DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260130003
引用格式: 王新雨, 施梦美, 卢钰, 等. 聚乳酸可降解果蔬保鲜膜的制备、性能及其应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 196–205.
Wang Xinyu, Shi Mengmei, Lu Yu, et al. Research progress on the preparation, properties and applications of polylactic acid biodegradable cling films for fruits and vegetables [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(15): 196–205. (in Chinese with English abstract).

聚乳酸可降解果蔬保鲜膜的制备、性能及其应用研究进展

王新雨[#], 施梦美[#], 卢　钰, 胡张宇, 穆烽春, 程嘉伟, 郑淑娟[*]
(安徽工程大学生物与食品工程学院, 芜湖　241000)

摘　要: 传统石油基塑料保鲜膜难以降解, 造成严重的污染, 同时果蔬采后损失率高, 需开发绿色、高效的替代包装材料。聚乳酸可降解保鲜膜是一种由植物原料(如玉米淀粉)制成、可在自然环境中分解的环保保鲜膜。聚乳酸因为具有较好的加工适应能力, 力学性能以及生物降解属性, 在果蔬保鲜包装方面极具竞争力。本文综述了聚乳酸果蔬保鲜膜的制作方法, 性能及其在果蔬保鲜方面的实际应用情况, 也对未来的发展方向做了探讨。未来研究需聚焦于多功能协同、智能化响应及低成本规模化制备, 以加速聚乳酸可降解保鲜膜的实际应用推广。本文旨在为果蔬保鲜提供环保方案, 为高性能聚乳酸果蔬保鲜材料的开发提供理论支撑和技术指导, 推动食品包装材料科学的创新发展, 助力“双碳”目标下的绿色包装转型。

关键词: 聚乳酸可降解保鲜膜; 合成方法; 功能特性; 食品应用
中图分类号: TS206.4　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)15–0196–10

Research progress on the preparation, properties and applications of polylactic acid biodegradable cling films for fruits and vegetables

WANG Xin-Yu[#], SHI Meng-Mei[#], LU Yu, HU Zhang-Yu, MU Feng-Chun, CHENG Jia-Wei, ZHENG Shu-Juan[*]
(*College of Biological and Food Engineering*, *Anhui Polytechnic University*, *Wuhu* 241000, *China*)

ABSTRACT: Traditional petroleum-based plastic wrap is difficult to degrade and causes serious pollution. Meanwhile, the post-harvest loss rate of fruits and vegetables is high, so there is a need to develop green and efficient

收稿日期: 2026-01-30
基金项目: 安徽工程大学 2023 年安徽省大学生创新创业训练计划项目(202310363250); 安徽工程大学 2024 年安徽省大学生创新创业训练计划项目(S202410363240); 安徽工程大学引进人才科研启动基金项目(2022YQQ071); 芜湖市绿色食品产业研究院有限公司产业引导基金项目(LSSPCYYJY-2024KF-06, HX-2025-09-067); 安徽工程大学本科教学质量提升计划项目(2023szyzk71)
#王新雨和施梦美为共同第一作者
第一作者: 王新雨(2003—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品营养。E-mail: 1280783625@qq.com
施梦美(2005—), 女, 主要研究方向为食品营养。E-mail: 3455810565@qq.com
***通信作者:** 郑淑娟(1990—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品营养。E-mail: zhengshujuan1015@163.com

alternative packaging materials. Polylactic acid biodegradable cling film is an environmentally friendly packaging material made from plant-based sources like corn starch, which can decompose naturally. Due to the good processability, mechanical strength and biodegradability, polylactic acid is highly competitive in the field of fruits and vegetables preservation packaging. This paper reviewed the preparation methods and properties of polylactic acid biodegradable cling films for fruits and vegetables, as well as the practical applications in fruit and vegetable preservation, and explored potential future developments. Future research should focus on multifunctional synergy, intelligent responsiveness, and low-cost, large-scale preparation to accelerate the practical application and promotion of polylactic acid biodegradable cling films. This study aims to offer an eco-friendly solution for fruits and vegetables packaging, provide theoretical support and technical guidance for the development of high-performance fruits and vegetables preservation materials, promote innovation in food packaging material science, and support the green packaging transformation under the dual carbon goals.

KEY WORDS: polylactic acid biodegradable cling films; synthesis method; functional properties; food applications

0　引　言

全球每年大约有 20%~30%的新鲜果蔬被外界微生物污染或者被自身产生的代谢产物引起变质，造成了巨大损失[1]。传统保鲜方法有物理法、化学法、生物法[2]。物理保鲜法的主要优点是无毒无害、环保高效，缺点是设备昂贵，受控范围局限[3]。化学保鲜法的优势是技术简单、价格低廉、适应性强、效果明显。化学保鲜法是一种低成本、高效率的食品保存方法，但是化学保鲜法以化学保鲜剂为物质基础，存在添加过量、易残留等安全隐患问题，需严格监控[4]。而生物保鲜则是一种绿色环保、无毒无害、无残留污染，并且保鲜效果好的一种方式[5]。聚乳酸(polylactic acid, PLA)保鲜是一种以绿色低碳为发展方向的新型保鲜方式。PLA 作为一种可生物降解包装材料[6]，可以有效地保证食品安全，还可以极大地延长食品的保质期[7]。PLA 保鲜膜能够有效避免传统保鲜方法可能带来的化学残留[8]和塑料包装不可降解[9]的问题，对于促进环境保护和提升保鲜性能有着十分重要的意义。PLA 具有一定的可降解性[10]、良好的机械性[11]和较好的热稳定性[12]，是果蔬保鲜包装的理想材料之一。

本文综述了 PLA 可降解果蔬保鲜膜的合成方法、物理与功能性质(如降解性、机械性和物理性、热稳定性与抗菌性)及其在食品中保鲜、智能指示、防紫外线与表面疏水性包装中的应用进展，为 PLA 保鲜膜的技术发展具有一定推进作用，更为解决果蔬采后损失、食品安全及环境污染等实际问题提供了可行的绿色解决方案，具有一定的科学价值与社会经济效益。

1　PLA 果蔬保鲜膜的制备方法

PLA 保鲜膜的制备方法主要有流延法、静电纺丝法、溶液浇铸法和共混技术等，如表 1 所示。依据不同种类果蔬的不同保鲜要求，可以使用不同的保鲜膜制备方法。

流延法是目前工业化的主导生产工艺，因工艺成熟、产率高等优势可实现大产量连续化生产。经后续双向拉伸工艺[13]可提高其薄膜力学强度、阻隔性能以及透明度。但流延法设备投入大，对原料强度要求高，普通流延膜易存在易碎的问题，主要应用于强度要求较高、对气密性有较高要求的食品包装膜或高阻隔膜。

表 1　PLA 果蔬保鲜膜的制备方法对比

Table 1　Comparison of preparation methods for PLA fruit and vegetable preservation films

