

氧化白藜芦醇处理对黄皮果实贮藏特性和采后品质的影响

林育钊¹, 冯梦隼¹, 陈洪彬^{1,3*}, 蒋璇靓¹, 郑金水², 吴锦雯¹

1. 泉州师范学院海洋与食品学院, 福建泉州 362000; 2. 泉州市农业科学研究所, 福建泉州 362212; 3. 近海资源生物技术福建省高校重点实验室(泉州师范学院), 福建泉州 362000

摘要: 黄皮[*Clausena lansium* (Lour.) Skeels]属于芸香科, 原产于我国华南地区, 内含大量生物活性物质, 有利于人体健康。然而, 黄皮果实因其果皮较薄、果肉较软, 易受到机械损伤或发生果实腐烂、果皮褐变、贮藏特性丧失等症状, 最终降低了果实采后商品价值及食用价值。因此, 有必要开发一种安全、环境友好的采后保鲜技术, 以提升黄皮果实贮藏特性及其采后品质, 从而延长果实保鲜期。氧化白藜芦醇(OXY)是一种天然活性产物, 具有抗褐变、抗氧化、抗菌、抗炎、抗病毒等功效。有研究表明, OXY在药用保健领域研究较多而在食品保鲜中研究较少。目前尚无关于外源OXY处理提高黄皮果实贮藏特性与采后品质的研究报道。因此, 为探究外源OXY处理对黄皮果实采后保鲜效应的影响, 以鸡心黄皮果实为试材, 分别采用0.2 g/L OXY溶液与蒸馏水(CK)浸泡处理黄皮果实30 min, 随后取出果实晾干并装袋(每袋装50颗果实), 置于相对湿度为85%、温度为(25±1)℃的条件下贮藏10 d, 每2 d取样观察, 测定黄皮果实的贮藏特性与采后品质相关指标的变化。结果表明: 与CK相比, OXY处理能减缓采后黄皮果实的果皮细胞膜透性、褐变度和褐变指数的上升趋势, 维持较高水平的果实商品率与较低水平的果实失重率。另外, OXY处理能维持采后黄皮果实较高的果皮 L^* 值、色调角 h 值和较高的果皮总酚含量, 而降低果皮过氧化物酶和多酚氧化酶等酚酶活性。此外, OXY处理也可维持采后黄皮果实较高的果肉可溶性固形物、维生素C、可滴定酸、蔗糖与可溶性总糖含量。因此, 外源OXY处理能有效提高黄皮果实的采后贮藏特性, 稳定果实果皮的外观品质与果肉营养品质, 进而延长黄皮果实的采后保鲜期。

关键词: 黄皮果实; 氧化白藜芦醇; 贮藏特性; 采后品质

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

Effects of Oxyresveratrol Treatment on the Storage Behavior and Postharvest Quality of Wampee Fruit

LIN Yuzhao¹, FENG Mengfei¹, CHEN Hongbin^{1,3*}, JIANG Xuanjing¹, ZHENG Jinshui², WU Jinwen¹

1. College of Oceanology and Food Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China; 2. Quanzhou Institute of Agricultural Sciences, Quanzhou, Fujian 362212, China; 3. Key Laboratory of Inshore Resources Biotechnology (Quanzhou Normal University), Fujian Province University, Quanzhou, Fujian 362000, China

Abstract: Wampee [*Clausena lansium* (Lour.) Skeels] is a species of Rutaceae family and native to Southern China, which contains a large number of bioactive compounds that are beneficial to human health. However, because of the thin pericarp and soft pulp, wampee fruit is susceptible to the mechanical damage and the quality deterioration symptoms of fruit rot, pericarp browning and storage characteristic loss, and thus reducing the commercial value and edible value of harvested wampee fruit. Therefore, it is necessary to develop a safe and environmentally friendly postharvest storage technology for enhancing the storage behavior and quality, and prolonging storage time of harvested wampee fruit. Oxyresveratrol (OXY) is a naturally active product, with the efficacies of anti-browning, anti-oxidation, antibacterial,

收稿日期 2022-12-01; 修回日期 2023-03-25

基金项目 2022年度福建省中青年教育科研项目(No. JAT220265); 福建省自然科学基金面上项目(No. 2023J01902, No. 2021J01976)。

作者简介 林育钊(1992—), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 果蔬采后生物学与保鲜技术。*通信作者(Corresponding author), 陈洪彬(CHEN Hongbin), E-mail: yummyway@qq.com。

anti-inflammatory and antiviral. OXY has been studied more in the field of medicinal health care, but less in the field of food preservation. However, there are no reports on increasing the storage behavior and postharvest quality of wampee fruit by the usage of exogenous OXY. The study was aimed to study the effects of exogenous OXY treatment on the preservation of harvested wampee fruit. The fruit of wampee cv. Jixin was used as the experiment material, and the wampee fruit was treated by OXY solution with concentration of 0.2 g/L and distilled water (CK) for 30 min, separately. Then, the fruit was air-dried and packaged (50 fruits per bag), and stored at relative humidity 85% and temperature $(25\pm1)^{\circ}\text{C}$ for 10 days. The changes of related indices of the storage behavior and postharvest quality in wampee fruit were observed and measured every two days. Compared to CK, OXY treatment could delay the increments of pericarp cell membrane permeability, browning degree and browning index, and maintain a higher commercially acceptable fruit rate but a lower weight loss percentage of harvested wampee fruit. Furthermore, OXY treatment might keep the higher values of L^* and hue angle, a higher total phenolics content, but the lower activities of phenolases such as peroxidase and polyphenol oxidase in pericarp of harvested wampee fruit. Moreover, OXY treatment could retain the higher contents of total soluble solids, vitamin C, titratable acidity, sucrose and total soluble sugar in pulp of harvested wampee fruit. Therefore, the treatment of exogenous OXY could effectively enhance the storage behavior, and retain the pericarp appearance quality and pulp nutritional quality, and thus prolong the storage time in harvested wampee fruit.

