

# 果蔬包装用可生物降解材料的制备与应用研究进展

张清宇<sup>1</sup>, 李晓如<sup>1</sup>, 萧诺莹<sup>1</sup>, 陈汉城<sup>2</sup>, 范小平<sup>1</sup>

(1.华南农业大学 食品学院, 广州 510642; 2.广东安德力新材料有限公司, 广东 汕头 515800)

**摘要:** **目的** 可生物降解材料具有高效和环保的特点, 可以减轻传统石油基材料过度使用带来的环境污染问题, 总结可生物降解材料及其制备技术的特点为进一步促进其在果蔬包装中的应用提供参考和基础。**方法** 首先对现有的可生物降解材料进行分类, 其次探究其制备方法, 然后对近年来可生物降解材料在生鲜果蔬包装中的应用, 以及对生鲜果蔬保质期和质量的影响相关的研究进行总结和分析, 最后对可生物降解材料的特点和应用前景进行归纳、分析和展望。**结果** 可生物降解材料具有良好的性能, 适当的透气性和透湿性, 较高的 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 选择透过性, 可大幅度地提高果蔬的货架期。**结论** 可生物降解材料相较于现有的保鲜包装材料有更好的保鲜效果, 高效环保, 能减轻不可降解材料对环境造成的污染问题。

**关键词:** 果蔬包装; 可生物降解材料; 制备; 应用; 进展

**中图分类号:** TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)07-0075-12

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.07.009

## Preparation and Application Progress of Biodegradable Materials for Fruit and Vegetable Packaging

ZHANG Qing-yu<sup>1</sup>, LI Xiao-ru<sup>1</sup>, XIAO Nuo-ying<sup>1</sup>, CHEN Han-cheng<sup>2</sup>, FAN Xiao-ping<sup>1</sup>

(1.College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2.Guangdong Andelie New Material Co., Ltd., Guangdong Shantou 515800, China)

**ABSTRACT:** Biodegradable materials have the characteristics of high-efficiency and environmental protection. They can solve the problem of environment pollution for overuse of petroleum-based packaging materials. The work aims to summarize the characteristics of biodegradable materials and their preparation technology to provide reference for their further application in fruit and vegetable packaging. Firstly, the existing biodegradable materials were classified. Secondly, the preparation methods of biodegradable materials were introduced. And then the application of biodegradable materials in fresh fruit and vegetable packaging and their impact on the quality of fresh fruits and vegetables in recent years were summarized and analyzed. Finally, the characteristics and application prospects of biodegradable materials were summarized, analyzed and prospected. Biodegradable materials had good properties, proper air permeability and moisture permeability, and high CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> selective permeability, which can greatly improve the shelf life of fruits and vegetables. Compared with the existing fresh-keeping packaging materials, biodegradable materials have better fresh-keeping ef-

收稿日期: 2021-08-03

基金项目: 2021年广东省科技创新战略专项(pdjh2021b0087); 2020年广东省级大学生创新训练项目; 2021年华南农业大学大学生创新创业训练计划(X202110564035); 2021年广东省科技专项资金项目(210714116891352); 2020年广东省科技创新战略专项资金项目(2020B121202008)

作者简介: 张清宇(1997—), 男, 华南农业大学硕士生, 主攻食品加工与包装。

通信作者: 范小平(1981—), 男, 博士, 华南农业大学副教授, 主要研究方向为食品加工与包装。

fect, high efficiency and environmental protection, and can reduce the environmental pollution caused by non-degradable materials.

**KEY WORDS:** fruit and vegetable packaging; biodegradable materials; preparation; application; progress

近年来,伴随着食物消费结构的演变和膳食结构的破坏,加工程度最低的生鲜果蔬消费迅速增长<sup>[1]</sup>。生产鲜切果蔬时,通过剥皮、切割、洗涤、用消毒剂杀菌、干燥等处理改变了其物理完整性,使其比原料更易腐烂<sup>[2]</sup>。这是由于收获和加工后果蔬活组织的呼吸作用、蒸腾作用加剧,酶活性增强,同时腐败菌和病原菌大量增殖<sup>[3]</sup>。据统计,发达国家果蔬产品的损耗率不到5%,而我国果蔬的腐烂率高达25%~30%<sup>[4]</sup>。包装可以阻碍果蔬的定性腐败,一般来说,果蔬的品质与氧气的浓度和储存温度有关,适合的条件可以降低其呼吸速率,从而限制新鲜质量的损失<sup>[5]</sup>,因此,果蔬保鲜特性和包装薄膜渗透率密切相关。

目前,生鲜果蔬包装普遍采用的材料仍是石油基聚合物膜,比如聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯膜等,由于这些石油基包装膜的非生物可降解性,已经导致了严重的生态问题。从2021年1月起,随着我国“禁塑令”全面实施,以更环保的可生物降解材料取代传统石油基包装薄膜则显得越来越有必要<sup>[6]</sup>。生物降解性不仅是一种功能要求,也是一种重要的环境属性。

可生物降解材料是由淀粉和生物衍生单体等可再生原料生产得到<sup>[7]</sup>,能够回收利用,也可以被微生物降解。因为与传统石油基材料相比,可生物降解材料的成本高、整体性能差,所以导致其市场占有率远远不够,各方面的研究还有待进一步深入和完善。基于此,文中首先对目前果蔬包装用的可生物降解材料进行分类,然后对其制备方法和应用进展进行归纳、总结和分析,并对今后该领域的进一步研究进行展望。

## 1 可生物降解材料的类型

可生物降解材料包括微生物合成降解材料、化学合成降解材料和天然高分子共混降解材料三大类,见表1。微生物合成降解材料为一类聚酯,它是以脂肪族结构和酯基为主链构成的,由某些不常见的微生物以糖和有机酸为原料经发酵合成而成<sup>[8]</sup>;化学合成降解材料由2种或2种以上的组分(亲水胶体或脂质)组成,以产生比单个组分具有更好特性的混合;天然高分子共混降解材料主要是全淀粉材料,是一种将淀粉与增塑剂加热混合而成的材料<sup>[9]</sup>。

## 2 可生物降解材料的制备方法

### 2.1 膜的制备方法

#### 2.1.1 流延法

流延法是指在陶瓷粉料中加入溶剂、分散剂、粘结剂、增塑剂等成分,得到均匀分散的稳定料浆,然后在流延机上制得一定厚度薄膜的成型方法。流延法在塑料和涂料工业上应用广泛,如制备薄膜、塑料袋等,常见的有用于果蔬包装的PVA缓释薄膜等。流延法加工设备简单、成本低、所制备的产品性能好,常用于在高温下加工易降解或熔融黏度高的聚合物,在制备聚合物基功能材料方面已得到了较为广泛的应用<sup>[10]</sup>。

叶青青等<sup>[11]</sup>采用流延法制备了结构均匀的壳聚糖/聚赖氨酸复合膜,将其用于柑橘的保鲜,结果表明该膜减缓了柑橘V<sub>C</sub>含量和含糖量的流失速度,抑制了柑橘的损失和腐败。Ponnudurai等<sup>[12]</sup>从香蕉中提取出一种纤维素NFC,并以NFC、聚乙烯醇和聚丙烯酸为原料,通过流延法制备纳米纤维膜,发现该膜可以防紫外线,具有强交联,高隔氧能力和较高的抗拉强度等特点。用该纳米薄膜包装的西红柿的保质期可以维持15d,比传统薄膜延长了7d。蒋金勇<sup>[13]</sup>通过流延法制备了PLA-PBSA/生姜精油/茶树精油活性薄膜,发现2种精油可以和PLA-PBSA相容,使薄膜的抗氧化性能、氧气透过率和水蒸气透过率均得到进一步提升;该薄膜适合应用于强呼吸跃变型果蔬的保鲜(如西兰花),可以在保持水果较高抗坏血酸含量的同时有效抑制丙二醛(MDA)含量的上升。