特性	流延法	静电纺丝法	溶液浇铸法	共混技术
主要特点与原理	工业化主导工艺，经双向拉伸可提高性能	制备功能性纳米纤维膜，利于负载和控释活性物质	实验室常用方法，便于多种功能组分充分分散	通过熔融共混其他聚合物对 PLA 进行改性
优点	工艺成熟、产率高、可连续化大生产；薄膜力学强度、阻隔性和透明度高	制造高比表面积纤维网络，满足智能包装要求	操作简单、设备要求低；适用于研发新材料和新配方	成本低，能有效改善 PLA 脆性、易断裂等问题，提升冲击强度；工艺成熟，易于产业化
缺点	设备投入大，对原料强度要求高；普通膜易碎	产量低、生产成本高；纤维膜脆弱；活性物质易在初期快速释放	溶剂量大，增加成本且污染环境；溶剂难以完全去除	不同聚合物存在相容性问题，可能出现分层，需添加相容剂或改性界面
适用场景	对强度和气密性要求高的食品包装膜或高阻隔膜	机械强度要求不高，但需要高端活性包装的领域(如肉类、果蔬保鲜)	实验室进行多类型多功能复合膜的研究	对膜的柔韧性、抗冲击性或耐热性有较高需求的包装领域

静电纺丝法制备的功能性纳米纤维膜具有堆积成堆或高孔隙率的纤维网络，有利于负载并且控制释放抗菌剂、抗氧化剂等活性物质的特点。这种方法最大的优势是能够制造出高比表面积，满足智能包装的要求。因为它产量低，而且生产成本高，以及它的纤维膜比较脆弱，同时负载的活性物质容易出现初期快速释放的情况。所以静电纺丝法适合于一些机械强度要求不高，但是需要高端活性食品包装(用于肉类或者果蔬保鲜)等[14]。

溶液浇筑法是实验室常用的制膜方法，操作简单、设备要求低,能在溶液中实现多种功能组分(例如纳米粒子、植物精油)的充分分散[15]，适用于研发实验用的各种膜类新材料和新配方。但溶液浇筑法也有自身的缺陷，即溶剂量较大，会增大成本、破坏环境且难以完全去除溶剂，因此溶液浇筑法多用于实验室做多类型多功能复合膜的研究。

PLA 保鲜膜常使用共混工艺对 PLA 进行改性，共混是 PLA 最常见的一种改性方法。共混技术是通过熔融共混将 PLA 与其他聚合物或功能助剂复合，以改善其加工性能或赋予其新功能的常用方法[16]。该工艺的优势在于成本较低、易于实现产业化。然而，不同聚合物间的相容性是影响共混效果的关键因素，若相容性较差可能导致相分离，需添加相容剂或进行界面改性[17]。共混技术适用于对膜的柔韧性、抗冲击性或耐热性有较高需求的包装领域。

2 PLA 果蔬保鲜膜性质

PLA 是制作 PLA 膜的基础材料。PLA 是聚酯类聚合物[18]，乳酸单体合成 PLA 有直接缩聚法和开环聚合法两种方法[19]，原理图如图 1 所示。直接缩聚法包括溶液缩聚和熔融缩聚[21]。溶液缩聚是将乳酸单体溶于高沸点有机溶剂中，在催化剂作用下逐步聚合并不断除水，粗产物经丙酮溶解和水沉淀纯化后，在 40 ℃下进一步反应以提高分子量。熔融缩聚则是在高温、高真空或惰性氛围中使乳酸熔融，直接脱水缩聚，流程简单但产物分子量较低。目前工业化生产主要采用更成熟的开环聚合法，该方法以丙交酯为单体，通过阳离子、阴离子或配位插入机制进行开环聚合，其中配位开环聚合使用金属基催化剂(如辛酸亚锡或稀土配合物)，通过配位-插入机制实现链增长，可获得高分子量、力学性能优异的 PLA 产品。PLA 在自然环境中主要被微生物分解，适用于制备可降解果蔬包装保鲜膜。通过微生物的作用, PLA 被分解为水和二氧化碳，最终进入自然循环体系。与传统的塑料保鲜膜相比，PLA 果蔬保鲜膜具有可降解性、机械性能、热稳定性、抗菌性等特点，是一种环保和可持续的包装材料。

2.1 可降解性

传统塑料保鲜膜不可降解，给自然环境带来了严重的问题[22]。PLA 降解的方式包括水解降解、酶催化降解、紫外光降解、热解、生物降解等[23]。其中水解、酶解、生物降解 3 种方式较为常见。PLA 的水解降解分为 3 个部分[24]。第 1 步碎片化阶段，水分子渗透进入 PLA 材料内部，攻击酯键，引发链断裂。PLA 表面和内部出现微裂纹、孔洞或微裂隙。材料力学性能开始下降，但整体结构仍保持完整。第 2 步降解扩展阶段，水解作用从表面向内部扩展，裂纹和孔洞逐渐增多、扩大。聚合物链进一步断裂，形成更小的碎片。材料逐渐失去强度，结晶区暴露。第 3 步解聚阶段, PLA 链进一步断裂为低聚物(如二聚体、三聚体)和乳酸单体。材料逐渐崩解为细小碎片，最终可被微生物进一步代谢矿化生成水和二氧化碳。PLA 的酶降解过程依赖于微生物分泌的酶。首先，微生物分泌胞外 PLA 脱聚合酶，然后该脱聚合酶作用于 PLA 的胞内酯键，产生寡聚体、二聚体和单体。最终，这些低分子量化合物被微生物吸收，并被细胞内酶进一步分解为二氧化碳和水[25]。生物降解是高分子材料被自然界中存在的一些微生物(例如细菌、真菌和藻类等)分解成水和二氧化碳的过程[26]。

PLA 在环境中的降解过程主要取决于所处环境的类型和条件，通常涉及水解和酶解两种机制。在土壤和堆肥中，降解以酶促降解为主，微生物(如放线菌、细菌和真菌)附着于 PLA 表面并分泌蛋白酶、脂酶等酶类，催化酯键断裂，生成乳酸单体，随后被微生物代谢为水和二氧化碳。在水环境(如淡水)中，降解则以水解为主，尤其是自催化水解，PLA 链末端的羧酸基团催化酯键断裂。在废水和垃圾填埋场中，降解常通过生物膜形成与微生物降解共同作用，生物膜提供微生物附着表面并分泌水解酶，酶促成水和二氧化碳解。

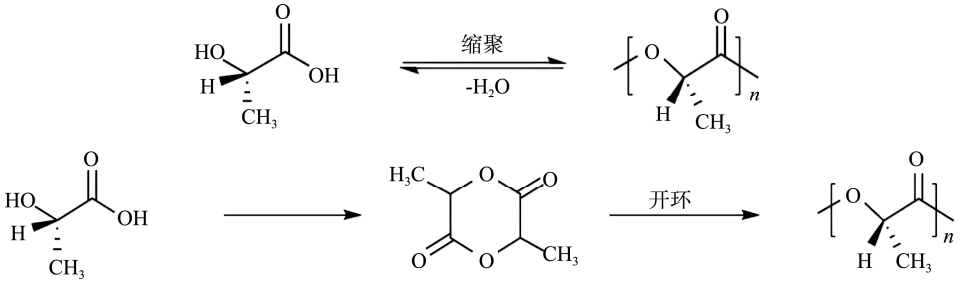


图 1 直接缩聚法和开环聚合法原理图[20]

Fig.1 Schematic diagram of direct polycondensation and ring-opening polymerization[20]

