

引用格式:董迅,王思凡,袁宗胜,等.聚乙烯高效降解细菌的筛选和降解特性[J].福建农林大学学报(自然科学版),2025,54(5):658-666.
DONG X, WANG S F, YUAN Z S, et al. Screening and degradation characteristics of highly efficient polyethylene-degrading bacteria[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2025,54(5):658-666.

聚乙烯高效降解细菌的筛选和降解特性

董 迅¹, 王思凡², 袁宗胜³, 刘 芳¹

(1.福建农林大学生命科学学院,福建 福州 350002;2.福建农林大学未来技术学院,
福建 福州 350002;3.闽江学院地理与海洋学院,福建 福州 350108)

摘要:【目的】以闽江河口湿地红树植物的内生细菌为材料,从中筛选具有高效降解聚乙烯(PE)塑料能力的细菌菌株,为塑料污染生物修复技术和环保型塑料处理体系研发提供微生物资源与理论支撑。【方法】采用选择培养技术分离、筛选闽江河口湿地红树植物中具有降解 PE 塑料的内生细菌。将筛选的降解细菌接种到 PE 膜片上,综合判断其对 PE 的降解能力;计算 PE 膜片质量损失率;采用光学显微镜、扫描电子显微镜观察 PE 膜片表面变化;通过测量水接触角判断 PE 膜片疏水性变化;采用傅里叶红外光谱仪测定 PE 膜片表面官能团变化。【结果】分离、筛选得到 5 株可明显降解 PE 塑料的内生细菌,分别是阿氏芽孢杆菌 YZS-D08、暹罗芽孢杆菌 YZS-M04、沙福芽孢杆菌 YZS-C03、死谷芽孢杆菌 YZS-C10、人参新芽孢杆菌 BQB-A20。5 株 PE 降解细菌均能在 30 d 内使 PE 膜片质量损失 5% 以上,其中在 YZS-C03 作用下,PE 膜片质量损失率(7.30%)最高;经 5 株降解细菌处理后,PE 膜片表面存在明显的降解痕迹和微生物侵蚀孔洞,水接触角减小了 17.83°~29.10°,红外光谱图出现了羰基吸收峰。【结论】分离、筛选出 5 株具有高效降解 PE 塑料能力的红树植物内生细菌,扩大了 PE 塑料降解细菌的选择范围。

关键词:内生细菌;聚乙烯;生物降解;傅里叶红外光谱;塑料污染

中图分类号: X172

文献标识码: A

文章编号: 1671-5470(2025)05-0658-09

DOI: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).202410002



开放科学(资源服务)
标识码(OSID)

Screening and degradation characteristics of highly efficient polyethylene-degrading bacteria

DONG Xun¹, WANG Sifan², YUAN Zongsheng³, LIU Fang¹

(1.College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2.College of Future Technology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3.College of Geography and Oceanology, Minjiang University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract:【Objective】Bacterial strains which efficiently degraded polyethylene (PE) plastic were screened from the endophytic bacteria of mangrove plants in the Minjiang River estuary wetland to provide microbial resources and theoretical support for the research and development of plastic pollution bioremediation technology and environmentally friendly plastic processing system.【Method】A selective culture technique was used to isolate and screen the endophytic bacteria with the ability to degrade PE plastics from the mangrove plants in the Minjiang River estuary wetland. Then the selected strains were inoculated on PE film to comprehensively evaluate their PE-degrading ability based on the weight loss rate of PE film, surface changes of PE films under optical microscope and scanning electron microscope (SEM), changes in the hydrophobicity of PE film by measuring the water contact angle, and changes in the functional groups on the surface of PE film via Fourier transform infrared spectrometer (FTIR).【Result】Five endophytic strains that can efficiently degrade PE plastics were isolated and screened, namely *Priestia aryabhattai* YZS-D08, *Bacillus siamensis* YZS-M04, *B.safensis* YZS-C03, *B.vallismortis* YZS-C10 and *Neobacillus ginsengisoli* BQB-A20. All the 5 strains caused

收稿日期:2024-10-07 修回日期:2024-11-24

基金项目:福州市科技计划项目(2021-S-092)。

通信作者:刘芳(1980—),女,副教授,博士。研究方向:微生物资源与利用、食用菌遗传育种。Email:fjliufang@163.com。

the weight loss rate of PE film to more than 5% within 30 d, among which YZS-C03 had the highest rate of 7.30%. After treated with the 5 strains, obvious degradation marks and microbial erosion holes were observed on the surface of PE films, together with the declines of water contact angles by 17.83° – 29.10° and detection of a carbonyl absorption peak in the infrared spectrum. 【Conclusion】 Five strains of endophytic bacteria which can efficiently degrade PE plastics were isolated and screened from mangrove plants, which expanded the selection range of PE plastic-degrading bacteria.

Key words: endophytic bacteria; polyethylene; biodegradation; Fourier transform infrared spectrum; plastic pollution

近年来随着经济发展,塑料需求量及废弃量显著增加。目前,每年全球塑料废弃量约为3.5亿t^[1]。其中,成本低、结构简单的聚乙烯(polyethylene, PE)塑料被广泛应用及废弃^[2],且废弃物总体上仅有9%被回收利用^[3]。由于PE理化性质稳定,难以自然降解,易在环境中累积,严重影响生态环境质量^[4]。PE塑料在生物或非生物的作用下会形成微塑料(直径小于5 mm的塑料颗粒)。王佩瑶等^[5]在PE对生态环境影响的研究中指出,微塑料会改变土壤持水性,加剧土壤中的水分蒸发,干扰植物生长和种子萌发,影响农作物生长。同时,存在于海洋中的微塑料会随着洋流分布至全球,是影响范围最广的污染方式^[6]。环境中的微塑料最终经呼吸和食物链,直接或间接进入人体,对人体健康造成危害^[7]。

