

袁楚珊, 黄余年, 董欣瑞, 等. 不同贮藏温度对黄桃采后品质和抗氧化能力的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 356–364. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040176

YUAN Chushan, HUANG Yunian, DONG Xinrui, et al. Effect of Different Storage Temperatures on Postharvest Quality and Antioxidant Capacity of Yellow-fleshed Peach[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 356–364. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040176

· 贮藏保鲜 ·

不同贮藏温度对黄桃采后品质和抗氧化能力的影响

袁楚珊^{1,2,3}, 黄余年^{1,2,3}, 董欣瑞^{1,2,3}, 刘 伟^{1,2,3}, 苏东林^{1,2,3}, 朱向荣^{1,2,3,*}

(1. 湖南大学研究生院隆平分院, 湖南长沙 410125;

2. 湖南省农业科学院农产品加工研究所, 湖南长沙 410125;

3. 果蔬贮藏加工及质量安全湖南省重点实验室, 湖南长沙 410125)

摘 要: 本文主要研究了低温贮藏对黄桃果实贮藏品质和抗氧化能力的影响。黄桃采后预冷 12 h, 在 0、4 和 10 ℃ 三个不同低温条件下进行贮藏。结果表明, 0 ℃ 贮藏的黄桃采后腐烂率和褐变率均为 0, 显著低于 4 和 10 ℃ ($P < 0.05$)。与 4 和 10 ℃ 相比, 0 ℃ 贮藏还可以明显抑制膜透率的升高, 且贮藏期品质、抗氧化酶活性以及总抗氧化能力均保持在较高水平。在 0 ℃ 下贮藏, 果实能够维持较好的硬度、总糖、可溶性固形物、可滴定酸、维生素 C、总酚和总黄酮的含量; 同时 0 ℃ 贮藏抑制了多酚氧化酶和过氧化物酶活力, 而且有利于抗氧化酶维持较高的活性, 缓解果实冷害。4 和 10 ℃ 下, 硬度和维生素 C 含量显著下降 ($P < 0.05$), 丙二醛含量显著上升 ($P < 0.05$)。采用聚类分析和主成分分析进行数据分析, 聚类分析可以将 19 种生理和品质指标分为两个明显的独立簇, 与主成分分析的结果大体一致, 即 14~21 d 是不同温度贮藏的品质劣变点, 且第一主成分可以很好地将硬度、维生素含量、可滴定酸含量与其他指标分开, 这体现出黄桃果实品质指标和生理指标间的相似性与差异性。因此, 0 ℃ 贮藏可以显著保持黄桃采后品质和抗氧化能力。

关键词: 低温贮藏, 黄桃, 采后品质, 抗氧化能力, 抗氧化酶活

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)03-0356-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040176

本文网刊:



Effect of Different Storage Temperatures on Postharvest Quality and Antioxidant Capacity of Yellow-fleshed Peach

YUAN Chushan^{1,2,3}, HUANG Yunian^{1,2,3}, DONG Xinrui^{1,2,3}, LIU Wei^{1,2,3}, SU Donglin^{1,2,3}, ZHU Xiangrong^{1,2,3,*}

(1. Longping Branch, Graduate School of Hunan University, Changsha 410125, China;

2. Agricultural Products Processing Institute of Hunan Agricultural Sciences Academy, Changsha 410125, China;

3. Hunan Key Lab of Fruits & Vegetables Storage, Processing, Quality and Safety, Changsha 410125, China)

Abstract: The effect of low temperature storage on the postharvest quality and antioxidant capacity of yellow-fleshed peach (YFP) was investigated. The YFP fruits were pre-cooled for 12 h after harvesting, and grouped and stored at 0, 4 and 10 ℃ in refrigeration. The quality parameters and antioxidant enzyme activities were determined. The results showed that the decay rate and browning index of YFP stored at 0 ℃ were 0, which were significantly lower than those of fruit stored at 4 and 10 ℃ ($P < 0.05$). And membrane permeability of YFP stored at 0 ℃ was significantly suppressed. Compared with 4 and 10 ℃, the quality, total antioxidant capacity and antioxidant enzyme activity stored at 0 ℃ were all maintained at a higher level at the end of storage. The fruit hardness, contents of total sugar, soluble solid content (SSC), titratable acid (TA), vitamin C (V_C), total phenol and total flavonoids were better maintained at 0 ℃. At the same time, the activities of

收稿日期: 2022-04-18

基金项目: 湖南省重点研发计划 (2020NK2048); 湖南省农业科技创新项目 (2021CX80, 2022CX43)。

作者简介: 袁楚珊 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物化学, E-mail: ycs199801@163.com。

* 通信作者: 朱向荣 (1978-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: xiangrongchu@163.com。

polyphenol oxidase and peroxidase were inhibited and the fruit chilling injury was reduced at 0 °C. At 4 and 10 °C, hardness and V_C content decreased significantly ($P<0.05$), while malondialdehyde (MDA) content increased rapidly ($P<0.05$). At present, the 19 physiological and biochemical parameters were separated into two distinct independent clusters were observed by hierarchical clustering analysis (HCA), which were generally consistent with the results of principal component analysis (PCA), the periods of 14~21 d were the quality deterioration points stored at different temperatures, and the first principal component (PC1) could well separate the hardness, V_C content, TA and other indicators. The result could indicate the similarity and difference between physiological and biochemical indexes of YFP. Thus, the storage temperature on 0 °C can promote the quality and antioxidant ability of yellow-fleshed peach.

Key words: low temperature storage; yellow-fleshed peach; postharvest quality; antioxidant capacity; antioxidant enzyme activity

黄桃(*Amygdalus persica*)属于蔷薇科桃属,别名黄肉桃(yellow-fleshed peach, YFP),颜色鲜艳,味道香甜,质地脆硬,富含各种维生素和矿物质,具有极高的营养价值^[1-2]。黄桃属于呼吸跃变型果实,采摘时正值夏季高温天气,因此极易在环境温度下迅速成熟并腐烂。如何采取有效保鲜手段维持果实的新鲜度就成了首要目标^[3]。如今已有关桃果实保鲜技术研究,如侯佳迪等^[4]使用 1-甲基环丙烯(1-MCP)处理不同成熟度的果实发现其对低成熟度的果实保鲜作用更显著。Zhao 等^[5]将热空气和瓜氏毕赤酵母复合处理桃果实,能有效抑制真菌病害的发生,延缓果实品质和抗氧化指标的下降。王友升等^[6]采用水杨酸处理促进了桃果实后熟过程中内酯类物质的释放。周慧娟等^[7]采用气调处理延长蟠桃贮藏期和货架期,抑制冷藏褐变。

低温贮藏一直是减缓果实成熟和采后腐烂的有效技术。但桃果实对温度敏感,温度过高保鲜效果有限,温度过低容易引起生理紊乱,直观地表现为果皮或果肉褐变、质地木质化或粉质化、风味变淡、未成熟果实不能正常软化后熟^[8-9]。国内外学者采用低温贮藏技术对其他水果研究较多^[10-11],但对黄桃果实研究的较少,且对其品质和抗氧化能力影响尚不清楚。因此确定适宜的贮藏温度,对控制黄桃果实冷害,保持品质和减少采后损失具有重要意义。

