

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80218

柚皮苷—多糖—蛋白复合保鲜膜制备工艺优化及应用

徐 帝^{1,2} 刘 霞^{1,2} 熊莹姿^{1,2} 谢雨彤^{1,2} 胡逸飞^{1,2} 郑雅文^{1,2}

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 食品科学与生物技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: [目的] 优化柚皮苷—多糖—蛋白复合膜的制备工艺参数, 并分析其缓释能力和保鲜效果。[方法] 以多糖和蛋白质作为复合膜基底, 通过透光率、不透明度、水蒸气渗透率(WVP)和氧气渗透率(OP)为考察指标, 优化基底材料种类、添加量及其配比。在此基础上, 将柚皮苷(1%, 3%, 5%)加入到基膜中, 获得柚皮苷—多糖—蛋白复合膜, 并分析复合膜的缓释作用及对龙眼的保鲜效果。[结果] 当多糖为羧甲基纤维素钠/果胶/壳聚糖(质量比为 1:1:2), 添加量为 1.8%; 蛋白质为玉米醇溶蛋白, 添加量为 4% 时, 制备的复合膜对紫外线、水蒸气、氧气有较好的阻隔能力。膜中的柚皮苷能够发生一定的缓释, 有利于复合膜的抗氧化和抗菌作用; 且柚皮苷—多糖—蛋白复合膜在一定程度上能够降低龙眼的失重率, 保持果实的新鲜状态。[结论] 制备的多糖—蛋白基膜具有良好的物理特性, 柚皮苷的加入使复合膜具有作为功能性(抗氧化、抗菌)可食用保鲜膜的潜力。

关键词: 多糖; 蛋白质; 柚皮苷; 保鲜膜; 龙眼

Preparation process optimization and application of naringin-polysaccharide-protein composite preservative film

XU Di^{1,2} LIU Xia^{1,2} XIONG Yingzi^{1,2} XIE Yutong^{1,2} HU Yifei^{1,2} ZHENG Yawen^{1,2}

(1. School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Food Science and Biotechnology, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: [Objective] To optimize the processing parameters of naringin-polysaccharide-protein composite preservative film and to explore the slow release ability and preservation effect of the composite film. [Methods] Polysaccharides and proteins are used as the substrate of the composite film, and the types, additions, and ratios of the substrate materials are optimized by the indicators of light transmittance, opacity, water vapor permeability (WVP), and oxygen permeability (OP). On this basis, naringin (1%, 3%, 5%) is added to the base film to obtain naringin-polysaccharide-protein composite film. A preliminary study is conducted to analyze the slow-release effect and freshness preservation effect of the composite film on Longan. [Results] When the polysaccharide is sodium carboxymethyl cellulose/pectin/chitosan (mass ratio of 1:1:2) with an addition of 1.8% and the protein is zein with an addition of 4%, the prepared composite film has a better barrier to ultraviolet rays, water vapor, and oxygen. The naringin in the film can be released slowly to some extent, which facilitates the antioxidant and antimicrobial effects of the composite film. In addition, naringin-polysaccharide-protein composite film can reduce the weight loss rate of Longan to a certain extent to maintain the freshness of the fruit. [Conclusion] The prepared composite film has good physical properties, and the naringin provides functional potential (antioxidant, antimicrobial), suggesting its applicability as edible composite preservative film.

Keywords: polysaccharide; protein; naringin; preservative film; Longan

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(编号: CX20230715)

通信作者: 刘霞(1976—), 女, 湖南农业大学教授, 博士。E-mail: liuxiaspr@aliyun.com

收稿日期: 2025-02-12 改回日期: 2025-04-28

引用格式: 徐帝, 刘霞, 熊莹姿, 等. 柚皮苷—多糖—蛋白复合保鲜膜制备工艺优化及应用[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 105-113.

Citation: XU Di, LIU Xia, XIONG Yingzi, et al. Preparation process optimization and application of naringin-polysaccharide-protein composite preservative film[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 105-113.

传统石油基塑料保鲜膜虽能满足保鲜需求,但存在气体阻隔性不足、增塑剂迁移风险及不可降解等缺陷,难以满足食品安全、环保的双重需求^[1-2]。目前,基于天然高分子材料(如多糖、蛋白质)制备的可食用保鲜膜因其来源广泛、可降解性等优势备受关注。然而,单一材料膜的局限性源于其分子结构的固有缺陷。例如,多糖类材料(如壳聚糖)虽具备良好的抗菌性与成膜性,但存在脆性高、阻隔性差的特点^[3-4];蛋白质材料(如明胶)虽有较好的延展性,却因亲水基团过多而易吸湿溶胀^[5]。

Lan 等^[6]探究了 3 种多糖(海藻酸钠、羧甲基纤维素钠和壳聚糖)添加量对复合膜性能的影响,当三者添加量分别为 1.5%,0.5%,1.5% 时,所制备的复合膜有较优异的物理特性。陈露珠等^[7]将普鲁兰多糖添加到羧甲基壳聚糖中制备的复合膜,可将罗氏沼虾的货架期由 4 d 延长至 8 d。乔勤勤等^[8]采用 4.0% 大豆分离蛋白和 10 mg/mL 苦瓜多糖制成的复合涂膜液,对鲜切马铃薯的保鲜效果最优。Muley 等^[9]结合壳聚糖和乳清蛋白所制备的复合涂膜液,能够在 5,20 °C 下将草莓保质期分别延长至 8,5 d。近年来,通过二元复合体系制备功能性保鲜膜的研究较多,但对多元组分(如多类型多糖与蛋白质复配)的研究尚未见报道。此外,传统保鲜膜抗氧化与抗菌性能的提升主要依赖化学合成添加剂,其安全性争议促使研究者转向天然活性成分的开发^[10-11]。其中,柚皮苷作为一种苷类黄酮,广泛存在于柑橘类水果中,具有显著的抗氧化、抗菌及抗炎特性^[12-13]。但现有研究多集中于柚皮苷的药理作用,其在保鲜膜中的功能化应用仍处于起步阶段。

