

生物基可降解包装材料在果蔬保鲜中的研究进展

刘家欣, 梁梦茜, 张群利*
(东北林业大学, 哈尔滨 150040)

摘要: **目的** 综述生物基可降解包装材料在果蔬类食品保鲜中的研究进展, 为解决传统包装材料难以降解、环境污染的问题, 提升果蔬保鲜效果, 以及推进果蔬贮藏保鲜技术研究工作的开展提供思路和方法。**方法** 通过检索国内外相关文献, 对蛋白质、多糖、脂质这 3 类常见的生物基可降解包装材料的特点进行归纳和总结, 重点阐述了近年来学术界对其复合性能及其在鲜切果蔬、未加工果蔬应用中的研究进展及工业化前景。**结果** 生物基可降解包装材料具有极高的经济和环境价值, 能较好地维持果蔬产品的新鲜度、延长果蔬贮藏期。**结论** 这些研究不仅为生物基可降解包装材料的进一步开发提供了理论支撑, 还为未来果蔬保鲜加工与生产指明了方向, 展现出广阔的工业化应用前景, 可更好地满足人们对果蔬包装的需求。

关键词: 可降解材料; 食品包装; 保鲜; 鲜切果蔬

中图分类号: TB484

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)03-0010-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.002

Research Progress of Bio-based Degradable Packaging Materials in the Preservation of Fruits and Vegetables

LIU Jiaxin, LIANG Mengxi, ZHANG Qunli*

(Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to review the research progress of bio-based degradable packaging materials in the preservation of fruits and vegetables, so as to provide ideas and methods for solving the problems of the traditional packaging materials that are difficult to degrade and environmentally polluted, enhancing the effect of preservation of fruits and vegetables, and promoting the research on the storage and preservation technology of fruits and vegetables. The characteristics of three common types of bio-based degradable packaging materials, namely protein, polysaccharide and lipid, were summarized and concluded by searching relevant literature in China and abroad. The research progress and industrialization prospect of composite properties and application of such materials in fresh-cut fruits and vegetables and unprocessed fruits and vegetables in recent years were also discussed. Bio-based degradable packaging materials had high economic and environmental value, which could better maintain the freshness of fruit and vegetable products and extend the storage period. These studies not only provide theoretical support for the further development of bio-based degradable packaging materials, but also point out the direction for the future processing and production of fruits and vegetables, showing a broad prospect of industrial application, so as to better meet people's needs for fruit and vegetable packaging.

KEY WORDS: degradable materials; food packaging; preservation; fresh-cut fruits and vegetables

继“限塑令”颁布以来, 遏制“白色污染”、加强环境保护等课题受到广泛的关注。在全球塑料污染治理

中, 2023 年发布的《切断根源: 全世界如何终结塑料污染, 创造循环经济》塑料污染解决方案加强了人

收稿日期: 2024-10-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (2572019BL01)

*通信作者

们对塑料污染的重视^[1]。相比于不可再生的化石资源, 生物质资源具有原料可再生、可生物降解等优点, 是制作包装产品的理想材料。天然可降解材料是以具备生物降解特性的天然高分子物质为基本原料制造而成的材料, 可在适当的自然环境下被微生物完全降解, 且降解后的产物对自然环境没有危害, 如图 1 所示。生物基可降解型包装薄膜的成膜基质通常采用蛋白质、多糖和脂类等自然生物材料, 但由于其自身结构和性质的影响, 其力学性能、隔绝性能和热稳定性往往不如化学合成塑料。目前人们主要通过不同原料复配、材料改性以及采用不同加工方式来改善天然可降解材料的性能, 以使其具备替代化学合成塑料的潜能^[2]。

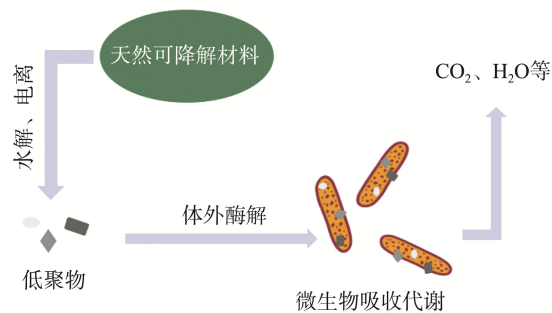


图 1 天然可降解材料的降解流程
Fig.1 Degradation process of natural degradable materials

中国不仅是全球最大的果蔬农产品生产国, 还是果蔬等生鲜食品物流运输量位居首位的国家。果蔬采摘后, 其细胞仍会进行一定的呼吸代谢, 此过程会消耗糖类营养物质, 导致产品品质下降。同时这一过程会促使内源乙烯释放, 加速果蔬的成熟与老化进程^[3]。目前市场上流通的果蔬保鲜膜普遍缺乏抗菌功能, 而微生物是导致果蔬腐败的关键因素之一。尽管化学合成杀菌剂能在一定程度上控制细菌滋生, 但细菌可能对其产生

耐药性, 这对人体健康构成潜在威胁。因此, 开发具备抗菌性能的生物可降解材料作为果蔬保鲜的现代包装材料具有广阔的发展前景和重要的研究价值^[4]。本文旨在探讨生物基可降解包装材料的研究进展, 对不同材料在鲜切果蔬及未加工果蔬保鲜领域的应用现状进行综述, 并对该领域的未来研究方向提出展望, 以期为实际生产应用提供有价值的参考依据。

1 可降解膜基质

1.1 蛋白质基质

蛋白质作为关键的有机大分子, 是构成生命体的基本物质之一。它作为一种由氨基酸组成的天然聚合物, 具有广泛的物理和化学特性。自然界中许多不同种类动物、植物和微生物蛋白质都可用来制备生物可降解薄膜, 如玉米醇溶蛋白、大豆分离蛋白、明胶、酪蛋白、乳清蛋白和芝麻蛋白等^[2], 如表 1 所示。

