

# 可降解塑料及其微生物降解研究进展

吴佳云\*, 李茹欣\*, 陈恩祈, 卢得雨, 谢桂英, 杜星辰, 钟宇晴, 邓博晖, 成彩霞,  
廖三阳子, 黄金岚, 黄玉杰#, 曾斌#

深圳技术大学药学院, 广东 深圳

收稿日期: 2023年5月19日; 录用日期: 2023年6月19日; 发布日期: 2023年6月28日

## 摘要

为了缓解塑料制品广泛使用造成的环境污染, 人们逐渐使用可降解塑料代替传统塑料。根据后期处理方式的差异, 可降解塑料主要可分为四大类: 光降解塑料、生物降解塑料、化学降解塑料、光/氧-生物复合降解塑料。其中, 生物降解塑料的应用最为广泛。根据化学结构和性能上的不同, 目前常用的可降解塑料主要可分为聚 $\alpha$ -羟基酸类、二元酸二元醇共聚酯类、聚羟基烷酸酯类及淀粉基类。本文我们综述了近年来国内外研究者针对以上四类生物降解塑料的降解条件及机理等相关研究进展, 并整理了可降解生物塑料的主要微生物研究及种类等信息, 有助于对可降解塑料的深入认识、新型可降解塑料的研制及优质降解方法的开发。

## 关键词

塑料, 可降解塑料, 生物降解塑料, 微生物降解

# Research Progress on Biodegradable Plastics and Their Microbial Degradation

Jiayun Wu\*, Ruxin Li\*, Enqi Chen, Deyu Lu, Guiying Xie, Xingchen Du, Yuqing Zhong,  
Bohui Deng, Caixia Cheng, Sanyangzi Liao, Jinlan Huang, Yujie Huang#, Bin Zeng#

Pharmaceutical College of Shenzhen University of Technology, Shenzhen Guangdong

Received: May 19<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 19<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to alleviate the environmental pollution caused by the widespread use of plastic prod-

\*共同第一作者。

#共同通讯作者。

文章引用: 吴佳云, 李茹欣, 陈恩祈, 卢得雨, 谢桂英, 杜星辰, 钟宇晴, 邓博晖, 成彩霞, 廖三阳子, 黄金岚, 黄玉杰, 曾斌. 可降解塑料及其微生物降解研究进展[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(3): 670-678. DOI: 10.12677/aep.2023.133083

ucts, people gradually use biodegradable plastics instead of traditional plastics. According to the difference of post-processing methods, degradable plastics can be divided into four categories: photodegradation plastics, biological degradation plastics, chemical degradation plastics, light/oxygen-biological composite degradation plastics. Among them, biodegradable plastics are the most widely used. According to the different chemical structures and properties, the commonly used degradable plastics can be divided into poly- $\alpha$ -hydroxy acids, dibasic acid diol copolyesters, polyhydroxyalkanoates and starch-based plastics. In this paper, we reviewed the research progress on the degradation conditions and mechanisms of the above four types of biodegradable plastics by domestic and foreign researchers in recent years, and sorted out the main microbial research and types of biodegradable plastics, which is helpful for the in-depth understanding of biodegradable plastics, the development of new biodegradable plastics and the development of high-quality degradation methods.

## Keywords

Plastics, Degradable Plastics, Biodegradable Plastics, Microbial Degradation

Copyright © 2023 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

鉴于传统塑料的生产需求量庞大且处理结果不理想等情况,国际上普遍呼吁开发可生物降解的塑料来替代传统塑料,以此实现从源头上解决塑料污染问题的期望。因此,针对生物降解塑料的降解过程、机理及效率的研究具有非常重大的意义。

生物降解塑料(Biodegradable plastic)是可降解塑料的一种,美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)在国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)在“降解”(Degradation)定义的基础上,对生物降解塑料解释为:可在细菌、霉菌、藻类等自然界微生物作用下降解的降解性塑料。根据降解程度的不同,生物降解塑料可分为完全生物降解塑料和不完全生物降解塑料(生物破坏性塑料)。与传统塑料相比,生物降解塑料具有生物降解性和生物相容性等优点,具有广阔的开发与发展前景。