微生物在对环境保护方面有着不可或缺的作用,如在堆肥过程中显著提高肥料质量^[8],能分解污水中的有机物^[9],可吸附土壤中的重金属^[10]。研究指出,利用微生物将PE塑料代谢为水和二氧化碳,可有效解决PE塑料的环境污染难题^[11–13]。传统的PE塑料处理方法主要为物理填埋和焚烧^[2],但这些处理方式会造成环境的二次污染。黄炳政等^[14]提出在合成PE塑料时导入可降解单元,使PE在保持原有优点的同时具有可降解特性,但改变了PE合成途径,其生产成本随之上升,且无法直接解决现存PE塑料的降解问题。微生物降解无需改变PE塑料的合成途径,为解决PE塑料降解问题提供了潜在的有效手段。目前发现具有降解PE塑料的真菌主要有根霉菌属(*Rhizopus*)、曲霉菌属(*Aspergillus*)、青霉菌属(*Penicillium*)^[15]。Sangale et al^[16]在土壤中分离、筛选出10株能降解PE塑料的真菌,其中,降解效率最高的是米曲霉(*Aspergillus oryzae*) BAYF5,可在60 d内使PE塑料质量损失58.51%。细菌在PE塑料降解中同样具有重要作用。目前被发现能降解PE塑料的细菌达20种以上,其中主要包括假单胞菌属(*Pseudo-*

monas)、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)等^[17–19]。Maroof et al^[20]在垃圾处理厂中分离出6株可降解PE的细菌,其中,降解效率最高的是暹罗芽孢杆菌(*B.siamensis*),经90 d处理,PE塑料质量损失8.46%。在可降解PE塑料的微生物研究中,多数PE降解细菌来自土壤^[21]或昆虫体内^[22],而来自植物体内的降解细菌则鲜有报道。为此,本研究以植物内生细菌为研究方向,探寻可高效降解PE塑料的细菌菌株。以闽江河口湿地红树植物的内生细菌为材料,通过选择培养技术筛选出具有PE降解能力的内生细菌,并综合判断其对PE的降解能力,旨在为开发塑料污染生物修复技术、构建环境友好型塑料废弃物处理体系提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试菌株 供试菌株为本课题组前期分离的闽江河口湿地秋茄等红树植物不同部位的319株内生细菌。

1.1.2 PE材料 低密度PE粉末粒径80目,购自中国石油化工股份有限公司;PE自封袋购自广州市宇成包装材料有限公司。将PE自封袋裁剪为1 cm×1 cm的正方形膜片进行后续试验。

1.2 培养基的配制

1.2.1 营养培养基 NA培养基:含3 g牛肉膏、10 g蛋白胨、5 g NaCl、18 g琼脂,用去离子水溶解并定容至1 L,pH为7.0~7.2。

NB培养基:含3 g牛肉膏、10 g蛋白胨、5 g NaCl,用去离子水溶解并定容至1 L,pH为7.0~7.2。

1.2.2 筛选培养基 无碳源矿物盐培养基:含0.7 g $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ 、0.7 g KH_2PO_4 、1.0 g NH_4NO_3 、0.5 g NaCl、0.5 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.002 g $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.002 g $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 、0.001 g $MnSO_4 \cdot H_2O$,用去离子水溶解并定容至1 L,并用1 mol ·

L^{-1} NaOH 调节培养基的 pH 为 7.0。

在无碳源矿物盐培养基中添加 1.5% 琼脂,即为无碳源矿物盐固体培养基。在直径为 9 cm 的平板表面涂布 0.02 g 已灭菌的 PE 粉末作为唯一碳源^[23]。

1.3 PE 降解细菌的筛选与 16S rRNA 鉴定

采用三区划线法将 319 株内生细菌接种至无碳源矿物盐固体培养基上培养,选择当中生长较快的单菌落接种至 NA 培养基上于 4 ℃ 下培养保存,同时接种至以 PE 为唯一碳源的最小碳源矿物盐培养基上于 30 ℃、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养。观察 PE 降解细菌在 NA 培养基平板上于 30 ℃ 培养 24 h 后的菌落形状和菌体形态,并进行革兰氏染色,同时参照《常见细菌系统鉴定手册》^[24] 的方法鉴定菌株的生理生化指标。将筛选的菌株接种在 NA 培养基上于 30 ℃ 培养 48 h,选用 DP302 细菌基因组 DNA 提取试剂盒(天根生化科技有限公司)提取筛选菌的 DNA,使用引物 27F (5'-AGAGTTTGATCMTG-GCTCAG-3')、1492R (5'-TACGGTTACCTGT-TACGACTT-3') 扩增筛选菌 16S rRNA 基因的 V1~V9 可变区。PCR 反应体系:含 2.5 μL 10×PCR Buffer、0.5 μL 基因组 DNA、0.5 μL 10 mmol·L⁻¹ dNTP、0.5 μL 20 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pf 引物、0.5 μL 20 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Pr 引物、0.5 μL 5 U· μL^{-1} Taq,用 ddH₂O 补足至 25 μL 。设 ddH₂O 为空白对照。PCR 产物送至生工生物工程(上海)股份有限公司测序。依据测序结果,对所得的 16S rRNA 基因序列与 GenBank 数据库中的菌种进行相似度对比及同源性分析,并通过 MEGA 11 软件构建系统发育树。

1.4 PE 降解细菌生长曲线的绘制

将筛选的 PE 降解细菌接种到 NB 培养基上,置于 30 ℃、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床中振荡培养,每 3 h 取样测定 $D_{600 \text{ nm}}$ 并绘制生长曲线。

