

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240919010

引用格式: 邓欢, 邓希文, 吴金玲, 等. 壳聚糖/木质素/ ϵ -聚赖氨酸复合膜的制备及其保鲜效果研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 262–272.

DENG H, DENG XW, WU JL, *et al.* Preparation of chitosan/lignin/ ϵ -polylysine composite film and its preservation effects [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 262–272. (in Chinese with English abstract).

壳聚糖/木质素/ ϵ -聚赖氨酸复合膜的制备 及其保鲜效果研究

邓欢^{1,2#}, 邓希文^{1#}, 吴金玲¹, 陈玲琪¹, 韦晓群¹, 丁心³,
张军勇³, 徐振林¹, 王弘¹, 温棚^{1,4*}

(1. 广东省食品质量安全重点实验室, 华南农业大学食品学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学广州都柏林国际生命科学与技术学院, 广州 510642; 3. 广东中兴绿丰发展有限公司, 河源 517000; 4. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室河源分中心, 河源 517000)

摘要: **目的** 制备一种多功能壳聚糖基复合膜, 提高复合膜在水果保鲜中的应用价值。**方法** 本研究通过流延法制备了壳聚糖/木质素/ ϵ -聚赖氨酸复合膜, 并探究其对沙糖橘和蓝莓采后保鲜效果的影响。**结果** 木质素的添加虽然使膜呈现棕黄色, 但其仍具有良好透明性、且赋予膜优异的耐水性和抗氧化性; 抑菌实验结果表明, 负载 0.2% ϵ -聚赖氨酸的复合膜对金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*)和大肠杆菌(*Escherichia coli*, *E. coli*)的抑菌率为 100%。对沙糖橘和蓝莓的保鲜实验表明, 在优化复合膜组成的条件下(2.0%壳聚糖、0.023%木质素、0.2% ϵ -聚赖氨酸), 复合膜可有效延缓沙糖橘和蓝莓果实贮藏过程中的物理化学性质变化速率, 在常温贮藏 12 d 后, 相比于空白组(未经任何处理的果实), 复合膜处理的沙糖橘和蓝莓的腐烂率分别降低了 22.22%和 62.50%, 失重率减少了 3.22%和 3.67%, 而硬度提高了 35.59%和 2.02%。同时, 复合膜可有效维持沙糖橘和蓝莓中可溶性固形物、维生素 C (vitamin C, VC)、可滴定酸等营养物质含量。**结论** 本研究所制备的壳聚糖/木质素/ ϵ -聚赖氨酸复合膜有望替代化学保鲜剂应用在沙糖橘和蓝莓的保鲜中, 为新型绿色保鲜材料的开发提供参考。

关键词: 保鲜; ϵ -聚赖氨酸; 木质素; 壳聚糖; 沙糖橘; 蓝莓

Preparation of chitosan/lignin/ ϵ -polylysine composite film and its preservation effects

DENG Huan^{1,2#}, DENG Xi-Wen^{1#}, WU Jin-Ling¹, CHEN Ling-Qi¹, WEI Xiao-Qun¹,
DING Xin³, ZHANG Jun-Yong³, XU Zhen-Lin¹, WANG Hong¹, WEN Peng^{1,4*}

收稿日期: 2024-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001631); 华南农业大学大学生创新创业训练计划项目(S202410564033)

#邓欢和邓希文为共同第一作者

第一作者: 邓欢(2004—), 女, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 3304664404@qq.com

邓希文(2003—), 女, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 2729673748@qq.com

*通信作者: 温棚(1988—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品质量安全。E-mail: pwen@scau.edu.cn

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Food Quality and Safety, College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangzhou Dublin International College of Life Sciences and Technology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Guangdong Zhongxing Lufeng Development Co., Ltd., Heyuan 517000, China; 4. Lingnan Modern Agricultural Science and Technology Guangdong Province Laboratory Heyuan Sub-center, Heyuan 517000, China)

ABSTRACT: Objective To prepare a multifunctional chitosan-based composite film and improve its application in fruit preservation. **Methods** A kind of chitosan/lignin/ ϵ -polylysine composite film was fabricated, and its effects on the postharvest preservation of *Citrus reticulata* ‘Shiyue Ju’ and *Vaccinium* spp. were also investigated. **Results** The results showed that although the addition of lignin made the film brown, the good transparency, excellent water resistance and antioxidant property were also observed in the obtained film. Moreover, the results showed that the composite film loaded with 0.2% ϵ -polylysine exhibited 100% inhibition rate against *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) and *Escherichia coli* (*E. coli*). The preservation experiment results indicated that, under the optimized film composition conditions (2.0% chitosan, 0.023% lignin, 0.2% ϵ -polylysine), the chitosan/lignin/ ϵ -polylysine composite film could effectively delay the changes of physical and chemical properties during the fruits storage. After 12 days of storage at room temperature, compared with the blank groups (untreated *Citrus reticulata* ‘Shiyue Ju’ and *Vaccinium* spp.), the composite film-treated *Citrus reticulata* ‘Shiyue Ju’ and *Vaccinium* spp.’s rot rate decreased by 22.22% and 62.50%, the weight loss rate decreased by 3.22% and 3.67%, as well as the hardness of *Citrus reticulata* ‘Shiyue Ju’ increased by 35.59% and the hardness of *Vaccinium* spp. increased by 2.02%, respectively. At the same time, the composite film effectively maintained the content of soluble solids, vitamin C (VC), titratable acid and other nutrients in *Citrus reticulata* ‘Shiyue Ju’ and *Vaccinium* spp.. **Conclusion** The prepared chitosan/lignin/ ϵ -polylysine composite film is expected to replace chemical preservatives in the preservation of oranges and blueberries, providing a reference for the development of novel green preservation materials.

KEY WORDS: preservation; ϵ -polylysine; lignin; chitosan; *Citrus reticulata* ‘Shiyue Ju’; *Vaccinium* spp.

0 引言

随着人们生活水平及健康意识的提高,人们对水果的需求量大幅上涨,水果产业已在我国国民经济中占重要地位^[1],但在水果的贮藏运输过程中,因果实自身的生理代谢活动及外界微生物感染导致其易出现皱缩、腐烂等现象,既对消费者的健康造成威胁,更严重影响其商业价值。如2021年,我国水果产量的首位—柑橘,年产量达 5.6×10^3 万t,但因采后处理不当所致的腐烂损耗达20%^[2];以及2022年我国蓝莓市场规模达296.47亿元^[3]。近年来,为了保持新鲜果蔬的贮藏质量和延长保质期,应用了多种保鲜技术,包括化学处理(氯化钙、1-甲基环丙烯、水杨酸等)、物理方法(低温调节、气调储存、紫外线等)和生物技术(如基因工程技术)^[4]。如LANGER等^[5]使用1-甲基环丙烯处理草莓以延长草莓的软化;MARTÍNEZ-CAMACHO等^[6]将壳聚糖和水杨酸混合液喷洒于黑莓表面以延长黑莓保质期;TERAO等^[7]通过紫外辐射和热水处理抑制了甜瓜中镰刀菌的生长,以此延缓了果实腐烂;以及SHI等^[8]将乳酸/纳米纤维素/蛋白质生物抗菌复合膜作用于香蕉和樱桃番茄,20℃下将水果保质期延长6d以上。化学处理会因化学残留引发食品安全问题而物理保存技术虽然环保无残留但耗能高、成本高^[9]。相比之下,多糖基涂膜保鲜材料因保鲜效果