为便于研究者能快速了解近年来生物降解塑料的研究情况,本文从几类生物可降解塑料对应的种类及其降解菌种出发整理了相关研究进展,包括:聚 $\alpha$ -羟基酸类塑料、二元酸二元醇共聚酯类塑料、聚羟基烷酸酯类塑料及淀粉基类塑料等。

## 2. 现有可降解塑料的种类

常用的生物降解塑料主要可分为聚 $\alpha$ -羟基酸类、二元酸二元醇共聚酯类、聚羟基烷酸酯类及淀粉基类四大类。聚 $\alpha$ -羟基酸类主要包含聚乳酸(poly(lactic acid, PLA)、聚乙醇酸类(polyglycolic acid, PGA)等;二元酸二元醇共聚酯类主要包含聚二元醇-二元酸类(poly(butylene succinate), PBS)和聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯类(Poly(butylene terephthalate adipate), PBAT);聚羟基烷酸酯类(polyhydroxyalkanoates, PHA)中发展较好的是聚羟基丁酸酯塑料(poly- $\beta$ -hydroxybutyrate, PHB)及聚羟基丁酸戊酸酯(Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate), PHBV);而成功实现产业化生产和应用的淀粉基塑料则是由淀粉经过改性塑化生产。

目前处理可降解塑料的方式有工业堆肥、家庭堆肥、厌氧消化、焚烧等，而微生物降解塑料在实用性、降解性、效率性等方面都具有优势。相比其他，微生物降解塑料能在自然适宜的环境下较快降解塑料，从根本上解决废旧塑料的污染问题。

在可降解塑料的应用市场中，光降解塑料、光和生物降解塑料由于技术不成熟、成本高等因素导致产品类型较少，故常见的可降解塑料主要为生物降解塑料。从世界范围看，生物降解塑料中，正在开发的聚羟基丁酸酯塑料 (poly- $\beta$ -hydroxybutyrate, PHB) 及聚羟基丁酸戊酸酯 (Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate), PHBV) 是公认的最有希望的生物降解塑料之一。接下来，我们将根据生物降解塑料化学结构和性能的不同分类综述各类塑料的微生物降解研究情况。

### 3. 聚 $\alpha$ -羟基酸类塑料的微生物降解

聚  $\alpha$ -羟基酸 (poly( $\alpha$ -hydroxy acid)) 是一类具有良好可降解性和生物相容性的高分子，主要包括聚乳酸类 (polylactic acid, PLA)、聚乙醇酸类 (polyglycolic acid, PGA) 等。它可以在锌催化剂的催化下高效醇解为相应的甲酯，再经过与 LiOH 反应后即可回到  $\alpha$ -羟基酸 (合成单体五元环  $\alpha$ -内酯 (OCAs) 的原料)，从而实现塑料的闭环回收。

#### 降解聚乳酸 (PLA) 的微生物

除聚乳酸 (polylactic acid, PLA)，单体为乳酸 (Lactic acid, LA)，属于生物可降解脂肪族聚酯 (图 1)。其由于良好的机械性能、耐热性及对环境污染小，被认为是最有希望的材料。PLA 在自然界中被完全降解需要一定的时间，为提高其降解效率，研究者针对 PLA 的生物降解过程展开大量研究。目前从环境中分离出降解 PLA 的微生物大多为细菌，如淀粉菌，放线菌等。

