

聚乳酸基可生物降解薄膜在食品包装领域的研究进展

杨辉¹, 李立^{2*}

(1. 信阳职业技术学院 旅游学院, 河南 信阳 464000; 2. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306)

摘要: 通过对当前聚乳酸 (Polylactic Acid, PLA) 基可生物降解薄膜在食品包装领域的最新研究进行总结, 为解决传统石油基塑料难以降解、污染环境的问题, 以及促进 PLA 基可生物降解食品包装膜的进一步发展提供指导和参考。介绍了 PLA 材料的特性、PLA 基可生物降解薄膜的制备方法, 重点对用于食品包装的 PLA 多糖基薄膜、PLA 蛋白质基薄膜、PLA 植物提取物和精油基薄膜、PLA 纳米材料基薄膜以及 PLA 合成聚合物基薄膜的研究进行了综述。PLA 基复合膜在保留可生物降解性的同时, 具有良好的力学性能、物理特性以及生物活性, 可有效延长贮存食品货架期。这些研究为开发兼具高性能和多功能的 PLA 基可生物降解薄膜提供了理论支撑, 同时还为其实现大规模工业化生产指明了方向。

关键词: PLA; 食品包装; 可生物降解; 货架期

中图分类号: TB484

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)09-0052-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.007

Research Progress of Polylactic Acid-based Biodegradable Films in Food Packaging

YANG Hui¹, LI Li^{2*}

(1. School of Tourism, Xinyang Vocational and Technical College, Henan Xinyang 464000, China;

2. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the latest advancements in polylactic acid (PLA)-based biodegradable films for food packaging, to address the environmental challenges posed by non-degradable petroleum-based plastics and provide guidance for the further development of PLA-based biodegradable packaging materials. The characteristics of PLA materials and preparation methods of PLA-based biodegradable films for food packaging were introduced. The review specifically focuses on research progress in food packaging applications of PLA polysaccharide-based films, PLA protein-based films, PLA plant extracts and essential oils-based films, PLA nanomaterial-based films, and PLA synthetic polymer-based films. PLA-based composite films maintain biodegradability while demonstrating excellent mechanical properties, physical characteristics, and bioactivity, effectively extending the shelf life of packaged foods. These studies provide theoretical support for developing high-performance multifunctional PLA-based biodegradable films and indicate directions for achieving large-scale industrial production.

KEY WORDS: polylactic acid (PLA); food packaging; biodegradable; shelf life

近年来, 全球塑料消费量持续攀升, 其中包装材料每年消耗掉近 40% 的塑料^[1], 食品包装作为塑料的主要应用领域, 其产生的不可降解废弃物在海洋、土壤中形成持久性“白色污染”, 并通过微塑料颗粒侵入

食物链, 对人类健康构成潜在风险^[2]。我国已相继出台多个关于“限塑令”的政策, 包括《关于进一步加强塑料污染治理的意见》(2020 年)《“十四五”塑料污染治理行动方案》等, 并明确到 2025 年大幅减少塑料

收稿日期: 2025-03-11

基金项目: 上海市科委科技创新行动计划 (23N31900200)

*通信作者

制品的使用。欧盟于 2019 年 6 月通过《欧盟一次性塑料禁令》, 在 2024 年进入全面实施阶段。美国加州从 2026 年 1 月 1 日起, 超市和杂货店将全面禁止塑料购物袋。尽管如此, 但以聚乙烯 (Polyethylene, PE)、聚丙烯 (Polypropylene, PP) 为代表的传统石油基塑料因成本低廉、加工性能优异等特点, 依然在食品包装领域被广泛应用^[3]。在此背景下, 开发可快速生物降解以及环境友好型食品包装材料, 成为破解“白色污染”的有效途径。

可生物降解材料是指在特定环境条件 (如堆肥、土壤、水体) 中, 通过微生物 (细菌、真菌等) 的生物代谢作用, 能够被完全分解为水、二氧化碳、甲烷或生物质等自然物质的材料^[4]。按照材料来源与合成方式的差异, 可生物降解材料通常被划分为 3 类: 天然生物基材料, 如多糖类、蛋白质类以及油脂类等; 化学合成类材料, 如 PLA、聚琥珀酸丁二酯 (Polybutylene Succinate, PBS) 和聚己内酯 (Polycaprolactone, PCL) 等; 微生物合成类材料, 如聚羟基脂肪酸酯 (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) 等^[5-6]。相比传统塑料, 可生物降解材料具有可持续性、可生物降解性、环境友好性、可回收性、良好的生物相容性以及可减少化石燃料依赖等优势^[7]。我国《“十四五”塑料污染治理行动方案》中提出要出台生物降解塑料标准, 科学稳妥推广塑料替代产品。虽然《欧盟一次性塑料禁令》将可生物降解材料也包括在内, 短期内该禁令限制了可生物降解材料的推广, 但长期会促进材料性能突破、应用场景多元化和产业链升级。

PLA 因其良好的生物降解性、生物相容性、抗紫外线辐射性、热加工性以及透明性, 被认为是理想的食品环保包装基材^[8-9]。然而, 单一组分 PLA 薄膜在力学性能、阻隔性以及物理特性等方面存在明显短板, 制约了其应用范围^[10]。当前的研究主要是通过引入功能性添加剂或构建共混体系来提高其性能, 并赋予其抗菌、抗氧化等生物活性, 从而进一步拓展其在食品包装领域的应用潜力^[11]。本文主要综述了 PLA 基复合薄膜作为食品包装材料的研究进展, 重点介绍了 PLA 的特性, PLA 基薄膜的制备方法, 以及根据复合材料的不同, 分类阐述了多种 PLA 复合薄膜及其在食品包装中的应用, 为进一步的相关研究提供参考。

1 PLA 特性

PLA 是一种可生物降解的热塑性塑料, 由玉米、小麦、甘蔗、大米等可再生资源中的糖类经发酵生成乳酸单体, 再通过聚合形成线性生物基聚酯链^[4]。良好的热加工性, 以及优异的化学、力学和物理性能, 使得其应用范围广泛^[8]。

PLA 具有弹性低、刚性高、脆性大的特点^[12], 其力学性能接近传统塑料, 但冲击强度和断裂伸长率

低于 PP、PE 和聚对苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene Terephthalate, PET)。其拉伸强度和杨氏模量与 PET 相当, 但韧性不足限制了其在高应力塑性变形场景的应用^[13]。PLA 的力学性能存在可调性, 根据结晶度、分子量、聚合物结构、材料配方 (如增塑剂、共混物、复合材料等) 及加工工艺的不同, 其性能可从柔软弹性材料跨越至高刚性材料^[14]。

PLA 是一种半结晶或无定形聚合物, 其玻璃化转变温度 (t_g) 约为 58 °C, 熔点 (t_m) 范围为 130~230 °C。其热稳定性与分子量、分子链结构中异构体的配比相关。纯聚左旋乳酸 (Poly-L-Lactic Acid, PLLA) 或者聚右旋乳酸 (Poly-D-Lactic Acid, PDLA) 的 t_m 在 170~180 °C, 当 PDLA 与 PLLA 的质量比为 1:1 时, 可形成 t_m 达 230 °C 的立构复合晶体^[15]。

PLA 表现出的阻隔性能优于聚苯乙烯、PE 和 PP, 但逊色于 PET^[16]。其阻隔性能主要受结晶度的影响, 较高的结晶度通常会提高 PLA 薄膜的阻隔性。这是因为它增大了聚合物基质内部的曲折度, 从而减缓了水蒸气和气体分子的扩散速度^[3]。

PLA 的降解可分为 2 个阶段。在最初的非生物降解阶段, PLA 的酯键通过水解断裂, 导致低分子量乳酸低聚物的释放。这一阶段可能很慢, 通常发生在温度高于 30 °C 的高湿度环境中^[17]。在第二阶段, 即生物降解阶段, 在有氧条件下, 最终分解为二氧化碳、水和生物质; 无氧条件下则生成甲烷、烃类及生物质。PLA 的分子量、结晶度、 t_g 和 t_m , 均会显著影响其降解行为。此外, 环境因素 (如湿度、温度、pH 值以及酶或微生物) 也在 PLA 的降解过程中起关键作用^[15,18]。