#### 2.1.2 静电纺丝法

静电纺丝技术具有成本效益高、效率高等优点,用于制造功能性微尺度和纳米尺度的聚合物纤维。主要利用电势运行,释放导电溶液,泰勒锥形成,在各种力(如静电、阻力和重力)的作用下获得超细纤维线,最后,通过不同形状的装置收集纤维<sup>[14]</sup>。可以根据电纺纤维的特性和具体应用进行调整,包括改变其厚度、长度、面积体积比、表面化学和成分的能力。此外,电纺纤维具有密度低、比表面积大、孔隙率高、孔径可调等优点。基于这些原因,静电纺丝常被用于制造多种用途的功能材料,包括组织工程、药物递送、伤口敷料、过滤、电极设计、酶固定和食品包装<sup>[15]</sup>。归纳了静电纺丝聚合物在果蔬包装中的应用情况,见表2。

静电纺纳米纤维具有许多优点, 与传统的成膜方法相比有着巨大的进步。目前的静电纺丝技术在食品包装行业中的应用大部分还限于实验室规模, 而要普遍应用于工业层面上促进产业化和作为食品包装薄膜, 则必须在商业规模上生产纤维。总之, 食品包装用静电纺纳米纤维的稳定性、阻隔性能、功能性和力学性能仍有待进一步研究和优化。

### 2.1.3 复合涂膜

大多数研究表明, 复合涂膜是提高鲜切果蔬品质较有前景的方法, 因为它能够将抗氧化剂、抗菌剂、保健品、颜色和风味作为纳米载体进行封装。该方法能够作为活性化合物的储存库, 保护活性化合物并调节其受控释放, 以响应某些触发因素<sup>[22]</sup>。归纳分析了复合涂膜在果蔬包装中的应用情况, 见表 3。

表 1 可生物降解材料分类  
Tab.1 Classification of biodegradable plastics

类型	种类
微生物合成降解材料	聚羟基脂肪酸酯、聚乳酸、聚羟基丁酸酯
化学合成降解材料	聚己内酯、聚乙烯醇、聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯、聚琥珀酸丁二醇酯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚碳酸亚乙酯、聚甲基乙撑碳酸酯、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二甲酯
天然高分子共混降解材料	蛋白质型材料、壳聚糖型材料

表 2 静电纺丝聚合物在果蔬包装中的应用  
Tab.2 Application of electrospun polymer in fruit and vegetable packaging

果蔬	静电纺丝材料	包装效果
草莓	聚乳酸/碳纳米管/壳聚糖	对革兰氏阴性菌和阳性菌的抗菌活性好, 可延缓草莓的生理变化, 延长保质期 <sup>[16]</sup>
鲜切苹果	麦醇溶蛋白/槲皮/壳聚糖	保持色泽, 控制水分流失 <sup>[17]</sup>
桃	玉米醇溶蛋白/己醛/聚氧化乙烯	防止细胞膜降解, 延长保质期 <sup>[18]</sup>
芒果	己醛/聚乙烯醇/纳米纤维素	防止成熟, 延长保质期 <sup>[19]</sup>
蘑菇	聚乙烯醇/肉桂精油/ $\beta$ -环糊精	保持新鲜, 延缓腐烂 <sup>[20]</sup>
鲜枣	PVA/红甘蓝提取物复合膜作为 pH 生物传感器的纤维垫	pH 生物传感器可实时显示包装袋内水果 pH 值的变化, 监测水果的腐败程度 <sup>[21]</sup>

表 3 复合涂膜在果蔬保鲜中的应用  
Tab.3 Application of nano emulsion film in preservation of fruits and vegetables

类型	原料	保鲜效果	
按制备方法分类	壳聚糖/淀粉	提高番茄的货架期 <sup>[23]</sup>	
	壳聚糖/石榴皮提取物	降低了芒果新鲜质量的损失, 保持了其总可溶性固形物、酸度和 pH 值 <sup>[24]</sup>	
	壳聚糖/苹果皮多酚	延长草莓的采后寿命, 延缓果实贮藏过程中的衰老, 保持果实的品质属性 <sup>[25]</sup>	
	壳聚糖/纳米 TiO <sub>2</sub>	减少芒果腐烂和水分散所造成的损失, 延缓呼吸高峰, 维持果实硬度 <sup>[26]</sup>	
插层复合法	大豆分离蛋白/羟丙基甲基纤维/橄榄油	有利于保持梨子硬度, 降低水分损失, 有效抑制其抗坏血酸的含量 <sup>[27]</sup>	
原位聚合法	纳米 ZnO /羧甲基纤维素钠	抑制红橘的呼吸作用, 进而降低果实的腐烂率, 提高果皮的抗氧化酶活性和总抗氧化能力 <sup>[28]</sup>	
按作用效果分类	PVA-溶菌酶	提高鸡蛋的保质期 <sup>[29]</sup>	
	纳米乳液抗菌剂	壳聚糖	保持桃色泽和硬度、降低其酸度和腐烂率、减缓可溶性固形物分解 <sup>[30]</sup>
	纳米乳液抗氧化剂	可食性橘皮精油涂层	延长了柑桔片的货架期 <sup>[31]</sup>
	纳米乳液织构增强剂	黄原胶/ $\alpha$ -生育酚/nopal 提取物	提高苹果和番石榴的硬度 <sup>[32]</sup>

目前,应用于果蔬复合涂膜合成方法主要是共混法,简单的共混法所制备的薄膜在膜与膜之间存在着明显的界面,为一个热力学不稳定体系,而表3的3种制备方法可以有效地减小不稳定程度,降低界面张力。天然来源的抗菌剂、抗氧化剂和织构增强剂是化学添加剂的潜在替代品,代表了满足消费者要求的一种有前途的策略。相较于传统的乳液型食用涂膜,使用天然活性化合物配制的纳米乳液型涂膜可以提高鲜切果蔬的安全性和保质期。

## 2.2 微胶囊的壳材

微胶囊技术指将化合物封装在微球或微胶囊内,其平均直径为1 mm到几百 $\mu\text{m}$ 。许多不同的活性材料,如药物、酶、维生素、杀虫剂、香料和催化剂,已成功地封装在由多种聚合物和非聚合物材料制成的微球或微胶囊中,包括聚乙二醇、聚甲基丙烯酸甲酯、纤维素、明胶等。这些微胶囊通过不同的释放机制在适当的时间释放其内容物。该技术在医药、农业、食品、印刷等多个领域得到广泛应用<sup>[33]</sup>。

微胶囊技术可以有效防止有害物质直接与鲜切果蔬接触,减缓果蔬的氧化速度和腐败速率,从而有效地延长其货架期。Cui等<sup>[34]</sup>制备了石榴多酚的壳聚糖纳米颗粒,将其加入玉米醇溶蛋白制备活性膜,能有效抑制单核李斯特菌的生长,能够有效地抑制微生物的活性。