因此,本文以‘锦绣’黄桃果实为材料,采后预冷 12 h,采用 0、4、10 °C 不同低温进行贮藏,比较不同低温处理对黄桃果实贮藏品质及抗氧化能力的影响,确定最佳处理温度;并采用主成分分析(principal component analysis, PCA)和聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA)进行综合品质评价,为黄桃贮藏保鲜技术研究提供基础信息和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黄桃 2021 年 8 月在湖南省怀化市麻阳县的一家商业果园中进行采摘,品种为‘锦绣’,八成熟,选择表面光滑、颜色、大小一致,没有虫害的果实;2,6-二氯酚靛酚、 V_C 标准品、聚乙烯吡咯烷酮(polyvinyl-polyrrolidone, PVPP)、2,4,6-三吡啶基三嗪(2,4,6-tris(2-pyridyl)-s-triazine, TPTZ) 上海瑞永生物

科技有限公司;苯酚、盐酸、硫酸、乙醇、乙酸、乙酸钠、碳酸钠、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、氯化钠、聚乙二醇 6000、曲拉通 X-100、过氧化氢、氯化铁、硫酸亚铁、邻苯二酚、愈创木酚、钼酸铵、过硫酸钾

国药集团化学试剂有限公司;没食子酸标准品、芦丁标准品 成都曼斯特生物科技有限公司;福林-酚试剂、二硫苏糖醇(dithiothreitol, DTT)、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(2,2'-amino-bis(2-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium-salt, ABTS)、氮蓝四唑(nitro-blue tetrazolium, NBT)

合肥博美生物科技有限责任公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、6-羟基-2,5,7,8-四甲基-苯并二氢吡喃-2-羧酸(6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid, Trolox) 梯希爱(上海)化成工业发展有限公司。

DDS-11A 电导率仪 上海雷磁仪器厂;HH-W 600 电热恒温水浴锅 北京三二八科学仪器有限公司;CT3-4500 质构分析仪 美国 Brookfield 公司;爱拓糖酸度测定仪 日本 Atago 公司;Avanti J-26XP 型冷冻离心机 美国 Beckman 公司;UV-1800 紫外可见分光光度计 岛津仪器(苏州)有限公司;KQ-数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司;WP-UP-WF-20 超纯水制备机 四川沃特水处理设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理方法 采摘完成通过冷链运输至冷库中,将其全部放于 6~8 °C 条件下预冷 12 h,预冷后果心温度降至 6.2 °C。每个处理三个平行组,每组 30 个果实,使用 0.02 mm 厚聚乙烯塑料袋进行封装,然后将其分别放在 0~1 °C、4~5 °C 和 10~11 °C 的冷库中贮存,相对湿度 85%~90%。在第 0、7、14、21、28 和 35 d 进行取样,放至室温(20±1 °C)半小时后再测定,同时统计黄桃果实的腐烂率、褐变指数,并检测硬度和可溶性固形物(soluble solid content, SSC)等指标,最后将桃果肉切块后用液氮研磨至粉末状,再放入-80 °C 低温冰箱中储存,后续测定生理指标使用。

1.2.2 腐烂率和褐变指数的测定 腐烂面积或果肉纵切面褐变面积超过 1 cm² 的桃果实均视为坏果。

通过从以下等级目测评估桃果实的褐变程度: 0=无症状, 1=0%~10%, 2=10%~25%, 3=25%~50%, 4=超过 50%。褐变指数和腐烂率的计算公式为:

$$\text{褐变指数}(\%) = \frac{\sum (\text{褐变程度} \times \text{该水平的果实数})}{\text{果实总数} \times 4} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{腐烂率}(\%) = \frac{\sum \text{坏果}}{\text{原始果总数}} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

1.2.3 膜透性和丙二醛(MDA)的测定 测定膜透性参考 Zhou 等^[12]的方法并加以改进, 将果实纵向切开, 打孔器打孔, 取直径 6 mm、高 5 mm 的圆柱体果粒。将果粒置于烧杯中, 在烧杯中加入去离子水, 在 30 ℃ 的水浴锅中水浴加热 1 h, 并测定电导率为 A_0 ; 随后, 将其维持沸腾状态 10 min 后, 再冷却到室温, 此时测电导率为 A_1 。根据 Liu 等^[13]的方法测定丙二醛含量, 将 1 g 冷冻桃肉粉用 5 mL 100 g·L⁻¹ 的三氯乙酸溶液匀浆, 并立即以 16000×g 离心 10 min, 收集上清液。准确吸取 2 mL 的上清液, 加入 2 mL 6.7 g·L⁻¹ 硫代巴比妥酸溶液, 煮沸 20 min, 然后立即于冰上冷却, 以 12000×g 离心 10 min, 于 450、532 和 600 nm 处测定吸光值, 以每千克所含 MDA 含量的纳摩尔表示, 即 nmol·kg⁻¹。

$$\text{膜透性}(\%) = \frac{A_0}{A_1} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

$$\text{MDA 含量} = [6.45 \times (\text{OD}_{532} - \text{OD}_{600}) - 0.56 \times \text{OD}_{450}] \times \frac{V_t \times V_r}{V_s \times m} \quad \text{式 (4)}$$

式中: V_t 为萃取液的总体积, mL; V_r 为反应混合液的总体积, mL; V_s 为反应混合液中所含的萃取液的体积, mL; m 为以新鲜重量(FW)为基础的样品质量, g。

1.2.4 生理参数的测定 使用 CT3-4500 质构分析仪, 测试参数为深度 8 mm, 测试速度为 2 mm/s, 距离为 8 mm, 使用 50 kg 校准的称重传感器, 单位为 g; 同时采用数字折射计测定桃果实的可溶性固形物(SSC)和可滴定酸(TA)含量, 以百分比(%)表示。

维生素 C(V_C)的含量参考 2, 6-二氯酚靛酚法测定^[14], 单位为 mg/100 g, 结果以鲜重计。采用苯酚-硫酸法^[15]测定总糖的含量, 以百分比(%)表示。

1.2.5 总酚和总黄酮含量的测定 根据 Wang 等^[16]的方法, 采用 80%(v/v)乙醇溶液提取桃果实中的酚类物质。准确称取 5 g 冷冻桃肉粉, 加入 80%(v/v)的乙醇溶液, 在 60 ℃ 温度下超声功率为 240 W, 提取 1 h 后, 在 4 ℃ 下以 16000×g 转速冷冻离心 25 min, 将上清液收集作为酚类物质和黄酮物质测定的提取液, 于低温环境下保存备用。参考吕群金等^[17]的方法测定总酚含量, 以标准品没食子酸做标准曲线, 回归方程: $y=0.0139x+0.1405$, 相关系数 $R^2=0.998$ 。参考 Jia 等^[18]测定黄酮的方法, 用芦丁做标准曲线, 回

