徐莹, 王文月, 李旋, 等. 不同贮藏时间‘黄太平’沙果品质评价及加工适宜性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 315−327. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030133

XU Ying, WANG Wenyue, LI Xuan, et al. Evaluation of Quality and Processing Suitability of 'Huang Taiping' Crabapples during Different Storage Periods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 315−327. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030133

· 分析检测 ·

# 不同贮藏时间‘黄太平’沙果品质评价及加工适宜性研究

徐　莹[1], 王文月[1], 李　旋[1], 苏月莹[2], 毕金峰[1,*]

（1.中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工重点实验室, 北京 100193;
2.兴安盟农畜产品质量安全中心, 内蒙古乌兰浩特 137400）

**摘　要:** 本研究以不同贮藏时间的‘黄太平’沙果为研究对象，利用离子色谱、高效液相色谱、傅里叶红外光谱等技术分析不同贮藏时间沙果感官理化和营养品质的变化，建立各指标改变与品质特性变化的关联，评估沙果的加工适宜性。研究发现沙果在贮藏期间色泽明显变暗，硬度降低。有机酸含量减少，其中苹果酸含量降幅最大，达 44.56%。山梨糖醇和蔗糖含量分别下降 28.53% 和 67.93%，果糖和葡萄糖含量无显著变化。总酚含量呈先升后降趋势，25 d 时达 3.41 mg GAE/g，较鲜果上升了 17.15%。此外，抗氧化能力及多酚氧化酶活性持续增强。果胶组分中碱溶性果胶（NSP）得率和线性度下降，NSP 与螯合性果胶（CSP）分子量增加，水溶性果胶（WSP）和 NSP 的支链化程度变化显著。主成分分析结果表明不同贮藏时间沙果感官理化和营养品质具有显著差异，果实色泽与总酚、可溶性糖、有机酸含量及果胶性质和结构密切相关，果实硬度与有机酸及果胶含量密切相关。基于沙果贮藏特性动态变化规律，前期（0~2 d）优先开发果汁/果酱，中期（2~18 d）适宜加工果脯/发酵制品，末期（18 d 后）可加工果泥/功能提取物。本研究结果为沙果加工原料的品质选择提供了重要参考。

**关键词:** 沙果, 品质, 果胶, 贮藏, 加工适宜性

**中图分类号:** TS255.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0315−13

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025030133

本文网刊:

# Evaluation of Quality and Processing Suitability of 'Huang Taiping' Crabapples during Different Storage Periods

**XU Ying[1], WANG Wenyue[1], LI Xuan[1], SU Yueying[2], BI Jinfeng[1,*]**

（1.Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;
2.Agricultural and Livestock Product Quality and Safety Center of Hinggan League, Ulanhot 137400, China）

**Abstract:** This study evaluated the processing suitability of crabapple by investigating the correlation of changes in physiological and nutritional quality of 'Huang Taiping' with different storage period upon the quality indicator examined using a combination of analytical methods, including ion chromatography (IC), high-performance liquid chromatography (HPLC), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Notable storage-related changes included significant color darkening and textural deterioration. Organic acid content decreased markedly, especially malic acid, which declined by 44.56%. Sugar levels exhibited divergent trends: sorbitol and sucrose decreased substantially by 28.53% and 67.93%, respectively, whereas fructose and glucose levels remained relatively stable. Total phenolic content followed a biphasic trend, peaking at 25 days with a 17.15% increase compared with fresh fruit, followed by a gradual decline. Antioxidant

**收稿日期:** 2025−03−13

**基金项目:** 内蒙古自治区科技计划项目“沙果干营养健康休闲食品提质增效加工关键技术研发”（2023KJHZ0036）; 国家重点研发计划项目（子课题）“寒地特色水果营养功能复合稳态制造关键技术与装备研究及应用示范”（2022YFD1600505-5）。

**作者简介:** 徐莹（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 沙果加工品质形成和调控机理, E-mail: xyymg1101@163.com。

*** 通信作者:** 毕金峰（1970−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工制造与营养健康理论技术, E-mail: bjfcaas@126.com。

capacity increased concurrently with elevated polyphenol oxidase activity. Changes in pectin structure were also observed, including reduced yield and linearity of $Na_2CO_3$-soluble pectin (NSP), along with increased molecular weights of both NSP and CDTA-soluble pectin (CSP). FTIR analysis revealed significant branching alterations in the structures of water-soluble pectin (WSP) and NSP. Principal component analysis identified distinct quality clusters across storage period, with color parameters closely associated with phenolic compounds, sugars, organic acids, and pectin properties and structures. Firmness variations showed strong correlated with malic acid and CSP levels. Based on these dynamic storage characteristics of crabapple, processing recommendations were staged as follows: juice/jam production was optimal during the initial phase (0~2 days), preserved/fermented products were suitable for the mid-term phase (2~18 days), while fruit puree and functional extracts were recommended after 18 days of storage. These findings offer essential biochemical insights for improving raw material selection in the crabapple processing industry.

**Key words:** crabapple; quality; pectin; storage; processing suitability

沙果(*Malus asiatica*)又名花红果、林檎,是一种多年生的蔷薇科苹果属植物,根系强健,生长旺盛,适生范围广[1]。在我国沙果栽培历史悠久,主要分布于西北、华北以及东北地区[2]。沙果营养价值丰富,其果实含有较高含量的维生素 C、酚类化合物、膳食纤维,以及镁、钙、铁等多种矿物质[3−4],其中沙果多酚具有抗氧化、抗炎、抗癌等多种生物活性[5−8],沙果膳食纤维能够促进肠道蠕动,对胆固醇和亚硝酸根离子具有较强的吸附能力[9−10]。沙果属于典型的呼吸跃变型果实[11],新鲜沙果采摘后一般置于 4(±2)℃冷库待加工,沙果果实贮藏过程中常出现肉质沙化,硬度下降,丧失酸甜口感,果皮、果肉褐变等现象,严重影响了沙果加工工艺和产品品质。由于沙果酸涩口感,不宜鲜食,目前多用于果干、果汁等辅餐调味食品加工,而沙果产品的品质受多种因素的影响,其中,沙果加工适宜性是由其原料品质特性及其加工产品品质需求所决定的。因此,加工适宜性评价是贯穿原料特性、加工工艺和产品品质的关键,系统的加工适宜性评价有助于实现原料分级高效利用、工艺精准调控及产品质量提升,从而减少原料损耗并提高产品附加值。

研究表明,沙果贮藏期间的品质变化与乙烯的合成、水杨酸代谢密切相关,而褪黑素浸泡处理可以有效延缓沙果品质的改变[1]。此外,果实的生物活性物质和抗氧化性的改变也是贮藏过程中的重要的营养品质变化,低温低氧贮藏可以缓解沙果果实的活性物质消耗[12]。然而在低温条件下,大多数水果的呼吸作用并未完全停止,其品质与生理特性的演变依然错综复杂。Wang 等[13] 研究表明随贮藏时间的延长,‘富士’苹果失重率增加,可滴定酸含量降低,总酚及还原糖含量增加,抗自由基能力及抗氧化酶活性增加。王震等[14] 研究表明贮藏后‘鲁丽’‘嘎啦’苹果的硬度、可溶性固形物、DPPH 自由基清除率均下降,而多聚半乳糖醛酸酶(PG)、脂氧合酶(LOX)活性上升。然而,沙果与苹果在贮藏期间的感官特性、理化指标及营养组分动态变化具有显著差异,主要归因于二者果实质地(细胞壁结构/木质化程度)及代谢特征(糖酸比/酚类物质积累模式)的不同。针对沙果等小宗特色水果,现有研究多聚焦于采后保鲜及加工工艺,而鲜有涉及沙果贮藏期间感官理化和营养品质变化及其与加工适宜性评价关联的相关研究。

本研究系统地从感官理化和营养品质方面阐述贮藏过程中的‘黄太平’沙果果实综合品质变化规律并评估其加工适宜性,建立了贮藏时间与加工适宜性的关联。采用离子色谱、液相色谱以及傅里叶红外光谱等技术,通过果皮和果肉色泽、质构特性表征其感官理化品质;并通过糖、酸、多酚、果胶组分等特征含量变化揭示其营养品质变化。采用主成分分析法进行不同感官理化指标与果实品质特性的关联分析,以期为沙果原料在感官理化及营养品质变化及加工用原料选择方面提供一定的理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

‘黄太平’沙果于 2023 年 9 月盛果期,自内蒙古兴安盟科右前旗采摘,选择新鲜,颜色体积均匀,无明显机械损伤,无虫害、成熟度一致的果实。冷链运输,4(±2)℃,70%RH 条件贮藏;甲醇　色谱级,美国 Thermo Fisher Scientific 公司;莽草酸、草酸、苹果酸、柠檬酸、酒石酸　色谱级,上海源叶生物科技有限公司;福林酚试剂　北京索莱宝科技有限公司;反式-1.2-环已二胺四乙酸(一水合物)　上海麦克林生化科技有限公司;多酚氧化酶(PPO)试剂盒、果胶甲酯化酶(PG)试剂盒　苏州格锐思生物科技有限公司。

CM-5 分光测色计　日本 Konica Minolta 公司;BCA224l-10CN 分析天平　德国赛多利斯科学仪器有限公司;DK-S26 电热恒温水浴锅　上海精宏实验设备有限公司;Q-500Z 超声波发生器　昆山市超声仪器有限公司;UV-1800 紫外分光光度计　日本岛津公司;ICS-3000 离子色谱仪　美国 DIONEX 公司;1525 高效液相色谱仪器　美国 Waters 公司;916 Ti-touch 自动电位滴定仪　瑞士万通中国有限公司;BLK-FD-1 真空冷冻干燥机　江苏博莱客冷冻科技发展有限公司;DAWN EOS 多角度激光散射仪　美国 WyAtt 公司;傅里叶变换红外吸收光谱仪　德国 Bruker 公司;EMUC7 酶标仪　日本徕卡公司;TA.XT 2i/50 物性分析仪　英国 Stable Micro Systems 公司。

## 1.2　实验方法

1.2.1　样品制备　沙果原料去除破碎、变色、有明显机械损伤的果实，普通塑料袋包装，立即置于 4(±2) ℃、湿度 70% 的冷库贮藏，于 0、2、4、11、18、25 d 随机取沙果样品 30 个左右，切分为两瓣后，液氮速冻，−80 ℃ 冻藏待用。

