

可食性蛋白涂膜剂在“红美人”柑橘保鲜中的应用

余晓梅^{1*}, 刘艳², 陈妍³, 徐建辉¹

(1. 象山县食品检验检测中心, 浙江宁波 315700) (2. 宁波市产品食品质量检验研究院(宁波市纤维检验所), 浙江宁波 315000) (3. 嘉兴市食品药品与产品质量检验检测院, 浙江嘉兴 314000)

摘要: 该研究用大豆分离蛋白(Soy Protein Isolate, SPI)涂膜剂、乳清蛋白(Whey Protein Isolate, WPI)涂膜剂和SPI-WPI复合涂膜剂处理“红美人”柑橘,以不作处理为对照(Control Check, CK)组,观测果皮微观形貌,测定果实贮藏期间品质变化。实验表明,三组涂膜组腐烂指数、失重率始终低于CK组。贮藏14 d,CK组腐烂指数为6.66%,SPI组为3.33%,WPI组和SPI-WPI组无腐烂现象;贮藏超过35 d,CK组腐烂指数超过20%,失重率达16.15%,显著高于涂膜组。涂膜组可溶性固形物(Total Soluble Solid, TSS)值、可滴定酸(Titratable Acid, TA)含量变化过程滞后CK组1~2周,贮藏14 d,涂膜组TSS值上升0.77%~1.70%,而CK组TSS值不再上升;贮藏21 d,CK组TA含量达到低值6.29 g/L,而涂膜组TA值分别为8.48、8.03、8.79 g/L,显著高于CK组。涂膜组Vc、总酚和类黄酮含量变化幅度小于CK组。扫描电镜成像表明蛋白涂膜剂在柑橘表面形成光滑致密膜,覆盖角质层上气孔,从而增强光泽度、放缓代谢水平。蛋白涂膜剂可延长“红美人”柑橘贮藏时间,提高果实耐贮性,WPI和SPI分别在贮藏前期和贮藏后期展现良好的保鲜效果,SPI-WPI介于两者。

关键词: 涂膜保鲜;“红美人”柑橘;大豆分离蛋白;乳清蛋白

文章编号: 1673-9078(2025)02-175-182

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.0029

Application of Edible Protein Coating Agents in the Preservation of *Citrus reticulata* “Hong Mei Ren”

YU Xiaomei^{1*}, LIU Yan², CHEN Yan³, XU Jianhui¹

(1. Xiangshan Food Inspection and Testing Center, Ningbo 315700, China) (2. Ningbo Product and Food Quality Inspection and Research Institute (Ningbo Fiber Inspection Institute), Ningbo 315000, China) (3. Jiaxing Food, Drug and Product Quality Inspection and Testing Institute, Jiaxing 314000, China)

Abstract: A soy protein isolate (SPI) coating agent, whey protein isolate (WPI) coating agent, and SPI-WPI composite coating agent were used to preserve the *Citrus reticulata* variety “Hong Mei Ren.” In addition, a control group (CK) with no treatment was established for comparison and evaluation of preservation performance. The microscopic morphology of the peel was observed, and the storage quality of the fruit was measured. The results showed that the decay indices and weight loss rates of the three treatment groups were lower than those of the CK group. After 14 days of storage, the decay index of the CK group was 6.66%, and that of the SPI group was 3.33%. There was no decay in the WPI and SPI-WPI groups. After storage for more than 35 days, the decay index of the CK group exceeded 20%, and the mass loss rate reached 16.15%. These values were significantly higher than those of the treatment groups. Changes in the total soluble solid (TSS) value

引文格式:

余晓梅,刘艳,陈妍,等.可食性蛋白涂膜剂在“红美人”柑橘保鲜中的应用[J].现代食品科技,2025,41(2):175-182.

YU Xiaomei, LIU Yan, CHEN Yan, et al. Application of edible protein coating agents in the preservation of *Citrus reticulata* “Hong Mei Ren” [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 175-182.

收稿日期: 2024-01-08

作者简介: 余晓梅(1991-),女,硕士,工程师,研究方向:食品质量安全, E-mail: 18768177035@163.com

and titratable acid (TA) content in the treatment groups lagged behind those in the CK group by 1~2 weeks. After 14 days of storage, the TSS values in the treatment groups increased by 0.77%~1.70%, whereas the TSS value of the CK group no longer increased. After storage for 21 days, the TA content of the CK group reached a minimum of 6.29 g/L, whereas the TA values of the treatment groups were 8.48, 8.03, and 8.79 g/L, respectively, significantly higher than those in the CK group. Changes in the vitamin C, total phenolic, and flavonoid contents in the treatment groups were lower than those in the CK group. Scanning electron microscopy imaging revealed that the protein coating agents formed smooth and dense films on the fruit surface, covering the pores on the cuticle, and thereby enhancing gloss while slowing metabolism. The storage period of the *C. reticulata* variety “Hong Mei Ren” can be prolonged by protein coating agents to enhance the storage tolerance of the fruit. WPI and SPI show good preservation effects in early and late storage stages, respectively, whereas the performance of SPI-WPI was intermediate.

