

塑料降解菌的筛选及降解效率的研究

刘翠娟¹, 程 晶¹, 赵天瑞¹, 韩 弛¹, 郭玉辉¹, 王春悦¹, 于樱姿¹, 王瑞俭^{1,2*}

¹ 北华大学林学院, 吉林 吉林

² 吉林省林业生物技术工程研究中心, 吉林 吉林

收稿日期: 2024年7月1日; 录用日期: 2024年9月20日; 发布日期: 2024年9月29日

摘 要

我国是塑料产品生产大国, 塑料产品的使用产生了大量难以降解的塑料垃圾。为了能获得可高效降解塑料的菌株, 本研究以聚乙烯塑料为唯一碳源, 筛选出塑料降解菌, 通过失重法测定其降解效率, 采用16S rDNA序列测定对其进行核酸分类学鉴定。结果: 从半降解带土塑料中筛选出9株塑料降解菌, 塑料降解菌的降解率为0.33%~4.24%。9株塑料降解菌中, 6株为恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*), 3株为产吡啶金黄杆菌(*Chryseobacterium indologenes*), 恶臭假单胞菌的塑料降解率高于产吡啶金黄杆菌, 有进一步开发应用的潜力。

关键词

塑料, 降解菌, 筛选, 降解率

Study on Screening and Degradation Efficiency of Plastic Degradation Bacteria

Cuijuan Liu¹, Jing Cheng¹, Tianrui Zhao¹, Chi Han¹, Yuhui Guo¹, Chunyue Wang¹, Yingzi Yu¹, Ruijian Wang^{1,2*}

¹ Forestry Institute, Beihua university, Jilin Jilin

² Engineering Research Centre of Forestry Biotechnology of Jilin Province, Jilin Jilin

Received: Jul. 1st, 2024; accepted: Sep. 20th, 2024; published: Sep. 29th, 2024

Abstract

China is a major producer of plastic in the world, while the use of plastic products creates a large amount of plastic waste which is difficult to be degraded. In order to obtain strains that can efficiently degrade plastics, polyethylene plastic was used as the sole carbon source to screen plastic

*通讯作者。

文章引用: 刘翠娟, 程晶, 赵天瑞, 韩弛, 郭玉辉, 王春悦, 于樱姿, 王瑞俭. 塑料降解菌的筛选及降解效率的研究[J]. 微生物前沿, 2024, 13(3): 227-235. DOI: 10.12677/amb.2024.133024

degrading bacteria. The degradation efficiency was determined by weight-loss method, and the strains were identified by nucleic acid taxonomy based on 16S rDNA sequencing. Results: 9 plastic degrading bacteria were screened from semi degraded soil plastics, with the degradation rate of 0.33% to 4.24%. Among the 9 strains of plastic degrading bacteria, two-thirds are *Pseudomonas putida* and one-thirds are *Chryseobacterium indologenes*. The plastic degradation rate of *P. putida* is higher than that of *C. indologenes*. That indicates *P. putida* has the potential for further development and application.

Keywords

Plastic, Degrading Bacteria, Screening, Degradation Efficiency

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

根据 Plastics Europe (2023)发布的统计数据显示, 2022 年全世界范围内塑料的总产量约为 400.3 Mt, 其中聚乙烯(polyethylene, PE)的生产占总产量的 14.1%, 而中国生产的塑料产品占总量的 32%。由于我国是生产和消费塑料产品的主要国家之一, 塑料垃圾对我国环境的污染造成巨大的威胁。目前, 全球对于塑料垃圾的处理仍采用原始的方法, 如: 填埋、焚烧、堆肥等, 这些原始的处理方式易产生大量有毒有害物质, 对人体及生物体生产造成危害[1]-[5]。塑料的生物降解方法是指在一定时间范围内, 塑料在生物(如细菌、真菌和藻类等)的作用下被逐渐分解为对环境无害的生物质、CO₂、CH₄ 和水的过程[6]-[9], 生物降解方法具有安全、清洁、高效、环境友好等特点, 能够用于大量降解塑料[9]。因此, 微生物降解作为一种安全、环保的塑料垃圾处理方式, 受到人们关注。