研究拟以多糖和蛋白质的种类、添加量及配比对复合膜理化性能的影响进行工艺优化,筛选出 3 种多糖与 1 种蛋白质构建复合基膜,再将一定量的柚皮加入基膜中,获得柚皮苷-多糖-蛋白复合膜,分析该复合膜中的缓释及对龙眼的保鲜作用,旨在为功能性复合膜的进一步研究及其在食品中的保鲜应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

羧甲基纤维素钠和海藻酸钠:化学纯,国药集团化学试剂有限公司;

果胶:半乳糖醛酸(干基计)≥74%,上海阿拉丁试剂有限公司;

壳聚糖:脱乙酰度≥95%,上海麦克林生化科技有限公司;

玉米淀粉:食品级,上海枫未事业有限公司;

大豆分离蛋白、谷朊粉和乳清蛋白:食品级,浙江一诺生物科技有限公司;

玉米醇溶蛋白:食品级,河南华瑞生物科技有限公司;

冰醋酸:食品级,广州康本生物科技有限公司;

柚皮苷:≥95%(HPLC),西格玛奥德里奇贸易有限公司;

新鲜龙眼:市售。

1.1.2 主要仪器设备

紫外—可见分光光度计:Lambda 365 型,美国 PerkinElmer 公司;

真空干燥箱:DZF-6030A 型,上海一恒科学仪器有限公司;

分析天平:ATY224R 型,日本岛津实验器材有限公司;

数字温控磁力搅拌器:RH digita 型,德国 IKA 公司。

1.2 方法

1.2.1 复合膜的制备 称取一定质量的多糖(如海藻酸钠、羧甲基纤维素钠和壳聚糖),按照一定的比例加入超纯水中,50 °C 混匀,加入 1% 醋酸;称取一定质量的蛋白质和柚皮苷,75 °C 搅拌 15 min 使其完全溶解;上述溶液于常温下充分混匀,将复合膜液倒入干净培养皿上均匀流延,50 °C 干燥成膜,4 °C 冰箱保存待用。

1.2.2 复合膜的制备条件优化

(1) 多糖种类:选择羧甲基纤维素钠、果胶、玉米淀粉、壳聚糖、海藻酸钠 5 种多糖,将其中 3 种多糖相互组合按照质量分数 1.5% 的添加量,以质量比 1:1:1 制备复合膜,以复合膜的透光率、不透明度、水蒸气渗透率、氧气渗透率为指标综合确定多糖种类。

(2) 多糖添加量:固定 3 种多糖种类后,按质量比 1:1:1,分别考察多糖添加量(0.9%,1.2%,1.5%,1.8%,2.1%)对复合膜透光率、不透明度、水蒸气渗透率和氧气渗透率的影响。

(3) 多糖配比:固定多糖种类和添加量后,分别考察 3 种多糖的质量比(1:1:1,1:2:1,1:2:3,1:2:2)对复合膜透光率、不透明度、水蒸气渗透率和氧气渗透率的影响。

(4) 蛋白质种类:固定多糖种类、添加量及其配比,按照 2% 的添加量,分别考察蛋白质种类(大豆分离蛋白、玉米醇溶蛋白、小麦面筋蛋白、乳清蛋白)对复合膜透光率、不透明度、水蒸气渗透率和氧气渗透率的影响。

(5) 蛋白质添加量:固定多糖基底(种类、添加量及配比)和蛋白质种类后,分别考察蛋白质添加量(1%,2%,3%,4%,5%)对复合膜透光率、不透明度、水蒸气渗透率和氧气渗透率的影响。

1.2.3 复合膜的性能指标测定

(1) 透光率和不透明度:将复合膜裁剪成同样大小后贴至比色皿一侧,采用紫外分光光度计测定复合膜的透光率。按式(1)计算复合膜的不透明度^[14]。

$$X_1 = \frac{A_{600\text{ nm}}}{x}, \quad (1)$$

式中:

X_1 ——不透明度, mm^{-1} ;

$A_{600\text{ nm}}$ ——600 nm处吸光度值;

x ——复合膜厚度, mm。

(2) 水蒸气渗透率(WVP):根据王恩胜等^[15]的方法略作修改。将复合膜用封口膜密封于装有约1 g干燥剂(无水氯化钙)的小烧杯口,并将其放入装有饱和NaCl溶液的干燥箱中(相对湿度55%、温度25℃),定期记录小烧杯的质量变化,每个复合膜样品测量3次,取平均值。按式(2)计算WVP。

$$\text{WVP} = \frac{\Delta m \times L}{A \times t \times \Delta P}, \quad (2)$$

式中:

WVP——水蒸气渗透率, $\text{g}/(\text{mm} \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$;

Δm ——杯重增量, g;

L ——膜厚, mm;

A ——覆盖膜样面积, mm^2 ;

t ——测量时间, h;

ΔP ——膜两侧的水蒸气压差, kPa。

(3) 氧气渗透率(OP):采用脱氧剂吸收法^[16],略作修改。将复合膜样品用密封膜密封至装有约1 g脱氧剂($m_{\text{铁粉}}:m_{\text{活性炭}}:m_{\text{氯化钠}}=0.5:1.0:1.5$)的瓶口上,将瓶子放入装有饱和 BaCl_2 溶液的干燥器中,定期记录瓶子质量,并按式(3)计算OP。

$$\text{OP} = \frac{\Delta m \times L}{A \times t}, \quad (3)$$

式中:

OP——氧气渗透率, $\text{g}/(\text{mm} \cdot \text{h})$;

Δm ——瓶重增量, g;

L ——膜厚, mm;