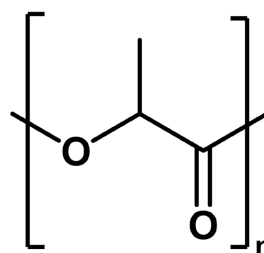


Figure 1. Chemical structural formula of PLA

图 1. PLA 的化学结构式

2013 年，林娟 [1] 等从垃圾填埋场的土壤中筛选出降解 PLA 的菌株 *Lentzea waywayandensis*，于 30°C 条件下优化培养 25 天降解率可达 84.80%，该菌种的解聚酶可断裂 PLA 分子的酯键从而产生寡聚体、二聚体和单体等，降解产物可通过半透性细菌膜，作为碳源和能源被利用后可分解成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O。Titiporn Panyachanakul [2] 等人在研究 PLA 生物降解的过程中发现，降解的过程中会产生乳酸，抑制了 PLA 的生物降解过程，通过将乳酸分离出反应体系，于 60°C、PH 8 条件下优化培养 *Actinomadura keratinilytica* strain T16-1 菌株，可将其对 PLA 的降解率提高至约 89%。2018 年，Tiparporn Bupachat [3] 等从土壤和废水污泥中分离出菌株 *Stenotrophomonas pavanii*CH1 和 *Pseudomonas geniculata*WS3，以 PLA 作底物可刺激两菌种产生蛋白酶与 PLA 降解酶，PLA 降解酶可作为水解酶吸附在 PLA 表面，进而裂解其酯键来产生低聚物和乳酸单体。实验结果表明在最适条件下，*Stenotrophomonas pavanii*CH1 (30°C, PH 7.5) 降解能力优于 *Pseudomonas geniculata*WS3 (30°C, PH 8)。表 1 总结了近年来发现的可降解 PLA 的菌株、降解条件及其降解率。

**Table 1.** Microorganisms with the ability to degrade PLA plastics**表 1.** 具有 PLA 塑料降解能力的微生物

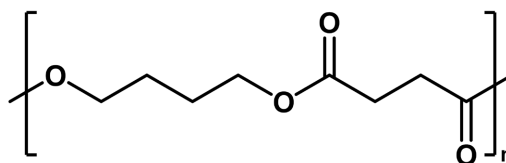
菌株名称	温度/°C	PH	实验时间	降解率	引用
<i>L. waywayandensis</i>	30	—	25d	84.80%	1
<i>Actinomadura Keratinilytica strainT16-1</i>	60	8	72h	89.00%	2
<i>Stenotrophomonas pavaniiCH1</i>	30	7.5	20d	45.00%	3
<i>Pseudomonas geniculataWS3</i>	30	8	20d	10.00%	

## 4. 二元酸二元醇共聚酯类塑料的微生物降解

共聚酯是由两种或两种以上不同的二元羧酸或酸酐与二元醇单体通过共缩聚而制得的共聚物。脂肪族二元酸与二元醇共聚酯是一类可完全生物降解的高分子材料，该类主要包括聚二元醇 - 二元酸类 (Poly(butylene succinate), PBS)、聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯 (Poly(butylene terephthalate adipate), PBAT) 等。PBS 受其自身性能限制，市场用量不及 PBAT，故目前全球生产都以 PBAT 为主。

### 4.1. 降解聚二元醇 - 二元酸类塑料(PBS)的微生物

聚二元醇 - 二元酸类 (Poly(butylene succinate), PBS)，属于热塑性全生物降解塑料，是用丁二醇和丁二酸合成的聚酯加工而成的一种新型塑料 (图 2)。其在正常储存和使用过程中性能非常稳定，只有在堆肥、水体等接触特定微生物的条件下才发生降解，埋入土壤经过 3 个月可实现完全降解。

**Figure 2.** Chemical structural formula of PBS**图 2.** PBS 的化学结构式

国内外在近年来针对 PBS 降解菌展开一系列的研究，并陆续取得一些成果，已见报道的 PBS 降解微生物有 *Aspergillus versicolor* 和 *Penicillium sp.* 等菌种，表 2 总结了近年来发现可降解 PBS 主要菌株的降解条件及降解率。

