张子涵, 再屯古丽·亚森, 姜溪雨, 等. 不同贮藏期西梅果实制浆品质特性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 34−45. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090049

ZHANG Zihan, ZAITUNGULI Yasen, JIANG Xiyu, et al. Pulp Quality Characteristics of Prune Plum Fruits at Different Storage Periods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 34−45. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090049

·特邀主编专栏—果蔬基料制造: 基础理论、新型加工、质量控制与智能制造（客座主编: 徐贞贞、王永涛、李涛; 产业顾问: 李仁杰）·

# 不同贮藏期西梅果实制浆品质特性研究

张子涵[1], 再屯古丽·亚森[2], 姜溪雨[1], 张　强[2], 毕金峰[1,3], 刘　璇[1,3,*]

（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.喀什地区瓜果蔬菜产业发展中心, 新疆喀什 844000;
3.中国农业科学院西部农业研究中心, 新疆昌吉 831100）

**摘　要:** 目的: 通过研究不同贮藏时间西梅果实制浆品质特性, 探讨适宜制浆的西梅原料品质标准。方法: 在 4 ℃ 贮藏 7 周期间, 监测西梅果实品质指标及其果浆理化特性的动态变化趋势。结果: 果实硬度随贮藏时间延长显著下降, 果皮和果肉硬度分别降低了 65.3% 和 87.3%。果实和果浆可溶性固形物、还原糖和固酸比增加、可滴定酸降低。果实可萃取酚和花色苷含量分别增加了 40.08% 和 83.73%。随果实贮藏时间延长, 果浆浊度上升, 表观黏度下降, 粒径分布集中在 300~350 μm。相关性分析表明果浆 $a^*$值与果实可萃取酚和花色苷含量呈正相关, 果浆 $L^*$、$b^*$值与果实可萃取酚和花色苷含量呈负相关, 果浆浊度、悬浮稳定性和黏度与果皮硬度显著相关（$P<0.05$）。结论: 通过主成分分析筛选出果浆固酸比、稠度系数、$b^*$值为果浆核心品质指标, 分别代表果浆酸甜口感、流变特性和色泽品质。基于以上核心品质指标, 构建了果浆综合品质的多元线性回归预测赋分模型。模型可通过检测果实固酸比、总糖和果皮 $b^*$值预测果浆品质, 为西梅采收期判断和加工原料筛选提供量化依据。此外, 综合品质得分表明贮藏 42 d 的西梅果实制浆品质最佳, 这一结果明确了西梅果实适宜制浆的关键指标参数。

**关键词:** 西梅, 主成分分析, 相关性分析, 贮藏, 果浆, 品质评价

**中图分类号:** TS255.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0034−12

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025090049　　本文网刊:

# Pulp Quality Characteristics of Prune Plum Fruits at Different Storage Periods

**ZHANG Zihan[1], ZAITUNGULI Yasen[2], JIANG Xiyu[1], ZHANG Qiang[2], BI Jinfeng[1,3], LIU Xuan[1,3,*]**

（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.Kashgar Prefecture Fruit and Vegetable Industry Development Center, Kashgar 844000, China;
3.Institute of Western Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, China）

**Abstract:** Objective: This study aimed to investigate the changes in pulp quality characteristics of prune plum fruits during storage and to establish quality standards for selecting suitable raw materials for pulping. Methods: Plums were stored at 4 ℃ for seven weeks and the dynamic variations in fruit quality indices and the physicochemical properties of the resulting pulp were monitored throughout the storage period. Results: Fruit firmness decreased markedly during storage, with peel and flesh firmness declining by 65.3% and 87.3%, respectively. Soluble solids content (SSC), reducing sugars, and the solid-acid ratio increased in both fruit and pulp, whereas titratable acidity (TA) decreased. The contents of extractable polyphenols and anthocyanins in the fruit increased by 40.08% and 83.73%, respectively. With prolonged storage, pulp turbidity in-