PLA 保鲜膜的降解速度受环境条件的影响, 如温度、湿度、微生物等[27]。PLA 分子在高温有氧和潮湿的环境下, 酯键含量较高, 这些酯类键断均有不同程度的降解。氧化反应在降解时发生酯链断裂, 高分子长分子链分裂成更短的部分, 成为乳酸分子[28]。乳酸分子再分解为二氧化碳和水。PLA 保鲜膜的自然分解往往需要严格的温度条件。通常, 只有当环境温度达到 55~70 ℃的高温区间时, 分子链才会在水的作用下快速解离, 从而启动有效生物降解[27,29]。湿度是驱动 PLA 降解最核心的环境因素[30]。高湿条件会引发并加速其主链酯键的水解断裂, 导致分子量、力学性能的快速下降和结晶度等结构变化, 这一机制在液态水或高湿度蒸汽环境下尤为显著[31–33]。特定微生物[34]如放射瘤菌角质分解菌属、甘蔗莱西氏菌属等)能分泌酶(如酯酶)催化 PLA 断链, 并利用其碎片, 从而加速最终生物降解[35]。

2.2　物理和机械性能

PLA 因其良好的透光性和安全性, 正在逐渐应用于食品包装领域[36]。PLA 物理和机械性能体现在透光率、机械强度和脆性 3 个方面。

首先, 透光率是一个动态的、受多因素影响的关键指标, 通常在可见光范围内(如 550 nm)可达 80%以上, 可以通过添加剂与共混提高[37]。有研究表明, 实验采用熔融共混法制备了 PLA 和其他材料的复合材料, 通过透光率测试研究其透明性能。结果表明, 纯 PLA 透光率为 89%, 添加 20%聚丁二酸丁二酯后降至 61%, 主要两相不相容导致光散射。进一步引入 10%乙酰柠檬酸三丁 0.4%多酰胺类化合物和 0.3%过氧化二异丙苯后, 透光率显著提升至 82%[38]。这归因于乙酰柠檬酸三丁和过氧化二异丙苯改善了 PLA 与聚丁二酸丁二酯的界面相容性, 多酰胺类化合物细化了球晶结构, 共同减少了光散射, 从而在实现增韧的同时显著提高了材料的透光性。

其次, PLA保鲜膜具有良好的机械性能, 其在 50 ℃及特定振幅下, PLA 的弹性模量约为聚乙烯的 9.39 倍[39]。在对强度或韧性要求更高的场合, 可通过共混、拉伸取向[40]等改性技术进一步提升其力学性能, 也可通过共混等方式赋予 PLA 膜高阻隔、抗菌、透湿调控等功能, 从而拓展其应用范围。如通过熔融共混法制备了改性蓖麻油与 PLA 的共混材料, 并系统评价了其机械强度, 实验采用转矩流变仪在 180 ℃、60 r/min 条件下共混 10 min, 随后注塑成型为哑铃样条, 依据 GB/T 1040.1—2018《塑料拉伸性能的测定》标准测试拉伸性能, 结果表明, 纯 PLA 的拉伸强度为(67.5±2.11) MPa, 断裂伸长率为(9.35±0.87)%。添加纯蓖麻油后材料表现出明显增塑效应, 拉伸强度下降而断裂伸长率上升。而添加改性蓖麻油的 PLA20M 样品拉伸强度为(61.91±1.59) MPa, 断裂伸长率为(7.51±0.96)%, 与纯 PLA 性能相近, 说明改性蓖麻油在维持 PLA 基体力学性能的同时, 未引起显著劣化[41]。这归因于改性蓖麻油的热致相变特性及其极性基团与 PLA 分子链的相互作用, 在共混过程中增强了两相相容性, 冷却后改性蓖麻油凝固为固体分散相, 起到一定的增强作用。

最后, PLA 本身的脆性大、韧性差的问题是制约 PLA 应用的重要因素。近年来, 科研人员通过共混改性和增塑等方法使 PLA 的韧性得到了大幅度提高, 扩大 PLA 在高档保鲜膜方面的使用范围。如加入高柔性可降解聚酯是一种改性 PLA 的方法。有一项研究是 PLA 与聚(己二酸-对苯二甲酸乙二醇酯)(polybutylene adipate terephthalate, PEAT)共混, 实验通过直接酯化法成功合成了具有高柔性和优异断裂伸长率(>900%)的可生物降解脂肪族-芳香族共聚物 PEAT, 并将其与 PLA 熔融共混制备了一系列不同配比的 PLA/PEAT 共混材料, 该实验系统研究了 PEAT 添加量对共混物力学性能、相形态及流变行为的影响, 结果表明, PEAT 的加入显著改善了 PLA 的韧性, 当 PEAT 含量为 30wt%时, 共混物的断裂伸长率从纯 PLA 的 6.7%大幅提升至 359%, 冲击强度也从 4.4 kJ/m^2 增加至 10.5 kJ/m^2, 分别提升 53 倍和 138%[42]。傅里叶变换红外光谱分析证实 PLA 与 PEAT 之间存在一定的化学相互作用, 有助于提高相容性。扫描电子显微镜观察显示 PEAT 的增韧机制主要涉及分子链缠结与解缠结以及由脱黏空化引发的剪切屈服机制。

2.3　热稳定性

PLA 是具有熔点约 170 ℃的半结晶性高分子[43]。PLA 的耐热性主要受其结晶行为影响, 具体包括晶体形态、结晶度与尺寸等因素[44]。

一般而言, 常见的 PLA 晶体有 α 晶型和 α'晶型[45]。PLA 的 α 晶型由于分子链间排列紧密, 结构有序性较高, 热稳定性较高。α'晶型热稳定性较差。晶体的熔化温度与其结晶度大小有关。PLA 结晶度越高, 则分子链堆积密度越大, 热变形温度及耐热性也就随之提高。PLA 分子链构型对 PLA 耐热性的影响也不可忽视。旋光 PLA 因分子链规整性差导致结晶度低, 热稳定性差。传统加工方式下由于 PLA 结晶速度慢, 结晶度相对较低, 因而造成制品的热变形温度也相对较低[46]。

提高其耐热性的常见途径主要有添加成核剂促进结晶, 通过退火处理改善晶体完整性, 采用交联或接枝改性抑制分子链运动, 以及与高耐热聚合物共混或引入增强相(纤维、纳米颗粒)等。此外, 加工工艺如双向拉伸、强剪切流动场等也能通过诱导取向结晶进一步提升 PLA 的耐热性能。添加成核剂[47](无机滑石粉), 可以大幅度提高热变形温度。但是添加无机成核剂的效果相对有限。有机类成核剂虽然可以明显提高 PLA 的热变形温度, 但由于会破坏其原有的热稳定性。PLA 在退火过程中, 结晶度随退火温度升高而显著提升。具体而言, 当退火温度从 60 ℃升高到 80 ℃时, 结晶度从 5.1%显著提升至 29.7%, 在 80 ℃时, 结