国内外对于塑料降解菌的研究主要集中在对降解菌的筛选、表征及降解机理等方面。对于塑料降解菌的筛选, 通常采用以塑料为唯一碳源的选择培养基, 在适宜的条件下进行富集培养后, 从中筛选出塑料降解菌株[10]-[14]。目前已经发现具有塑料能力的微生物主要有: 青霉菌(*Penicillium*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)、假单胞菌(*Pseudomonas*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)等[15]-[19]。对微生物降解塑料的特性研究, 主要采用失重法、傅立叶红外光谱法(FTIR)、扫描电镜法(SEM)等方法测定菌株的塑料降解率[17]-[20]。目前已报道的菌株, 塑料降解效率在 0.75%~58.19% [2] [3] [21], 且降解时间较长, 一般在 60 d 以上[3]。对于微生物降解塑料的机理, 一般认为与微生物的酶促反应密切相关, 微生物分泌的某些酶可以催化各种反应, 促使塑料完成降解[21]-[26], 目前已有研究报道, 脂肪酶、酯酶、漆酶、脲酶、过氧化氢酶等与塑料降解有关[15] [23] [27]。

当前, 高效降解菌的选育及降解酶的分离纯化仍是塑料生物降解的主要研究方向[6]。为寻找具有塑料降解功能的微生物, 本研究以聚乙烯塑料为唯一碳源, 从含半降解塑料的土壤中筛选塑料降解菌, 通过失重法测定塑料降解菌的降解效率, 并采用核酸分类学鉴定筛选出的塑料降解菌, 为塑料的微生物降解研究提供有价值的参考。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验材料

聚乙烯塑料薄膜: 购于鸿达包装材料有限公司, 厚度为 0.004 mm。

PE 粉: 购于恒发塑化, 物理性状为白色球形, 粒径范围为 0.075 mm~0.106 mm, 平均分子量为 5000, 密度为 0.94 g/mL。

半降解带土塑料: 采于吉林市江南东山和北华大学垃圾回收站。

2.2. 试剂与培养基

无机盐溶液培养基: 硝酸铵 2.0 g, 七水硫酸镁 0.1 g, 磷酸氢二钾 1.5 g, 磷酸二氢钾 3.0 g, 无水氯化钙 0.01 g, 二水乙二胺四乙酸二钠 0.01 g, pH 调至 7.5, 加水至 1 L, 121℃ 灭菌 20 min。

LB 琼脂糖固体培养基: 蛋白胨 10 g, 酵母粉 5 g, 氯化钠 10 g, 琼脂粉 17 g, 蒸馏水 1 L, pH: 7.4~7.6, 121℃ 灭菌 20 min。

LB 液体培养基: 蛋白胨 10 g, 酵母粉 5 g, 氯化钠 10 g, 蒸馏水 1 L, pH: 7.2~7.6, 121℃ 灭菌 20 min。

2.3. 实验方法

2.3.1. 塑料的处理

将 PE 粉置于紫外灯下辐照灭菌 2 h 后备用。

准确称取 0.8~1.0 g 聚乙烯塑料薄膜, 剪成约 10 × 3 cm 长条, 用无菌水清洗后于 75% 酒精中浸泡 1 h, 再置于紫外灯下, 辐照处理 1 h 后, 留存备用。

2.3.2. 菌悬液的制备

取采自吉林市江南东山和北华大学东校区废品站的带土塑料约 10 g, 加入 250 mL 无机盐溶液培养基中, 于 25℃, 180 rpm 条件下摇床振荡 30 min, 室温静置沉降 10 min, 得菌悬液。

2.3.3. 塑料降解菌的筛选与驯化

1) 塑料降解菌的富集

无菌条件下, 准确称取 0.16 g 聚乙烯颗粒加入盛有 80 mL 无机盐溶液培养基中, 加入 1 mL 菌悬液, 于 25℃, 180 rpm 条件下摇床振荡培养 7 d。