优良、成本低、安全等,是目前果蔬保鲜的研究热点^[10]。

涂膜保鲜是利用天然无毒的材料制备出涂膜液后浸涂于水果表面,待风干后提供一个半封闭环境,即形成复合膜。该膜能够隔绝外界氧气、减少水分散失,以降低果蔬呼吸速率和营养物质消耗^[11];同时,通过添加一些抗氧化、抑菌的功能化合物,可有效减少微生物感染和氧化褐变,从而达到保鲜目的。壳聚糖(chitosan, CS),自然界中唯一的阳离子多糖^[12],因其优异成膜性和安全性,是可食性膜基材的研究热点。但单一的壳聚糖膜存在阻隔性差、机械性能不足、抗菌性有限及抗氧化活性差等缺点^[13],严重制约其应用。木质素(bagasse lignin, BL)是一种具有高度复杂结构的生物大分子,丰富的官能团赋予其特殊的生物活性,如酚羟基具有优异的抗氧化、抗菌和抗紫外线功能^[14]。 ϵ -聚赖氨酸(ϵ -polylysine, ϵ -PL)是一种天然存在的阳离子多肽,可以抑制食品中微生物的生长,常用于食品保存^[15-16],将 ϵ -PL与其他保鲜剂、抗菌剂等联合使用后,能协同增强其保鲜功效。当前复合涂膜多以壳聚糖为基础并添加植物精油、聚赖氨酸等抗菌物质进行水果保鲜。如CHÁFER等^[17]将含精油(佛手柑、百里香和茶树油)的壳聚糖涂层应用于橙子,抑制了橙子表面微生物的生长;吴超等^[18]使用壳聚糖/山梨酸钾/ ϵ -聚赖氨酸复合膜进行蓝莓保鲜研究。而较少将BL添加至复合膜中进行水果保鲜的

研究。本研究以壳聚糖为成膜基材, 添加不同浓度的 ϵ -聚赖氨酸、BL, 探讨不同组成的壳聚糖/木质素/ ϵ -聚赖氨酸复合膜(chitosan/ lignin/ ϵ -polylysine, CS/BL/ ϵ -PL)的性能, 以及复合膜对沙糖橘和蓝莓常温贮存的品质影响, 为沙糖橘和蓝莓的保鲜贮藏技术提供新思路。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

沙糖橘来自广西省南宁市沙糖橘生产基地; 佳沃蓝莓采自云南省曲靖佳沃蓝莓种植基地。

CS(上海阿拉丁生化科技股份有限公司); BL(济南圣泉集团); 1,1-二苯基-2-苦基胍(1,1-diphenyl- 2-picrylhydrazyl, DPPH)(上海源叶生物科技有限公司); ϵ -PL(上海麦克林生化科技有限公司); 大肠杆菌 ATCC25922 (*Escherichia coli*, *E. coli*)、金黄色葡萄球菌 ATCC25923 (*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*)(上海保藏生物技术中心)。

1.2 仪器与设备

DF-101S 水浴锅(上海力辰邦西仪器科技有限公司); Nanodrop 2000C 超微量分光光度计(德国赛默飞世尔科技公司); PL203 精密电子天平(德国 Mettler Toledo 公司); MS-H-ProA 磁力搅拌器(大龙兴创实验仪器股份公司); Hitachi-S-37000N 扫描电子显微镜(德国卡尔蔡司公司); TA.XT.Plus 质构仪(英国 Stable Micro System 公司); 阿贝折光仪(东莞三量量具有限公司); WSC-2B 便携式精密色差仪(上海海物光仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 不同复合膜的制备

(1) CS 膜的制备

称取 1.80 g CS 溶解于 90 mL 的乙酸水溶液中(1%, V:V), 充分溶解得到 CS 涂膜液。将上述制备好的涂膜液均匀流延在玻璃皿上, 放入 45 °C 干燥箱干燥 15 h 后, 得到 CS 膜。

(2) CS/BL 膜的制备

首先将 50 mg BL 溶解于 10 mL 无水乙醇中充分溶解, 然后向其中缓慢加入 40 mL 蒸馏水, 最终得到质量浓度为 1 mg/mL 的 BL 溶液。然后, 取 20.0 mL 上述 CS 涂膜液与 6.0 mL BL 溶液混合, 搅拌均匀即得 CS/BL 涂膜液。最后, 参考 1.3.1(1)的干燥方法, 得到 CS/BL 膜。

(3) CS/ ϵ -PL 膜的制备

称取 20.00 mg ϵ -PL 粉末添加到 20 mL CS 涂膜液中, 充分溶解得 CS/ ϵ -PL 涂膜液。同理, 参考 1.3.1(1)的干燥方法, 得到 CS/ ϵ -PL 膜。

(4) CS/BL/ ϵ -PL 膜的制备

将 20.0 mL CS 溶液和 6.0 mL BL 溶液均匀混合, 得到 CS/BL 溶液; 分别制备 3 份 CS/BL 溶液, 向其中分别加入

6.50、26.00、52.00 mg 的 ϵ -PL 粉末, 得到 ϵ -PL 质量浓度为 0.25、1.00 和 2.00 mg/mL 的 CS/BL/ ϵ -PL 涂膜液。同理, 参考 1.3.1(1)的干燥方法, 得到 CS/BL/ ϵ -PL 系列复合膜, 分别标记为 CS/BL/ ϵ -PL-1, CS/BL/ ϵ -PL-2, CS/BL/ ϵ -PL-3。

1.3.2 复合膜的测试与表征

(1) 扫描电镜测试

参考 FU 等^[19]的方法, 分别对上述制备的复合膜进行喷金处理, 并用导电胶将其粘在扫描电镜的样品台上, 用场发射扫描电子显微镜对复合膜的形态进行了表征测试, 加速电压为 3 kV。

(2) 抗氧化活性测试

参考 ROY 等^[20]的方法并作调整测定 DPPH 自由基清除率。首先制备 0.04 mg/mL 的 DPPH 乙醇溶液, 避光贮存。将 50.00 mg 的复合膜加入 5.0 mL 乙酸水溶液(1%, V:V)中, 溶解, 浸泡 24 h。接着, 室温下取 1.0 mL 浸泡液与 2.0 mL DPPH 溶液混合, 避光贮存 30 min 后用紫外分光光度计测 517 nm 处的吸光值。以无水乙醇作空白对照, 每组 3 个平行。最后按照公式(1)计算复合涂膜液的 DPPH 自由基清除能力:

$$\text{DPPH 自由基清除能力}/\% = \frac{A_m - (A_n - A_i)}{A_m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_m 为乙醇和 DPPH 乙醇溶液在 517 nm 的吸光值; A_n 为样品溶液和 DPPH-乙醇溶液在 517 nm 的吸光值; A_i 为乙醇和样品溶液在 517 nm 的吸光值。

(3) 抗菌活性测试

本研究通过观察大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长状态测评不同复合膜的抗菌性能。首先将菌种活化, 挑取生长状态良好的单菌落进行传代培养。采用摇菌法, 取复合膜 0.50 g 经紫外线照射消毒后, 加入 10.0 mL 菌悬液(1.0×10^6 CFU/mL)中, 置于 37 °C 恒温摇床中 150 r/min 摇菌 6 h。取样稀释涂布于琼脂平板, 放入 37 °C 恒温箱倒置培养, 培养 12 h 后观察细菌生长情况。以不含复合膜的菌悬液作为空白对照。

(4) ϵ -PL 最小抑菌浓度和最小杀菌浓度的测定

设 *E. coli* 和 *S. aureus* 为测试菌。在试管中两倍连续稀释, 直至 ϵ -PL 的最终浓度范围为 2000~31.25 $\mu\text{g/mL}$, 同时进行空白实验。最后将浓度为 $10^5 \sim 10^6$ CFU/mL 的菌悬液接种到试管中, 于 37 °C 下培养 24 h 后使用酶标仪测量 OD₆₀₀, 一般认为 OD₆₀₀<0.1 所对应抗菌剂的浓度即为最小抑菌浓度(minimum inhibitory concentration, MIC)。从澄清的试管中取出 0.1 mL 在固体培养基上涂布, 37 °C 下培养 24 h, 观察完全无菌落生长所对应的 ϵ -PL 浓度即为小杀菌浓度(minimum bactericidal concentration, MBC)。

(5) 颜色测试

参考 ZHANG 等^[21], 使用全自动色度计测量薄膜的颜色, 其中 L 表示亮/暗, a 表示红/绿, b 表示黄/蓝。用标准白板对全自动色度计校准($L^* = 96.03$, $a^* = 0.13$, $b^* = -1.96$)。根据

公式(2)计算出总色差 ΔE :

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

式中: $\Delta L^* = L - L^*$, $\Delta a^* = a - a^*$, $\Delta b^* = b - b^*$; L , a , b 为色差仪测得的实际数据。