1.5 PE 降解能力的测定

将筛选的 PE 降解细菌接种到 NB 培养基上,置于 30 ℃、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床中振荡培养至对数生长期后,再置于 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min,取沉淀,加入 0.9% 无菌生理盐水离心 10 min,重复操作两次,用生理盐水稀释菌液至 $D_{600 \text{ nm}}$ 为 1.0^[25]。PE 膜片称量后,用 75% 乙醇消毒 2 h。将 100 mL 无碳源矿物盐液体培养基置于三角瓶中,加入 3 片

表面已消毒的 PE 膜片,将上述培养至对数生长期的 PE 降解细菌以 1% (体积分数) 的接种量接种至无碳源矿物盐液体培养基中,同时以未接种菌株的培养基作为对照组,每种处理设置 3 个平行样本。将三角瓶置于 25 ℃、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒温振荡培养箱中培养 30 d 后,取样观察 PE 膜片质量损失情况、表面形貌变化、官能团变化和疏水性变化^[26]。

1.5.1 PE 膜片质量测定 将 PE 膜片置于质量分数为 2% 的 SDS 溶液中振荡洗涤 2 h,随后超声清洗 15 min,以去除附着于表面的生物膜;洗涤后,用无菌水对 PE 膜片冲洗 3 次;最后将洗涤后的 PE 膜片置于干燥器中干燥 2 d 后进行称量^[27]。PE 膜片质量损失率计算公式如下:

质量损失率/% = [(初始质量 - 降解后质量) / 初始质量] × 100。

1.5.2 PE 膜片表面微观形貌观察 用无菌水冲洗 PE 膜片以去除表面残余培养基,再将 PE 膜片置于体积分数为 2.5% 的戊二醛中固定 2 h;采用乙醇梯度脱水法对固定完成的 PE 膜片进行脱水,依次将 PE 膜片置于体积分数分别为 30%、50%、70%、90%、100% 的乙醇中,每次处理 15 min;脱水完成后,使用叔丁醇置换乙醇 2 次,每次 30 min。采用 BM2000 光学显微镜(南京江南永新光学有限公司)观察处理完成的 PE 膜片表面形貌变化。固定喷金处理后,用 SU3800 扫描电子显微镜(株式会社日立制作所)观察 PE 膜片微观形貌^[28]。

1.5.3 PE 膜片表面疏水性测定 平铺干燥处理后的 PE 膜片,将去离子水滴落至 PE 膜片表面,观察水滴形态,选定基线后采用 DSA100 液滴形状分析仪(克吕士科学仪器有限公司)测定水接触角^[29]。

1.5.4 PE 膜片表面官能团测定 清洗干净的 PE 膜片自然干燥后,用 Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪(赛默飞世尔科技公司)测定其表面官能团。测定条件:扫描波数 600~4000 cm^{-1} ,分辨率 4 cm^{-1} ,扫描 32 次。

2 结果与分析

2.1 PE 降解细菌的筛选与鉴定

筛选培养基上有少量的菌落形成,而未接种的筛选培养基上无菌落生长。挑选生长速度最快且长势接近的单菌落至 NA 培养基上进行富集培养后,再次接种至筛选培养基上进行复筛。重复操作

3 次后,筛选出 5 株可高效降解 PE 的细菌,分别编号为 YZS-D08、YZS-M04、YZS-C03、YZS-C10、BQB-A20。

2.1.1 PE 降解细菌的形态特征 YZS-D08、YZS-M04、YZS-C03、YZS-C10、BQB-A20 均为革兰氏阳性菌,菌落呈圆形、淡黄色、无光泽、无流动性,菌体均有芽孢、无荚膜。

2.1.2 PE 降解细菌的生理生化指标 由表 1 可

知:在 V.P 试验中,YZS-C10、BQB-A20 呈阳性, YZS-D08、YZS-M04、YZS-C03 呈阴性;葡萄糖产酸试验中只有 YZS-C10 呈阳性,其余 4 株均呈阴性; YZS-C03 是 H₂S 试验中唯一呈阴性的菌株,其余 4 株均呈阳性;5 株菌株其他的生理生化指标均相同。

2.1.3 PE 降解细菌 16S rRNA 分子鉴定 基于测序结果,通过与 GenBank 数据库中的同源序列比对分析,构建系统发育树(图 1)。

表 1 降解细菌的生理生化指标¹⁾
Table 1 Physiological and biochemical indexes of degrading bacteria

菌株 Strain	接触酶反应 Catalase reaction	V.P 试验 Voges-Proskauer test	MR 试验 Methyl red test	葡萄糖产酸试验 Glucose acid production test	葡萄糖产气试验 Glucose gas production test
YZS-D08	-	-	-	-	-
YZS-M04	-	-	-	-	-
YZS-C03	-	-	-	-	-
YZS-C10	-	+	-	+	-
BQB-A20	-	+	-	-	-

菌株 Strain	柠檬酸盐试验 Citrate test	硝酸盐还原试验 Nitrate reduction test	淀粉水解试验 Starch hydrolysis test	吡哌试验 Indole test	丙二酸测定 Malonic acid test	H ₂ S 试验 H ₂ S test
YZS-D08	-	+	+	-	-	+
YZS-M04	-	+	+	-	-	+
YZS-C03	-	+	+	-	-	-
YZS-C10	-	+	+	-	-	+
BQB-A20	-	+	+	-	-	+

¹⁾ “+”表示阳性,“-”表示阴性。“+” indicates positive, and “-” indicates negative.