2) 塑料降解菌的筛选

① 塑料降解菌的初步筛选

将塑料降解菌富集液稀释 100 倍后, 各取 50 μ L、100 μ L、150 μ L 稀释液涂布于 LB 琼脂培养基上, 25℃ 倒置培养 2 d。挑取单菌落加入 4 mL 含聚乙烯颗粒的无机盐溶液培养基中, 25℃, 180 rpm 摇床培养 7 d。筛选出有明显生长迹象的菌株, 在 LB 固体培养基上划线分离。

② 塑料降解菌的复筛

挑取塑料降解菌的单菌落, 加入含 5% LB (V/V) 的无机盐溶液液体培养基中, 25℃, 180 rpm 条件下振荡培养 1 d。取 1.6 mL 菌液, 加入 80 mL 含 0.2% 聚乙烯颗粒 (W/V) 的无机盐溶液培养基中, 25℃, 180 rpm 条件下振荡培养 7 d。取 1.6 mL 培养的菌液于 80 mL 上述聚乙烯 - 无机盐液体培养基中进行继代培养, 重复 10 次。从中筛选出具有明显浑浊现象的菌株。

3) 塑料降解率测定

① 精密称取 0.8~1.0 g 灭菌处理的聚乙烯薄膜, 放入 80 mL 含 5% LB (V/V) 的无机盐溶液培养基中, 按 1% (V/V) 比例加入复筛出塑料降解菌的菌液, 25℃, 120 rpm 条件下振荡培养 7 d。

② 转接实验: 将培养液中聚乙烯塑料条转入 80 mL 含 5% LB (V/V) 的无机盐溶液培养基中, 并按 1% (V/V) 比例加入相应菌株的培养液, 25℃, 120 rpm 条件下振荡培养 14 d。

③ 重复该过程 16 次。

④ 塑料降解率的测定：最后一次转接实验后，取出各菌株降解的聚乙烯塑料，用洗涤剂浸泡 3 min 后进行清洗，60℃烘干至恒重，称量并记录其准确质量，按以下公式计算各菌株的塑料降解率，并从中筛选出降解率较高的菌株。

$$\text{塑料降解率} = (m_0 - m_1) \div m_0 \times 100\%$$

m_0 ：降解前的聚乙烯塑料质量

m_1 ：降解后的聚乙烯塑料质量

2.3.4. 塑料降解菌的核酸分类学鉴定

1) 塑料降解菌的纯化

取各塑料降解菌的菌液，于 LB 琼脂培养基上划线分离，37℃倒置培养 1 d 后，挑取单菌落重复划线分离三次。挑取生长良好的单菌落，加入 700 uL LB 液体培养基中，于 25℃，160 rpm 条件下振荡培养 8 h。吸取 100 uL 菌液按照 1:1 比例加入 50%甘油，混匀后-80℃冰箱保存菌种。

2) 塑料降解菌的 DNA 提取

取各塑料降解菌的菌液 200 uL，12,000 rpm，离心 1 min，弃上清，加入 200 uL ddH₂O，涡旋混匀，100℃加热 10 min，2000 rpm，离心 1 min，上清中含菌株的基因组 DNA。

3) 16S rDNA 片段的 PCR 扩增

以各塑料降解菌 DNA 提取液作为模板，用 16S rDNA 的通用引物 27F (AGAGTTT-GATCCTGGCTCAG)、1492R (GGTACCTTGTTACGACTT)进行 PCR 扩增反应。20 uL 反应体系包含：8.5 uL ddH₂O，10 uL PCR mix，0.5 uL 上游引物(10 umol/L)，0.5 uL 下游引物(10 umol/L)，0.5 uL DNA 模板。PCR 反应程序为：95℃ 5 min；95℃ 20 s，55℃ 20 s，72℃ 1 min 40 s，循环 30 次；72℃ 2 min；12℃，1 h。用 1%的琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 扩增产物。