Keywords: wampee fruit; oxyresveratrol; storage behavior; postharvest quality

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.04.016

黄皮 [*Clausena lansium* (Lour.) Skeels] 属于芸香科黄皮属的常绿果树, 原产于我国的华南地区^[1-4]。黄皮具有果大、果皮薄、果肉厚、果汁多、口感酸甜、风味独特、富含生物活性物质等特点^[1-2], 还具有降血糖、消痰化气、抗氧化、润肺止咳等功效^[3-5], 因而深受消费者的喜爱。然而, 黄皮果实由于果皮较薄、果肉质较软, 易受到机械损伤或发生腐烂, 进而加速果实采后发生果皮褐变、品质劣变与贮藏特性丧失等症状, 一般采后 2~3 d 便失去其商品价值^[1, 3-4]。这些限制因素不利于黄皮果实采后品质保持和远距离运销, 也不利于黄皮产业的健康可持续发展。有研究报道, 采用程序降温^[4]、低温^[5]或施保功化学杀菌剂^[6]等措施, 能稳定黄皮果实的采后品质。然而, 这些采后处理方法存在运用成本较高或存在化学残留而危害人体健康、危害环境等问题, 因而不适于在黄皮果实采后保鲜的实际运用中进行广泛推广使用。因此, 寻找一种安全、环境友好的采后保鲜技术, 将有利于增强黄皮果实采后品质及其贮藏特性, 延长果实保鲜期。

氧化白藜芦醇 (OXY) 作为反式二苯乙烯类的天然产物白藜芦醇的 2'-羟基化衍生物, 是一种重要的天然活性产物^[7-8]。在自然界中, OXY 广泛存在于多种植物中, 并且在桑科植物中最为普遍, 也存在于一些百合科、蔷薇科、禾本科、买麻藤科及豆科等植物中^[9]。另外, OXY 具有抗褐变、抗氧化、抗菌、抗炎、抗病毒等功效^[7, 9-10]。由于这些良好的医疗保健功效, OXY 在药用保健

领域的研究及应用较多, 然而在食品保鲜的研究与应用较少^[10]。如外源 OXY 处理能减缓鲜切马铃薯片^[7]、鲜切苹果^[8]等褐变的发生, 提高其品质水平。然而, 目前未见关于外源 OXY 处理提高黄皮果实贮藏特性与采后品质的研究报道。因此, 本研究以福建省特色的鸡心黄皮果实作为试材, 研究外源 OXY 处理对黄皮果皮细胞膜透性、褐变指数和褐变度、果实失重率与商品率, 果皮过氧化物酶 (POD) 及多酚氧化酶 (PPO) 等酚酶活性、总酚含量、色调角 h 值和色差 L^* 值, 果肉维生素 C、可溶性固形物 (TSS)、可溶性总糖、可滴定酸 (TA) 与蔗糖含量等的变化, 进而阐明外源 OXY 处理对黄皮果实采后贮藏特性、果皮外观品质与果肉营养品质等的影响, 旨在为提高黄皮果实的采后贮藏品质及延长果实的贮藏期提供理论依据与指导。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料: 鸡心黄皮 [*Clausena lansium* (Lour.) Skeels cv. Jixin] 果实采自福建省永春县岵山镇果园, 果实成熟度约九成熟。黄皮在采收之后, 于当天运至实验室 (泉州), 挑选色泽一致、大小均一、无损伤、健康的果实。

试剂: 氧化白藜芦醇 (OXY), 购自杭州瑞树生化有限公司; 本研究涉及测定果实贮藏特性和采后品质指标的常用化学试剂 (化学纯) 均购自国药集团化学试剂有限公司。

仪器与设备: CR400 色差仪, 日本柯尼卡公司; PRX-450A 型智能人工气候箱, 浙江宁波赛福实验仪器有限公司; S230 电导率仪、ME204 电子天平、ET18 自动电位滴定仪, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; PAL-1 型手持糖度计, 日本株式会社爱宕公司; M200 Pro Infinite 酶标仪, 瑞士帝肯公司; GL-20G-II 型高速冷冻离心机, 上海安亭科学仪器厂。

1.2 方法

1.2.1 果实采后处理 预试验: 将黄皮果实平均分为 5 组(每组设置 3 个重复), 分别浸泡在浓度为 0 (CK)、0.1、0.2、0.3 g/L OXY 溶液中 30 min, 随后取出晾干并装袋, 每袋装果 50 个, 在 $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度为 85% 下进行贮藏, 每 2 d 取样测定果皮褐变指数和褐变度。结果发现, 在贮藏 10 d 时, 0 (CK)、0.1、0.2、0.3 g/L OXY 不同处理组的果皮褐变指数分别为 0.957、0.921、0.831、0.884, 褐变度分别为 0.921、0.913、0.811、0.854。由此可知, 0.2 g/L OXY 能保持采后黄皮果实最低的果皮褐变指数与褐变度, 进而保持较好的果实采后品质。因此, 采用浓度为 0.2 g/L OXY 溶液进行后续研究。

在获得最佳的 OXY 处理浓度的基础上, 将黄皮果实分为 2 组(每组 3 个重复):(1)对照(CK), 在蒸馏水中浸泡 30 min;(2)OXY 处理, 在 0.2 g/L OXY 溶液中浸泡 30 min。然后取出晾干、装袋(50 个/袋), 置于 $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度为 85% 条件下贮藏, 每 2 d 取样观察, 并测定相关指标。

1.2.2 相关指标测定 (1) 果皮细胞膜透性。取 10 个黄皮果实, 用打孔器(直径为 5 mm)取出赤道面果皮圆片 20 个, 参照 LIN 等^[11]和 JIANG 等^[12]的方法测定果皮的细胞膜透性(%)。

(2) 果皮褐变指数和褐变度。取 1 袋黄皮果实(50 个), 参照 JIANG 等^[12]和 LIN 等^[13]的方法评价果皮褐变指数。从 10 个黄皮果实中取出 2 g 果皮, 参照 LIN 等^[13]和孔祥佳等^[14]的方法测定果实褐变度, 结果以 450 nm 波长的吸光值 (OD_{450}) 表示。

