

# 塑料污染生物降解及其评价分析方法研究进展\*

杜泓钰 王巧宁 王虹丹 王运庆<sup>†</sup> 陈令新<sup>†</sup>

(中国科学院环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东 烟台 264003)

**摘要** 作为一类新型海洋污染物,微纳塑料引起了人们的高度重视。探索微纳塑料与生物的相互作用,对于揭示其生态效应和环境归趋具有重要意义。目前相关工作大多集中于生物体内转运、分布和蓄积等“物理”层面,微纳塑料的“化学”降解行为及相关规律研究尚鲜有涉猎。本文从塑料污染生物降解的研究现状、降解机制、评价分析方法等方面进行简要综述,以期为海洋中微纳塑料生物降解研究提供参考。

**关键词** 微纳塑料;生物降解;分析方法

微纳塑料作为一类新兴污染物受到了全球科学家和公众的关注<sup>[1]</sup>。海洋是微纳塑料的最终汇集区,目前在河口、近海、大洋,甚至南北极、深海超深渊带都发现了微纳塑料的存在<sup>[2,3]</sup>。大量研究表明,微纳塑料可以被多种海洋生物摄取,导致器官堵塞和机械损伤,海洋生物自身携带及从环境中吸附的有害物质,也会产生毒害作用。随着食物链传递,微纳塑料最终进入人体,给人类健康造成威胁<sup>[4]</sup>。探索微纳塑料和生物的相互作用,对于揭示环境生态效应具有重要意义。目前相关研究多集中于生物体内转运、分布和蓄积等“物理”层面<sup>[5]</sup>,体内“化学”降解行为的发生与否及相关规律尚鲜有研究。本文对塑料污染生物降解的研究现状、降解机制、分析评估方法等方面进行简要综述,以期为海洋中微纳塑料生物降解研究提供参考。

## 1 塑料生物降解研究现状

尽管普遍观点认为,聚苯乙烯(PS)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚对苯二甲酸(PET)、聚氨酯(PUR)等石油基塑料分子结构稳定,难以生物降

解,但由于在污染环境修复方面的重要价值,研究人员从未停止在塑料生物降解方向上的探索。近年来,在环境微生物和动物肠道微生物降解两个方面取得了重要进展。

### 1.1 环境微生物降解

细菌作为自然界强大的分解者,几乎可降解所有已知的天然化合物及大部分人工合成物质。已发现具有塑料降解能力的环境微生物有芽孢杆菌属(*Bacillus sp.*)、假单胞菌(*Pseudomonas adaceae*)、无色杆菌(*Achromobacter sp.*)、赤红球菌(*Rhodococcus ruber*)、链霉菌(*Streptomyces sp.*)等30余种,以陆地环境降解菌为主<sup>[6,7]</sup>,多分离自土壤、垃圾填埋场、堆肥等。例如,文献<sup>[8]</sup>报道了一株从塑料瓶回收点土壤样品中分离的PET降解菌*Ideonella sakaiensis*,其可以分泌降解酶,将PET解聚成可被吸收和生物转化的塑料单体。真菌被发现可以有效降解PUR,已报道的降解真菌有丝状真菌及酵母菌,其中包括塔宾曲霉(*Aspergillus tubingensis*)、南极假丝酵母(*Candida antarctica*)、嗜酒假丝酵母(*Candida ethanolica*)、塞内加尔弯孢霉(*Curvularia senegalensis*)、茄病镰刀菌(*Fusarium solani*)

收稿日期: 2021-05-31

\* 国家自然科学基金面上项目(42076199)资助

<sup>†</sup> 通讯作者: E-mail: yqwang@yic.ac.cn; lxchen@yic.ac.cn

作者简介: 杜泓钰(1996—),女,硕士研究生,主要从事海洋环境分析化学研究。E-mail: hydu@yic.ac.cn

等,主要发现于堆肥环境<sup>[9]</sup>。

与陆地相比,海洋环境中塑料的微生物降解研究较少。假单胞菌(*Pseudomonas adaceae*)、沼泽考克氏菌(*Kocuria palustris*)、短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*)与枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)等<sup>[10, 11]</sup>,对PE、PP显示了一定的降解能力。PE经过氧化预处理后,可以被海水中的弯曲芽孢杆菌(*Bacillus flexus*)部分降解。海水中的芽孢杆菌(*Bacillus sp.*)处理塑料90 d后,通过重量测定和原子力显微镜观察等手段,