A ——覆盖膜样面积, mm^2 ;

t ——测量时间, h。

1.2.4 不同添加量下柚皮苷的缓释性能 根据Gao等^[17]的方法略微修改。将裁剪大小一致的复合膜片分散至一定体积的超纯水中浸泡,常温下间隔一定时间(10, 20, 30, 40, 50, 120, 240, 360 min),移取1 μm 膜样清液,稀释6倍后,利用紫外分光光度计测定282 nm处吸光度。根据标准曲线计算柚皮苷含量,并按式(4)计算柚皮苷释

放率。

$$X_2 = \frac{M}{M_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

X_2 ——柚皮苷释放率, %;

M ——柚皮苷在特定时间的释放量, μg ;

M_0 ——柚皮苷添加量, μg 。

1.2.5 复合膜的保鲜效果 选取同一批次市售的新鲜龙眼放入塑料盒中,室温下分别用市售保鲜膜(I)、多糖—蛋白质基膜(II)、1%柚皮苷—多糖—蛋白复合膜(III)、3%柚皮苷—多糖—蛋白复合膜(IV)和5%柚皮苷—多糖—蛋白复合膜(V)密封,并使用未覆膜包装的龙眼作为对照。按式(5)计算贮藏期间龙眼的失重率^[18]。

$$X_3 = \frac{m_0 - m_x}{m_0} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

X_3 ——失重率, %;

m_0 ——龙眼的初始质量, g;

m_x ——贮藏过程中龙眼的质量, g。

1.3 数据处理

使用SPSS、Origin 26.0软件进行统计分析;所有试验重复3次,结果以平均值±标准差表示。采用单变量方差分析(ANOVA)和邓肯多重比较检验, $P < 0.05$ 表示差异显著。

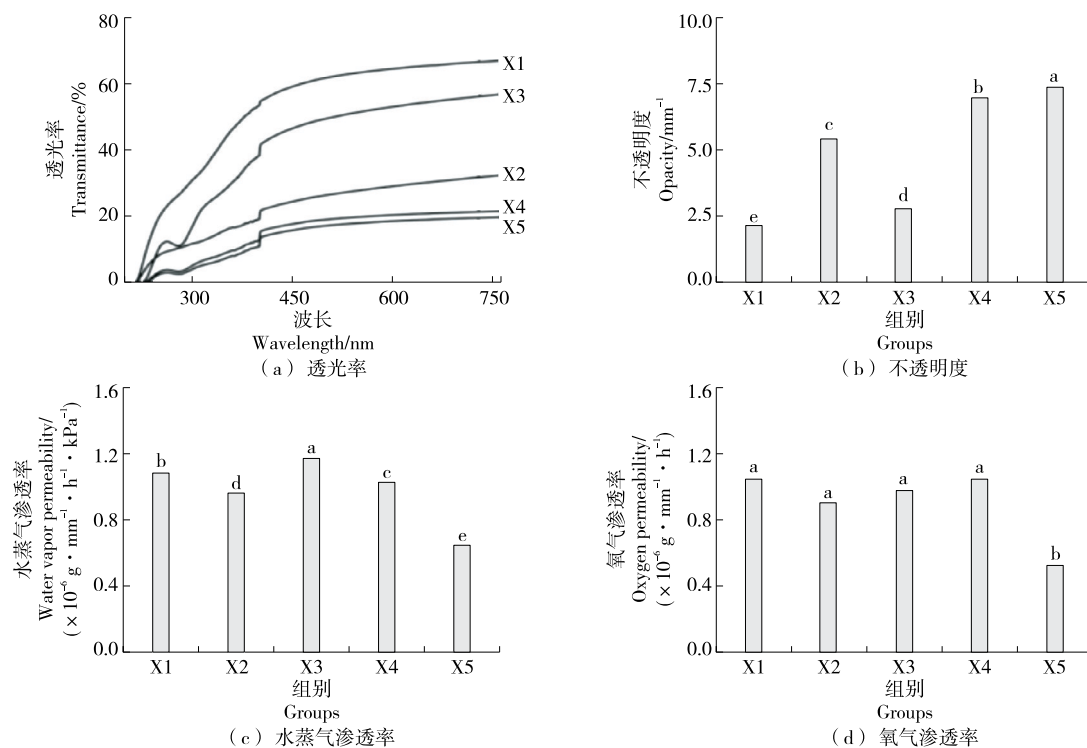
2 结果与分析

2.1 多糖种类的确定

由图1(a)和图1(b)可知,基于羧甲基纤维素钠、果胶和壳聚糖的薄膜表现出较强的紫外线和可见光的阻隔性,能够有效减少光照造成的食品氧化腐败^[19-20]。结合图1(c)和图1(d)可知,该薄膜对水蒸气和氧气的隔绝能力具有明显优势。故选用羧甲基纤维素钠、果胶和壳聚糖三者复配作为多糖基底时,复合膜的阻隔性能最优。