(6)含水率和溶胀系数测试

精确称重复合膜,放入烘箱于 105 °C 条件下干燥至恒重,然后将其用蒸馏水在室温下充分浸泡 24 h,取出再次放入烘箱于 105 °C 条件下干燥至恒重,按公式(3)计算复合膜的含水率。另外,将复合膜放入 37 °C 烘箱,烘干至恒重,称重得 W_a ,然后置于 37 °C 纯水中,恒温溶胀 12 h,最后用滤纸吸去膜表面水分,称重得 W_b ,溶胀系数由公式(4)计算:

$$\text{含水率}/\% = \frac{W_o - W_d}{W_o} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{溶胀系数}/\% = \frac{W_b - W_a}{W_a} \times 100\% \quad (4)$$

式中: W_o 为膜的质量, g; W_d 为膜干燥后的质量, g; W_a 为初始样品的重量, g; W_b 为溶胀后的样品的重量, g。

1.3.3 水果涂膜处理

挑选中等大小、无破损、无病虫害的新鲜沙糖橘、蓝莓作为实验原料,将表面灰尘水渍擦去,分别将其浸入到 CS、CS/BL、CS/ ϵ -PL、CS/BL/ ϵ -PL-1、CS/BL/ ϵ -PL-2、CS/BL/ ϵ -PL-3 涂膜液中约 1 min,在自然状态下风干后保存于食品级 pp 塑料盒中。以未作任何处理的空白(CK)组作对照,将其置于常温下储藏,并分别于第 0、2、4、6、8、10、12 d 取样一次,进行指标测定。

1.3.4 水果保鲜指标测试

(1)腐烂率的测定

果实表皮可见的任何霉菌、病斑或者果皮软化,则视其为腐烂。水果的腐烂率按照公式(5)计算:

$$\text{腐烂率}/\% = \frac{M_1}{M_{\text{总}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: M_1 为腐烂的水果数; $M_{\text{总}}$ 为该组实验果实总果数。

(2)失重率的测定

使用分析天平测量重量,失重率为与开始新鲜果实重量相比损失的百分值,分别测量贮藏第 0、2、4、6、8、10、12 d 的果实的重量。失重率按照公式(6)计算:

$$\text{失重率}/\% = \frac{m_o - m_d}{m_o} \times 100\% \quad (6)$$

式中: m_o 为贮存前果实的质量, g; m_d 为贮存第 d 天果实的质量, g。

(3)可溶性固形物的测定

将贮藏第 0、2、4、6、8、10、12 d 的果实去皮榨汁,然后用纱布过滤。在室温下使用阿贝折光仪测量果汁中可溶性固形物含量。

(4)硬度的测定

参考 DAS 等^[22],在果实赤道部位均匀取 3 点,使用质构仪 3 mm(直径)探头测定果实贮藏第 0、2、4、6、8、10、12 d 的硬度。三点测得值求平均即为果实硬度。

(5)可滴定酸的测定

可滴定酸按照如下方法测定:取 5.00 g 沙糖橘果浆,加蒸馏水 10.0 mL,用氢氧化钠标准溶液滴定至 pH=8.2,即为滴定终点,记录消耗的氢氧化钠标准溶液体积,测定蓝莓可滴定酸重复以上操作。通过公式(7)可计算出样品酸含量 X :

$$X/\% = \frac{V \times C \times K}{W} \times 100\% \quad (7)$$

式中: V 为消耗的氢氧化钠标准溶液的体积, mL; C 为氢氧化钠标准溶液的浓度, mol/L; W 为果汁的重量, g; K 为换算系数,取柠檬酸的折算系数 0.064。

(6)维生素 C 含量的测定

首先,对维生素 C (vitamin C, VC)标准溶液进行滴定,取 0.02 mg/mL VC 标准溶液 10.0 mL 于锥形瓶中,加入 0.5% 淀粉溶液 1.0 mL,用 0.1 mol/L 碘液滴定至淡蓝色,并保持 30 s 不褪色。每组重复 3 次,记录所耗碘液的平均体积,记为 V_1 。然后进行样品溶液的滴定:取样品上清液 10.0 mL 于锥形瓶中,加入淀粉溶液 1.0 mL,滴定方法同上,所耗碘液的平均体积记为 V_2 。最后通过公式(8)计算得出:

$$\text{VC 含量}/(\text{mg}/100 \text{ g 样品}) = \frac{V_2}{V_1} \quad (8)$$

式中: V_1 为滴定 VC 标准溶液消耗的碘液体积, mL; V_2 为滴定样品溶液消耗的碘液体积, mL。

1.4 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行数据处理,ANOVA 检验采用邓肯多重比较进行显著性分析, $P < 0.05$ 表示组间差异显著。采用 Origin 2021 软件绘图,所有实验均重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 CS/BL/ ϵ -PL 复合膜的结构表征

2.1.1 颜色分析

BL 自身含有的发色基团会导致薄膜呈现较深的颜色,进而影响复合膜的实际应用,因此,对不同膜表面的色度值进行了定量分析,其中 L 表示膜的亮度, a 表示膜的红绿色, b 表示膜的黄蓝色, ΔE 表示色差值,如表 1 所示,与 CS 膜相比,添加了 BL 的复合膜 L 从 88.470 减少至 74.047,表明复合膜的明亮度降低。而复合膜的 a 和 b 明显升高,其中, a 增加说明复合膜红色调加深, b 增加说明复合膜黄色调加深,这是因为 BL 结构中含有大量苯环、酮基、酚羟基等,这些基团赋予 BL 棕色的特性。此外,随着复合膜中 ϵ -PL 浓度的增加,薄膜 L 、 a 、 b 和 ΔE 均无显著性变化 ($P > 0.05$),这是因为 ϵ -PL 本身无色,因此不同浓度 ϵ -PL 对薄膜的颜色基本没有影响。综合来看,本研究所制备的 CS/BL/ ϵ -PL 系列膜均可以较好地展现食品外观。

2.1.2 形貌分析

扫描电子显微镜可反映复合膜的完整度、光滑度。如

图 1 所示, CS 和 CS/BL 膜均具有光滑平整的表面, 表明二者具有良好的生物相容性; 而添加了 ϵ -PL 后, CS/ ϵ -PL 和 CS/BL/ ϵ -PL 复合膜的表面变得粗糙。这可能是 ϵ -PL 在一定程度上破坏了壳聚糖分子之间的有序排列, 使得膜的均匀性下降, 这与膜的溶胀系数结果分析相吻合。YONG 等^[23]在制备单宁酸/ ϵ -PL 复合膜过程中发现, ϵ -PL 会削弱膜结构的完整性, 使得膜出现颗粒感。

2.2 CS/BL/ ϵ -PL 复合膜的性能分析







2.2.1 复合膜的溶胀性能分析

复合膜溶胀系数是评价复合膜耐水性的重要指标^[24]。

由图 2(a)看出 CS/BL 的溶胀系数最低为 22.48, CS/ ϵ -PL

最高为 37.17, 且添加了 BL 的涂膜与未添加 BL 的组存在显著性差异($P < 0.05$)。这是由于 ϵ -PL 具有较强的吸湿性, 是一种有利于水分子传递的亲水材料^[25], 导致复合膜的溶胀系数增大。而 BL 是一种天然高分子聚合物, 在纳米化后仍具有较为致密的分子结构, 这使得 CS 分子更为分散, 则水分子就不会在膜内聚集而导致溶胀, 以及 BL 是多环芳香族的, 由于这种结构, 它能降低亲水材料的润湿性^[26], 故可降低溶胀系数。因此在 CS/ ϵ -PL 的膜中添加一定量的 BL 能够有效降低膜的溶胀系数, 即膜中各成分相互作用使得膜的耐水性能更加稳定。

表 1 复合膜的颜色与外观
Table 1 Color and appearance of composite film

样品	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>L</i>	ΔE	外观图
CS	-0.420±0.035 ^b	0.477±0.939 ^b	88.470±0.318 ^a	7.989±0.576 ^b	
CS/BL	5.293±0.909 ^a	16.550±2.029 ^a	74.047±2.084 ^b	29.201±3.058 ^a	
CS/ ϵ -PL	-0.450±0.040 ^b	-0.517±0.315 ^b	88.707±0.102 ^a	7.491±0.128 ^b	
CS/BL/ ϵ -PL-1	5.790±0.679 ^a	18.853±1.444 ^a	73.183±1.427 ^b	31.457±2.116 ^a	
CS/BL/ ϵ -PL-2	5.977±0.775 ^a	18.573±1.887 ^a	72.670±2.036 ^b	31.652±2.789 ^a	
CS/BL/ ϵ -PL-3	6.140±0.357 ^a	18.677±1.059 ^a	72.053±0.774 ^b	32.202±1.316 ^a	