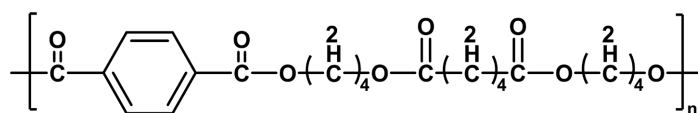
2008 年，孙琪团队 [4] 从土壤中筛选分离得到菌株 *Alemaria sp.* HJ03，鉴定为链格孢属真菌，在 25°C、pH4.0 的条件下对 PBS 薄膜降解 18 d 降解率可达 87.95%。2011 年，李凡等 [5] 通过土壤筛选和诱变得到真菌 *Aspergillus versicolor* DS0503-a，pH 5.5、28°C 为其产酶最适条件，降解率在 24 天后达到 4.5% 且依旧呈现上升趋势。后续又通过混合培养 DS0401 与 DS0601 菌株证明混菌条件有利于 PBS 的降解，且验证得出 *Aspergillus versicolor* 菌株是堆肥条件下降解 PBS 最有效的菌株。2012 年，王蕾团队 [6] 筛选出能降解 PBS 的真菌菌种 PBSZ2# 菌和 PBSZ5# 菌，研究得出，降解 PBS 的初始阶段真菌处于生长期，菌丝附着在 PBS 膜表面并侵入内部造成聚合物薄膜的崩裂；降解加速阶段中菌生长代谢加快，并产生一定量的脂肪酶作用于 PBS 酯键，此时 PBS 膜会在菌产脂肪酶的作用下降解，小分子降解产物脱离出聚合物主体；由于最后阶段降解主要发生在非晶区，故降解速率会减慢。2020 年，Urbanek, Aneta K. 等 [7] 发现南极微生物群中发现多种具有生物降解活性的细菌菌株，且部分可降解多种类型的生物塑料，例如 A-1 短小芽孢杆菌，淀粉样芽孢杆菌 TB-13，放线菌属 TF1，链霉菌属 APL3，*Laceyella sp.* TP4 和烟曲霉 NKCM1706 等，其对 PCL、PBSA 和 PBS 等塑料均具有降解活性。

**Table 2.** Microorganisms with the ability to degrade PBS plastics**表 2.** 具有 PBS 塑料降解能力的微生物

菌株名称	温度/°C	PH	实验时间	降解率
HJ10 突变株	25	5	18 d	92.23%
Aspergillus versicolor DS0503-a	28	5.5	24 d	4.50%
PBSZ2#菌	—	—	30 d	13.43%
PBSZ5#菌	—	—	30 d	13.43%

#### 4.2. 降解聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯塑料(PBAT)的微生物

聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(Poly(butylene terephthalate adipate), PBAT), 属于热塑性生物降解塑料, 是己二酸丁二醇酯和对苯二甲酸丁二醇酯的共聚物(图 3)。其有较好的延展性、断裂伸长率, 及优良的生物降解性, 是生物降解塑料研究和市场应用最好的降解材料之一。

**Figure 3.** Chemical structural formula of PBAT**图 3.** PBAT 的化学结构式

2009 年, Kasuya 等[8]从土壤中分离出可降解 PBAT 的 5 种菌株, 研究发现降解过程中 NKCM1712 等菌株可通过分泌 PBAT 水解酶与 PBAT 表面结合, 水解切断 PBAT 表面的高分子链, 生成小分子化合物, 从而实现降解。2017 年, 天津工业生物技术研究所[9]研究发现了一种能够高效降解 PBAT 塑料地膜的微生物菌群 SX, 实验证明 SX 菌群经过驯化后可以实现 13 天内对 PBAT 塑料地膜降解效率达到 99% 以上。

2018 年, Aarthy 等[10]报道了隐球酵母菌(Cryptococcus)在 25°C 下经过 216 h 可实现对 PBAT 的完全降解, 该菌可产生脂肪酶对酯键进行水解。2019 年张敏等[11]利用 LB 培养基筛选出可降解 PBAT 的寡养单胞菌 Stenotrophomonas sp. strain YCJ1, 其在偏碱性环境中对 PBAT 的平均降解率能达到 11.6%, 且可分泌出脂肪酶攻击 PBAT 的酯键, 使高分子断裂成小分子链。2020 年, 林雁冰、刘佳茜等人先后发现 N3-2 菌种[12]和 N1-2 菌种[13]可通过降低膜片疏水性和塑料表面引入极性官能团的方式提高 PBAT 塑料膜的菌株附着率来破坏膜结构, 并分别使 PBAT 地膜失重率达到  $6.538\% \pm 0.086\%$  和  $6.489\% \pm 0.006\%$ 。表 3 中总结了近年来发现的可降解 PBAT 的菌株、降解条件及其降解率。