虽然近年来微胶囊技术得到快速发展,但为了克服方法的局限性,提高微胶囊的利用率,在某些领域仍有许多需要进一步研究的问题,而工程技术对改善微胶囊的各种制备工艺和提高其性能至关重要。

## 3 可生物降解材料在果蔬包装中的应用

目前,市面上的果蔬包装多为疏水性石油基聚合物材料,其在制作中添加的增塑剂和溶剂影响了果蔬的风味挥发性成分的吸附和转移,导致包装内部风味特性的整体不平衡,比如聚丙烯会吸收各种风味化合物,包括酯、酮和醛等,而可生物降解材料能够完全避免此问题。其次相较于传统的石油基薄膜,可生物降解薄膜具有更优的气体透过性和水蒸气透过性,故具有长远的推广意义<sup>[35]</sup>。

### 3.1 微生物合成降解材料

#### 3.1.1 聚乳酸的应用

聚乳酸(Polylactide Acid, PLA)是一种热塑性脂肪族聚酯,来源于玉米、木薯根和甘蔗等可再生材料。PLA具有良好的透明性,力学性能,生物相容性,热稳定性等,其产业化工艺技术成熟,产量大,价格低廉,应用广,易降解;被归类为GRAS(一般被美国食品药品监督管理局认定为安全的并经欧盟委员

会授权用于与食品接触),因此,它常常被用于制备可生物降解包装膜,用于延长各种农产品的货架期,包括蓝莓、芹菜、菠菜、甜瓜等,见表4。

#### 3.1.2 聚羟基脂肪酸酯的应用

聚羟基脂肪酸酯(Holyhydroxyalkanoates, PHA)是通过发酵工程技术制备的生物材料<sup>[50]</sup>。PHA的制备是一个低能耗和低 $\text{CO}_2$ 排放的过程,具有许多可调节的材料性能,易于降解,从制备过程到使用后都有利于对环境的保护;其随着成本的进一步降低,以及高附加值应用的开发,将成为一种成本可被市场接受的多领域应用的生物材料。

Moreno等<sup>[51]</sup>通过静电纺丝技术在PHA薄膜上制备了富含酚类物质的玉米醇溶蛋白纤维,并将其应用于食品包装的内涂层。结果表明,交联延迟了酚类化合物(迷迭香酸、咖啡酸及其衍生物)在2种溶剂中的释放,并保持了它们的抗氧化性能,有助于亲水性和亲脂性食品的保存。

Yang等<sup>[52]</sup>制备了一系列缓释药速率可调的PHA微球或支架。研究发现,以Ci为载体的PHA微球对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌均表现出优异的抗菌活性。通过果实保鲜实验,证实了负载型Ci微球具有良好的防腐性能和优良的抗菌保鲜性能。Ci微球和支架具有良好的生物相容性和缓释性能,将在农业和食品领域得到广泛应用。

### 3.2 化学合成降解材料

#### 3.2.1 聚己内酯的应用

聚己内酯(Polycactone, PCL)是一种可生物降解的聚酯,由 $\epsilon$ -己内酯开环聚合而成。PCL具有很好的柔性和加工性,但其熔点较低,阻隔性较差,因其具有良好的生物相容性,所以可作为改性剂提高其他高聚物的性能。PCL常被应用于卷心菜、花椰菜、西红柿、甜玉米和蓝莓等果蔬的包装和贮藏,归纳了PCL在果蔬包装中的应用,见表5。

#### 3.2.2 聚乙烯醇的应用

聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)是一种性能良好的合成聚合物,具有良好水溶性、黏度和热稳定性,广泛应用于化工工业<sup>[62]</sup>。研究表明,一些微生物可以把PVA当作碳和能源。尽管如此,大部分的工作都集中在细菌上,只有少数研究涉及真菌降解聚合物。真菌菌株能够生长和降解各种化合物,如有机污染物、高分子材料<sup>[63]</sup>。

Min等<sup>[64]</sup>制备了HACC/PVA复合涂层,发现其对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和灰霉病菌的抑制率可达99%,对草莓有良好的抑菌效果。Lan等<sup>[65]</sup>制备了PVA/茶多酚复合膜用于草莓的保鲜,发现其可以有效地延缓草莓果体重和硬度下降。此外,PVA/茶多酚复合膜显著地延缓了果可滴定酸和可溶性固

表 4 PLA 在果蔬包装中的应用  
Tab.4 Application of PLA in fruit and vegetable packaging

果蔬	包装材料	包装效果
蓝莓	PLA/ $\beta$ -CD-百里香酚	有效延长蓝莓的保质期 <sup>[36]</sup> 。
	尤加利精油/PLA/PHA PLA/甜菜皮	维持了蓝莓果实的新鲜度, 降低其水分的蒸发速度, 保持其总酚含量 <sup>[37]</sup> 。 有效抑制蓝莓青霉菌和灰霉菌孢子生长, 维持蓝莓果实总黄酮、多酚含量 <sup>[38]</sup>
芹菜	PLA95kPaO <sub>2</sub>	芹菜条在 7 °C 下贮藏 1 周的保鲜效果最好 <sup>[39]</sup>
	PLA/PBAT/碳酸钙/二氧化硅	保持芹菜水分和 V <sub>C</sub> 含量, 减缓其老化速度, 具有较好的保鲜效果 <sup>[40]</sup>
金针菇	PLA 薄膜真空包装	可延缓金针菇酶后期衰老, 抑制酶促褐变, 提高其感官质量与品质 <sup>[41]</sup> 。
	N-甲基吡咯烷酮/PLA 透气膜	有效延长金针菇的保质期 2~3 d, 抑制其褐变速度和多酚氧化酶活性 <sup>[42]</sup>
菠菜	PLA/PET	发现 PLA/PET 塑料铰链托盘可用于鲜切和熟切菠菜的包装, 但必须解决冷凝水问题 <sup>[43]</sup>
	水降解 PLA 保鲜袋	水降解 PLA 保鲜膜对菠菜有着良好的保鲜效果, 再配合其优良的降解性能, 在海上有着巨大的应用前景 <sup>[44]</sup>
甜瓜	PLA 容器	较好地保持了鲜切甜瓜的整体品质, 生物基 PLA 是石油基聚酯的合适替代品用于鲜切甜瓜的贮藏 <sup>[45]</sup>
	PLA 膜包装	PLA 对呼吸活动期间产生的气体具有光屏障作用, 使用 PLA 储存的甜瓜显示出更高的亮度和色度损失 <sup>[46]</sup>
	PLA/纳米粘土	纳米粘土的存在减少水转移, 保质期能延长 30%左右 <sup>[47]</sup>
西兰花	PLA 薄膜	对常温条件下的西兰花保鲜效果明显, 能有效地延长其常温货架期 <sup>[48]</sup>
	PLA/纳米纤维素/PEG	有效降低叶绿素和维生素 C 的降解, 减缓西兰花衰老, 延长其货架期 <sup>[49]</sup>
	葡萄柚精油/PLA/PBSA	具有强抗氧化性, 抑制丙二醛的增多, 延长西兰花的保质期 <sup>[13]</sup>