晶度达到最高值(29.7%)[48]。交联/接枝改性指的是采用化学法或者辐射法等将高聚物交联形成三维网络, 以此限制大分子链段运动, 提高玻璃化转变温度, 但不利于操作且不易于控制网络结构。共混高耐热聚合物(例如聚甲醛、聚碳酸酯)简单方便经济, 然而需要注意的是二者需要具有良好的相容性, 加入相容剂才能保证产品均匀分散。使用纤维(竹纤维、玻璃纤维等)或纳米粒子(二氧化硅、碳纳米管等)做增强骨架制得纤维/纳米复合材料可同时提高力学和耐温性能, 且可以在表面经过处理, 从而提高分散性及界面结合强度等。双向拉伸是[49]通过在相互垂直的两个方向上拉伸 PLA 薄膜, 在拉伸应力和温度场的耦合作用下调控其结晶行为。强剪切流动场[50]通常借助特殊设备(如动态保压注射成型机), 在 PLA 熔体冷却固化过程中施加高强度剪切力。提高 PLA 耐热性, PLA 能够通过各种加工方法完成纺丝[51]、挤塑[52]、注塑吹塑[53]、双轴拉伸塑料薄膜[54]等。

2.4 抗菌性

PLA 保鲜膜缺乏抗菌特性, 要加入抗菌剂才能得到有抗菌特性的保鲜膜[55]。抗菌剂类型可分为无机、有机和天然 3 大类, 各具不同的抗菌机制与适用范围[56]。抗菌剂的引入在赋予 PLA 膜抗菌活性的同时, 也会影响其降解行为, 如表 2 所示, 因此需要在抗菌效能与降解性能之间取得平衡。这些方法通过物理、化学或生物机制赋予 PLA 抗菌功能, 并根据其特性分别应用于食品保鲜、环保包装等多个领域, 推动了 PLA 保鲜膜向功能化、绿色化方向发展。

无机抗菌剂(如纳米银、二氧化硅、MgO)主要通过释放金属离子(如 Ag^+、Mg^{2+})或光催化产生活性氧破坏细菌细胞膜, 干扰代谢, 具有广谱、长效的特点, 适用于 PLA 保鲜膜等食品包装材料。如王琼玉等[61]在研究中探讨了金属-多酚网络在果蔬保鲜中的应用, 指出基于金属配位构建的抗菌体系在可控释放和抗氧化方面具有显著优势。有机抗菌剂(如季铵盐、胍类、咪唑类)依靠带正电的基团与细菌细胞膜静电作用, 破坏膜结构, 导致细胞死亡, 抗菌快速、易加工, 常用于食品包装、抗菌涂层等。如孙文涛等研究者针对此问题, 通过将聚胍接枝到二氧化钛表面制备了复合抗菌剂, 并将其用于改性聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯/PLA 生物降解保鲜膜, 不仅提升了薄膜的力学性能, 还增强了对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制效果[62]。天然抗菌剂(如壳聚糖、精油、茶多酚)通过静电吸附、破坏膜完整性或干扰 DNA 合成等多种机制抑菌, 兼具生物安全性与环境友好性, 尤其适用于食品接触材料、生鲜包装等对安全性要求高的场合[63]。如赖英萍[64]在研究中制备了柠檬酸壳聚糖复合膜, 发现壳聚糖基材料不仅能通过成膜性阻隔微生物, 其自身的抗菌活性还能显著延长食品的货架期, 在食品活性包装领域展现出良好的应用前景。

3 PLA 果蔬保鲜膜应用

在食品包装方面, PLA 表现出多功能的潜力, PLA 保鲜膜透气性良好, 可利用天然指示剂制备果蔬气调保鲜, 而且能够智能显示食物的新鲜程度。经由复合改性技术, 可以给予 PLA 保鲜膜紫外线高效阻隔能力, 保护光敏感果蔬和果蔬原料, 这些功能使得 PLA 成为适合果蔬保鲜的理想包装材料, 达到了保鲜、指示与防护的统一。

3.1 保鲜和隔离

PLA 保鲜膜综合透气性很好, 所以在果蔬保鲜方面有优势, PLA 与常见包装材料对比见表 3 所示, 表明 PLA 的二氧化碳透过率处于适中水平, 能防止包装内二氧化碳浓度过高或过低。低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)相比, PLA 的透氧率 7.9~52 $cm^3\times mm/m^2\times d\times atm$ 介于两者之间, 既高于透氧率极低的 PET, 又低于透氧率过高的 LDPE, 这种适度偏高的特性能够有效抑制果蔬呼吸作用但又不至于使其缺氧。在透湿量方面, PLA5.0~7.0 g mm m^{-2} day^{-1} 虽高于 LDPE 乙烯和 PET, 但这种较高的透湿性恰恰能避免包装内因湿度过大而产生结露霉变, 同时防止果蔬失水萎蔫[67]。这些为高效的保鲜提供基础[68]。PLA 保鲜膜的作用主要有抑制果蔬呼吸作用和微生物生长, 从而延长货架期且还能智能调控氧气和二氧化碳的穿透率, 在包装内部自动营造出合适的低氧环境。PLA 保鲜膜给果蔬带来合适的保鲜环境, 它能有效地隔绝外界不良因素, 并通过透氧率、二氧化碳透过率以及透湿量, 在保鲜和隔绝功能间达成兼顾, 以此做到包装内部气体和湿度的动态调控[69]。PLA 保鲜膜的透氧率对其保鲜效果有直接影响, 当氧气的透氧率较高时, 包装内部的氧气浓度便会增大, 会促使水果和蔬菜的新陈代谢速率加快, 进而缩减保鲜时间, 如果透氧率过低, 则可能抑制水果和蔬菜的正常呼吸作用, 其品质及其成熟过程都会受到影响。所以, 保存果蔬新鲜度

表 2 抗菌剂对 PLA 降解行为的影响

Table 2 Effects of antibacterial agents on the degradation behavior of PLA

抗菌剂类型	对 PLA 降解行为的影响	文献
无机抗菌剂(如 CaO)	加速降解(多数), 分子链运动能力增强, 降解更易进行	[57]
天然抗菌剂(如壳聚糖)	普遍加速降解, 亲水性加速水解	[58]
有机抗菌剂	天然植物化合物对降解无负面影响, 对香豆酸和原儿茶酸轻微延缓; 阿魏酸对降解无影响	[59–60]

表 3　PLA 保鲜膜透气性与常用包装材料对比

Table 3　Comparison of gas permeability between PLA preservation films and common packaging materials

指标	PLA	LDPE	PET	文献
二氧化碳透过率	10.2	3.3	18~22	[65]
透氧率/(cm^3×mm/m^2×d×atm)	7.9~52	78~453	1.18	[66]
透湿量/(g mm m^{-2} day^{-1})	5.0~7.0	0.5~2.0	0.5~2.0	[67]

就得要有恰当的氧气透过率，二氧化碳透过率同样也要适度，二氧化碳的透过性能不能过高，否则水果和蔬菜就会急速失水，从而影响到 PLA 保鲜膜的保鲜功能，但如果透过率过低，就会阻碍植物的呼吸作用，既影响品质，又可能干扰后续的加工步骤。渗透率在维持果蔬水分协调方面也十分关键，重点在于调控 PLA 保鲜膜内部的湿度，倘若透湿量偏低，便会出现果蔬失水，萎缩的情形。透湿量若是过高，则有可能产生结露状况，甚至造成霉变，进而影响到新鲜度以及营养成分的保存。