(3) 果实商品率和失重率。取出 1 袋黄皮果实(50 个), 参照 LIN 等^[11]和郭欣等^[15]的方法测定商品率(%)。参照 LIN 等^[11]的方法测定失重率(%)。

(4) 果皮色差 L^* 值和色调角 h 值。挑选 10 个黄皮果实, 参照曾玲珍等^[16]和王慧等^[17]的方

法, 使用 CR400 色差仪对果皮赤道面上的相对 4 个部位测定 L^* 值及 h 值($^{\circ}$)。

(5) 果皮总酚含量。从 10 个黄皮果实中取出 0.5 g 果皮, 参照 LIN 等^[18]的方法测定果皮总酚含量, 结果以没食子酸(GA)当量表示(g/kg)。

(6) 果皮过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性。从 10 个黄皮果实中取出 2 g 果皮, 参照郭欣等^[19]的方法测定果皮 POD 活性(U/mg); 参照郭欣等^[19]和 CHEN 等^[20]的方法测定果皮 PPO 活性(U/mg)。

(7) 果皮蛋白质含量。参照 BRADFORD^[21]的方法进行测定, 用牛血清白蛋白作标准曲线。

(8) 果肉品质特性。取 10 个黄皮果肉, 参照 LIN 等^[11]的方法, 用 PAL-1 型手持糖度计测定果肉可溶性固形物(TSS)含量(%)。从 10 个黄皮果实中取 5 g 果肉, 参照 LIN 等^[11]和 JIANG 等^[12]的方法进行预处理, 之后采用 ET18 型自动电位滴定仪测定可滴定酸(TA)含量(%)。从 10 个黄皮果实中取果肉 1 g, 参照 LIN 等^[11]和 JIANG 等^[12]的方法测定果肉维生素 C 含量(g/kg)。挑选 10 个黄皮果实, 取出果肉 2 g, 参照 LIN 等^[11]的方法测定果肉可溶性总糖(g/kg)和蔗糖含量(g/kg)。

1.3 数据处理

在本研究中, 除测定 TSS 含量设置 10 次重复外, 其余指标均设置 3 次重复。使用 Microsoft Excel 2016 软件制图; 利用 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析。

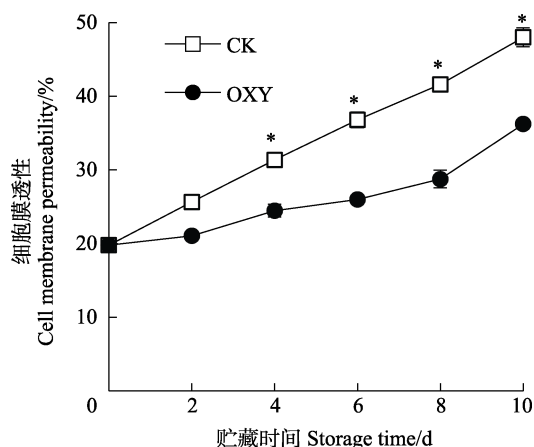
2 结果与分析

2.1 果皮细胞膜透性的变化

细胞膜透性主要用于评价果实细胞膜的损伤水平, 也是衡量果实耐贮性的一个重要指标^[11-12]。由图 1 可知, CK 和 OXY 处理组的黄皮果实果皮细胞膜透性均呈快速上升趋势。进一步比较发现, 与 CK 相比, OXY 处理组具有较低水平的果皮细胞膜透性, 并在贮藏 4~10 d 达到显著水平($P < 0.05$)。在贮藏第 10 天时, OXY 处理组的果皮细胞膜透性仅为 CK 的 75.46%。因此, OXY 处理能减缓黄皮果实采后果皮细胞膜透性的升高, 维持较好细胞膜的完整性。

2.2 果皮褐变指数和褐变度的变化

褐变指数和褐变度是评价果实褐变程度的重

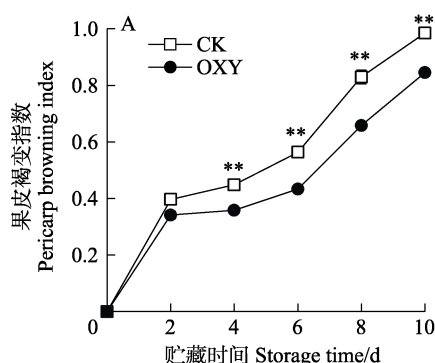


*表示差异显著 ($P<0.05$)。
* indicates significant difference ($P<0.05$).

图1 外源 OXY 处理对采后黄皮果实果皮细胞膜透性的影响

Fig. 1 Effects of exogenous OXY treatment on cell membrane permeability in pericarp of harvested wampee fruit

要指标^[13]。如图 2A 所示,在贮藏 0~10 d, CK 和 OXY 处理组的果皮褐变指数迅速上升,并且 OXY 处理组的果皮褐变指数均低于 CK,在贮藏 4~10 d 极显著 ($P<0.01$) 低于 CK,在贮藏第 10 天时, OXY 处理组的果皮褐变指数为 CK 的 85.79%。



*表示差异显著 ($P<0.05$); **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

* indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图2 外源 OXY 处理对采后黄皮果实果皮褐变指数 (A) 和褐变度 (B) 的影响

Fig. 2 Effects of exogenous OXY treatment on browning index (A) and browning degree (B) in pericarp of harvested wampee fruit

果实在贮藏期间常因蒸腾作用失去水分,导致果实重量减轻而降低了果实的商品价值^[11, 15]。如图 3B 所示, CK 与 OXY 处理组的果实失重率在贮藏 0~10 d 均快速上升。进一步分析可知,在贮藏 0~10 d, OXY 处理组的失重率均低于 CK,并且在贮藏第 6、10 天呈显著水平 ($P<0.05$),在贮藏第 8 天呈极显著水平 ($P<0.01$)。在贮藏第 10 天时, OXY 处理组的失重率仅为 CK 的 85.42%。