表 5 PCL 在果蔬包装中的应用  
Tab.5 Application of PCL in fruit and vegetable packaging

果蔬	包装材料	包装效果
西兰花	壳聚糖纤维素膜粘合到 PCL 膜上制备层压板	包装西兰花, 有效地延长西兰花的保质期 <sup>[53]</sup>
	三层复合膜(PCL/MC/PCL)	控制西兰花中总好氧微生物群的生长, 在控制果蔬致病菌和总菌群方面具有潜在的应用前景 <sup>[54]</sup>
蘑菇	PCL/PPC 共混膜	能够有效降低多酚氧化酶活性和保留蘑菇颜色 <sup>[55]</sup>
	PCL/PLA/肉桂醛	具有较高的水蒸气透过率, 可保持鲜菇的品质, 延长其采后寿命 <sup>[56]</sup>
草莓	PCL 薄膜	显著提高了草莓的货架期至 22 d。该环保膜可批量生产, 方便日常使用 <sup>[57]</sup>
	PLLA-PCL-PLLA 三嵌段共聚物	适宜于草莓包装的气氛组成, 贮藏期间果实保持较好的感官状态, 维生素 C、硬度、糖度、质量损失率损失得较慢, 草莓的保质期高达 20 d <sup>[58]</sup>
菠菜	PCL 薄膜	抑制叶绿素的降解和丙二醛的积累量, 延缓采后衰老, 较好地保持菠菜的感官品质 <sup>[59]</sup>
番茄	PCL/N-TiO <sub>2</sub> 复合多孔纤维	合成的复合多孔纤维在可见光下具有一定的光催化活性, 可降解青番茄的乙烯 <sup>[60]</sup>
	PCL/氧化硅	具有较高的断裂伸长率和适宜的透气性, 延迟番茄成熟, 养分含量高, 保质期延长 <sup>[61]</sup>

物流失和有限的微生物增殖,其能延长草莓的保质期。

Fahma 等<sup>[66]</sup>采用溶剂蒸发浇铸法制备了热塑性淀粉-PVA-纤维素纳米复合材料。将其应用于冷藏和常温下的红辣椒包装。发现用纳米复合薄膜包装的红辣椒在室温下贮藏 12 d,而在冷藏温度下,红辣椒的储藏期长达 15 d。

杜运鹏<sup>[67]</sup>制备了 PVA 抗氧复合薄膜,并进一步对其进行纳米改性,将其应用于鲜切山药的保鲜。在常温下,测定了不同包装天数鲜切山药的质量损失率、V<sub>C</sub> 含量、硬度、可溶性固形物、色差和多酚氧化酶活性等指标,发现相较于对照组,纳米改性 PVA 抗氧复合薄膜保鲜效果更好。从综合抗氧保鲜分析来看,含有质量分数为 0.3% 的 4-HR 和质量分数为 0.3% 的 CA 纳米改性 PVA 抗氧复合薄膜的保鲜效果最优。

### 3.2.3 聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯的应用

聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯 (Poly (butyleneadipate-co-terephthalate), PBAT) 是目前比较热门的可生物降解材料之一,其韧性、热稳定性和透气性良好。因其分子链两侧存在苯环,故力学性能和耐冲击性能较强。PBAT 的结晶度和熔点相对较低, PBAT 包装膜不仅广泛应用于果蔬的保鲜、冷冻食品的储运等,在农业上也应用广泛,例如地面覆盖薄膜除草<sup>[68]</sup>。归纳分析了 PBAT 在果蔬包装中的应用情况,见表 6。

## 3.3 天然高分子共混降解材料

### 3.3.1 蛋白质型材料的应用

蛋白质是由肽键连接在一起的氨基酸组成的动

植物细胞的结构和功能成分,动植物来源的蛋白质已被广泛用于薄膜制备。蛋白质型材料具有良好的韧性与阻隔性,高效的生物降解性,但抗拉强度不足,耐高温能力差,可与其他聚合物进行改进加工,提高其性能。大豆蛋白、小麦面筋蛋白、玉米醇溶蛋白和乳清蛋白是常用的植物蛋白,常用于制作薄膜的动物蛋白有明胶、胶原蛋白和角蛋白。当蛋白质基薄膜应用于食品保鲜时,必须考虑食物过敏、小麦面筋不耐症(乳糜泻)、牛奶蛋白不耐症和宗教信仰/禁令等<sup>[75]</sup>。

有研究制备了乳清蛋白薄膜,将其用于包装草莓,发现在 7~10 °C 的条件下草莓的保质期延长至 12 d,还发现面筋膜比面筋基涂料的防腐效果更好<sup>[76]</sup>。Takala 等<sup>[77]</sup>制备了玉米醇溶蛋白膜,并用油酸对其增塑,以延长西兰花的货架期。新鲜的西兰花在低温下贮藏 6 d 后,用玉米醇溶蛋白膜密封在玻璃瓶中,保持了原来的硬度和颜色。Vimala 等<sup>[78]</sup>制备了玉米醇溶蛋白基保鲜膜用于苹果切片的保鲜,发现其防褐变效果与普通保鲜膜相当,但能更好地防止苹果切片的质量损失。

### 3.3.2 壳聚糖型材料的应用

壳聚糖是由 D-氨基葡萄糖和 N-乙酰-D-氨基葡萄糖组成的共聚物<sup>[79]</sup>。以甲壳素为原料,经碱脱乙酰制得的线形多糖。与其他中性或带负电的多糖相比,壳聚糖具有独特的阳离子性质,使其具有强而广谱的抗菌性能<sup>[80]</sup>;壳聚糖型材料具有良好的成膜性,生物可降解性与生物相容性,对人体无毒无害等优点。归纳分析了壳聚糖型材料在果蔬包装中的应用情况,见表 7。

表 6 PBAT 在果蔬包装中的应用

Tab.6 Application of PBAT in fruit and vegetable packaging

果蔬	包装材料	包装效果
番茄	PBAT/TiO <sub>2</sub> /Ag	TiO <sub>2</sub> /Ag 纳米粒子具有优异的抗菌活性,复合生物膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有独特的抗菌性能,对番茄具有良好的保鲜效果 <sup>[69]</sup>
	PBAT/PLA/肉桂皮精油	抑制松毛虫离体菌丝生长,对番茄有很好的防护效果 <sup>[70]</sup>
	PBS/PBAT 共混膜	维持果实中过氧化物酶的活性,抑制多酚氧化酶和果胶酶的活性,从而减缓果实的褐变与软化的速率 <sup>[71]</sup>
草莓	PBAT/MO 种子粉复合膜	PBAT-1%MO 薄膜具有良好的生物降解包装性能,延长了草莓的贮藏时间,降低了草莓受真菌侵害的风险。与纯 PBAT 相比,MO 降低了草莓的真菌污染 <sup>[72]</sup>
黄瓜	PBAT/PE 熔融共混	质量分数为 30% 的 PBAT/PE 薄膜的气体透过性、透湿性等性能更好,适合较长时间贮藏;质量分数为 20% 的 PBAT/PE 薄膜的柔韧性更好,适合用于贮藏期为 20 d 内的短期贮藏或运输包装 <sup>[73]</sup>
金针菇	PBAT/PP 熔融共混	质量分数为 20% 的 PBAT/PP 共混薄膜真空包装金针菇后 V <sub>C</sub> 含量变化、质量损失率、可溶性固形物含量下降较平缓,无胀包结露现象 <sup>[74]</sup>

表 7 壳聚糖在果蔬包装中的应用  
Tab.7 Application of chitosan in fruit and vegetable packaging