证明了该菌能够降解PE与PVC塑料<sup>[12]</sup>。最近,中国科学院海洋研究所孙超岷团队发现能有效降解PET和PE的海洋微生物菌群和酶<sup>[13]</sup>。但总体来说,由于海水温度低、降解微生物种类和数量少,生物降解的条件差,塑料在海水中降解非常缓慢。如PE塑料经海水降解菌作用30 d后,重量损失不超过2%;PVC塑料降解90 d后,重量损失仅为0.26%<sup>[12]</sup>。因此,海洋环境微生物对塑料的影响极为有限。部分已报道的塑料降解环境微生物见表1。

表1 部分已报道的塑料降解环境微生物

Table 1 Some reported plastics degrading environmental microorganisms

生境	塑料类型	菌属	分离环境	参考文献
陆地	PET	艾德昂菌( <i>Ideonella sp.</i> )	日本 Sakai 市 PET 瓶回收点的沉积物	[8]
	PET	嗜热裂孢菌( <i>Thermobifida sp.</i> )	土壤	[14]
	PET	假丝酵母( <i>Candida sp.</i> )	—	[15]
	PE	赤红球菌( <i>Rhodococcus sp.</i> )	以色列废弃 PE 地膜污染的土壤	[16]
	LDPE	芽孢杆菌( <i>Bacillus sp.</i> )	波兰 Rybnik 的废弃煤矿土壤	[17]
	LDPE	微球菌( <i>Micrococcus sp.</i> )	波兰 Holy Anne Mountain 的火山口土壤	[17]
	HDPE	无色菌( <i>Achromobacter sp.</i> )	波兰垃圾填埋场的土壤和 PE 购物袋碎片	[18]
	HDPE	丛毛单胞菌( <i>Comamonas sp.</i> )	巴西土壤中的塑料碎片	[6]
	PVC	假单胞菌( <i>Pseudomonas sp.</i> )	美国垃圾填埋场的垃圾渗滤液	[19]
	PS	红球菌( <i>Rhodococcus sp.</i> )	以色列废弃地膜污染的土壤	[20]
海洋	PE	芽孢杆菌( <i>Bacillus sp.</i> )	阿拉伯海近岸水体	[10]
	PC	假单胞菌( <i>Pseudomonas sp.</i> )	孟加拉湾近海	[10]
	PP	红球菌( <i>Rhodococcus sp.</i> )	马来西亚红树林沉积物	[21]
	HDPE	蜡样芽孢杆菌( <i>Bacillus cereus</i> )	印度洋	[22]
	LDPE	短小芽孢杆菌( <i>Bacillus pumilus</i> )	阿拉伯海	[23]
	LDPE	枯草杆菌( <i>Bacillus subtilis</i> )	阿拉伯海	[23]

注: LDPE 代表低密度聚乙烯, HDPE 代表高密度聚乙烯。

Note: LDPE is short for low density polyethylene, and HDPE is short for high density polyethylene.

## 1.2 动物肠道微生物降解

动物肠道微生物降解是一类新近发现的塑料降解模式。我国科学家杨军教授受一种常见的米虫印度谷螟(*Plodia interpunctella*)啮食塑料袋启发,开始了其降解PE塑料的深入探索,从其肠道内分离出阿氏肠杆菌(*Enterobacter asburiae*)和芽孢杆菌(*Bacillus sp.*)2株具有PE降解能力的细菌<sup>[24]</sup>。随后,文献[25]发现黄粉虫(*Tenebrio molitor*)可以利用肠道微小杆菌(*Exiguobacterium sp.*)高效降解PS塑料泡沫。