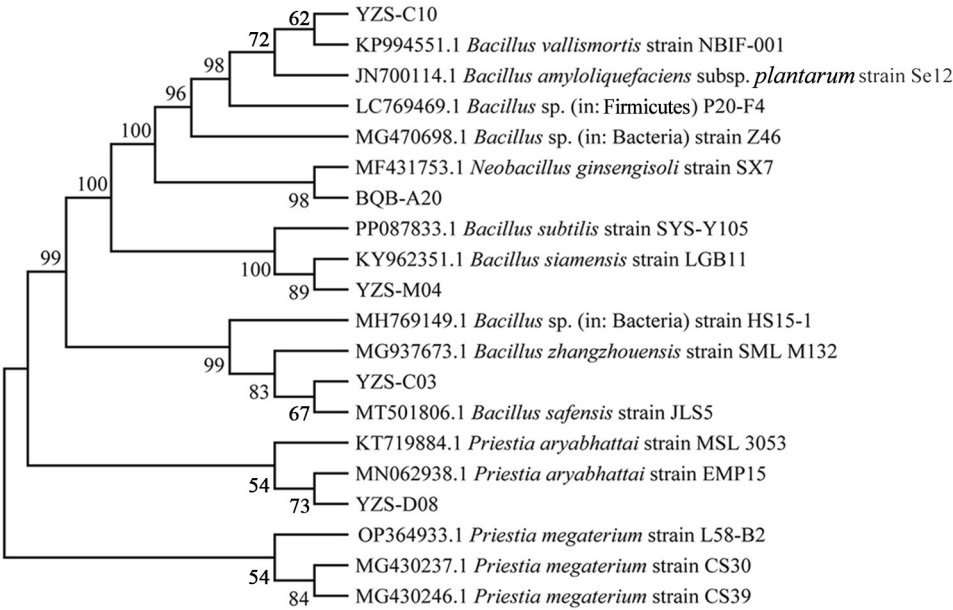


图 1 基于 16S rRNA 序列构建的 5 株降解细菌的系统进化树

Fig.1 Phylogenetic tree of 5 degrading strains constructed based on 16S rRNA sequences

图 1 显示, YZS-D08 的 16S rRNA 序列与 Priestia 中基因号为 MN062938.1 的 16S rRNA 序列同源性达 100%, 且与阿氏芽孢杆菌(P.aryabhattai) 同处于一个分支上(菌株拉丁学名备注扫描 OSID 码可见)。YZS-M04 的 16S rRNA 序列与 Bacillus 中基

因号为 KY962351.1 的 16S rRNA 序列同源性达 100%, 且与暹罗芽孢杆菌同处于一个分支上。YZS-C03 与沙福芽孢杆菌(B.safensis) 同处于一个分支上, 且 16S rRNA 序列与 Bacillus 中基因号为 MT501806.1 的 16S rRNA 序列同源性达 100%。与

YZS-C10 处于同一个进化分支的是 *Bacillus* 中基因号为 KP994551.1 的死谷芽孢杆菌 (*B. vallismortis*), 且 16S rRNA 序列与 KP994551.1 的 16S rRNA 序列同源性达 100%。BQB-A20 与人参新芽孢杆菌 (*Neobacillus ginsengisoli*) 同处于一个进化分支上, 且 16S rRNA 序列与 *Neobacillus* 中基因号为 MF431753.1 的 16S rRNA 序列同源性达99.93%(菌株拉丁学名备注扫 OSID 码可见)。

基于菌落形态观察、生理生化指标鉴定和 16S rRNA序列分析初步确定 YZS-D08 为阿氏芽孢杆菌 (*P. aryabhattai*), YZS-M04 为暹罗芽孢杆菌 (*B.siamensis*), YZS-C03 为沙福芽孢杆菌 (*B.siamen-*

sis), YZS-C10 为死谷芽孢杆菌 (*B. vallismortis*), BQB-A20 为人参新芽孢杆菌 (*N.ginsengisoli*)。

2.2 PE 降解细菌生长情况

PE 降解细菌在以 PE 为唯一碳源的无碳源矿物盐培养基上的生长情况如图 2 所示。YZS-C03、YZS-C10 在接种 3 h 后进入对数生长期,BQB-A20、YZS-M04 在接种 6 h 后进入对数生长期, YZS-D08 进入对数生长期最晚(接种 9 h 后)。YZS-C03、YZS-C10、BQB-A20、YZS-D08 均在接种 24 h 后进入稳定期,YZS-M04 则在接种 30 h 后进入稳定期。5 株降解细菌进入对数生长期的时间虽存在差异, 但稳定期菌株数量相近。

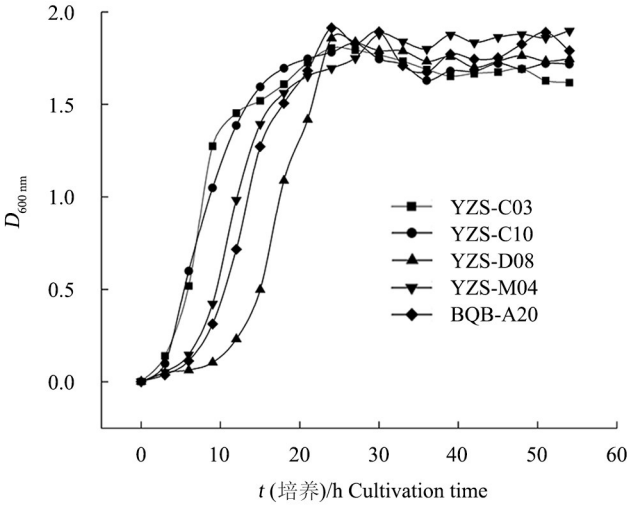


图 2 降解细菌的生长曲线

Fig.2 Growth curve of degrading bacteria

2.3 PE 降解细菌对 PE 膜片的降解效果

2.3.1 对 PE 膜片质量损失率的影响 图 3 显示, 5 株 PE 降解细菌降解处理 30 d 后,PE 膜片的质量损失率均超过 5%,而对照组未发生变化,表明 5 株降解细菌在 PE 降解方面有明显成效。YZS-C03 作用下,PE 膜片的质量损失率最高,为 7.30%;YZS-C10 作用下,PE 膜片质量降低 0.30 mg,质量损失率为 5.85%,影响最小。