归方程 $y=0.01116x+0.005756$, 相关系数 $R^2=0.998$ 。

1.2.6 可溶性蛋白含量的测定 采用考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白含量, 在波长 595 nm 处测定吸光值, 以每 100 g 鲜重所含可溶性蛋白质的质量表示, 即 mg/100 g。

1.2.7 抗氧化酶活力的测定

1.2.7.1 过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活力的测定 制备提取液: 用 20 mL 含 1 mmol 聚乙二醇(PEG 6000)、4%(w/v)交联聚乙烯吡咯烷酮(PVPP)和 1% 曲拉通 X-100(v/v)的乙酸-乙酸钠缓冲液(0.1 mol·L⁻¹, pH5.5)冰浴条件下研磨冷冻桃肉粉成匀浆, 冷冻离心后, 低温保存备用。POD 活力的测定采用愈创木酚染色法, 在波长 470 nm 处测定吸光值, 以每克鲜重每分钟吸光值增加 1 为一个 POD 活性单位(U)。按照 Nguyen 等^[19]的方法测定 PPO 活力, 以邻苯二酚为底物, 在波长 420 nm 处测定吸光值, 以每克鲜重每分钟吸光值增加 1 为一个 PPO 活性单位(U)。

1.2.7.2 超氧化物歧化酶(SOD)活力的测定 用 20 mL 含 5 mmol/L DTT(w/v)和 5% PVPP(w/v)的磷酸钠缓冲液(0.1 mol·L⁻¹, pH7.8)从冷冻桃肉粉中提取 SOD。在波长 560 nm 处测定吸光值, 一个 SOD 活性单位(U)表示为对 NBT 光化还原的抑制为 50%。

1.2.7.3 过氧化氢酶(CAT)活力的测定 参考 Yu 等^[20]的方法, 用 0.9%(w/v)的氯化钠水溶液从冷冻桃肉粉中提取 CAT, 加入钼酸铵迅速中止 CAT 分解 H₂O₂ 的反应, 剩余的 H₂O₂ 与钼酸铵反应产生一种淡黄色的络合物, 在波长 405 nm 处测定吸光值, 以每克鲜重每分钟分解 1 μmol 的 H₂O₂ 的量为一个 CAT 活性单位(U)。

1.2.8 非酶抗氧化活性的测定

1.2.8.1 DPPH 自由基清除能力的测定 参考 Brand-Williams 等^[21]的测定方法, 准确吸取 1 mL 提取液于试管中, 随后加入 2 mL 浓度为 0.3 mmol·L⁻¹ 的 DPPH 溶液(80% 乙醇溶解), 混匀, 30 ℃ 水浴中反应 1 h 后, 于波长 517 nm 处测定吸光值。以 Trolox 为标准当量, 计算反应溶液的抗氧化能力, 单位 mg TE·100 g⁻¹ 表示。

1.2.8.2 ABTS 自由基清除能力的测定 参考 Wang 等^[22]的测定方法, 将 7.4 mmol·L⁻¹ ABTS 水溶液和 2.6 mmol·L⁻¹ 过硫酸钾水溶液按体积比 1:1 混合, 室温下避光放置 12 h 后, 用 80% 乙醇(v/v)稀释约 50 倍其吸光度小于 0.7, 制成 ABTS 自由基工作液。准确吸取 0.1 mL 提取液于试管中, 加入 5 mL 的 ABTS 自由基工作液, 暗处反应 10 min 后, 于波长 734 nm 处测定吸光值。以 Trolox 为标准当量, 计算反应溶液的抗氧化能力, 单位 mg TE·100 g⁻¹ 表示。

1.2.8.3 FRAP 自由基清除能力的测定 参考 Benzie 等^[23]测定方法, 将 300 mmol·L⁻¹ 乙酸钠缓冲液(pH

3.6)、10 mmol·L⁻¹ TPTZ 溶液和 20 mmol·L⁻¹ 氯化铁溶液按体积比 10:1:1 混合,制成 FRAP 溶液。吸取 3.6 mL FRAP 溶液,120 μL 提取液和 360 μL 去离子水,混合,在 37 ℃ 水浴中反应 1 h,于波长 593 nm 处测定吸光值。以 FeSO₄ 为标准当量,样品抗氧化活性以达到同一吸光度值为一个 FRAP 值,计算溶液的抗氧化能力,单位 mg FeSO₄·100 g⁻¹ 表示。

1.3 数据处理

所有实验重复三次,实验结果以平均值±标准差表示。数据通过 Excel 2010 软件统计和整理,并使用 SPSS 16.0 软件进行方差分析和 Duncan 多重比较, $P<0.05$ 表示差异显著。使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 黄桃果实腐烂率和褐变指数的变化

如图 1A 所示,随着贮藏时间的延长,4 和 10 ℃ 贮藏下的黄桃果实腐烂率逐渐上升,在贮藏结束时分别达到最大值为 40% 和 60%。0 ℃ 下贮藏的黄桃果实整个贮藏期间内没有明显冷害,且 0 ℃ 组的腐烂率显著低于 4 和 10 ℃ 组($P<0.05$)。

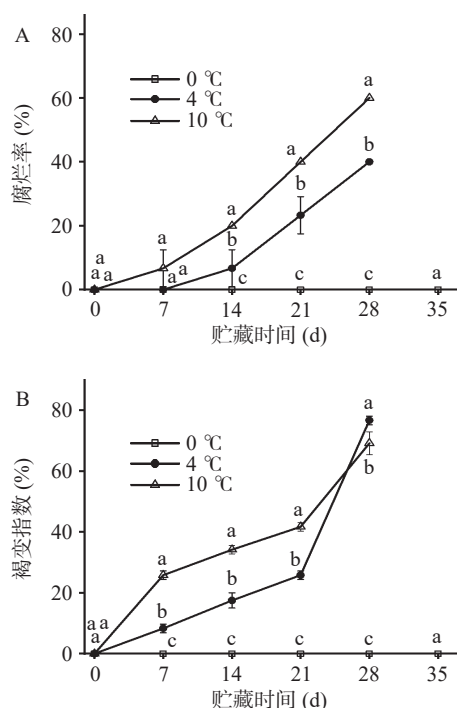


图 1 黄桃果实腐烂率(A)和褐变指数(B)的变化

Fig.1 Change of rot rate (A) and browning index (B) of YFP
注: 不同小写字母表示相同贮藏时间不同处理方式之间差异显著($P<0.05$); 图 2~图 7 同。

如图 1B 所示,4 和 10 ℃ 组第 7 d 首次观察到褐变现象,褐变指数分别为 8.3% 和 25.2%,并于第 21 d 分别达到 25.8% 和 41.7%,随后,4 ℃ 组有褐变快速加重的趋势,在第 28 d 达到 76.7%,且比 10 ℃ 组的褐变程度更严重。这可能是由于黄桃果实对温度比较敏感^[24],在 6~8 ℃ 的低温条件贮藏时生理紊乱更快,造成更严重的褐变现象。另外,在整个贮藏