1.2.2　色泽测定　参考方贵平等[15] 的方法采用 CM-5 分光测色计对沙果的果皮和果实内部的 $L^*$、$a^*$和 $b^*$值进行测定，以白板和黑板进行仪器校准，在白板基础上进行沙果样品色泽测定。每个样品做 3 次平行试验。

1.2.3　质构测定　参照 Hu 等[16] 的方法采用物性分析仪对沙果进行测定，参数指标为硬度、黏附性、弹性、咀嚼性、胶着性、内聚性、回复性。在 TPA 模式下采用 P/6 探头进行压缩实验，测试前速率 1 mm/s，测中速率 1 mm/s，测后速率 1 mm/s；触发力 5 N，形变量为 10%；每次测试后擦拭清理探头，每组每个样品平行测定 3 次，结果取均值作为最终测定结果，并记录数据。

1.2.4　可滴定酸及有机酸含量测定　参考李怡诺等[17] 的方法对可滴定酸和有机酸含量进行测定。

准确称取样品 2 g，加入 10 mL 蒸馏水，匀浆后再次加入 30 mL 蒸馏水，置于沸水浴中提取 30 min，定容至 50 mL，10000 r/min 4 ℃ 离心 10 min，取上清作为提取液。取 15 mL 提取液，加入 15 mL 蒸馏水，用 0.05 mol/L 氢氧化钠标准溶液进行电位滴定，以 pH8.1 为滴定终点，记录氢氧化钠标准溶液消耗体积 V。

有机酸组分定性定量通过高效液相色谱法进行，−80 ℃ 沙果样品取出后，粉碎，称取 8 g 沙果粉末，加入 15 mL 蒸馏水，充分混合后，600 W 超声提取 1 h，10000 r/min 4 ℃ 离心 10 min，取上清液，重复三次，定容至 50 mL 作为提取液，提取液过膜(0.45 μm 水系滤膜)备用。色谱条件：流动相：0.01 mol/L 磷酸二氢钾(pH2.5)，流速：0.8 mL/min，柱温：40 ℃，进样量：10 μL。有机酸含量色谱分析标准曲线如表 1 所示。

表 1　沙果果实有机酸含量色谱分析标准曲线
Table 1　Standard curve for chromatographic analysis of organic acid content in crabapple

| 有机酸 | 标准曲线 | 拟合度$R^2$ |
|---|---|---|
| 草酸 | y=9298.8x−3557.9 | 0.9997 |
| 酒石酸 | y=1015.2x−994.31 | 0.9999 |
| 莽草酸 | y=3996.8x−35321 | 0.9991 |
| 柠檬酸 | y=1E+06x−7550.7 | 0.9997 |
| 苹果酸 | y=575937x+10901 | 0.9996 |

1.2.5　可溶性糖含量测定　参照石彩玲等[18] 的方法采用高效离子色谱对可溶性糖组分进行分析。−80 ℃ 沙果样品取出后，粉碎，称取 3 g 沙果粉末，加入 20 mL 蒸馏水，充分混合后，600 W 超声提取 30 min，10000 r/min 4 ℃ 离心 10 min，取上清液，定容至 25 mL 作为提取液，将提取液稀释 200 倍，过膜(0.45 μm 水系滤膜)备用。色谱条件：色谱柱：分析柱：Carbo PacTMPA10 4×250 mm analytical；淋洗液：200 mmol/L NaOH；流速：1 mL/min；进样体积：10 μL；柱温：35 ℃；检测器：脉冲安培检测器，金电极。梯度洗脱条件：A 相为水，B 相为 200 mmol/L NaOH 溶液，0~25 min，91% A，9% B；25~25.1 min，20% A，80% B；25.1~35 min，20% A，80% B；35~35.1 min，91% A，9% B；35.1~45 min，91% A，9% B。可溶性糖含量色谱分析标准曲线如表 2 所示。

表 2　沙果果实可溶性糖含量色谱分析标准曲线
Table 2　Standard curve for chromatographic analysis of soluble content in crabapple

| 可溶性糖 | 标准曲线 | 拟合度$R^2$ |
|---|---|---|
| 葡萄糖 | y=1.3160x | 0.9978 |
| 蔗糖 | y=0.6473x | 0.9999 |
| 果糖 | y=0.7002x | 0.9999 |
| 山梨糖醇 | y=1.1741x | 0.9996 |

1.2.6　总酚含量及抗氧化能力测定　参照李文静等[19] 的方法进行总酚及抗氧化能力测定。

样液制备：−80 ℃ 沙果样品取出后，粉碎，称取 1 g 沙果粉末，70% 乙醇 600 W 超声提取 30 min，10000 r/min 4 ℃ 离心 10 min，取上清液，重复提取三次，合并上清，用蒸馏水定容至 100 mL 作为提取液，−20 ℃ 保存。

总酚含量利用福林酚法测定。取 200 μL 提取液加入 800 μL 蒸馏水和 1 mL 10% 福林酚试剂，摇匀后加入 1 mL 7.5% 碳酸钠溶液和 5 mL 蒸馏水，混合均匀，避光静置 30 min。以没食子酸为标样制作标准曲线，测定 765 nm 下的吸光值。总酚含量以没食子酸当量表示(mg GAE/g)。

DPPH 自由基清除能力：取 2 mL 提取液，加入 4 mL DPPH 溶液完全混合，室温避光静置 30 min，于 517 nm 处测定吸光值。

FRAP 铁离子还原能力：取 0.1 mL 提取液，加入 6 mL FRAP 工作液，充分混匀，37 ℃ 保温 30 min，于 593 nm 处测定吸光值。

1.2.7　酶活测定　PPO 酶活测定：参照多酚氧化酶(PPO)试剂盒说明书，测定样品的 PPO 酶活。称取约 1 g 沙果组织样本，加入经预冷的 5 mL 纯乙醇，冰浴匀浆，4 ℃ 放置 10 min，10000 r/min 4 ℃ 离心 10 min，弃上清，重复两次，向沉淀中加入 1 mL 提取液，涡旋混匀，10000 r/min 4 ℃ 离心 5 min，取上清。在 96 孔板中依次加入：试剂一 170 μL；试剂二 50 μL；样本 50 μL，混匀后于 420 nm 处读取 A1 值，5 min 后读取 A2 值，ΔA=A2−A1，将每分钟每克组织在反应体系中使 420 nm 处吸光值变化 0.005 定义为一个酶活单位(U)。

PG 酶活测定：参考果胶甲酯化酶(PG)试剂盒说明书，测定样品的 PG 酶活。称取约 1 g 沙果组织样本，加入经预冷的 1 mL 95% 乙醇，冰浴匀浆，4 ℃ 放置 10 min，10000 r/min 4 ℃ 离心 5 min，弃上清，沉淀中加入经预冷的 1 mL 80% 乙醇，4 ℃ 放置 10 min，10000 r/min 4 ℃ 离心 5 min，弃上清，向沉淀中加入 1 mL 提取液，涡旋混匀，4 ℃ 放置 10 min，10000 r/min 4 ℃ 离心 10 min，取上清。测试管中依次加入样本 20 μL；试剂一 130 μL，对照管中加入样本 20 μL；试剂二 130 μL，二者置于 40 ℃ 水浴 30 min 后，加入试剂三 150 μL，沸水浴 5 min，冰浴冷却，取 200 μL 于 96 孔板中，540 nm 处测吸光值 A，将 40 ℃ 时每克样本每小时分解果胶酸产生 1 mg 半乳糖醛酸定义为一个酶活单位(U)。

1.2.8 果胶提取 参照 Yu 等[20] 的方法进行果胶组分的提取和分离。

细胞壁物质制备：−80 ℃ 沙果样品取出后，粉碎，称取 100 g 沙果粉末，加入 900 mL 70% 乙醇，磁力搅拌 1 h，抽滤，滤渣加入 900 mL 70% 乙醇，磁力搅拌 2.5 h，抽滤，滤渣加入 900 mL 丙酮，磁力搅拌 1 h，抽滤，滤渣 40 ℃ 烘干过夜，得到细胞壁物质(alcohol insoluble residue，AIR)。

水溶性果胶：取 1 g AIR 于蒸馏水中搅拌煮沸 20 min，冷却抽滤，滤液和冲洗液混合定容至 250 mL 即为水溶性果胶(water soluble pectin，WSP)提取液，提取液装入 3.5 kD 透析袋，于蒸馏水中透析 72 h，一天换水 3 次，将透析液倒入铝盒，−80 ℃ 冰箱冷冻 6 h，冻干得到 WSP，称重，置于干燥器中存放。

螯合性果胶：WSP 萃取残渣中加入 0.05 mol/L 环己烷-反式-1,2-二胺四乙酸溶液(含 0.1 mol/L 乙酸钾，pH6.5)，磁力搅拌 15 min，28 ℃ 水浴摇床振荡 6 h，抽滤，滤液和冲洗液混合定容至 250 mL 即为螯合性果胶(CDTA soluble pectin，CSP)提取液，提取液装入 3.5 kD 透析袋，透析 72 h(前 36 h 用 0.1 mol/L 的氯化钠溶液，后 36 h 用蒸馏水)，将透析液倒入铝盒，−80 ℃ 冰箱冷冻 6 h，冻干得到 CSP，称重，置于干燥器中存放。

碱溶性果胶：CSP 萃取残渣中加入 180 mL 0.05 mol/L 碳酸钠(含 0.02 mol/L 硼氢化钠)，4 ℃ 恒温搅拌 16 h，28 ℃ 水浴摇床 6 h，抽滤，滤液和冲洗液混合定容至 250 mL 即为碱溶性果胶($Na_2CO_3$ soluble pectin，NSP)提取液，提取液装入 3.5 kD 透析袋，于蒸馏水中透析 72 h，一天换水 3 次，将透析液倒入铝盒，−80 ℃ 冰箱冷冻 6 h，冻干得到 NSP，称重，置于干燥器中存放。

1.2.9 果胶性质测定 基于实验过程中原料感官观察及相关指标变化，选择 0、11、25 d 果胶进行性质及结构测定。参照 Hu 等[21] 的方法对果胶中性糖及结构进行测定。