Key words: coating preservation; *Citrus reticulata* “Hong Mei Ren”; soy protein isolate; whey protein isolate

“红美人”柑橘果实紧，无浮皮，囊瓣壁极薄，果肉黄橙色，柔软多汁，果冻样食感成为其最鲜明特征，完熟后糖度达到 12° 以上，有柑橘“爱马仕”的美誉。然而，“红美人”柑橘皮薄多汁、果身柔软、糖分高的特点，也使其长时间储存成为难题。自然存放一周以上，易发生腐败变质，果皮软塌难剥；若采用低温保鲜容易发生冷害，口感较差。在柑橘类水果贮藏中，使用百可得、多菌灵、2,4-二氯苯氧乙酸等化学保鲜剂进行浸泡处理是目前采用最多的一类方法。虽然这类化学保鲜剂有较好的抑菌效果，但化学合成物质对人体健康有危害，甚至有致畸、致癌、致突影响^[1]。

可食性涂膜保鲜技术以天然可食性物质为主要原料，通过浸渍、喷洒、涂抹等方式在果实表面固化形成致密半透性膜，有效抑制果实水分蒸发、呼吸代谢和微生物生长繁殖，避免果实遭受外力损伤，达到保留果实营养物质和维持外观的作用，在水果保鲜中已有较多的研究报道^[2]。可食性膜包括多糖类膜、脂类膜和蛋白类膜等^[3]，早期对可食性材料的研究主要集中在多糖类膜上^[4]，多糖类膜大多亲水性强，成膜后的保湿性、抗菌性等存在缺陷，且膜机械性能不佳，强度和韧性不够^[5]，通过化学改性、物理共混等方式可改善膜性能^[6,7]，但一定程度增加了涂膜工艺的复杂程度^[8]。

随着对蛋白质研究的深入，发现蛋白膜的机械性能和阻气阻湿性能优于多糖膜^[9]，不仅具有良好的营养价值，还可抑制微生物生长^[10]。蛋白质类膜以动物蛋白和植物蛋白为主要原料，如大豆分离蛋白（Soy Protein Isolate, SPI）膜、乳清蛋白（Whey Protein Isolate, WPI）膜、小麦面筋蛋白膜、玉米醇溶蛋白膜等^[11,12]。作者对比羧甲基纤维素、海藻酸钠、玉米醇溶蛋白等多种多糖类和蛋白类涂膜剂，发现

SPI 和 WPI 涂膜剂具有配制方法简便、成膜速度快且连续性好、膜颜色透亮且不粘手等多种优势。研究表明，SPI 含 90% 以上蛋白质，有近 20 种氨基酸，营养价值高，具有良好的阻气阻水性、成膜性，可有效维持果实硬度，降低营养物质损失^[13]；WPI 溶液在 75~100 °C 加热变性，可形成高阻氧性、低透氧率、强度高等特点的乳清蛋白膜^[14,15]。2023 年 10 月，SPI 和 WPI 正式列入保健食品原料目录，证实 SPI 和 WPI 对人体不产生任何急性、亚急性或慢性危害。本文以“红美人”柑橘为研究对象，研究了 SPI 涂膜剂、WPI 涂膜剂和 SPI-WPI 复合涂膜剂对“红美人”柑橘贮藏品质的影响，以期获得简单高效、绿色安全、适用于“红美人”柑橘的可食性蛋白类涂膜剂，为此类柑橘保鲜提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

“红美人”柑橘，采自宁波象山鹤浦镇，果园采用大棚种植，占地规模 120 亩，种有“红美人”柑橘果树约 1 万株，亩产 1 500~2 000 kg。选择大小熟度均匀、表面光滑无损伤的果实，清水冲洗擦干后备用。

大豆分离蛋白粉，北京索莱宝科技有限公司；乳清蛋白粉，美国西尔玛配料有限公司；甘油，食品级，广州康本生物科技有限公司；谷氨酰胺转氨酶（Transglutaminase, TGase）食品级，泰兴市东圣生物科技有限公司；氢氧化钠（分析纯），昆山金城试剂有限公司。

HH-4 数显恒温水浴锅，国华电器有限公司；ME203 千分之一天平，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；UV-2600 紫外可见分光光度计，岛津仪

器有限公司; A650 全自动折光仪, 济南海能仪器股份有限公司; ME3002 电子天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; FE20 pH 计, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; Regulus 8230 型超高分辨冷场发射扫描电子显微镜, 日本日立公司。

1.2 实验方法

1.2.1 涂膜剂制备

预实验对比了壳聚糖、羧甲基纤维素、魔芋葡甘聚糖、海藻酸钠、玉米醇溶蛋白、SPI、WPI 等 7 种涂膜材料的配制条件、涂膜液起泡程度、成膜速度和表现, 在上述涂膜材料中, SPI 和 WPI 涂膜剂兼具配制方法简便易推广、涂膜液起泡程度低消泡快、成膜速度快且连续性好、膜颜色透亮不粘手等多种优势。根据预试验结果选择 SPI、WPI 为成膜材料, 并固定其在涂膜剂中的质量分数、增塑剂甘油的添加比例。

SPI 涂膜剂制备: 称取 2.5 g SPI、1.25 g 甘油, 与 100 g 纯水混合, 用氢氧化钠溶液调节 pH 值至 8~10, 于 80 °C 水浴加热 30 min, 40 °C 保存备用。

WPI 涂膜剂制备: 称取 4.0 g WPI, 与 100 g 纯水混合, 加入 TGase 于 50 °C 水浴反应 90 min, 煮至微沸灭活, 加入 2.0 g 甘油, 40 °C 保存备用^[3]。

SPI-WPI 复合涂膜剂制备: 将 SPI 涂膜液和 WPI 涂膜液以体积比 1:1 混合均匀, 40 °C 保存备用。

1.2.2 涂膜方法及分组

将“红美人”柑橘随机分成 4 组。取其中 3 组, 将柑橘分别浸泡于 SPI 涂膜剂、WPI 涂膜剂、SPI-WPI 复合涂膜剂 10~15 s 后取出, 于通风橱内晾干, 分别记为 SPI 组、WPI 组、SPI-WPI 组; 另取 1 组不作任何处理, 作为空白对照 (Control Check, CK) 组。各组在平均温度为 10 °C、相对湿度为 50%~70% 的自然条件下贮藏, 每 7 天测定相关指标。