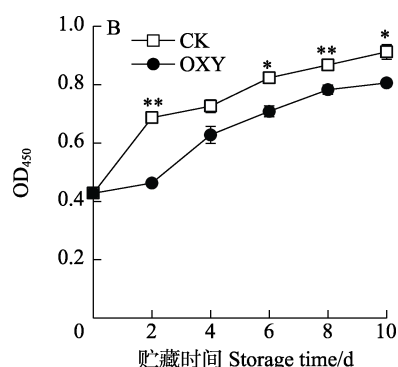
因此, OXY 处理可以减缓采后黄皮果实商品

由图 2B 可知,在贮藏 0~10 d, CK 和 OXY 处理组的黄皮果实果皮褐变度均快速上升。进一步分析可知,与 CK 对比, OXY 处理组的果皮褐变度在贮藏期均具有较低水平,并在贮藏第 2、8 天极显著低于 CK ($P<0.01$),在贮藏第 6、10 天显著低于 CK ($P<0.05$)。在贮藏第 10 天时, OXY 处理组的果皮褐变度是 CK 的 88.38%。

因此, OXY 处理可减缓黄皮果实采后果皮褐变指数和褐变度的升高,进而延缓果皮褐变的发生。

2.3 果实商品率和失重率的变化

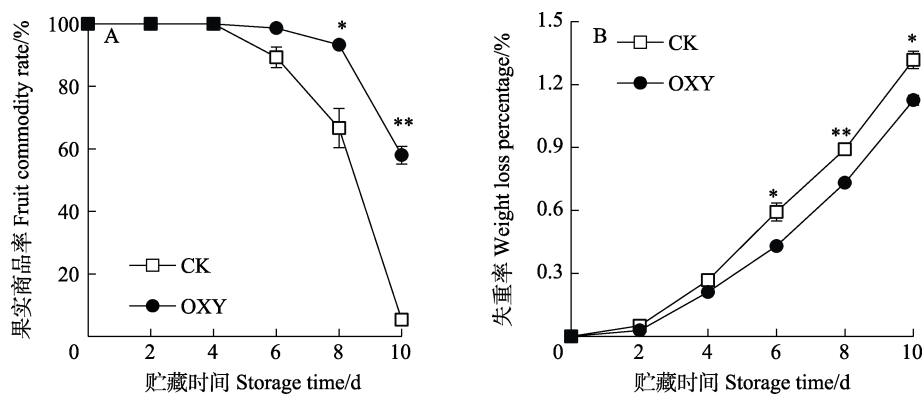
果实商品率是反映健康果实商业可接受程度的重要指标^[15]。如图 3A 所示, CK 与 OXY 处理组的黄皮果实商品率在贮藏 0~4 d 均为 100%,但从贮藏第 4 天开始,却表现出不同的变化趋势。其中, CK 的商品率在贮藏 4~10 d 急剧下降,在贮藏第 10 天时,其商品率仅为 5.33%;而 OXY 处理组的商品率在贮藏 4~6 d 呈缓慢下降,随后快速下降。通过比较发现, OXY 处理的果实商品率在贮藏 6~10 d 均高于 CK,并在贮藏第 8 天显著高于 CK ($P<0.05$),在贮藏第 10 天呈极显著水平 ($P<0.01$)。



率的下降与失重率的上升。

2.4 果皮色差 L^* 值和色调角 h 值的变化

色泽是评价果实外观品质的重要指标,常用 L^* 值表示色泽的明亮程度 (数值越大表示越鲜亮),色调角 h 值表示不同的颜色^[15-16]。采后黄皮果实果皮的色泽由淡黄色逐渐变成棕黄色,之后向黄褐色、褐色转变。在贮藏 0~10 d, CK 与 OXY 处理组的黄皮果实 L^* 值 (图 4A) 与 h 值 (图 4B) 均快速下降,并且 OXY 处理组均保持在较高水

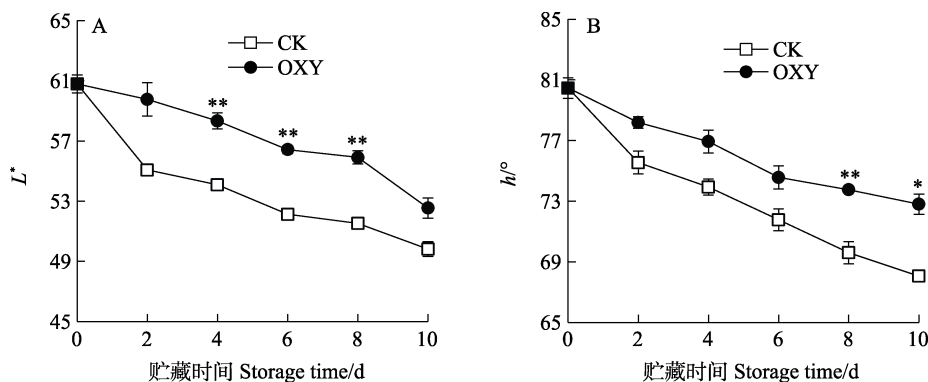


*表示差异显著 ($P<0.05$); **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

* indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 3 外源 OXY 处理对采后黄皮果实商品率 (A) 和失重率 (B) 的影响

Fig. 3 Effects of exogenous OXY treatment on fruit commodity rate (A) and weight loss percentage (B) of harvested wampee fruit



*表示差异显著 ($P<0.05$); **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

* indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

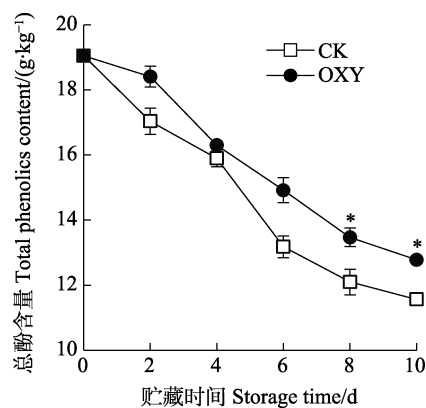
图 4 外源 OXY 处理对采后黄皮果实果皮 L^* 值 (A) 和 h° 值 (B) 的影响