2.3.2 对 PE 膜片表面微观形态的影响 光学显微镜下,5 株 PE 降解细菌处理 30 d 后,PE 膜片边缘出现明显崩坏或崩解的现象(图 4B-4F),而对照组 PE 膜片的边缘仍可明显区分(图 4A)。扫描电子显微镜下,PE 膜片经 5 株降解细菌处理后,表面粗糙并出现明显的微生物侵蚀孔洞(图 5B-5F),而对照组的 PE 膜片依然保持光滑(图 5A)。

2.3.3 对 PE 膜片表面疏水性的影响 水接触角

是衡量塑料老化降解过程亲水性变化的重要参数,塑料老化会引起水接触角的减小,亲水性增强^[30]。表 2 显示,PE 膜片在降解处理前具有良好的疏水性(水接触角大于 90°为疏水,反之则亲水^[29]);经 5 株 PE 降解细菌降解处理 30 d 后,PE 膜片表面的水接触角均小于 90°。经 5 株降解细菌处理后,PE 膜片角度降低率均大于 15%,导致 PE 膜片的疏水性下降,使微生物更易于附着、侵蚀 PE 膜片。其中:YZS-D08 处理后,PE 膜片表面水接触角降低幅度最大,降低了 31.84%;YZS-C10 处理后,水接触角降低幅度最小,降低了 19.51%。PE 膜片表面疏水性的降低,表明 5 株降解细菌具有高效降解 PE 的能力。

2.3.4 对 PE 膜片表面官能团的影响 傅里叶红外光谱仪测定结果(附图 I,扫 OSID 码可见)显示,5 株 PE 降解细菌处理前,PE 膜片在 2 914、

2 847、1 471、720 cm^{-1} 附近出现特征峰。2 914、2 847 cm^{-1} 附近的两个特征吸收峰分别由甲基键($-\text{CH}_3$)和亚甲基键($-\text{CH}_2$)振动引起;而在1 471、720 cm^{-1} 附近的两个特征吸收峰分别由甲基键($-\text{CH}_3$)和C—H键振动引起。5株降解细菌处理30 d后,PE

膜片均在1 646 cm^{-1} 附近出现了新的特征吸收峰,由羰基键($\text{C}=\text{O}$)振动引起。羰基键($\text{C}=\text{O}$)的出现标志着PE发生了生物降解^[31]。表明PE膜片在5株降解细菌的作用下发生了生物降解。

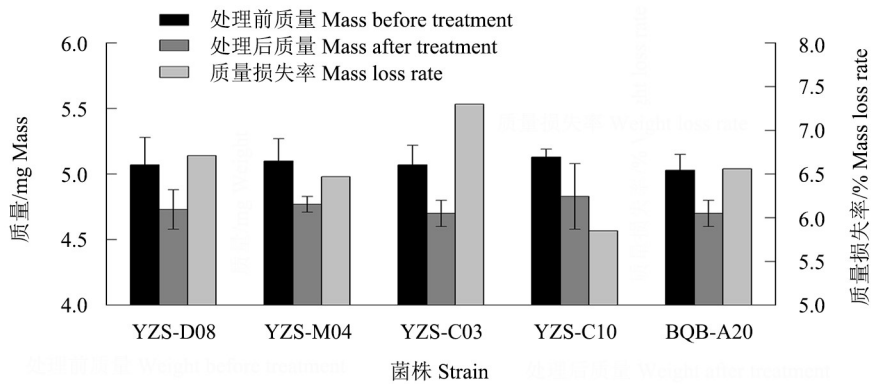
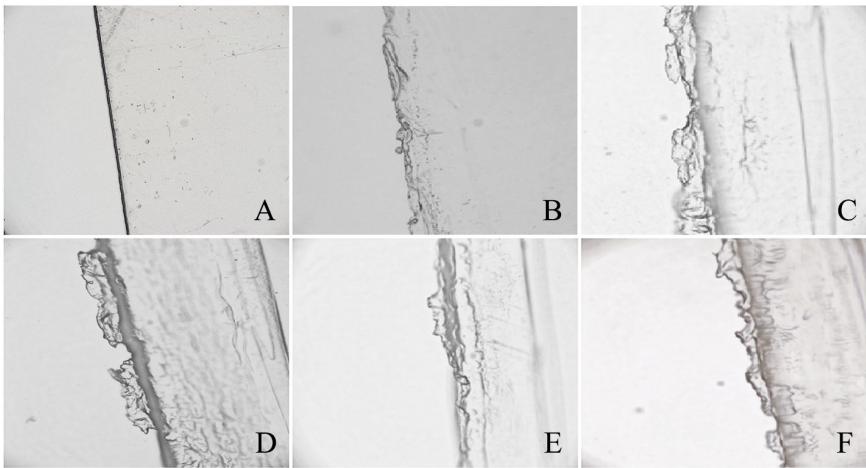


图 3 降解细菌对 PE 膜片质量的影响

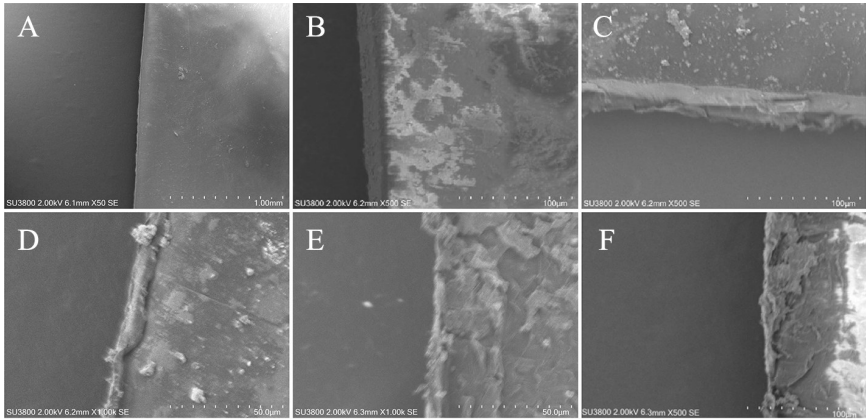
Fig.3 Effect of degrading bacteria on the mass of PE film