1.2.3 贮藏品质指标测定

1.2.3.1 腐烂指数

参考文献方法^[16]并进行修改。腐烂级别分成 4 级: 0 级——无褐斑, 无皱褶, 无霉变; 1 级——褐斑、皱褶、霉变面积小于 1/10; 2 级——褐斑、皱褶、霉变面积介于 1/10~1/3 之间; 3 级——褐斑、皱褶、霉变面积大于 1/3。腐烂指数为各级别样品数量与腐烂级别的乘积之和, 占最高级别与样品总数量乘积的百分比。

1.2.3.2 失重率

果实在贮藏前称重得到 m_0 , 每隔一定时间称重得到 m_t , 根据式 (1) 计算失重率^[17]。

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

Δm ——失重率, %;

m_0 ——贮藏前果实质量, g;

m_t ——贮藏期间果实质量, g。

1.2.3.3 可溶性固形物 (Total Soluble Solid, TSS)

参考 NY/T 2637-2014 《水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法》, 果肉高速捣碎, 用双层擦镜纸过滤, 滴加 2~3 滴试液于折光仪棱镜表面, 在 (20±0.5) °C 环境温度下, 记录折射仪读数。

1.2.3.4 可滴定酸 (Titratable Acid, TA)

参考 GB 12456-2021 《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中的第一法酸碱指示剂滴定法进行测定。

1.2.3.5 抗坏血酸 (Vitamin C, Vc)

参考 GB 5009.86-2016 《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》中的第三法 2,6-二氯靛酚滴定法进行测定。

1.2.3.6 总酚及类黄酮

参考曹建康等^[18]的方法, 取 2.5 g 果肉组织, 加入预冷 $\varphi=1\%$ HCl-甲醇溶液, 在冰浴中研磨匀浆, 转移到 25 mL 比色管中, 定容至刻度, 混匀。4 °C 避光放置 20 min, 期间摇动 3 次, 收集滤液。 $\varphi=1\%$ HCl-甲醇溶液作参比溶液, 分别于波长 280 nm、325 nm 处测定溶液吸光值。

总酚含量以每克鲜重果肉组织在波长 280 nm 处吸光度值表示, 即 OD280/g FW; 类黄酮含量以每克鲜重果肉组织在波长 325 nm 处吸光度值表示量, 即 OD325/g FW。

1.2.3.7 扫描电镜观察

切下面积 2 cm×2 cm 果皮, 临界点干燥去除水分后对果皮表面喷金镀膜, 扫描电子显微镜观测果皮表面微观形貌, 加速电压为 10 kV。

1.3 数据处理

本研究采用 OriginPro 2022 软件和 SPSS 20.0 软件数据处理和作图, 选择单因素方差分析 (one-way ANOVA) 中的 Waller-Duncan 多重比较进行显著性分析, 当 $P < 0.05$ 时, 认为统计结果具有显著性。