2 PLA 基可生物降解薄膜的制备方法

2.1 挤出流延法

挤出流延法是在流延设备上通过狭缝模具挤出熔融聚合物, 并通过高速冷却辊冷却成形的过程。该法生产速度较快, 适合大规模工业化生产, 且生产的薄膜具有良好的光学性能和透明度。然而, 当生产形状复杂或较厚的薄膜时, 有一定的局限性^[8]。Laorenza 等^[19]以 PLA 和聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯 (Polybutylene Adipate Terephthalate, PBAT) 为基材, 并加入生姜油和柠檬皮油, 通过挤出流延法制备了活性包装薄膜。精油提高了聚合物的相容性, 改变了结晶度, 提升了薄膜的柔韧性, 同时赋予薄膜抗菌活性和防止虾黑变的功效。

2.2 挤出吹膜法

挤出吹膜是薄膜大规模生产最常用的方法, 主要用于生产管状薄膜, 适用于制作袋子和包装袋。其工艺过程包括熔融树脂、通过环形模具、空气注入、膨胀拉伸、冷却固化、压平、定型收卷, 进而得到成品薄膜。主要优势在于通过调节空气压力和拉伸速度可

以轻松控制薄膜厚度。与挤出流延法相比,生产的薄膜往往透明度较低^[3]。Zibaei等^[20]应用挤出吹膜法,同时添加聚烯烃弹性体(Polyolefin Elastomer, POE)、硒纳米颗粒(Selenium Nanoparticles, SeNPs)以及作为增塑剂的柠檬酸三乙酯(Triethyl Citrate, TEC),制备了一种PLA/POE/SeNPs复合膜,薄膜的阻隔性、力学性能以及抗氧化性得到提高,可用于食品包装。

2.3 溶液浇铸法

溶液浇铸法也是一种较常用的制备薄膜的方法。其主要工艺流程:将制成的生物聚合物溶液倒入模具中,并通过干燥去除溶剂,从而形成薄膜。该方法具有显著的优势,包括操作简单、成本效益高以及无需专用设备。然而,它也存在一些缺点,包括加工时间较长、可实现的形状和形式灵活性有限^[21]。Liang等^[22]制备了一种由银纳米颗粒(Silver Nano-particles, AgNPs)、环糊精金属有机框架(Nano-sized Cyclodextrin Metal-organic Frameworks, γ -CD-MOFs)和PLA组合的新型包装薄膜 AgNPs@ γ -CD-MOFs/PLA,其对照拉氏假单胞菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌率均超过80%,表现出良好的抗菌能力。此外,与PE和PLA相比,AgNPs@ γ -CD-MOFs/PLA能有效抑制双孢蘑菇的细菌性褐斑病,并在储存12 d后保持更好的外观。

2.4 静电纺丝法

静电纺丝是制备亚微米或纳米级聚合物纤维的一种多功能、经济高效的技术。主要由4部分组成:高压电源、恒流注射泵、喷丝头、导电接收装置。其基本原理涉及电场力和表面张力的相互作用。在高压电场的作用下,含有聚合物的溶液在针头上被拉伸,形成泰勒锥结构。随着电场的增加,液滴内部的电荷分离,导致表面张力增加,使液滴进一步拉伸成带电射流。这种射流携带大量聚合物分子,以极高的速度飞向接收装置,形成细密且均匀的纤维束。该法制备的纳米纤维具有直径范围大、孔隙率高、比表面积大、力学性能优异等优点。然而,有限的产能仍然是当前工业化应用的一个挑战^[23]。Zhao等^[24]使用静电纺丝法,将天然埃洛石纳米管(Halloysite Nanotubes, HNTs)负载 Cu^{2+} 作为抗菌剂制备了PLA/HNTs-Cu复合纳米纤维膜。该复合纳米纤维具有良好的热稳定性、力学性能以及疏水性。抑菌实验结果表明,PLA/HNTs-Cu对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑制率分别为98.31%和97.80%,呈现出优异的抑菌效果。通过草莓保鲜实验发现,覆盖复合纳米纤维膜的草莓,在外观、质量损失和硬度方面均优于对照组、纯PLA组和PLA/HNTs组。

2.5 3D打印法

3D打印是一种通过计算机辅助设计模型,将数字模型切片为多层,然后通过3D打印机逐层打印,

最终形成三维实体的技术。该方法灵活性高,可定制薄膜形状、尺寸和功能,适合小批量个性化生产。但也存在一些局限性,如打印速度慢、材料选择有限和设备成本高等^[25]。PLA是一种具有良好加工性能和力学性能的热塑性材料,可用于3D打印^[26]。Gauss等^[27]将纳米纤维化纤维素接枝到PLA中,并通过3D打印制备了具有优异的拉伸性能和热机械稳定性的复合材料。Petousis等^[28]将PLA作为基材,纤维素纳米纤维和氧化亚铜(Cu_2O)为纳米添加剂,通过3D打印技术制备了复合材料。结果表明,该材料在拉伸和弯曲性能上优于纯PLA,同时对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌表现出优异的抗菌性能。

总之,挤出流延法生产薄膜透明度高,工艺成熟,可连续化生产,适合工业化。挤出吹膜法虽设备复杂,工艺控制难度大,但可连续化生产,提升产率,在规模化生产中优势明显。溶液浇铸法因其具有对设备依赖性小、工艺简便的特点,在实验阶段应用广泛,但生产周期长,无法连续化,不适合工业化。静电纺丝技术可负载活性成分,功能性强,但设备成本较高,且生产效能偏低。3D打印适合个性化包装以及小批量定制,但打印速度慢,材料利率低,成本高,难以规模化生产。

3 用于食品包装的PLA基可生物降解薄膜

在食品包装领域,PLA凭借出色的可生物降解性,以及良好的热加工性,使其成为制膜材料的研究热点,但柔韧性不足、脆性大、阻隔性差以及成本高等缺点限制了其应用与发展。研究发现,将PLA与多糖^[29]、蛋白质^[30]、植物提取物和精油^[31-32]、纳米材料^[33]以及其他可生物降解聚合物^[34]进行复合改性,不仅可以提高薄膜的力学、屏障性能,赋予其多种生物活性,还可以保留其生物降解性和安全性,从而拓展其应用范围。表1列出了PLA基可生物降解薄膜在食品包装中的应用案例。

3.1 PLA-多糖基薄膜

3.1.1 PLA-淀粉复合膜

淀粉作为自然界广泛存在的一类由葡萄糖分子聚合而成的多糖类物质,具有良好的生物相容性、成膜性、生物可降解性,且成本低廉和无毒害等^[5]。将PLA与淀粉结合可增强其韧性,同时保留可生物降解特性,并降低成本。

多种不同来源的淀粉均被应用于制备PLA基薄膜。Yusoff等^[46]研究了以PLA与木薯淀粉(Tapioca Starch, TS)为原料来制备生物复合膜,结果表明,TS的加入显著提高了共混物的拉伸强度。Godoy等^[47]将牛油果籽淀粉经乙酰乙酸叔丁酯改性后,与PLA

进行了复合。与纯 PLA 相比, 复合材料的断裂伸长率从 3.35% 提高到 27.80%, 紫外线阻隔性能从 16.21% 提高到 83.86%, 水蒸气透过率和氧气透过率分别降低了 54.77% 和 97.53%。Zhou 等^[35]使用了豌豆淀粉 (Pea Starch, PS) 和 PLA 制备了 PS/PLA 双层膜。该双层膜的柔韧性、阻隔性能均优于 PLA 膜。通过保鲜实验发现, 该双层膜降低了圣女果的质量损失率, 延长了有机酸和维生素 C 的保留时间。