A.对照组 Control group; B.YZS-D08; C.YZS-M04; D.YZS-C03; E.YZS-C10; F.BQB-A20。

图 4 降解细菌作用下,PE 膜片表面在光学显微镜下的形态特征(100×)

Fig.4 Morphological characteristics of PE film surface treated with degrading strains under optical microscope (100×)



A.对照组 Control group (50×); B.YZS-D08 (500×); C.YZS-M04 (500×); D.YZS-C03 (1 000×); E.YZS-C10 (1 000×); F.BQB-A20 (500×)。

图 5 降解细菌作用下,PE 膜片表面在扫描电子显微镜下的形态特征

Fig.5 Morphological characteristics of PE film surface treated with degrading strains under scanning electron microscope

表 2 降解细菌作用下,PE 膜片水接触角的变化

Table 2 Changes in water contact angle of PE film treated with degrading bacteria

菌株 Strain	处理前角度/(°) Angle before treatment	处理后角度/(°) Angle after treatment	角度降低率/(%) Angle reduction rate
YZS-D08	91.40±0.79	62.30±0.60	31.84
YZS-M04	91.40±0.79	70.83±3.27	22.51
YZS-C03	91.40±0.79	67.70±1.41	25.93
YZS-C10	91.40±0.79	73.57±2.17	19.51
BQB-A20	91.40±0.79	62.50±0.30	30.79

3 讨论

3.1 PE 降解细菌对 PE 塑料的降解效果

PE 塑料的生物降解效果常通过质量损失率来评估,即 PE 经微生物降解后的质量减少比例^[32]。高超等^[33]从印度谷螟幼虫肠道中分离出的霍氏肠杆菌(*Enterobacter hormaechei*)可在 30 d 内使 PE 质量损失 4.24%;胡亚楠等^[34]从大蜡螟和黄粉虫肠道分离出的蜡样芽孢杆菌(*B. cereus*)和博甘都肠杆菌(*E. bugandensis*),分别在 30 d 内使 PE 质量损失 5.66%、5.39%。本研究筛选出 5 株可降解 PE 的红树植物内生细菌,培养 30 d 后均表现出不同的降解效果。YZS-C03 表现出较高的降解效率,可使 PE 在 30 d 内质量损失 7.30%;而降解效率较低的 YZS-C10,在 30 d 内使 PE 质量损失 5.85%。5 株降解细菌均具有高效降解 PE 的能力。

Das et al^[35]在 PE 膜片上接种解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)并培养 60 d 后,发现 PE 膜片表面出现了明显的裂纹。本研究中,经 PE 降解细菌降解 30 d 后,PE 膜片边缘在光学显微镜下可见明显的微生物降解痕迹,扫描电子显微镜下则可见明显的微生物侵蚀孔洞,进一步证明了 5 株降解细菌对 PE 膜片的降解作用。

3.2 PE 降解细菌对 PE 塑料理化性质的影响

PE 塑料具有较强的疏水性,但在老化的过程中,其疏水性会减弱,导致水接触角减小^[30]。薛彬等^[36]测量了老化前后 PE 微塑料的水接触角,发现水接触角从 127.2°降至 72.8°。本研究结果显示,经 PE 降解细菌降解后的 PE 膜片表面水接触角明显减小,表明 PE 膜片由原本的疏水性转变为亲水性,进一步说明了 5 株降解细菌对 PE 膜片的降解作用。

PE 表面官能团的变化是检验 PE 降解的重要指标之一。本研究结果显示,经 PE 降解细菌降解后的 PE 膜片表面在 1 646 cm⁻¹处出现了 C=O 伸缩振动

峰,表明在微生物降解过程中,PE 表面引入了氧气,形成了羰基基团。这一结果与 Harshvardhan et al^[37]的研究结果一致,进一步验证了 PE 塑料在微生物降解过程中经历了氧化反应,表面官能团发生了变化。

4 结论

本研究从闽江河口湿地秋茄等红树植物中分离了 319 株内生细菌,并从中筛选出 5 株具有高效降解 PE 能力的细菌,分别为阿氏芽孢杆菌 YZS-D08、暹罗芽孢杆菌 YZS-M04、沙福芽孢杆菌 YZS-C03、死谷芽孢杆菌 YZS-C10、人参新芽孢杆菌 BQB-A20,表明在红树植物内生细菌中存在可降解 PE 的细菌资源,扩大了微生物降解 PE 的菌种来源。

参考文献(References)

[1] VUPPALADADIYAM S S V, VUPPALADADIYAM A K, SAHOO A, et al. Waste to energy: trending key challenges and current technologies in waste plastic management [J]. Science of the Total Environment, 2024, 913: 169436. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169436.

[2] 刘强,卢亚红,吴慧,等.聚乙烯塑料的微生物降解[J].中国塑料,2022,36(3):120-126. DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2022.03.019.

LIU Q, LU Y H, WU H, et al. Microbial degradation of polyethylene plastics[J]. China Plastics, 2022,36(3):120-126. DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2022.03.019.

[3] VIDAL F, VAN DER MAREL E R, KERR R, et al. Designing a circular carbon and plastics economy for a sustainable future[J]. Nature, 2024,626: 45-57. DOI: 10.1038/s41586-023-06939-z.