**Table 3.** Microorganisms with the ability to degrade PBAT plastics**表 3.** 具有 PBAT 塑料降解能力的微生物

菌株名称	温度/°C	PH	实验时间	降解率
NKCM1712	—	—	10 d	8.40%
NKCM2511	—	—	10 d	1.40%
NKCM2512	—	—	10 d	1.20%
微生物菌群 SX	37	7.6-8.0	13 d	>99%
Cryptococcus	25	—	216 h	100%
Stenotrophomonas sp. strain YCJ1	37	7.2-8.2	5 d	11.60%
N3-2 菌种	28	7	56 d	6.538
N1-2 菌种	28	7	56 d	6.489

## 5. 聚羟基烷酸酯类塑料的微生物降解

聚羟基烷酸酯类(polyhydroxyalkanoates, PHA)塑料是一种新型的可完全生物降解的热塑性塑料, 主要包括聚- $\beta$ -羟丁酸(poly- $\beta$ -hydroxybutyrate, PHB)及聚羟基丁酸戊酸酯(Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate, PHBV)等。由于 PHA 的生物降解性及生物相容性, 其在医药领域具有极为广阔的应用前景。

### 5.1. 降解聚- $\beta$ -羟丁酸塑料(PHB)的微生物

聚- $\beta$ -羟丁酸(poly- $\beta$ -hydroxybutyrate, PHB)是目前通用塑料中的一种环保型的替代产品(图 4)。PHB 可被完全降解, 降解产物对环境无毒害, 且其他塑料相比降解速度更快。目前从环境中分离出的 PHB 降解菌大多为细菌和真菌, 包括青霉菌、假单胞菌、放线菌等, 不同菌种对 PHB 降解速率也不同。

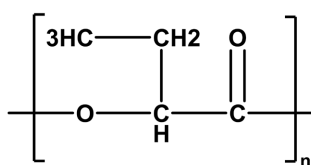


Figure 4. Chemical structural formula of PHB

图 4. PHB 的化学结构式

在 20 世纪 60 年代, PHB 生物降解的研究工作开始陆续展开。2002 年, 陈珊等[14]从污泥中分离出一株具有降解 PHB 能力的青霉菌, 编号命名为 DS9701, 为国内 PHB 生物降解特性研究及应用奠定了基础。2007 年, 赵洪霞[15]在对 DS9701-04 菌株的研究中发现, 酶降解 PHB 的主要产物为 PHB 单体或二聚体, 单体进入细菌体内可被分解, 此发现为重新利用化学合成方法大规模生产 PHB 鉴定了基础。PHB 降解过程较为复杂: 首先, 细菌分泌胞内和胞外解聚酶开始降解 PHB 多聚体, PHB 非晶部分开始降解后, 结晶部分形成非晶过渡层, 直至最终全部降解为  $\beta$ -3 羟基丁酸单体、二聚体。该单体很小且具有水溶性, 可被动运输通过细胞壁、膜, 参与脂肪酸  $\beta$ -氧化和三羧酸循环(TCA)过程。不同条件下的产物不同, 有氧条件下, 生成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ; 在缺氧条件下, 生成甲烷, 无对环境有害物质生成。

PHB 微生物降解的早期研究中, 菌落主要来源于生活污水、堆肥等。通常在高温条件下微生物降解塑料的效率更高, 此符合市场的需求, 且存在着巨大的经济价值, 故寻找新的嗜热菌成为了研究热点。2012 年, Don 等[16]从台湾不同环境中分离出 341 种具有降解能力的嗜热放线菌, 其中降解 PHB 能力最强的菌株为孟加拉链霉菌 77T-4, 该菌落可分泌出一种新型的 PHB 解聚酶, 对进一步研究嗜热性链霉菌提供了基础。表 4 中总结了近年来发现的可降解 PHB 的菌株、降解条件及其降解率。