Fig. 4 Effects of exogenous OXY treatment on values of L^* (A) and h (B) in pericarp of harvested wampee fruit

平。进一步比较发现,在贮藏 4~8 d, OXY 处理组的果皮 L^* 值均极显著高于 CK ($P<0.01$); 在贮藏第 8 天 OXY 处理组的果皮 h 值极显著高于 CK ($P<0.01$), 在贮藏第 10 天显著高于 CK ($P<0.05$)。在贮藏第 10 天时, OXY 处理组的果皮 L^* 值和 h 值分别是 CK 的 1.05 倍和 1.07 倍。综上, OXY 处理能有效延缓采后黄皮果实果皮 L^* 值和 h 值的降低, 进而保持较好的果皮外观色泽。

2.5 果皮总酚含量的变化

总酚是一种酚类物质, 其含量的变化与褐变有关, 而保持较高的总酚含量, 可以延缓果皮发生褐变^[11, 20]。如图 5 所示, 在贮藏 0~10 d, CK 与 OXY 处理组的黄皮果实果皮总酚含量均快速下降。进一步对比可知, OXY 处理组的总酚含量在贮藏期均高于 CK, 并在贮藏 8~10 d 显著高于 CK ($P<0.05$), 并且在贮藏第 10 天时, OXY 处理组的果皮总酚含量是 CK 的 1.11 倍。因此, OXY



*表示差异显著 ($P<0.05$)。

* indicates significant difference ($P<0.05$).

图 5 外源 OXY 处理对采后黄皮果实果皮总酚含量的影响

Fig. 5 Effects of exogenous OXY treatment on total phenolics content in pericarp of harvested wampee fruit

处理可以延缓采后黄皮果实果皮总酚含量的降低, 从而维持较好的果皮外观品质。

2.6 果皮 POD 和 PPO 活性的变化

果皮褐变的发生常涉及酚酶 (POD 或 PPO) 所诱导的酶促褐变反应, 较低的 PPO 和 POD 活性可以减少果皮褐变的发生^[13, 22]。由图 6A 可知, CK 和 OXY 处理组果实果皮的 POD 活性在贮藏 0~2 d 均急剧上升, CK 的 POD 活性在 2~8 d 逐渐下降, 8~10 d 快速上升; 而 OXY 处理组的果皮 POD 活性在 2~6 d 快速下降, 6~8 d 略有降低, 随后快速上升。与 CK 相比, OXY 处理组果实具有较低水平的果皮 POD 活性, 并在贮藏 4~10 d 显著高于 CK ($P<0.05$)。

由图 6B 可得, CK 的果皮 PPO 活性在贮藏 0~8 d 急剧上升, 8~10 d 快速下降。OXY 处理组的果皮 PPO 活性在贮藏 0~2 d 快速上升, 2~4 d 缓慢下降, 4~8 d 急剧提升, 而 8~10 d 快速下降。通过比较可知, 在贮藏 4~10 d, OXY 处理组的果皮 PPO 活性均低于 CK, 且在贮藏 6~10 d 显著高于 CK ($P<0.05$)。

因此, OXY 处理能有效维持采后黄皮果实较低水平的果皮 POD 和 PPO 活性。

2.7 果肉 TSS、TA 和维生素 C 含量的变化

TSS、TA 和维生素 C 是果实重要的营养成分和风味物质, 常用来评价果实品质^[10]。由图 7A 可知, 在贮藏 0~10 d, CK 果实的果肉 TSS 含量呈逐渐下降的趋势。而 OXY 处理组的果肉 TSS 含量在贮藏 0~2 d 快速提高, 2~10 d 逐渐下降。进一步对比可知, 在贮藏期, OXY 处理组的果肉 TSS 含量均高于 CK, 并且在贮藏第 2~6 天和第 10 天极显著高于 CK ($P<0.01$)。在贮藏第 10 天时, OXY 处理果实的果肉 TSS 含量是 CK 的 1.26 倍。

由图 7B 可知, CK 的果肉 TA 含量在贮藏 0~2 d 快速下降, 随后呈缓慢下降趋势。而 OXY 处理组的果肉 TA 含量在贮藏 0~2 d 略有上升, 随后持续下降。通过对比分析可知, OXY 处理组的果肉 TA 含量在贮藏期均高于 CK, 并且在贮藏第 2、

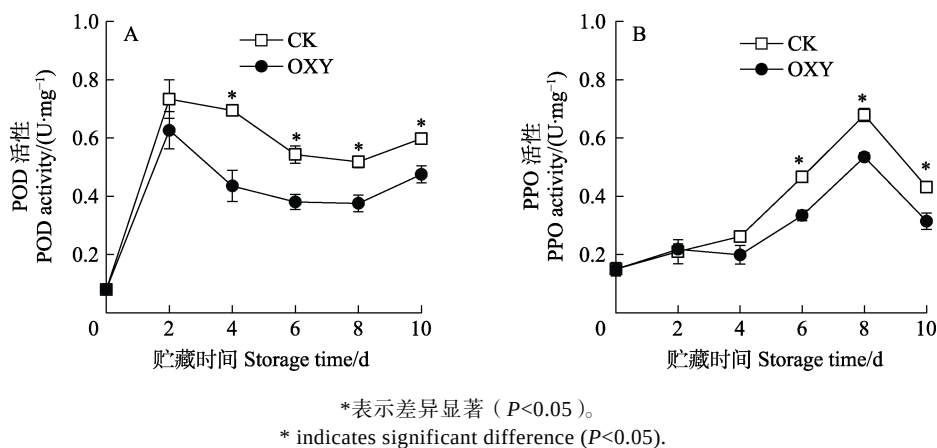


图 6 外源 OXY 处理对采后黄皮果实果皮 POD (A) 和 PPO (B) 活性的影响

Fig. 6 Effects of exogenous OXY treatment on activities of POD (A) and PPO (B) in pericarp of harvested wampee fruit