不同类型的蛋白质薄膜各具特色, 其中, 醇溶蛋白广泛存在于玉米、小麦、高粱、水稻等谷物中, 特别是玉米醇溶蛋白, 目前报道较多。这种蛋白质薄膜展现出卓越的生物可降解性和生物相容性, 同时兼具出色的耐热性、优异的成膜能力和耐脂性。范鑫等^[5]采用静电纺丝技术, 以玉米醇溶蛋白和肉桂醛为基材制备保鲜膜, 探究肉桂醛对薄膜性能的影响, 结果表明, 该复合膜具有良好的纤维形貌、乙烯吸附效率、疏水性, 并且能有效抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的生长, 在水果保鲜中有一定应用潜力。大豆分离蛋白作为大豆油生产过程中的一种副产品, 因成本效益高、具备出色的成膜性能和良好的生物相容性而备受关注。然而大豆分离蛋白膜普遍面临着力学性能不佳和耐水性较差等问题。江睿钊等^[13]利用视水处理的谷朊粉改良大豆分离蛋白膜性质, 结果表明, 当谷朊粉与大豆分离蛋白比例 $<2:8$ 时, 复合膜拥有优良的网

表 1 蛋白质基质包装材料
Tab.1 Protein matrix packaging materials

基质种类	增塑剂/生物活性成分/添加剂	优势	引用
玉米醇溶蛋白	肉桂醛	良好的乙烯吸附性和抑菌性	[5]
	蓖麻油	较好的力学性能、热稳定性、透气性和乙烯吸附性能	[6]
大豆分离蛋白	纳米颗粒、双醛多糖	提高膜的热稳定性和力学性能, 显著改善了膜的内部结构和抗氧化性能	[7]
乳清蛋白	乳源抗菌肽	提高抗菌性能	[8]
酪蛋白	埃洛石纳米黏土、香叶醇	水分含量降低, 提高了力学性能、抗菌性能	[9]
	塔拉单宁	降低酪蛋白膜的水蒸气透过率和紫外光透过率, 增强薄膜抗氧化性	[10]
明胶	环氧丙基三甲基氯化铵、迷迭香酸	优异的紫外线阻隔性和力学性能、良好的抗菌性能	[11]
	二氧化钛、载百里香酚的 β -环糊精	良好的拉伸强度、水溶性和生物相容性、抗菌性能	[12]

络架构及耐热性能,在包装领域具有较好的发展潜力。酪蛋白作为牛奶的关键组成部分,展现出了优异的水溶性、分散性和成膜特性。然而,纯酪蛋白膜在实际应用中面临着水蒸气透过率较高以及力学性能相对不足的挑战。邓霜琪等^[10]的研究表明,无论是水解类还是缩合类单宁,都能显著提升酪蛋白膜的紫外光屏蔽能力、水蒸气阻隔性能以及抗氧化性,改性后的酪蛋白膜展现出巨大的应用空间。明胶通常来源于猪、牛等哺乳动物的皮肤、骨骼、肌腱及韧带等组织,是一种由胶原蛋白经部分水解得到的蛋白质。然而,纯明胶薄膜具有耐水性较差、力学性能不理想、气体阻隔性差等缺陷。Chen 等^[14]将转谷氨酰胺酶和壳聚糖引入明胶膜中,利用其与明胶的共价和非共价相互作用,提升明胶膜的综合性能,结果显示,壳聚糖和转谷氨酰胺酶的加入使复合膜的紫外透过率和亲水性明显下降。综上所述,不同材料对蛋白质膜的改性效果存在差异,添加具有疏水性、抑菌性、抗氧化性的改良剂可提高蛋白质膜的应用特性,其中肉桂醛、蓖麻油的加入均能使玉米醇溶蛋白的乙烯吸附性能增强。鉴于蛋白质基生物聚合物是食品包装领域中颇具潜力的材料之一,应致力于开发出具有更全面功能的可降解可再生的食品包装薄膜。

1.2 多糖基质

多糖作为一种来源广泛且具备多种生物活性的高分子化合物,其化学性质稳定,独特的长链螺旋分子结构赋予了它出色的成膜性能。多糖膜种类繁多,主要包括淀粉、壳聚糖、改性纤维素以及源自植物提取的凝胶膜等,如表 2 所示。

淀粉是一类最常见的天然多糖,也是食品工业中不可或缺的重要原材料。纯淀粉膜的力学性能较差,亲水性较高,在很大程度上限制了其在包装领域的应用^[22]。通常通过在淀粉基薄膜中加入增强剂和抗菌成分,以增强其强度、耐水性、阻隔性能和抗菌活性。

Ren 等^[15]采用果胶和香叶醇对淀粉膜进行改性,提高了淀粉基薄膜的疏水性及力学强度,使其具有抑菌效果,这对淀粉的开发和应用有很大的参考价值。壳聚糖是一种多用途的生物基多糖,由几丁质经化学或酶处理而得,其因无毒、降胆固醇和抗菌等特性,在食品行业中得到了较为广泛的应用^[23]。然而,纯壳聚糖膜或涂层在保存方面有一定的局限性^[24]。Tripathi 等^[18]使用碳酸钙和儿茶素对壳聚糖薄膜进行改性,结果表明,其抗氧化和抗紫外性能得到明显提高,可用于对氧气和光敏感的食品保鲜。纤维素是地球上最丰富的生物质来源的聚合物,但在相对湿度较高的环境中,它的力学性能会受到负面影响,阻碍了其在包装行业的应用,因此对纤维素疏水改性吸引了不少研究学者的关注^[25]。曹佳丽等^[19]基于再生纤维素膜,利用从紫甘蓝中提取的花青素和纳米 SiO₂ 制备了一种可生物降解的智能比色传感膜,该膜具有良好力学性能和超疏水性,有望应用于对食品进行实时新鲜度监测的智能包装中。除上述常见的多糖外,还存在许多天然多糖,它们同样适用于制备天然且可降解的包装材料。Han 等^[21]以 γ -氨基丁酸和丁香醛为原料合成席夫碱化合物,用来制备果胶基复合薄膜,结果表明,复合薄膜具有优异的力学性能,且可屏蔽紫外光、部分可见光、水分和氧气。综上所述,通过选用不同的改良剂或与其他基质进行复合处理,可优化多糖基膜的各项性能,上述改性主要提升了其耐水性、抗氧化性及紫外防护性能。值得一提的是,花青素的加入使多糖基膜具有了智能比色功能,这为多糖基膜在食品包装领域的工业化应用提供了参考价值。