2.2 多糖添加量的确定

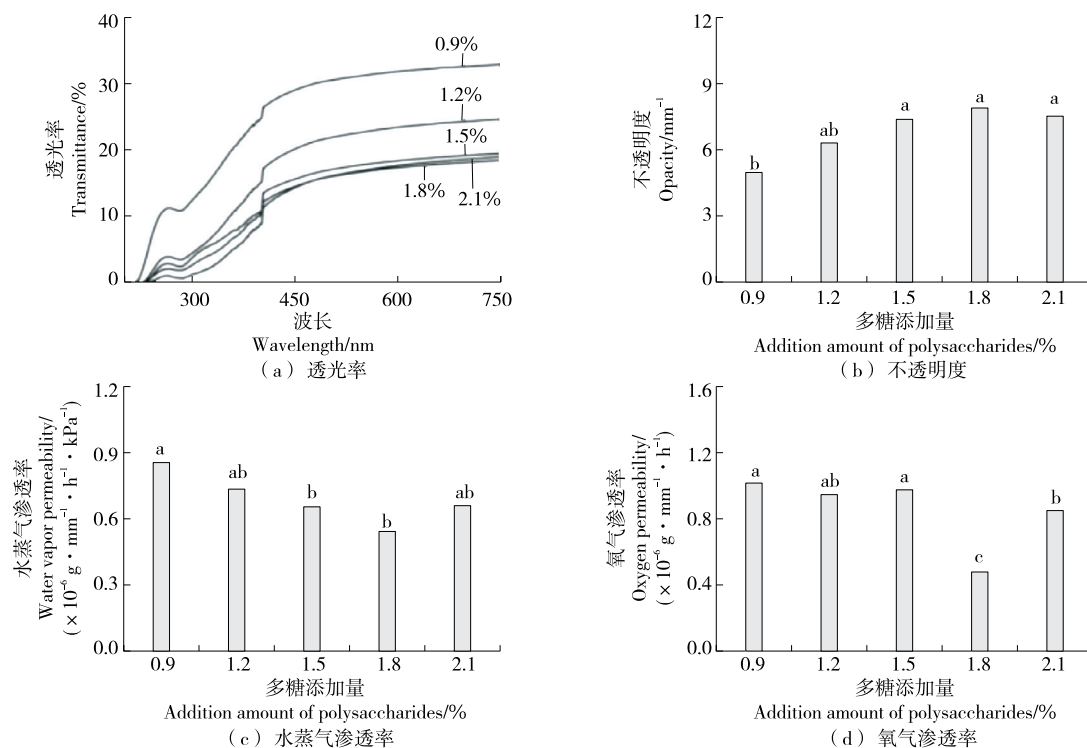
由图2可知,随着多糖添加量的增加,复合膜的透光率有所下降。当添加量>1.5%时,复合膜对光线有较强的阻隔能力;当多糖添加量为1.8%时,复合膜的不透明度值达到最大;继续添加多糖,复合膜的不透明度有所下降,可能是过量的多糖在复合膜中分布不均匀,复合膜存在空隙,光线更容易透过^[21]。随着多糖添加量的增加,复合膜的WVP和OP均先降低后上升,当多糖添加量为1.8%时,复合膜的隔绝性能最好,具有优异的隔绝氧气的能力。故选择最优的多糖添加量为1.8%。



X1为海藻酸钠、羧甲基纤维素钠和壳聚糖组合;X2为玉米淀粉、海藻酸钠和壳聚糖组合;X3为海藻酸钠、羧甲基纤维素钠和果胶组合;X4为海藻酸钠、果胶和壳聚糖组合;X5为羧甲基纤维素钠、果胶和壳聚糖组合;小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图1 不同种类多糖组合对薄膜性能的影响

Figure 1 Effect of different types of polysaccharide combinations on film properties



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图2 多糖添加量对薄膜性能的影响

Figure 2 Effect of polysaccharide addition amount on film properties

2.3 多糖配比的确定

由图3可知,当羧甲基纤维素钠、果胶和壳聚糖质量比为1:1:2时,复合膜具有较低的透光率,能够阻挡一定的光照对食品的损害。当羧甲基纤维素钠、果胶和壳聚糖质量比为1:2:3时,复合膜具有最低的WVP。综合考虑,按羧甲基纤维素钠、果胶和壳聚糖质量比为1:1:2制备基膜。

2.4 蛋白质种类的确定

蛋白质是一类营养丰富且可再生的天然大分子物质,被广泛应用于复合膜中以改善其物理特性^[22-23]。由图4可知,多糖—小麦面筋蛋白复合膜具有最低的透光率,但可能由于该蛋白质的结构特性导致成膜后阻水能力差。玉米醇溶蛋白在WVP和OP方面具有较大优势,可能与该蛋白中含有的疏水性氨基酸有关^[24-25]。因此,选用玉米醇溶蛋白制备的多糖—蛋白复合膜的性能较为理想。