文献[24-28]的系列工作在国际上引发昆虫降解塑料的研究热潮。此外,多种摄食木质素、蜂蜡等天然聚合物的昆虫,也陆续被发现具有塑料降解能力<sup>[29, 30]</sup>。文献[31]通过PE驯养大蜡螟(*Galleria mellonella*),从其肠道中分离出3株具有较强塑料降解能力的细菌,在30 d内对PE的失重率分别为8.07%、5.66%和5.38%。除了昆虫以外,蜗牛的摄食作用也可以导致PET、PS微纤维表面加速磨损及老化,以及纤维直径减小。摄食发泡PS会对蜗牛的菌群结构和丰富度产生一定的影响,肠杆菌科(*Enter-*

*obacteriaceae*) 和鞘脂杆菌科 (*Sphingobacteriaceae*) 等 PS 敏感的优势菌相对丰富度明显增高,表明特定的肠道菌群可能参与塑料的生物降解过程<sup>[32]</sup>。表 2 总结了部分已报道的具有塑料降解能力的动物。

由于生物消化系统中存在适宜的菌株种类和丰

富的胞外降解酶,且咀嚼作用显著缩小了塑料尺寸,增加了降解酶攻击的比表面积<sup>[25]</sup>,使得动物肠道内的降解能力较自然环境中显著提高。例如,黄粉虫将发泡 PS 转化为 CO<sub>2</sub> 的半衰期仅为 15 ~ 20 h,并且可以降解 PS、PE 和硫化橡胶等多种材质<sup>[27]</sup>。

表 2 部分已报道的具有塑料降解能力的动物

Table 2 Some reported animals with plastic degradation ability

塑料类型	动物	菌属	实验周期	参考文献
PS	黄粉虫 ( <i>Tenebrio molitor</i> Linnaeus)	<i>Exiguobacterium</i> sp. strain YT2	30 d	[25]
PE	印度粉蛾 ( <i>Plodia interpunctella</i> )	<i>Enterobacter asburiae</i> YTI and <i>Bacillus</i> sp. YP1	28 d	[24]
PS foam	大麦虫 ( <i>Zophobas atratus</i> )	—	28 d	[33]
PE、PS	黄粉虫 ( <i>Tenebrio molitor</i> Linnaeus)	<i>Citrobacter</i> sp. and <i>Kosakonia</i> sp.	32 d	[27]
HDPE	小蜡虫 ( <i>Achroia grisella</i> )	—	28 d	[29]
SBR	黄粉虫 ( <i>Tenebrio molitor</i> Linnaeus)	—	21 d	[34]
PE	蜡虫幼虫 ( <i>Galleria mellonella</i> )	—	12 h	[31]
PS	黑粉虫 ( <i>Tenebrio obscurus</i> )	<i>Spiroplasmataceae</i> and <i>Enterobacteriaceae</i>	31 d	[35]
PET、PS	白玉蜗牛 ( <i>Achatina fulica</i> )	—	48 h	[32]

注:SBR 代表丁苯橡胶。

Note: SBR is short for styrene butadiene rubber.

### 1.3 微生物降解塑料的过程

微生物的生物降解过程是微生物群落利用有机物作为碳源进行代谢的过程,由需氧微生物完全转化为 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、矿物质和生物质,或者在厌氧性生物作用下转化为 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和腐殖质。如图 1 所示,塑料生物降解过程包括 3 个主要阶段。

1) 微生物生物膜的形成。环境中的微塑料因具有比表面积高、表面风化产生丰富的官能团等特点,极易被微生物快速附着定植于表面,并形成动态变化的生物膜。生物膜的形成可改变微塑料的密度、疏水性、化学官能团、粗糙度等一系列理化性质和表面形貌,促进微生物对微塑料的生物降解。例如,赤红球菌 (*Rhodococcus ruber*) 可以在生物膜上定植,并形成“蘑菇样”的三维结构<sup>[36]</sup>;食烷菌 (*Alcanivorax borkumensis*) 可以在 LDPE 表面形成较厚的生物膜,在降解过程中起重要作用<sup>[37]</sup>。微生物分泌的胞外多糖可以增强生物膜对塑料表面的粘附力,加速生物降解过程。研究人员对降解 PE 的红球菌生物膜中多糖含量进行分析,发现多糖含量比蛋白质高 2.5 倍<sup>[36]</sup>。