果蔬	包装材料	包装效果
番茄	纳米二氧化钛/壳聚糖	发现该膜在紫外光照射下表现出乙烯的光降解活性, 从而延缓了番茄的成熟过程和品质变化 <sup>[81]</sup>
	壳聚糖纳米粒子/百里香酚	延长包装樱桃番茄保质期, 番茄硬度无明显变化, 质量损失率低 <sup>[82]</sup>
葡萄	壳聚糖包覆 PS	延长葡萄的货架期 <sup>[83]</sup>
	UV-C/壳聚糖涂膜	抑制果实的质量损失, 保持果实视觉品质, 提高鲜食葡萄冷藏过程中植物化学成分含量 <sup>[84]</sup>
	丁香/薰衣草挥发油/香兰素为原料, 用包油乳剂制备壳聚糖和海藻酸钠微球	抑制灰霉病菌的生长, 保持葡萄的新鲜度、硬度、风味和气味 <sup>[85]</sup>
草莓	壳聚糖/百里香挥发油可食性涂膜	使草莓保质期延长 15 d, 经过处理的草莓延缓了物理化学和抗氧化性能的丧失 <sup>[86]</sup>
	壳聚糖的牡丹提取物涂层	延长了草莓保质期, 减缓质量损失, 维持了维生素的含量和提高了抗氧化能力 <sup>[87]</sup>
	壳聚糖/玉米淀粉/肉桂醛复合膜	对灰霉病菌、根霉和大肠杆菌有较强的抑制作用, 对草莓具有显著的保鲜效果, 降低了营养价值的损失; 减缓其生理变化, 延长保质期 <sup>[88]</sup>
蘑菇	壳聚糖/纳米钛涂膜	能有效降低白蘑菇的质量损失、细胞膜损伤、抑制褐变、延长其货架期 <sup>[89]</sup>
	没食子酸接枝壳聚糖膜 含 $\alpha$ -生育酚的活性壳聚糖/玉米醇溶蛋白膜	提高了双孢蘑菇的抗氧化能力和采后品质 <sup>[90]</sup> 能有效地降低香菇的质量损失率, 保持硬度, 减轻褐变, 该活性膜包装优良的抗氧化能力 <sup>[91]</sup>

## 4 结语

一方面, 果蔬产品行业处于高速发展阶段, 对包装材料的需求旺盛, 而另一方面, 石油基包装材料导致了严重的环境污染问题, 因此, 寻找高效、环保的果蔬保鲜包装材料已成为当下的热点。在过去的几十年里, 人们对可生物降解材料进行了大量的研究并探讨其提高果蔬产品货架期的可行性。相较于传统的石油基材料, 可生物降解包装材料有以下特点: 可生物降解材料有适当的透气性和透湿性; 有较高的  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  选择透过性; 有更好的保鲜效果; 高效环保, 能减轻不可降解材料对环境造成的污染问题。

近年来, 可生物降解材料在市场上的应用占比正在逐步提高, 但是目前大部分制备研究技术还仅停留于实验室阶段, 要在工业上进一步扩大生产及应用规模, 还需要致力于降低可生物降解材料的成本, 提高其产量, 并对已有材料进行改性, 改善其制备方法, 以便其在适用性方面超越传统的石油基材料。虽然可生物降解材料仍存在一些技术问题, 但是可以预见。随着人们环保意识的不断增强和世界环保组织颁发《环境保护法》等政策, 可生物降解材料将逐步广泛地应用到各个领域。

## 参考文献:

- [1] AHMAD T, CAWOOD M, IQBAL Q, et al. Phytochemicals in *Daucus Carota* and Their Health Benefits-Review Article[J]. *Foods*, 2019, 8(9): 424.
- [2] PISCOPO A, ZAPPIA A, PRINCI M P, et al. Quality of Shredded Carrots Minimally Processed by Different Dipping Solutions[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(5): 2584-2593.
- [3] HUSSEIN Z, FAWOLE O A, OPARA U L. Preharvest Factors Influencing Bruise Damage of Fresh Fruits a Review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 229: 45-58.
- [4] 石珂. 果蔬干燥加工新技术[J]. *农村新技术*, 2019(8): 56-57.  
SHI Ke. New Drying Technology of Fruits and Vegetables[J]. *New Rural Technology*, 2019(8): 56-57.
- [5] SOLTANI F M, FARAHMANDI A, HOSSEINPOUR S. Recent Advances in Ultrasound Application as a Novel Technique in Analysis, Processing and Quality Control of Fruits, Juices and Dairy Products Industries: A review[J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 57: 73-88.
- [6] MORALES-JIMÉNEZ M, GOUVEIA L, YÁÑEZ-FERNÁNDEZ J, et al. Production, Preparation and Characterization of Microalgae-Based Biopolymer as a Potential