为了提升淀粉的加工性能, 通常将淀粉原料进行改性而制成热塑性淀粉 (Thermoplastic Starch, TPS),

因其能改善 PLA 的物理性能而受到广泛关注。Souri^[48]等研究发现, 在 PLA 基料中加入质量分数为 60% 的 TPS 时, 薄膜断裂伸长率增加了 77%。Zhao 等^[36]制备了 TPS/PLA/PBAT 复合膜来控制草菇的自溶, 通过调节 TPS 添加量, 对薄膜透湿性进行调控, 进而实现对包装内部微环境湿度的控制。添加 30% TPS 的复合膜对草菇自溶的抑制作用最强, 能有效延缓草菇的自由水、可溶性固形物、质量损失率和多酚氧化酶的增加, 使草菇的货架期由 24 h 延长到 72 h。PLA 与淀粉复合后断裂伸长率的提升见表 2。

表 1 PLA 基可生物降解薄膜在食品包装中的应用
Tab.1 Applications of PLA-based biodegradable films in food packaging

添加成分	食品	类型	效果	参考文献
豌豆淀粉	圣女果	柔韧性、阻隔性改善	断裂伸长率提升 123.7%, 透氧性降低 93.5%。降低了圣女果的质量损失率, 延长了有机酸和维生素 C 的保留时间	[35]
热塑性淀粉、PBAT	草菇	调节透湿性	通过调节热塑性淀粉含量调节透湿性, 将草菇的保质期从 24 h 延长至 72 h	[36]
壳聚糖	鱼片	抗菌	对大肠杆菌、荧光假单胞菌和金黄色葡萄球菌的抑制率超过 95%, 将 4 °C 储存鱼片的保质期延长至 9 d 以上	[37]
微晶纤维素	兰州百合	抗氧化	多酚氧化酶和过氧化物酶活性较对照降低 30.02% 和 8.49%~12.51%, 有效延缓了兰州百合采后衰老	[38]
酪蛋白、黄芩苷	草莓	吸湿溶胀性	吸水溶胀后散发呼吸热, 显著延长了草莓的货架期	[39]
印度藏茴香精油、香草精油	华夫饼	抗菌	第 30 天真菌计数 < 1.00 log(CFU/mL), 将华夫饼保质期延长至 30 d	[40]
桑葚色素、二氧化钛纳米颗粒	猪肉	智能指示标签	根据肉制品 pH 值变化引发的标签颜色改变实时监测冷鲜猪肉的鲜度	[41]
单宁酸	猪肉	抗菌	大肠杆菌、荧光假单胞菌和金黄色葡萄球菌的抑菌效果分别为 86%、90% 和 96%, 将冷藏猪肉保质期延长了 5 d	[42]
纳米壳聚糖、唇香草精油	彩虹鳟鱼片	抗氧化、力学性能改善	精油浓度越高增塑作用越明显, DPPH 清除率最高达到 84.33%, 有效延缓了彩虹鳟鱼片的氧化腐败过程	[43]
PBS、小高良姜精油	熟糯米饭	抗菌性	高 PBS 比例薄膜释放更多精油, 抑菌效果更佳, 将熟糯米饭的保质期延长 2 倍以上	[44]
PCL	草莓	改善柔韧性和耐水性	草莓表现出较低的产品质量损失、较好的保色性, 0~3 °C 保鲜期达到 64 h	[34]
PBAT、生姜油和柠檬皮油	虾	柔韧性改善、抗菌	断裂伸长率提升 93.24% 以上, 对蜡样芽孢杆菌显示出抗菌活性、有效地抑制了虾储存 3~6 d 的黑变	[19]
聚羟基丁酸酯、茴香精油	牡蛎	力学性能、抗菌	力学性能与乙烯-乙醇共聚物相当。有效遏制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌增殖, 将牡蛎保质期延长了 2~3 d	[45]

表 2 PLA 与几种淀粉复合后断裂伸长率
Tab.2 Changes in elongation at break of PLA composites with various starches

淀粉来源	复合形式	断裂伸长率	参考文献
TPS	PLA/TPS 共混 (TPS 60%)	增加 77%	[48]
改性牛油果籽淀粉	PLA/改性牛油果籽淀粉 (20%) 共混	由 3.35% 提高至 27.80% (增加 730%)	[47]
豌豆淀粉	PLA/豌豆淀粉 (50%), 双层膜	由 7.20% 提高至 15.11% (增加 123.7%)	[35]
马铃薯改性淀粉	PLA/马铃薯改性淀粉 (50%), 共混	增加 300%	[49]

3.1.2 PLA-壳聚糖复合膜

壳聚糖是一种由甲壳素脱乙酰基的天然高分子多糖,具有良好的成膜性、抗菌性、生物相容性以及可降解性,已被广泛应用于食品保鲜与包装领域^[50]。研究发现,壳聚糖与 PLA 共混后,薄膜不仅具备抗菌活性,同时力学性能也得到提高^[10]。

Chang 等^[37]制备了 PLA-壳聚糖薄膜,并将其应用于鱼片的保鲜包装。结果表明,添加 0.5%壳聚糖的 PLA 膜具有最好的力学性能、延展性和抗菌性,能够将 4℃储存鱼片的保质期延长至 9 d 以上。为了使薄膜具有更广谱的抗菌活性,研究者通常将 PLA 与壳聚糖以及其他多种活性成分进行复合,如将含有单宁酸和壳寡糖的明胶-壳聚糖溶液涂覆在 PLA 薄膜上^[51],以及通过多层复合的方式将壳聚糖、月桂酰精氨酸乙酯和纤维素纳米晶体与 PLA 进行结合^[52],均表现出对革兰氏阳性/阴性菌的有效抗菌活性。

也有研究者将其他活性成分与壳聚糖进行接枝来增强其活性,然后再与 PLA 进行复合。路冠茹等^[53]制备了黄酮接枝壳聚糖/PLA 复合膜,结果显示,与普通 PE 薄膜相比较,复合膜的水蒸气透过率和氧气透过率、透光率、抗拉强度更优,同时在储藏期间能有效抑制薏米仁脂质变化和菌落总数。Zhou 等^[54]开发了咖啡酸接枝壳聚糖/PLA 复合膜,对采后双孢蘑菇进行了包装研究,该活性膜可以通过调节膜脂代谢来提高双孢蘑菇采后品质。

3.1.3 PLA-纤维素复合膜

纤维素是植物细胞壁的主要组成成分,由葡萄糖单元经 β -1,4 糖苷键连接构成^[55]。天然纤维素资源丰富,可再生,价格低廉,又有较好的降解性和生物相容性,以及良好的力学性能,常作为增强组分加入聚合物中,制备出更优性能的复合材料^[56]。

Zhu 等^[57]制备的野葛根微晶纤维素/PLA 复合膜断裂伸长率是纯 PLA 薄膜的 1.6 倍,同时具有更低的吸水率,更好的热稳定性,更高的紫外线屏蔽性能以及可接受的透明度。Wang 等^[58]将肉桂醛(Cinnamaldehyde, CEO)加入 PLA 溶液中,均匀涂覆在改性纤维素片上,制备了 CEO@PLA/纤维素复合材料。与纯 PLA 薄膜相比,该复合材料的水接触角增大,吸水率和水蒸气透过率降低。CEO 释放初期较快,随后逐渐减缓,呈现出良好的缓释效果。此外,抑菌实验表明,该复合材料对黑曲霉和哈茨木霉具有显著的抗菌效果,且抗菌效果随 CEO 浓度的增加而增强。使用复合材料包装的香菇在储存期间,颜色更亮,硬度更高,微生物数量更少,有效延长了香菇的货架期。

3.2 PLA-蛋白质基薄膜

从植物、动物或微生物中获得的蛋白质也可用于制备具有优异力学和阻隔性能的 PLA 基蛋白质薄膜。

植物性蛋白价格低廉,在改善 PLA 性能的同时,能够显著降低成本。Biswas 等^[59]制备了 PLA-棉籽蛋白双层薄膜,与单层纯 PLA 膜相比较,棉籽蛋白层的加入降低了成本,并在一定程度上增加了薄膜的拉伸性和不透明度。Dodange 等^[60]使用苦豌豆种子蛋白和 PLA 制备了双层膜,该双层薄膜表现出更好的断裂伸长率。