期内,0 ℃ 组没有观察到褐变现象,说明 0 ℃ 贮藏有利于缓解黄桃果实褐变的发生。

2.2 黄桃果实膜透性和丙二醛(MDA)含量的变化

水果在采后贮藏期间出现衰老和冷害时,电解质会发生泄露和细胞膜逐渐不完整^[25]。如图 2A 所示,三组黄桃果实的膜透性在贮藏期内均呈上升趋势,4 和 10 ℃ 组第 28 d 达到最大值分别为 67.1% 和 73.7%,且在贮藏 14 d 开始,4 和 10 ℃ 组的果实膜透性均显著高于 0 ℃ 组($P<0.05$)。

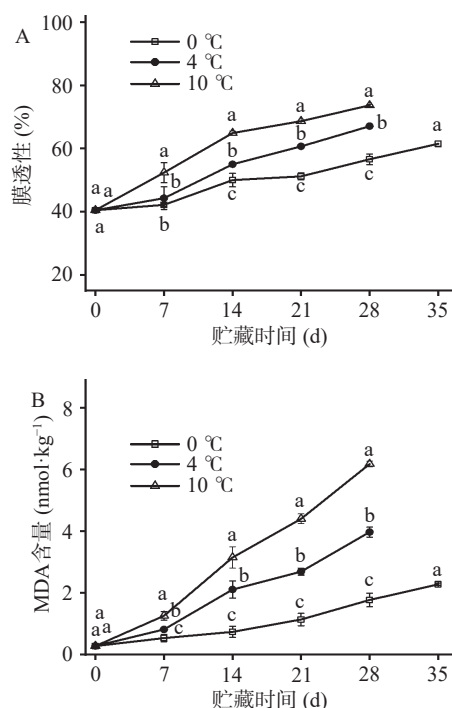


图 2 黄桃果实膜透性(A)和 MDA 含量(B)的变化
Fig.2 Changes of membrane permeability (A) and MDA content (B) of YFP

MDA 是果实衰老过程的主要产物^[26],是评估细胞膜系统受损程度的另一个指标。如图 2B 所示,随着贮藏时间的延长,三组黄桃果实的 MDA 含量在贮藏期内均呈上升趋势与膜透性的趋势相同。在第 28 d,4 和 10 ℃ 组的 MDA 含量达到最大值分别为 3.97 和 6.18 nmol·kg⁻¹,而 0 ℃ 组的 MDA 含量为 1.77 nmol·kg⁻¹ 显著低于 4 ℃ 和 10 ℃ 组($P<0.05$)。因此,可以看出当黄桃果实贮藏的温度越高时,MDA 含量也就越高,较低的温度贮藏有利于黄桃品质的保持。

2.3 黄桃果实生理品质的变化

如图 3A 所示,在整个贮藏期,黄桃果实的硬度都呈现不断下降的趋势,且从 7 d 开始 0 ℃ 组的硬度显著高于 4 和 10 ℃ 组($P<0.05$)。贮藏第 0 d 时三组硬度为 1079.8 g,此时硬度最大;在第 28 d 时分别下降至 716.8 g(0 ℃)、213.2 g(4 ℃)和 144.0 g(10 ℃)。

如图 3B 所示,总糖含量的变化呈现先上升后下降的趋势,且在贮藏的第 14 d 达到峰值,其中,以 10 ℃ 组贮藏的黄桃果实总糖含量最高为 34.5%,0 和 4 ℃ 组较低分别为 30.0%、30.5%。总糖含量下

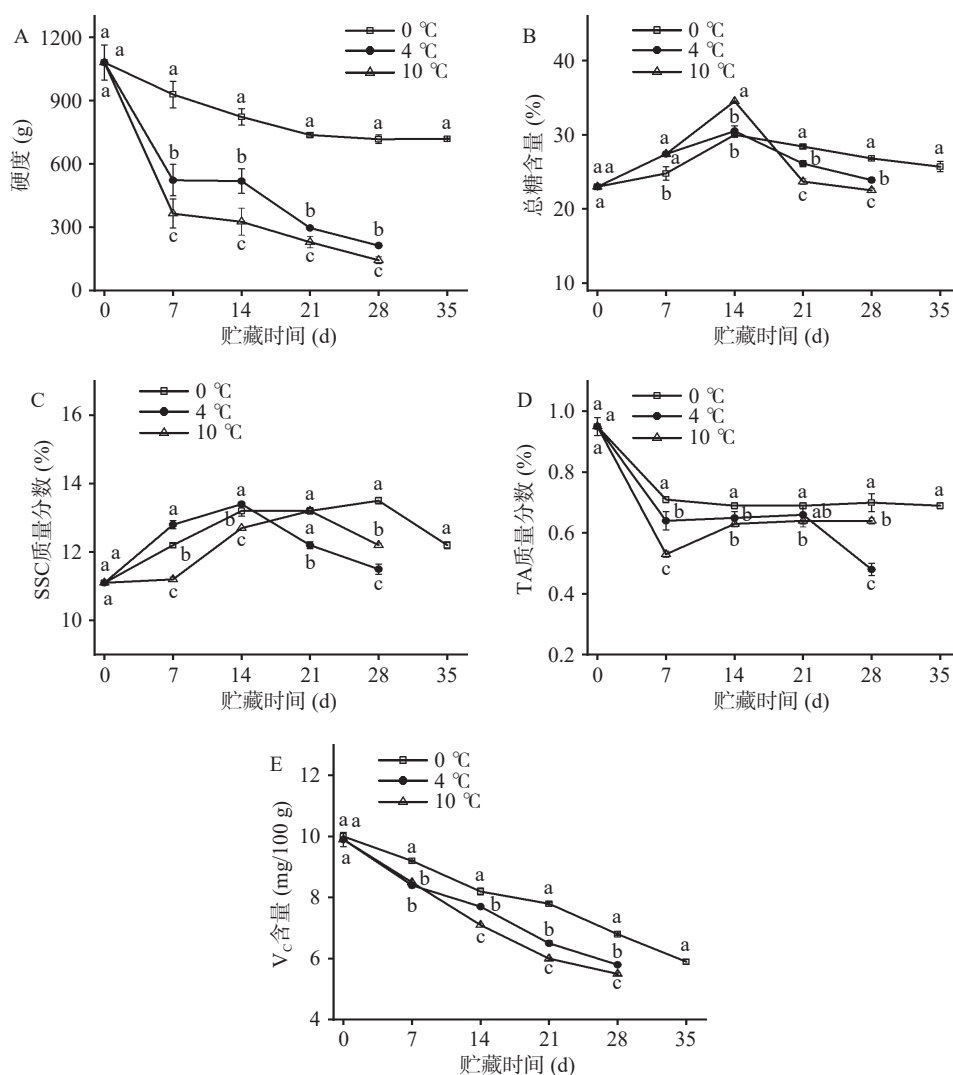


图3 黄桃果实硬度(A)、总糖含量(B)、SSC质量分数(C)、TA质量分数(D)和 V_C 含量(E)的变化

Fig.3 Changes of the firmness (A), total sugar content (B), SSC content (C), TA content (D) and V_C content (E) of YFP