- Bioactive Film[J]. *Coatings (Basel)*, 2020, 10(2): 120.
- [7] VOET V S D, GUIT J, LOOS K. Sustainable Photopolymers in 3D Printing: A Review on Biobased, Biodegradable, and Recyclable Alternatives[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2021, 42(3): 2000475.
- [8] KABIR E, KAUR R, LEE J, et al. Prospects of Biopolymer Technology as an Alternative Option for Non-Degradable Plastics and Sustainable Management of Plastic Wastes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120536.
- [9] GERE D, CZIGANY T. Future Trends of Plastic Bottle Recycling: Compatibilization of PET and PLA[J]. *Polymer Testing*, 2020, 81: 106160.
- [10] 方晓霞, 温变英. 溶液流延法制备聚合物基功能材料研究进展[J]. *塑料*, 2014, 43(2): 30-33.  
FANG Xiao-xia, WEN Bian-ying. Research Progress on Preparation of Polymer-Based Functional Materials by Solution Casting[J]. *Plastics*, 2014, 43(2): 30-33.
- [11] 叶青青, 李亚娜, 候温甫. 壳聚糖/聚赖氨酸对柑橘的保鲜性研究[J]. *包装工程*, 2017, 38(17): 52-57.  
YE Qing-qing, LI Ya-na, HOU Wen-fu. Freshness of Citrus by Chitosan/Poly-Lysine[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(17): 52-57.
- [12] PONNUDURAI P K S S G, SUBRAMANIAN J. Synthesis of Nano-Film from Nanofibrillated Cellulose of Banana Pseudostem(*Musa Spp*) to Extend the Shelf Life of Tomato[J]. *Nanotechnology Weekly*, 2021, 15: 2.
- [13] 蒋金勇. 聚乳酸可降解活性包装在果蔬保鲜中的应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 46-48.  
JIANG Jin-yong. Polylactic Acid(PLA) Biodegradable Active Packaging and Its Application in Fruits and Vegetables[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020: 46-48.
- [14] ZHANG Cen, LI Yang, WANG Peng, et al. Electrospinning of Nanofibers: Potentials and Perspectives for Active Food Packaging[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(2): 479-502.
- [15] WEN Peng, ZHU Ding-he, WU Hong, et al. Encapsulation of Cinnamon Essential Oil in Electrospun Nanofibrous Film for Active Food Packaging[J]. *Food Control*, 2016, 59: 366-376.
- [16] LIU Yao-wen, WANG Shu-yao, LAN Wei-jie, et al. Fabrication of Polylactic Acid/Carbon Nanotubes/Chitosan Composite Fibers by Electrospinning for Strawberry Preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 121: 1329-1336.
- [17] LI Sen, YAN Yan, XIAO Guan. Preparation of a Hordein Antioxidant Electrospun Nanofibre Film for Food Packaging and Improvement of the Film Hydrophobic Properties Byheat Treatment[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020: 100466.
- [18] RANJAN S, CHANDRASEKARAN R, PALIYATH G, et al. Effect of Hexanal Loaded Electrospun Fiber in Fruit Packaging to Enhance the Post Harvest Quality of Peach[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 23: 100447.
- [19] BISWAL B, SUBRAMANIAN K S. Slow Release of Hexanal by Biodegradable Electrospun Nanofibres for Increasing Shelf-Life of Harvested Mango Fruits[J]. *Madras Agricultural Journal*, 2019, 106(10-12): 633-642.
- [20] PAN Jie-feng, AI Fang-mi, SHAO Ping, et al. Development of Polyvinyl Alcohol/ $\beta$ -Cyclodextrin Antimicrobial Nanofibers for Fresh Mushroom Packaging[J]. *Food Chemistry*, 2019, 300: 125249.
- [21] MAFTOONAZAD N, RAMASWAMY H. Design and Testing of an Electrospun Nanofiber Mat as a pH Biosensor and Monitor the pH Associated Quality in Fresh Date Fruit (*Rutab*) [J]. *Polymer Testing*, 2019, 75: 76-84.
- [22] ACEVEDO-FANI A, SOLIVA-FORTUNY R, MARTÍN-BELLOSO O. Nanostructured Emulsions and Nanolaminates for Delivery of Active Ingredients: Improving Food Safety and Functionality[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 60: 12-22.
- [23] 薛琼, 邓靖, 付艳琪, 等. 改性纳米  $\text{SiO}_2$  微球的制备及其在果蔬保鲜中的应用[J]. *包装学报*, 2018, 10(2): 16-22.  
XUE Qiong, DENG Jing, FU Yan-qi, et al. Preparation of Modified Nano- $\text{SiO}_2$  Microspheres and Its Application in Fresh Keeping of Fruits and Vegetables[J]. *Packaging Journal*, 2018, 10(2): 16-22.
- [24] KUMAR N, PRATIBHA, NEERAJ, et al. Effect of Chitosan-Pullulan Composite Edible Coating Functionalized with Pomegranate Peel Extract on the Shelf Life of Mango (*Mangifera indica*) [J]. *Coatings*, 2021, 11(764): 1-20.
- [25] ASAD R, MUHAMMAD A R, ABDOU A, et al. Application of Chitosan-Based Apple Peel Polyphenols Edible Coating on the Preservation of Strawberry (*Fragaria Ananassa Cv Hongyan*) Fruit[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 45(1): 7-8.
- [26] XING Ya-ge, YANG Hua, GUO Xun-lian, et al. Effect of Chitosan/Nano- $\text{TiO}_2$  Composite Coatings on the Postharvest Quality and Physicochemical Characteristics of Mango Fruits[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 263: 109135.
- [27] DAVE R K, RAMANA R T V, NANDANE A S. Improvement of Post-Harvest Quality of Pear Fruit with Optimized Composite Edible Coating Formulations[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(12): 3917-3927.
- [28] 高燕利, 徐丹, 任丹, 等. 纳米氧化锌复合涂膜中锌的迁移及其对采后红橘的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(15): 154-161.



- GAO Yan-li, XU Dan, REN Dan, et al. Migration of Zn in Nano Zinc Oxide Composite Coatings and Its Effects on Postharvest Tangerine Fruits[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(15): 154-161.
- [29] 刘巧, 罗进旭, 付星, 等. 基于聚乙烯醇-溶菌酶复合抗菌涂膜剂的鸡蛋保鲜研究[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(8): 251-256.
- LIU Qiao, LUO Jin-xu, FU Xing, et al. Application of Polyvinyl Alcohol-Chitosan Composite Antimicrobial Coating Agent in Preservation of Fresh Eggs[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(8): 251-256.
- [30] 李芳菲, 马文瑶, 李艳梅, 等. 壳聚糖涂膜处理对鲜切桃的保鲜效果[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 31(1): 44-49.
- LI Fang-fei, MA Wen-yao, LI Yan-mei, et al. Effect of Chitosan Coating on Quality Maintenance of Fresh-Cut Peach[J]. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science)*, 2018, 31(1): 44-49.
- [31] RADI M, AKHAVAN D S, AKHAVAN H R, et al. The Use of Orange Peel Essential Oil Microemulsion and Nanoemulsion in Pectin-Based Coating to Extend the Shelf Life of Fresh-Cut Orange[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(2): 13441.
- [32] GARCÍA-BETANZOS C I, HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ H, BERNAL-COUOH T F, et al. Physicochemical, Total Phenols and Pectin Methyltransferase Changes on Quality Maintenance on Guava Fruit (*Psidium Guajava* L) Coated with Candeuba Wax Solid Lipid Nanoparticles-Xanthan Gum[J]. *Food Research International (Ottawa, Ont)*, 2017, 101: 218-227.
- [33] MONALISHA P, POOJA P, MARTIN G J O, et al. Innovative Technologies for Extraction and Microencapsulation of Bioactives from Plant-Based Food Waste and Their Applications in Functional Food Development[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 279.
- [34] CUI Hai-ying, SURENDRHIRAN D, LI Chang-zhu, et al. Biodegradable Zein Active Film Containing Chitosan Nanoparticle Encapsulated with Pomegranate Peel Extract for Food Packaging[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 24: 100511.
- [35] 董同力嘎, 张靳, 胡健, 等. 硅橡胶材料、生物可降解材料和微孔材料在果蔬气调保鲜中的应用与进展[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(6): 96-100.
- DONG Tong-li-ga, ZHANG Jin, HU Jian, et al. Application and Research Progress of Silicone Rubber, biodegradable, and Microporous Materials in Modified Atmosphere Packaging of Fresh Fruits and Vegetables[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, 41(6): 96-100.
- [36] FRINÉ V, NELSY G, ROSA P, et al. Effect of PLA Active Packaging Containing Monoterpene-Cyclodextrin Complexes on Berries Preservation[J]. *Polymers*, 2021, 13(9): 1399.
- [37] 沈春华, 李立, 杜云飞. PLA/PHA 活性抗菌薄膜对蓝莓低温保鲜效果的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(7): 121-126.
- SHEN Chun-hua, LI Li, DU Yun-fei. Effect of PLA/PHA Active Films on Preservation of Blueberries during Cold Storage[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(7): 121-126.
- [38] 吴韬, 袁旭, 王庆慧, 等. AIT 生物包装调控蓝莓货架品质及抗氧化活性研究[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(3): 11-16.
- WU Tao, YUAN Xu, WANG Qing-hui, et al. Effect of AIT-Bio-Film on the Quality and Antioxidant Activity of Blueberry during the Cold Shelf-Life[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2018, 37(3): 11-16.
- [39] GONZÁLEZ-BUESA J, PAGE N, KAMINSKI C, et al. Effect of Non-Conventional Atmospheres and Bio-Based Packaging on the Quality and Safety of *Listeria Monocytogenes*-Inoculated Fresh-Cut Celery (*Apium Graveolens* L) During Storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 93: 29-37.
- [40] 蒋佳男, 李海登, 李继兰, 等. 可降解高透 CO<sub>2</sub> 透湿果蔬保鲜膜的研制与应用[J]. *食品工业*, 2019, 40(11): 138-141.
- JIANG Jia-nan, LI Hai-deng, LI Ji-lan, et al. Development and Application of Biodegradable Films with Degradable High CO<sub>2</sub> Moisture Permeability[J]. *The Food Industry*, 2019, 40(11): 138-141.
- [41] 张琪, 张伟阳, 陈晓东, 等. 聚乳酸薄膜真空包装对金针菇保鲜效果的研究[J]. *食品工业*, 2014, 35(3): 91-95.
- ZHANG Qi, ZHANG Wei-yang, CHEN Xiao-dong, et al. Research of Polylactide Film Vacuum Packaging on Preservation of *Flammulina Velutipes*[J]. *The Food Industry*, 2014, 35(3): 91-95.
- [42] 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: 11-16.
- YAN Chen-ran. Preparation and Study on Polylactic Acid Film for Food Preservation Packaging[D]. Chengdu: Cheng'du University, 2020: 11-16.
- [43] BOTONDI R, BARTOLONI S, BACCELLONI S, et al. Biodegradable PLA (Polylactic Acid) Hinged Trays Keep Quality of Fresh-Cut and Cooked Spinach[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(9): 5938-5945.
- [44] 李丹, 李中华, 金林宇, 等. 水降解聚乳酸保鲜袋对绿叶蔬菜的保鲜性能研究[J]. *上海包装*, 2019(10): 42-47.
- LI Dan, LI Zhong-hua, JIN Lin-yu, et al. Study on Fresh-keeping Performance of Water Degradable Poly-