类似地,动物及微生物蛋白与 PLA 复合用于活性包装的研究也有报道。Khodanazary 等^[61]将含有氧化锌纳米颗粒(ZnO Nanoparticles, ZnONPs)的乳清分离蛋白(Whey Protein Isolated, WPI)与 PLA 复合,制备了双层活性膜,WPI 增强了 PLA 的氧气阻隔性,ZnONPs 赋予薄膜良好的抗菌和抗氧化活性。该活性膜显著抑制了鲤鱼鱼片的微生物增殖和脂质氧化,将冷藏货架期延长至 12 d。Gulzar 等^[62]将添加乳酸链球菌素的明胶/壳聚糖纳米纤维溶液静电纺丝到 PLA 薄膜上形成涂层,经过处理的 PLA 薄膜的水蒸气透过率降低,同时拉伸强度提高,并具有良好的抗菌活性。以此薄膜制成的保鲜袋在 12 d 的储藏期内,有效延缓了冷藏亚洲鲈鱼片的微生物增长和脂质氧化,起到较好的保鲜效果。

3.3 PLA-植物精油/提取物基薄膜

3.3.1 PLA-植物精油复合膜

植物精油是一种有特殊气味且富含多种醛酮类和酚类的物质,具有抗菌、抗氧化等生物活性^[63]。将植物精油与 PLA 相结合,可起到增塑的作用^[16],同时通过调控薄膜中精油释放,以提升保鲜效果的方式备受研究者关注。

Wang 等^[64]开发了含有丁香精油(Clove Essential Oil, CEO)的双层 PLA 缓释膜,内层直接接触食品,扩散路径短,初始浓度梯度大,释放快速;外层需穿透内层才能释放,扩散路径延长,浓度梯度降低,释放速率减缓,精油释放路径如图 1 所示。CEO 增强了薄膜的拉伸强度、气体阻隔性,并赋予薄膜良好的抗紫外线、抗菌和抗氧化活性,同时能有效抑制黑鱼在储存过程中微生物的生长和蛋白质的分解。Zheng 等^[65]开发了含有牛至精油(Oregano Essential Oil, OEO)和蒙脱石(Montmorillonite, MMT)的缓释 PLA/PHA 活性包装。OEO 的增塑作用使薄膜的断裂伸长率从 23.36%提高到 65.80%。MMT 的添加减少了制备过程中 OEO 的损失,并实现了缓释。在河豚保鲜实验中,OEO 的缓慢释放有效抑制了鱼片储存期间的微生物生长和氧化变质,将河豚鱼片在冷藏条件下的保质期延长 2~3 d。Zhang 等^[66]设计了由 PLA 层和皮克林乳液(Pickering Emulsion, PE)层组成的双层薄膜。在 PE 层中,由大豆分离蛋白和壳聚糖纳米颗粒组成载体来负载复合精油(香芹酚和百里香酚(Carvacrol and Thymol, CT))。CT 显著提高了 PE 层

的稳定性, CT 含量越高, PE 层的微观结构越致密, 表面疏水性越强, 断裂伸长率越高, 阻水性也越好。当 CT 负载量为 8% 时, 薄膜显示出最低的水蒸气 ($(1.25 \pm 0.06) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和氧气透过性 ($(0.24 \pm 0.01) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 以及优异的抗氧化和抗菌性, 能将冷藏猪肉的保质期从 3 d 延长到 6 d, 保鲜效果如图 2 所示。

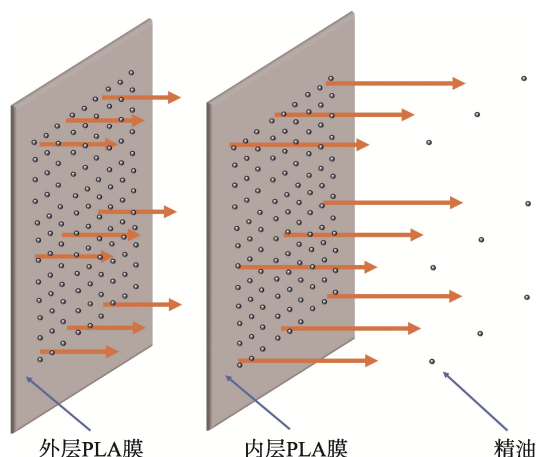


图 1 双层 PLA 薄膜精油的释放路径
Fig.1 Release pathway of essential oils in bilayer PLA films

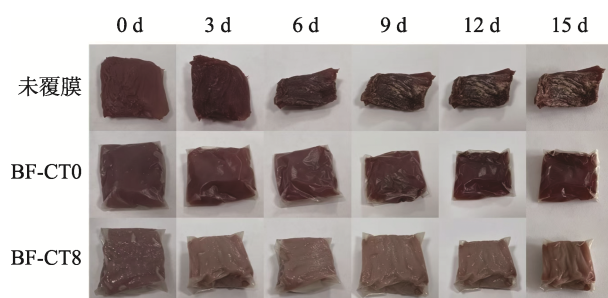


图 2 负载不同 CT 含量的 PLA 复合膜包装猪肉的外观变化^[66]

Fig.2 Appearance changes of pork packaged with PLA composite films containing different CT concentrations^[66]

3.3.2 PLA-植物提取物复合膜

植物提取物是通过物理、化学或生物学技术从植物中提取 1 种或多种具有生物活性的成分, 如多酚类、色素、生物碱及多糖等, 普遍具有显著的抗氧化、抗癌、抑菌和免疫调节等多种功效, 近年来提取物已被广泛地应用到食品保鲜中^[67]。Arruda 等^[68]将富含 β 酸的啤酒花提取物添加到 PLA 中进行研究, 该提取物的添加对于 PLA 的结晶度、力学性能以及热稳定性有一定的影响, 但提高了薄膜的抗氧化性和对紫外线阻隔性。此外, 抗菌结果表明, 薄膜对金黄色葡萄球菌和单核细胞增生李斯特菌具有显著的抑制作用。Andrade 等^[69]制备了负载绿茶多酚 (Green Tea Extracts, GTE) 和迷迭香多酚 (Rosemary Extracts, RE) 提取物的 PLA 薄膜, 并应用于杏仁和牛肉的包装。

结果显示, 负载多酚提取物的 PLA 薄膜表现出良好的抗氧化性能, 能够有效延缓食品的脂质氧化过程。其中, PLA-RE 膜在延长杏仁保质期方面表现出色, 而 PLA-GTE 膜则对牛肉的脂质氧化有较好的抑制作用。

近年来, pH 敏感型鲜度智能指示标签也是研究热点, 有研究者将植物提取物与 PLA 结合, 制备了 pH 敏感型智能指示标签。Xu 等^[70]利用静电纺丝技术制备了负载花青素 (Anthocyanin, CAN) 和季铵化壳聚糖 (Hydroxypropyltrimethyl Ammonium Chloride Chitosan, HACC) 的 PLA 膜。研究发现, 添加 6%CAN 后, 显著提升了薄膜的热稳定性、阻水性、抗菌性和抗氧化性, 但薄膜的刚度和气体阻隔性降低了。此外, 6%ACN/PLA/HACC 膜在 pH3-11 的缓冲溶液中都具有显著的颜色响应性能。在储存实验中, 6%ACN/PLA/HACC 膜能够有效指示蓝莓的新鲜度, 并显著降低蓝莓的腐烂率和质量损失率。

3.4 PLA-纳米材料基薄膜

为了提高 PLA 的力学性能、热稳定性以及结晶度, 通常使用纳米填料对 PLA 进行改性, 以制备 PLA 复合材料^[71]。在食品包装中, 将纳米活性成分融入包装材料, 开发出新型纳米活性包装, 可以更好地提升保鲜效果^[72]。

Liew 等^[73]将氧化石墨烯/氧化锌纳米复合材料添加到 PLA 中, 显著增强了 PLA 膜的力学性能、热稳定性和抗菌性能。Dejene 等^[74]向 PLA 中加入 ZnO NPs 和假香蕉纤维 (Enset Fibers, EFs), 以提高薄膜的力学性能、抗真菌活性和迁移性能。其中, 最优配方 (6.7% ZnO NPs 和 6% EFs) 将埃塞俄比亚传统面包英吉拉的保质期延长至 8 d, 远超通常的 2~3 d。