3.2　PLA 智能指示包装

PLA 包装功能朝着智能特性的主动检测方向转变。这项技术的关键之处在于整合天然比色传感器，一般会采用植物的花青素[70]，姜黄素[71]等天然色素作为指示成分[72]。这些色素会对环境中的某些特定刺激(比如 pH，挥发性胺类物质或者氧气浓度)作出灵敏反应，并且伴随着显著的颜色改变，能直观地显示包装内部食品当下的质量状况。

当前的研究主要围绕以 PLA 作基材，利用添加天然活性成分来研制既具有可视检测能力又具备自动保鲜功能的智能包装薄膜。一项研究构建了可对酸性环境中活性成分智能释放的双层膜，该薄膜以果胶和 PLA 制成双层结构，并加入了由苯丙氨酸和香草醛合成的席夫碱作为活性成分。实验证实，该薄膜具备 pH 响应释放能力。当处于水果成熟产生的酸性环境中时，薄膜中的席夫碱结构被触发水解，智能释放出香草醛等活性物质。结果表明，这一智能释放机制有效抑制了鲜切梨在 7 d 储存期间的酶促褐变，并协同提升了薄膜的抗氧化和抗菌性能，从而显著延缓了水果品质的下降。这证明成功构建了一种能对酸性环境响应并释放活性成分的双层膜保鲜系统[73]。目前，增强天然指示剂的长期稳定性及其与 PLA 基体的相容性是该领域的研究重点，以促进这种环保、直观、主动保鲜的智能化包装走向实际应用。

3.3　防紫外线

传统包装导致紫外线照射而造成包装内的光敏组分，如核黄素、油脂等营养损失，变质或产生不良风味[74]。PLA 对紫外线非常敏感，PLA 长期暴露于紫外线辐射下会严重破坏 PLA 的机械性能，限制其户外应用[75]。所以，在实际应用中，往往需要通过共混等手段，加入天然光吸收剂(木纤维、木质素、姜黄素)[36]或改性剂，进一步提升 PLA 材料的防紫外线能力，以满足更严苛的包装防护要求。

研究通过共沉淀法合成了 Mg^{2+}、Al^{3+}、Ce^{3+}三元水滑石，并采用十二烷基硫酸钠进行插层改性，成功制备了有机改性水滑石[76]。将改性后有机改性水滑石作为助剂，通过吹塑工艺制备了 PLA 和有机改性水滑石复合薄膜。实验结果显示，当有机改性水滑石添加量为 0.5% 时，显著增强了 PLA 薄膜在 250~760 nm 波段的紫外吸收能力，主要归因于水滑石层状结构的光散射作用以及 Ce^{3+}对紫外线的强吸收。紫外老化行为相较于纯 PLA 薄膜，添加 0.5%有机改性水滑石的 PLA 复合薄膜具有更优异的抗紫外老化性能。更前沿的是通过化学键合将核黄素、芦荟大黄素等天然光吸收剂引入 PLA 分子链[77]，从而制成一种薄膜，可以屏蔽整个光谱紫外线和蓝光，并且保持较高的透明度，从而开发出全生物基紫外线吸收体系。

3.4　表面疏水功能

表面疏水性指材料表面对水的排斥能力，通常用水接触角衡量，接触角越大，疏水性越强，PLA 与常见包装材料水接触角对比见表 4 所示。食品包装的表面疏水性也是食品防护的重要指标。具有优越疏水性的包装可以有效阻断包装与环境之间的水分流动，减少细菌和其他微生物的附着，有助于保持食品的新鲜度。纯 PLA 膜水接触角约为 67.4°，是一种弱疏水性保鲜膜。PLA 可以通过在表面构建微观粗糙结构和共混等改性方法增强表面疏水性。

表 4　PLA 保鲜膜接触角与常用包装材料对比

Table 4　Comparison of contact angle between PLA preservation films and common packaging materials

材料	水接触角/°	表面特性	数据来源
PLA	67.4	弱疏水、亲水性优于 LDPE	[78]
LDPE	87.63 ± 4.34	强疏水、表面非极性	[79]
PET	70~80	中等疏水、极性高于 LDPE	[80]

PLA 通过物理或化学方法在表面制造微米或纳米级的粗糙度。例如，有研究通过立构复合与自组装方法，在 PLA 表面构建了由亚微米颗粒组成的微观粗糙结构，显著提升了其疏水性，实验采用三嵌段聚合物溶液，在乙醇蒸汽氛围中涂覆于 PLA 表面，通过缓慢沉积形成立构复合的疏水层。结果表明，调节聚合物溶液浓度可实现表面疏水行为的转变，在 0 ℃条件下获得最大接触角 151°的超疏水表面[81]。

4 结束语

PLA 可降解果蔬保鲜膜以其优异的生物降解性、良好的机械性能和热稳定性，以及通过功能化改性赋予的抗菌、防紫外线、智能指示等特性，展现出在果蔬保鲜领域的广阔应用前景。目前，PLA 保鲜膜已能够在一定程度上调控包装内部气体环境、延缓果蔬衰老、减少采后损失，并通过引入天然活性成分实现智能化、可视化保鲜功能，初步形成了“保鲜+指示+防护”多功能一体化的发展趋势。

尽管当前 PLA 膜已具备一定的抗菌、抗氧化等功能，但多功能的协同作用机制尚未深入探讨，如抗菌性与降解性能之间的平衡关系、防紫外线功能对膜透明度与力学性能的影响等，仍缺乏系统研究。现有研究多集中于将天然色素(如花青素、姜黄素)简单共混于 PLA 基体中，存在指示剂稳定性差、响应不灵敏、与基体相容性差等问题。对 pH 响应、胺类物质识别等多重刺激响应机制的系统设计仍较为薄弱，缺乏成熟的响应模型与标准化评价体系。多数研究仅停留在添加紫外线吸收剂或屏蔽剂层面，缺乏对紫外线阻隔机制、光老化行为与材料长期稳定性的系统评价。尤其在保持高透明度的同时实现高效紫外线屏蔽，仍是当前材料设计的难点。当前 PLA 膜的性能评价多集中于实验室条件下，缺乏与传统包装材料(如 LDPE、PET)在实际应用场景中的性能对比分析，尤其在透气性、透湿性、力学强度等方面的综合性能评估仍不系统。高性能 PLA 膜的生产成本仍高于传统塑料，且加工工艺(如流延、静电纺丝)在连续化、规模化方面仍存在技术壁垒。此外，市场对可降解材料的认知不足、政策支持体系不完善也制约其推广。

未来研究应通过纳米复合、界面修饰等手段实现抗菌、抗氧化、防紫外线、智能响应等多功能的协同集成，提升材料的综合保鲜能力；深入研究天然指示剂与 PLA 基体的相容性及释放行为，构建基于 pH、温度、挥发性物质等多重刺激响应的可视化智能包装系统；开发基于天然光吸收剂(如木质素、姜黄素)或结构色调控的全生物基紫外线屏蔽体系，实现高效、透明、可持续的紫外线防护；推动 PLA 膜与传统包装材料的系统对比研究，建立统一的功能性能评价标准，为产业化应用提供理论依据；加强流延、共混、静电纺丝等工艺的集成优化研究，探索低成本、高效率的规模化制备路径，提升 PLA 膜的市场竞争力。

总之，PLA 可降解果蔬保鲜膜作为绿色包装材料的重要发展方向，未来需在功能协同、智能化设计、工艺优化与标准化建设等方面持续深耕，推动其从实验室走向市场，为果蔬保鲜提供更加环保、智能、高效的解决方案。

参考文献

[1] 吴艾频, 王世宽. 微生物在果蔬防腐保鲜上的应用研究进展[J]. 农产品加工(上半月), 2021(3): 70–73, 76.
Wu Aipin, Wang Shikuan. Research progress of application of microorganism in the preservation of fruits and vegetables [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2021(3): 70–73, 76.