1.2.9.1 中性糖含量测定 采用高效离子色谱对果胶的中性糖进行分析，称取 10 mg 果胶加入三氟乙酸并充氮 1 min 后，于 120 ℃ 水解 1.5 h。氮吹至样品干燥，再加入 10 mL 超纯水复溶，过膜待测。色谱条件：色谱柱：分析柱：CarboPacTMPA20 3×150mm analytical；淋洗液：250 mmol/L NaOH 和 1 mol/L NaAC；流速：0.5 mL/min；进样体积：10 μL；柱温：35 ℃；检测器：脉冲安培检测器，金电极；梯度洗脱条件：A 相为水，B 相为 250 mmol/L 的 NaOH，C 为 1 mol/L 的 NaAC，0~20 min，94% A，6% B，0% C；20~20.1 min，89% A，6% B，5% C；20.1~35 min，74% A，6% B，20% C；35~35.1 min，20% A，80% B，0% C；35.1~45 min，20% A，80% B，0% C；45~45.1 min，94% A，6% B，0% C；45.1~55 min，94% A，6% B，0% C。果胶中的中性糖，包括岩藻糖(Fuc)、鼠李糖(Rha)、阿拉伯糖(Ara)、半乳糖(Gal)、葡萄糖(Glu)、木糖(Xyl)、半乳糖醛酸(GalA)和葡萄糖醛酸(GluA)采用外标法进行定量分析。果胶中性糖含量色谱分析标准曲线如表 3 所示。

表 3 沙果果实果胶中性糖含量色谱分析标准曲线

Table 3 Standard curve for chromatographic analysis of neutral sugar content in pectin of crabapple

| 中性糖 | 标准曲线 | 拟合度$R^2$ |
|---|---|---|
| 岩藻糖 | y=1.7325x | 0.9999 |
| 鼠李糖 | y=1.4793x | 0.9999 |
| 阿拉伯糖 | y=1.7991x | 0.9999 |
| 半乳糖 | y=1.6986x | 0.9999 |
| 葡萄糖 | y=1.9405x | 0.9998 |
| 木糖 | y=2.2038x | 0.9999 |
| 半乳糖醛酸 | y=0.5104x | 0.9999 |
| 葡萄糖醛酸 | y=0.9042x | 0.9999 |

1.2.9.2 分子量测定 参照 Njoroge 等[22] 方法采用十八角度激光散射仪对果胶的重均分子量(Mw)和数均分子量(Mn)进行测定分析。三种组分的果胶精确称取 10 mg，用 5 mL 0.1 mol/L 氯化钠溶液溶解过夜，过膜备用。取制备的果胶样品 200 μL 注入 TSK 凝胶柱(G4000PWxl)，色谱条件：流动相：0.1 mol/L NaCl 溶液，流速：0.5 mL/min，进样量：100 μL。采用 ASTRA 5.3.4 软件对 Mw、Mn 和 Mw/Mn 值进行分析。

1.2.9.3 傅里叶红外光谱测定 采用傅里叶变换红外光谱仪测定果胶结构。取约 1 mg 果胶与 100 mg KBr 研磨，混匀，压片扫描测定。扫描分辨率设置为 4 $cm^{-1}$，累计扫描 64 次，扫描波数范围 4000~400 $cm^{-1}$。

### 1.3 数据处理

使用 SPSS 27.0 软件对数据进行统计分析和因子分析，使用单因素(ANOVA)检验进行显著性和差异性检验，使用 Origin 64 和 Excel 作图。为确保结果的可靠性，所有实验均进行三次重复。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同贮藏期沙果表观色泽变化与加工适宜性

沙果果实的色泽是影响其品质的重要感官指标，同时果实大面积的褐变将影响加工产品的性状及品质。如图 1(A)所示果实外观随着贮藏时间延长略微变黄，果肉没有肉眼可辨的色泽改变。如图 1(B)(C)所示，沙果贮藏过程中果皮亮度($L^*$)有所下降，从第 11 d 开始与鲜果有显著差异($P$<0.05)。$b^*$值在贮藏初期有所上升，即果皮颜色变黄，这可能是由于果实贮藏过程中花青素降解和类胡萝卜素的积累导致的[23]。果肉 $a^*$、$b^*$值无明显变化，$L^*$值有所下降。研究表明沙果在贮藏过程中果皮、果肉均存在轻微的变暗现象可能是由于沙果果肉水分流失及发生组织褐变等因素导致的，而果肉组织褐变的主要原因是酶促褐变[24]。综上，沙果在 25 d 的贮藏中即发生了肉眼可辨的果皮色泽的改变，不适于鲜果销售；同时果肉发生的轻微变暗现象会直接影响果汁/果浆制品的色泽品质。

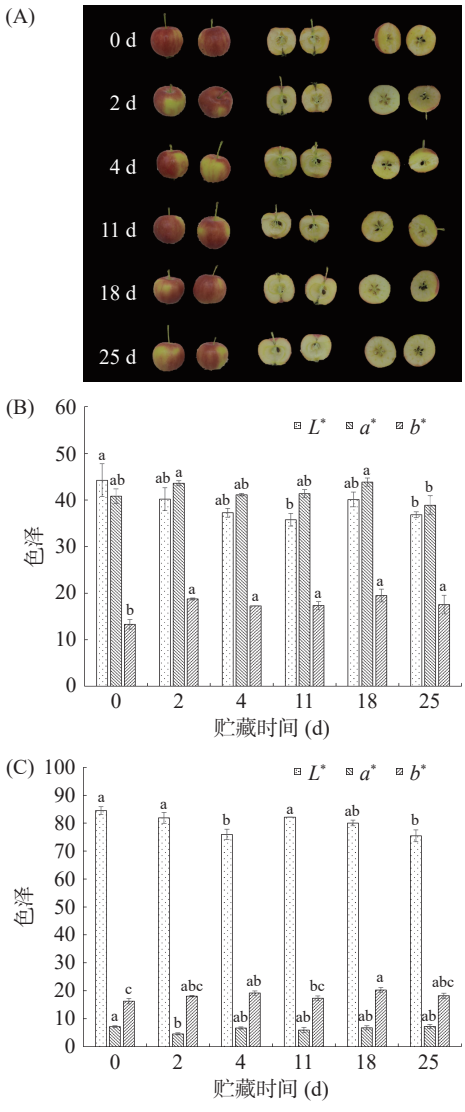



图 1　不同贮藏时间沙果表观、横切、纵切图(A)以及果皮(B)、果肉(C)色泽变化

Fig.1　Appearance, cross section and longitudinal section (A), color changes of pericarp (B) and pulp (C) of crabapples in different storage times

注：不同小写字母表示不同贮藏时间差异显著($P$<0.05)，图 2~图 6、图 8 同。

### 2.2　不同贮藏期沙果质地品质变化与加工适宜性

沙果的质地特性包括硬度、松散度和弹性等，与其口感紧密相关。硬度作为评价沙果质地和贮藏稳定性的关键指标，直接反映了沙果的物理结构特性，而口感则是对沙果质地特性的主观感知，间接体现质构品质特性[25−26]。随着贮藏时间的延长，沙果硬度、咀嚼性、胶着性均呈现下降趋势，回复性、内聚性、弹性呈现上升趋势(表 4)。沙果果实硬度下降显著，从贮藏开始时的 1725.57 g 下降到 25 d 时的 1249.58 g，下降了 27.58%($P$<0.05)，这可能是由于沙果贮藏时内部水分流失、有机物质消耗、细胞壁降解导致支撑力降低、果实组织软化[27] 所引起的。同时，胶着性、回复性、内聚性以及咀嚼性等质地指标随贮藏时间延长也呈现规律性变化，这与纤维素、果胶等大分子作用密切相关。其中，纤维素在纤维素酶(Cx)作用下发生链断裂，导致细胞壁机械支撑力下降，直接影响果实的回复性，而果胶物质则发生多聚半乳糖醛酸酶(PG)和 $\beta$-半乳糖苷酶($\beta$-Gal)介导的脱酯化与解聚反应，直接削弱了细胞间的粘结力，这是硬度、咀嚼性显著下降的主要原因；同时，这一过程也引发了细胞壁网络的松弛与重组，可能导致了内聚性与弹性数值的上升趋势[28−29]。基于硬度等质构品质特性的变化，贮藏中后期(贮藏 2 d 后)的沙果果实出现软化，原有脆硬口感丧失，多数已不适宜鲜食，同时由于硬度降低、回复性升高导致出汁效果降低不适宜制汁/浆，此外组织软化支撑力降低也不利于进一步切片及制干加工。果酱、果泥等无颗粒、形状要求的制品可作为质地改变后沙果加工的方向。

### 2.3　不同贮藏期沙果可滴定酸及有机酸含量变化与加工适宜性

有机酸作为果实中主要的风味和营养物质，其含量适当时可保证果实有较好的口感，并提供丰富的营养价值[30]。由图 2(A)可知，沙果鲜果可滴定酸含量为 25.39 mmol/L，沙果贮藏过程中，可滴定酸含量呈现先增加后减少的趋势，这可能与贮藏期间沙果呼吸速率的增加有关，较高的呼吸速率可能促进了果实内部有机酸等酸性物质的降解，进而导致了可滴定酸水平的下降[31]。对于有机酸组成，沙果果实中苹果酸含量最高，其次是柠檬酸、酒石酸、草酸、莽草酸，苹果酸的含量变化是影响沙果果实中有机酸变化的重要因素。贮藏过程中，沙果五种有机酸含量均呈现整体下降趋势，其中酒石酸、莽草酸呈现持续下降趋势，草酸、柠檬酸以及苹果酸贮藏 2 d 时含量有所上升，贮藏 4 d 出现急剧下降，可能由于苹果酸、柠檬酸等参与细胞呼吸作用，果实出现呼吸高峰，二者降解加快，含量大幅降低[32]。沙果鲜果莽草酸、草酸、

表 4 不同贮藏时间沙果质构变化

Table 4 Changes of the texture of crabapples in different storage times

| 贮藏时间(d) | 硬度(g) | 黏附性(g) | 回复性(%) | 内聚性 | 弹性(%) | 胶着性 | 咀嚼性 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1725.57±56.99[a] | −1.87±0.40[a] | 23.01±2.73[a] | 0.45±0.03[a] | 64.56±2.09[a] | 784.69±74.40[a] | 509.74±65.61[a] |
| 2 | 1669.64±113.24[a] | −1.46±0.13[a] | 21.95±1.46[a] | 0.45±0.06[a] | 62.07±0.69[a] | 784.16±88.77[a] | 490.58±74.61[a] |
| 4 | 1523.91±176.83[ab] | −2.13±0.35[a] | 22.75±2.20[a] | 0.48±0.03[a] | 62.42±3.91[a] | 745.40±126.14[a] | 472.35±96.86[a] |
| 11 | 1208.97±53.52[b] | −1.54±0.07[a] | 21.40±3.41[a] | 0.49±0.08[a] | 62.84±3.88[a] | 679.29±43.15[a] | 467.32±32.51[a] |
| 18 | 1229.77±95.35[b] | −1.23±0.08[a] | 27.09±1.49[a] | 0.54±0.01[a] | 68.83±1.18[a] | 669.79±54.24[a] | 462.28±44.54[a] |
| 25 | 1249.58±152.88[b] | −1.25±0.45[a] | 26.49±0.93[a] | 0.54±0.02[a] | 68.46±0.51[a] | 674.66±69.47[a] | 461.85±47.43[a] |