2) 生物降解。微生物在该过程中分泌酶和自

由基,通过酶解反应将聚合物转化为更简单的形式,然后进行同化。研究表明,在水解酶、酯酶、脂肪酶、蛋白酶 K、角质酶、脲酶、氧化酶等参与下,塑料聚合物的碳骨架断裂,分解为低聚物、二聚体和单体,然后被微生物作为碳源吸收同化。例如,塔宾曲霉菌 (*Aspergillus tubingensis*) 在菌丝的辅助作用下,脂肪酶、酯酶破坏 PUR 化学键,实现了聚合物降解<sup>[38]</sup>。

3) 矿化。这是塑料生物降解的最后一步<sup>[17]</sup>。在此过程中,脂肪酸等小分子中间产物通过微生物细胞进一步的生物代谢作用释放出最终产物,如 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>。根据矿化水平,可以量化生物降解速率的完整过程<sup>[34]</sup>。例如,聚合物尼龙的矿化过程如下<sup>[1]</sup>:

$$C_a H_b O_c N_d + \left(2a + \frac{3d - b}{2} - c\right) O = aCO_2 + \frac{3d - b}{2} H_2O + dNH_3 \quad (3d > b),$$

$$C_a H_b O_c N_d + \left(2a + \frac{b - 3d}{2} - c\right) O = aCO_2 + \frac{b - 3d}{2} H_2O + dNH_3 \quad (3d > b).$$

