绿色包装材料聚乳酸的降解行为研究进展

潘坤鹏[1],张冬霞[2]

(1.郑州信息工程职业学院,河南 郑州 450100;2.江西工程学院智能制造产业学院,江西 新余 338000)

摘　要: 聚乳酸(PLA)作为应对白色污染的绿色包装材料,其降解行为及环境价值备受关注。文章综述PLA以水解为主的降解机理,表明其降解过程受自身结构与外界环境等多种因素影响。PLA的降解由其主链酯键的水解活性、结晶区与无定形区的比例(由单体立构规整性决定)、分子量及其分布共同决定。PLA的降解涉及水解、微生物酶解、光降解及热降解等多种机制。采用共聚、共混等改性手段能够有效干预降解速率。PLA在工业堆肥条件下能够实现降解循环,最终完全矿化,不产生永久性微塑料。PLA在包装领域具有显著的环保潜力,但其降解效率的可控性与后端处理体系的适配性仍是未来研究与实践的重点方向。

关键词: 聚乳酸;绿色包装;降解机理

中图分类号: TQ322　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1005-3360(2026)09-0210-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.037

Research Progress on Degradation Behavior of Green Packaging Material Polylactic Acid

PAN Kunpeng[1], ZHANG Dongxia[2]

(1. Zhengzhou Information Engineering Vocational College, Zhengzhou 450100, China; 2. College of Intelligent Manufacturing Industry, Jiangxi University of Engineering, Xinyu 338000, China)

Abstract: Polylactic acid (PLA), as a green packaging material to address white pollution, has attracted considerable attention regarding its degradation behavior and environmental value. The article reviews the degradation mechanisms of PLA, which are dominated by hydrolysis, and indicates that the degradation process is influenced by multiple factors, including its own structure and external environmental conditions. The degradation of PLA is governed by three key factors: The hydrolytic reactivity of the ester bonds in the polymer backbone, the crystalline-to-amorphous ratio (dictated by monomer stereoregularity), and the molecular weight and its distribution. The degradation of PLA involves multiple mechanisms, including hydrolysis, microbial enzymatic degradation, photodegradation, and thermal degradation. Modification approaches such as copolymerization and blending can effectively intervene in the degradation rate. PLA can achieve a degradation cycle under industrial composting conditions and eventually undergo complete mineralization without generating permanent microplastics. PLA has significant environmental potential in the packaging field, but the controllability of its degradation efficiency and the compatibility with backend treatment systems remain key directions for future research and practice.

Keywords: PLA; Green packaging; Degradation mechanism

全球塑料污染问题日益严峻,开发可生物降解的绿色包装材料成为当务之急[1]。聚乳酸(PLA)来源于玉米、木薯等植物可再生资源,具备良好的力学性能、气体阻隔性、光学与表面特性[2],在自然环境中能够降解[3],因此在食品包装、日用消费品包装等领域展现出广阔的应用前景[4]。PLA的可降解特性是实现其绿色价值的关键[5]。在自然环境中,PLA降解是一个相对缓慢的过程,降解效率受到材料自身属性、降解环境以及降解机理等

收稿日期Submitted date 2025-10-15;修回日期Revised date 2025-11-10;录用日期Accepted date 2025-12-08

基金项目:江西省科技项目(GJJ2203015)

联系人,pankunpeng678@163.com

引用本文:潘坤鹏,张冬霞.绿色包装材料聚乳酸的降解行为研究进展[J].塑料科技,2026,54(9):210-214.

Citation: PAN K P, ZHANG D X. Research progress on degradation behavior of green packaging material polylactic acid[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 210-214.

多重因素的影响[6]。科学系统地研究PLA的降解行为，对准确评估其环境价值、指导其正确使用与废弃处理至关重要。

本文概述PLA的合成与结构特征，系统阐述PLA以水解为核心、多机制协同的降解机理，剖析材料自身性质与外部环境的关键影响因素，提出采用共聚改性、填料复合及添加促降解剂等策略优化PLA降解性能，评估PLA在工业堆肥、土壤、淡水及海洋等不同环境下的降解效果。

1 PLA的合成与结构特征

PLA的合成主要包括直接缩聚法和开环聚合法两种[7]。直接缩聚法工艺简单，但难以获得高分子量，导致产品力学性能较差；工业上主要采用开环聚合法，即先将乳酸环化为丙交酯，再催化开环聚合[8]。