注: 不同小写字母表示不同贮藏时间差异显著($P$<0.05)。

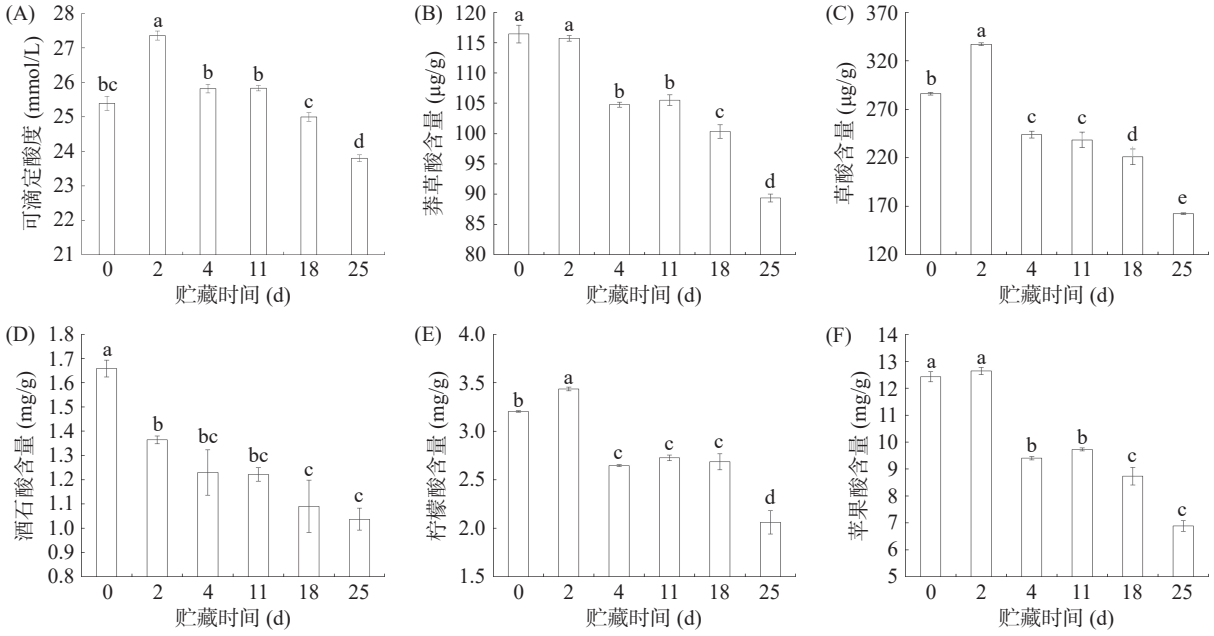



图 2 不同贮藏时间沙果可滴定酸及有机酸含量变化

Fig.2 Changes of titratable acid and organic acid content of crabapples in different storages

注: A: 可滴定酸; B: 莽草酸; C: 草酸; D: 酒石酸; E: 柠檬酸; F: 苹果酸。

酒石酸、柠檬酸、苹果酸含量分别为 0.12、0.29、1.66、3.20、12.43 mg/g。贮藏 4 d 后, 五种有机酸含量分别下降 10.01%、14.74%、25.81%、17.39% 以及 24.31%, 贮藏末期(25 d)五种有机酸的含量分别降低了 23.23%、43.24%、37.46%、35.70%、44.56%, 其中苹果酸含量下降最快。有研究表明苹果酸在植物碳水化合物代谢的调节、果实成熟和采后软化中起着关键作用[33]。因此, 沙果采后贮藏 2 d 具有更高的有机酸含量和丰富的有机酸组成, 实现酸味物质最大化保留与典型风味的精准表达, 更适宜鲜食和制汁/浆加工。

### 2.4 不同贮藏期沙果可溶性糖含量变化与加工适宜性

沙果果实中主要的可溶性糖有葡萄糖、蔗糖以及果糖, 主要的糖醇是山梨糖醇。这些糖可以相互转化并作为呼吸代谢的基质, 从而影响水果的风味、品质和保质期[34−35]。沙果果实中果糖含量最高, 其次是葡萄糖。由图 3 可知, 沙果贮藏过程中蔗糖含量逐渐降低, 而葡萄糖含量基本不变, 果糖呈现波动趋势, 山梨糖醇含量随着贮藏期的延长逐渐下降。其中从 0 d 到 25 d 蔗糖含量由 18.71 mg/g 降低至 6.00 mg/g, 降低了 67.93%, 山梨糖醇含量由 6.17 mg/g 降低至 4.41 mg/g, 降低了 28.53%。有研究表明山梨糖醇在果实中被山梨糖醇脱氢酶催化生成果糖, 而蔗糖在合成酶或转化酶的作用下迅速分解成果糖和葡萄糖。果糖、葡萄糖等单糖部分在液泡中贮藏, 多数会进入代谢过程, 在己糖激酶(HxK)和果糖激酶(FRK)的催化下磷酸化生成为 6-磷酸葡萄糖(G6P)和 6-磷酸果糖(F6P), 后续参与淀粉、纤维素、半纤维素和各种细胞成分的合成以及呼吸消耗, 为生理活动提供能量[36−38]。因此, 沙果贮藏期间可溶性糖与糖醇的动态变化显著影响其加工品质。采后 2 d 内加工可保持蔗糖与山梨糖醇的功能性, 11 d 内利用果糖峰值优化甜味, 超越该贮藏期将因糖代谢失衡导致产品品质与经济价值显著降低。

### 2.5 不同贮藏期沙果总酚及抗氧化能力变化与加工适宜性

酚类物质是植物重要的次生代谢产物, 与水果的成熟衰老、色泽变化以及抗氧化活性密切相关。如图 4 所示, 随着贮藏时间的延长, 沙果中总酚含量呈现先上升后下降的趋势, 下降速度明显低于上升速度, 其中贮藏 18 d 时总酚含量达到峰值 3.61 mg GAE/g, 25 d 时总酚含量为鲜果的 117.15%, 与富士

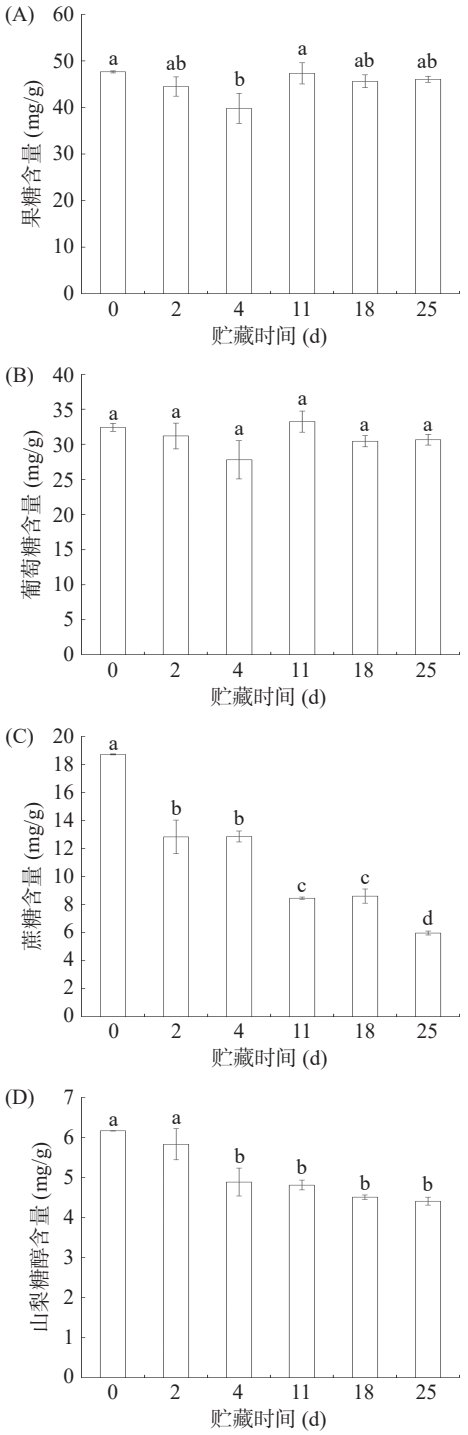



图 3　不同贮藏时间沙果可溶性糖含量变化

Fig.3　Changes of the soluble sugar content of crabapples in different storage times

注: A: 果糖; B: 葡萄糖; C: 蔗糖; D: 山梨糖醇。

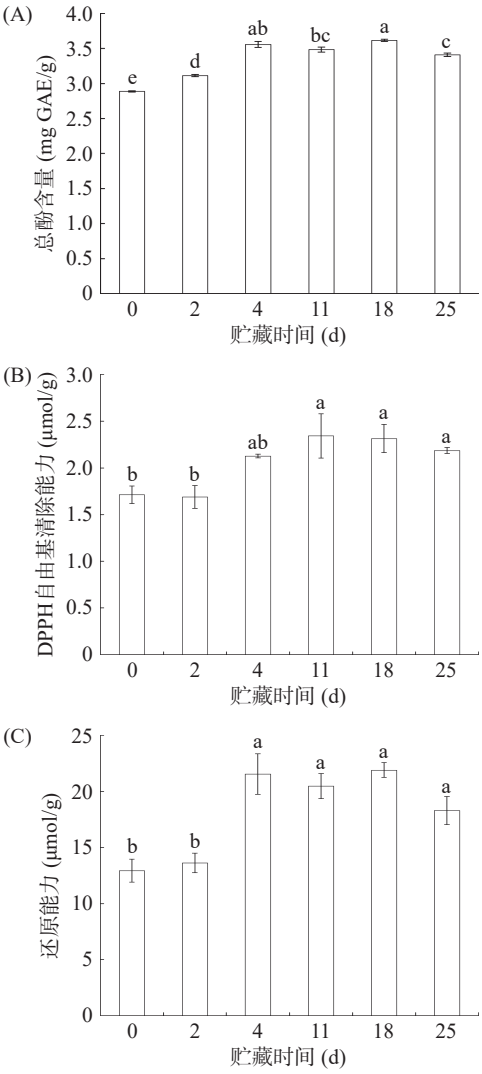



图 4　不同贮藏时间沙果总酚含量及抗氧化能力变化

Fig.4　Changes of total phenol content and antioxidant capacity of crabapples in different storage times