注: $a, b, c, d$  分别为聚合物尼龙中 C, H, O, N 的系数。

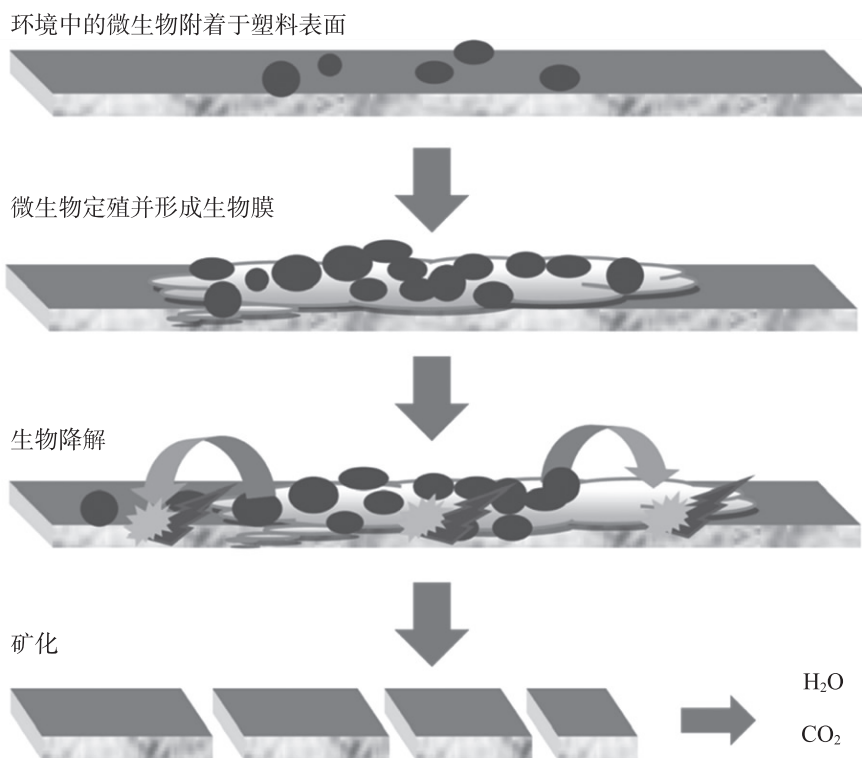


图1 塑料的微生物降解过程

Fig. 1 Scheme of microbial degradation progress of plastic

## 2 塑料生物降解分析方法

塑料的生物降解评估和降解物种筛选的基本流程为:以塑料为食物“饲喂”微生物或待测物种,分离提取处理后的塑料组分,比较处理前后的理化性质变化,进行降解现象的判定<sup>[42]</sup>。表征手段主要包括:通过电子显微镜(扫描电子显微镜 SEM 和透射电子显微镜 TEM 等)表征塑料的粒径、形状、表面形貌特征;通过凝胶渗透色谱法(GPC)进行聚合物的分子量测定;通过核磁共振光谱(NMR)、傅立叶变换红外光谱(FTIR)和气相色谱-质谱联用(GC-MS)等表征聚合物化学结构信息。分析处理前后塑料特征谱峰的差异,判定样品化学成分和官能团的变化,验证是否出现特征性降解产物。

### 2.1 电子显微镜检法

电子显微镜观察是非常高效的微塑料降解初步鉴定方法。宋杨等<sup>[32]</sup>对蜗牛取食 PET 后的排泄物运用 SEM 分析表面形态,观察结果表明,原始 PET

表面相对比较光滑,从蜗牛排泄物提取的 PET 表面形态发生明显变化,多处出现裂纹,表明蜗牛消化作用可以造成 PET 的磨损。

### 2.2 热重分析法

热重分析(TGA)是在程序控制温度下,测量物质的质量与温度或时间的关系的方法。通过 TGA 分析技术对喂食 PS、PE 的黄粉虫粪便进行分析测定,判定塑料样品经过黄粉虫肠道后是否发生了热改性。通常,PS 在 360 ~ 480 °C 下发生热解,最大分解速率温度约为 450 °C;喂食 PS 的黄粉虫粪便通常具有 175 ~ 275 °C、275 ~ 360 °C、360 ~ 480 °C 3 个热解阶段,低于 100 °C 的分解可归类为挥发性有机化合物(包括肠分泌物、来自 PS 的羧酸化合物等),而 100 ~ 360 °C 分解可归因于其他生物废物和可生物降解的残留物。表明 PS 在经过黄粉虫肠道后发生了改性<sup>[27]</sup>。

### 2.3 光谱分析法

FTIR 根据被检测物质的官能团、化学键振动,



对不同波长的光进行吸收,据此分析生物降解,基团发生变化以及新的基团出现都能证明聚合物发生了降解。例如,在PS生物降解研究中<sup>[39]</sup>,通过FTIR表征,发现在 $1700\text{ cm}^{-1}$ 、 $1050\sim 1150\text{ cm}^{-1}$ 、 $2500\sim 3500\text{ cm}^{-1}$ 处出现3个新峰,可以判定降解过程生成了C=O、C-O和羧酸基的氢键。

NMR是一种快速且准确的化合物结构鉴定方法。Kundungal等<sup>[29]</sup>利用<sup>1</sup>H-核磁共振(<sup>1</sup>H NMR)分析研究了小蜡螟虫(*Achroia grisella*)对HDPE的降解产物,发现其排泄物的残留聚合物出现了新的有机基团,为PE被生物降解提供了有力证据。文献<sup>[39]</sup>通过<sup>1</sup>H NMR表征,发现在 $\delta(5.35、3.6、2.7)$ 出现新峰,可以判定降解过程中生成了碳碳双键(-CH=CH-)、羰基( $\text{H}_2\text{C}=\text{O}$ )和羟基(-OH);通过固体核磁共振(<sup>13</sup>C CP/MAS NMR)表征,发现有芳香族共振信号出现,可以归属于PS解聚/氧化过程中产生的苯基衍生物。