[2] 孙佳娇, 金新文, 郭慧静, 等. 果蔬保鲜研究现状及前景展望[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(13): 195–203.
Sun Jiajiao, Jin Xinwen, Guo Huijing, et al. Research status and prospect of fruit and vegetable preservation [J]. Food Research and Development, 2025, 46(13): 195–203.

[3] 陈思宇, 金建, 赵世琳. 物理技术在果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(21): 167–172.
Chen Siyu, Jin Jian, Zhao Shilin. Progress in application of physical technology in preservation of fruits and vegetables [J]. Food Research and Development, 2023, 44(21): 167–172.

[4] 马璐艳. 化学保鲜技术在食品储存中的应用优势及建议[J]. 食品安全导刊, 2025(16): 164–166.
Ma Luyan. The advantages and suggestions for the application of chemical preservation technology in food storage [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(16): 164–166.

[5] 马彩霞, 闫亚美, 米佳, 等. 生物保鲜技术在果蔬中的应用与发展[J]. 宁夏农林科技, 2023, 64(2): 20–24, 38.
Ma Caixia, Yan Yamei, Mi Jia, et al. Application and development of biological technology in the fresh-keeping of fruits and vegetables [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2023, 64(2): 20–24, 38.

[6] Lazaridis D G, Andritsos N D, Giannakas A E, et al. Development and valuation of novel PLA-based biodegradable packaging materials complemented with food waste of plant and animal origin for shelf-life extension of selected foods: trends and challenges [J]. Sustainability, 2025, 17(2): 720.

[7] 齐淑宁, 赵垚垚, 唐继兴, 等. 不同保鲜袋包装对水蜜桃贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 55–62.
Qi Shuning, Zhao Yaoyao, Tang Jixing, et al. Effect of different fresh-keeping bags on storage quality of juicy peach [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(19): 55–62.

[8] Yin Yexi, Zhou Jiayi, Fu Huiyang, et al. Occurrence and migration of synthetic phenolic antioxidants in food packaging materials: effects of plastic types and storage temperature [J]. Science of the Total Environment, 2025, 963: 178459.

[9] 蓝敏怡, 李会茹, 胡立新, 等. 塑料食品包装材料的环境污染综述[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(5): 186–210.
Lan Minyi, Li Huiru, Hu Lixin, et al. A review of the environmental pollution of food plastic packaging mate-rials [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(5): 186–210.

[10] Lors C, Leleux P, Park C H. State of the art on biodegradability of

bio-based plastics containing polylactic acid [J]. Frontiers in Materials, 2025, 11: 1476484.

[11] 王寒冰, 杨震, 刘静, 等. 聚乳酸共混材料含量检测与性能研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2026, 27(2): 124-128.
WANG Hanbing, YANG Zheng, LIU Jing, et al. Research on content detection in polylactic acid and the properties of blends [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2026, 27(2): 124-128.

[12] 秦宜轩, 王耀彬, 王萍, 等. 聚乳酸耐热改性的进展[J]. 塑料, 2025, 54(4): 89–93.
Qin Yixuan, Wang Yaobin, Wang Ping, et al. Progress on heat resistance modification of polylactic acid [J]. Plastics, 2025, 54(4): 89–93.

[13] 邹振宇, 刘小超, 刘跃军. 双向拉伸工艺对 PLA 薄膜结晶、力学、阻隔及光学性能的影响[J]. 包装学报, 2023, 15(3): 17–24.
Zou Zhenyu, Liu Xiaochao, Liu Yuejun. Effect of biaxial stretching process on crystallization, mechanical, barrier and optical properties of PLA films [J]. Packaging Journal, 2023, 15(3): 17–24.

[14] 冯笑琳, 李旭明. 静电纺丝制备抗菌性聚乳酸纳米纤维膜的研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(3): 176–180.
Feng Xiaolin, Li Xuming. Research progress of preparation of antibacterial polylactic acid nanofiber membrane by electrospinning [J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(3): 176–180.

[15] 刘冬. 聚乳酸基纳米锂藻土复合薄膜的制备与应用[D]. 昆明: 云南民族大学, 2016: 32-45.
Liu Dong. Preparation and application of poly lactic acid based nanolaponite composite films [D]. Kunming: Yunnan University of Nationalities, 2016: 32-45.

[16] 季昕, 封飞宇, 阎俊华, 等. 聚乳酸共混改性研究新进展[J]. 化学通报(印刷版), 2023, 86(1): 63–68.
Ji Xin, Feng Feiyu, Yin Junhua, et al. New progress in blending modifications of polylactic acid [J]. Chemistry, 2023, 86(1): 63–68.

[17] 宁丁怡, 赵恬娇, 董亚鹏, 等. 共混改性调控聚乳酸结晶及力学性能的研究进展[J]. 中国塑料, 2025, 39(6): 126–132.
Ning Dingyi, Zhao Tianjiao, Dong Yapeng, et al. Research progress in blending modification for regulating crystallization and mechanical properties of poly(lactic acid) [J]. China Plastics, 2025, 39(6): 126–132.

[18] 张超. 聚: (*L*: 赖氨酸: *L*: 乳酸: *ε*: 己内酯)/聚: *L*: 乳酸复合骨组织工程支架的制备与性能研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2023: 1-5.
Zhang Chao. Preparation and properties of poly-(*L*-lysine-*L*-lactic acid-*ε*-caprolactone)/poly-*L*-lactic acid composite bone tissue engineering scaffold [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2023: 1-5.

[19] Swetha T A, Bora A, Mohanrasu K, et al. A comprehensive review on polylactic acid (PLA)-Synthesis, processing and application in food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 234: 123715.

[20] 刘新军, 陈健, 张奇, 等. 生物可降解聚乳酸材料的两种主要化学合成方法及其应用[J]. 当代化工研究, 2025(4): 106–108.
Liu Xinjun, Chen Jian, Zhang Qi, et al. Two main chemical synthesis methods of biodegradable polylactic acid materials and their applications [J]. Modern Chemical Research, 2025(4): 106–108.

[21] 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.
Li Hongqiang, Duan Peng, He Baoyu. Synthesis of degradable polylactic acid and toughening modification of elastomer [J]. Chemical Management, 2025(18): 134–137.

[22] 王乙富, 王建柱, 张正贵. 可生物降解的 PLA-PBS 共混物的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2025, 56(11): 11099–11107.
Wang Yifu, Wang Jianzhu, Zhang Zhenggui. Preparation and properties of biodegradable PLA-PBS blend [J]. Journal of Functional Materials, 2025, 56(11): 11099–11107.

[23] Qi Xiang, Ren Yiwei, Wang Xingzu. New advances in the biodegradation of poly(lactic) acid [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 117: 215–223.