注: A: 总酚含量; B: DPPH 自由基清除能力; C: 铁离子还原能力。

苹果、蓝莓等变化趋势一致[39−40]。前期酚类物质的增加可能是由于乙烯的作用刺激苯丙氨酸解氨酶(PAL)的活性, 而 PAL 是酚类物质生成的关键酶, 促进酚类物质的产生[41]。沙果在贮藏中抗氧化能力的变化通过 DPPH 自由基清除能力和铁离子还原能力表征。DPPH 自由基清除能力整体上呈现上升趋势, 贮藏 11 d 沙果果实的 DPPH 自由基清除能力由 1.71 μmol/g 上升至 2.34 μmol/g。铁离子还原能力与 DPPH 自由基清除能力变化基本一致, 贮藏 4 d 时, 铁离子还原能力由 12.92 μmol/g 上升至 21.54 μmol/g, 随后没有显著性差异($P$>0.05)。研究表明酚类物质与抗氧化潜力之间存在正相关关系, 酚类物质是抗氧化能力的主要贡献者, 此外果实的抗氧化水平还与类黄酮和 L-抗坏血酸的合成有关[42]。沙果贮藏过程中酚类物质与抗氧化能力的动态协同变化对其加工功能特性具有关键调控作用。贮藏中期沙果总酚的阶段性富集与抗氧化协同效应, 适用于功能性果汁或干燥制品的开发。

多酚氧化酶(PPO)的活性关系着水果贮藏中果实的成熟衰老和组织褐变过程。如图 5 所示, 沙果鲜果 PPO 活性为 70.20 U/g, 贮藏期间 PPO 活性存在波动, 但整体上呈现上升趋势, 在贮藏 25 d 时达到 130.95 U/g, PPO 可能会加剧酚类物质的氧化络合, 导致果实发生严重褐变[43]。然而总酚含量变化情况与 PPO 活性变化情况存在一定差异, 表明沙果果实中多酚酶促氧化是多种酶参与的氧化反应[44]。进

一步说明，贮藏时间延长至 2 d 以上，多酚氧化酶活性升高，极易发生酶促褐变，在生产加工时应注意 PPO 活性的变化，采取有效措施来抑制酶促褐变的发生。

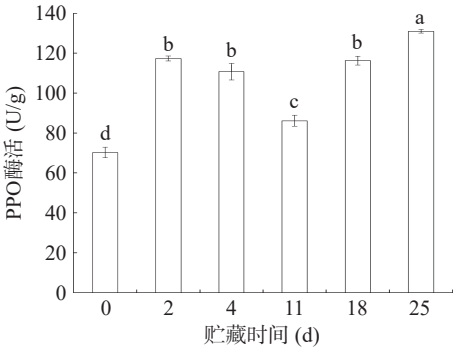



图 5 不同贮藏时间沙果 PPO 酶活变化

Fig.5 Changes in PPO enzyme activity of crabapples in different storage times

## 2.6 不同贮藏期沙果果胶结构和性质变化与加工适宜性

沙果果实的综合品质很大程度取决于其质地的稳定性，而果实质地与果肉细胞细胞壁物质组成含量密切相关，细胞壁物质主要成分是多糖，包括纤维素、半纤维素和果胶组分[45]。果胶天然存在于细胞壁和胞间层中，有助于增强细胞之间的粘附和细胞的机械强度。而果实软化主要与细胞初生壁和胞间层的降解和修饰有关，因此沙果贮藏过程中果胶结构变化是引起也是反映果实质地及理化营养品质变化的关键因素之一[46−47]。水溶性果胶（WSP）、螯合性果胶（CSP）、碱溶性果胶（NSP）是沙果果胶的主要组分，由图 6 可知，三种组分的沙果果胶得率下降，沙果鲜果三种果胶组分得率为 0.79 g/1 g AIR，其中 WSP

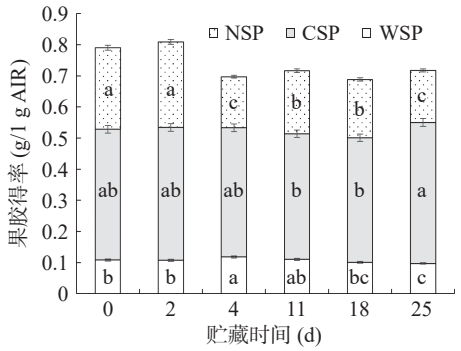



图 6 不同贮藏时间沙果果胶得率变化

Fig.6 Changes of pectin yield of crabapples in different storage times

得率最低，为 0.11 g/1 g AIR；CSP 得率最高，为 0.42 g/1 g AIR；NSP 为 0.26 g/1 g AIR，与苹果果胶组成一致[48]。贮藏过程中 NSP 得率显著降低（$P$<0.05），在贮藏 25 d 时降至 0.17 g/1 g AIR，WSP 和 CSP 得率没有明显变化。

对不同贮藏期的沙果果胶的重均分子量（Mw）、数均分子量（Mn）、多分散性（PDI）及中性糖（表 5）组成进行分析，在贮藏过程中 CSP 的 Mw、Mn 分别由 19.05×10$^4$、13.75×10$^4$ g/mol 增加至 26.90×10$^4$、20.05×10$^4$ g/mol；NSP 的 Mw、Mn 由 13.50×10$^4$、6.55×10$^4$ g/mol 增加至 27.30×10$^4$、10.20×10$^4$ g/mol；WSP 的 Mw、Mn 先增加后减少。PDI 表示果胶分子的多分散性。三种果胶组分贮藏过程中的 PDI 无显著差异（$P$>0.05），表明三种果胶组分的分子分散性分布随着贮藏时间延长没有显著变化[46]。果胶中性糖组成和含量与果胶主链、侧链结构特性相关，沙果中三种果胶组分的中性糖组成随着贮藏时间延长发生不同程度变化。贮藏 25 d 时三种果胶组分总中性糖含量（岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木

表 5 不同贮藏时间沙果果胶性质变化

Table 5 Changes of pectin properties of crabapples in different storage times

| 指标 | WSP | | | CSP | | | NSP | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 d | 11 d | 25 d | 0 d | 11 d | 25 d | 0 d | 11 d | 25 d |
| Mw（×10$^4$ g/mol） | 15.05±0.35$^b$ | 19.45±0.05$^a$ | 15.85±0.75$^b$ | 19.05±0.45$^c$ | 23.40±0.60$^b$ | 26.90±0.30$^a$ | 13.50±1.50$^b$ | 18.55±2.25$^b$ | 27.30±1.2$^a$ |
| Mn（×10$^4$ g/mol） | 8.01±0.22$^b$ | 10.45±0.25$^a$ | 8.3±0.43$^b$ | 13.75±0.85$^b$ | 18.35±0.35$^a$ | 20.05±0.15$^a$ | 6.55±0.56$^b$ | 6.86±0.74$^b$ | 10.20±0.51$^a$ |
| PDI=Mw/Mn | 1.89±0.01$^a$ | 1.87±0.04$^a$ | 1.91±0.01$^a$ | 1.39±0.05$^a$ | 1.27±0.01$^a$ | 1.35±0.02$^a$ | 2.09±0.41$^a$ | 2.70±0.04$^a$ | 2.69±0.01$^a$ |
| 岩藻糖（mg/g） | 0.86±0.18$^a$ | 0.23±0.09$^b$ | 0.61±0.27$^a$ | 0.17±0.02$^a$ | 0.11±0.01$^b$ | 0.12±0.00$^{ab}$ | 0.75±0.04$^a$ | 0.80±0.06$^a$ | 0.98±0.05$^a$ |
| 鼠李糖（mg/g） | 9.63±0.05$^a$ | 3.39±0.06$^c$ | 7.48±0.11$^b$ | 2.03±0.22$^a$ | 1.33±0.12$^b$ | 1.47±0.11$^b$ | 10.93±0.45$^b$ | 12.59±0.4$^{ab}$ | 14.68±1.02$^a$ |
| 阿拉伯糖（mg/g） | 77.85±0.13$^a$ | 41.10±0.78$^b$ | 78.07±1.22$^a$ | 13.06±1.96$^a$ | 8.50±0.01$^b$ | 8.93±0.71$^b$ | 38.54±3.16$^b$ | 54.74±7.36$^a$ | 54.58±1.87$^a$ |
| 半乳糖（mg/g） | 29.11±0.01$^b$ | 26.46±0.35$^b$ | 34.01±0.33$^a$ | 4.72±0.70$^a$ | 4.38±0.00$^a$ | 3.86±0.31$^a$ | 21.24±1.51$^b$ | 51.61±6.88$^a$ | 40.91±1.60$^a$ |
| 葡萄糖（mg/g） | 12.90±0.00$^b$ | 13.59±0.10$^a$ | 11.75±0.04$^b$ | 0.94±0.07$^b$ | 1.28±0.19$^a$ | 0.79±0.02$^b$ | 2.09±0.31$^a$ | 2.66±0.61$^a$ | 2.08±0.26$^a$ |
| 木糖（mg/g） | 8.09±0.01$^a$ | 3.83±0.05$^b$ | 6.36±0.08$^a$ | 0.64±0.29$^a$ | 0.28±0.04$^a$ | 0.34±0.04$^a$ | 4.51±0.42$^a$ | 5.37±0.93$^a$ | 6.04±0.20$^a$ |
| 半乳糖醛酸（mg/g） | 165.59±0.28$^c$ | 178.52±1.47$^b$ | 205.47±1.13$^a$ | 38.98±0.35$^a$ | 28.25±4.13$^b$ | 27.94±0.88$^b$ | 59.36±4.81$^a$ | 54.99±11.05$^a$ | 59.74±14.13$^a$ |
| 葡萄糖醛酸（mg/g） | 1.42±0.02$^a$ | 1.15±0.01$^b$ | 1.19±0.01$^b$ | 0.14±0.00$^a$ | 0.08±0.01$^b$ | 0.08±0.01$^b$ | 0.37±0.04$^a$ | 0.41±0.05$^a$ | 0.62±0.08$^a$ |
| Ratio1 | 1.32±0.00$^a$ | 2.53±0.44$^a$ | 1.80±0.67$^a$ | 1.93±0.28$^a$ | 1.93±0.27$^a$ | 1.90±0.08$^a$ | 0.78±0.01$^a$ | 0.43±0.03$^b$ | 0.51±0.10$^b$ |
| Ratio2 | 0.06±0.00$^a$ | 0.02±0.00$^b$ | 0.04±0.01$^a$ | 0.05±0.01$^a$ | 0.05±0.00$^a$ | 0.05±0.00$^a$ | 0.18±0.01$^b$ | 0.24±0.04$^{ab}$ | 0.26±0.04$^a$ |
| Ratio3 | 11.18±0.79$^c$ | 20.26±0.83$^a$ | 15.03±0.17$^b$ | 8.74±0.34$^a$ | 9.79±0.89$^a$ | 8.70±0.04$^a$ | 5.46±0.20$^b$ | 8.41±0.81$^a$ | 6.52±0.22$^{ab}$ |