注: 同一列中标记不同小写字母的数据间有显著性差异($P < 0.05$)。

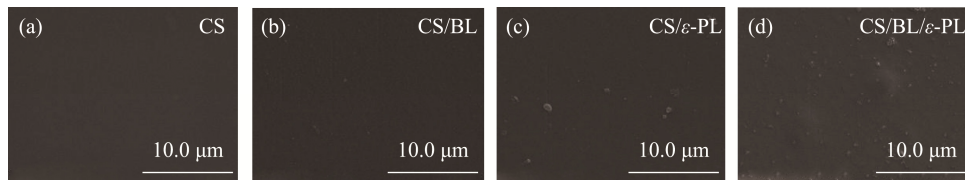
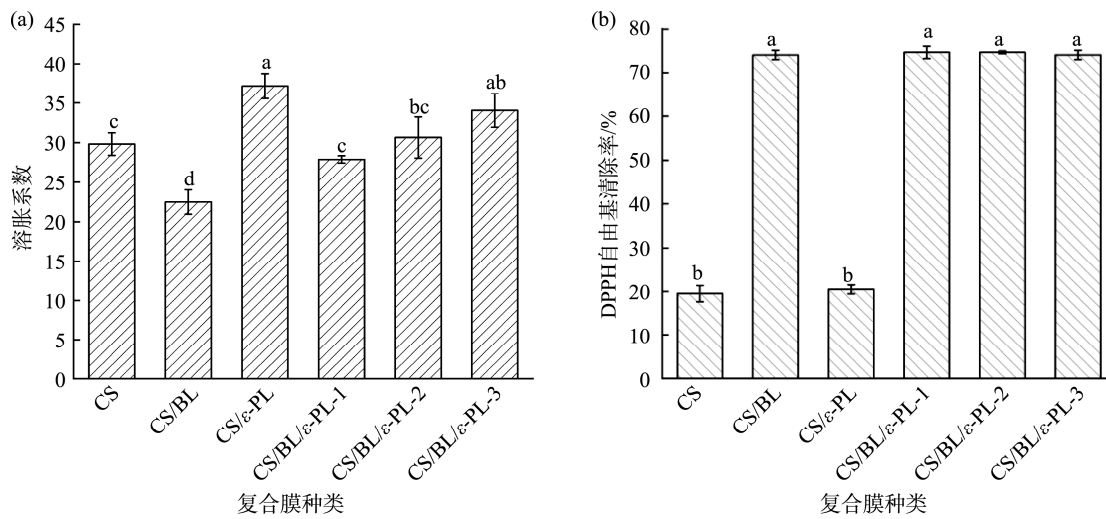


图 1 复合膜扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron microscopy images of composite films



复合膜种类

注: 不同小写字母表示组间有显著性差异($P < 0.05$), 图3、5、7同。

图 2 复合膜的溶胀性(a)和抗氧化活性分析(b)

Fig.2 Swelling property (a) and antioxidant activity (b) of the composite film

2.2.2 复合膜的抗氧化性能分析

抗氧化性是评价保鲜膜优劣的一项重要指标, DPPH 自由基清除率越高越能体现膜优良的抗氧化性。如图 2(b), CS 和 CS/ ϵ -PL 为样品组清除率较低, 其余组高达 74%。且添加 BL 的组与未添加 BL 的组存在显著差异($P < 0.05$), 表明 BL 可以大大增强复合膜的抗氧化性。同样地, MAKRI 等^[27]在研究纳米 BL 对生物基(乳酸)复合膜性能的影响中发现复合膜表现出的抗氧化性随纳米 BL 的浓度增加而增加。因此, 所制备的 CS/BL/ ϵ -PL 系列复合膜具有优异的抗氧化活性。

2.2.3 复合膜的抑菌性能分析

通过菌落生长情况反映不同膜的抑菌效果, 相同时间内, 菌落数越少表明抑菌效果越好[图 3(a)]。由图 3(b)可知, CS 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌率分别为 21.68%、13.53%; 而 CS/BL 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌率分别为 22.35%、25.45%。这是因为 BL 结构中的酚羟基降低了细菌细胞膜周围的 pH, 以致细胞破裂, 细菌死亡^[28]。所制备的 CS/BL/ ϵ -PL 系列复合膜抑菌率均为 100%, 这是由于 ϵ -PL 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的 MIC 和 MBC 值均为 0.125 mg/mL 和 0.25 mg/mL[图 3(c)], 而复合涂膜中 ϵ -PL 的质量浓度均高于 0.25 mg/mL。因此, 所制备的 CS/BL/ ϵ -PL 复合膜具有优异的抗菌性能。

2.3 CS/BL/ ϵ -PL 复合膜处理对沙糖橘品质的影响

2.3.1 涂膜处理对沙糖橘腐烂率的影响

在贮藏过程中, 受腐败微生物影响沙糖橘易出现发霉腐烂, 影响其品质。从图 4 可看出, CK 组个别沙糖橘在第 6 d 时已出现腐烂、长霉的迹象, CS、CS/ ϵ -PL、CS/BL 组的部分果实第 8 d 后陆续出现发软的现象, 而 CS/BL/ ϵ -PL 处理的沙糖橘的外表仍保持光滑完整; 到 12 d 时, CK、CS 组超过 50% 的果实明显软烂, CS/BL/ ϵ -PL 仅个别出现软烂的现象, 其中 CS/BL/ ϵ -PL-3 处理的沙糖橘的腐烂率相比于 CK 组降低了 22.22%。肖媛^[29]研究发现, 随 ϵ -PL 浓度升高, 其对柑橘酸腐菌生长的抑制能力逐渐增强, 从而降低贮藏期柑橘的腐败率。综上, CS/BL/ ϵ -PL 在缓解沙糖橘腐烂发挥了重要作用, 能够有效保持沙糖橘贮存期间的外观及其市场价值。

2.3.2 涂膜处理对沙糖橘失重率的影响

水果失重主要是因为水果自身的蒸腾作用和呼吸作用而失去水分和消耗体内的物质。由图 5(a)可知, 在整个贮藏过程中每组沙糖橘的失重率逐渐上升, 但各处理组沙糖橘的失重率始终低于空白组。到第 12 d, CK 组沙糖橘失重率为 14.98%, 而 CS/BL/ ϵ -PL-2、CS/BL/ ϵ -PL-3 处理的沙糖橘失重率分别为 10.44%、11.76%, CS/BL/ ϵ -PL-3 处理的沙糖橘失重率相比 CK 组减少了 3.22%。ANJANA 等^[30]研