[24] 朱跃. 土壤环境中聚乳酸塑料膜的微生物降解及降解菌群的富集应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2025: 1-4.
Zhu Yue. Study on microbial degradation of polylactic acid plastic film in soil environment and enrichment and application of degrading bacteria [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2025: 1-4.

[25] Shekhar N, Mondal A. Synthesis, properties, environmental degradation, processing, and applications of polylactic acid (PLA): an overview [J]. Polymer Bulletin, 2024, 81(13): 11421–11457.

[26] 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.
Peng Qiang, Gao Ting, Lao Zhichao, et al. Research progress on biodegradable plastics [J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2024, 50(8): 56–64.

[27] Banerjee A, Borah A, Chah C N, et al. Decoding the complex interplay of biological and chemical factors in Polylactic acid biodegradation: a systematic review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282: 136956.

[28] Hajilou N, Mostafayi S S, Yarin A L, et al. A comparative review on biodegradation of poly(lactic acid) in soil, compost, water, and wastewater environments: incorporating mathematical modeling perspectives [J]. AppliedChem, 2025, 5(1): 1.

[29] Mironov V, Trofimchuk E, Plutalova A. Degradation of high concentrations of commercial polylactide packaging on food waste composting in pilot-scale test [J]. Bioresource Technology, 2024, 410: 131288.

[30] Jiang Hui, Wang Yiqun, Sun Jiaoxia, et al. The aging behavior of degradable plastic polylactic acid under the interaction of environmental factors [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2024, 46(5): 163.

[31] Tosakul T, Suetong P, Chanthot P, et al. Degradation of polylactic acid and polylactic acid/natural rubber blown films in aquatic environment [J]. Journal of Polymer Research, 2022, 29(6): 242.

[32] Rocca-Smith J R, Whyte O, Brachais C H, et al. Beyond biodegradability of poly(lactic acid): physical and chemical stability in humid environments [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(3): 2751–2762.

[33] Rocca-Smith J R, Chau N, Champion D, et al. Effect of the state of water and relative humidity on ageing of PLA films [J]. Food Chemistry, 2017, 236: 109–119.

[34] Zaaba N F, Jaafar M. A review on degradation mechanisms of polylactic acid: hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation [J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60(9): 2061–2075.

[35] Bao Lin, Cui Xuejing, Zeng Tao, et al. Incorporation of polylactic acid microplastics into the carbon cycle as a carbon source to remodel the

endogenous metabolism of the gut [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2025, 122(19): e2417104122.

[36] Sun Peng, Liu Kelan, Dong Cunjun, et al. Optimizing polylactic acid: synthesis, properties, and regulatory strategies for food packaging applications [J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2025, 19(3): 19.

[37] 王琛, 丁可青, 周徵艺. 3D 打印聚乳酸灯饰产品的设计应用[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(10): 72–76.
Wang Chen, Ding Keqing, Zhou Zhengyi. Design and application of 3D printing polylactic acid lighting products [J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10): 72–76.

[38] 李新芳, 黄旭平, 洪鹏, 等. 生物降解聚乳酸复合材料的增韧增透性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(7): 157–161, 166.
Li Xinfang, Huang Xuping, Hong Peng, et al. Study on toughness and transparency of biodegradable polylactic acid composites [J]. New Chemical Materials, 2024, 52(7): 157–161, 166.

[39] Muthui Z W, Kamweru P K, Nderitu F G, et al. Polylactic acid (PLA) viscoelastic properties and their degradation compared with those of polyethylene [J]. International Journal of Physical Sciences, 2015, 10(21): 568–575.

[40] 李万隆. 熔体微分电纺聚乳酸纤维膜双向拉伸增强研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024: 1-17.
Li Wanlong. Study on bidirectional tensile strengthening of polylactic acid fiber film by melt differential electrospinning [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024: 1-17.

[41] 秦杰, 杨乐, 王姿懿, 等. 改性蓖麻油/聚乳酸共混材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(6): 76–82.
Qin Jie, Yang Le, Wang Ziyi, et al. Preparation and performance study of modified *Castor* oil/polylactic acid blended materials [J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(6): 76–82.

[42] Jiang Jiacheng, He Zhen, Yin Wang, et al. Enhancing the toughness of poly(lactic acid) with a novel, highly flexible and biodegradable polyester: poly(ethylene adipate-co-terephthalate) terephthalate [J]. Journal of Polymer Research, 2024, 31(6): 151.

[43] Tao Sijing, Qiang Zhe, Ren Jie. Combined use of additives for improving heat resistance and processability of stereo complex crystallization polylactic acid [J]. Polymer International, 2025, 74(5): 465–476.

[44] Zhao Xipo, Liu Jinchao, Li Juncheng, et al. Strategies and techniques for improving heat resistance and mechanical performances of poly(lactic acid) (PLA) biodegradable materials [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 218: 115–134.

[45] Zhang Lei, Zhao Guoqun, Chen Zhiping, et al. Chirality hierarchical transfer in homochiral polymer crystallization under high-pressure CO_2 [J]. Nature Communications, 2024, 15: 7231.

[46] 肖文昊, 武靖博, 林江华, 等. 羟基官能化结构成核剂对聚乳酸结晶行为的影响及其机制[J]. 塑料科技, 2025, 53(12): 172–178.
Xiao Wenhao, Wu Jingbo, Lin Jianghua, et al. Effect and its mechanisms of hydroxyl-functionalized structural nucleating agents on crystallization behavior of polylactic acid [J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(12): 172–178.

[47] 严笔涛, 马金莲, 刘婉玉, 等. PLA/PBST/Talc-TA复合材料制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 121–126.
Yan Bitao, Ma Jinlian, Liu Wanyu, et al. Study on preparation and properties of PLA/PBST/talc-TA composites [J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(8): 121–126.

[48] 甄琪, 秦子轩, 张恒, 等. 医疗包装用聚乳酸熔喷超细纤维材料的退火工艺研究[J]. 中国塑料, 2025, 39(6): 24–30.
Zhen Qi, Qin Zixuan, Zhang Heng, et al. Study on annealing process of polylactic acid melt blown microfibrous for medical packaging [J]. China Plastics, 2025, 39(6): 24–30.

[49] Jariyasakoolroj P, Kumsang P, Phattarateera S, et al. Enhanced impact resistance, oxygen barrier, and thermal dimensional stability of biaxially processed miscible poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) thin films [J]. Polymers, 2024, 16(21): 3033.

[50] Sang Zihong, Chen Yuan, Li Yue, et al. Simultaneously improving stiffness, toughness, and heat deflection resistance of polylactide using the strategy of orientation crystallization amplified by interfacial interactions [J]. Polymer Crystallization, 2018, 1(1): 1–12.

[51] 陈实. 聚乳酸基静电纺丝载药纤维膜的构筑及其药物释放与抗菌性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2025: 1-5.
Chen Shi. Construction of PLA-based electrospun drug-loaded fiber membrane and its drug release and antibacterial properties [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2025: 1-5.

[52] 曹祥薇, 邓少鹏, 李世建, 等. 新型烟草用聚乳酸降温段挤塑加工[J]. 橡塑技术与装备, 2022, 48(4): 66–69.
Cao Xiangwei, Deng Shaopeng, Li Shijian, et al. Extrusion processing of polylactic acid cooling section for new tobacco [J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2022, 48(4): 66–69.