注：Ratio 1=半乳糖醛酸/（岩藻糖+鼠李糖+阿拉伯糖+半乳糖+木糖）；Ratio 2=鼠李糖/半乳糖醛酸；Ratio 3=（阿拉伯糖+半乳糖）/鼠李糖；Mn：数均分子量；Mw：重均分子量；PDI多分散性：Mw/Mn；不同小写字母表示不同贮藏时间差异显著（$P$<0.05）。

糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸）最高，为568.13 mg/g。其中，WSP 中性糖含量最高，其次是 NSP，CSP 含量最低。Ratio 1 表示果胶的线性度，与同型半乳糖醛酸聚糖域（homogalacturonans，HG）有关。三种果胶组分中，WSP 和 CSP 的线性度高于 NSP，贮藏期间，NSP 的线性度降低，表明其主链发生降解。Ratio 2 反映了果胶中 RG-I 结构域的占比。NSP 中 Ratio 2 的值高达 0.18~0.26，表明 NSP 结构中 RG-I 具有较高的占比。Ratio 3 代表 RG-I 域的分支程度，三种果胶中，WSP 的支链化程度最高，WSP 和 NSP 在贮藏过程中支链化程度发生较大的变化，这与贮藏过程中果胶组分之间的相互转化，以及其它大分子多糖与果胶组分的转化相关[49]。

不同贮藏时间沙果三种果胶组分 WSP、CSP 和 NSP 的红外光谱分别如图 7 所示，3400 $cm^{-1}$ 附近的峰值被认为是半乳糖醛酸分子内或分子间-OH 的伸缩振动引起的，2930 $cm^{-1}$ 附近的峰值是由甲基 C-H 键不对称伸缩振动引起的，1740 $cm^{-1}$ 和 1620 $cm^{-1}$ 处主要是游离羧基以及酯基（COO-）结构的 C=O 振动。1400 $cm^{-1}$ 处主要是 C-C 对称伸缩振动吸收峰，与 1620 $cm^{-1}$ 处吸收峰共同构成了羧基的特征峰[50]。在 0~25 d 的贮藏过程中，WSP 的-OH 键伸缩振动峰发生蓝移，NSP 的-OH 键伸缩振动峰发生红移，表明贮藏过程中 WSP 分子间的相互作用增强，NSP 分子间的相互作用减弱。在贮藏 0 d 的沙果 WSP 样品中，于 2856 $cm^{-1}$ 处观察到一个特征吸收峰，该波数处的吸收通常与长链亚甲基结构中的 C-H 键振动有关。此峰在后续贮藏中消失，表明相应物质结构在贮藏初期的生理代谢过程中被降解或转化[20]。

在果实贮藏过程中，多种细胞壁相关酶参与细胞壁组分及结构的改变，从而影响果实果胶组成和含量的变化进程[51]。多聚半乳糖醛酸酶（PG）主要作用于 $\alpha$-1,4 糖苷键，产生半乳糖醛酸。针对大多数呼吸跃变型果实，PG 是果实质地品质变化的关键酶[26]。如图 8 所示，沙果鲜果 PG 活性为 4.08 U/g，贮藏期间 PG 酶活性呈现先上升后下降趋势。贮藏第 11 d PG 酶活性达到最大值 8.87 U/g。杏[52] 和猕猴桃[53] 在贮藏过程中表现出相同趋势，PG 催化果胶分解为小分子物质，这导致细胞壁松动和果实软化。综上，随着沙果原料贮藏时间延长果胶组分发生显著改变，果胶得率显著下降，NSP 得率降低，且随着 PG 酶活性升高，果胶将加速降解，有助于形成适度柔韧的质地，适配果脯或果酱加工中对“软而不烂”质构的需求。此外，PG 酶活性峰值的合理利用可优化细胞壁多糖的降解效率。定向选择最佳果胶状态将有助于提升沙果加工产品的流变适配性与质构稳定性。

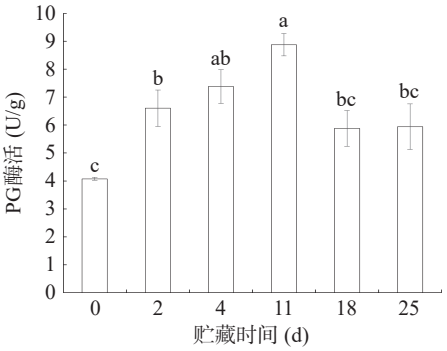



图 8　不同贮藏时间沙果多聚半乳糖醛酸酶酶活变化

Fig.8　Changes of PG enzyme activity of crabapples in different storage times

## 2.7　主成分分析

以贮藏时间为因变量（贮藏 0、2、4、11、18、25 d 分别表示为 T1、T2、T3、T4、T5、T6），以沙果不同贮藏时间感官理化和营养指标为自变量，进行主成分分析（principal component analysis，PCA）。获得两个主成分 PC1 和 PC2，并分别解释 58.7% 和 13.4% 的变异。由图 9（A）得分图可知，相同贮藏时间的沙果样品呈现聚集，而不同贮藏时间沙果样品显示出明显的分离，且按照贮藏时间依次排开保持一定的距离，其中 T1、T2 与 T5、T6 均得到较好区分，表明不同贮藏时间沙果的感官理化和营养品质指标呈现显著变化。图 9（B）载荷图，同一方向的指标表明指标之间存在正相关性；而朝相反方向的指标则表明它们之间存在负相关性。果皮 $b^*$值与总酚、FRAP 铁离子还原能力、DPPH 自由基清除能力、PPO 活性存在

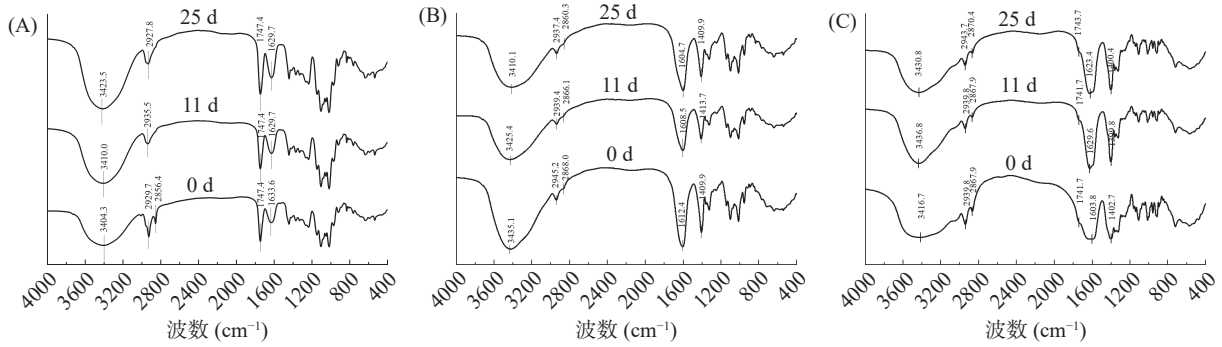



图 7　不同贮藏时间沙果果胶结构变化

Fig.7　Changes of the pectin structure of crabapples in different storage times

注：（A）WSP；（B）NSP；（C）CSP。

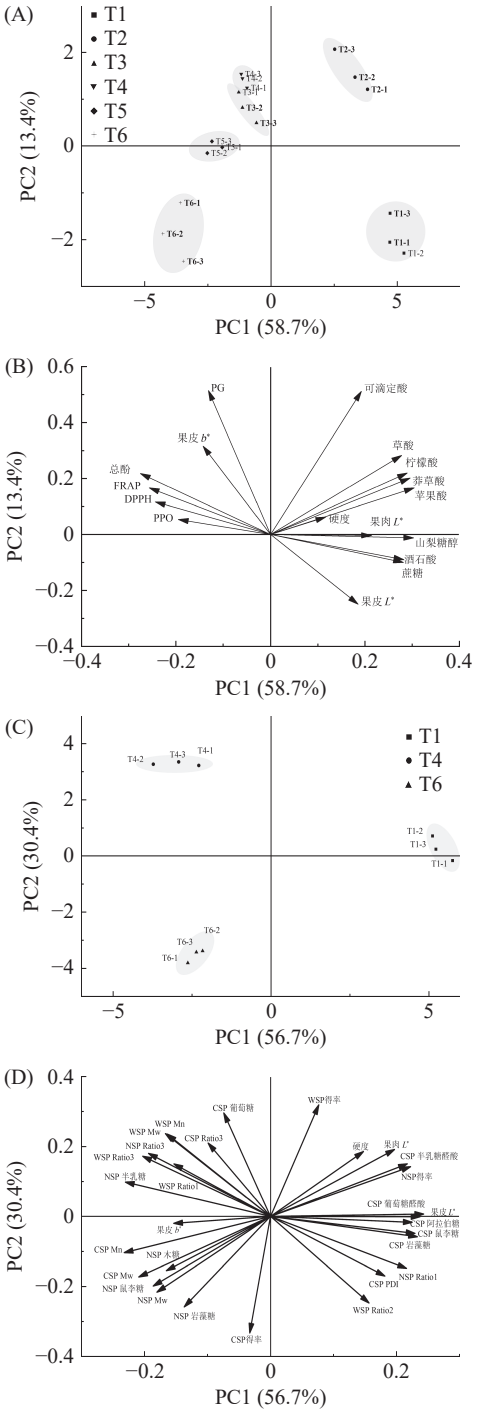



图 9 沙果主成分分析

Fig.9 Principal component analysis of crabapples

注:(A)理化营养特性得分图;(B)理化营养特性载荷图;(C)果胶性质得分图;(D)果胶性质载荷图。

正相关关系,而与有机酸以及可溶性糖含量之间存在负相关关系。果皮、果肉的 $L^*$值与有机酸以及可溶性糖含量之间存在正相关关系,与总酚、FRAP 铁离子还原能力、DPPH 自由基清除能力、PPO 活性存在负相关关系。此外,果实硬度与其有机酸含量呈现正相关关系,表明果实贮藏过程中有机酸含量的降低伴随着果肉组织的绵软化。