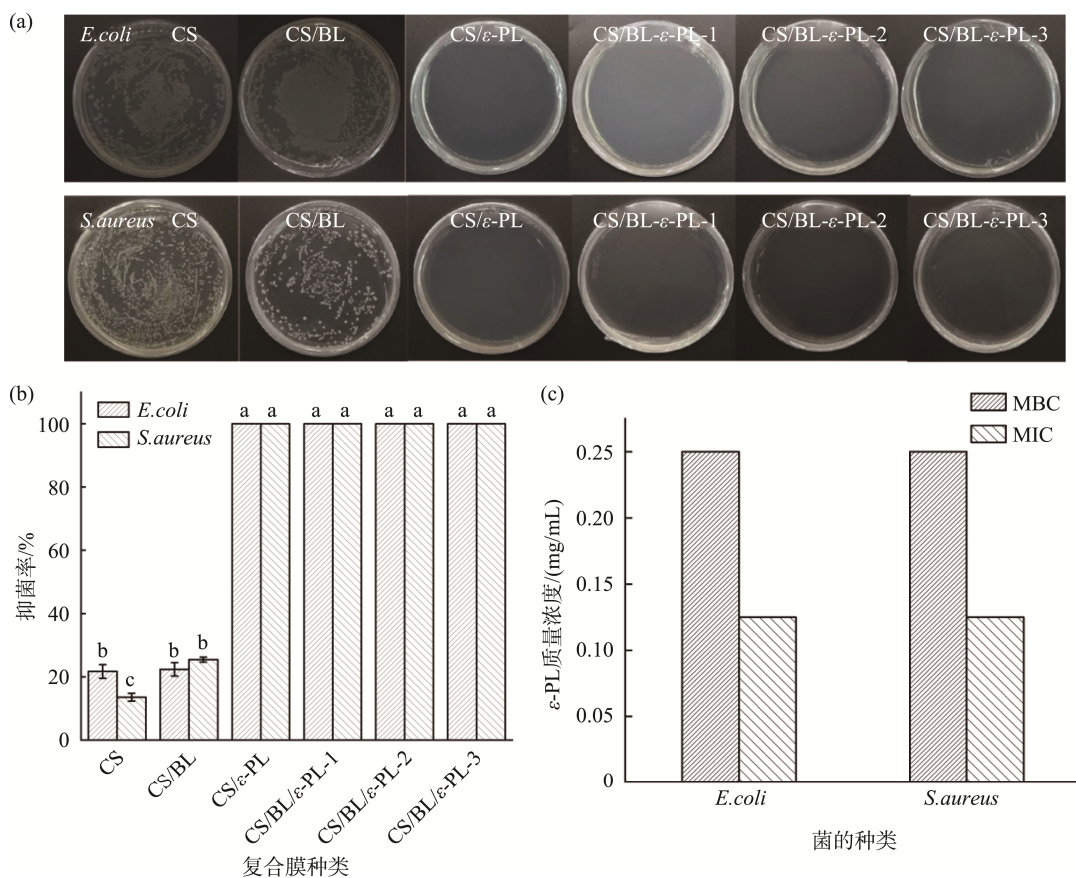


图3 复合膜的抑菌效果(a、b)及 ϵ -PL对*E. coli*和*S. aureus*的MIC和MBC值(c)

Fig.3 Inhibition effects of the composite film (a, b) and the MIC and MBC values of ϵ -PL on *E. coli* and *S. aureus* (c)

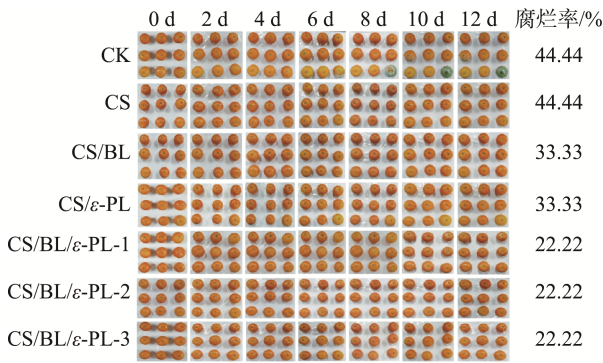


图4 不同复合膜处理的沙糖橘腐烂情况

Fig.4 Rotting situation of *Citrus reticulata* 'Shiyue Ju' treated with different composite films

究了聚乙烯醇-洋葱纳米纤维-纳米姜黄素涂膜在室温下对柑橘的保鲜效果,发现在储藏的第 13 d,无任何处理的柑橘失重率近 20.00%,而涂膜处理的柑橘失重率为 11.10%。综合来看,涂膜处理均能阻碍水果自身水分与环境交换,进而保持水分,延长保质期。

2.3.3 涂膜处理对沙糖橘可滴定酸含量的影响

果实中的有机酸即为其可滴定酸,成熟时含量最高,后期会逐渐下降,对水果口感产生一定影响。由图 5(b)看出每组沙糖橘随贮藏时间的增加,有机酸含量逐渐降低,而复合膜有助于缓解有机酸的损耗。储藏 12 d 后,CK 组沙糖橘可滴定酸含量由 0.67%降为 0.30%,CS/BL/ε-PL-3 处理的沙糖橘可滴定酸含量由 0.66%降为 0.41%。可滴定酸含量下降主要是因为果实的呼吸作用消耗了有机酸,而涂膜在一定程度上抑制了水果的呼吸作用从而减缓可滴定酸的流失。

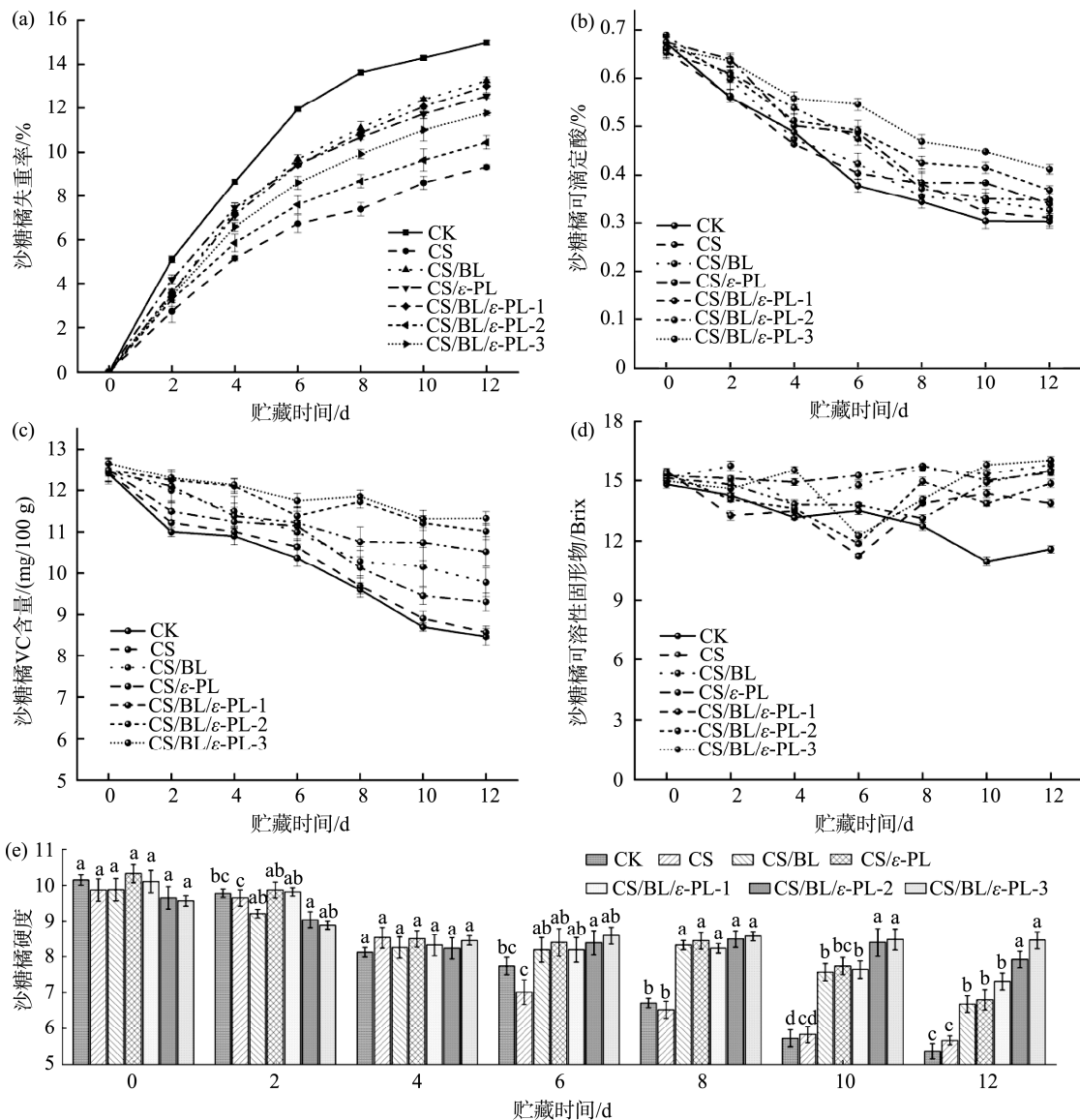


图5 不同处理对沙糖橘的影响失重率(a)、可滴定酸(b)、VC含量(c)、可溶性固形物含量(d)和硬度(e)的影响

Fig.5 Effects of different treatments on the weight loss rate (a), titratable acid (b), VC content (c), soluble solid content (d) and hardness (e) of *Citrus reticulata* 'Shiyue Ju'