Table 4. Microorganisms with the ability to degrade PHB plastics

表 4. 具有 PHB 塑料降解能力的微生物

菌株名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$	PH	实验时间	降解率
菌株 DS9701	28	6.8	23 h	9.40%
青霉菌属 DS9701-04	30 $^{\circ}\text{C}$	4.75	9 d	近 100%
孟加拉链霉菌 77T-4	45 $^{\circ}\text{C}$	—	18 h	95%

### 5.2. 降解聚羟基丁酸戊酸酯塑料的微生物

聚羟基丁酸戊酸酯(Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate), PHBV), 是 3-羟基丁酸酯和 3-羟基

戊酸酯的共聚物(图 5), 具有生物可降解、资源可再生、生物相容性等多种优良特性。自然条件下 PHBV 膜在土壤中的降解速率比在水中快, PHBV 膜完全降解最少需要几个月的时间。目前 PHBV 的降解研究中, 多数以青霉菌、食酸菌属、门多萨假单胞菌属等分泌的胞外解聚酶为主, 但关于 PHBV 的胞内解聚降解相关报道不多。

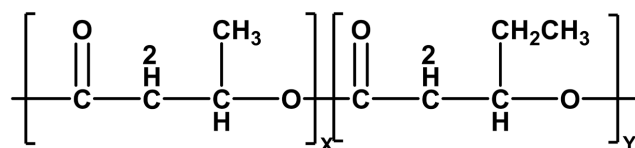


Figure 5. Chemical structural formula of PHBV

图 5. PHBV 的化学结构式

1992 年, Luzier WD [17]在 PHBV 降解机理研究中发现 PHBV 胞外解聚酶, 可使 PHBV 解聚并降解为 3-羟基丁酸和 3-羟基戊酸单体, 其进入细胞内参与  $\beta$ -氧化和三羧酸循环代谢, 有氧条件下产生  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 厌氧条件下产生  $\text{CH}_4$ 。2010 年, 冯夫妮[18]等对门多萨假单胞菌 FFN0701 进行研究, 发现 PHBV 膜在 12~36 h 失重率不高, 48 h 后加速, 于 144 h 可完全降解。该团队分离并纯化门多萨假单胞菌 FFN0710 的胞外解聚酶, 为其工业化的实行打下基础。2020 年, Satti SM 等[19]筛选出具有强降解能力的真菌 *Penicillium oxalicum* SS2, 在  $40^\circ\text{C}$ , pH 5.0 的条件下, 该菌株 36 h 内就可使 PHBV (0.3%)乳液澄清, 在土壤中 48h 内对 PHBV 膜(50 mg)降解率几乎达 100%, 7 天可完全降解, 无颗粒物残留, 对环境无污染。表 5 中总结了近年来发现的可降解 PBAT 的菌株、降解条件及其降解率。

Table 5. Microorganisms with the ability to degrade PHBV plastics

表 5. 具有 PHBV 塑料降解能力的微生物

菌株名称	温度/ $^\circ\text{C}$	PH	实验时间	降解率
<i>Ralstonia pickettii</i> T1	37	7.5	—	—
<i>Acidovorax</i> sp.TP4	30	8	—	—
<i>Pseudomonas mendocina</i> FFN0701	10~50	8~9.5	—	—
<i>Penicillium oxalicum</i> SS2	15~60	3.0~8.0	36~168 h	100%

## 6. 淀粉基塑料的微生物降解

淀粉是一种天然高分子聚合物(图 6), 其被降解后会以  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的形式回归自然。淀粉基塑料是利用化学应对淀粉进行化学改性, 把原淀粉变成热塑性淀粉。淀粉基塑料已被广泛应用于包装材料、一次性餐具和薄膜等生活用品方面。据报道, 目前对淀粉基塑料的降解研究已发现多种降解效果较佳的菌种。