4) 16S rDNA 片段的序列测定

将扩增效果良好的 PCR 扩增产物送往上海生工进行 DNA 序列测定，测序引物为 27F/1492R，双向测序。

5) 塑料降解菌的鉴定

测序结果经 MEGA7.0 软件去除无用序列后，使用 DNAMAN 软件进行序列比对和序列拼接，所整理的各菌株 16S rDNA 序列在 NCBI 数据库中进行 BLAST 分析。用 MEGA7.0 软件将各菌株 16S rDNA 序列与数据库中已知序列进行 DNA 序列比对，选择 NJ 树法，采用 Bootstrap 检测(1000 次)对塑料降解菌进行聚类分析，最终确定各塑料降解菌株的种属。最后根据各塑料降解菌的特性，分析各菌株的潜在应用价值。

3. 结果与讨论

3.1. 塑料降解菌的筛选



Figure 1. Screening of plastic degradation bacteria

图 1. 塑料降解菌筛选

以 PE 塑料为唯一碳源的无机盐培养基从半降解塑料的土壤中筛选出可利用塑料的菌株。经两步筛选,共得到 9 个具有塑料降解作用的菌株,分别为 PE 3-1、PE 3-2、PE 3-5、PE 3-7、PE 3-10、PE 4-1、PE 4-5、PE 4-7 和 PE 4-8。筛选结果如图 1,从图中可以看到,各菌株经培养后,培养基均出现明显的浑浊,表明各菌株在以塑料为唯一碳源的培养基中能生长繁殖。

3.2. 塑料降解率的测定

以塑料膜为降解对象,在低能量培养基中,采用失重法对各菌株的塑料降解率进行测定。降解率实验结果见图 2。结果表明,PE 3-1、PE 3-2、PE 3-5、PE 3-7、PE 3-10、PE 4-1、PE 4-5、PE 4-7 和 PE 4-8 九株菌的塑料降解率分别为 1.41%、4.24%、1.12%、1.42%、0.338%、0.702%、0.65%、0.33%和 0.413%。其中,菌种 PE 3-2 的降解效果显著高于其他菌株。

目前,塑料的微生物降解仍存在降解效率,降解时间长的问题。如段亚良[11]用黑曲霉(*Aspergillus niger*)对聚乙烯塑料颗粒进行 30 d 的降解后,降解率为 7.65%,Hou 等[28]用两株假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)降解聚乙烯塑料 60 d,降解率分别为 3.62%和 5.95%。本研究中筛选出的塑料降解菌,经 224 d,降解率也仅为 4.24%,说明该菌株对塑料膜的降解能力有限,另外,本研究使用的塑料膜较厚,比表面积小,微生物与塑料接触少,也是导致降解率低的原因。