PLA的降解从根本上由其结构特征决定。图1为PLA的化学结构。PLA分子主链中的酯键(—CO—O—)具有较高的水解反应活性，为材料降解提供必要的化学基础。在立体构型与聚集态结构层面，单体的立构规整性直接调控材料的结晶行为。采用高纯度*L*-丙交酯形成的聚左旋乳酸(PLLA)链规整排列，易形成结晶区。采用*D*-丙交酯则会破坏PLA的规整性，形成无定形区。结晶区与无定形区的比例构成了PLA降解的微观结构基础[9]。此外，分子量及其分布可直接影响聚合物链的长度、构象和物理缠结密度[10]。

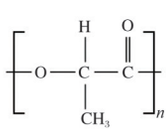


图1 PLA的化学结构

Fig.1 Chemical structure of PLA

2 PLA的降解机理与影响因素

2.1 PLA的降解机理

PLA的降解涉及多种机制，主要包括水解、微生物酶解、光降解及热降解4种方式[11]。

水解是PLA化学降解的主导方式，其核心化学本质是水分子攻击并断裂主链酯键。图2为PLA的水解机理[12]。PLA的主链上的酯键是潜在的断裂点。水解过程始于水分子向材料内部扩散渗入非晶区，为后续的水解反应做好准备。水分子持续进攻酯键，引发水解反应R—CO—O—R+H_2O→R—COOH+R—OH，这是PLA降解的起点。随着分子量的显著下降，材料内部逐渐松散，但外形仍基本得以保持。当分子量降至临界值后，材料的力学性能急剧下降，易碎裂。碎片进一步水解为乳酸等能够被微生物代谢的小分子，最终分解为CO_2和H_2O[13]。这一过程不依赖生物酶，可以在任何有水的环境中发生。PLA的水解具有一个显著特征——自催化效应。降解产生的羧基端基会降低材料局部的pH值，增强材料内部的酸性，加速酯键断裂，导致降解呈自加速趋势，形成“由内向外”的崩解模式。降解速率强烈依赖材料凝聚态结构，松散的无定形区易被水渗透而率先降解；致密的结晶区则阻碍水分子侵入，表现出较强的抗水解性[14]。

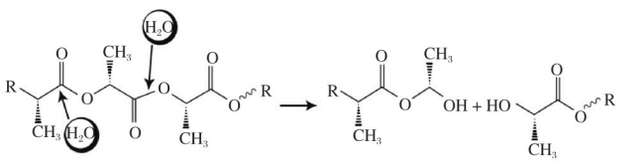


图2 PLA的水解机理

Fig.2 Hydrolysis mechanism of PLA

微生物酶解在PLA降解后期起到关键的推动作用，是实现完全生物矿化的核心。图3为PLA的微生物降解与物质循环[15]。在水解基础上，微生物分泌的蛋白酶和脂肪酶能高效、专一地催化断裂PLA酯键，显著加速低聚物与单体的最终分解[16]。由于酶分子尺寸较大，难以渗入材料内部，酶解主要表现为“表面侵蚀”模式，即从外向内逐层分解。微生物先附着于PLA表面并形成微生物膜，分泌胞外酶进行解聚，产生寡聚体。微生物吸收寡聚体，将其代谢为无机物。酶解作用的有效性高度依赖其所处的环境条件[17]。在有氧条件下，PLA可彻底转化为CO_2、H_2O和生物质；在厌氧环境中，则可能产生甲烷。

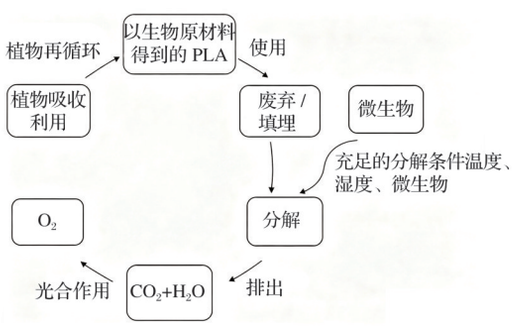


图3 PLA的微生物降解与物质循环

Fig.3 Microbial degradation and material cycle of PLA

PLA在紫外线作用下能够生成高活性自由基，触发光氧化链式反应，导致主链断裂、分子量显著下降及材料结构破坏[18]。

热量作为关键驱动因素，能够提高体系能量，显著加速水解与酶解等过程的动力学速率。PLA中残留的水分在加热条件下会发生水解反应。高温会进一步引发氧化降解，通过自由基链反应促使分子链发生断裂或交联。此外，高温还会引发分子内的酯交换反应[19]。