[4] 赵长乐,林欣,徐耀波,等.一株聚乙烯降解菌的鉴定及其发酵条件优化[J].西南大学学报(自然科学版),2023,45(4):119-125. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.04.012.

ZHAO Z L, LIN X, XU Y B, et al. Identification of a polyethylene-degrading strain and optimization of its fermentation conditions [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2023, 45 (4): 119 - 125. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.04.012.

[5] 王佩瑶,曹萌萌,桑成琛,等.聚乙烯的生态影响及其生物降解[J].山东化工,2023,52(14):73-75. DOI: 10.

- 3969/j.issn.1008-021X.2023.14.021.
- WANG P Y, CAO M M, SANG C C, et al. Ecological impact of polyethylene and its biodegradation[J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52 (14): 73 - 75. DOI: 10.3969/j.issn.1008-021X.2023.14.021.
- [6] 陈昱霏,夏斌,朱琳,等.气候变化与海洋微塑料污染的相互影响研究进展[J].中国科学:化学,2024,54(7):1027-1037. DOI: 10.1360/SSC-2023-0250.
- CHEN Y F, XIA B, ZHU L, et al. Research progress on the interaction between climate change and marine microplastic pollution[J]. Scientia Sinica: Chimica, 2024, 54 (7): 1027-1037. DOI: 10.1360/SSC-2023-0250.
- [7] 石悦琪,叶广彬,孙珊珊,等.聚乙烯(PE)生物降解的研究进展[J].中国农学通报,2024,40(21):69-77. DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.cash2023-0859.
- SHI Y Q, YE G B, SUN S S, et al. Research progress on biodegradation of polyethylene (PE) [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40 (21): 69 - 77. DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.cash2023-0859.
- [8] FRANKE-WHITTLE I H, CONFALONIERI A, INSAM H, et al. Changes in the microbial communities during co-composting of digestates[J]. Waste Management, 2014, 34(3):632-641. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.12.009.
- [9] XIA Y, WEN X H, ZHANG B, et al. Diversity and assembly patterns of activated sludge microbial communities: a review[J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(4):1038-1047. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.03.005.
- [10] REN S Y, NI H G. Biodeterioration of microplastics by bacteria isolated from mangrove sediment [J]. Toxics, 2023, 11 (5): 432. DOI: 10.3390/toxics11050432.
- [11] 高珊,张金艳,矫月,等.黑曲霉降解废弃聚乙烯地膜的研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2021,33(6):54-59. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2090.2021.06.009.
- GAO S, ZHANG J Y, JIAO Y, et al. Degradation of waste polyethylene mulching film by *Aspergillus niger* [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021, 33 (6): 54 - 59. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2090.2021.06.009.
- [12] 曹萌萌,朱利霞,桑成琛,等.降解聚乙烯真菌哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)的筛选和鉴定[J].牡丹江师范学院学报(自然科学版),2023(1):41-46. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6180.2023.01.010.
- CAO M M, ZHU L X, SANG C C, et al. Screening and identification of polyethylene-degrading fungus *Trichoderma harzianum* [J]. Journal of Mudanjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2023 (1): 41 - 46. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6180.2023.01.010.
- [13] 王蕾,惠向娟,支慧,等.一株淡紫孢菌对聚乙烯地膜降解能力的研究[J].干旱地区农业研究,2023,41(4):217-225. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2023.04.23.
- WANG L, HUI X J, ZHI H, et al. Degradation effects of a strain of *Purpureocillium lilacinum* on polyethylene film [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41 (4): 217 - 225. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2023.04.23.
- [14] 黄炳政,韩瑞,李峥,等.有机碱催化 ω -十五内酯开环聚合制备类聚乙烯性质的可降解塑料[J].高分子学报,2024,55(8):976-985. DOI: 10.11777/j.issn1000-3304.2024.24067.
- HUANG B Z, HAN R, LI Z, et al. Ring-opening polymerization of ω -pentadecalactone catalyzed by organobases toward degradable polyethylene-like plastics [J]. Acta Polymerica Sinica, 2024, 55 (8): 976 - 985. DOI: 10.11777/j.issn1000-3304.2024.24067.
- [15] 闫景凯,贾亚婷,侯彬,等.聚乙烯塑料微生物降解及表征方法的研究进展[J].现代化工,2024,44(9):30-35. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.09.006.
- YAN J K, JIA Y T, HOU B, et al. Research progress in microbial degradation and characterization methods for polyethylene plastics [J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44 (9): 30 - 35. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.09.006.
- [16] SANGALE M K, SHAHNAWAZ M, ADE A B. Potential of fungi isolated from the dumping sites mangrove rhizosphere soil to degrade polythene [J]. Scientific Reports, 2019, 9 (1): 1 - 11. DOI: 10.1038/s41598-019-41448-y.
- [17] DANSO D, CHOW J, STREIT W R. Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2019, 85 (19): e01019-e01095. DOI: 10.1128/AEM.01095-19.
- [18] 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. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120899.
- [19] LI Z Y, WEI R, GAO M X, et al. Biodegradation of low-density polyethylene by *Microbulbifer hydrolyticus* IRE-31 [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110402. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110402.
- [20] MAROOF L, KHAN I, YOO H S, et al. Identification and characterization of low density polyethylene degrading bacteria isolated from soils of waste disposal sites [J]. Environmental Engineering Research, 2020, 26 (3): 200167. DOI: 10.4491/eer.2020.167.
- [21] 肖梦杰,王怡霏,王桂端,等.短芽孢杆菌PB1对聚乙烯的降解[J].山东农业大学学报(自然科学版),2023,54(6):858-864. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2023.06.009.