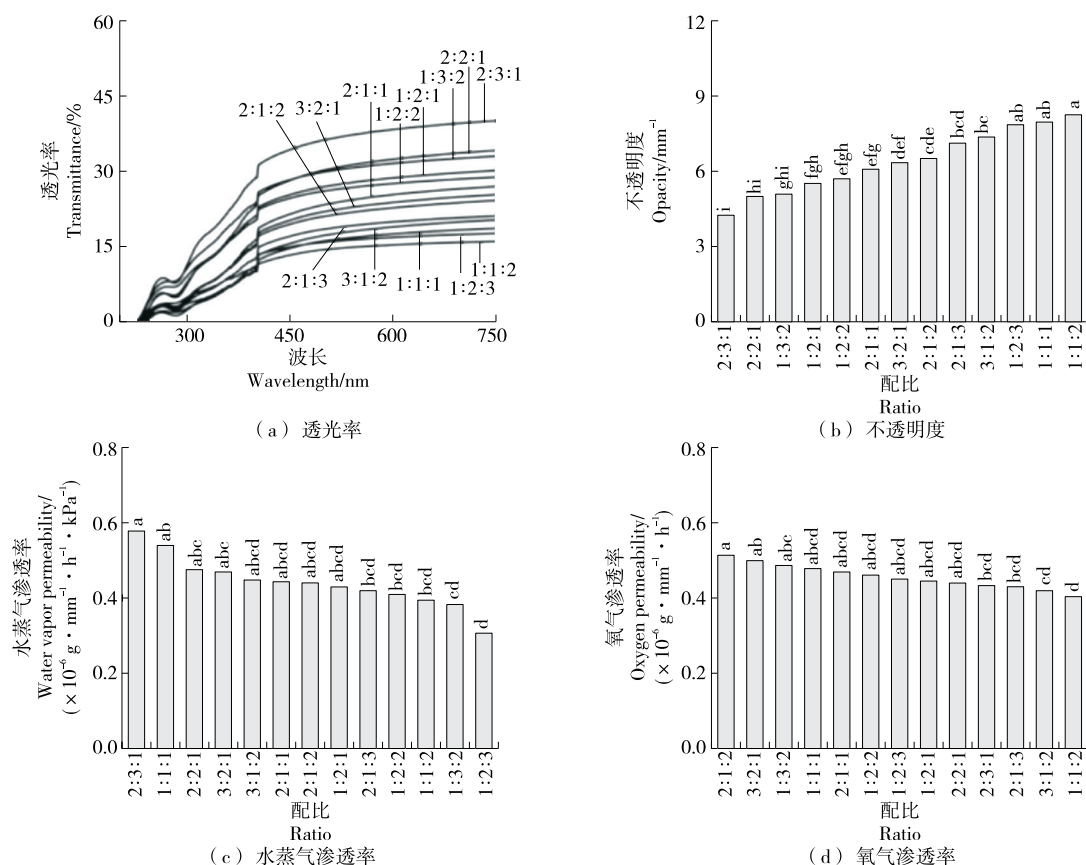
2.5 蛋白质添加量的确定

由图5可知,2%的玉米醇溶蛋白所制备的复合膜具有较高的不透明度。考虑在实际应用中,包装可能会因

为过低的透光率遮盖食品形貌,进而减弱消费者购买欲望,故需要保留一定程度的透明度。随着玉米醇溶蛋白添加量的增加,复合膜的阻隔性能有所提高,表明多糖物质和蛋白质混合均匀,形成了更致密的结构。当玉米醇溶蛋白添加量为5%时,WVP和OP均有所提高,可能是过量的蛋白质发生了聚集,造成膜面不均匀,降低了其阻隔能力^[26]。故玉米醇溶蛋白的最佳添加量为4%。

2.6 复合膜中柚皮苷的缓释性能

在包装体系中,功能性物质从复合膜中释放,有利于抑制微生物的生长,延长食品的保质期^[27-28]。由图6可知,多糖—蛋白膜在282 nm处未出现紫外吸收峰,其他3种柚皮苷复合膜出现了明显的紫外吸收峰。说明多糖和蛋白质对柚皮苷的紫外检测没有影响,可以通过282 nm处的紫外吸光度探究复合膜中的柚皮苷是否发生缓释。纯水环境下,不同柚皮苷添加量下复合膜(1%, 3%, 5%)在50 min前释放迅速,这可能是复合膜中游离的柚皮苷率先释放导致的。在约240 min后,释放达到平衡,溶液中柚皮苷质量浓度分别为5.88, 18.84, 34.33 $\mu\text{g/mL}$,其释放率分别为76.90%, 82.12%, 89.81%。