关于 PLA 纳米复合膜的安全性和生物降解性研究也有报道。为了降低银纳米颗粒 (Silver Nanoparticles, AgNPs) 给食品包装材料带来的安全风险和成本, Wu 等^[75]制备了一种 AgNPs-PLA 微球/PLA-热塑性聚氨酯 (Thermoplastic Polyurethane, TPU) 纳米纤维层次抗菌膜。该抗菌膜在低 AgNPs 含量下表现出优异的抗菌性能、力学性能和低细菌黏附性, 成功将草莓保鲜期延长至 7 d 以上, 且菌落总数保持在较低水平。Yanat 等^[76]将几丁质纳米晶体 (Chitin Nanocrystals, ChNC) 添加到 PLA 中制备了 ChNC/PLA 复合材料, 并研究了其生物降解性和迁移行为。研究结果表明, ChNC 的加入显著提高了 PLA 的结晶度, 且未对 PLA 的生物降解性产生负面影响。同时, ChNC/PLA 复合材料的迁移水平低于允许限值, 表明其在食品包装领域具有潜在的应用前景。

3.5 PLA-合成聚合物基薄膜

PLA 可以与各种可生物降解合成聚合物共混, 形成具有增强性能和特性的薄膜。PBS 是一种热塑性脂肪族生物聚酯, 具有良好的生物降解速率, PBS 的断

裂伸长率和热变形温度均高于 PLA^[77], 在 PLA 薄膜中加入 PBS, 使其在保持 PLA 强度的同时改变其韧性, 改善其结晶性, 并能保持其生物降解性, 使其更适合用于包装^[78]。Wongphan 等^[44]研究探讨了 PLA/PBS 聚合物比例和高良姜精油对薄膜的物理化学性质、力学性能和阻隔性能的影响, 结果表明, 80%PLA/20%PBS 薄膜表现出更高的相容性、增塑性、力学性能和阻隔性能。此外, 精油对 PLA 和 PBS 聚合物具有增塑作用, 同时赋予薄膜良好的抗菌性。

聚羟基丁酸酯 (Poly(3-hydroxybutyrate), PHB) 因可生物降解、气体阻隔性好, 成为食品包装首选生物基材料之一。其质地脆, 适用于刚性包装, 也能与 PLA 及添加剂等共混/挤, 经流延、吹膜工艺制备柔性包装^[79]。Miao 等^[45]开发了基于 PLA 和 PHB 的可生物降解薄膜。该薄膜的力学性能与乙烯-乙醇共聚物 (Ethanol Vinyl Alcohol, EVOH) 薄膜相当, 但氧气阻隔能力受到影响。在薄膜中添加茴香 (Fennel, FEN) 精油后制成的 PLA-PHB-FEN 薄膜展现出对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌增殖的有效遏制。PLA-PHB-FEN 薄膜包装的牡蛎中, 需氧菌和厌氧菌的数量均降低, 在保持牡蛎品质的同时, 将其保质期延长了 2~3 d。

聚(丁二酸丁二醇酯-共己二酸) (Poly(Butylene Succinate-co-hexamethylene Adipate), PBSA) 是一种脂肪族生物降解聚酯, 它具有高柔韧性、优异的冲击强度、良好的耐热性和可加工性, 其材料特性 (如密度、拉伸强度、刚度) 可与 PP、PET 和 PE 相媲美。与 PLA 共混不仅能提高延展性和韧性, 还能提高最终共混物的结晶率、加工性和黏弹性^[80]。Aliotta 等^[81]将 PLA 与 PBSA 进行混合, 并以不同的 PBSA 含量 (质量分数为 20%、30%、40%) 生产 PLA/PBSA 薄膜。发现随着 PBSA 含量的增加, 薄膜的延展性和抗撕裂性都有所提高。Yang 等^[82]研究发现, 添加了活性成分百里酚和香芹的 PLA-PBSA 活性薄膜的力学性能优于 PLA-PHB 和 EVOH 薄膜, 活性成分的释放增强了薄膜的抗菌和抗氧化活性。在冷藏条件下, 用 PLA-PBSA 薄膜包装的三文鱼片可延长 3~4 d 的贮藏期。

PCL 是一种可生物降解性的聚合物材料。PCL 与 PLA 相结合可以弥补 PLA 在水汽阻隔性能、刚性和热变形温度等方面的缺陷, 生产出具有更好的物理、力学和热性能的新型生物材料^[83]。为了解决 PLA 薄膜用于草莓保鲜时柔韧性差和耐水性不足、无法保持草莓风味品质的问题, Zhang 等^[34]将 PLA 分别与 PCL、PBS、PBAT、聚碳酸亚丙酯 (Polypropylene Carbonate, PPC)、聚(3-羟基丁酸-co-4-羟基丁酸酯) 5 种可生物降解聚合物制成薄膜, 研究内容包括薄膜的形态、机械特性和水蒸气阻隔效果。结果表明, 相比较其他 5 种薄膜, PLA-PCL 具有较好的相容性、柔韧性、断裂伸长率和拉伸强度, 且水蒸气透过率处

于草莓保鲜可接受范围内。在草莓保鲜过程中, PLA-PCL 薄膜具有更低的产品质量损失、合适的气体交换率和更好的色泽保持效果。

PBAT 是一种芳香族脂肪族共聚酯, 可生物降解, 具有高拉伸应变性, 是增韧 PLA 的重要材料。Zheng 等^[84]以 PBAT 和 PLA 为基材, PCL、聚乙二醇、纳米 TiO₂ 为相容剂, 纳他霉素为抗菌剂制成活性薄膜。结果表明, PBAT 与 PLA 紧密结合形成复合结构, 具有良好的化学相容性, 降低了 PLA 的结晶度。该活性薄膜具有较高的拉伸强度 (24.1~43.5 MPa) 和断裂伸长率 (85.8%~258.2%), 同时具备良好的表面疏水性和可生物降解性。在葡萄保鲜应用中, 能有效降低葡萄腐烂率, 保持其品质, 并抑制致病真菌生长。

天然多糖可提升 PLA 薄膜柔韧性, 原料可再生, 可赋予薄膜抗菌活性, 但吸湿性强。可通过溶液浇铸或挤出成形, 原料成本低, 工业化可行性高。蛋白质基 PLA 膜多采用多层结构, 可降低透氧性, 但蛋白质易变性热稳定性差, 且加工复杂, 需多层共挤或涂层工艺, 设备成本高。精油和提取物赋予 PLA 薄膜抗菌抗氧化等生物活性, 且精油能起到增塑的作用, 但精油易挥发, 影响食品风味, 提取物影响包装外观, 原料成本较高, 且加工时需考虑高温对活性成分的影响, 增加工艺复杂性。纳米材料可增强 PLA 薄膜力学性能、热稳定性、阻隔性以及抗菌活性, 但可能会引发食品安全风险, 且材料成本高, 易团聚, 工艺复杂, 工业化难度高。合成聚合物可提升 PLA 柔韧性和抗冲击强度, 但可能需要添加相容剂, 导致成本升高, 同时也可能影响降解速率, 可通过吹膜成形, 兼容现有加工设备, 工艺成熟, 适合规模化生产。

4 挑战与局限性

PLA 作为食品包装材料优势明显, 但目前市场上已实现规模化商用的案例还不多, 还有许多问题和困难需要克服。具体如下:

1) 大批量规模化生产难以实现。当前对 PLA 的改性研究大多停留在实验室小试阶段, 配方比例和工艺稳定性不足以支撑放大生产, 且很多改性添加成分未实现标准化, 若批量生产, 质量稳定的原料得不到保证。

2) 潜在风险。PLA 薄膜作为食品接触用包装材料, 其中添加的改性成分和加工助剂不可避免地会迁移到食品中, 对食品的安全性产生影响, 如纳米颗粒、加工助剂等带来的安全风险。目前国内外对 PLA 基薄膜中成分的迁移行为和安全风险研究尚不充分。