- lactic Acid Fresh-keeping Bag for Green Leafy Vegetables[J]. Shanghai Packaging, 2019(10): 42-47.
- [45] ZHOU Hui-juan, KAWAMURA S, KOSEKI S, et al. Comparative Quality Changes of Fresh-Cut Melon in Bio-Based and Petroleum-Based Plastic Containers during Storage[J]. Environmental Control in Biology, 2016, 54(2): 93-99.
- [46] BOTONDI R, MOSCETTI R, MASSANTINI R. A Comparative Study on the Effectiveness of Ozonated Water and Peracetic Acid in the Storability of Packaged Fresh-Cut Melon[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(5): 2352-2360.
- [47] LORITE G S, ROCHA J M, MIILUMÄKI N, et al. Evaluation of Physicochemical/Microbial Properties and Life Cycle Assessment (LCA) of PLA-Based Nanocomposite Active Packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 305-315.
- [48] 李伟, 张一珠, 付正义, 等. 聚乳酸薄膜对西兰花的保鲜效果分析[J]. 食品科学, 2016, 37(14): 270-273.  
LI Wei, ZHANG Yi-zhu, FU Zheng-yi, et al. Effect of Polylactic Acid Film Packaging on Preservation of Broccoli[J]. Food Science, 2016, 37(14): 270-273.
- [49] 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: 61-64.  
HE Yi-yao. Study on Poly(Lactic Acid)/Nanocrystalline Cellulose Biodegradable Food Packaging Films and the Application of Broccoli Preservation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 61-64.
- [50] 张雪姣, 马晓军. PHAs/纤维素复合材料研究进展[J]. 上海包装, 2017(4): 61-65.  
ZHANG Xue-jiao, MA Xiao-jun. Research Progress of PHAs/Cellulose Composites[J]. Shanghai Packaging, 2017(4): 61-65.
- [51] MORENO M A, ORQUEDA M E, GÓMEZ-MASCARAQUE L G, et al. Crosslinked Electrospun Zein-Based Food Packaging Coatings Containing Bioactive Chito Fruit Extracts[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 496-505.
- [52] YANG Shen-yu, MIAO Qiu-ju, HUANG Yi-ping, et al. Preparation of Cinnamaldehyde-Loaded Polyhydroxyalkanoate/Chitosan Porous Microspheres with Adjustable Controlled-Release Property and Its Application in Fruit Preservation[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 26: 100596.
- [53] ESPINOZA-GARCÍA K, MARCOS-FERNÁNDEZ A, NAVARRO R, et al. Polymerization of E-Caprolactone with Degraded PET for Its Functionalization[J]. Journal of Polymer Research, 2019, 26(8): 1-12.
- [54] TAKALA P N, SALMIERI S, BOUMAIL A, et al. Antimicrobial Effect and Physicochemical Properties of Bioactive Trilayer Polycaprolactone/Methylcellulose-Based Films on the Growth of Foodborne Pathogens and Total Microbiota in Fresh Broccoli[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(3): 648-655.
- [55] CHENG Pei-fang, LIANG Min, YUN Xue-yan, et al. Biodegradable Blend Films of Poly( $\epsilon$ -Caprolactone)/Poly(Propylene Carbonate) for Shelf Life Extension of Whole White Button Mushrooms[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(1): 144-156.
- [56] QIN Yu-yue, LIU Dong, WU Yan, et al. Effect of PLA/PCL/Cinnamaldehyde Antimicrobial Packaging on Physicochemical and Microbial Quality of Button Mushroom (*Agaricus Bisporus*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 99: 73-79.
- [57] YUN Xue-yan, WANG Yu, LI Meng-ting, et al. Application of Permselective Poly( $\epsilon$ -Caprolactone) Film for Equilibrium-Modified Atmosphere Packaging of Strawberry in Cold Storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(6): 13247.
- [58] YUN Xue-yan, LI Xiao-fang, EERDUNBAYAER, et al. Controllable Poly(L-Lactic acid) Soft Film with Respirability and its Effect on Strawberry Preservation[J]. Polymer Science, Series A, 2021, 63: 77-90.
- [59] 成培芳, 董同力嘎, 春艳, 等. 聚己内酯自发热调包装薄膜对菠菜贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(2): 133-137.  
CHENG Pei-fang, DONG Tong-li-ga, CHUN Yan, et al. Effect of Poly( $\epsilon$ -Caprolactone)modified Atmosphere Packaging Film on Postharvest Quality of Spinach[J]. Food & Machinery, 2018, 34(2): 133-137.
- [60] 张焯. 新型果蔬保鲜包装材料的设计及应用[D]. 保定: 河北大学, 2020: 33-54.  
ZHANG Ye. Design and Application of New Functional Materials for Preservation Packaging of Fruits and Vegetables[D]. Baoding: Hebei University, 2020: 33-54.
- [61] YUN Xue-yan, QI Xiao-jing, ZHANG Yu-qin, et al. Application of SiO<sub>x</sub>-Coated Poly( $\epsilon$ -Caprolactone) Film for Preservation of Cherry Tomato[J]. Polymers and Polymer Composites, 2020, 28(5): 309-319.
- [62] MĚRKOVÁ M, JULINOVÁ M, HOUSER J, et al. An Effect of Salt Concentration and Inoculum Size on Poly(Vinyl Alcohol) Utilization by Two Sphingomonas Strains[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2018, 26(6): 2227-2233.
- [63] ULLAH M, LI Hui, SUN Shi-wei, et al. Polyvinyl Alcohol Degradation by *Bacillus Cereus* RA23 from Oil Sludge Sample[J]. 3 Biotech, 2019, 9(10): 350.
- [64] MIN Tian-tian, ZHU Zhu, SUN Xiao-li, et al. Highly Efficient Antifogging and Antibacterial Food Packaging Film Fabricated by Novel Quaternary Ammonium Chitosan Composite[J]. Food Chemistry, 2020, 308: 125682.
- [65] LAN Wei-jie, ZHANG Rong, AHMED S, et al. Effects