1.3 脂质基质

脂类化合物是由脂肪酸和醇作用生成的酯类物质,其组成包括单纯脂、复合脂、脂的前体及衍生物、结合脂。在可食用薄膜中,脂类抗菌膜展现出了良好的耐水性能,如表 3 所示。

表 2 多糖基质包装材料
Tab.2 Polysaccharide matrix packaging materials

基质种类	增塑剂/生物活性成分/添加剂	优势	引用
淀粉	棕榈酸、香叶醇	提高了薄膜的疏水性、抑菌性	[15]
	微晶纤维素	改善力学性能,提高接触角,降低水蒸气透过率	[16]
壳聚糖	季铵盐、单宁酸	改善了膜的水溶性、抗氧化、抗紫外等性能	[17]
	儿茶素、碳酸钙	提高了膜的拉伸强度、抗氧化能力	[18]
纤维素	甘油、紫甘蓝花青素、纳米 SiO ₂	良好的力学性能、表面超疏水性、紫外线阻隔	[19]
	单宁酸	加快降解速度,具有良好紫外防护性能,力学性能优异	[20]
果胶	席夫碱	优良的耐水性,对紫外光和部分可见光的屏蔽能力	[21]

表 3 脂质基质包装材料
Tab.3 Lipid matrix packaging materials

基质种类	增塑剂/天然物质/添加剂	优势	引用
棕榈蜡	鱼明胶	良好的耐水性、抗紫外线性	[26]
蜂蜡	蜂胶、吐温 80	疏水性、良好的抑菌效果	[27]
紫胶	桐油酸	较好韧性、疏水性	[28]
壬酸	明胶	力学强度高、耐水性好	[29]
肉豆蔻酸	纤维素	高疏水性、优异的自清洁性能	[30]

脂质虽具有疏水性,但其脆性限制了其在生物可降解材料中的应用,因此脂质常被用作改善生物可降解材料疏水性的添加剂^[31]。棕榈蜡是一种具有熔点高、溶解度低、惰性等特点的天然蜡质,提取于棕榈树叶。Nurulsyahida 等^[26]采用溶剂铸造法制备了鱼明胶和棕榈蜡复合的环保型包装薄膜,并对添加不同棕榈蜡浓度的鱼明胶薄膜的物理、力学性能及其微观结构和耐水性进行了分析,研究发现,添加质量分数为 15%的棕榈蜡的复合膜,其紫外线防护性能、力学性能和耐水性均得到改善。蜂蜡是一种复杂的天然物质,其构成主要包括由高级脂肪酸与一元醇合成的酯类以及脂肪酸和糖类,常温下为固体,不溶于水,并带有特殊香味^[32]。刘瑞平^[33]以酸处理淀粉为成膜基材,以脂质为疏水剂、辛烯基琥珀酸淀粉酯为乳化剂制备可食性膜,结果表明,经辛烯基琥珀酸淀粉酯乳化的蜂蜡有效地提高了膜的疏水性和水蒸气阻隔性能,且该膜表现出较好的断裂伸长性;同时,当添加的辛烯基琥珀酸淀粉酯的质量分数>12%时,淀粉膜具有较高的热稳定性。此外,该复合膜的紫外线防护性能也得到进一步改善。紫胶,亦称虫胶,主要由紫胶树脂、紫胶蜡和紫胶色素组成,是一种独特的动物基天然大分子树脂。李春吟等^[28]采用桐油酸对紫胶树脂进行增韧改性处理,成功制备出增韧紫胶树脂。实验结果表明,桐油酸添加量的增多使紫胶树脂的柔韧性逐渐增强,且其疏水性也有所提升。壬酸作为一种中链脂肪酸,能比短链脂肪酸更好地提升材料的水蒸气阻隔性能。孔令月等^[29]通过壬酸增塑、双醛淀粉交联和热压处理相结合的方法制得明胶膜,研究发现,当壬酸质量分数为 20%时,该膜展现出最佳的力学性能和耐水性能。肉豆蔻酸,一种主要源自肉豆蔻的饱和脂肪酸,具有良好的化学稳定性,不易被氧化或分解,有一定的抗菌活性。Chen 等^[30]采用溶剂蒸发结晶技术,利用肉豆蔻酸对纤维素膜进行表面修饰,成功制备了具有各向异性的纤维素/肉豆蔻酸复合膜。结果显示,该复合膜具备出色的疏水特性及卓越的自清洁能力。此外,无论是在干燥环境还是在潮湿环境,所制备的薄膜均展现出优异的拉伸强度和良好的韧性。综上所述,通过将脂质与其他材料