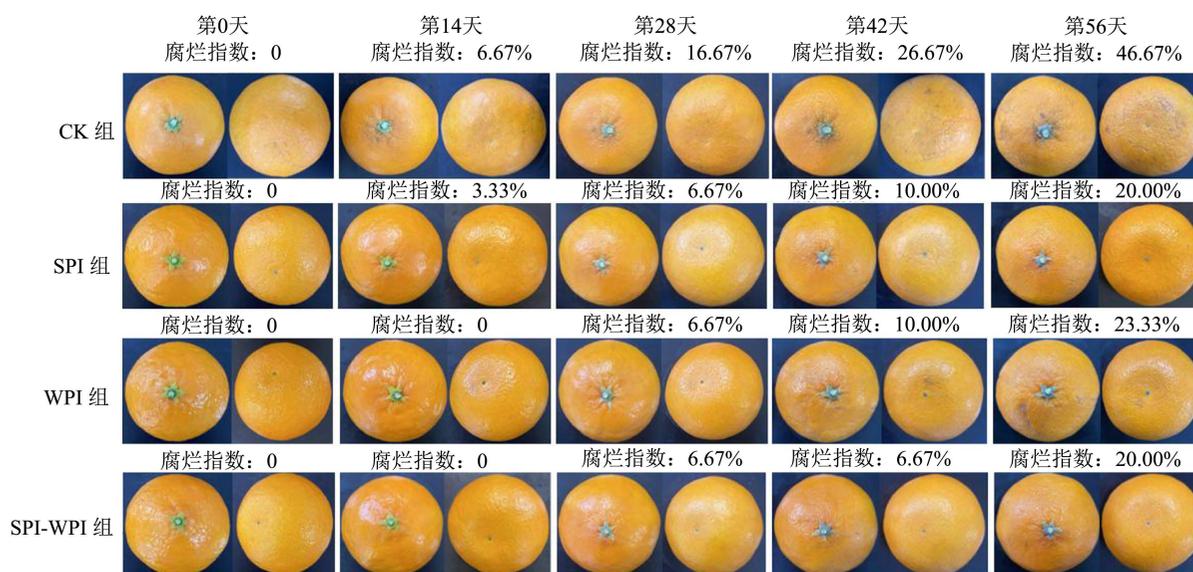


图1 贮藏期间“红美人”柑橘的外观变化

Fig.1 Appearance change of *Citrus reticulata* “Hong Mei Ren” during storage

2 结果与讨论

2.1 不同处理对“红美人”柑橘贮藏品质的影响

2.1.1 外观及腐烂指数变化

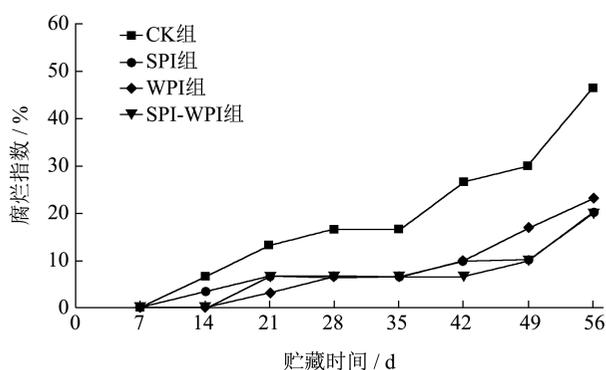


图2 贮藏期间“红美人”柑橘的腐烂指数变化

Fig.2 Changes of decay index of *Citrus reticulata* “Hong Mei Ren” during storage

柑橘采后易发生失水、霉菌感染或褐斑等现象,降低果实的贮藏性能和食用价值^[19]。由图1可见,“红美人”柑橘经过蛋白类涂膜剂处理后,果实更加明亮饱满,WPI组和SPI-WPI组的果皮光泽度较好,其次是SPI组,CK组光泽度最弱。贮藏14d,CK组果皮开始出现褐斑,果蒂发黄变形,果蒂周围失水皱缩;三组涂膜组外观无明显变化,果实仍饱满有光泽,果蒂完整翠绿。贮藏28d,CK组果皮失去光泽,果蒂进一步收缩;三组涂膜组除果蒂

变色外无明显变化。贮藏42d,CK组果皮失水皱裂,果皮暗淡布满褐点,果实弹性下降,不具有感官吸引力;SPI组和SPI-WPI组有细微褐点,WPI组出现局部褐斑,三组涂膜组果蒂周围均轻微皱缩,但果实仍具弹性。贮藏56d,SPI组和SPI-WPI组的外观品质优于WPI组。

图2与图1结果一致,贮藏14d,CK组的腐烂指数为6.66%,SPI组为3.33%,而WPI组和SPI-WPI组未发现腐烂现象。CK组贮藏21d腐烂指数超过10%(13.33%),贮藏35d以后腐烂速度加剧,第42天时腐烂指数为26.67%。SPI组14d出现轻微腐烂现象,WPI组和SPI-WPI组21d出现轻微腐烂现象,但在35d内总体变化不大,属于个别现象。贮藏42d后,三组涂膜组的腐烂速度加快,贮藏结束SPI组、WPI组和SPI-WPI组的腐烂指数依次为20.00%、23.33%、20.00%,而CK组高达46.67%。

由此可见,未做处理的“红美人”柑橘贮藏时间超过14d,就出现褐斑、果蒂变形、失水皱缩等品质劣化现象,贮藏超过35d,果实整体品质下降。三种涂膜剂均可提升“红美人”柑橘外观吸引力,可显著延缓腐烂速度。在贮藏初期WPI组光泽度佳,腐烂速度缓慢,但后期腐烂指数略高于SPI组,SPI-WPI组的涂膜后光泽度接近WPI组,腐烂速率介于WPI组和SPI组之间。

2.1.2 失重率

贮藏期间,在蒸腾作用下果实水分不断散失,

“红美人”柑橘的失重率逐渐上升。由图3可见,整个贮藏期间,CK组的失重率始终高于三组涂膜组,且在贮藏后期质量损失加剧。贮藏14 d,CK组、SPI组、WPI组和SPI-WPI组的失重率分别为5.37%、4.92%、4.66%和5.13%,CK组的失重率显著高于WPI组,而与SPI组和SPI-WPI组的差异不显著;贮藏42 d,SPI组、WPI组、SPI-WPI组的失重率分别为13.45%、13.57%、13.27%,而CK组的失重率达16.15%,显著高于三组涂膜组。谢建华等^[20]研究表明含有乳清蛋白的复合膜可显著降低琯溪蜜柚的失重率。除贮藏21 d,SPI-WPI组的失重率显著高于WPI组外,其他贮藏时间段三组涂膜组之间的并无显著性差异。

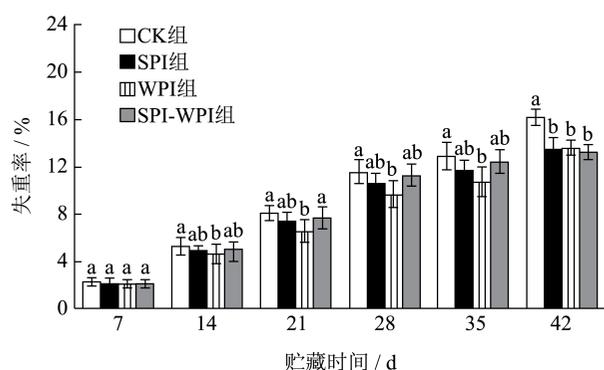


图3 贮藏期间“红美人”柑橘的失重率变化

Fig.3 Changes of weight loss rate of *Citrus reticulata* “Hong Mei Ren” during storage

注:图中不同字母表示不同处理组间差异显著($P < 0.05$)。下同。

可见,蛋白类涂膜剂可延缓“红美人”柑橘质量损失,WPI涂膜剂保水作用在贮藏初期就能体现,而SPI和SPI-WPI涂膜剂的保水效果相似,均在后期较为明显。果实失重程度与涂膜层本身的水蒸气透过率有关,推测WPI涂膜剂的水蒸气阻隔性前期略优于SPI涂膜剂,但随着贮藏时间的延长有所降低,后期三种涂膜剂差异不大。