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图3 多糖比对薄膜性能的影响

Figure 3 Effect of polysaccharide ratios on film properties

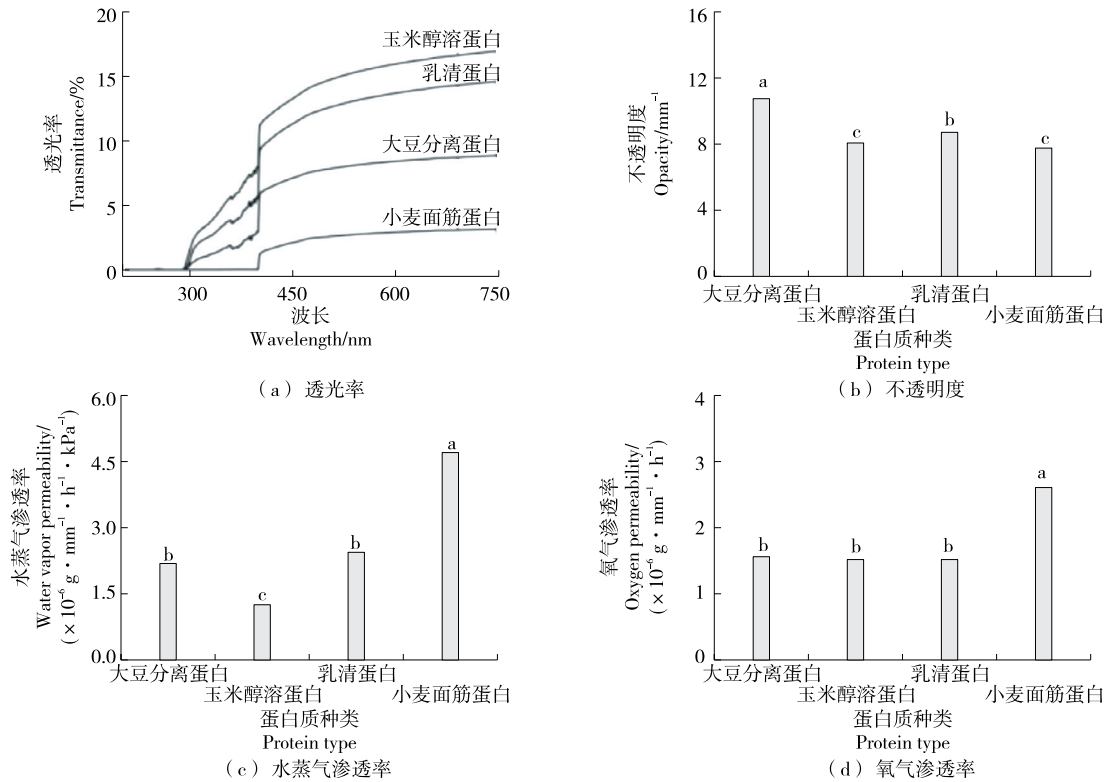


图4 蛋白质种类对薄膜性能的影响

Figure 4 Effect of protein type on film properties

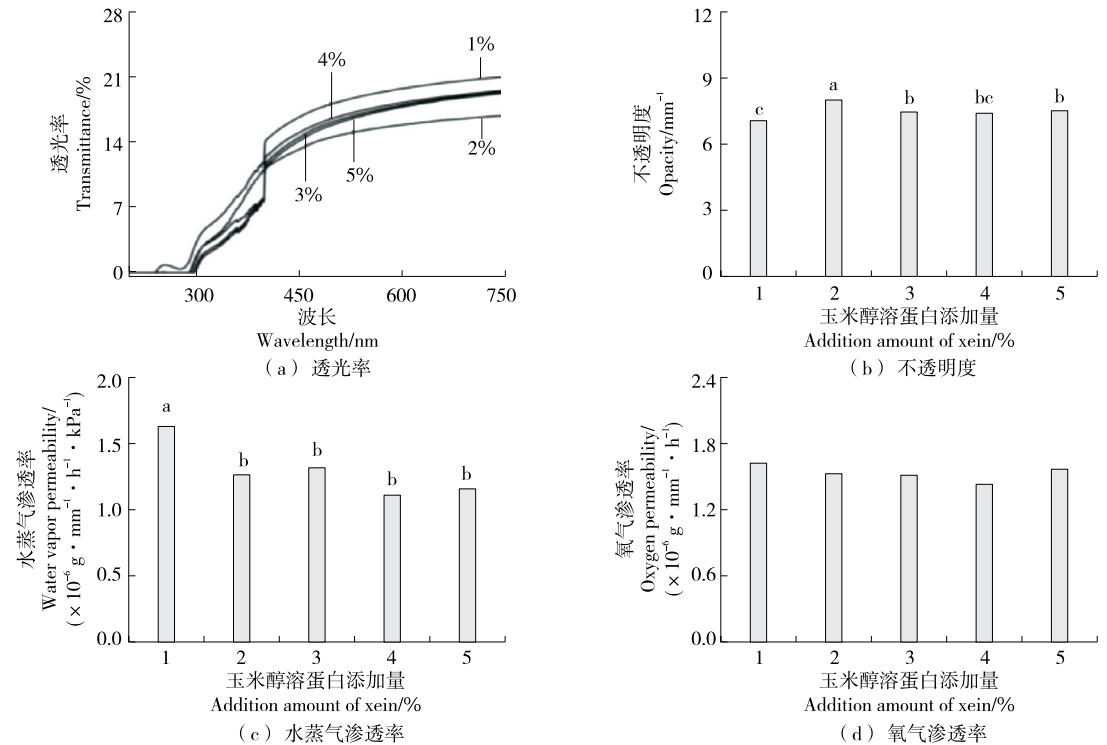


图5 玉米醇溶蛋白质添加量对薄膜性能的影响

Figure 5 Effect of zein addition amount on film properties

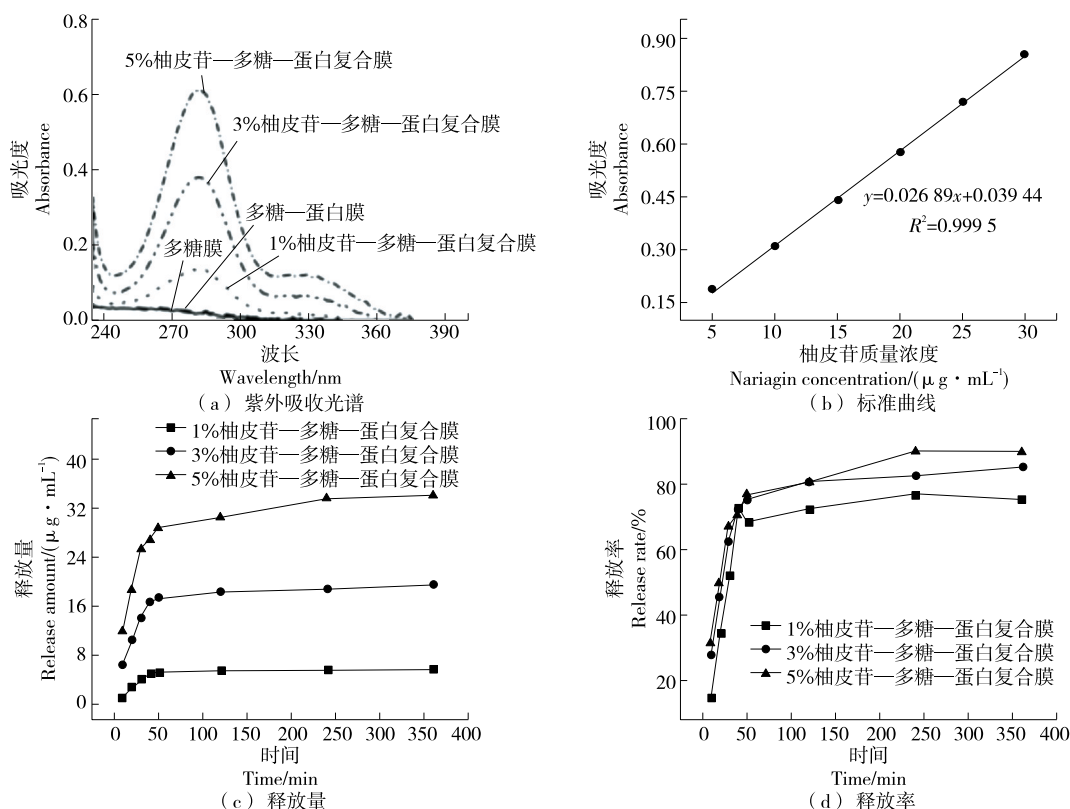


图6 柚皮苷—多糖—蛋白复合膜的性能
Figure 6 Properties of naringin-composite film

2.7 柚皮苷—多糖—蛋白复合膜对市售龙眼的保鲜效果

果实失重主要与其水分蒸发、呼吸作用、挥发性物质散失或微生物活动等导致的质量损失有关^[29-30]。由图7和图8可知,龙眼的失重率均随着贮藏时间的延长而上升,其中无膜状态下的升幅最大。未覆膜处理的龙眼果肉发硬,可能与果实表面脱水导致的水分过度流失有关。使用市售保鲜膜处理的龙眼在失重率方面表现优异,但贮藏8 d后出现了果皮漏液现象,且产生了白色菌丝。这可能是由于龙眼在贮藏期间的呼吸作用产生的水分被密封在膜内,水分聚集形成的潮湿环境加速了微生物生长。相较于前者,柚皮苷—多糖—蛋白复合膜包覆后的龙眼软硬适中,果实仍保存完好,且失重率也在可接受范围内,故柚皮苷—多糖—蛋白复合膜对龙眼的保鲜起到了积极作用。一方面是因为复合膜具有较好的阻隔性能,提供了干燥的贮藏环境;另一方面是柚皮苷可从复合膜中释放,其自身具有的抗氧化、抗菌性能可抑制果实表面病菌的繁殖。