光降解主要作用于材料表面，通过引发氧化与链断裂产生微裂纹，为水及微生物的侵入创造通道，促进由表及里的降解。

PLA材料内部的自催化水解持续降低分子量并引发本体脆化，增大比表面积，进一步加速光、热及微生物的侵蚀。这几种机制在不同环境下主次地位不同，但存在协同

作用。

2.2 PLA降解的影响因素

PLA的降解速率受材料自身性质和外部环境的双重影响，这些因素的复杂性是导致PLA在不同环境中降解行为差异明显的根本原因。

PLA材料的自身性质能够直接决定其化学结构的稳定性及对水解的敏感性。聚合物的初始分子量越高，需要断裂的酯键就越多，降解时间则越长；分子量分布影响降解均匀性。在立体化学结构方面，*L*-乳酸单元比例越高，分子链规整性越好，结晶度越高，降解越慢；*L*-乳酸单元比例较低则使材料以无定形为主，从而显著提升水解速率。无定形区利于水分渗透和链断裂，结晶区则像物理交联点一样阻碍水解，因此高结晶度与大尺寸球晶会延缓降解[20]。材料的物理形态(如薄膜、纤维或多孔泡沫)影响其与环境接触的比表面积，比表面积越大，降解越快。通过添加亲水或碱性填料或通过共聚改性破坏链规整性，也能够主动调节PLA的降解性能[21]。

外部环境是PLA降解的重要驱动条件，直接影响其降解速率与路径。温度在其中起主导作用，高温能够显著提升水解速率与微生物活性。水分作为水解反应物，是降解发生的基本前提，湿度或液态水的存在不可或缺。环境的pH值也具有催化作用，强酸、强碱条件均可以加速水解，而PLA自身水解产生的酸性产物还会引发内部自催化。氧气条件可影响PLA代谢产物类型。机械应力可能使PLA产生微裂纹，增大介质接触面积，间接加速降解过程[22]。

3 PLA降解性能优化策略

3.1 共聚改性调控分子结构

共聚改性是从分子结构层面优化PLA降解性能的根本方法。该方法引入对水、热以及酶等环境因素更为敏感的化学基团或链段到PLA主链，改变PLA高分子链的规整排列，降低材料的结晶能力。分子链堆叠变得松散，能够增加自由体积，使水分子更容易扩散至材料内部，进而大幅提升水解效率。这种方法的优势在于能够从分子层面精准设计降解位点，在不显著影响材料力学性能的前提下，改变酯键的密度、分布及化学环境，从而影响水解速率，实现降解性能的可控调节。此外，引入的官能团还可能为微生物攻击提供更多的识别位点，进一步提高生物的降解效率[23]。

通过分子设计调控PLA的聚集态结构是增强其降解性能的有效途径。白麓恺[24]将四苯乙烯(TPE)衍生物与PLA共混。结果表明：TPE可选择性地分布于聚合物相中，改变结晶度与微观相形态；退火处理能够提升结晶度并增强聚集诱导发光。赵吉丽等[25]在PLA中引入柔性聚酯链段(PDEGA)与增韧剂(MBS)进行共聚改性，显著降低了PLA的玻璃化转变温度，使其晶体尺寸细化，边界模糊。这种结构增加了非晶区比例，为水和酶分子创造更多的渗透通道，从而形成多维降解路径，在不损害力学性能的前提下，有效优化PLA的降解性。

3.2 天然填料复合增强降解性能

在PLA中加入天然填料能够改变复合材料的多层次结构，为水分和微生物创造渗透通道，从而加速降解过程[26]。天然填料通常选用富含纤维素、半纤维素等亲水组分。与PLA共混后，天然填料在潮湿环境中会率先吸水膨胀或降解，在PLA基体中产生微孔和裂纹，为水分侵入提供通道，也为微生物的附着和生长提供落脚点[27]。天然填料在PLA中建立无数个降解附着点，从内部加速PLA整体的崩解和生物降解过程。

吴静怡等[28]制备PLA/玉米淀粉复合材料。结果表明：淀粉作为成核剂能够使结晶度从5.3%上升至15.4%；添加淀粉后，PLA中增多的晶体界面为水分渗透和酯键水解提供起点，预设降解路径。康佳豪等[29]利用γ-甲基丙烯酰氧基丙基三甲氧基硅烷(KH570)改性小麦秸秆纤维素，制备PLA/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)薄膜。结果表明：复合材料的内部形成均匀丝状结构，该结构显著增加了材料比表面积。降解过程中丝状结构优先消失，成为微生物攻击前沿，引导降解由表及里发生。