降阶段,0 °C 组下降趋势较为平缓,而 10 °C 组下降速度最快;在第 28 d 分别下降至 26.8%(0 °C)、23.9%(4 °C)和 22.5%(10 °C)。

如图 3C 所示,SSC 质量分数呈线先上升后下降的趋势,但 4 °C 组在第 14 d 达到峰值 13.4%,10 °C 组在第 21 d 达到峰值 13.2%,而 0 °C 组到第 28 d 才达到峰值 13.5%。在贮藏后期 SSC 含量下降阶段,0 °C 组下降较为缓慢,且显著高于 10 和 4 °C 组 ($P<0.05$)。

如图 3D 所示,TA 质量分数总体上呈下降趋势,但 10 °C 组有短暂上升。在贮藏第 0 d 至第 7 d 期间 TA 质量分数下降速度最快;贮藏第 0 d 时 TA 质量分数为 0.95%,在贮藏第 7 d 分别下降至 0.71%(0 °C)、0.64%(4 °C)、0.53%(10 °C),之后 0 °C 组下降趋势较为缓慢,且除第 21 d 外,0 °C 的 TA 质量分数显著高于 10 和 4 °C 组 ($P<0.05$)。

如图 3E 所示, V_C 含量都呈现下降趋势,贮藏第 0 d 含量最高为 9.9 mg/100 g,在贮藏第 28 d 时,下降至分别为 6.8 mg/100 g(0 °C)、5.8 mg/100 g(4 °C)和 5.5 mg/100 g(10 °C),且在贮藏过程中 0 °C 组 V_C

含量显著高于 4 和 10 °C 组 ($P<0.05$)。

2.4 黄桃果实总酚和总黄酮含量的变化

如图 4A 所示,总酚含量均呈现先上升后下降的趋势,在贮藏第 21 d,4 和 10 °C 达到峰值分别为 1094.9 和 1210.3 mg/100 g,而 0 °C 组在贮藏第 28 d 才达到 1015.4 mg/100 g。在贮藏后期,4 °C 和 10 °C 组的总酚含量呈现下降的趋势,在第 28 d 分别下降至 639.2 和 609.3 mg/100 g,而 0 °C 组下降程度与其他两组相比较则较为平缓。如图 4B 所示,总黄酮含量的变化与总酚相似,都呈先上升后下降趋势。在贮藏第 21 d,4 和 10 °C 组达到峰值分别为 630.4 和 642.5 mg/100 g,在贮藏第 28 d 下降至 448.4 和 398.9 mg/100 g。0 °C 组的总黄酮含量在贮藏第 28 d 达到峰值 674.7 mg/100 g,随着贮藏时间的延长,总黄酮含量缓慢地下降,且贮藏结束时总黄酮的含量显著高于 4 和 10 °C 组 ($P<0.05$)。因此,以上可以看出 0 °C 贮藏明显地延缓了贮藏后期总酚和总黄酮含量的下降。

2.5 黄桃果实可溶性蛋白含量的变化

如图 5 所示,4 和 10 °C 组的可溶性蛋白含量呈现先上升后下降的趋势,在贮藏第 0 d 时可溶性蛋白

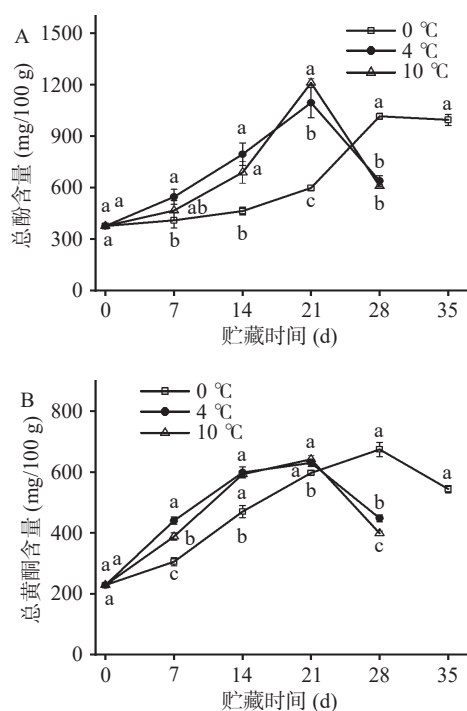


图 4 黄桃果实总酚含量(A)和总黄酮含量(B)的变化
Fig.4 Changes of the total phenols content (A) and total flavonoids content (B) of YFP

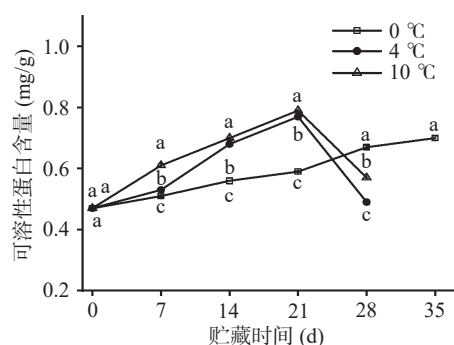


图 5 黄桃果实可溶性蛋白含量的变化
Fig.5 Changes of the soluble protein content of YFP

含量为 0.47 mg/g, 贮藏第 21 d 后达峰值分别为 0.77 和 0.79 mg/g。而 0 °C 组整个贮藏期呈上升趋势, 贮藏第 35 d 可溶性蛋白含量达 0.70 mg/g, 在贮藏后期 0 °C 组的可溶性蛋白的含量显著高于 4 和 10 °C 组 ($P < 0.05$), 可以看出 0 °C 可延缓可溶性蛋白含量的下降。

2.6 黄桃果实抗氧化酶活性的变化

如图 6A 所示, PPO 活力均呈现先上升后下降的趋势, 贮藏到第 21 d 时达到峰值, 依次为 $0.84 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$ (0 °C)、 $1.06 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$ (4 °C) 和 $1.05 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$ (10 °C), 随后 PPO 活力开始降低, 0 °C 组相较于其他处理组下降较为缓慢, 并与 4 和 10 °C 组具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

如图 6B 所示, POD 活力在整个贮藏期呈先上升后下降趋势, 与 PPO 活力趋势基本一致。4 和 10 °C 组的 POD 活力都在贮藏第 21 d 达到峰值, 分别为 3.13 和 $2.98 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$, 随后在贮藏第 28 d 下降至 2.56 和 $2.79 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$, 而 0 °C 组的 POD 活力在第