李双健^[31]研究发现在 25 °C 条件下贮存 12 d 后, CK 组的沙糖橘可滴定酸含量已低于 0.40%, 而玉米醇溶蛋白-单宁酸纳米颗粒/壳聚糖复合膜处理的沙糖橘可滴定酸含量约为 0.50%。综上, CS/BL/ ϵ -PL-3 的复合膜的保鲜效果最优, 其抑制了沙糖橘的呼吸作用, 有效维持了沙糖橘的原有风味。

2.3.4 涂膜处理对沙糖橘 VC 含量的影响

VC 作为一种水溶性维生素, 在贮藏过程中易作为生化反应的底物被消耗^[32]。由图 5(c) 可看出, 贮藏期间沙糖橘的 VC 含量逐渐降低。这主要是由于复合膜阻碍了沙糖橘与外界的气体交换, 果实呼吸强度降低, 进而有效减缓 VC 的氧化反应^[31]。此外, CS/BL/ ϵ -PL-3 能进一步抑制沙糖橘中 VC 的损失, 在第 12 d 时沙糖橘的 VC 含量(11.33 mg/100 g) 是 CK 组(8.46 mg/100 g) 的 1.3 倍。因此, 复合膜可大大延缓沙糖橘中 VC 的流失, 保证沙糖橘的营养价值。

2.3.5 涂膜处理对沙糖橘可溶性固形物含量的影响

可溶性糖、VC、酸和矿物质等均为水果中的可溶性固形物, 其含量与果实成熟度以及呼吸速率有密切的关系^[33]。由图 5(d) 看出, 多数组别的沙糖橘的可溶性固形物含量在贮藏的 0~4 d 主要呈下降趋势, 这主要是因为果实进行呼吸代谢, 导致糖类消耗, 因此可溶性固形物含量下降。而第 6 d 后波动上升(除 CK 组), CS 和 CK 组的可溶性固形物终值低于它们的起始值, 其他组别终值均略高于起始值。这与李保祥等^[34]测量柑橘贮藏期间可溶性固形物的所得结果相似, 可能原因是沙糖橘细胞壁中的原果胶转化为可溶性糖, 同时果实水分损失, 导致可溶性固形物含量上升。因此, 复合膜处理组能有效地延缓沙糖橘中可溶性固形物含量和营养成分的流失, 维持沙糖橘的口感。

2.3.6 涂膜处理对沙糖橘硬度的影响

果实硬度不仅是判断果实成熟度的指标, 还是反映果实退化程度最直观的指标^[35]。如图 5(e) 所示, 随贮藏时间增加, 所有组别的沙糖橘硬度呈下降趋势。贮藏 12 d 后, CK、CS 组的硬度下降最为明显, 分别降低了 47.19%、42.65%; 而 CS/BL/ ϵ -PL-2 和 CS/BL/ ϵ -PL-3 的分别降低了 17.93%、11.60%, 相比于 CK 组, CS/BL/ ϵ -PL-3 处理的沙糖橘的硬度提高了 35.59%。LI 等^[36]发现, 在 25 °C 储藏 60 d 后, CK、CS、CS-聚甲氧基黄酮类化合物的柠檬醛乳剂组处理的柑橘的硬度分别降低了 3.64、3.24、2.87。因此, 从数据分析上看, 复合膜在一定程度上能够维持沙糖橘的硬度, 其中 CS/BL/ ϵ -PL-3 复合膜的效果最优。

2.4 CS/BL/ ϵ -PL 复合膜处理对蓝莓品质的影响

2.4.1 涂膜处理对蓝莓腐烂率的影响

由图 6 看出, 贮藏期间, CK 组蓝莓的腐烂情况比所有经涂膜处理的蓝莓严重, 在第 4 d 就出现了脱水褶皱情况, 而 CS、CS/ ϵ -PL、CS/BL、CS/BL/ ϵ -PL 处理的蓝莓在第 6 d 才出现褶皱, 空白组的腐烂速度约为处理组的 1.5 倍。CS/BL/ ϵ -PL 复合膜的保鲜效果良好, 蓝莓多数都未出现褶

皱、干瘪、凹陷的现象, 其中 CS/BL/ ϵ -PL-3 处理的蓝莓的腐烂率相比于 CK 组降低了 62.50%。吴超等^[18]在探究壳聚糖/山梨酸钾/ ϵ -聚赖氨酸复合膜对蓝莓的保鲜效果也有类似结论, 即经壳聚糖、 ϵ -PL 处理组的腐烂率始终低于对照组。综上所述, CS 隔绝了外界空气, ϵ -PL 展现出了良好的抗菌性, 其中 ϵ -PL 浓度大的复合膜具有更优的保鲜性能。

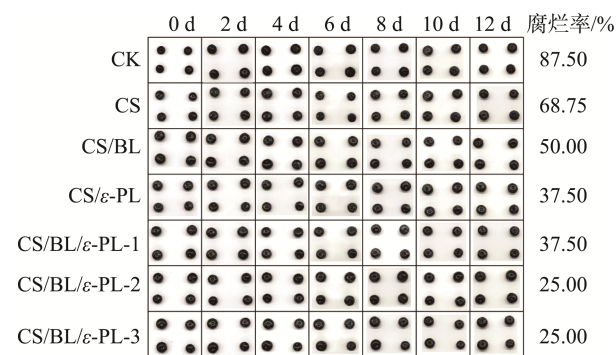


图6 不同复合膜处理的蓝莓的腐烂情况

Fig.6 Effects of different treatments on the rot rates of *Vaccinium* spp.

2.4.2 涂膜处理对蓝莓失重率的影响

从图 7(a) 可看出在整个贮藏过程中, 蓝莓各组失重率逐渐上升, 但 CS/ ϵ -PL、CS、CS/BL/ ϵ -PL 涂膜失重率均小于对照组的趋势。第 12 d, CK 组蓝莓的失重率高达 63%, CS/BL/ ϵ -PL 处理组均低于 60%, 其中, CS/BL/ ϵ -PL-3 处理的蓝莓的失重率最低为 59.33%, 相比 CK 组失重率减少了 3.67%。同样, 杜珂涵等^[32]在探究壳聚糖/纳米 ZnO 复合膜对蓝莓失重率影响中发现, 在 18~25 °C 下贮藏 12 d 后, CK 组的失重率达 27.56%, 其余处理组的蓝莓失重率均低于 25%。可见, 复合膜能够阻碍蓝莓自身水分与环境交换, 延长保质期, 且 CS/BL/ ϵ -PL-3 效果最优。

2.4.3 涂膜处理对蓝莓可滴定酸含量的影响

由图 7(b) 可见, 蓝莓可滴定酸含量随贮藏时间的推移, 呈现先减后增再减的趋势。这可能是蓝莓的呼吸作用消耗了体内有机酸, 从而导致可滴定酸含量下降; 随着时间推移, 微生物生长代谢易产生酸性物质, 导致有机酸含量上升。贮藏 12 d 后, CS/BL/ ϵ -PL-3 处理蓝莓的可滴定酸含量由 0.67% 降为 0.52%, CK、CS、CS/BL 分别由 0.65% 降为 0.34%、0.67% 降为 0.38%、0.68% 降为 0.45%。ZHAO 等^[37]发现, 室温下贮藏 15 d 后, 壳聚糖/金针菇脚多糖复合膜组的蓝莓可滴定酸含量是空白组蓝莓的 1.29 倍, 即复合膜能有效减缓贮藏期间蓝莓的呼吸作用, 抑制蓝莓可滴定酸的损耗。综上, CS/BL/ ϵ -PL-3 复合膜能有效维持贮藏期蓝莓的品质。

2.4.4 涂膜处理对蓝莓 VC 含量的影响

蓝莓高含量的 VC 是评判其商业价值和营养价值的重要因素, 含量越高则价值越高。如图 7(c) 所示, 贮藏期间蓝莓的 VC 含量波动下降, 而处理组的下降幅度显著低于对照

组($P<0.05$)。在第12 d, CK组以及CS、CS/BL、CS/ ϵ -PL处理的蓝莓VC含量分别为26.88、27.30、27.88、28.66 mg/100 g, 而CS/BL/ ϵ -PL的蓝莓VC含量均高于29.00 mg/100 g, 即同时添加BL和 ϵ -PL的保鲜效果更优。ZHAO等^[37]的研究也发现室温贮藏的第15 d, 壳聚糖/金针菇脚多糖复合膜处理的蓝莓VC含量是CK组的1.14倍。