进行复合,解决了其应用时脆性大的问题,且复合材料疏水性能优异,上述研究为脂质基包装材料的进一步的开发应用提供了重要依据和参考。

1.4 其他材料

除了上述 3 类生物基可降解包装材料,还有一些合成生物基可降解包装材料,如聚乳酸(Polylactid Acid, PLA)、聚己二酸丁二酯(Polybutylene Adipate, PBAT)和聚羟基脂肪酸酯(Polyhydroxyalkanoates, PHA)等。PLA 是由乳酸经聚合反应制得的可再生、可降解的生物基聚合物。由于 PLA 具有较高的熔点和玻璃化转变温度,为实现其有效的生物降解,需采用 55~60 °C 的温度对 PLA 进行堆肥化处理。此外,PLA 的耐热性相对较低且力学强度有限。Natesan 等^[34]以对苯二胺为交联剂,通过香草醛合成希夫碱化合物,以增强 PLA 生物复合膜的性能。研究表明,两者之间存在强界面相互作用,这一相互作用有效降低了 PLA 的脆性,提升了其抗菌活性,且复合膜的玻璃化转变温度降低了 10 °C。PBAT 是一种人工合成的、具备出色生物降解特性的高分子材料,具有优异的加工性能且柔韧性好。然而由于其成本相对较高,目前尚未实现广泛应用。PHA 是一种由微生物在养分和代谢失衡的环境中合成的生物基聚酯,有较好的水蒸气阻隔性能。Jo 等^[35]采用纤维素纳米纤维来提高 PHA 的性能,结果显示,复合材料加工性能得到增强,拉伸性能有所提高。PHA 的生产和回收成本较高,应用并不广泛。综上所述,合成生物基可降解包装材料降解慢、成本高,不利于工业化应用,未来可通过改性或与互补材料复合,优化其性能,提升其降解速度,以制备更优质的生物基可降解包装材料。

2 果蔬保鲜中的应用

2.1 鲜切果蔬

鲜切果蔬产品,也被广泛称为“即食产品”“预切产品”或“轻度加工果蔬产品”,是以新鲜果蔬作为起始原料,经一系列精心设计的处理流程:分级筛选、整理清洁、精确切分、去核去皮、细节修整、保鲜处

理以及专业包装等,从而直接转化为完全即食的果蔬制品。为确保这些产品的便捷食用与新鲜度,它们通常需经历低温运输并在冷藏条件下销售^[36]。然而,鲜切果蔬在加工、贮藏、运输及销售这一系列流程中面临着机械损伤、自身代谢活动改变以及微生物侵染等多重挑战,这极易导致产品变色、硬度下降、水分流失乃至腐败变质,严重损害了其商品价值,造成经济损失,同时也带来了较高的食品安全隐患。鉴于此,我国正不断加大对鲜切果蔬加工与贮藏保鲜技术的研发力度,旨在通过适宜的加工手段和保鲜技术,有效减轻上述不利影响。在这一领域,利用具备成膜性、抗菌性和可降解性等独特优势的生物质材料进行鲜切果蔬保鲜,已吸引了不少研究学者的广泛关注与深入探讨,如表4所示。

Lin 等^[43]以鲜切苹果为保鲜对象,开发了一种由海藻酸钠与巴西棕榈蜡组成的复合膜。结果表明,该可食性薄膜有效减少了鲜切苹果的重量损失,抑制了多酚氧化酶的活性,能更好地保持鲜切苹果的鲜亮颜色和硬度。乔勤勤等^[38]以鲜切土豆为试验原料,采用苦瓜多糖和不同浓度的大豆分离蛋白制成的复合涂膜液处理鲜切土豆,结果表明,复合涂膜液可减缓鲜切土豆感官品质的变化,减少其质量损失及褐化程度,降低还原糖和酚类化合物的转化程度,以及可溶性固形物的消耗速度。王艳等^[39]通过在鲜切哈密瓜表面应用壳聚糖与植酸制成的复合涂膜,成功构建了一道防水性保护膜屏障。该膜有效抑制了哈密瓜果实的水分蒸发,显著减少了营养成分的散失和果实质量损失,确保了哈密瓜良好的口感和较高的维生素C含量,有效维持了哈密瓜的抗氧化稳定性。齐杰等^[44]通过制备壳聚糖、海藻酸钠和纤维素纳米晶多层纳米包装材料,并用于鲜切雪

梨保鲜,结果表明,该处理可有效抑制鲜切雪梨呼吸作用,保持其生理品质,延长其货架期。孔倩倩^[45]等优化了海藻酸钠、ε-聚赖氨酸、氯化钙与γ-氨基丁酸复合涂膜,并评价了该膜对鲜切芹菜的保鲜效果,结果表明,鲜切芹菜经处理后,水分和营养物质的消耗减少,褐变程度减轻,贮藏时间延长3~4 d。田旭静^[46]以鲜切莴笋为研究对象,在(4±2)℃的贮藏条件下,深入探究了不同浓度壳聚糖涂膜液处理对其品质的具体影响。结果显示,质量分数为1%的壳聚糖涂膜液展现出了最佳的保鲜效果。该处理方式不仅能有效抑制鲜切莴笋的呼吸作用,减少其质量损失,还能降低多酚氧化酶的活性,减缓维生素C含量的降低速率,同时可提升过氧化氢酶的活性,从而有效维持鲜切莴笋贮藏期间的品质。综上所述,上述生物质材料均在鲜切果蔬保鲜中表现出良好的性能,所制备的包装材料通过隔绝氧气和微生物,减缓了鲜切果蔬的新陈代谢以及腐败过程,降低了其褐变程度,保持了其品质和风味。但未来在鲜切果蔬贮藏保鲜技术研究工作中,仍需通过进行进一步的研究和分析,提高这类方法实际应用的安全性。

2.2 未加工果蔬

直接从农田采摘后,未经任何加工或处理就提供给消费者的果蔬,与鲜切果蔬相比保留了果蔬的原始营养成分,消费者需自行进行清洗、切块等处理。然而在从产地到消费者的整个果蔬供应链中,腐烂和变质等因素会导致10%~20%的果蔬损耗,这给国家和相关行业带来了较大的经济损失^[47]。除了常用的冷藏、气调等保鲜手段,还可采用生物可降解薄膜来减缓果蔬变质进程,如表5所示。