以贮藏时间为因变量(贮藏 0、11、25 d 分别表示为 T1、T4、T6),以不同贮藏时间沙果样品三种果胶组分特征性指标为自变量,进行主成分分析,获得两个主成分 PC1 和 PC2,分别解释 56.7% 和 30.4% 的变异。由图 9(C)(D)可知,不同贮藏时间沙果的果胶性质有显著差异,T1、T4、T6 分布在三个象限,果皮和果肉 $L^*$值与 NSP 得率、CSP 中性糖含量、NSP 的 Ratio1 存在正相关关系,与 WSP 的 Ratio3、CSP 和 NSP 的分子量、NSP 的中性糖含量呈负相关关系,表明沙果色泽变暗与三种果胶组分的降解与转化有关。此外,沙果硬度与 WSP 和 NSP 的得率呈正相关,与 CSP 的得率呈负相关,表明贮藏过程中沙果果实的软化与三种果胶组分的相对含量密切相关。

### 2.8 加工适宜性评价

基于沙果贮藏过程中感官品质、理化特性及营养组分的动态变化规律,可将其贮藏周期划分为三个阶段并针对性适配加工工艺:贮藏前期(0~2 d)果实呈现高酸性特征(可滴定酸含量增加,有机酸组分以苹果酸为主导),总酚积累(达 3.11 mg GAE/g),而抗氧化活性(2 d 时 DPPH 自由基清除率 1.69 μmol/g 及 FRAP 值 13.61 μmol/g)较低,伴随 PPO 活性(峰值达 117.32 U/g)及 PG 活性(峰值达 6.60 U/g)上升,果胶组分中 WSP 分子量分布稳定。该阶段适宜果汁等高附加值产品开发,PG 活性较高有助于提高出汁率。此外结合相应的果胶特性,利用其凝胶性能,考虑酸性果酱产品的开发。但需抑制 PPO 介导的酶促褐变并调控蔗糖-果糖转化;贮藏中期(2~18 d)有机酸显著衰减(2~18 d 苹果酸降解率达 30.93%),总酚持续保持高水平(18 d,3.61 mg GAE/g)而抗氧化能力持续提升,硬度下降(2~18 d 降低 26.35%),同时 PG 酶活维持在较高水平(11 d 达峰值 8.87 U/g),该阶段较低的酸度和硬度利于渗糖与干燥,因此适于果脯和果干产品的生产,此外有机酸和糖分变化可能促进特定微生物发酵(如果醋),适于发酵制品开发。但需通过复合护色剂缓解色泽劣变;贮藏末期(18 d 后)果实呈现显著质地软化(25 d 硬度 1249.58 g),果胶分子重构,NSP 分子量增加(25 d NSP 分子量 Mw $27.30\times10^4$ g/mol,Mn $10.20\times10^4$ g/mol),抗氧化能力仍保持较高水平(25 d 时 DPPH 自由基清除率 2.19 μmol/g 及 FRAP 值 18.29 μmol/g),可加工为低质地要求的果泥等产品,或作为功能性提取物使用。但需外源补充酸味剂以改善产品风味并持续监控 PPO 活性以维持产品稳定性。

## 3 结论

本研究以‘黄太平’沙果为研究对象,探究了贮藏期间(0~25 d)沙果感官和理化营养品质的变化规律,评估了各指标变化的关联。结果表明,在感官品质方面,随着贮藏时间的延长,沙果果皮颜色变黄、果肉轻微变暗;果实的硬度明显下降。理化营养品质方面,可滴定酸含量呈先升后降趋势,苹果酸等 5 种主要有机酸含量下降;蔗糖和山梨糖醇含量持续降低,果糖和葡萄糖含量保持稳定;总酚含量先增后减,

DPPH 自由基清除能力和 FRAP 铁离子还原能力整体上呈现上升趋势。沙果果胶得率下降，其中 NSP 的得率显著降低，且其线性度降低；NSP 与 CSP 分子量增加，WSP 和 NSP 的支链化程度变化显著。主成分分析显示贮藏时间显著影响沙果感官和理化营养品质，其中果实色泽与总酚、有机酸、可溶性糖含量及果胶的降解和转化有关，果实硬度与果胶得率及有机酸含量密切相关。基于沙果贮藏特性动态变化规律，提出三阶段加工策略：前期（0~2 d）优先开发果汁/果酱并抑制酶促褐变，中期（2~18 d）适宜加工果脯/发酵制品但需强化护色，末期（18 d 后）可加工果泥/功能提取物并需补酸及监控稳定性。本研究为沙果的贮藏品质控制、加工原料的筛选及原料加工适宜性评估提供了重要的理论依据和实践指导。后续研究应深入解析贮藏期品质变化分子机制，并开展多品种沙果加工适宜性综合评价。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

## 参考文献


［1］ 张磊. 兴安沙果栽培技术、区域试验及品质特征研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学, 2022. ［ZHANG Lei. Study on cultivation techniques, regional experiment and quality characters of Xingan Shaguo[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.］

［2］ 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 第三十六卷[M]. 北京：科学出版社, 1974. ［Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China. No. 36[M]. Beijing: Science Press, 1974.］

［3］ 李艳梅, 赵福顺, 赵丽华. 沙果 123 苹果 沈农 2 号苹果营养成分分析[J]. 农产品加工(学刊), 2009(2): 79−81. ［LI Yanmei, ZHAO Fushun, ZHAO Lihua. Analysis of nutrients Shaguo and 123Apple and 2-Shennong apple[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2009(2): 79−81.］

［4］ 张浩然. 沙果醋混菌发酵工艺及超声催陈研究[D]. 北京：北京林业大学, 2020. ［ZHANG H R. Study on the mixed fermentation technology and ultrasonic aging of *Malus asiatica* vinegar[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.］

［5］ 朱丹, 牛广财, 蔡亚平, 等. 沙果渣多酚抗氧化活性的研究[J]. 中国食品添加剂, 2010, 21(5): 129−132. ［ZHU Dan, NIU Guangcai, CAI Yaping, et al. Study on antioxidation activity of polyphenol from *Malus asiatica* pomace[J]. China Food Additives, 2010, 21(5): 129−132.］

［6］ ABUDUAINI M, LI J, RUAN J H, et al. Bioassay-guided preparation of antioxidant, anti-inflammatory active fraction from crabapples (*Malus prunifolia* (Willd.) Borkh.)[J]. Food Chemistry, 2023, 406: 135091.

［7］ HAN Meiling, LI Guo, LIU Xiaowei, et al. Phenolic profile, antioxidant activity and anti-proliferative activity of crabapple fruits[J]. Horticultural Plant Journal, 2019, 5(4): 155−163.

［8］ WANG Lu, LI Zhen, AN Siying, et al. *Malus baccata* (Linn.) Borkh polyphenols-loaded nanoparticles ameliorate intestinal health by modulating intestinal function and gut microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 252: 126233.

［9］ 刘亚琼, 马翠云, 刘高丽, 等. 沙果膳食纤维对胆固醇和亚硝酸根离子吸附作用的研究[J]. 农家参谋, 2018(20): 63. ［LIU Y Q, MA C Y, LIU G L, et al. Study on adsorption of dietary fiber from crabapples to cholesterol and nitrite ions[J]. The Farmers Consultant, 2018(20): 63.］

［10］ 牛广财, 朱丹, 肖盾, 等. 沙果渣膳食纤维润肠通便作用的动物实验研究[J]. 食品科学, 2011, 32(13): 293−296. ［NIU Guangcai, ZHU Dan, XIAO Dun, et al. Improving effect of dietary fiber from *Malus asiatica* pomace on defecation in mice[J]. Food Science, 2011, 32(13): 293−296.］

［11］ 袁瑞敏, 彭静, 王佳傲, 等. 褪黑素调控水杨酸和乙烯代谢维持沙果贮藏品质[J]. 核农学报, 2023, 37(9): 1798−1805. ［YUAN R M, PENG J, WANG J A, et al. Melatonin regulates salicylic acid and ethylene metabolism to maintain Shaguo quality during storage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(9): 1798−1805.］

［12］ REHMAN R N U, ALI S, HASAN M U, et al. Low temperature and hypoxic conditions induce flavonoids biosynthesis and enhances antioxidant potential of crabapple (*Malus profusion*) fruits[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2021, 43(9): 131.

［13］ WANG Wenliang, CAO Ziming, HOU Furong, et al. Quality maintenance mechanism of oxalic acid treatment in fresh-cut apple fruit during storage based on nontarget metabolomics analysis[J]. Food Chemistry, 2024, 436: 137685.

［14］ 王震, 裴令栋, 彭勇, 等. 中早熟苹果品种的贮藏品质和酚类物质差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 202−210. ［WANG Zhen, PEI Lingdong, PENG Yong, et al. Differences in storage quality and phenolic composition of mid-early maturing apple varieties[J]. Food Science, 2023, 44(7): 202−210.］

［15］ 方贵平, 李旋, 王雅, 等. 两种不同工艺冷冻干燥沙棘粉品质对比研究[J]. 核农学报, 2023, 37(11): 2214−2226. ［FANG Guiping, LI Xuan, WANG Ya, et al. Comparative study on quality of sea buckthorn powder freeze-dried by two different processes[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(11): 2214−2226.］

［16］ HU Jiaxing, BI Jinfeng, LI Xuan, et al. Understanding the mechanism of moisture migration impact on the texture and color characters of dried apple cubes[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(12): e16031.