2.1.3 TSS和TA

TSS与果实成熟度以及品质密切相关^[21],TSS含量高,能增加细胞的渗透压,从而增强保水力^[22]。从图4看,“红美人”柑橘的TSS呈先上升后下降趋势,随着贮藏时间的进一步增加,TSS值略微回升。这与多项研究结果趋势一致^[23-25],原因在于贮藏前期糖类增加量大于呼吸作用的消耗量,可溶性糖积累引起TSS值上升;贮藏中期呼吸作用消耗大于糖类合成,造成TSS含量下降;贮藏后期,

果实水分散失导致干物质含量上升,使得TSS再次上升。具体来看,贮藏7 d,CK组的TSS值上升较快,为16.50%,显著高于SPI组和SPI-WPI组,WPI组的TSS值与其他三组差异均不显著。贮藏14 d,CK组的TSS值为16.60%,不再明显上升,而SPI组、WPI组和SPI-WPI组的TSS值相较于第7天,分别上升1.13%、0.77%、1.70%,呈现明显上升趋势。贮藏21 d,CK组的TSS值仅为13.87%,显著低于三组涂膜组,且低于初始水平(14.43%),随后在质量损失影响下逐步回升,三组涂膜组的回升时间则明显晚于CK组。可见,三组涂膜组的TSS值波动趋势相对于CK组至少延迟一周以上,涂膜剂的处理抑制了果实的呼吸作用,降低了可溶性糖的消耗速率^[26]。

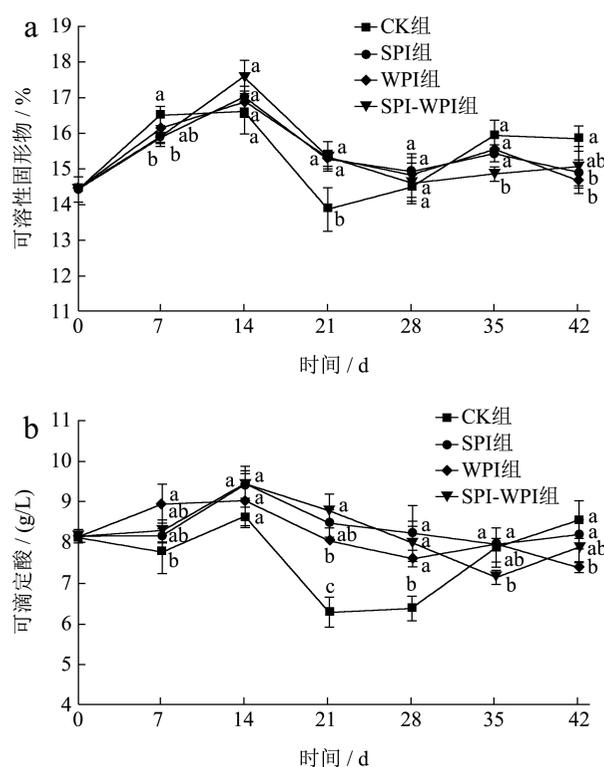


图4 贮藏期间“红美人”柑橘的TSS和TA变化

Fig.4 Changes of TSS and TA of *Citrus reticulata* “Hong Mei Ren” during storage

TA反映了果实中有机酸的含量,有机酸是呼吸代谢的底物,转化为糖分供细胞代谢^[27],也是柑橘风味的来源之一,一般随着果实的成熟与衰老其含量逐渐下降^[28]。如图4所示,“红美人”柑橘的TA含量在贮藏期间略微上升后下降,后期变化趋于缓慢,于辉等^[29]研究的砂糖橘TA含量变化也呈现先增加后减少的趋势。贮藏初期,糖类物质有氧化分解积累有机酸,TA值上升,随着果实内部氧

含量降低,糖类物质限于糖酵解途径,有机酸进一步转化降解,TA值下降。贮藏7 d,CK组TA含量为7.78 g/L,显著低于WPI组(8.96 g/L),与SPI组(8.17 g/L)和SPI-WPI组(8.29 g/L)差异不显著。贮藏21 d,CK组的TA含量达到低值6.29 g/L,下降了20%以上,说明CK组果肉中柠檬酸等风味物质损失明显,口感风味变差,而同一时期的SPI组、WPI组和SPI-WPI组的TA值分别为8.48、8.03、8.79 g/L,显著高于CK组。由于水分散失加剧,CK组的TA含量在低水平保持1周后又回升。SPI组和SPI-WPI组TA值整体无显著性差异,变化曲线相似,在第14天明显上升后缓慢回落;WPI组7~14 d略微上升后逐渐下降,变化也较为平缓。SPI组、WPI组、SPI-WPI组的TA含量变化幅度总体上小于CK组,TA含量下降回升过程明显滞后于CK组两周以上,且低值依次为7.95、7.39、7.16 g/L,均高于CK组,可见蛋白涂膜剂处理有助于较少有机酸类物质损失,保持“红美人”柑橘风味的稳定。

2.1.4 Vc

如图5所示,各组“红美人”柑橘的Vc含量均为先升后降的波动变化。三组涂膜组的Vc含量相对于对照组变化幅度更小,但差异并不显著。可能由于果实中Vc含量在生长过程中就存在较大的个体差异,贮藏期间受光照、温度、水分损失等多种因素影响,果实代谢作用不断变化,导致其Vc含量不稳定。

