Tender C A, Devriese L I, Haegeman A, et al. Bacterial community profiling of plastic litter in the Belgian part of the North Sea[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015,49(16):9629–9638.
- [39] Wen B, Liu J H, Zhang Y, et al. Community structure and functional diversity of the plastisphere in aquaculture waters: does plastic color matter[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,740:140082.
- [40] Liu P, Zhan X, Wu X W, et al. Effect of weathering on environmental behavior of microplastics: properties, sorption and potential risks[J]. *Chemosphere*, 2020,242:125193.
- [41] Cai L, Wu D, Xia J H, et al. Influence of physicochemical surface properties on the adhesion of bacteria onto four types of plastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671:1101–1107.
- [42] Smith M, Love D C, Rochman C M, et al. Microplastics in seafood and the implications for human health[J]. *Current Environmental Health Reports*, 2018,5(3):375–386.
- [43] Ammar Y, Swailes D, Bridgens B, et al. Influence of surface roughness on the initial formation of biofilm[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015,284:410–416.