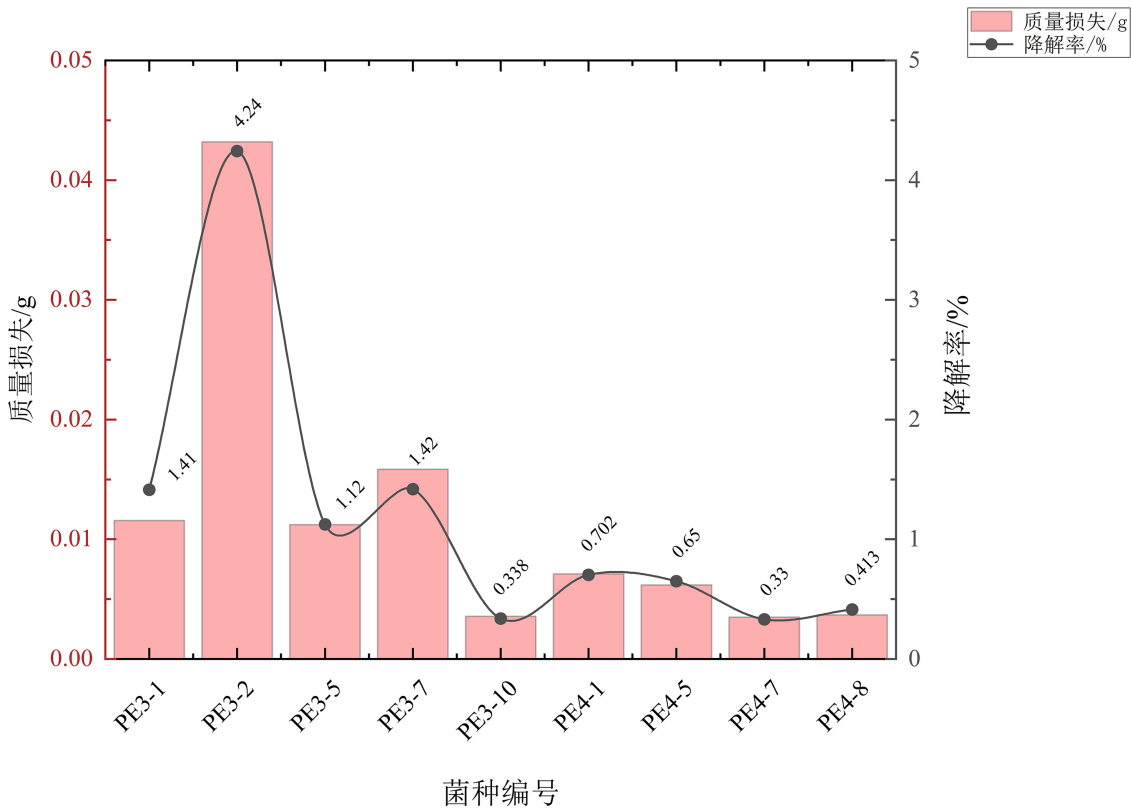


Figure 2. Degradation results of plastic degrading bacteria
图 2. 塑料降解菌对塑料的降解率作用

3.3. 塑料降解菌的核酸分类学鉴定

采用平板划线法对塑料降解菌进行纯化,提取各菌株的 DNA 后,采用通用引物(27F-1492R)扩增其

16S rDNA 序列，PCR 扩增产物和琼脂糖凝胶电泳检测结果如图 3。实验结果显示，各塑料降解菌均扩增出单一、明显的条带，扩增产物长度约 1500 bp。

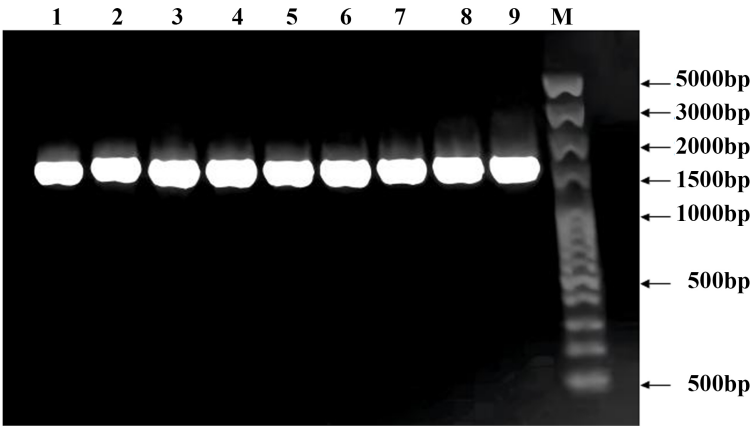


Figure 3. Electrophoretic profile of 16S rDNA fragments from plastic degrading bacteria.

图 3. 塑料降解菌的 16S rDNA 片段扩增结果

对各塑料降解菌株的 16S rDNA 片段进行测序，各序列整理后，经序列比对，在 NCBI 数据库中进行 BLAST 检索，挑选出相似度最高(99%以上)的同源序列，进行序列比对及聚类分析。各塑料降解菌及其相似序列的聚类分析结果如图 4。聚类分析结果显示，菌株 PE 3-1、PE 3-2、PE 3-5、PE 3-7、PE 4-7 和 PE 4-8 与恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)的同源性最高(99.93%)，故这 6 株菌同为恶臭假单胞菌。菌株 PE 3-10、PE 4-1 和 PE 4-5 与产吡啶金黄杆菌(*Chryseobacterium indologenes*)的同源性最高(99.93%)，因此这 3 株菌的鉴定结果为产吡啶金黄杆菌。