3.3 促降解剂改变材料内部结构

在不大幅改变PLA加工性能和力学性能的前提下，添加促降解剂能够缩短降解诱导期，提高整体降解速率。理想的促降解剂应具备良好的催化活性、分散性、环境友好性及与加工工艺的兼容性。这些促降解剂如同“催化剂”或“造孔剂”，能够改变材料内部的微化学环境或物理结构，主动激发和加快PLA最初的水解步骤[30]。

令狐昌开等[31]使用氯化铁作为促降解剂，将PLA置于碱液中浸泡8 d，材料的质量损失率从4.67%提高至88.97%。为了避免在加工过程中分子链发生过度降解，采用扩链剂亚磷酸三苯酯(TPP)进行调控，PLA的拉伸强度达到43.78 MPa，降解率达到65.76%。AZARIAN等[32]采用生物源球霰石$CaCO_3$-Ag杂化微球作为功能性添加剂，经熔融共混加入PLA，在保留材料可降解性的同时，明显改善力学性能和阻隔性能。

4 PLA在不同环境中的降解效果

4.1 工业堆肥

在温度为58~70 ℃、相对湿度为55%~70%环境下对PLA进行工业堆肥降解，嗜热微生物的活性被激活，PLA材料可在半年内降解，产物为环境无害的CO_2、H_2O和腐殖质[33]。

PLA在工业堆肥条件下的降解过程较好地诠释了循环经济理念。第一，废弃的PLA制品经过工业堆肥处理，能够转化为富含营养的腐殖质，这些堆肥产物可以回归农田，促进作物生长，构建从包装到农业的有机物质闭环[34]。第二，该方式能够有效避免传统填埋工艺可能导致的甲烷排放与渗滤液污染，同时取代化石原料制品的焚烧处理，

从而显著降低包装全生命周期的碳排放量。第三，乳酸单体的回收再利用更是实现了资源闭环循环[35]。

4.2 土壤掩埋与家庭堆肥

当PLA包装进入填埋场或条件远逊于工业堆肥的家庭堆肥系统时，其降解行为和绿色价值会发生显著变化。土壤掩埋环境通常具有厌氧、低温、低微生物多样性和缺乏主动管理的特点[36]。家庭堆肥虽然是有氧环境，但其堆肥温度波动大，很难长期维持在50 ℃以上，微生物群落和翻动频率远不如工业系统稳定高效。PLA的水解过程变得缓慢，分子链断裂所需时间较长。

PLA在自然环境下可降解为CO_2、H_2O和有机质，避免在食物链中累积[37]。在家庭堆肥中，若能够采用改良技术，如添加特定菌剂、优化堆体大小、适当提升堆肥温度等，PLA仍能在一到两年内逐步降解，其产物可以融入堆肥，改善土壤结构[38]。PRATAMA等[39]采用紫外辐照与亚临界水萃取相结合的预处理工艺，显著降低了PLA分子量，加速了后续生物降解过程。GUICHERD等[40]研究发现，采用酶嵌入技术将特异性降解酶嵌入PLA基质，可显著提高PLA在堆肥条件下的降解速度。上述研究为分散式处理包装废弃物提供可能，增强了材料的环境适应性。

4.3 淡水与海洋

PLA包装在淡水与海洋等自然水体中能够缓慢降解。与受控的堆肥系统相比，天然水体普遍具有温度偏低、pH值接近中性、微生物群落稀疏且分布分散等特点，不具备集中降解的有利条件。在这些实际环境因素的制约下，PLA的水解及生物降解进程十分缓慢[41]。因此，若PLA制品进入水域，可能对水生生物带来缠绕或误食等实体性风险[42]。但是，PLA相较于传统塑料仍具备关键的绿色价值。PLA的化学结构决定其分子链最终会断裂成可以被微生物利用的小分子物质，并彻底矿化[43]。从长远角度看，PLA不会在环境中永久积累，利于生态系统恢复。