表4 不同鲜切果蔬在生物质材料中的保鲜效果
Tab.4 Preservation effect of different fresh-cut fruits and vegetables in biomass materials

变质类型	鲜切果蔬品种	基质种类	效果	引用
褐变型	苹果	大豆分离蛋白/沙蒿胶	明显降低鲜切苹果贮藏24 h内的质量损失和褐变指数	[37]
	土豆	苦瓜多糖/大豆分离蛋白	有效减缓鲜切马铃薯感官品质的变化,降低鲜切土豆的质量损失率和褐变程度	[38]
异味型	哈密瓜	壳聚糖	有效降低鲜切哈密瓜的质量损失率,保持哈密瓜风味	[39]
	藕片	海藻酸钠	维持高水平不饱和脂肪酸,保持藕片外观和风味品质	[40]
霉变型	柚子	海藻酸钠	有效地维持了柚片样品的总多酚含量和总抗坏血酸含量	[41]
	胡萝卜	普鲁兰多糖/黄蜀葵胶	对胡萝卜的新鲜度、质量损失率、维生素C和丙二醛含量都有较好的保鲜效果	[42]

表 5 不同未加工果蔬在生物质材料中的保鲜效果
Tab.5 Preservation effect of different unprocessed fruits and vegetables in biomass materials

鲜切果蔬品种	基质种类	效果	引用
蓝莓	壳聚糖/金针菇脚多糖	有效延缓蓝莓老化, 减少水分蒸发, 减缓了蓝莓维生素 C 的降解	[48]
葡萄	桑皮微纳米纤维	有效保持葡萄的新鲜度, 减缓果实水分的散失、腐烂	[49]
番荔枝	刺槐豆胶/黄原胶	明显改善番荔枝果实的裂果、烂果和质量损失情况	[50]
圣女果	聚乙烯醇/果胶/乳清蛋白	有效减少水分和可滴定酸含量的损失, 保持了圣女果的质量和风味	[51]
蘑菇	普鲁兰多糖/海藻酸钠	有效地抑制微生物活性和氧化, 更好地保持蘑菇的品质和水分含量	[52]
香菇	大豆分离蛋白	有效保持香菇品质, 减缓可溶性蛋白质和还原糖含量的下降, 抑制细菌的生长	[53]
秋葵	桔梗多糖/海藻酸钠	秋葵质量损失率明显降低、叶绿素含量变化较缓	[54]

Zhao 等^[48]成功制备了一种壳聚糖/金针菇脚多糖复合保鲜膜, 并应用于蓝莓保鲜, 结果显示, 相较于单一壳聚糖膜, 该复合膜的水蒸气与紫外线阻隔性能提高, 抗菌和抗氧化性能增强, 且能有效延缓蓝莓老化, 减少水分蒸发, 调节蓝莓内部气体以抑制其呼吸代谢, 显著延长了蓝莓果实的保质期。杨培芹等^[49]通过制备丁香酚/桑皮微纳米纤维膜, 研究了不同质量分数的丁香酚对纤维膜性能的影响, 结果表明, 该复合膜具有良好的透湿性和力学性能, 在室温下能有效保持巨峰葡萄的新鲜度, 减缓水分散失、果实腐烂进程, 并抑制维生素 C 的流失。杨永利等^[50]将特定配比的中药大黄和五倍子提取液添加到刺槐豆胶/黄原胶复配膜液中, 制成了复合涂膜保鲜剂, 并应用于番荔枝的涂膜保鲜及模拟贮藏实验。结果显示, 该保鲜剂能显著保持番荔枝果实的品质, 大幅降低其褐变程度和乙烯释放量, 有效推迟了番荔枝的软化过程。刘端武等^[51]制备了以聚乙烯醇、果胶、乳清蛋白为基质、单宁酸交联的多功能复合膜, 并评估其在圣女果保鲜中的应用, 结果表明, 复合膜涂覆显著减小了圣女果在贮藏期间的质量损失率, 并提升了其中可滴定酸的含量, 表现出优异的保鲜效果。王余等^[53]通过制备茶黄素/大豆分离蛋白复合涂膜保鲜剂用于香菇保鲜, 以评价其保鲜效果, 结果表明, 该复合涂膜剂能有效延缓香菇的 pH 值下降, 且果实质量损失减少, 可溶性固形物的流失得到抑制。此外, 该涂膜剂还能有效抑制细菌生长, 从而维持香菇在贮藏期间的优良品质。郑妍等^[54]通过从桔梗中提取多糖, 制备了一种包含海藻酸钠、氯化钙及柠檬酸的涂膜保鲜剂, 并成功应用于秋葵的保鲜处理。实验结果显示, 与未使用涂膜保鲜剂的对照组相比, 经过处理的秋葵表现出更低的质量损失率, 叶绿素含量下降速度减缓, 秋葵的货架期显著延长。上述研究表明, 生物可降解材料在未加工果蔬保鲜中也具有良好的应用潜力, 未来的研究应着重将这种保鲜方式与物理保鲜技术、

纳米技术等相结合, 推进果蔬保鲜领域的智能化包装技术研发。

3 结语

生物基可降解包装材料以其生物可降解性、安全性、卓越的抗菌性能及广泛的应用潜力, 日益受到关注, 其中蛋白质、多糖、脂质这 3 类生物基可降解包装材料最为常见。蛋白质成膜材料展现出优异的阻隔性能, 但其易受水分子影响, 耐水性较差。多糖类成膜材料对水分子具有较强的吸引力和相容性, 然而其力学性能却相对较弱。脂质类成膜材料具备出色的防水性能, 但其成膜效果不佳, 易产生不良风味, 影响消费者的食用体验。为克服单一材料的局限性, 将 2 种或多种生物质材料复合或与其他生物抑菌物质复配制备的可食性复合膜应运而生。这种复合膜能集成各单一材料的优点, 显著提升薄膜材料的整体性能, 在果蔬包装中得到了较好的应用。展望未来, 在果蔬的储运保鲜过程中, 应致力于多技术的协同研究, 实现资源的循环利用。同时, 研发集安全、抗菌、防潮、透气等多功能于一体的新型可降解果蔬食品包装材料, 以满足食品包装市场日益增长的多样化需求, 将使果蔬保鲜及食品包装行业发生创新性转变。