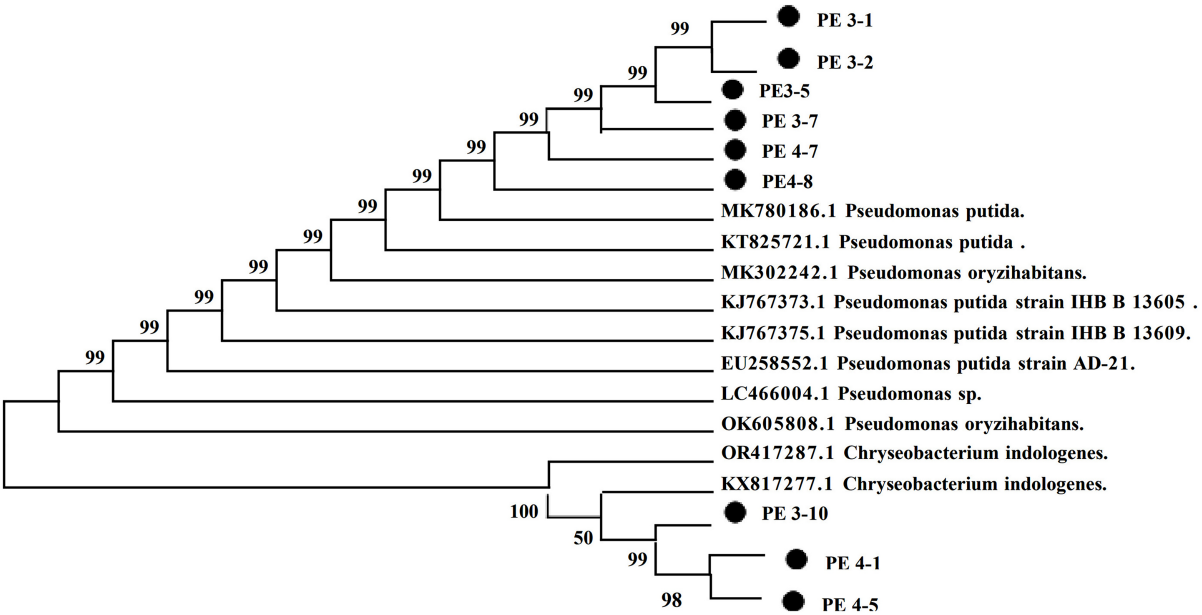


Figure 4. Cluster analysis of plastic degrading bacteria

图 4. 塑料降解菌的聚类分析

各塑料降解菌的核酸分类学鉴定结果见表 1。其中恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*) 6 株，产吡啶

金黄杆菌(*Chryseobacterium indologenes*)3 株。已报道的塑料降解菌以假单胞菌(*Pseudomonas*)居多[28] [29]，另据报道，青霉菌(*Penicillium*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)等也具有塑料降解的作用[17] [18] [27]。本研究筛选出的塑料降解菌多为恶臭假单胞菌，塑料降解能力较强，该菌属为革兰氏阴性菌[30]，是人类咽部的正常菌群。球杆状、氧化酶阴性、无动力、为专性需氧菌，最适生长温度 25℃~30℃，可产生荧光素(青脓素)，能够降解烟酸，且不会产生二次污染[31]。能够诱导棉花植株的系统抗性，提高棉花抗病性[32]；其发酵菌液产生的环二肽 cyclo (L-Pro-L-Ile)，可抑制线虫的活性[33]，还可促进双孢蘑菇生长发育[34]等。筛选出的产吡啶金黄杆菌，塑料降解能力较弱。该菌属为非发酵型革兰氏阴性菌，圆形、菌落大小 0.5~1 mm、金黄色、较透明、蛋白酶阳性，其培养物或培养物分离出的化合物可抑制线虫的生长繁殖，尤其是对松材线虫有显著抑制作用，还可高效降解废水中的有机污染物[35]，并可用于制备蛋白质谷氨酰胺酶[36]和弹性蛋白酶[37]。另外，该类菌也可高效降解羽毛角蛋白，72 h 内羽毛降解率高达 70%以上，且其菌液及其羽毛发酵液对哺乳动物无副作用[38]。