- of Various Antimicrobial Polyvinyl Alcohol/Tea Polyphenol Composite Films on the Shelf Life of Packaged Strawberries[J]. *LWT*, 2019, 113: 108297.
- [66] FARAH F, PRIYA W O, NURMALISA L, et al. Thermoplastic Starch-PVA-Cellulose Nanocomposite Film for Extending the Shelf Life of Red Chili[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 460(1): 012036.
- [67] 杜运鹏. 纳米改性聚乙烯醇(PVA)抗氧复合包装薄膜的制备及对鲜切山药保鲜的应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 50-56.
- DU Yun-peng. Preparation of Nano Modified Polyvinyl Alcohol (PVA) Anti Oxygen Composite Packaging Film and Its Application in Fresh Cut Yam[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017: 50-56.
- [68] 魏风军, 武明毅, 吴静茹. 可生物降解 PBAT 材料在蔬果类阻隔性包装中的应用探析[J]. *今日印刷*, 2020(2): 54-56.
- WEI Feng-jun, WU Ming-yi, WU Jing-ru. Application of Biodegradable PBAT Material in Barrier Packaging of Fruits and Vegetables[J]. *Print Today*, 2020(2): 54-56.
- [69] CAO Cheng-lin, WANG Yu-yuan, ZHENG Shao-ming, et al. Poly (Butylene Adipate-co-Terephthalate)/Titanium Dioxide/Silver Composite Biofilms for Food Packaging Application[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 132: 109874.
- [70] BLACK-SOLIS J, VENTURA-AGUILAR R I, CORREA-PACHECO Z, et al. Preharvest Use of Biodegradable Polyester Nets Added with Cinnamon Essential Oil and the Effect on the Storage Life of Tomatoes and the Development of *Alternaria Alternata*[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 245: 65-73.
- [71] 刘孟禹. 改性PBS薄膜的制备及对樱桃番茄气调保鲜效果的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019: 23-38.
- LIU Meng-yu. Preparation of Modified PBS Film and Its Effect on Fresh-Keeping of Cherry Tomato[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019: 23-38.
- [72] VERDI A G, SOUZA A G, ROCHA D B, et al. Biodegradable Films Functionalized with *Moringa Oleifera* Applied in Food Packaging[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2021, 30(3): 235-246.
- [73] 许兵. 高透湿性聚乙烯薄膜的制备及其对小黄瓜保鲜效果的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018: 20-36.
- XU Bing. Study on the Preparation of High Permeability Polyethylene Film and the Effect of Minicucumber Preservation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018: 20-36.
- [74] 春艳. 基于金针菇保鲜的可呼吸型包装薄膜的制备及其应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019: 14-35.
- CHUN Yan. Study on the Preparation and Application of Breathable Packaging Films Based on the Preservation of Mushroom[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019: 14-35.
- [75] ABDUL KHALIL H P S, BANERJEE A, SAURABH C K, et al. Biodegradable Films for Fruits and Vegetables Packaging Application: Preparation and Properties[J]. *Food Engineering Reviews*, 2018, 10(3): 139-153.
- [76] MULEY A B, SINGHAL R S. Extension of Postharvest Shelf Life of Strawberries (*Fragaria Ananassa*) Using a Coating of Chitosan-Whey Protein Isolate Conjugate[J]. *Food Chemistry*, 2020, 329: 127213.
- [77] TAKALA P N, VU K D, SALMIERI S, et al. Antibacterial Effect of Biodegradable Active Packaging on the Growth of *Escherichia Coli*, *Salmonella Typhimurium* and *Listeria Monocytogenes* in Fresh Broccoli Stored at 4 °C[J]. *Food Science & Technology*, 2013, 53(2): 499-506.
- [78] VIMALA B S K, MARIA L M, MOSES J A, et al. Zein-Based Anti-Browning Cling Wraps for Fresh-Cut Apple Slices[J]. *International Journal of Food science & Technology*, 2020, 55(3): 1238-1245.
- [79] PINEM M P, WARDHONO E Y, NADAUD F, et al. Nanofluid to Nanocomposite Film: Chitosan and Cellulose-Based Edible Packaging[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(4): 660.
- [80] RADWAN-PRAGŁOWSKA J, PIĄTKOWSKI M, DEINEKA V, et al. Chitosan-Based Bioactive Hemostatic Agents with Antibacterial Properties-Synthesis and Characterization[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2019, 24(14): 2629.
- [81] KAEWKLIN P, SIRIPATRAWAN U, SUWANAGUL A, et al. Active Packaging from Chitosan-Titanium Dioxide Nanocomposite Film for Prolonging Storage Life of Tomato Fruit[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 112: 523-529.
- [82] HAJAR O S, LIYANA O N F, AHMAD S R, et al. Corn Starch/Chitosan Nanoparticles/Thymol Bio-Nanocomposite Films for Potential Food Packaging Applications[J]. *Polymers*, 2021, 13(3): 390.
- [83] SUGANYA A, SHANMUGVELAYUTHAM G, HIDALGO-CARRILLO J. Plasma Surface Modified Polystyrene and Grafted with Chitosan Coating for Improving the Shelf Lifetime of Postharvest Grapes[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2018, 38(5): 1151-1168.
- [84] SABIR F K, SABIR A, UNAL S. Chitosan Coating and UV-C Irradiation to Maintain Postharvest Quality of Minimally Processed Table Grapes Cv 'Michele Palieri'[J]. *Erwerbs-Obstbau*, 2020, 62(1): 35-42.
- [85] SANGSUWAN J, SUTTHASUPA S. Effect of Chitosan

- and Alginate Beads Incorporated with Lavender, Clove Essential Oils, and Vanillin Against *Botrytis Cinerea* and their Application in Fresh Table Grapes Packaging System[J]. *Packaging Technology & Science*, 2019, 32(12): 595-605.
- [86] KEYDIS M, MARTA O, ALBERTO A, et al. The Effect of Edible Chitosan Coatings Incorporated with *Thymus Capitatus* Essential Oil on the Shelf-Life of Strawberry (*Fragaria x Ananassa*) during Cold Storage[J]. *Biomolecules*, 2018, 8(4): 155.
- [87] PAGLIARULO C, SANSONE F, MOCCIA S, et al. Preservation of Strawberries with an Antifungal Edible Coating Using Peony Extracts in Chitosan[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(11): 1951-1960.
- [88] WANG Yue, LI Rui, LU Rui, et al. Preparation of Chitosan/Corn Starch/Cinnamaldehyde Films for Strawberry Preservation[J]. *Foods*, 2019, 8(9): 423.
- [89] ROKAYYA S, KHOJAH E, ELHAKEM A, et al. Investigating the Nano-Films Effect on Physical, Mechanical Properties, Chemical Changes, and Microbial Load Contamination of White Button Mushrooms During Storage[J]. *Coatings (Basel)*, 2021, 11(44): 44.
- [90] LIU Jun, LIU Shuang, ZHANG Xin, et al. Effect of Gallic Acid Grafted Chitosan Film Packaging on the Postharvest Quality of White Button Mushroom (*Agaricus Bisporus*)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147: 39-47.
- [91] ZHANG Li-ming, LIU Zhan-li, SUN Yang, et al. Combined Antioxidant and Sensory Effects of Active Chitosan/Zein Film Containing  $\alpha$ -Tocopherol on *Agaricus Bisporus*[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 24: 100470.

责任编辑：曾钰婵