5 结论

作为生物基可降解包装材料，PLA的降解行为由分子结构决定。主链酯键的高水解活性提供化学基础，而链段立构规整性通过调控结晶度影响降解速率，无定形区优先水解，结晶区则表现出抗水解性。降解以水解为主导，具有自催化特征，降解产生的羧基端基加速酯键断裂，形成由内向外的崩解模式；酶解则以表面侵蚀方式推动最终矿化。材料自身性质与外部环境共同决定实际降解速率。通过共聚改性、天然填料复合及促降解剂添加等策略，可从分子链结构、微观形貌及催化路径3个层面有效缩短降解诱导期。PLA在工业堆肥条件下可降解，实现有机质闭环循环。在土壤、家庭堆肥及自然水体中降解速率虽显著减缓，但其最大绿色价值在于最终完全矿化，不产生永久性微塑料。PLA环保效益的充分发挥，高度依赖完善的废弃物分类与处理体系。未来，亟须构建从材料创新到系统管理的综合治理路径。

参考文献

[1] 韩石磊, 张付申. 废弃生物可降解塑料的处理方法与发展趋势[J]. 中国环境科学, 2023, 43(12): 6445-6464.

[2] LI T, SUN H Y, WU B Y, et al. High-performance polylactic acid composites reinforced by artificially cultured diatom frustules[J]. Materials & Design, 2020, 195: 109003.

[3] KANSAL D, HAMDANI S S, PING R Q, et al. Food-safe chitosan-zein dual-layer coating for water- and oil-repellent paper substrates[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(17): 6887-6897.

[4] 王达, 任永琳, 刘合, 等. 聚乳酸物理化学改性研究最新进展[J]. 现代化工, 2023, 43(1): 57-61.

[5] HUA M, JIANG C M, ZAHID H M, et al. High-performance biodegradable polylactide films with nano-reinforced stereo-complex polylactide and layered crystalline structures for eco-friendly packaging applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 313: 144165.

[6] 王战勇, 王玉俊, 张婉婷, 等. 聚乳酸的生物降解[J]. 微生物学杂志, 2023, 43(2): 1-9.

[7] 李红强, 段鹏, 贺宝玉. 可降解聚乳酸的合成及弹性体增韧改性[J]. 化工管理, 2025(18): 134-137.

[8] LITTLE A, WEMYSS A M, HADDLETON D M, et al. Synthesis of poly(lactic acid-*co*-glycolic acid) copolymers with high glycolide ratio by ring-opening polymerisation[J]. Polymers, 2021, 13(15): 2458.

[9] 裴媛媛, 文韬. 基于丙交酯衍生物的聚酯高分子的合成研究进展[J]. 高分子通报, 2022, 35(1): 32-45.

[10] YANG T, LU R Y, YAN J Y, et al. Influence of molecular weight on the thermal degradation of poly(lactic acid): A crystallization perspective [J]. Polymer, 2025, 335: 128839.

[11] 刘晓刚, 吴盛恩, 王庆飞, 等. 生物质塑料材料降解方式及效果的研究进展[J]. 中国造纸, 2024, 43(9): 56-69.

[12] LI J Y, LIU H H, PAUL CHEN J. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection[J]. Water Research, 2018, 137: 362-374.

[13] 任永琳, 王达, 刘合, 等. 聚乳酸水解机理及水解性能改进方法研究进展[J]. 石油化工, 2022, 51(9): 1129-1136.

[14] 张宏才, 肖翔, 郭志强. 初始指标及聚碳化二亚胺对PLA水解特性的影响研究[J]. 蚌埠学院学报, 2025, 14(2): 19-25.

[15] 何晓莉, 龚芮, 杨秀英, 等. 聚乳酸降解行为和抗老化改性研究进展[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6): 166-171.

[16] ECONOMOU C N, BERTOZZI S M, NARDI M, et al. Enhanced biodegradation of polylactic acid by Aspergillus oryzae lipase: Toward sustainable plastic end-of-life solutions[J]. Bioresource Technology, 2025, 434: 132807.

[17] 张艳, 解清园. 基于高分子聚乳酸结构变化的生物降解技术研究[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2023, 23(3): 33-38.

[18] 陈静, 邱慈波, 高艳飞. 可降解聚乳酸塑料在包装工业的应用进展[J]. 塑料, 2022, 51(6): 106-112.

[19] 孙曦月, 孟德安, 王苗苗, 等. 生物基聚乳酸塑料热解研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(2): 168-173.

[20] 张阿里布米, 吕旭彦, 路学成. 聚乳酸的制备及其复合材料力学性能、结晶度改性研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(2): 187-192.

[21] 金琰, 蔡凡凡, 王立功, 等. 生物可降解塑料在不同环境条件下的降解研究进展[J]. 生物工程学报, 2022, 38(5): 1784-1808.

[22] 彭强, 高挺, 劳志超, 等. 可生物降解塑料研究进展[J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(8): 56-64.