2.4.5 涂膜处理对蓝莓可溶性固形物含量的影响

可溶性固形物含量越高则意味着蓝莓的口感越好。从图7(d)看出蓝莓的可溶性固形物含量呈先增后减的趋势。

原因可能是贮藏期的蓝莓因呼吸作用消耗可溶性糖的速率小于其生成可溶性糖的速率, 故呈上升趋势; 反之, 则呈下降趋势。经CS/BL/ ϵ -PL处理的蓝莓在第6 d左右出现小高峰, 而CK、CS、CS/BL、CS/ ϵ -PL组在贮藏的第2~4 d出现小高峰, 可见CS/BL/ ϵ -PL可减缓蓝莓的呼吸作用。在贮藏的第12 d, CS/BL/ ϵ -PL-3涂膜处理的蓝莓可溶性固形物含量(12.57 Brix)是CK组(9.3 Brix)的1.35倍。类似地, HOSSEN等^[38]发现CS/明胶-生姜精油/ β -环糊精复合膜处理的蓝莓可溶性固形物含量变化也呈先增后减的趋势。

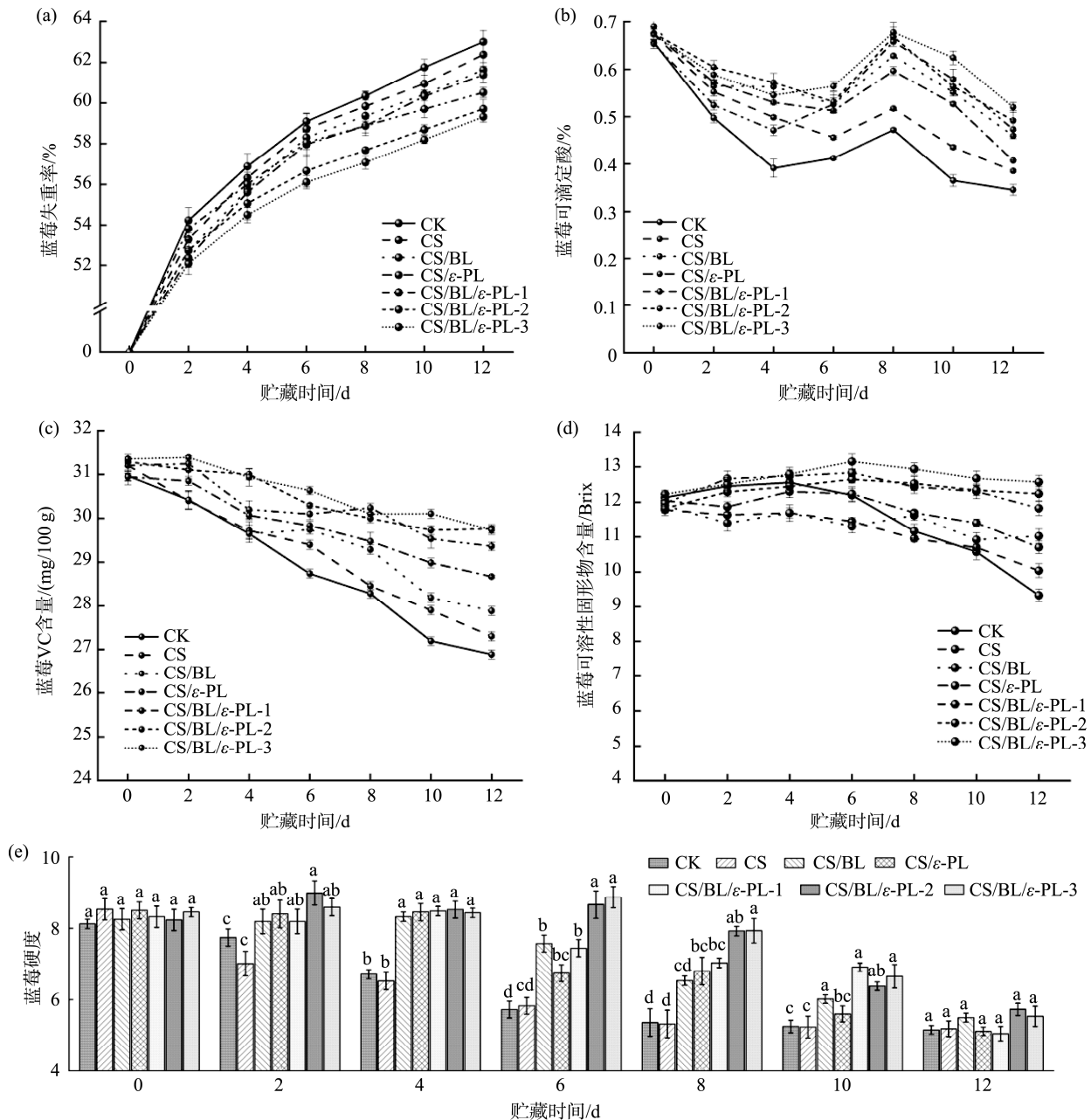


图7 不同处理对蓝莓失重率(a)、可滴定酸(b)、VC含量(c)、可溶性固形物含量(d)和硬度(e)的影响

Fig.7 Effects of different treatments on the weight loss rate (a), titrable acid (b), VC content (c), soluble solids content (d) and hardness (e) of *Vaccinium* spp.

2.4.6 涂膜处理对蓝莓硬度的影响

由图 7(e)可知,贮藏期间蓝莓硬度总体呈下降趋势。在第 12 d 时,CK、CS/BL/ ϵ -PL-2、CS/BL/ ϵ -PL-3 组的蓝莓硬度分别下降了 36.58%、30.38%、34.56%,CS/BL/ ϵ -PL-3 组相比于 CK 组提高了 2.02%。XING 等^[39]研究发现,在 0 °C 贮藏 32 d 后,CK 组的蓝莓硬度下降 30%,CS、CS/TiO₂ 组分别下降 16%、12%,可见复合膜能够有效抑制贮存期间蓝莓的硬度损失。这主要是复合膜抑制了蓝莓的代谢作用和水分流失,从而阻碍细胞壁成分的分解。

3 结论

本研究结果表明,CS/BL/ ϵ -PL 复合膜具有良好的抗氧化性能和抑菌性,尽管 BL 和 ϵ -PL 具有特殊的理化性质,其制备出的复合膜平整度略低于纯 CS 膜,但其功能性仍不受影响。将复合膜用于沙糖橘和蓝莓,通过各项理化指标可以看出复合膜对沙糖橘和蓝莓有良好的保鲜效果,尤其 CS/BL/ ϵ -PL-3 的复合膜效果最佳,该复合膜有效维持了水果的重量、硬度,减缓 VC 和可溶性固形物的流失。因此,添加 BL 和 ϵ -PL 的壳聚糖复合膜可维持沙糖橘和蓝莓贮藏期间的品质,其作为绿色安全的保鲜剂在水果保鲜中具有优良的应用前景。