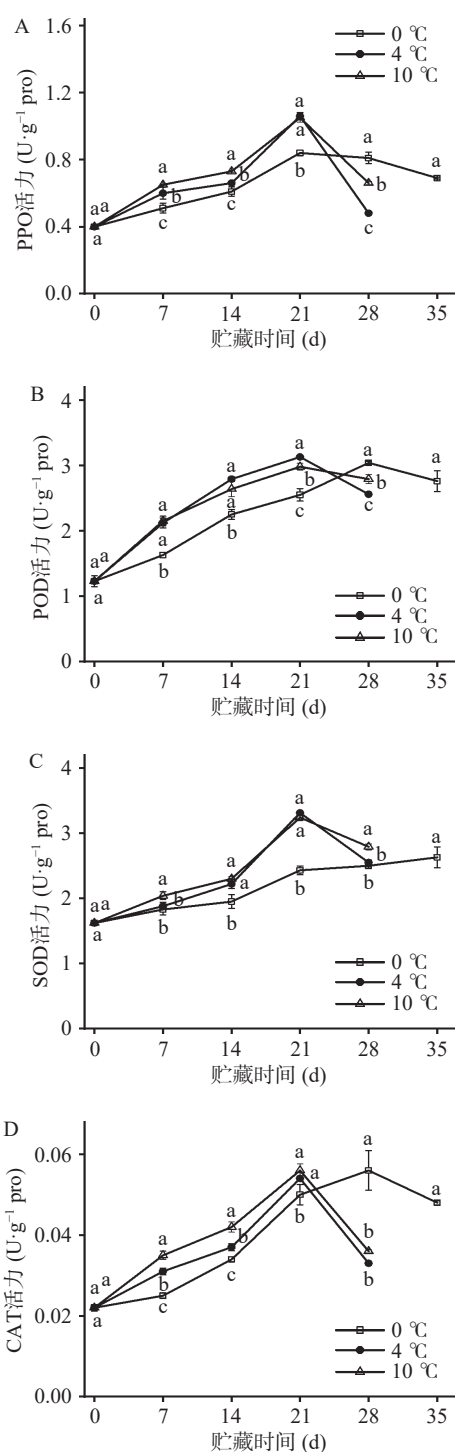


图 6 黄桃果实 PPO 活力(A)、POD 活力(B)、SOD 活力(C)和 CAT 活力(D)的变化

Fig.6 Changes of the PPO activity (A), POD activity (B), SOD activity (C) and CAT activity (D) of YFP

28 d 才达到峰值为 $3.04 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$, 可以看出 0 °C 可以延缓 POD 酶活力上升。

如图 6C 所示, 4 和 10 °C 组的 SOD 活力在贮藏期呈先上升后下降趋势, 与 PPO、POD 活力趋势相同; 在贮藏第 21 d 达到峰值为 3.31 和 $3.24 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$, 随后在贮藏第 28 d 下降至 2.55 和 $2.79 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$ 。而 0 °C 组的 SOD 活力在整个贮藏期呈上升趋势, 贮藏结束时达 $2.63 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$ 。

如图 6D 所示, 0 °C 组的 CAT 活力呈先上升后

下降趋势在贮藏第 28 d 达到峰值,此时 0 ℃ 组的峰值为 $0.054 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$, 4 和 10 ℃ 组则在贮藏第 21 d 达到峰值,均为 $0.056 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pro}$ 。但在贮藏后期 0 ℃ 组的 CAT 活力显著高于 4 和 10 ℃ 组($P < 0.05$)。

2.7 黄桃果实总抗氧化活性的变化

如图 7 所示,采用 DPPH、ABTS、FRAP 三种方法测定 0、4 和 10 ℃ 对黄桃果实总抗氧化活性的影响。DPPH 自由基清除能力、ABTS 自由基清除能力和 FRAP 自由基清除能力都呈先上升后下降的变化趋势。4 ℃ 组的 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力的峰值出现在贮藏第 21 d 分别为 $227.1 \text{ mg TE} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 和 $114.9 \text{ mg TE} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,而 10 ℃ 组的 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力峰值出现在贮藏第 14 d 分别为 230.7 和 $119.5 \text{ mg TE} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$; 4 和 10 ℃ 组的 FRAP 自由基清除能力的峰值均在贮藏第 21 d 分别为 82.4 和 $88.1 \text{ mg FeSO}_4 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 。0 ℃ 组抗氧化活性的峰值均出现在第 28 d,分别为 214.8 、 $102.7 \text{ mg TE} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 和 $85.1 \text{ mg FeSO}_4 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,且贮藏后期 0 ℃ 组的

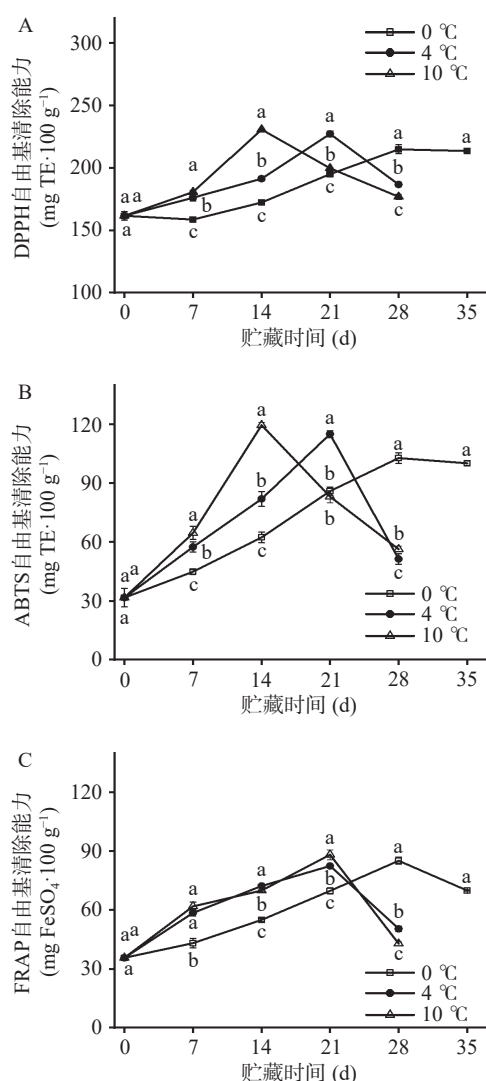


图 7 黄桃果实 DPPH(A)、ABTS(B)和 FRAP(C)自由基清除能力的变化

Fig.7 Changes of free radical scavenging ability of DPPH (A), ABTS (B) and FRAP (C) of YFP

DPPH、ABTS、FRAP 的抗氧化值显著高于 4 和 10 ℃ 组($P < 0.05$),可以看出 0 ℃ 在贮藏后期有更高的抗氧化能力。

2.8 相关性分析

如图 8A 所示,通过对黄桃果实的 19 项生理指标进行主成分分析(PCA),模型显示出样本集的总方差为 83.6%(PC1 为 64.1%,PC2 为 19.5%)。结果表明,在 0、4 和 10 ℃ 下,不同时间贮藏的样品可以很好地被区分。如图 8A 所示,PC1 将贮藏前期(0、7、14 d)与贮藏后期(21、28、35 d)的样品分离开,说明贮藏前期与后期样品差异较大,14~21 d 是不同温度贮藏的品质劣变点;如图 8B,PC1 可以很好地将硬度、V_C 含量、TA 质量分数与其他指标分开。