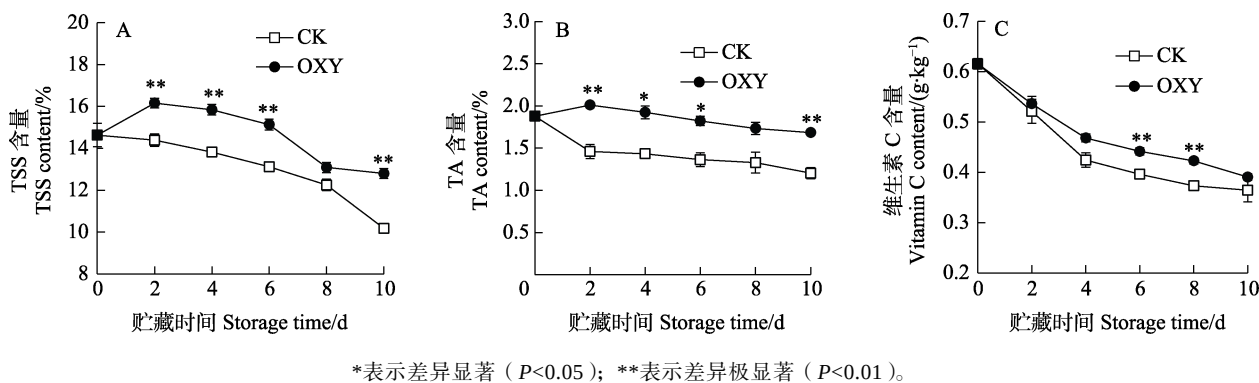


图 7 外源 OXY 处理对采后黄皮果实果肉 TSS (A)、TA (B) 和维生素 C (C) 含量的影响

Fig. 7 Effects of exogenous OXY treatment on contents of TSS (A), TA (B) and vitamin C (C) in pulp of harvested wampee fruit

10 天极显著高于 CK ($P<0.01$), 在贮藏 4~6 d 显著高于 CK ($P<0.05$)。在贮藏第 10 天, OXY 处理组的果肉 TA 含量是 CK 的 1.40 倍。

由图 7C 可知, 在贮藏 0~10 d, CK 和 OXY 处理组的黄皮果肉维生素 C 含量均急剧下降。OXY 处理的果肉维生素 C 含量均高于 CK, 且在贮藏 6~8 d 极显著高于 CK ($P<0.01$)。在贮藏第 10 天, OXY 处理组与 CK 的果肉维生素 C 含量分别比 0 d 下降了 36.53% 和 40.91%。

因此, OXY 处理能维持采后黄皮果实较高水平的果肉 TSS、TA 和维生素 C 含量, 从而保持较好的果肉营养品质。

2.8 果肉可溶性总糖和蔗糖含量的变化

糖 (如蔗糖或可溶性总糖) 含量的高低与果实的风味、品质等密切相关^[10, 15]。由图 8A 可知, 在贮藏期间, CK 和 OXY 处理组的黄皮果实果肉可溶性总糖含量均快速下降, 而 OXY 处理组维持在较高水平。通过分析可得, 在贮藏 6~8 d, OXY 处理组显著高于 CK ($P<0.05$), 在贮藏第 10 天极

显著高于 CK ($P<0.01$)。在贮藏第 10 天, OXY 处理组的果肉可溶性总糖含量是 CK 的 1.89 倍。

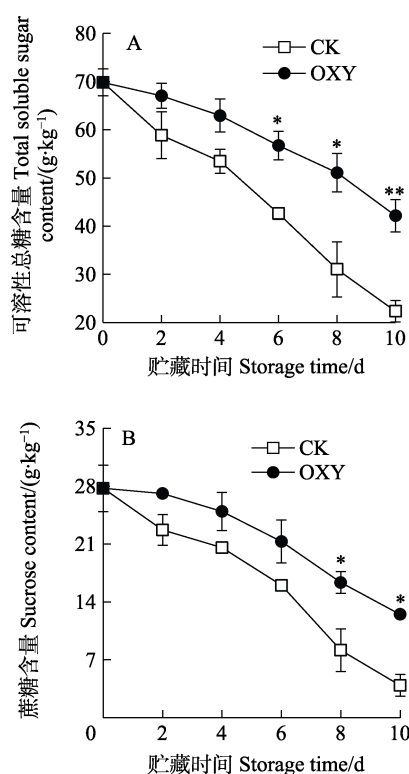
由图 8B 可知, 在贮藏 0~10 d, CK 和 OXY 处理组的黄皮果肉蔗糖含量均呈快速下降趋势, 与 CK 相比, OXY 处理组的果肉蔗糖含量均保持较高水平。进一步分析可知, 在贮藏期 8~10 d, OXY 处理组的果肉蔗糖含量显著高于 CK ($P<0.05$)。在贮藏第 10 天时, OXY 处理组的果肉蔗糖含量是 CK 的 3.20 倍。

因此, OXY 处理能维持采后黄皮果实果肉较高的可溶性总糖和蔗糖含量, 进而提高果肉营养品质。

3 讨论与结论

果皮褐变和失水是黄皮果实采后品质劣变最常见的症状^[4]。而果实组织细胞膜结构完整性的缺失是导致其发生褐变和失水的重要因素, 这在龙眼^[11]、荔枝^[12]等果实上已经得到了证实。本研究发现, OXY 处理能维持采后黄皮果实较低的果皮细胞膜透性, 维持黄皮果实较好的细胞膜结构的完整性, 保持较低的褐变指数和褐变度、较高的果实商品率和较低的失重率, 进而保持果实较好的贮藏特性, 这与姜雪等^[10]采用外源 OXY 处理荔枝果实上的研究结果一致。