## 2.4 色谱分析法

色谱法是光谱法的替代方法,利用不同物质在固定相与流动相之间分配能力的差异,实现多种物质之间的分离。GPC和GC-MS是常见的检测方法。

GPC分析可表征聚合物数均分子量(Mn)和重均分子量(Mw)的变化,这两种分子量通常被认为是聚合物解聚和降解的主要指标。在动物降解塑料的过程中,最常见的解聚模式是塑料聚合物的Mn和Mw均降低,分子量分布向低分子量方向转移。Yang等<sup>[25]</sup>通过GPC分析黄粉虫粪便中降解产物的分子量分布来研究PS分子的长链结构变化,与对照PS的分子量分布相比,粪便提取物的分子量分布曲线向较低分子量的方向移动;与对照PS相比,粪便提取物的Mn和Mw有所降低。这些结果表明,PS的长链结构发生解聚/裂解,在粉虫肠道中成了较低分子量的片段。

GC-MS方法被用于分析和鉴定PS在黄粉虫体内降解过程中生成的化合物<sup>[40]</sup>。已鉴定出几种塑料添加剂,包括2,4,6-三苯基-1-己烯,1,3,5-三苯基环己烷,苯乙酮,枯基醇以及2,4-二叔丁基苯酚。此外,提取物中还鉴定出PS单体苯乙烯、 $\alpha$ -甲

基苯乙烯等,这些物质的形成表明在PS生物降解过程中发生了酶促和生化反应。

## 2.5 同位素示踪法

稳定同位素示踪法是指利用稳定的同位素对所研究的化合物进行标记,通过分析仪器在不同时间测定该同位素或该化合物反应后的位置和数量等变化,了解其反应的机制和途径。<sup>13</sup>C同位素示踪分析是有机高分子生物转化研究的“金标准”。在昆虫降解塑料的机制研究方面,Yang等<sup>[24]</sup>通过采用<sup>13</sup>C标记的PS喂养黄粉虫16d,然后对黄粉虫自身以及所产粪便和气体进行同位素检测,发现PS聚合物被黄粉虫摄入后代谢为不同的产物,其中47.7%被转化为CO<sub>2</sub>,49.2%随粪便排出,仅约0.5%被黄粉虫所同化进入脂质中。

## 3 海洋微纳塑料生物降解的研究展望

海洋中也存在多种以天然多聚物(如富含甲壳质、几丁质、木质素、肽聚糖成分的“海洋雪”颗粒和动植物等)为食的生物,它们具有很强的分子消化和降解能力<sup>[41]</sup>。微纳塑料与这类海洋生物相互作用,可能不仅仅限于常规的体内转运、分布和蓄积等“物理”层面,也会涉及到塑料降解的“化学”变化<sup>[42,43]</sup>。海洋中具有降解能力物种的筛选和降解机制研究,对于准确理解微纳塑料归趋和生态效应具有重要意义。

### 3.1 基于生物降解的环境塑料归趋研究

微纳塑料在海洋食物网中的传递和最终归趋目前尚无定论<sup>[3]</sup>。从全球尺度上看,海洋塑料垃圾实测质量仅是模型估算值的1%,大量的海洋塑料垃圾不知去向<sup>[10]</sup>。海洋生物降解作用是回答这一问题的重要线索。微纳塑料在海洋庞大的食物网中循环往复传递,生物体内降解的累积效应不容忽视。

### 3.2 海洋降解物种和微生物的筛选

发掘新的高效海洋降解物种和降解菌,有助于海洋微塑料污染修复技术发展。在此基础上,深入研究微生物降解机理,揭示代谢途径,使用生物技术

手段对降解微生物或酶进行改造,提高降解效率。进一步建立海洋环境应用的整套技术体系,促进海洋资源高值开发利用和塑料污染治理工艺技术的发展。

### 3.3 评估塑料降解的分析方法创新

尽管已有的光谱、色谱等常规方法可用于塑料降解的结果判定,但存在生物样本用量大、分析繁琐缓慢、研究成本高等问题,难以直接应用于海洋生物体内塑料降解的研究。未来必须发展快速筛查技术和评估方法,实现塑料体内降解行为的高灵敏、原位和快速分析。