Table 1. Identification results of plastic degradation bacteria
表 1. 塑料降解菌的鉴定

引物	菌株	基因 ID	拉丁名	中文名	相似度(%)
27F/1492R	PE 3-1	MK780186.1	<i>Pseudomonas putida</i>	恶臭假单胞菌	99.93
	PE 3-2				
	PE 3-5				
	PE 3-7				
	PE 4-7	KX817277.1	<i>Chryseobacterium indologenes</i>	产吡啶金黄杆菌	99.93
	PE 4-8				
	PE 4-1				
	PE 4-5				
	PE 3-10				

4. 结论

本文以聚乙烯为唯一碳源，分离出 9 株可培养塑料降解菌株，其塑料降解率为 0.33%~4.24%，菌株 PE 3-1 的降解率最高(4.24%)。经核酸分类学鉴定有 6 株为恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)，3 株为产吡啶金黄杆菌(*Chryseobacterium indologenes*)。两类菌均有一定应用价值，且较为安全，其中，恶臭假单胞菌的塑料降解能力较强，在塑料降解方面有更大的应用潜力。

致 谢

本文受北华大学林学院大学生创新创业训练计划项目资金支持。
感谢吉林省林业生物技术工程研究中心和北华大学林学院林业生物技术创新研究平台对本课题的支持和帮助。

参考文献

[1] 杨军, 宋怡玲, 秦小燕. 聚乙烯塑料的生物降解研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 1165-1168.
[2] 王佳蕾, 霍毅欣, 杨宇. 聚乙烯塑料的微生物降解[J]. 微生物学通报, 2020, 47(10): 3329-3341.
[3] 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.