为了避免发生酶促褐变, 通常果实组织液泡中的酚类物质 (如总酚) 与位于细胞膜、细胞质、叶绿体等质体中的酚酶是分离的, 但是果皮细胞受损或细胞区室化结构被破坏, 将促进酚酶和酚类底物之间的接触, 进而诱发酶促褐变^[13]。本研究发现, 与 CK 相比, OXY 处理组在贮藏期具有较高的果皮总酚含量、 L^* 值和 h 值, 较低的 POD 活性、褐变指数和褐变度; 在贮藏 4~10 d 具有较低的 PPO 活性。因此认为, OXY 处理可通过降低黄皮果皮 PPO 和 POD 活性, 减缓总酚氧化降解, 从而减缓果皮褐变而保持其外观品质。这与陈春等^[8]在鲜切苹果上的研究结果一致。王锋等^[22]在甜樱桃的研究结果表明, 外源褪黑素处理可以延缓 POD 和 PPO 活性的上升, 保持较高的多酚含量, 抑制甜樱桃果实褐变的发生; 杨菊等^[23]研究发现, 外源抗坏血酸可以延缓采后香蕉果皮褐变的发生; LIN 等^[24]在龙眼果实上的研究表明, 采用外源没食子酸丙酯处理可以延缓采后龙眼果实褐变并增强其耐贮性, 以上研究结果与本研究结果相似。



*表示差异显著 ($P<0.05$); **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

* indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

图 8 外源 OXY 处理对采后黄皮果实果肉可溶性总糖 (A) 和蔗糖 (B) 含量的影响

Fig. 8 Effects of exogenous OXY treatment on contents of total soluble sugar (A) and sucrose (B) in pulp of harvested wampee fruit

此外, 姜雪等^[10]在荔枝上的研究表明, OXY 处理可以提高采后荔枝果实的营养物质如 TSS、TA、维生素 C 和可溶性糖的含量, 这与本研究结果一致。蒋璇靓等^[25]在余甘子上的研究表明, 褪黑素处理可以维持采后余甘子果肉较高的 TSS、维生素 C、TA 含量从而保持其果肉营养品质, 这与本研究结果类似。

综上所述, 0.2 g/L OXY 处理能维持采后黄皮果实较低的果皮细胞膜透性、褐变指数和褐变度, 维持较高的果实商品率和较低的失重率, 进而保持果实较好的贮藏特性; OXY 处理还能维持采后黄皮果实较高的果皮 L^* 值、 h 值和总酚含量, 而维持较低的果皮 POD 与 PPO 活性, 从而保持较好的果皮外观色泽与品质; 另外, OXY 处理也能保持采后黄皮果实较高的果肉 TSS、TA、维生素 C、可溶性总糖和蔗糖含量, 进而稳定较好的果肉营养品质。因此, 外源 OXY 能作为一种安全的采后保鲜方法以提升黄皮果实的贮藏特性和采后品质, 进而延长果实采后贮藏期。

参考文献

- [1] ZENG J K, JIANG Z T, LI W, ZHANG L B, SHAO Y Z. Effect of UV-C irradiation on postharvest quality and antioxidant properties of wampee fruit [*Clausena lansium* (Lour.) Skeels] during cold storage[J]. Fruits, 2020, 75(1): 36-43.
- [2] SHAO Y Z, JIANG Z T, ZENG J K, LI W, DONG Y. Effect of ethanol fumigation on pericarp browning associated with phenol metabolism, storage quality, and antioxidant systems of wampee fruit during cold storage[J]. Food Science and Nutrition, 2020, 8: 3380-3388.
- [3] 常文俊, 陈露, 林晓凯, 李雯, 曾教科. 不同采后处理对黄皮果实冷藏后货架期品质的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(3): 33-38.
CHANG W J, CHEN L, LIN X K, LI W, ZENG J K. Effects of different postharvest treatments on quality of wampee fruits during shelf life after cold storage[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(3): 33-38. (in Chinese)
- [4] 常文俊, 阎宁, 沈丸钧, 李雯, 曾教科. 程序降温处理对黄皮果实贮藏品质和采后生理的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(6): 1181-1187.
CHANG W J, YAN N, SHEN W J, LI W, ZENG J K. Effects of low temperature conditioning on storage quality and postharvest physiology of wampee (*Clausena lansium* L.) fruits[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(6): 1181-1187. (in Chinese)
- [5] 孟祥春, 黄泽鹏, 凡超, 陆育生. 贮藏温度对无核黄皮保鲜期和品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(21): 8530-9535.
MENG X C, HUANG Z P, FAN C, LU Y S. Effects of storage temperature on the preservation period and quality of seedless wampee fruit[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(21): 8530-9535. (in Chinese)
- [6] 陈丽晖, 李军, 陈杰忠, 张昭其. 施保功浓度和贮藏温度对黄皮保鲜效果的影响[J]. 广东农业科学, 2007(2): 66-67.
CHEN L H, LI J, CHEN J Z, ZHANG Z Q. Effect of prochloraz treatment and storage temperature on quality of wampee fruits[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2007(2): 66-67. (in Chinese)
- [7] 孟祥春, 黄泽鹏, 黎家妍, 邹永. 氧化白藜芦醇对鲜切马铃薯褐变的抑制作用[J]. 农产品加工, 2018(12): 7-10, 14.
MENG X C, HUANG Z P, LI J Y, ZOU Y. Inhibiting effects of oxyresveratrol on browning of fresh-cut potato[J]. Farm Products Processing, 2018(12): 7-10, 14. (in Chinese)
- [8] 陈春, 黎家妍, 黄泽鹏, 孟祥春, 邹永. 氧化白藜芦醇对鲜切苹果及果汁褐变的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(20): 285-289, 295.
CHEN C, LI J Y, HUANG Z P, MENG X C, ZOU Y. Effects of oxyresveratrol on browning of fresh-cut apples and apple juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(20): 285-289, 295. (in Chinese)
- [9] HE J F, ZHU Q, DONG X, PAN H Y, CHEN J, ZHENG Z P. Oxyresveratrol and ascorbic acid O/W microemulsion: preparation, characterization, anti-isomerization and potential application as antibrowning agent on fresh-cut lotus root slices[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 269-276.
- [10] 姜雪, 蒋璇靓, 陈洪彬, 吴一晶, 郑宗平, 林河通. 采后氧化白藜芦醇处理对荔枝果实品质与耐贮性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(10): 133-139.
JIANG X, JIANG X J, CHEN H B, WU Y J, ZHENG Z P, LIN H T. Effects of oxyresveratrol treatment on quality and storability of postharvest litchi fruit[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(10): 133-139. (in Chinese)
- [11] LIN Y Z, LI N, LIN H T, LIN M S, CHEN Y H, WANG H, RITENOUR M A, LIN Y F. Effects of chitosan treatment on the storability and quality properties of longan fruit during storage[J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125627.
- [12] JIANG X J, LIN H T, SHI J, NEETHIRAJAN S, LIN Y F, CHEN Y H, WANG H, LIN Y X. Effects of a novel chitosan formulation treatment on quality attributes and storage behavior of harvested litchi fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 252: 134-141.
- [13] LIN Y F, LIN H T, LIN Y X, ZHANG S, CHEN Y H, JIANG X J. The roles of metabolism of membrane lipids and phenolics in hydrogen peroxide-induced pericarp browning