### 参考文献

- [1] Andradý A L. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1596–1605
- [2] Peeken I, Primpke S, Beyer B, et al. Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nature Communications*, 2018, 9: 1505–1517
- [3] Kane I A, Clare M A, Miramontes E, et al. Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation. *Science*, 2020, 368(6495): 1140–1145
- [4] Amelia T S M, Khalik W M A W M, Chuan O M, et al. Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2021, 8(12): 1–26
- [5] Bayo J, Olmos S, Lopez-Castellanos J. Microplastics in an urban wastewater treatment plant: the influence of physicochemical parameters and environmental factors. *Chemosphere*, 2020, 238: 169–193
- [6] Chamas A, Moon H, Zheng J J, et al. Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(9): 3494–3511
- [7] Ru J, Huo Y, Yang Y. Microbial degradation and valorization of plastic wastes. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 1–20
- [8] Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 2016, 351(6278): 1196–1199
- [9] Danso D, Chow J, Streit W R. Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 2019, 85(19): 1157–1166
- [10] Shao Z, Dong C, Guo W, et al. Marine microplastic distribution and plastic-degrading microorganisms: a review. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38(4): 490–501
- [11] Jacquin J, Cheng J, Odobel C, et al. Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the “plastisphere”. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 118–124
- [12] Kumari A, Chaudhary D R, Jha B. Destabilization of polyethylene and polyvinylchloride structure by marine bacterial strain. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(2): 1507–1516
- [13] Gao R, Sun C. A marine bacterial community capable of degrading poly(ethylene terephthalate) and polyethylene. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 1–12
- [14] Barth M, Honak A, Oeser T, et al. A dual enzyme system composed of a polyester hydrolase and a carboxylesterase enhances the biocatalytic degradation of polyethylene terephthalate films. *Biotechnology Journal*, 2016, 11(8): 1082–1087
- [15] Carniel A, Valoni E, Nicomedes Junior J, et al. Lipase from *Candida antarctica* (CALB) and cutinase from *Humicola insolens* act synergistically for PET hydrolysis to terephthalic acid. *Process Biochemistry*, 2017, 59: 84–90
- [16] Orr I G, Hadar Y, Sivan A. Colonization, biofilm formation and biodegradation of polyethylene by a strain of *Rhodococcus ruber*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, 65(1): 97–104
- [17] Nowak B, Pajk J. Microorganisms participating in the biodegradation of modified polyethylene films in different soils under laboratory conditions. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2011, 65(6): 757–767
- [18] Wang J, Liu X, Dai Y, et al. Effects of co-loading of polyethylene microplastics and ciprofloxacin on antibiotic degradation efficiency and microbial community structure soil. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 1–11
- [19] Wei W, Huang Q S, Sun J, et al. Polyvinyl chloride microplastics affect methane production from the anaerobic digestion of waste activated sludge through leaching toxic bisphenol-A. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(5): 2509–2517
- [20] Mor R, Sivan A. Biofilm formation and partial biodegradation of polystyrene by the actinomycete *Rhodococcus ruber*. *Biodegradation*, 2008, 19(6): 851–858
- [21] Auta H S, Emenike C U, Jayanthi B, et al. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp and *Rhodococcus* sp isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 127: 15–21
- [22] Sudhakar M, Doble M, Murthy P S, et al. Marine microbe-mediated biodegradation of low and high-density polyethylenes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2008, 61(3): 203–213
- [23] Harshvardhan K, Jha B. Biodegradation of low-density polyethylene by marine bacteria from pelagic waters, Arabian Sea, India. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1): 100–106
- [24] Yang J, Yang Y, Wu W M, et al. Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic-eating wax-