3) 影响感官品质。活性成分, 如植物精油和提取物等, 在起到抗菌抗氧化作用的同时, 可能会影响食品的风味、色泽、口感以及包装外观。

4) 较高的成本。由于原料乳酸的生产效率较低^[16], 导致当前 PLA 的生产成本远高于传统石油基塑料, 成本过高必然会降低消费者的接受意愿。

5 结语

PLA 因其良好的可生物降解性和生物相容性, 被广泛应用于食品包装领域。与传统石油基塑料相比, PLA 表现出韧性差、脆性大以及成本高等问题, 限制了其应用。为解决这些问题, 研究人员采用各种方法, 如添加增塑剂、纳米材料或与多种聚合物共混等来提高 PLA 基薄膜的性能。虽然这些方法目前取得了一些进展, 但目前多数研究仍停留在实验室阶段。未来的研究可集中在以下几个方面:

1) 对于已取得一定进展的研究, 可验证配方和工艺的稳定性, 向放大生产转移。

2) 开发新的生物基增塑剂 (如农业废弃物和粮食作物等), 在保证性能的同时, 确保良好的环境相容性和生物可降解性。

3) PLA 基薄膜中添加成分的迁移特性及其对食品安全性的研究。

4) 赋予 PLA 基薄膜更多有助于食品包装的功能, 如将活性包装与智能包装相结合等。

5) 有效提升 PLA 薄膜对活性成分的缓控释性能, 包括缓控释作用机理揭示, 以及多种活性成分同时存在对缓控释的影响等。

6) 降低活性成分对包装食品感官品质影响的研究。

7) 提高乳酸生产效率, 降低 PLA 成本。

尽管仍面临诸多挑战, 但相信随着研究的不断推进, 以及新材料、新技术设备和新工艺的不断涌现, 高性能 PLA 基可生物降解薄膜终将在食品包装领域展现更加广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] SHLUSH E, DAVIDOVICH-PINHAS M. Bioplastics for Food Packaging[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 125: 66-80.
- [2] MEGHA K B, ANVITHA D, PARVATHI S, et al. Environmental Impact of Microplastics and Potential Health Hazards[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2025, 45(1): 97-127.
- [3] HAN LYN F, ISMAIL-FITRY M R, NORANIZAN M A, et al. Recent Advances in Extruded Polylactic Acid-Based Composites for Food Packaging: A Review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 266: 131340.
- [4] TEIXEIRA S C, DE OLIVEIRA T V, DE FÁTIMA FERREIRA SOARES N, et al. Sustainable and Biodegradable Polymer Packaging: Perspectives, Challenges, and Opportunities[J]. Food Chemistry, 2025, 470: 142652.
- [5] 陈龙, 程昊, 王谊, 等. 淀粉基可降解材料及其在食品工业中的应用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 364-375.
CHEN L, CHENG H, WANG Y, et al. Starch-Based Biodegradable Materials and Its Applications in Food Industry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 364-375.
- [6] 江天宇, 王晓娟. 可生物降解纳米材料在食品包装中的研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(S1): 137-142.
JIANG T Y, WANG X J. Research Progress of Biodegradable Nano-Materials in Food Packaging[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(S1): 137-142.
- [7] CHENG J, GAO R, ZHU Y, et al. Applications of Biodegradable Materials in Food Packaging: A Review[J]. Alexandria Engineering Journal, 2024, 91: 70-83.
- [8] 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.
- [9] HUSSAIN M, KHAN S M, SHAFIQ M, et al. A Review on PLA-Based Biodegradable Materials for Biomedical Applications[J]. Giant, 2024, 18: 100261.
- [10] DA SILVA PENS C J, KLUG T V, STOLL L, et al. Poly(lactic acid) and Its Improved Properties by Some Modifications for Food Packaging Applications: A Review[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 41: 101230.
- [11] SUN S Y, WENG Y X, ZHANG C L. Recent Advancements in Bio-Based Plasticizers for Polylactic Acid (PLA): A Review[J]. Polymer Testing, 2024, 140: 108603.
- [12] TÁBI T, AGEYEVA T, KOVÁCS J G. Improving the Ductility and Heat Deflection Temperature of Injection Molded Poly(lactic acid) Products: A Comprehensive Review[J]. Polymer Testing, 2021, 101: 107282.
- [13] KUMAR S, MUKHERJEE A, DUTTA J. Biopolymer-Based Food Packaging[M]. 1st Ed. New York: Wiley, 2022.
- [14] 刘浩. 聚乳酸基可降解复合材料的制备与性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
LIU H. Preparation and Properties of Polylactic Acid-Based Degradable Composites[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2023.
- [15] FARAH S, ANDERSON D G, LANGER R. Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications—A Comprehensive Review[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2016, 107: 367-392.

- [16] RESHMA C S, REMYA S, BINDU J. A Review of Exploring the Synthesis, Properties, and Diverse Applications of Poly Lactic Acid with a Focus on Food Packaging Application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 283: 137905.
- [17] CHAMAS A, MOON H, ZHENG J J, et al. Degradation Rates of Plastics in the Environment[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(9): 3494-3511.
- [18] MAYEKAR P C, LIMSUKON W, BHER A, et al. Breaking It Down: How Thermoplastic Starch Enhances Poly(lactic acid) Biodegradation in Compost—A Comparative Analysis of Reactive Blends[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(26): 9729-9737.
- [19] LAORENZA Y, HARNKARNSUJARIT N. Ginger Oil and Lime Peel Oil Loaded PBAT/PLA *via* Cast-Extrusion as Shrimp Active Packaging: Microbial and Melanosis Inhibition[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 38: 101116.
- [20] ZIBAEI R, EBRAHIMI B, ROUHI M, et al. Development of Packaging Based on PLA/POE/SeNPs Nanocomposites by Blown Film Extrusion Method: Physico-chemical, Structural, Morphological and Antioxidant Properties[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 38: 101104.
- [21] MAVAI S, BAINS A, SRIDHAR K, et al. Formulation and Application of Poly Lactic Acid, Gum, and Cellulose-Based Ternary Bioplastic for Smart Food Packaging: A Review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 268: 131687.
- [22] LIANG W X, MA N, FANG D L, et al. A Novel Antimicrobial Film AgNPs@ γ -CD-MOFs/PLA: Preparation, Characterization and Its Application for Packaging of *Agaricus Bisporus*[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2025, 47: 101449.
- [23] XU W S, SUN K X, HOU S L, et al. Research Progress of Advanced Polymer Composite Antibacterial Materials Based on Electrospinning[J]. *European Polymer Journal*, 2025, 222: 113623.
- [24] ZHAO X J, ZOU D H, LIU Y F, et al. Electrospun Polylactic Acid Nanofibers Membrane with Copper Ion-Loaded Clay Nanotubes for Fresh-Keeping Packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 267: 131651.
- [25] SHADAB SIDDIQUI M A, RABBI M S, AHMED R U, et al. Biodegradable Natural Polymers and Fibers for 3D Printing: A Holistic Perspective on Processing, Characterization, and Advanced Applications[J]. *Cleaner Materials*, 2024, 14: 100275.
- [26] WANG X Y, HUANG L J, LI Y S, et al. Research Progress in Polylactic Acid Processing for 3D Printing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 112: 161-178.
- [27] GAUSS C, PICKERING K L. A New Method for Producing Polylactic Acid Biocomposites for 3D Printing with Improved Tensile and Thermo-Mechanical Performance Using Grafted Nanofibrillated Cellulose[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 61: 103346.
- [28] PETOUSIS M, VIDAKIS N, MOUNTAKIS N, et al. Multifunctional Material Extrusion 3D-Printed Antibacterial Polylactic Acid (PLA) with Binary Inclusions: The Effect of Cuprous Oxide and Cellulose Nanofibers[J]. *Fibers*, 2022, 10(6): 52.
- [29] GUI H, MA W Y, CAO Y C, et al. Sustained Release, Antimicrobial, and Antioxidant Properties of Modified Porous Starch-Based Biodegradable Polylactic Acid/Polybutylene Adipate-Co-Terephthalate/Thermoplastic Starch Active Packaging Film[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 267: 131657.
- [30] CHEN J W, LI Y X, WANG Y F, et al. Active Polylactic Acid/Tilapia Fish Gelatin-Sodium Alginate Bilayer Films: Application in Preservation of Japanese Sea Bass (*Lateolabrax Japonicus*)[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100915.
- [31] BORO U, PRIYADARSINI A, MOHOLKAR V S. Synthesis and Characterization of Poly(lactic acid)/Clove Essential Oil/Alkali-Treated Halloysite Nanotubes Composite Films for Food Packaging Applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 216: 927-939.
- [32] 宋洁, 张蓉, 韩家旋, 等. PLA/天然废弃植物源提取物复合材料的制备与性能[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(6): 247-252.
- SONG J, ZHANG R, HAN J X, et al. Preparation and Properties of PLA/Natural Waste Plant Extract Composites[J]. *New Chemical Materials*, 2024, 52(6): 247-252.
- [33] YAKDOUMI F Z, HADJ-HAMOU A S, RAHOUI N, et al. Polylactic Acid Nanocomposites Containing Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes as Antimicrobial Packaging Materials[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 213: 55-69.
- [34] ZHANG Y M, ZHU M K, HUANG Z G, et al. The Effect of Polylactic Acid-Based Blend Films Modified with Various Biodegradable Polymers on the Preservation of Strawberries[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2024, 45: 101333.
- [35] ZHOU X M, YANG R D, WANG B, et al. Development