- [4] 蒋欣怡, 王书卿, 杨怡萱, 等. 土壤中可降解塑料微生物的分离和初步鉴定[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(26): 124-128.
- [5] 张李婷, 张博, 许维东, 等. 聚乙烯塑料生物降解研究进展[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1949-1962.
- [6] 毛海龙, 白俊岩, 姜虎生, 等. 可降解塑料的微生物降解研究进展[J]. 微生物学杂志, 2014, 34(4): 80-84.
- [7] 程若瑶. 微生物对塑料的降解[J]. 化工管理, 2020(5): 101-102.
- [8] 宋力, 赵晶晶, 王战勇, 等. 生物降解塑料降解技术及其前景展望[J]. 塑料, 2020, 49(5): 88-120.
- [9] 李昕玥, 刘卓苗, 薛润泽, 等. 典型塑料的生物降解及其降解机理[J]. 科学通报, 2021, 66(20): 2573-2589.
- [10] 关智慧. PE 和 PPC 地膜微生态效应评估与降解菌筛选[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [11] 段亚良. 聚乙烯微塑料降解菌的筛选和降解机理研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [12] 胡亚楠. 聚乙烯地膜降解细菌的筛选及降解性能评价[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2020.
- [13] 闵逸雯, 王小兵, 陈悦, 等. 聚乙烯农用地膜降解菌的筛选与鉴定[J]. 山东化工, 2023, 52(16): 12-14+20.
- [14] 沈梦霞. 海绵动物共附生聚乙烯微塑料降解菌的筛选及降解影响因素响应面优化[D]: [硕士学位论文]. 三亚: 海南热带海洋学院, 2023.
- [15] 干牧凡, 张妍, 时鹏, 等. 塑料的微生物降解机理研究进展[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(6): 140-155.
- [16] 陆辰霞, 刘龙, 李江华, 等. 淀粉填充聚乙烯类塑料降解微生物的筛选和降解特性[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(4): 683-687.
- [17] 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, 2023, 54(6): 858-864.
- [18] 邢祥祥, 伍杰毅, 赵鲁玉, 等. 残留聚乙烯地膜降解菌株的筛选及降解特性研究[J]. 新疆大学学报, 2023, 40(2): 231-241.
- [19] 王蕾, 惠向娟, 支慧, 等. 一株淡紫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.
- [20] 侯丽君. 不同类型塑料降解菌的筛选及降解机理初探[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020.
- [21] 刘鑫蓓. 土壤中聚乙烯与聚乙烯醇降解菌筛选及降解特性研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [22] 卢继科. 不同类型 PE 的微生物降解及其对土壤细菌群落的影响[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018.
- [23] 孙文潇, 杨帆, 侯梦宗, 等. 环境中的微塑料污染及降解[J]. 中国塑料, 2023, 37(11): 117-126.
- [24] 柴雅婷. 一株聚苯乙烯和聚乙烯塑料降解菌的筛选及其相关降解酶的功能鉴定[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [25] Hong, Z., Qiang, L., Hui, W., *et al.* (2023) Biodegradation of Polyethylene Film by the *Bacillus* sp. PELW2042 from the Guts of *Tenebrio molitor* (Mealworm larvae). *Process Biochemistry*, **130**, 236-244.
- [26] Kim, H.R., Lee, C., Shin, H., Kim, J., Jeong, M. and Choi, D. (2023) Isolation of a Polyethylene-Degrading Bacterium, *Acinetobacter* Guillouiae, Using a Novel Screening Method Based on a Redox Indicator. *Heliyon*, **9**, e15731. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15731>
- [27] Furlan, J.P.R., Lopes, R. and Stehling, E.G. (2021) Whole-Genome Sequence-Based Analysis of the *Paenibacillus* Aquistagni Strain DK1, a Polyethylene-Degrading Bacterium Isolated from Landfill. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **37**, Article No. 80. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03045-y>
- [28] Hou, L., Xi, J., Liu, J., Wang, P., Xu, T., Liu, T., *et al.* (2022) Biodegradability of Polyethylene Mulching Film by Two *Pseudomonas* Bacteria and Their Potential Degradation Mechanism. *Chemosphere*, **286**, Article 131758. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131758>
- [29] Mouafo, B.E.T., Tamsa, A.A., *et al.* (2021) Biodegradation of Polyethylene by the Bacterium *Pseudomonas Aeruginosa* in Acidic Aquatic Microcosm and Effect of the Environmental Temperature. *Environmental Challenges*, **3**, 1-24.
- [30] 郑小平, 唐薇, 尹靖琨, 等. 天女木兰组培污染菌的鉴定及多样性分析[J]. 自然科学, 2019, 7(3): 1-7.
- [31] 董亢. 一株恶臭假单胞菌菌株及其降解烟酸的应用[P]. 中国专利, CN202010970823.2. 2022-07-19.
- [32] 金利容, 许冬, 王玲, 等. 恶臭假单胞菌 HB3S-20 在棉花中的定殖及诱导抗性研究[J]. 中国生物防治学报, 2024, 40(1): 117-125.
- [33] 翟义乐. 恶臭假单胞菌 MCCC1A00316 作用线虫活性物质分离鉴定和其产生的 2-十一烷酮触杀线虫机制研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2020.

-
- [34] 王琳, 魏启舜, 周影, 等. 覆土层益生菌恶臭假单胞菌 TK3 对双孢蘑菇的促生作用[J]. 食用菌学报, 2018, 25(3): 23-29.
- [35] 李世友, 赵福强, 严弋敬. 产吡啶金黄杆菌及其应用[P]. 中国专利, 202011486523.3. 2022-07-05.
- [36] 张艳芳, 贾彩凤, 何灿, 等. 蛋白质谷氨酰胺酶产生菌的分离筛选和鉴定[J]. 食品工业科技, 2015, 36(1): 170-176.
- [37] 赵培培. 产新型弹性蛋白酶产吡啶金黄杆菌的分离鉴定及酶学性质研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- [38] 唐丹, 丁彦强, 黄玉红, 等. 产吡啶金黄杆菌 YM5 毒性相关基因及其急性经口毒性[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 289-293.