- worms. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (23): 13776–13784
- [25] Yang Y, Yang J, Wu W M, et al. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: part 1. chemical and physical characterization and isotopic tests. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(20): 12080–12086
- [26] Yang Y, Wang J, Xia M. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating superworms *Zophobas atratus*. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 1–15
- [27] Yang S S, Brandon A M, Flanagan J, et al. Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus): factors affecting biodegradation rates and the ability of polystyrene-fed larvae to complete their life cycle. *Chemosphere*, 2018, 191: 979–989
- [28] Yang Y, Yang J, Jiang L. Comment on “a bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)”. *Science*, 2016, 353(6301): 759
- [29] Kundungal H, Gangarapu M, Sarangapani S, et al. Efficient biodegradation of polyethylene (HDPE) waste by the plastic-eating lesser waxworm (*Achroia grisella*). *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(18): 18509–18519
- [30] Chen C C, Dai L, Ma L, et al. Enzymatic degradation of plant biomass and synthetic polymers. *Nature Reviews Chemistry*, 2020, 4(3): 114–126
- [31] Hu Y, He X, Yasenshali M, et al. Screening of polyethylene film-degrading bacteria from gut microbiota of *Galleria mellonella* and *Tenebrio molitor*. *Microbiology China*, 2020, 47(12): 4029–4041
- [32] Song Y, Cao C, Qiu R, et al. Uptake and adverse effects of polyethylene terephthalate microplastics fibers on terrestrial snails (*Achatina fulica*) after soil exposure. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 447–455
- [33] Kim H R, Lee H M, Yu H C, et al. Biodegradation of polystyrene by *Pseudomonas* sp. isolated from the gut of superworms (larvae of *Zophobas atratus*). *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(11): 6987–6996
- [34] Abuelkheir M G, Visconte L Y, Oliveira G E, et al. The biodegradative effect of *Tenebrio molitor* Linnaeus larvae on vulcanized SBR and tire crumb. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 1075–1082
- [35] Peng B Y, Su Y, Chen Z, et al. Biodegradation of polystyrene by dark (*Tenebrio obscurus*) and yellow (*Tenebrio molitor*) mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae). *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(9): 5256–5265
- [36] Sivan A, Szanto M, Pavlov V. Biofilm development of the polyethylene-degrading bacterium *Rhodococcus ruber*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, 72(2): 346–352
- [37] 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. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 380: 409–419
- [38] Khan S, Nadir S, Shah Z U, et al. Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis*. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 469–480
- [39] Yang L, Gao J, Liu Y, et al. Biodegradation of expanded polystyrene and low-density polyethylene foams in larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae): broad versus limited extent depolymerization and microbe-dependence versus independence. *Chemosphere*, 2021, 262: 1–34
- [40] Tsochatzis E, Lopes J A, Gika H, et al. Polystyrene biodegradation by *tenebrio molitor* larvae: identification of generated substances using a GC–MS untargeted screening method. *Polymers*, 2021, 13(1): 301–309
- [41] van Sebille E, Aliani S, Law K L, et al. The physical oceanography of the transport of floating marine debris. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(2): 99–106
- [42] Kumar G A, Anjana K, Hinduja M, et al. Review on plastic wastes in marine environment-biodegradation and biotechnological solutions. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 150: 118–124
- [43] Li J, Song Y, Cai Y B. Focus topics on microplastics in soil: analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 380–387

# PROGRESS ON BIODEGRADATION OF PLASTIC POLLUTION AND EVALUATION ANALYTICAL METHODS

Du Hongyu Wang Qiaoning Wang Hongdan Wang Yunqing<sup>†</sup> Chen Lingxin<sup>†</sup>

*(Key Laboratory of Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences  
(Yantai Institute of Coastal Zone Research), Yantai, Shandong 264003, China)*

**Abstract** As new types of marine pollutants, micro-nanoplastics have attracted great attention. It is of great significance to explore the interaction between micro-nanoplastics and organisms, which is crucial to unveil their ecological effects and environmental fates. At present, most of the related works focused on the “physical level”, such as transport, distribution and accumulation in organisms, but there is few research regarding to “chemical level”, like degradation behavior and related regulations. In this paper, we briefly reviewed the research status, degradation mechanism, and evaluation analytical methods of biodegradation of plastic pollution, which can provide reference for the study of biodegradation of micro-nanoplastics in the ocean.

**Key words** Micro-nanoplastic; Biodegradation; Analytical method