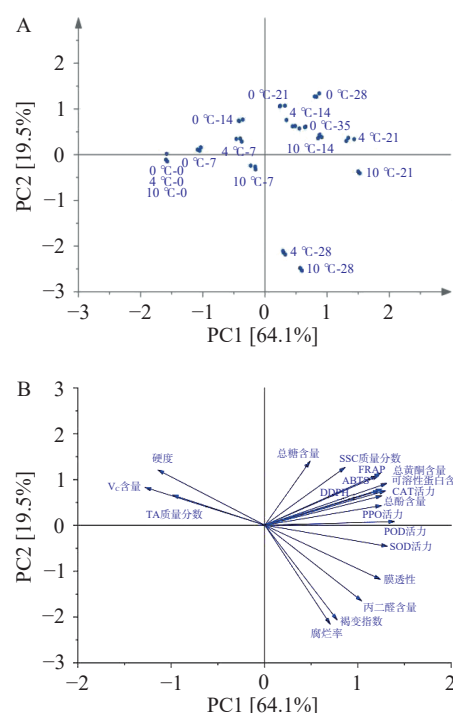


图 8 不同黄桃样品 PCA 图

Fig.8 PCA diagram of different YFP samples

通过对黄桃果实的 19 项生理指标进行聚类分析(HCA),解析低温对黄桃果实贮藏品质和抗氧化能力的影响。如图 9 所示,可以观察到两个明显的独立簇,第一组(A)包含腐烂率、褐变指数、膜透性、丙二醛含量、总糖含量、SSC 质量分数、CAT 活力、总酚含量、PPO 活力、可溶性蛋白含量、总黄酮含量、FRAP、DPPH、ABTS、POD 活力和 SOD 活力;该组又分为两小组,第一组由腐烂率、褐变指数、膜透性和丙二醛含量组成,第二小组由其他指标组成。第二组(B)由硬度、V_C 含量和 TA 质量分数组成,与 PCA 分析结果相同。从图 9 中的皮尔逊相关性可以看出,总酚、总黄酮含量与抗氧化酶和总抗氧化能力呈显著正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$);抗氧化酶与可溶性蛋白的含量呈显著正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$);膜透性和丙二醛含量与抗氧化酶和总抗氧化能力呈显著正相关($P < 0.05$)。

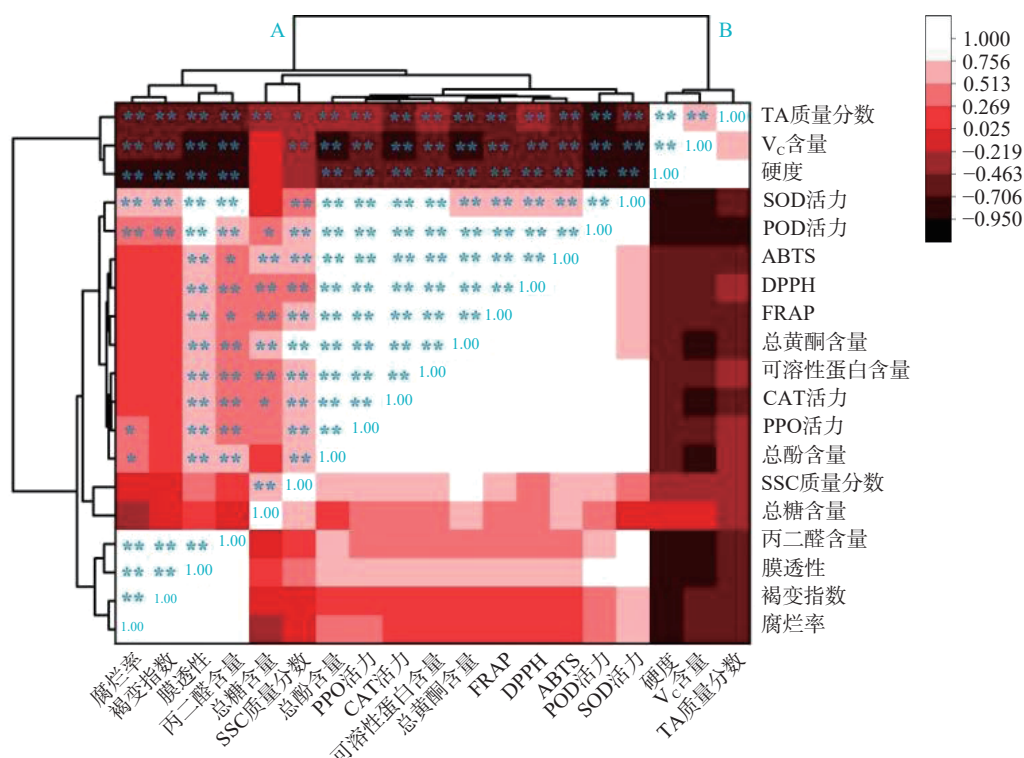


图 9 基于黄桃果实生理指标的皮尔逊相关性热图

Fig.9 Heatmap of Pearson correlations based on the physiological indicators of YFP

注: **: 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关, *: 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关。

3 讨论与结论

膜透性和 MDA 含量反映了细胞膜的损害程度, 温度越高, 膜透性和 MDA 含量越高, 黄桃果实的衰老程度越严重。0 ℃ 贮藏延缓了膜透性和 MDA 含量的上升, 有利于其结构的完整性, 这与先前 Liu 等^[1]的研究结果一致。总酚和总黄酮的含量与抗氧化酶活性变化趋势基本趋于一致, 总酚和总黄酮具有清除自由基和降低膜流动性的作用^[27], 维持了细胞膜的稳定性。

抗氧化酶对植物细胞具有保护作用^[28], 可以减轻活性氧的伤害, 且抗氧化酶和抗冷性呈正相关^[29]。0 ℃ 贮藏延缓了 SOD 和 CAT 的上升, 且在贮藏后期 SOD 和 CAT 活力显著高于 4 和 10 ℃ 组 ($P < 0.05$), 低温有助于保持高抗氧化酶的活性, 减轻果实冷害以及其他生理疾病。可溶性蛋白含量与抗氧化酶活力是呈显著正相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 贮藏初期可溶性蛋白含量增加, 是随着酶活力的增加而增加, 贮藏后期急剧下降, 与黄桃果实的生理紊乱有关, 0 ℃ 贮藏延缓了可溶性蛋白含量的下降。总抗氧化能力与总黄酮、总酚和 V_C 的变化基本一致。据前人研究, 桃果实中较高抗氧化活性与果肉褐变相关^[1], 0 ℃ 贮藏保持了较高的抗氧化活性。

果肉褐变或变色或与 PPO 和 POD 催化酚类物质有关。0 ℃ 贮藏延缓了 PPO 和 POD 的上升, 在贮藏后期 PPO 和 POD 活力显著高于 4 和 10 ℃ 组 ($P < 0.05$), PPO 和 POD 达到一个动态平衡, 而贮藏后期 4 和 10 ℃ 组含量快速下降, 可能跟发生生理紊乱有关。