[53] Bing Xiaohu, Ma Wenyu, Wu Minghui, et al. Lightweight, strong and high heat-resistant poly(lactide acid) foams *via* microcellular injection molding with self-assembly nucleating agent [J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2024, 42(6): 739–750.

[54] Ortega Z, Douglas P, Hanna P R, et al. Characterization of PLA sheets prepared by stretching under different conditions: influence of reprocessing and establishing optimal conditions [J]. Materials, 2023, 16(14): 1–32.

[55] 张晔, 崔立东. 草莓保鲜膜的制备与性能研究[J]. 森林工程, 2025, 41(3): 555–564.
Zhang Ye, Cui Lidong. Preparation and properties study of strawberry cling film [J]. Forest Engineering, 2025, 41(3): 555–564.

[56] 晏宸然. 用于食品包装的聚乳酸膜的制备及性能研究[D]. 成都: 成都大学, 2020: 41-41.
Yan Chenran. Preparation and study on polylactic acid filmfor food preservation packaging [D]. Chengdu: Chengdu University, 2020: 41-41.

[57] Loyo C, Moreno-Serna V, Fuentes J, et al. PLA/CaO nanocomposites with antimicrobial and photodegradation properties [J]. Polymer Degradation and Stability, 2022, 197: 109865.

[58] Rihayat T, Hadi A E, Aidy N, et al. Biodegradation of polylactic acid-based bio composites reinforced with chitosan and essential oils as anti-microbial material for food packaging [J]. Polymers, 2021, 13(22): 4019.

[59] Stepczyńska M. Influence of active compounds on the degradation of polylactide biocomposites [J]. Polimery/Polymers, 2019, 64(6): 410–416.

[60] Hernández-García E, Vargas M, Chiralt A, et al. Biodegradation of PLA-PHBV blend films as affected by the incorporation of different

phenolic acids [J]. Foods, 2022, 11(2): 243.

[61] 王琼玉, 黄伟豪. 金属-多酚网络在果蔬保鲜中的应用研究进展[J]. 塑料包装, 2025, 35(2): 61–63, 95.
Wang Qiongyu, Huang Weihao. Research progress on the application of metal-phenolic networks in the preservation of fruits and vegetables [J]. Plastics Packaging, 2025, 35(2): 61–63, 95.

[62] 孙文涛, 龚佳荣, 刘新宇, 等. 聚胍接枝二氧化钛抗菌剂改性聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯/聚乳酸生物降解保鲜膜的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(11): 29–39.
Sun Wentao, Gong Jiarong, Liu Xinyu, et al. Preparation and properties of PBAT/PLA antimicrobial cling films with polihexamethylene guanidine functionalized titanium dioxide as antimicrobial agent [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(11): 29–39.

[63] 王金瑞, 贺燕燕, 程文喜, 等. 聚乳酸抗菌复合材料的研究进展[J]. 精细化工, 2026, 43(4): 722-732..
Wang Jinrui, He Yanyan, Cheng Wenxi, et al. Research progress on antimicrobial polylactic acid composites [J]. Fine Chemicals, 2026, 43(4): 722-732.

[64] 赖英萍. 柠檬酸壳聚糖复合膜的制备及其应用研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2021: 24-42.
Lai Yingping. Study on preparation and application of citric acid chitosan composite membrane [D]. Xiamen: Xiamen University, 2021: 24-42.

[65] Ncube L K, Ude A U, Ogunmuyiwa E N, et al. Environmental impact of food packaging materials: a review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials [J]. Materials, 2020, 13(21): 4994.

[66] Kulkarni A, Narayan R. Effects of modified thermoplastic starch on crystallization kinetics and barrier properties of PLA [J]. Polymers, 2021, 13(23): 4125.

[67] Naser A Z, Deiab I, Darras B M. Poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review [J]. RSC Advances, 2021, 11(28): 17151–17196.

[68] 罗毅诚, 李亚娜, 罗瑞芬. PLA 和 PE 包装袋对西兰花贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 12–15.
Luo Yicheng, Li Yana, Luo Ruifen. Effects of PLA and PE packaging bags on storage quality of broccoli [J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 12–15.

[69] 何依谣. 聚乳酸/纳米纤维素可降解食品包装薄膜的研究及其在西兰花保鲜中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 34-48.
He Yiyao. Study on poly (lactic acid)/nanocrystalline cellulose biodegradable food packaging films and the application of broccoli preservation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 34-48.

[70] 李密. 聚乳酸功能复合膜的设计、开发与在生鲜食品中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 26-35.
Li Mi. The design and fabrication of polylactic acid functional composite membrane and its application in fresh food [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021:26-35.

[71] Cvek M, Paul U C, Zia J, et al. Biodegradable films of PLA/PPC and curcumin as packaging materials and smart indicators of food spoilage[J]. ACS applied materials & interfaces, 2022, 14(12): 14654–14667.

[72] Chiu I, Yang Tianxi. Biopolymer-based intelligent packaging integrated with natural colourimetric sensors for food safety and sustainability [J]. Analytical Science Advances, 2024, 5(5–6): e2300065.

[73] Said N S, Lee W Y. Development and characterization of pH-responsive Schiff base-infused pectin/PLA bilayer films for active fruit preservation packaging [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2025, 50: 101563.

[74] Liu Linze, Wu Yincai, Yun Xueyan, et al. UV-barrier poly(lactic acid) film with light-stabilized Eu complexes as filler [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 271: 132529.

[75] Liu Chengkai, Wang Dongmei, Li Yanbo, et al. A new strategy for the preparation of polylactic acid composites with UV resistance, light conversion, and antibacterial properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 135013.

[76] 陈爱豪, 依克拉木·吉力力, 甄卫军. 聚乳酸/改性水滑石吹塑薄膜的制备工艺及其紫外老化行为研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(1): 1–9.
Chen Aihao, Yikelamu　Jilili, Zhen Weijun. Study on preparation process and ultraviolet aging behavior of poly(lactic acid)/modified layered double hydroxides blown molding film [J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(1): 1–9.

[77] Li Pengfei, Huang Yun, Lan Lidan, et al. UV/blue-light-blocking polylactide films derived from bio-sources for food packaging application [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 306: 141751.

[78] Devi N D, Tiwari R, Goud V V. Cultivating *Scenedesmus* sp. on substrata coated with cyanobacterial-derived extracellular polymeric substances for enhanced biomass productivity: a novel harvesting approach [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2023, 13(4): 2971–2983.

[79] Chen Hanyu, Cheng Yifan, Moraru C I. Blue 405 nm LED light effectively inactivates bacterial pathogens on substrates and packaging materials used in food processing [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 15472.

[80] He Zhipeng, Kim J H, Yonezawa S. Controlled hydrophilic–hydrophobic transition of PET films via fluorination and drying [J]. Physchem, 2025, 5(4): 43.

[81] 吴单, 王婷兰, 王婧琳, 等. 一种基于立构复合及自组装方法构筑的耐受性疏水表面[J]. 应用化学, 2019, 36(6): 622–630.
Wu Dan, Wang Tinglan, Wang Jinglin, et al. A durable hydrophobic surface fabricated through stereo complexation and self-assembly [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2019, 36(6): 622–630.

(责任编辑: 韩晓红　蔡世佳)