- and Characterization of Bilayer Films Based on Pea Starch/Polylactic Acid and Use in the Cherry Tomatoes Packaging[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 222: 114912.
- [36] ZHAO M Y, ZHANG Z K, CAI H, et al. Controlled Moisture Permeability of Thermoplastic Starch/ Poly-lactic Acid/Poly Butylene Adipate-Co-Terephthalate Film for the Autolysis of Straw Mushroom *Volvariella Volvacea*[J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131409.
- [37] CHANG S H, CHEN Y J, TSENG H J, et al. Antibacterial Activity of Chitosan-Polylactate Fabricated Plastic Film and Its Application on the Preservation of Fish Fillet[J]. *Polymers*, 2021, 13(5): 696.
- [38] REN H W, XU Z H, GAO M, et al. Preparation of Microcrystalline Cellulose from Agricultural Residues and Their Application as Polylactic Acid/Microcrystalline Cellulose Composite Films for the Preservation of Lanzhou Lily[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 227: 827-838.
- [39] [39] 梁慧光, 甄晨波, 杨敏, 等. 聚乳酸-酪蛋白基复合膜性质及其在草莓保鲜中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(18): 9-15.
- LIANG H G, ZHEN C B, YANG M, et al. Properties of Polylactic Acid-casein-based Films and Their Application in Strawberry Preservation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(18): 9-15.
- [40] SINGH A, AHUJA A, MADAN M, et al. Active Packaging Film of Poly(lactic acid) Incorporated with Plant-Based Essential Oils of *Trachyspermum Ammi* as an Antimicrobial Agent and Vanilla as an Aroma Corrector for Waffles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 278: 135086.
- [41] WANG H X, DONG J, WANG X Z, et al. An Intelligent Indicating Label Using Mulberry Pigment, Polylactic Acid and Rutile TiO_2 Nanoparticle for Monitoring the Freshness of Cold Fresh Pork[J]. *Food Bioscience*, 2024, 59: 104006.
- [42] LIU L Z, HU Y J, DU L, et al. Tannic Acid-Grafted Polylactic Acid Films: A Nonmigrating Antibacterial Packaging for Chilled Fresh Meat[J]. *Food Chemistry*, 2025, 464: 141796.
- [43] SHAKOUR N, KHOSHKHOO Z, BASTI A A, et al. Investigating the Properties of PLA-Nanochitosan Composite Films Containing *Ziziphora Clinopodioides* Essential Oil and Their Impacts on Oxidative Spoilage of *Oncorhynchus Mykiss* Fillets[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(3): 1299-1311.
- [44] WONGPHAN P, NAMPANYA P, CHAKPHA W, et al. Lesser Galangal (*Alpinia Officinarum* Hance) Essential Oil Incorporated Biodegradable PLA/PBS Films as Shelf-Life Extension Packaging of Cooked Rice[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 37: 101077.
- [45] MIAO L Q, WALTON W C, WANG L X, et al. Characterization of Polylactic Acids-Polyhydroxybutyrate Based Packaging Film with Fennel Oil, and Its Application on Oysters[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 22: 100388.
- [46] YUSOFF N H, PAL K, NARAYANAN T, et al. Recent Trends on Bioplastics Synthesis and Characterizations: Polylactic Acid (PLA) Incorporated with Tapioca Starch for Packaging Applications[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2021, 1232: 129954.
- [47] GODOY ZÚNIGA M M, DING R N, OH E, et al. Avocado Seed Starch Utilized in Eco-Friendly, UV-Blocking, and High-Barrier Polylactic Acid (PLA) Biocomposites for Active Food Packaging Applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 265: 130837.
- [48] SOURI RUDABADI M, ASHENAI GHASEMI F, FASIHI M, et al. An Experimental Study on the Microstructural, Tensile, and Fracture Properties of Biodegradable Polylactic Acid Blended with Thermoplastic Corn Starch Filled with Halloysite Nanotubes[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 201: 116922.
- [49] BANIASADI H, LAURA Ă, MADANI Z, et al. Development and Characterization of Polylactic Acid/Starch Biocomposites—from Melt Blending to Preliminary Life Cycle Assessment[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 279: 135173.
- [50] 陈秀梅, 林妍, 陈俊宇, 等. 聚乳酸/壳聚糖/肉桂醛单向阻湿双层膜的制备及其在秀珍菇保鲜中的应用[J]. *食品科学*, 2024, 45(10): 232-241.
- CHEN X M, LIN Y, CHEN J Y, et al. Preparation of Polylactic Acid/Chitosan/Cinnamaldehyde One-Way Moisture Barrier Bilayer Film and Its Application in the Preservation of *Pleurotus Geesteranus*[J]. *Food Science*, 2024, 45(10): 232-241.
- [51] GULZAR S, TAGRIDA M, NILSUWAN K, et al. Electrospinning of Gelatin/Chitosan Nanofibers Incorporated with Tannic Acid and Chitoooligosaccharides on Polylactic Acid Film: Characteristics and Bioactivities[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107916.
- [52] PATIÑO VIDAL C, LUZI F, PUGLIA D, et al. Development of a Sustainable and Antibacterial Food Packaging Material Based in a Biopolymeric Multilayer System Composed by Polylactic Acid, Chitosan, Cellu-