［17］ 李怡诺, 王洋, 赵小娜, 等. 7 个产区大五星枇杷果实品质差异研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(12): 29−38. ［LI Yinuo, WANG Yang, ZHAO Xiaona, et al. Differences in fruit quality of Dawuxing loquat from seven production regions[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2023, 51(12): 29−38.］

［18］ 石彩玲, 田侠, 孙一鸣, 等. 离子色谱-脉冲积分安培法同时测定甘薯中 10 种可溶性糖组分[J]. 中国食品学报, 2023, 23(9): 324−330. ［SHI Cailing, TIAN Xia, SUN Yiming, et al. Determination of ten kinds of soluble sugars in sweetpotato by ion chromatography and pulsed amperometric detector[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(9): 324−330.］

［19］ 李文静, 刘一心, 陈明堃, 等. 14 种海棠果实品质分析及综合评价[J]. 食品科学, 2024, 45(16): 121−130. ［LI Wenjing, LIU Yixin, CHEN Mingkun, et al. Quality analysis and comprehensive

evaluation of 14 varieties of crabapples[J]. Food Science, 2024, 45(16): 121−130.]
[20] YU Qingting, LI Xuan, HU Jiaxing, et al. The effect of three pectin fractions variation on the browning of different dried apple products[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108052.
[21] HU Jiaxing, BI Jinfeng, LI Xuan, et al. Understanding the impact of pectin on browning of polyphenol oxidation system in thermal and storage processing[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 307: 120641.
[22] NJOROGE D M, KINYANJUI P K, MAKOKHA A O, et al. Extraction and characterization of pectic polysaccharides from easy- and hard-to-cook common beans (*Phaseolus vulgaris*)[J]. Food Research International, 2014, 64: 314−322.
[23] RYU J A, DUAN S C, GIL C S, et al. Combined UV-B and methyl jasmonate treatments enhance postharvest pigmentation of "Fuj" apples[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 190: 111938.
[24] 王静. 果蔬采后酶促褐变控制的研究进展[J]. 保鲜与加工, 2014, 14(4): 49−52,58. [WANG Jing. Research advances on the control of enzymatic browning of postharvest fruits and vegetables[J]. Storage and Process, 2014, 14(4): 49−52,58.]
[25] 高华奇, 王立芹, 孙翠, 等. 采后跃变型果实软化与果胶降解的研究进展[J]. 果树学报, 2022, 39(10): 1922−1934. [GAO Huaqi, WANG Liqin, SUN Cui, et al. Research progress on postharvest fruit softening and pectin degradation in climacteric fruits[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(10): 1922−1934.]
[26] MIN Ting, NIU Lifang, FENG Xiangyang, et al. The effects of different temperatures on the storage characteristics of lotus (*Nelumbo nucifera* G.) root[J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129109.
[27] ZHANG Kaisheng, ZHANG Dongyang, WANG Xuekun, et al. Integrated analysis of postharvest storage characteristics of seven apple cultivars and transcriptome data identifies MdBBX25 as a negative regulator of fruit softening during storage in apples[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 207: 112646.
[28] 屈丝雨, 任甜, 樊丁宇, 等. 灰枣和冬枣果实质地差异的解剖学观察及相关酶活性研究[J]. 果树学报, 2024, 41(9): 1811−1820. [QU Siyu, REN Tian, FAN Dingyu, et al. Anatomical observation on the differences in the fruit texture between Huizao and Dongzao jujube and related enzyme activities[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(9): 1811−1820.]
[29] 高滋艺, 范献光, 杨惠娟, 等. 苹果发育过程中细胞壁代谢及果肉质地的变化[J]. 食品科学, 2016, 37(19): 70−75. [GAO Ziyi, FAN Xianguang, YANG Huijuan, et al. Correlation among cell wall components, related enzyme activities and texture of developing fruits of different apple (*Malus×domestica*) cultivars[J]. Food Science, 2016, 37(19): 70−75.]
[30] TORREGROSA L, ECHEVERRIA G, ILLA J, et al. Spatial distribution of flavor components and antioxidants in the flesh of 'Conference' pears and its relationship with postharvest pathogens susceptibility[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 159: 111004.
[31] HASAN M K, ALAM A, ISLAM M R, et al. Evaluating the potential of 1-methylcyclopropene treatments on physicochemical properties, bioactive compounds, and shelf life of mango fruits under different storage conditions[J]. Heliyon, 2024, 10(15): e34695.
[32] 仇岑, 晋朝, 齐秋爽, 等. 降温方法对不同成熟度鸭梨冰温贮藏中有机酸含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 284−293. [QIU Cen, JIN Zhao, QI Qiushuang, et al. Effects of cooling method on organic acid content of different maturity of *Pyrus bretschneideri* Rehd. cv. Yali during ice-temperature storage[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(13): 284−293.]
[33] ZHU Jie, LI Canying, FAN Yiting, et al. γ-Aminobutyric acid regulates mitochondrial energy metabolism and organic acids metabolism in apples during postharvest ripening[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 186: 111846.
[34] FAN Yiting, LI Canying, LI Yihan, et al. Postharvest melatonin dipping maintains quality of apples by mediating sucrose metabolism[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 174: 43−50.
[35] WANG Jihan, LI Fujun, SUN Wenwen, et al. Role of sugar and energy metabolism in apple flesh browning during cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 326: 112758.
[36] 邓丽莉, 申琳, 生吉萍. 两种典型呼吸跃变型果实糖代谢过程及其在果实品质形成中的作用[J]. 食品科学, 2013, 34(19): 351−355. [DENG Lili, SHEN Lin, SHENG Jiping. Carbohydrate metabolism of two climacteric fruits and its impact on fruit quality[J]. Food Science, 2013, 34(19): 351−355.]
[37] 苏静, 祝令成, 刘茜, 等. 果实糖代谢与含量调控的研究进展[J]. 果树学报, 2022, 39(2): 266−279. [SU Jing, ZHU Lingcheng, LIU Xi, et al. Research progress on sugar metabolism and concentration regulation in fruit[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(2): 266−279.]
[38] HABIBI F, SHAHID M A, SPICER R L, et al. Postharvest storage temperature strategies affect anthocyanin levels, total phenolic content, antioxidant activity, chemical attributes of juice, and physical qualities of blood orange fruit[J]. Food Chemistry Advances, 2024, 4: 100722.
[39] 彭贞贞, 叶旗慧, 徐晓艳, 等. 1-甲基环丙烯处理对红富士苹果贮藏品质的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 83−92. [PENG Zhenzhen, YE Qihui, XU Xiaoyan, et al. Effect of 1-methylcyclopropene treatment on storage quality of red Fuji apple[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2020, 46(1): 83−92.]
[40] 袁富容, 杨婷, 冉雅文, 等. 基于主成分分析法评价 1-MCP 处理对‘蓝丰’蓝莓果实品质及生理的影响[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(9): 8−18. [YUAN Furong, YANG Ting, RAN Yawen, et al. Effects of 1-MCP treatment on 'Bluecrop' blueberry fruits quality and physiology based on principal component analysis[J]. Storage and Process, 2024, 24(9): 8−18.]
[41] LEJA M, MARECZEK A, BEN J. Antioxidant properties of two apple cultivars during long-term storage[J]. Food Chemistry, 2003, 80(3): 303−307.
[42] LIU Hui, JIANG Weibo, CAO Jiankang, 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.
[43] 王佳慧, 王甄洁, 谢春阳. 1-甲基环丙烯结合草酸处理对锦绣海棠贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(3): 87−92. [WANG Jiahui, WANG Zhenjie, XIE Chunyang. Effect of 1-MCP combined with oxalic acid on storage quality of mulas 'Jinxiu' fruit[J]. Food Research and Development, 2023, 44(3): 87−92.]
[44] 杨尚山, 杨悦, 尚鹏鹏, 等. NCA 处理对鲜切苹果贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(2): 1−7,14. [YANG Shang-

shan, YANG Yue, SHANG Pengpeng, et al. Effect of 1-nitrosocyclohexyl acetate（NCA）treatment on storage quality of fresh-cut apples[J]. Storage and Process, 2024, 24(2): 1−7,14.］

［45］ WANG Siqiang, LIU Chunyu, SU Xueru, et al. Transcriptome analysis reveals key metabolic pathways and gene expression involving in cell wall polysaccharides-disassembling and postharvest fruit softening in custard apple（*Annona squamosa* L.）[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 240: 124356.

［46］ WANG H, WANG J, MUJUMDAR A S, et al. Effects of postharvest ripening on physicochemical properties, microstructure, cell wall polysaccharides contents（pectin, hemicellulose, cellulose）and nanostructure of kiwifruit（*Actinidia deliciosa*）[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106808.

［47］ WEI Xueyan, XU Kang, QIN Weishuai, et al. Hawthorn（*Crataegus pinnatifida*）berries ripeness induced pectin diversity: A comparative study in physicochemical properties, structure, function and fresh-keeping potential[J]. Food Chemistry, 2024, 455: 139703.

［48］ LIU Jiakai, WANG Wei, QU Hao, et al. Effect of moderate electric field on rheological properties, cell wall components, and microstructure of apple tissue[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 351: 111516.

［49］ QIAO Yanyan, SHEN Yixiao, JIANG Hongzhou, et al. Structural characterization, antioxidant and antibacterial activity of three pectin polysaccharides from blueberry[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262: 129707.

［50］ 古佩娴, 刘声鹏, 黄超, 等. 猕猴桃软化过程中细胞壁修饰酶活性与果胶理化特性[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 230−238. ［GU Peixian, LIU Shengpeng, HUANG Chao, et al. Variations in cell wall-modifying enzyme activities and physicochemical properties of pectin in kiwifruit during postharvest softening[J]. Food Science, 2023, 44(21): 230−238.］

［51］ 李志文, 集贤, 闫师杰, 等. ‘巨峰’葡萄果实采后质地劣变机理研究[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2024(5): 38−44. ［LI Zhiwen, JI Xian, YAN Shijie, et al. Study on mechanism of post-harvest texture deterioration of 'Kyoho' grapes[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2024(5): 38−44.］

［52］ LI Yaling, HE Huan, HOU Yuanyuan, et al. Salicylic acid treatment delays apricot（*Prunus armeniaca* L.）fruit softening by inhibiting ethylene biosynthesis and cell wall degradation[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 300: 111061.

［53］ HUANG Wenjun, CHEN Meiyan, ZHAO Tingting, et al. Genome-wide identification and expression analysis of polygalacturonase gene family in kiwifruit（*Actinidia chinensis*）during fruit softening[J]. Plants, 2020, 9(3): 327.