3 结论

由羧甲基纤维素钠/果胶/壳聚糖(质量比为1:1:2,添

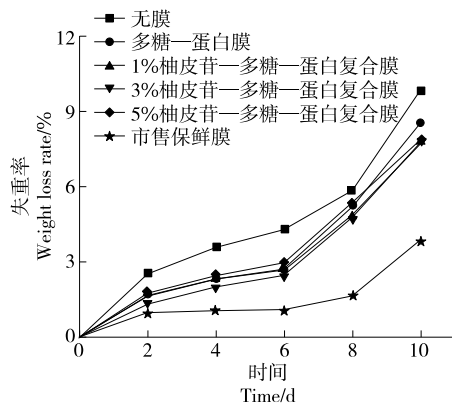


图7 新鲜龙眼在贮藏过程中失重率的变化
Figure 7 Changes in weight loss rate of fresh Longan during storage

加量为1.8%)复配的多糖和玉米醇溶蛋白(添加量4%)制备的多糖—蛋白基膜综合性能最佳。此外,将一定量的柚皮苷掺入到上述基膜中,柚皮苷具有缓慢释放的特性。与空白组和市售保鲜膜组进行对比,柚皮苷—多糖—蛋白复合膜能够在一定程度上延缓龙眼的失重率,维持其果肉的水分并抑制果实表面微生物的生长,说明该复合

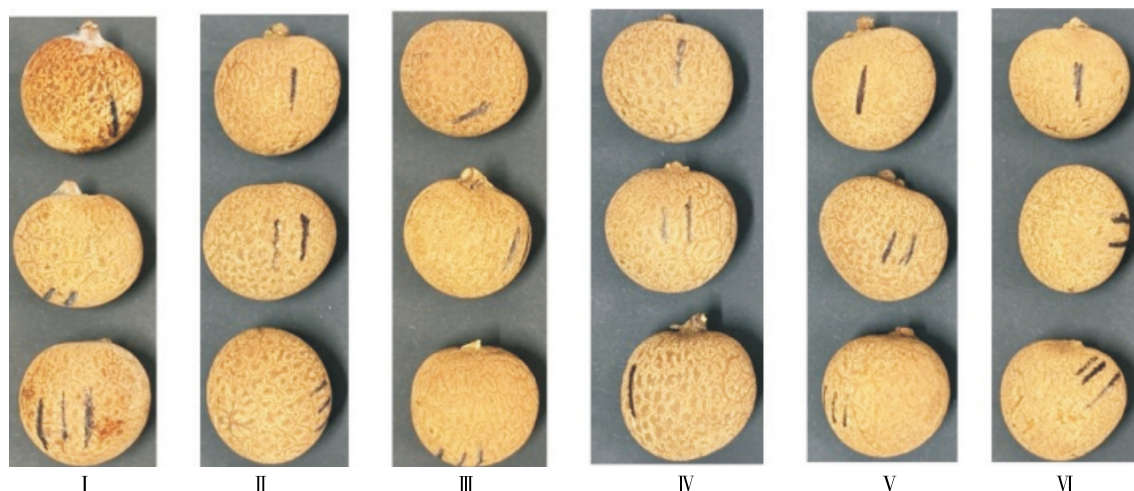


图 8 新鲜龙眼贮藏 10 d 后的外观

Figure 8 Appearance of fresh Longan after 10 days of storage

膜具有一定的应用潜力。有关柚皮苷在基膜中的最佳添加量、复合膜的功能特性(抗氧化能力、抗菌能力等),以及应用于果蔬保鲜的具体效果(水分含量、硬度、可溶性固形物、可滴定酸和糖度等)仍需进一步研究。

参考文献

- [1] YIN Y, WOO M W. Transitioning of petroleum-based plastic food packaging to sustainable bio-based alternatives[J]. Sustainable Food Technology, 2024, 2(3): 548-566.
- [2] SICILIANO S, LOPRESTO C G, LAMONACA F. From traditional packaging to smart bio-packaging for food safety: a review[J]. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2024, 9(4): 1 971-1 986.
- [3] 曲梦锐, 刘雨辰, 王东营. 壳聚糖—黄精精油复合涂膜对苹果果实的保鲜功效[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 115-120.
- QU M R, LIU Y C, WANG D Y. Preservation performance of chitosan-*Polygonatum* essential oil composite coating film on apple fruits[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 115-120.
- [4] CAZÓN P, VELAZQUEZ G, RAMÍREZ J A, et al. Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: a review[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 68: 136-148.
- [5] 欧阳澜澜, 邓娜, 尹世鲜, 等. 聚乙烯醇—鱼明胶—龙葵花青素复合膜的制备、结构表征及性能分析[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 90-99.
- OUYANG L L, DENG N, YIN S X, et al. Preparation, structural characterization, and performance analysis of polyvinyl alcohol/fish gelatin/*solanum nigrum* anthocyanin composite film[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 90-99.
- [6] LAN W T, HE L, LIU Y W. Preparation and properties of sodium carboxymethyl cellulose/sodium alginate/chitosan composite film[J]. Coatings, 2018, 8(8): 291.
- [7] 陈露珠, 李念, 裴诺, 等. 普鲁兰多糖/羧甲基壳聚糖复合膜的

制备及其对罗氏沼虾的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 137-143.