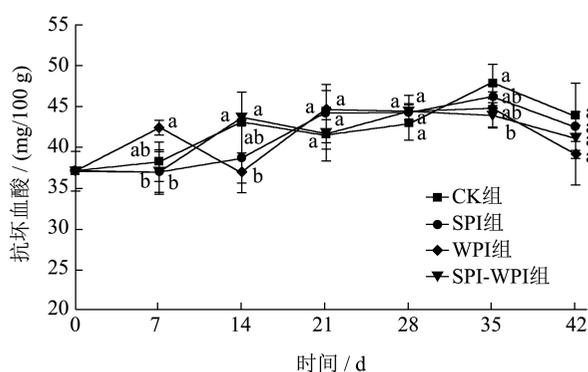


图5 贮藏期间“红美人”柑橘的Vc含量变化

Fig.5 Changes of Vc content of *Citrus reticulata* “Hong Mei Ren” during storage

2.1.5 总酚及类黄酮

柑橘组织中酚类物质、类黄酮等植物次生代谢产物与果实的色泽发育、品质和风味形成、成熟衰老过程、组织褐变等作用密切相关^[30]。从图6看,

四组果肉总酚和类黄酮含量变化趋势相似,呈先上升后下降的趋势。CK组第7天的总酚和类黄酮含量为(1.18、0.75),上升速度快于三组涂膜组,贮藏14~21 d,CK组的总酚和类黄酮含量上升速度放缓;贮藏28 d后,四组果肉总酚和类黄酮含量开始下降,此时,CK组的总酚和类黄酮含量再次高于涂膜组。贮藏前期,CK组果肉中有机酸转化降解较快,小分子醇、醛、酮类物质增加,而三组涂膜组由于气体交换、水分蒸发等活动被抑制,总酚和类黄酮含量上升较CK组缓慢;贮藏中期CK组因各类物质消耗导致代谢放缓;后期在水分蒸发导致的质量损失影响下,CK组的总酚和类黄酮含量要高于三组涂膜组。可见,蛋白类涂膜剂处理使得三组涂膜组代谢水平幅度更小,可以较为稳定的维持总酚和类黄酮含量。贮藏7 d,WPI组的总酚和类黄酮含量为(1.10、0.71),上升速度略高于SPI组(1.00、0.65)和SPI-WPI组(0.95、0.64);贮藏14~28 d,三组差异不显著。贮藏35 d,SPI组的总酚和类黄酮含量为(1.55、0.93),与WPI组(1.44、0.85)和SPI-WPI(1.41、0.81)组有显著差异。可见SPI-WPI组的值前期与SPI组相似,后期则与WPI组接近。

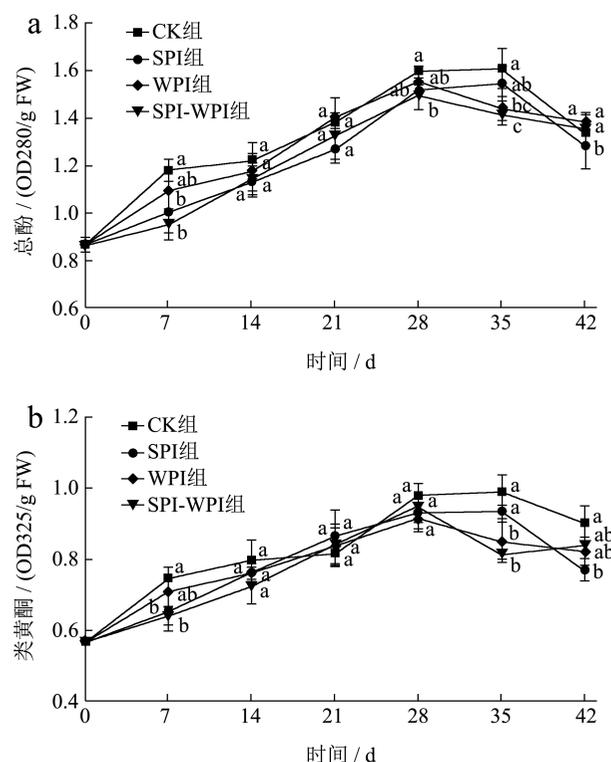


图6 贮藏期间“红美人”柑橘的总酚和类黄酮变化

Fig.6 Changes of total phenolics and flavonoid content of *Citrus reticulata* “Hong Mei Ren” during storage