[23] 邹辛祺, 葛正浩, 杨翔宇, 等. 增韧剂改性聚乳酸材料性能研究[J]. 塑料工业, 2023, 51(10): 128-134.

[24] 白麓恺. 四苯乙烯类聚集诱导发光分子在聚乳酸复合材料结晶性能研究中的应用[D]. 西安: 西安工业大学, 2025.

[25] 赵吉丽, 张会良, 高歌, 等. 聚乳酸/聚己二酸二甘醇酯/甲基丙烯酸甲酯-丁二烯-苯乙烯共聚物生物降解薄膜的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(3): 52-58.

[26] MENOSSI M, SALCEDO F, MANSILLA A Y, et al. Poly(lactic acid)/starch biodegradable blend with antioxidant activity: A sustainable alternative for single-use active plastic packaging[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(21): e56933.

[27] MUKAFFA H, ASROFI M, SUJITO, et al. Effect of alkali treatment of piper betle fiber on tensile properties as biocomposite based polylactic acid: Solvent cast-film method[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 48: 761-765.

[28] 吴静怡, 王佳启, 李亚, 等. 聚乳酸和玉米淀粉的复合工艺优化研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(11): 106-111.

[29] 康佳豪, 李骥昂, 孙鹏, 等. 小麦秸秆纤维素改性PLA/PBAT薄膜制备及性能研究[J]. 当代化工研究, 2024(6): 180-184.

[30] 刘文涛, 徐冠桦, 段瑞侠, 等. 聚乳酸改性与应用研究综述[J]. 包装学报, 2021, 13(2): 3-13.

[31] 令狐昌开, 李小龙, 罗筑, 等. 亚磷酸三苯酯调控聚乳酸/氯化铁共混体系的降解行为和性能[J]. 材料研究学报, 2021, 35(8): 632-640.

[32] AZARIAN M H, YUWAWECH K, TANTHANUCH W, et al. Biocompatible, biodegradable, and antimicrobial food packaging film from polylactic acid and biogenic vaterite $CaCO_3$-Ag hybrid[J]. Polymers, 2025, 17(10): 1345.

[33] 冯珊珊. 生物炭调控老化聚乳酸微塑料与镉复合污染土壤中小白菜生长机制研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2025.

[34] 吕汉强, 赵文花, 李含婷, 等. 聚乳酸可降解地膜对绿洲灌区玉米产量和农田水热特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(5): 72-79.

[35] 张婉婷. 东方拟无枝酸菌对聚乳酸的降解及其降解酶的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2025.

[36] 张莉娟, 陈洁, 敖瑞雪, 等. 土壤中生物降解塑料的降解过程及其对土壤动物的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 1145-1154.

[37] TOSAKUL T, CHANTHOT P, PATTAMAPROM C. High toughness and fast home-compost biodegradable packaging films derived from polylactic acid/thermoplastic starch/para-rubber ternary blends[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 18603.

[38] RONG-OR C, PONGPUTTHIPAT W, RUKSAKULPIWAT Y, et al. Soil burial degradation of bio-composite films from poly(lactic acid), natural rubber, and rice straw[J]. Polymer Bulletin, 2024, 81(12): 10729-10746.

[39] PRATAMA C A, MISTRY A N, KRAINARA S, et al. A dual approach using UV irradiation and subcritical water extraction for enhanced PLA waste degradation in a bioaugmented food composter[J]. Journal of Hazardous Materials Letters, 2025, 6: 100154.

[40] GUICHERD M, KHALED MBEN, GUÉROULT M, et al. An engineered enzyme embedded into PLA to make self-biodegradable plastic[J]. Nature, 2024, 631(8022): 884-890.

[41] ROYER S J, GRECO F, KOGLER M, et al. Not so biodegradable: Polylactic acid and cellulose/plastic blend textiles lack fast biodegradation in marine waters[J]. PLoS One, 2023, 18(5): e0284681.

[42] 冯琴霜, 张丽雪, 唐炳然, 等. 聚乳酸塑料在淡水沉积物中的降解过程[J]. 中国环境科学, 2024, 44(11): 6228-6240.

[43] KOH S, SUZUKI M, et al. Seawater biodegradation of a microbial lactate-based polyester (LAHB) as an advanced version of non-degradable polylactide[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2025, 89(9): 1405-1408.

[44] 杜野, 郭富成, 陈昊, 等. 海洋可降解塑料研究进展[J]. 当代化工, 2025, 54(8): 1923-1930.