2000 年, R. P. Wool 等[20]对微生物降解聚乙烯-淀粉(PE-S)复合材料进行研究, 发现复合材料降解的可接近性取决于材料中的淀粉浓度、淀粉颗粒的膜内分布、分形微观结构、降解时间及微生物降解复合材料中淀粉的生物过程, 植物纤维淀粉餐盒在染菌培养的情况下有更明显的降解效果。2009 年, 郭安福等[21]在模拟清洁环境下植物纤维淀粉餐盒被微生物分解的情况实验中, 选择黑曲霉、土曲霉、绿色木霉、出芽短梗霉、绳状青霉于培养基中混合培养, 研究发现该混合菌落可高效降解植物纤维淀粉餐盒, 降解率高达 41.59%, 且材料的大小对菌种降解能力基本无影响。2021 年, 齐艳杰等[22]针对降解机理研究得出, 生物率先通过微生物吞噬淀粉基塑料中所含的淀粉来增加塑料的比表面积, 而后分泌的酶结合

材料活性位点可降低聚合物强度。添加自氧化剂后其可与土壤中的金属盐类发生反应，通过切断聚合物的分子链来增加比表面积，提高断键速度，从而进一步被微生物分解。表 6 中总结了近年来发现的可降解淀粉基塑料的菌株、降解条件及其降解率。

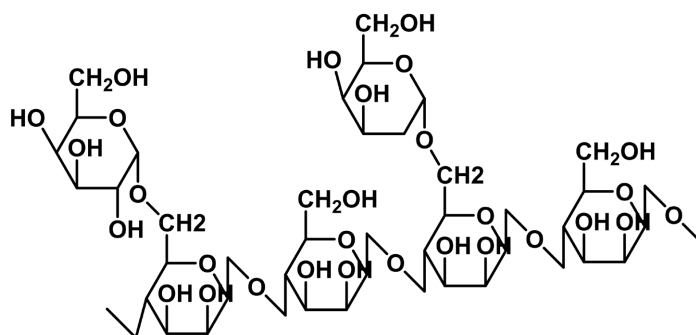


Figure 6. Chemical structural formula of starch  
图 6. 淀粉的化学结构式

Table 6. Microorganisms with the ability to degrade starch based plastics  
表 6. 具有淀粉基塑料降解能力的微生物

菌株名称	温度/°C	PH	实验时间	降解率
大肠杆菌	21~25	—	30 d	51.24%
黑曲霉、土曲霉、绿色木霉、出牙短梗霉、绳状青霉混合菌落	28~30	—	28 d	41.59%

## 7. 总结

本文所综述的可降解塑料及其相关微生物的主要研究概括了近 20 年世界各国研究者在可降解塑料及其微生物中的研究成果。各国研究者通过研究发现，筛选出在特定条件下对特定可降解塑料有较高降解率的菌种。这些研究对于未来的可降解研究来说有建设性的意义。

## 8. 展望

目前，我国塑料制品需求量日益增加，其处理时间长、难度大，迫切需要一种可以高效处理塑料的技术，生物可降解塑料因其在一定条件下可被快速降解并对环境友好而饱受关注。目前国内生物降解塑料仅有 PLA, PPC, PBS 三类的生产技术相对成熟，其余生物降解塑料还需进一步改进来顺应市场需求。生物可降解塑料种类繁多，降解环境多变，降解条件复杂，影响因素众多，不同条件下的降解率也不同。针对降解相关的研究大多停留在实验室开发阶段，无法有效研究自然状态下的降解效能。我们系统地归纳总结了生物可降解塑料在不同环境中的降解信息，期望为此后微生物降解研究的发展提供便利。

掌握大量生物可降解塑料的降解规律及特点之后，我们下一步将会探究如何在保证较高生物可降解性能的前提下对高效降解菌进行筛选、改造和培养以及不同材质的生物可降解塑料产品的研究和开发，以便于提高生物可降解塑料产品的普适性。未来我们也将重点关注生物可降解塑料的降解机理研究，采用生物强化、预处理等措施来突破其降解瓶颈，为实现生物可降解塑料的快速彻底降解找寻更多出路。