2.2 不同处理对“红美人”柑橘果皮表面微观形貌的影响

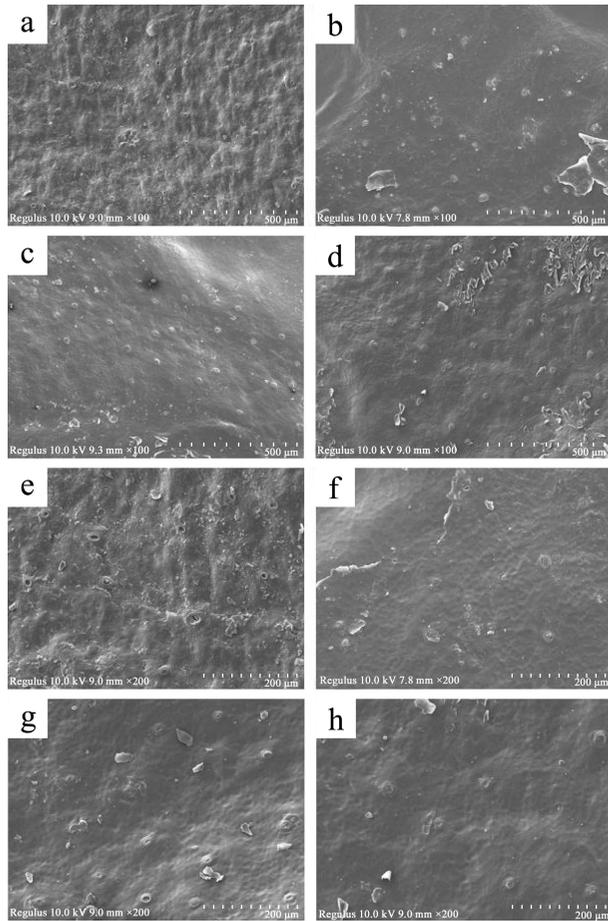


图7 第0天“红美人”柑橘果皮表面微观形貌

Fig.7 Microscopic morphology of the surface of *Citrus reticulata* “Hong Mei Ren” peels on 0 day

注: a~d 依次为 CK 组、SPI 组、WPI 组、SPI-WPI 组放大 100 倍的微观形貌, e~h 依次为 CK 组、SPI 组、WPI 组、SPI-WPI 组放大 200 倍的微观形貌。

柑橘表皮的角质层作为一层天然屏障, 由角质和蜡质组成, 可阻碍果实水分流失、保持表面洁净, 从而抵御微生物入侵、调节果实内部环境, 其上分布气孔, 是果实与外界环境进行气体交换的途径^[31-33]。李保祥等^[34]研究表明涂膜处理可在蜡质层表面形成保护膜, 使果实表面微米级的圆形气孔被聚合物覆盖。从图 7 看, 经过三种蛋白涂膜剂处理后, 柑橘表皮粗糙度明显下降, 表现在表皮相对光滑紧实、光泽度显著提升; 果皮角质层表面形成光滑致密的蛋白膜, 既降低表皮透水透气性, 又避免角质层破坏, 可有效防止非气孔性水分损失、延缓果实衰老软化、保护果实免受病原菌感染^[34], 从而保持果实的硬度和色泽。CK 组气孔口明显可见, 表明果

实与外界环境进行气体交换以及果实蒸腾作用未被抑制, 微生物容易通过裸露的气孔侵入。而三组涂膜组的气孔基本被蛋白膜所覆盖, 总体呈现封闭状态, 形成低 O₂ 含量、低透水性的环境, 抑制了果实呼吸作用和蒸腾作用, 防止病原菌直接穿透气孔感染果实, 提高屏障作用及保护作用。从气孔凸起程度看, 蛋白膜厚度依次为: SPI 组>SPI-WPI 组>WPI 组, 蛋白膜厚度增加, 可以增加膜的稳定性, 但膜的透亮程度下降, 这与外观变化、腐烂指数等结果一致。

3 结论

本实验采用 SPI 涂膜剂、WPI 涂膜剂和 SPI-WPI 复合涂膜剂分别处理“红美人”柑橘。经过蛋白类涂膜剂处理的柑橘果实更加明亮饱满, 果蒂发黄变形、果皮失水皱缩和褐斑等劣化现象被明显抑制。贮藏期间三组涂膜组的腐烂指数、失重率始终低于 CK 组, 贮藏时间超过 35 d, CK 组腐烂指数超过 20%, 失重率达 16.15%, 显著高于三组涂膜组。三组涂膜组的 TSS 值、TA 含量的下降回升过程明显滞后于 CK 组, 且低值均高于 CK 组; 总酚和类黄酮含量的上升速度缓于 CK 组, 后期变化幅度也较小; Vc 含量相对于 CK 组变化幅度更小, 但差异并不显著。结合各项指标, 蛋白涂膜剂处理使得“红美人”柑橘贮藏周期延长 1~2 周, 提高了果实的耐贮性。在贮藏前期, WPI 组光泽度佳, 表现出较好的保水、减少腐烂和风味物质损失等效果; 而贮藏后期, WPI 组的褐变程度较大, SPI 组更能稳定的维持果实外观品质、减缓风味物质的变化, SPI-WPI 组则介于两者之间。

结合微观形貌, 蛋白类涂膜剂处理使柑橘表面形成光滑致密的蛋白膜, 表皮粗糙度明显下降, 从而提升光泽度; 角质层上的气孔被蛋白膜所覆盖, 呈现封闭状态, 降低表皮透水透气性, 一方面可防止病原菌入侵, 保持果实的硬度和色泽, 另一方面放缓代谢水平, 降低失重率、腐烂指数, 减缓可溶性固形物、可滴定酸、总酚等含量变化, 使“红美人”柑橘品质更加稳定。三种涂膜剂的保鲜效果有细微差异, 可能与涂膜剂的成膜厚度和膜特性有关, 需进一步对比研究, 应用时可根据“红美人”柑橘的贮藏期限选择合适的涂膜剂。目前, 柑橘涂膜保鲜的研究集中在壳聚糖、羧甲基纤维素、海藻酸钠等多糖类涂膜保鲜剂, 本研究为蛋白类涂膜剂在柑橘保鲜中的应用及推广提供了科学依据。