CHEN L Z, LI N, PEI N, et al. Preparation of pullulan/carboxymethyl chitosan composite membrane and its fresh-keeping effect on *Macrobrachium rosenbergii*[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 137-143.

- [8] 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, 41.

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, 41.

- [9] 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.

- [10] 徐元柳, 刘迪迪, 王兆丹, 等. 植物提取物抑菌机理及联合现代新兴技术在肉类保鲜中的应用进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(11): 238-244.

XU Y L, LIU D D, WANG Z D, et al. Research progress on the antibacterial mechanism of natural plant extracts and its application in meat preservation by combining with modern emerging technologies[J]. Food & Machinery, 2024, 40(11): 238-244.

- [11] DAVIDSON P M, TAYLOR T M, SCHMIDT S E. Chemical preservatives and natural antimicrobial compounds[M]// DOYLE M P, BUCHANAN R L. Food microbiology: fundamentals and frontiers, 4th edition[S.L.]: ASM Press, 2012: 765-801.

- [12] JIANG H, ZHANG M T, LIN X L, et al. Biological activities and solubilization methodologies of naringin[J]. Foods, 2023,

- 12(12): 2 327.
- [13] ZHAO Y N, LIU S M. Bioactivity of naringin and related mechanisms[J]. Die Pharmazie-An International Journal of Pharmaceutical Sciences, 2021, 76(8): 359-363.
- [14] 谷芳, 马嘉欣, 车春波. 羧甲基纤维素基复合膜的制备及保鲜效果研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(2): 139-146.
- GU F, MA J X, CHE C B. Preparation and fresh-keeping effect of carboxymethyl cellulose based composite film[J]. China Food Additives, 2023, 34(2): 139-146.
- [15] 王恩胜, 杨晓聪, 张雯雯, 等. 茯苓/花青素/马铃薯淀粉复合膜的制备及其保鲜效果分析[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(2): 152-157, 162.
- WANG E S, YANG X C, ZHANG W W, et al. Preparation of *Poria cocos*/anthocyanin/potato starch composite film and its preservation effect analysis[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(2): 152-157, 162.
- [16] ZHANG L M, LI K N, YU D W, et al. Chitosan/zein bilayer films with one-way water barrier characteristic: physical, structural and thermal properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 200: 378-387.
- [17] GAO H X, HE Z, SUN Q, et al. A functional polysaccharide film forming by pectin, chitosan, and tea polyphenols[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 215: 1-7.
- [18] 贺莹, 逯丽鑫, 张烨, 等. 肉桂精油/壳聚糖可食性复合膜对樱桃保鲜的影响[J]. 北方园艺, 2023(10): 87-92.
- HE Y, LU L X, ZHANG Y, et al. Effects of cinnamon essential oil/chitosan edible composite film on cherry preservation[J]. Northern Horticulture, 2023(10): 87-92.
- [19] TRIPATHI S, KUMAR L, DESHMUKH R K, et al. Ultraviolet blocking films for food packaging applications[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(6): 1 563-1 582.
- [20] ZHANG Y Q, JIANG W B. Effective strategies to enhance ultraviolet barrier ability in biodegradable polymer-based films/coatings for fruit and vegetable packaging[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 139: 104139.
- [21] DANG X G, DU Y M, WANG X C. Engineering eco-friendly and biodegradable biomass-based multifunctional antibacterial packaging films for sustainable food preservation[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138119.
- [22] 宋怡倩, 李力, 王晓曦, 等. 植物蛋白基薄膜研究进展以及在果蔬保鲜应用[J]. 粮食科技与经济, 2024, 49(6): 103-109.
- SONG Y Q, LI L, WANG X X, et al. Advances in plant protein-based films and application in fruit and vegetable preservation[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2024, 49(6): 103-109.
- [23] CHEN H B, WANG J J, CHENG Y H, et al. Application of protein-based films and coatings for food packaging: a review [J]. Polymers, 2019, 11(12): 2 039.
- [24] AHAMMED S, LIU F, KHIN M N, et al. Improvement of the water resistance and ductility of gelatin film by zein[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105804.
- [25] 李双健, 邸清茹, 龚敏慧, 等. 壳聚糖/玉米醇溶蛋白-花色苷纳米颗粒复合膜的制备及其性能[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6): 213-222.
- LI S J, DI Q R, GONG M H, et al. Preparation and characterization of chitosan/zein-anthocyanin nanoparticles composite film[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6): 213-222.
- [26] TANG J J, HUANG C, LIU W J, et al. Preparation and characterization of a konjac glucomannan-based bio-nanocomposite film and its application in cherry tomato preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110689.
- [27] 袁红, 罗玉龙, 赵文秀, 等. 活性物质的抑菌和抗氧化机制及其在可食用膜中应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(17): 195-203.
- YUAN H, LUO Y L, ZHAO W X, et al. Research progress on the antibacterial and antioxidant mechanisms of active substances and their application in edible membranes[J]. Food Research and Development, 2024, 45(17): 195-203.
- [28] ZHANG W L, JIANG H T, RHIM J W, et al. Effective strategies of sustained release and retention enhancement of essential oils in active food packaging films/coatings[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130671.
- [29] 余杰海, 周文化, 马妍, 等. 蓝莓采后品质劣变与保鲜技术研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 220-226.
- YU J H, ZHOU W H, MA Y, et al. [J]. Research progress on postharvest quality deterioration and preservation technology of blueberry[J]. Food & Machinery, 2024, 40(4): 220-226.
- [30] PALUMBO M, ATTOLICO G, CAPOZZI V, et al. Emerging postharvest technologies to enhance the shelf-life of fruit and vegetables: an overview[J]. Foods, 2022, 11(23): 3 925.