## 基金项目

广东省科技创新战略专项资金立项项目；项目编号：pdjh2021b0447。



## 参考文献

- [1] 林娟. 聚乳酸降解菌的筛选及其降解过程优化与解析[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2013.
- [2] Panyachanakul, T., Sorachart, B., Lumyong, S., *et al.* (2019) Development of Biodegradation Process for Poly(DL-Lactic Acid) Degradation by Crude Enzyme Produced by *Actinomadura keratinilytica* Strain T16-1. *Electronic Journal of Biotechnology*, **40**, 52-57. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2019.04.005>
- [3] Malik, A.S., Boyko, O., Atkar, N. and Young, W.F. (2001) A Comparative Study of MR Imaging Profile of Titanium Pedicle Screws. *Acta Radiologica*, **42**, 291-293. <https://doi.org/10.1080/028418501127346846>
- [4] 竺可桢. 物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1973: 1-3.
- [5] Wit, E. and McClure, J. (2004) *Statistics for Microarrays: Design, Analysis, and Inference*. 5th Edition, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 5-18.
- [6] 程根伟. 1998年长江洪水的成因与减灾对策[M]//许厚泽, 赵其国. 长江流域洪涝灾害与科技对策. 北京: 科学出版社, 1999: 32-36.
- [7] 贾冬琴, 柯平. 面向数学素养的高校图书馆数字服务系统研究[C]//中国图书馆学会. 中国图书馆学会年会论文集: 2011年卷. 北京: 国家图书馆出版社, 2011: 45-52.
- [8] 张竹生. 微分半动力系统的不变集[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京大学, 1983.
- [9] Giambastiani, B.M.S. (2007) *Evoluzione Idrologica ed Idrogeologica della Pineta di San Vitale (Ravenna)*. Ph.D. Thesis, Bologna University, Bologna.
- [10] 姜锡洲. 一种温热外敷药制备方法[P]. 中国专利, 881056073. 1989-07-26.
- [11] 全国文献工作标准化技术委员会第六分委员会. CB6447-S6 文摘编写规则[S]. 北京: 标准出版社, 1986.
- [12] 张大伟. 页岩气: 打开中国能源勘探开发新局面[J]. 资源导刊, 2012(5): 2.
- [13] Wikipedia (2013) Quantum Entanglement. [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_entanglement](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_entanglement)
- [14] 陈珊, 刘东波, 夏红梅, 等. 降解聚  $\beta$ -羟基丁酸酯的真菌的研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2002, 34(3): 98-98.
- [15] 赵洪霞. DS9701-04 菌株对 PHB 的降解及其 PHB 解聚酶酶学性质的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2007.
- [16] Hsu, K.-J., Tseng, M., Don, T.-M. and Yang, M.-K. (2012) Biodegradation of Poly( $\beta$ -Hydroxybutyrate) by a Novel Isolate of *Streptomyces bangladeshensis* 77T-4. *Botanical Studies*, **53**, 307-313.
- [17] Luzier, W.D. (1992) Materials Derived from Biomass/Biodegradable Materials. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **89**, 839-842. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.3.839>
- [18] 冯夫妮. PHBV 胞外解聚酶的纯化及酶学性质的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- [19] Satti, S.M., *et al.* (2020) Biodegradation of Poly(3-Hydroxybutyrate) and Poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyvalerate) by Newly Isolated *Penicillium oxalicum* SS2 in Soil Microcosms and Partial Characterization of Extracellular Depolymerase. *Current Microbiology*, **77**, 1622-1636. <https://doi.org/10.1007/s00284-020-01968-7>
- [20] Wool, R.P., Raghavan, D., Wagner, G.C. and Billieux, S. (2000) Biodegradation Dynamics of Polymer-Starch Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, **77**, 1643-1657. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20000822\)77:8<1643::AID-APP1>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20000822)77:8<1643::AID-APP1>3.0.CO;2-8)
- [21] 郭安福, 李剑峰, 李方义, 魏宝坤. 植物纤维淀粉餐盒的降解性能研究[J]. 功能材料, 2009, 40(11): 1929-1932.
- [22] 齐艳杰, 吴霞, 周瑞, 柳傲雪. 淀粉基可降解塑料的应用及发展趋势[J]. 化工管理, 2021(29): 27-28.