- of harvested longan fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 111: 53-61.
- [14] 孔祥佳, 林河通, 郑俊峰, 林艺芬, 陈艺晖. 诱导冷藏橄榄果实抗冷性的适宜热空气处理条件优化[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 371-376.
- KONG X J, LIN H T, ZHENG J F, LIN Y F, CHEN Y H. Optimum conditions of hot air treatment for inducing chilling tolerance of Chinese olive fruits during cold storage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 371-376. (in Chinese)
- [15] 郭欣, 林育钊, 曾玲珍, 林静颖, 余星星, 林河通. 不同浓度壳聚糖处理对采后西番莲果实耐贮性和贮藏品质的影响[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(8): 1665-1673.
- GUO X, LIN Y Z, ZENG L Z, LIN J Y, YU X X, LIN H T. Effects of different concentrations of chitosan treatment on storability and storage quality of passion fruit postharvest[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(8): 1665-1673. (in Chinese)
- [16] 曾玲珍, 肖烟云, 林河通, 林育钊, 郑江枫. 不同浓度 1-MCP 处理对“朝霞”水蜜桃果实的保鲜效应[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(1): 25-32.
- ZENG L Z, XIAO Y Y, LIN H T, LIN Y Z, ZHENG J F. Effects of different concentrations of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatments on keeping qualities of harvested ‘Zhaoxia’ peach fruits[J]. *Storage and Process*, 2021, 21(1): 25-32. (in Chinese)
- [17] 王慧, 陈燕华, 林河通, 陈艺晖, 林艺芬. 不同浓度 1-MCP 处理对采后安溪油柿果实的保鲜效应[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(10): 2060-2066.
- WANG H, CHEN Y H, LIN H T, CHEN Y H, LIN Y F. Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatments at different concentrations on keeping quality of harvested Anxi persimmon fruit[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39(10): 2060-2066. (in Chinese)
- [18] LIN Y X, LIN Y F, LIN M S, FAN Z Q, LIN H T. Influence of hydrogen peroxide on the ROS metabolism and its relationship to pulp breakdown of fresh longan during storage[J]. *Food Chemistry*: X, 2021, 12: 100159.
- [19] 郭欣, 林育钊, 林河通, 李倩, 段睿琦, 朱文婧. 壳聚糖处理对西番莲果实感病指数、抗病相关酶活性和抗病物质含量的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(5): 206-212.
- GUO X, LIN Y Z, LIN H T, LI Q, DUAN R Q, ZHU W J. Effect of chitosan treatment on disease index, disease resistant-related enzyme activities and disease resistance-related substance contents in *Passiflora caerulea* L. fruit during storage[J]. *Food Science*, 2021, 42(5): 206-212. (in Chinese)
- [20] CHEN M Y, LIN H T, ZHANG S, LIN Y F, CHEN Y H, LIN Y X. Effects of adenosine triphosphate (ATP) treatment on postharvest physiology, quality and storage behavior of longan fruit[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8: 971-982.
- [21] BRADFORD M M. Rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72: 248-254.
- [22] 王锋, 杨青珍, 赵旗峰, 张晓萍. 外源褪黑素对甜樱桃果实褐变和品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(5): 340-347.
- WANG F, YANG Q Z, ZHAO Q F, ZHANG X P. Effect of exogenous melatonin treatment on browning and quality of sweet cherry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(5): 340-347. (in Chinese)
- [23] 杨菊, 程谦伟, 孟陆丽, 胡波, 石玉秋, 袁海英, 周传悦, 莫斯敏. 外源抗坏血酸对香蕉保鲜和抗氧化代谢的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(15): 146-151.
- YANG J, CHENG Q W, MENG L L, HU B, SHI Y Q, YUAN H Y, ZHOU C Y, MO S M. Effects of exogenous ascorbic acid on the storage quality and antioxidant metabolism of bananas[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(15): 146-151. (in Chinese)
- [24] LIN Y F, LIN Y X, LIN H T, SHI J, CHEN Y H, WANG H. Inhibitory effects of propyl gallate on membrane lipids metabolism and its relation to increasing storability of harvested longan fruit[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 133-138.
- [25] 蒋璇靓, 姜雪, 陈洪彬, 曾雅琪, 郑金水, 吴少慧, 蔡英卿. 采后褪黑素处理对余甘子果实品质和耐贮性的影响[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(6): 1259-1266.
- JIANG X J, JIANG X, CHEN H B, ZENG Y Q, ZHENG J S, WU S H, CAI Y Q. Effects of postharvest melatonin treatment on fruit quality and storability of *Phyllanthus emblica* fruit[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(6): 1259-1266. (in Chinese)