- lose Nanocrystals and Ethyl Lauroyl Arginate[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 36: 101050.
- [53] 路冠茹, 李达, 赵高乾. 黄酮接枝壳聚糖/聚乳酸复合膜的制备及保鲜效果研究[J]. 食品科技, 2024, 49(6): 56-62.
- LU G R, LI D, ZHAO G Q. Preparation and Preservation Effect of Flavonoid-Grafted-Chitosan/Polylactic Acid Composite Film[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(6): 56-62.
- [54] ZHOU Z C, HAN P, BAI S Q, et al. Caffeic Acid-Grafted-Chitosan/Polylactic Acid Film Packaging Enhances the Postharvest Quality of Agaricus Bisporus by Regulating Membrane Lipid Metabolism[J]. Food Research International, 2022, 158: 111557.
- [55] 杨慧杰, 李超, 李乐苹, 等. 纤维素基水凝胶薄膜在食品包装领域研究进展[J]. 包装工程, 2024, 45(19): 199-214.
- YANG H J, LI C, LI L P, et al. Research Progress of Cellulose-Based Hydrogel Film in Food Packaging[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(19): 199-214.
- [56] 詹伟招, 罗文翰, 刘庭源, 等. 天然纤维素增强聚乳酸复合材料性能研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(17): 113-121.
- ZHAN W Z, LUO W H, LIU T Y, et al. Progress on Properties of Natural Cellulose Reinforced Polylactide Composites[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(17): 113-121.
- [57] ZHU B R, ZHAO S, GUO J, et al. Enhancing the Mechanical Properties of Polylactic Acid (PLA) Composite Films Using Pueraria Lobata Root Microcrystalline Cellulose[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279: 135579.
- [58] WANG W T, NIU B, LIU R L, et al. Development of Bio-Based PLA/Cellulose Antibacterial Packaging and Its Application for the Storage of Shiitake Mushroom[J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136905.
- [59] BISWAS A, CHENG H N, KUZNIAR G, et al. Bilayer Films of Poly(lactic acid) and Cottonseed Protein for Packaging Applications[J]. Polymers, 2023, 15(6): 1425.
- [60] DODANGE S, SHEKARCHIZADEH H, KADIVAR M. Designing and Characterization of Bilayer Films Based on Bitter Vetch Seed Protein and Polylactic Acid for Enhanced Food Packaging[J]. Heliyon, 2025, 11(1): e41430.
- [61] KHODANAZARY A, MOHAMMADZADEH B. The Effects of Polylactic Acid-Whey Protein Isolated Bi-Layer Film Incorporated with ZnO Nanoparticles on the Quality of Common Carp Cyprinus Carpio[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(5): 4684-4694.
- [62] GULZAR S, TAGRIDA M, PRODPRAN T, et al. Antimicrobial Film Based on Polylactic Acid Coated with Gelatin/Chitosan Nanofibers Containing Nisin Extends the Shelf Life of Asian Seabass Slices[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100941.
- [63] 李莫涵, 焦利勇. 植物精油在包装领域的研究应用进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(10): 341-348.
- LI M H, JIAO L Y. Application of Plant Essential Oils in Packaging[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(10): 341-348.
- [64] WANG H D, DONG Y Y, QIU W Q, et al. Development of Slow Release Antibacterial Polylactic Acid Bilayer Active Film with Different Distributions of Clove Essential Oil and Its Application for Snakehead (Channa Argus) Preservation[J]. Food Control, 2024, 162: 110473.
- [65] ZHENG H, TANG H B, YANG C X, et al. Evaluation of the Slow-Release Polylactic Acid/Polyhydroxyalkanoates Active Film Containing Oregano Essential Oil on the Quality and Flavor of Chilled Pufferfish (Takifugu Obscurus) Fillets[J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132693.
- [66] ZHANG L L, YI H B, FENG S S, et al. Fabrication, Characterization, and Application of Complex Essential Oils Loaded Bilayer Films Using PLA and Pickering Emulsions with SPI-Chitosan Nanoparticles as Solid Support[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2025, 47: 101426.
- [67] 李红艳, 徐明磊, 翟赛亚. 植物提取物在肉制品保鲜中的作用研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(9): 236-240.
- LI H Y, XU M L, ZHAI S Y. Research Progress of Plant Extracts in Preservation of Meat Products[J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 236-240.
- [68] ARRUDA T R, BERNARDES P C, MORAES A R F E, et al. Beyond Brewing: B-Acid Rich Hop Extract in the Development of a Multifunctional Polylactic Acid-Based Food Packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 228: 23-39.
- [69] ANDRADE M A, BARBOSA C H, CERQUEIRA M A, et al. PLA Films Loaded with Green Tea and Rosemary Polyphenolic Extracts as an Active Packaging for Almond and Beef[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 36: 101041.
- [70] XU M Y, FANG D L, SHI C, et al. Anthocyanin-Loaded Polylactic Acid/Quaternized Chitosan Electrospun Nanofiber as an Intelligent and Active Packaging Film in

- Blueberry Preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 158: 110586.
- [71] 邵烨华, 高召阳, 王龙飞, 等. 聚乳酸纳米填料增强复合材料的应用研究进展[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(1): 130-139.
- SHAO Y H, GAO Z Y, WANG L F, et al. Research and Application Progress of Nano-Filler Reinforced Composites with Polylactic Acid[J]. Advanced Textile Technology, 2024, 32(1): 130-139.
- [72] 毕海心, 段珺婕, 周宇轩, 等. 抑菌性纳米颗粒的制备方法及其在食品保鲜领域的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(5): 12-22.
- BI H X, DUAN J J, ZHOU Y X, et al. Preparation Method of Antibacterial Nanoparticles and Their Application Progress in the Field of Food Preservation[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(5): 12-22.
- [73] LIEW W C, MUHAMAD I I, CHEW J W, et al. Synergistic Effect of Graphene Oxide/Zinc Oxide Nanocomposites on Polylactic Acid-Based Active Packaging Film: Properties, Release Kinetics and Antimicrobial Efficiency[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127288.
- [74] DEJENE B K, GUDAYU A D, ABTEW M A. Development and Optimization of Sustainable and Functional Food Packaging Using False Banana (Enset) Fiber and Zinc-Oxide (ZnO) Nanoparticle-Reinforced Polylactic Acid (PLA) Biocomposites: A Case of Injera Preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279: 135092.
- [75] WU Z C, ZHANG Z J, SONG X L, et al. A Silver Nanoparticles-Polylactic Acid Microspheres/Polylactic Acid-Thermoplastic Polyurethane Nanofibers Hierarchical Antibacterial Film[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 207: 117773.
- [76] YANAT M, MUTHURAJAN M, STRUBEL M, et al. Polylactic Acid Films Reinforced with Chitin Nanocrystals: Biodegradation and Migration Behavior[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 40: 101217.
- [77] ABDOLLAHI MOGHADDAM M R, ALI HESARINEJAD M, JAVIDI F. Characterization and Optimization of Polylactic Acid and Polybutylene Succinate Blend/Starch/Wheat Straw Biocomposite by Optimal Custom Mixture Design[J]. Polymer Testing, 2023, 121: 108000.
- [78] ZABIDI N', ZAINAL N N, TAWAKKAL I S M A, et al. Effect of Thymol on Properties of Bionanocomposites from Poly(lactic acid)/Poly(butylene succinate)/Nanofibrillated Cellulose for Food Packaging Application[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 251: 126212.
- [79] BRIASSOULIS D, ATHANASOULIA I G, TSEROTAS P. PHB/PLA Plasticized by Olive Oil and Carvacrol Solvent-Cast Films with Optimised Ductility and Physical Ageing Stability[J]. Polymer Degradation and Stability, 2022, 200: 109958.
- [80] PALAI B, MOHANTY S, NAYAK S K. Synergistic Effect of Polylactic Acid(PLA) and Poly(butylene succinate-co-adipate) (PBSA) Based Sustainable, Reactive, Super Toughened Eco-Composite Blown Films for Flexible Packaging Applications[J]. Polymer Testing, 2020, 83: 106130.
- [81] ALIOTTA L, GIGANTE V, DAL PONT B, et al. Tearing Fracture of Poly(lactic acid) (PLA)/ Poly(butylene succinate-co-adipate) (PBSA) Cast Extruded Films: Effect of the PBSA Content[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 289: 109450.
- [82] YANG C X, TANG H B, WANG Y F, et al. Development of PLA-PBSA Based Biodegradable Active Film and Its Application to Salmon Slices[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22: 100393.
- [83] NASUTION H, HARAHAH H, JULIANTI E, et al. Properties of Active Packaging of PLA-PCL Film Integrated with Chitosan as an Antibacterial Agent and Syzygium Cumini Seed Extract as an Antioxidant Agent[J]. Heliyon, 2024, 10(1): e23952.
- [84] ZHENG Y L, JIA X Y, ZHAO Z Y, et al. Innovative Natural Antimicrobial Natamycin Incorporated Titanium Dioxide (Nano-TiO₂)/ Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)/Poly(lactic acid) (PLA) Biodegradable Active Film (NTP@PLA) and Application in Grape Preservation[J]. Food Chemistry, 2023, 400: 134100.