参考文献:

[1] 刘宏钊, 安桢. 我国塑料污染治理的实践困境与规范进路——以 G 市 H 区为例[J]. 环境与发展, 2024, 36(3): 7-14.
LIU H Z, AN Y. The Practical Dilemma and Normative Approach of Plastic Pollution Control in China: Take District H of G City as an Example[J]. Environment & Development, 2024, 36(3): 7-14.
[2] 程昊, 陈龙, 徐振林, 等. 天然可降解材料的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 205-213.

- CHENG H, CHEN L, XU Z L, et al. Research Progress of Natural Biodegradable Materials[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(11): 205-213.
- [3] 吴秀兰, 任诗欣, 何俊杰, 等. 果蔬保鲜技术现状及展望[J]. *山东化工*, 2022, 51(12): 111-114.
WU X L, REN S X, HE J J, et al. Current Status and Future Trends of Postharvest Technology on Fruits and Vegetable[J]. *Shandong Chemical Industries*, 2022, 51(12): 111-114.
- [4] 吴湘涵, 李安洁, 梅佳睿, 等. 抑菌功能性可降解保鲜包装对香蕉的保鲜研究[J]. *包装工程*, 2024, 45(11): 105-111.
WU X H, LI A J, MEI J R, et al. Preservation of Bananas by Antibacterial Functional Degradable Fresh-Keeping Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(11): 105-111.
- [5] 范鑫, 杨婷, 王艺瑜, 等. 静电纺丝玉米醇溶蛋白-肉桂醛水果保鲜膜的制备及应用[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(5): 1-7.
FAN X, YANG T, WANG Y Y, et al. Preparation and Application of Electrospun Zein-Cinnamaldehyde Fruit Preservation Film[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(5): 1-7.
- [6] FAN X, CHANG L, PU H Y, et al. Enhancement of Zein-Based Films for Mango Preservation Using High-Intensity Ultrasound and Castor Oil Plasticization[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, 111: 107067.
- [7] LIU H, LI Y J, ZHANG C, et al. Nanoparticle and Dialdehyde Polysaccharide Synergistically Improving the Physicochemical Properties of Soy Protein Isolate Films Enriched with Lingonberry Extract[J]. *Food Hydrocolloids*, 2025, 159: 110667.
- [8] ZHANG R Y, WANG B N, ZHANG F X, et al. Milk-Derived Antimicrobial Peptides Incorporated Whey Protein Film as Active Coating to Improve Microbial Stability of Refrigerated Soft Cheese[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2024, 419: 110751.
- [9] CHAKRABORTY P, HATI S, MISHRA B K. Preparation and Characterization of Nanobiocomposite Films from Sodium Caseinate, Halloysite Nanoclay, and Geraniol and Application on Capsicum (*Capsicum Annum*) Fruits as a Case Study[J]. *Food Bioscience*, 2024, 61: 104665.
- [10] 邓霜琪, 廖晶晶, 廖崇森, 等. 植物单宁对酪蛋白膜的改性研究[J]. *包装工程*, 2023, 44(1): 203-212.
DENG S Q, LIAO J J, LIAO D S, et al. Modification of Casein-based Membrane with Plant Tannins[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(1): 203-212.
- [11] QIAO J, WANG L, WANG L, et al. Development and Characterization of Modified Gelatin-Based Cling Films with Antimicrobial and Antioxidant Activities and Their Application in the Preservation of Cherry Tomatoes[J]. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 2024, 13(4): 431.
- [12] HAI Y D, TIAN T M, XIAO L S, et al. Multifunctional Film Based on Gelatin With Titanium Dioxide and Thymol@ β -cyclodextrins for Fresh-keeping Packaging[J]. *Food Bioscience*, 2022, 50: 102168.
- [13] 江睿钊, 石林凡, 任中阳, 等. 谷朊粉对大豆分离蛋白膜理化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(5): 79-85.
JIANG R Z, SHI L F, REN Z Y, et al. Effect of Wheat Gluten on Physicochemical Properties of Soy Protein Isolate Films[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(5): 79-85.
- [14] CHEN H R, LAN X N, ZHANG Q, et al. Improving the Comprehensive Properties of Gelatin Films by Transglutaminase and Chitosan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 151: 109854.
- [15] REN J H, CAO Y F, ZHANG Y, et al. Dual Cross-Linked Network of the Active Starch Film by Incorporating Palmitic Acid and Geraniol: A Comprehensive Evaluation of the Hydrophobic Mechanism and Antimicrobial Activity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 280: 135830.
- [16] LIU F S, REN J H, YANG Q Y, et al. Improving Water Resistance and Mechanical Properties of Starch-Based Films by Incorporating Microcrystalline Cellulose in a Dynamic Network Structure[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 260: 129404.
- [17] HE C Y, YUAN L B, BI S W, et al. Modified Chitosan-Based Coating/Packaging Composites with Enhanced Antibacterial, Antioxidant, and UV-Resistant Properties for Fresh Food Preservation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(36): 48352-48362.
- [18] TRIPATHI S, KUMAR P, GAIKWAD K K. UV-Shielding and Antioxidant Properties of Chitosan Film Impregnated with Acacia Catechu Modified with Calcium Carbonate for Food Packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 257: 128790.
- [19] 曹佳丽, 董慧琳, 许阳蕾, 等. 用于食品新鲜度监测的纳米 SiO₂-花青素/再生纤维素智能比色传感膜的制备与性能[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(8): 4134-4145.
CAO J L, DONG H L, XU Y L, et al. Preparation and Properties of Nano-SiO₂-Anthocyanidin/Regenerated Cellulose Smart Colorimetric Sensing Film for Food Freshness Monitoring[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(8): 4134-4145.
- [20] LIU D Q, MA J F, WANG X, et al. High-Strength and High-Toughness Tannic Acid-Modified Cellulose Films for Food Preservation[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(37): 17769-17781.