参考文献

- [1] 金永学,冯建国,郑淘,等.蓝莓的功能成分、保健作用及其开发利用[J].食品与机械,2020,36(5):231-236.
- [2] 陈智慧,陈健晴,刘香香,等.多糖类、蛋白类及其复合涂膜在采后浆果保鲜中应用研究进展[J].保鲜与加工,2022,22(3):97-103.
- [3] 王莹,刘晶晶,张飞飞,等.乳清蛋白成膜条件及其应用[J].中国食品学报,2021,21(1):172-179.
- [4] 戚英伟,王玲,陈飞平,等.可食性涂膜性能及其水果保鲜应用研究进展[J].保鲜与加工,2022,22(1):110-120.
- [5] WANG H, GONG X, MIAO Y, et al. Preparation and characterization of multilayer films composed of chitosan, sodium alginate and carboxymethyl chitosan-ZnO nanoparticles [J]. Food Chemistry, 2019, 283: 397-403.
- [6] NOORBAKSH-SOLTANI S M, ZERAFAT M M, SABBAGHI S. A comparative study of gelatin and starch-based nano-composite films modified by nano-cellulose and chitosan for food packaging applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 189: 48-55.
- [7] WU K, ZHU Q, QIAN H, et al. Controllable hydrophilicity-hydrophobicity and related properties of konjac glucomannan and ethyl cellulose composite films [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79(7): 301-309.
- [8] 范振梅,宋贤良,陈晓维,等.不同保鲜方式下鲜切菠萝蜜的品质比较[J].现代食品科技,2023,39(6):93-100.
- [9] 敖利刚,吴磊燕,赖富饶.植物蛋白膜的应用及研究进展[J].现代食品科技,2007,23(8):86-89.
- [10] LAN C H, GRÉGOIRE L, CHAINE A, et al. Importance and efficiency of in-depth antimicrobial activity for the control of listeria development with nisin-incorporated sodium caseinate films [J]. Food Control, 2010, 21(9): 1227-1233.
- [11] 张金凤,王艳文,范恒军,等.玉米胚芽粕制备蛋白膜工艺优化及抗氧化研究[J].食品与机械,2022,38(5):94-100.
- [12] 杨坤.可食性乳清蛋白膜工艺及复合膜抑菌性研究[D].洛阳:河南科技大学,2009:1-3.
- [13] ALVES M M, GONALVES M P, ROCHA C M R. Effect of ferulic acid on the performance of soy protein isolate-based edible coatings applied to fresh-cut apples [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 80: 409-415.
- [14] PEREIRA R C, CARNEIRO J D D S, BORGES S V, et al. Preparation and characterization of nanocomposites from whey protein concentrate activated with lycopene [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(3): 637-642.
- [15] ZHANG J H, JIANG L, YANG J, et al. Effect of calcium chloride on heat-induced *Mesona chinensis* polysaccharide-whey protein isolation gels: Gel properties and interactions [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 155: 112907.
- [16] 陈超,庞林江.壳聚糖-植酸复合涂膜对黄岩蜜橘保鲜效果的影响[J].包装工程,2020,41(9):36-43.
- [17] 秦海容,徐丹,刘琴.壳聚糖复合涂膜的微观形貌变化及其对红桔的保鲜效果[J].食品与发酵工业,2018,44(2): 233-239.
- [18] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [19] DING Y, CHANG J, MA Q, et al. Network analysis of postharvest senescence process in citrus fruits revealed by transcriptomic and metabolomic profiling [J]. Plant Physiology, 2015, 168(1): 357-376.
- [20] 谢建华,谢丙清,郭巧玲,等.魔芋葡甘聚糖-乳清蛋白复合膜在琯溪蜜柚中的应用[J].食品科学技术学报,2017, 35(1):76-81.
- [21] 张旭,张天罡,穆维松,等.基于Vis/NIR光谱技术的酿酒葡萄成熟期间SSC预测研究[J].光谱学与光谱分析,2021, 41(1):229-235.
- [22] 那广宁,高聪聪,纪海鹏,等.保鲜剂不同组合对无核白葡萄贮藏保鲜的影响[J].包装工程,2020,41(1):11-16.
- [23] 彭旋,万春鹏,陈楚英,等.白薇提取液复合涂膜对脐橙冷藏保鲜的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2017,43(1):26-30.
- [24] PETRICCIONE M, SANCTIS F D, PASQUARIELLO M S, et al. The effect of chitosan coating on the quality and nutraceutical traits of sweet cherry during postharvest life [J]. Food Bioprocess Technology, 2015, 8(2): 394-408.
- [25] 张伟清,林媚,王天玉等.柠檬精油复合涂膜对椪柑采后品质的影响[J].核农学报,2020,34(12):2725-2733.
- [26] 余易琳,徐丹,任丹,等.纳米纤维素/壳聚糖复合涂膜在红桔保鲜中的应用[J].食品与发酵工业,2020,46(2):135-141.
- [27] 贺红宇,曾晓丹,王自鹏,等.肉桂精油处理对圣女果常温保鲜效果的影响[J].保鲜与加工,2017,17(3):11-15.
- [28] 张晶琳,王永江,刘海东,等.壳聚糖/CMC复合涂膜处理对柑橘果实采后品质的影响[J].现代食品科技,2019, 35(10):50-57.
- [29] 于辉,陈海光,梁艳婷.涂膜保鲜对沙糖橘贮藏品质的影响[J].安徽农业科学,2010,38(22):12002-12004.
- [30] AMODIO M L, DEROSI A, COLELLI G. Modeling phenolic content during storage of cut fruit and vegetables: A consecutive reaction mechanism [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 142: 1-8.
- [31] 杨绿竹,王馨雨,王蓉蓉,等.柑橘果皮角质层及其对采后贮藏保鲜影响的研究进展[J].食品科学,2020,41(7):234-244.
- [32] RYDER L S, TALBOT N J. Regulation of appressorium development in pathogenic fungi [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2015, 26: 8-13.
- [33] ARAGÓN W, REINA-PINTO J J, SERRANO M. The intimate talk between plants and microorganisms at the leaf surface [J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(19): 5339-5350.
- [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.