温度是黄桃果实贮藏过程中的最重要因素之一, 在不同低温下贮藏黄桃果实的生理品质也有所不同。0 ℃ 下贮藏可以显著抑制黄桃果实在采后贮藏时的腐烂率、褐变程度和膜透率的上升, 保持较高的果实品质和抗氧化活性。0 ℃ 下贮藏维持了果实硬度、总糖、SSC、TA、 V_C 、总酚和总黄酮的含量; 同时抑制了 PPO 活力、POD 活力、SOD 活力、CAT 活力和总抗氧化能力的降低。因此, 0 ℃ 贮藏可有效延长黄桃的保鲜期, 如果 0 ℃ 贮藏与其他的杀菌措施 (如臭氧) 或包装 (如自发气调) 效果将更好。

参考文献

- [1] LIU H, JIANG W, CAO J, et al. Effect of chilling temperatures on physiological properties, phenolic metabolism and antioxidant level accompanying pulp browning of peach during cold storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 255: 175–182.
- [2] 郭长江, 高蔚娜, 谢宗恺, 等. 中国蔬菜、水果抗氧化作用与有效成分的研究进展[J]. *生命科学*, 2015, 27(8): 1000–1004. [GUO C J, GAO W N, XIE Z K, et al. Research advances in antioxidant capacity and components of vegetables and fruits in China[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2015, 27(8): 1000–1004.]
- [3] 梁燕, 王彬, 张祖君, 等. 桃果实保鲜研究综述[J]. *山东林业科技*, 2018, 48(6): 82–89. [LIANG Y, WANG B, ZHANG Z J, et al. Research review on peach fruit preservation[J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2018, 48(6): 82–89.]
- [4] 侯佳迪, 朱丽娟, 王军萍, 等. 1-MCP 处理期不同成熟度‘霞晖 8 号’桃果实贮藏中品质和生理生化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(17): 326–334. [HOU J D, ZHU L J, WANG J P, et al. Effect of 1-MCP on peach fruit quality and physio-biochemical characteristics of 'Xiahui 8' with different maturity during storage

- [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(17): 326–334.]
- [5] ZHAO Y, LI Y F, YIN J J. Effects of hot air treatment in combination with *Pichia guilliermondii* on postharvest preservation of peach fruit[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(2): 647–655.
- [6] 王友升, 王胜杰, 陈小燕, 等. 1-MCP 和水杨酸对大久保桃果实衰老中挥发性物质的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(10): 214–221. [WANG Y S, WANG S J, CHEN X Y, et al. Effect of 1-MCP and salicylic acid on volatile substances in the aging of Dakubo peach fruit[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16(10): 214–221.]
- [7] 周慧娟, 杜纪红, 张夏南, 等. UVC 预处理对冷藏和货架期间‘锦香’黄桃挥发性物质组分及含量的影响[J]. *上海农业学报*, 2021, 37(3): 91–99. [ZHOU H J, DU J H, ZHANG X N, et al. Effects of UVC pretreatment on composition and content of volatile substances of ‘Jinxiang’ yellow peach during cold storage and shelf-life[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2021, 37(3): 91–99.]
- [8] BRUMMELL D A. Cell wall metabolism during the development of chilling injury in cold-stored peach fruit: Association of mealiness with arrested disassembly of cell wall pectins[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(405): 2041–2052.
- [9] 邓丽, 曾文芳, 刘慧, 等. 低温贮藏过程中溶质和硬质桃冷害发生的生理差异[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(4): 635–641. [DENG L, ZENG W F, LIU H, et al. Physiological differences in chilling injury between stony hard and melting peaches during cold storage[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(4): 635–641.]
- [10] ZHAO H D, LIU B D, ZHANG W L, et al. Enhancement of quality and antioxidant metabolism of sweet cherry fruit by near-freezing temperature storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 147: 113–122.
- [11] ZHAO H D, JIAO W X, CUI K B, et al. Near-freezing temperature storage enhances chilling tolerance in nectarine fruit through its regulation of soluble sugars and energy metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2019, 289: 426–435.
- [12] ZHOU R, LI Y F, YAN L P, et al. Effect of edible coatings on enzymes, cell-membrane integrity, and cell-wall constituents in relation to brittleness and firmness of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua) during storage[J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(2): 569–575.
- [13] LIU H, JIANG W B, CAO J K, et al. A combination of 1-methylcyclopropene treatment and intermittent warming alleviates chilling injury and affects phenolics and antioxidant activity of peach fruit during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 229: 175–181.
- [14] 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, 39–41. [CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experimental guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007, 39–41.]
- [15] GAO Y, KAN C N, WAN C P, et al. Quality and biochemical changes of navel orange fruits during storage as affected by cinnamaldehyde-chitosan coating[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 239: 80–86.
- [16] WANG L, SHAN T M, XIE B, et al. Glycine betaine reduces chilling injury in peach fruit by enhancing phenolic and sugar metabolisms[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 530–538.
- [17] 吕群金, 衣杰荣, 丁勇. Folin-Ciocalteu 比色法测定杨桃的多酚含量[J]. *湖南农业科学*, 2009(7): 99–101. [LÜ Q J, YI J R, DING Y, et al. Determination of polyphenol in carambola by Folin-Ciocalteu colorimetry[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009(7): 99–101.]
- [18] JIA Z S, TANG M C, WU J M. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals[J]. *Food Chemistry*, 1999, 64(4): 555–559.
- [19] NGUYEN T B T, KETSA S, DOORN W G V. Relationship between browning and the activities of polyphenoloxidase and phenylalanine ammonia lyase in banana peel during low temperature storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 30(2): 187–193.
- [20] YU C M, LV C G, SHI Y. The effect of steviol glycosides blending liquid on senescence after flowering in upland rice[J]. *Journal of Agronomy*, 2009, 8(3): 113–116.
- [21] BRAND-WILLIAMS W M, CUVELIER M E, BERSET C L W T. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 1995, 28(1): 25–30.
- [22] WANG L J, WU J, WANG H X, et al. Composition of phenolic compounds and antioxidant activity in the leaves of blueberry cultivars[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 16: 295–304.
- [23] BENZIE I F, STRAIN J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay[J]. *Analytical Biochemistry*, 1996, 239(1): 70–76.
- [24] 寇渐移. 不同贮藏温度对‘锦绣’黄桃果实色泽的影响[D]. 华中农业大学, 2016. [KOU X Y. Influences of different storage temperatures on color of ‘Jinxu’ peach fruits[D]. Huazhong Agricultural University, 2016.]
- [25] HUAN C, AN X J, YU M L, et al. Effect of combined heat and 1-MCP treatment on the quality and antioxidant level of peach fruit during storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 145: 193–202.
- [26] MA Y Y, HUANG D D, CHEN C B, et al. Regulation of ascorbate-glutathione cycle in peaches via nitric oxide treatment during cold storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 247: 400–406.
- [27] BLOKHINA O, VIROLAINEN E, VFAGERSTEDT K. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: A review[J]. *Annals of Botany*, 2003, 91(2): 179–194.
- [28] ZHANG Y, GONG Y, CHEN L, et al. Hypotaurine delays senescence of peach fruit by regulating reactive oxygen species metabolism[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 253: 295–302.
- [29] CAO S F, YANG Z F, CAI Y T, et al. Fatty acid composition and antioxidant system in relation to susceptibility of loquat fruit to chilling injury[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(4): 1777–1783.