- [21] HAN P, SUN J Y, MAO S, et al. Multifunctional Pectin-Based Films Containing Schiff Base Triggered by pH Microenvironment for Freshness Monitoring and Preservation of Fresh-Cut Papayas[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110417.
- [22] 江东阳, 李楠楠, 黄海源, 等. 淀粉/羧甲基纤维素/甘油可降解复合膜的制备及性能研究[J]. 林产化学与工业, 2024, 44(2): 94-10.
- JIANG D Y, LI N N, HUANG H Y, et al. Preparation and Properties of Starch/Carboxymethyl Cellulose/Glycerol Degradable Composite Films[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2024, 44(2): 94-10.
- [23] NWABIKE AMITAYE A, ELEMIKE E E, AKPEJI H B, et al. Chitosan: A Sustainable Biobased Material for Diverse Applications[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(4): 113208.
- [24] ZHANG Y Q, FENG X, SHI D F, et al. Properties of Modified Chitosan-Based Films and Coatings and Their Application in the Preservation of Edible Mushrooms: A Review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270: 132265.
- [25] WU Y H, QIAN Z J, LEI Y J, et al. Superhydrophobic Modification of Cellulose Film Through Light Curing Polyfluoro Resin in Situ[J]. Cellulose, 2018, 25(3): 1617-1623.
- [26] NURULSYAHIDA S, ISMAIL-FITRY M R, AINUN Z M A, et al. Effects of Palm Wax on the Physical, Mechanical and Water Barrier Properties of Fish Gelatin Films for Food Packaging Application[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 23: 100437.
- [27] 刘小霞, 安学明, 负建民, 等. 蜂胶、蜂蜡复合涂膜剂对双孢蘑菇的保鲜作用[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(16): 187-194.
- LIU X X, AN X M, (YUAN/YUN) J M, et al. Preservative Effects of Propolis and Beeswax Composite Coating on Agaricus Bisporus[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(16): 187-194.
- [28] 李春吟, 李坤, 孙彦琳, 等. 单宁/增稠紫胶树脂复合涂膜的制备及其防腐性能[J]. 林产化学与工业, 2021, 41(4): 1-9.
- LI C Y, LI K, SUN Y L, et al. Preparation and Corrosion Resistance of Tannin Acid/Toughened Shellac Resin Composite Coating[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2021, 41(4): 1-9.
- [29] 孔令月, 葛黎明, 徐志朗, 等. 壬酸增塑改性明胶膜的制备及性能研究[J]. 皮革科学与工程, 2024, 34(5): 15-24.
- KONG L Y, GE L M, XU Z L, et al. Preparation and Performance of Nonanoic Acid Plasticized Gelatin Films[J]. Leather Science and Engineering, 2024, 34(5): 15-24.
- [30] CHEN Q Q, CHANG C Y, ZHANG L N. Surface Engineering of Cellulose Film with Myristic Acid for High Strength, Self-Cleaning and Biodegradable Packaging Materials[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 269: 118315.
- [31] SHI S, XU X W, REN Y M, et al. Beeswax Coating Improves the Hydrophobicity of Sodium Alginate/Anthocyanin/Cellulose Nanocrystal Indicator Film[J]. Food Hydrocolloids, 2023: 144.
- [32] 李香荧, 黄燕敏, 江扬, 等. 以蜂蜡为基质纳米三氟氯氰菊酯制剂制备及杀虫活性研究[J]. 南宁师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(2): 79-86.
- LI X Y, HUANG Y M, JIANG Y, et al. Preparation and Insecticidal Activity of Lambda-Cyhalothrin Nanoformulation Based on Beeswax[J]. Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition), 2021, 38(2): 79-86.
- [33] 刘瑞平. 高疏水淀粉/脂质可食性膜的构建及其性能研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2023.
- LIU R P. Preparation and Properties of Highly Hydrophobic Starch/Lipid Edible Films[D]. Jinan: Shandong Agricultural University, 2023.
- [34] NATESAN S, SAMUEL J S, SRINIVASAN A K. Design and Development of Schiff's Base (SB)-Modified Polylactic Acid (PLA) Antimicrobial Film for Packaging Applications[J]. Polymer Bulletin, 2022, 79(7): 4627-4646.
- [35] JO J, KOO B. Bio-Composite Using Polyhydroxyalkanoates and Sustainable Nanofillers Derived from Cellulose Nanofibers and Its Application for an Environmentally Friendly Packaging Material[J]. Journal of Polymer Science, 2024, 62(20): 4706-4717.
- [36] 赵海云, 邵林, 李涛, 等. 鲜切果蔬保鲜技术的研究进展[J]. 农产品加工, 2023(10): 81-90.
- ZHAO H Y, SHAO L, LI T, et al. Research Progress of Fresh-cut Fruits and Vegetables Preservation Technology[J]. Farm Products Processing, 2023(10): 81-90.
- [37] ZHAO Y C, MA X L, WANG G H, et al. Pomegranate Peel Extract Incorporated Soy Protein Isolate/Artemisia Sphaerocephala Krasch. Gum Composite Films for Fresh-Cut Apples Preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135649.
- [38] 乔勤勤, 王玥, 孙雪婷, 等. 苦瓜多糖/大豆分离蛋白复合膜对鲜切马铃薯的保鲜研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(2): 27-33.
- QIAO Q Q, WANG Y, SUN X T, et al. Preservation of Fresh Cut Potato by Momordica Polysaccharide/Soybean Protein Isolate Composite Membrane[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2024, 43(2): 27-33.
- [39] 王艳, 汤卫东, 张亮. 壳聚糖+植酸复合涂膜对鲜切哈密瓜保鲜效果的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(4): 48-53.
- WANG Y, TANG W D, ZHANG L, et al. Preservation Effect of Natural Film with Chitosan Combining Phytic Acids on Fresh-Cutting Cantaloupe[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(4): 48-53.