- XIAO M J, WANG Y F, WANG G D, et al. Degradation of polyethylene by *Brevibacillus* sp. PB1 [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2023, 54(6): 858–864. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2023.06.009.
- [22] 李玮,王丹丹,庞诗琪,等.大麦虫及其肠道微生物对聚乙烯的生物降解[J].微生物学通报,2023,50(4): 1422–1431. DOI: 10.13344/j.microbiol.china.230197.
- LI W, WANG D D, PANG S Q, et al. Biodegradation of polyethylene by *Zophobas atratus* and its gut microorganisms [J]. Microbiology China, 2023, 50(4): 1422–1431. DOI: 10.13344/j.microbiol.china.230197.
- [23] 袁宗胜,刘芳,谢宝贵.一株暹罗芽孢杆菌及其应用: CN202111159186.1[P].2021–11–19.
- YUAN Z S, LIU F, XIE B G. A strain of *Bacillus siamense* and its application: CN202111159186.1[P].2021–11–19.
- [24] 东秀珠,蔡妙英.常见细菌系统鉴定手册[M].北京:科学出版社,2001:364–398.
- DONG X Z, CAI M Y. Manual of identification of common bacteria [M]. Beijing: Science Press, 2001: 364–398.
- [25] 卫婉,聂芳红,张敏,等.红树林沉积物聚乙烯降解菌的筛选和降解特性[J].广东海洋大学学报,2024,44(3): 143–149. DOI: 10.3969/j.issn.1673–9159.2024.03.017.
- WEI W, NIE F H, ZHANG M, et al. Screening and characterization of polyethylene-degrading bacteria from mangrove sediments [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2024, 44(3): 143–149. DOI: 10.3969/j.issn.1673–9159.2024.03.017.
- [26] 袁宗胜,刘芳,谢宝贵.一株阿氏芽孢杆菌及其应用: CN202111159072.7[P].2021–11–30.
- YUAN Z S, LIU F, XIE B G. A strain of *Priestia aryabhattai* and its application: CN202111159072.7[P]. 2021–11–30.
- [27] 袁宗胜,刘芳,谢宝贵.一株死谷芽孢杆菌 YZS-C10 及其应用: CN202111151301.0[P].2021–12–17.
- YUAN Z S, LIU F, XIE B G. A strain of *Bacillus vallismortis* YZS-C10 and its application: CN202111151301.0 [P].2021–12–17.
- [28] 袁宗胜,刘芳,谢宝贵.一株沙福芽孢杆菌 YZS-C03 及其应用: CN202111150090.9[P].2021–12–03.
- YUAN Z S, LIU F, XIE B G. A strain of *Bacillus siamensis* YZS-C03 and its application: CN202111150090.9 [P].2021–12–03.
- [29] 庞蕊蕊.水环境中可生物降解塑料的降解特征、机制及生物强化降解研究[D].上海:华东师范大学,2023.
- PANG R R. The degradation characteristics, mechanism and bioenhanced degradation of biodegradable plastics in aqueous environment [D]. Shanghai: East China Normal University, 2023.
- [30] 陈国栋,刘海成,孟无霜,等.微塑料老化的人工干预及理化特性表征研究进展[J].化工进展,2022,41(12): 6443–6453. DOI: 10.16085/j.issn.1000–6613.2022–0300.
- CHEN G D, LIU H C, MENG W S, et al. Research progress on artificial intervention and characterization of physicochemical properties of microplastics aging [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(12): 6443–6453. DOI: 10.16085/j.issn.1000–6613.2022–0300.
- [31] BUTYLINA S, MARTIKKA O, KÄRKI T. Weathering properties of coextruded polypropylene-based composites containing inorganic pigments [J]. Polymer Degradation and Stability, 2015, 120: 10–16. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.06.004.
- [32] ALI SHAH A, HASAN F, HAMEED A, et al. Biological degradation of plastics: a comprehensive review [J]. Biotechnology Advances, 2008, 26(3): 246–265. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.12.005.
- [33] 高超,郝孔利,赵宇婷,等.一株能够降解聚乙烯的霍氏肠杆菌的鉴定及分析[J].生物技术通报,2020,36(10): 99–104. DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2020–0246.
- GAO C, HAO K L, ZHAO Y T, et al. Identification and analysis of a strain of *Enterobacter hormaechei* capable of degrading polyethylene [J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36(10): 99–104. DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2020–0246.
- [34] 胡亚楠,贺旭,亚森·沙力,等.大蜡螟和黄粉虫肠道菌中聚乙烯地膜降解细菌的筛选及其降解性能[J].微生物学通报,2020,47(12): 4029–4041. DOI: 10.13344/j.microbiol.china.200088.
- HU Y N, HE X, YASEN S L, et al. Screening of polyethylene film-degrading bacteria from gut microbiota of *Galleria mellonella* and *Tenebrio molitor* [J]. Microbiology China, 2020, 47(12): 4029–4041. DOI: 10.13344/j.microbiol.china.200088.
- [35] DAS M P, KUMAR S. An approach to low-density polyethylene biodegradation by *Bacillus amyloliquefaciens* [J]. 3 Biotech, 2015, 5(1): 81–86. DOI: 10.1007/s13205–014–0205–1.
- [36] 薛彬,蓝文陆,林海英,等.老化微塑料对 Hg(II) 的吸附解吸行为及机理研究[J].环境科学与技术,2022,45(8): 31–37. DOI: 10.19672/j.cnki.1003–6504.0243.22.338.
- XUE B, LAN W L, LIN H Y, et al. Studies of behavior and mechanism of Hg(II) adsorption-desorption onto aged polystyrene [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(8): 31–37. DOI: 10.19672/j.cnki.1003–6504.0243.22.338.
- [37] HARSHVARDHAN K, JHA B. Biodegradation of low-density polyethylene by marine bacteria from pelagic waters, Arabian Sea, India [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 77(1/2): 100–106. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.10.025.