参考文献

- [1] 吴中勇,李延荣,董中丹.我国水果市场发展现状及对策研究[J].中国果菜,2023,43(11):79-83,87.
- [2] 胡宇霄,许让伟,朱峰,等.采后生产用水水质硬度及乙二胺四乙酸二钠对柑橘保鲜处理效果的影响[J].浙江柑橘,2024,41(2):26-33.
- [3] 徐艺格,王兴东,刘有春,等.蓝莓产业现状及技术发展趋势分析与展望[J].北方园艺,2024,8:130-136.
- [4] JIN P. Latest advances in preservation technology for fresh fruit and vegetables [Z]. MDPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023.
- [5] LANGER SE, MARINA M, FRANCESE P, et al. New insights into the cell wall preservation by 1-methylcyclopropene treatment in harvest-ripe strawberry fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 299: 111032.
- [6] MARTÍNEZ-CAMACHO JE, GUEVARA-GONZÁLEZ RG, RICO-GARCÍA E, et al. Delayed senescence and marketability index preservation of blackberry fruit by preharvest application of chitosan and salicylic acid [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 796393.
- [7] TERAO D, NECHET KL, FRIGHETTO RTS, et al. Control of fusarium rot in galia melon and preservation of fruit quality with UV-C radiation and hot water treatments [J]. Fitopatologia Brasileira, 2021, 46(3): 350-359.
- [8] SHI B, LIU S, WANG Y. Nisin/cellulose nanofiber/protein bio-composite antibacterial coating for postharvest preservation of fruits [J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 194: 108634.
- [9] ZHANG YQ, ZHANG WL, WU WJ, et al. Critical assessment of the delivery methods of chemical and natural postharvest preservatives for fruits and vegetables: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 1: 1-23.
- [10] WU JX, ZHANG L, FAN K. Recent advances in polysaccharide-based edible coatings for preservation of fruits and vegetables: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(12): 3823-3838.
- [11] 王佳欣,魏雯雯,李庆鹏,等.果蔬采后纳米复合涂膜保鲜研究进展[J].食品安全质量检测学报,2023,14(17):269-275.
- [12] HONG FD, QIU P, WANG YF, et al. Chitosan-based hydrogels: From preparation to applications, a review [J]. Food Chemistry: X, 2023, 21: 101095.
- [13] XU C, GUAN S, XU JQ, et al. Preparation, characterization and antioxidant activity of protocatechuic acid grafted carboxymethyl chitosan and its hydrogel [J]. Carbohydrate polymers, 2021, 252: 117210.
- [14] SHU F, JIANG B, YUAN YF, et al. Biological activities and emerging roles of lignin and lignin-based products-A review [J]. Biomacromolecules, 2021, 22(12): 4905-4918.
- [15] CHEN XX, LI YX, QIU YL, et al. Amino carboxymethyl chitosan/dialdehyde starch/polyvinyl alcohol double-layer film loaded with ϵ -polylysine [J]. Food chemistry, 2023, 428: 136775.
- [16] TRIPATHI J, AMBOLIKAR R, GUPTA S, et al. Preparation and characterization of methylated guar gum based nano-composite films [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107312.
- [17] CHÁFER M, SÁNCHEZ-GONZÁLEZ L, GONZÁLEZ-MARTÍNEZ C, et al. Fungal decay and shelf life of oranges coated with chitosan and bergamot, thyme, and tea tree essential oils [J]. Journal of Food Science, 2012, 77(8): 182-187.
- [18] 吴超,杨富雁,邵帮丽.壳聚糖、山梨酸钾和 ϵ -聚赖氨酸对蓝莓的复合涂膜保鲜效果[J].北方园艺,2022,7:99-105.
- [19] FU YJ, WANG J, HUANG S, et al. High oxygen barrier property of polyethylene composite films with bilayer polyvinyl alcohol coating for emergency foods in high-humidity environments [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(16): 1-5.
- [20] ROY S, PRIYADARSHI R, RHIM J. Gelatin/agar-based multifunctional film integrated with copper-doped zinc oxide nanoparticles and clove essential oil Pickering emulsion for enhancing the shelf life of pork meat [J]. Food Research International, 2022, 160: 111690.
- [21] ZHANG YD, HUANG YJ, CHEN YB, et al. Multifunctional and pH-responsive dialdehyde cellulose/polyvinyl alcohol composite film reinforced with curcumin [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(9): 1-5.

- [22] DAS B, DEVI LS, DUTTA J, *et al.* Eugenol and *Aloe vera* blended natural wax-based coating for preserving postharvest quality of Kaji lemon (*Citrus jambhiri*) [J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 22: 101349.
- [23] YONG YY, GU YY, NABEEL-AHMAD H, *et al.* Design and characterization of tannic acid/ ϵ -polylysine biocomposite packaging films with excellent antibacterial and antioxidant properties for beef preservation [J]. *Food Chemistry*, 2024, 439: 138155.
- [24] 项昭保, 刘岩, 张琳婧. 芦丁-壳聚糖抗氧化食品保鲜膜的制备与表征 [J/OL]. *重庆工商大学学报 (自然科学版本)*, [2024-05-04]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1155.N.20240109.1018.002>
XIANG ZB, LIU Y, ZHANG LJ. Preparation and characterization of antioxidant rutin/chitosan fresh-keeping film [J/OL]. *Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Sciences Edition)*, [2024-05-04]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1155.N.20240109.1018.002>
- [25] HE BB, WANG YF, JIANG ZX, *et al.* Physical properties and antibacterial activity of the composited films based on carboxymethyl cellulose and gelatin functionalized with ϵ -polylysine [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 191: 1126–1136.
- [26] RUWOLDT J, BLINDHEIM FH, CHINGA-CARRASCO G. Functional surfaces, films, and coatings with lignin-A critical review [J]. *RSC Advance*, 2023, 13(18): 12529–12553.
- [27] MAKRI SP, XANTHOPOULOU E, KLONOS PA, *et al.* Effect of micro- and nano-lignin on the thermal, mechanical, and antioxidant properties of biobased PLA-lignin composite films [J]. *Polymers*, 2022, 14(23): 5274.
- [28] XU YH, ZENG P, LI MF, *et al.* γ -Valerolactone/water system for lignin fractionation to enhance antibacterial and antioxidant capacities [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 279: 119780.
- [29] 肖媛. ϵ -聚赖氨酸对柑橘青霉菌及酸腐病菌的抑制作用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
XIAO Y. Antifungal activity of ϵ -polylysine against pathogenic fungi of blue mold and sour rot of citrus [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [30] ANJANA KSV, UMADEVI S, MIDHUN DCD, *et al.* Biomass derived cellulose nanofiber loaded PVA-nanocurcumin coating for extending the shelf life of mandarin oranges (*Citrus reticulata*) [J]. *Hybrid Advances*, 2024, 5: 100162.
- [31] 李双健. 负载玉米醇溶蛋白基纳米颗粒的壳聚糖膜制备及其在沙糖桔保鲜中的应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
LI SJ. Preparation of chitosan composite film loaded with zein based nanoparticles and its application in the preservation of sugar oranges [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [32] 杜珂涵, 张亲心, 黄天姿, 等. 壳聚糖/纳米 ZnO 复合涂膜对蓝莓保鲜效果的研究[J]. *食品科技*, 2023, 48(12): 31–40.
DU KH, ZHANG QX, HUANG TZ, *et al.* Effects of chitosan/nano-ZnO composite coating on preservation of blueberry [J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(12): 31–40.
- [33] 曹梦园, 乔成奎, 韩丽君, 等. 壳聚糖对果蔬的抗菌保鲜效果及其应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(9): 93–102.
CAO MY, QIAO CK, HAN LJ, *et al.* Research progress on the preservation and antibacterial effect of chitosan on fruits and vegetables and its application [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(9): 93–102.
- [34] 李保祥, 余易琳, 何悦, 等. 壳聚糖-纳米纤维素复合涂膜对砂糖橘贮藏保鲜效果的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(13): 185–192.
LI BX, YU YL, HE Y, *et al.* Effect of chitosan-nanocrystal cellulose composite coating on the preservation of Shatangju mandarin [J]. *Food Science*, 2021, 42(13): 185–192.
- [35] 王乐兵, 彭承祥, 孙晨晨, 等. 4 种不同涂膜处理对软枣猕猴桃贮藏品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(9): 232–239.
WANG LB, PENG CX, SUN CC, *et al.* Effects of 4 kinds of different coating treatments on the storage quality of *Actinidia arguta* [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(9): 232–239.
- [36] LI YR, GUO L, WEI JJ, *et al.* Effect of polyethoxylated flavonoids (PMFs)-loaded citral and chitosan composite coatings on citrus preservation: From the perspective of fruit resistance [J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 22: 101417.
- [37] ZHAO J, WANG Y, LI JB, *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.
- [38] HOSSEN MA, SHIMUL IM, SAMEEN DE, *et al.* Chitosan/gelatin coating loaded with ginger essential oil/ ϵ -cyclodextrin inclusion complex on quality and shelf life of blueberries [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 279(4): 135026.
- [39] XING YG, YANG S, XU QL, *et al.* Effect of chitosan/nano-tio2 composite coating on the postharvest quality of blueberry fruit [J]. *Coatings (Basel)*, 2021, 11(5): 512.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)