- [40] BATA GOUDA M H, ZHANG C J, PENG S J, et al. Combination of Sodium Alginate-Based Coating with L-Cysteine and Citric Acid Extends the Shelf-Life of Fresh-Cut Lotus Root Slices by Inhibiting Browning and Microbial Growth[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 175: 111502.
- [41] LINH C T M, NGOC V D, PHAT D T, et al. Effectiveness of Sodium Alginate-Based Coating on the Preservation of Da Xanh Pomelo Fresh-Cut[J]. *Applied Food Research*, 2024, 4(1): 100426.
- [42] TAN K B, ZHENG M, LIN J, et al. Fabrication of Abelmoschus Manihot Gum/Pullulan/Magnesium L-Ascorbate Green Composite Packaging Film and Its Excellent Performance in Preserving Fresh-Cut Carrots[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 278(2): 134546.
- [43] LIN X M, ZHANG H Y, GUO X, et al. A Novel Sodium Alginate-Carnauba Wax Film Containing Calcium Ascorbate: Structural Properties and Preservative Effect on Fresh-Cut Apples[J]. *Molecules*, 2022, 28(1): 367-367.
- [44] 齐杰, 陈凯灵, 孙若楠, 等. 壳聚糖-海藻酸钠/纤维素纳米晶多层包装对鲜切雪梨保鲜效果及呼吸代谢的影响[J]. *食品科技*, 2023, 48(9): 44-51.
- QI J, CHEN K L, SUN R N, et al. Effects of Chitosan-Sodium Alginate/Cellulose Nanocrystal Multilayer Packaging on Preservation and Respiration Metabolism of Fresh-Cut *Pyrus Nivalis*[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(9): 44-51.
- [45] 孔倩倩, 陈晓晓, 张建华, 等. 复合涂膜对鲜切芹菜的保鲜效果[J]. *食品工业*, 2024, 45(2): 57-63.
- KONG Q Q, CHEN X X, ZHANG J H, et al. The Preservation Effect of Composite Coating on Fresh-Cut Celery[J]. *The Food Industry*, 2024, 45(2): 57-63.
- [46] 田旭静. 壳聚糖涂膜处理对鲜切莴笋贮藏品质的影响[J]. *广东蚕业*, 2022, 56(8): 54-56.
- TIAN X J. Effect of Chitosan Coating Treatment on the Storage Quality of Fresh Cut Lettuce[J]. *Guangdong Sericulture*, 2022, 56(8): 54-56.
- [47] 王静. 果蔬采后保鲜包装技术的研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2022, 22(6): 91-96.
- WANG J. Research Progress of Fresh-Keeping Packaging Technology for Post-Harvest Fruits and Vegetables[J]. *Storage and Process*, 2022, 22(6): 91-96.
- [48] ZHAO J, WANG Y, LI J B, et al. Preparation of Chitosan/Enoki Mushroom Foot Polysaccharide Composite Cling Film and Its Application in Blueberry Preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 246: 125567.
- [49] 杨培芹, 潘志娟. 丁香酚/桑皮微纳米纤维膜的制备及其性能[J]. *纺织学报*, 2024, 45(8): 72-80.
- YANG P Q, PAN Z J. Preparation of Eugenol/Mulberry Micro-Nanofibers Membrane and Its Performance[J]. *Journal of Textile Research*, 2024, 45(8): 72-80.
- [50] 杨永利, 袁俏玲, 王丹, 等. 复合涂膜保鲜剂对番荔枝模拟贮运期间品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(7): 1106-1115.
- YANG Y L, YUAN Q L, WANG D, et al. Effect of Compound Film Preservative on Quality of *Annona Squamosa* L. During Simulated Storage and Transportation[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(7): 1106-1115.
- [51] 刘端武, 廖海周, 杨敏, 等. 聚乙烯醇-果胶-乳清蛋白复合膜性能及其在圣女果保鲜中的应用[J/OL]. *食品与发酵工业*, 2024: 1-13. (2024-08-14)[2024-10-20]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040139>.
- LIU D W, LIAO H Z, YANG M, et al. Properties of Polyvinyl Alcohol-pectin-whey Protein Composite Film and Application in Cherry Tomatoes Preservation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024: 1-13. (2024-08-14)[2024-10-20]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040139>.
- [52] RASHID A, QAYUM A, BACHA S A S, et al. Preparation and Functional Characterization of Pullulan-Sodium Alginate Composite Film Enhanced with Ultrasound-Assisted Clove Essential Oil Nanoemulsions for Effective Preservation of Cherries and Mushrooms[J]. *Food Chemistry*, 2024, 457: 140048.
- [53] 王余, 赵佩月, 雷时成, 等. 茶黄素-大豆分离蛋白复合物涂膜对香菇贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(8): 366-373.
- WANG Y, ZHAO P Y, LEI S C, et al. Effect of Theaflavins-Soy Protein Isolate Complex Coating on the Quality of *Lentinus Edodes*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(8): 366-373.
- [54] 郑妍, 张晓虎, 文佳奇. 桔梗多糖复合涂膜剂在秋葵中的保鲜效果研究[J]. *农学学报*, 2022, 12(12): 48-55.
- ZHENG Y, ZHANG X H, WEN J Q, et al. Effect of Platycodon Grandiflorum Polysaccharide Compound Coating Agent on Preserving Okra[J]. *Journal of Agriculture*, 2022, 12(12): 48-55.