**收稿日期:** 2025−09−05

**基金项目:** 国家重点研发计划（2024YFD2100601）; 新疆“天池英才”。

**作者简介:** 张子涵（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: 15928650683@163.com。

*** 通信作者:** 刘璇（1982−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: liuxuancaas@126.com。

creased, apparent viscosity decreased, and particle size distribution became concentrated within 300~350 μm. Correlation analysis revealed that the pulp's $a^*$ value was positively correlated with extractable polyphenols and anthocyanins in the fruit, while $L^*$ and $b^*$ values showed negative correlations. Moreover, pulp turbidity, suspension stability, and viscosity were significantly correlated with peel firmness ($P$<0.05). Conclusion: Principal component analysis identified the solid-acid ratio, consistency coefficient, and $b^*$ value of the pulp as the core quality indicators, reflecting its sweet-sour balance, rheological behavior, and color characteristics, respectively. Based on these core indicators, a multivariate linear regression model was established to predict overall pulp quality. By measuring the fruit's solid-acid ratio, total sugar, and peel $b^*$ value, this model enabled accurate prediction of pulp quality, providing a quantitative basis for determining the optimal harvest time and selecting suitable raw materials. Furthermore, the comprehensive quality score indicated that prune plums stored for 42 days exhibited the highest pulp quality, thereby defining the key parameters for optimal pulp production.

**Key words:** prune plum; principal component analysis; correlation analysis; storage; pulp; quality evaluation

西梅（*Prunus domestica* L.），别名酸梅，是蔷薇科李属植物[1]，富含丰富的膳食纤维、维生素和酚类化合物等功能成分，具有抗氧化[2]、抗结肠癌[3]、缓解便秘[4] 等功能活性。近年来，以新疆伽师为代表的西梅主产区产量持续增长。然而，西梅果实采后易失水软化，成熟度高的果实易腐、贮藏周期有限[5]。目前，西梅加工以制浆/汁和干制为主，加工转化率较低，且标准化水平不高，全产业链发展韧性不足。因此，西梅产业亟需通过提质增效和加工转化来延长产业链和提升效益。制浆加工作为西梅加工的主要方式，但原料品质、加工工艺及成品品质缺乏统一标准，目前西梅果浆产品品质参差不齐。基于西梅采后贮运流通现状以及制浆与鲜食对原料品质要求的差异，不同贮藏期原料对制浆品质影响至关重要，但尚未明确，制约了西梅汁浆产品标准化进程，无法支撑优质优价和产品有序竞争与发展。

研究表明，采后贮藏过程中水果品质的变化显著影响其加工特性，西梅[6]、苹果[7]、桃[8] 等水果在贮藏期间会发生色泽转变、质地软化、风味变化[9] 及营养功能成分转化，进而影响加工产品的产出效率和综合品质。如苹果果实在长期贮藏过程中因水分流失导致果汁得率下降[10]。不同可溶性固形物含量（SSC）水平的阿克苏富士苹果贮藏 90 d 后，鲜榨汁品质均发生明显劣变[11]。苹果贮藏至呼吸高峰时（0 ℃ 贮藏 45 d 或 20 ℃ 贮藏 15 d），加工所得果汁稳定性最佳[12]。芒果浆表观黏度随芒果催熟时间延长而逐渐降低，其流变特性呈规律性变化[13]。由此可见，水果果实在贮藏期品质的变化，对汁浆的产出率、色泽、糖酸、流变等品质产生不同程度的影响。

采用单一品质指标描述水果及其制品的品质指标存在一定局限性，建立基于关键核心品质指标的综合评价方法并应用于原料品质分类评价具有重要意义。筛选核心品质指标并构建综合评价模型的方法有主成分分析法[14]、聚类分析法[15]、层次分析法[16]、神经网络综合评价法[17] 等。其中，主成分分析（PCA）通过降维提取核心指标，从而支撑构建综合评价模型，在苹果[18]、桃[19] 等水果的品质综合评价中已有报道。与传统多项式等建模算法相比，神经网络算法构建综合模型可以实现较高的运算速度和预测准确率，对样本量有一定体量要求，且模型可解释性，需要深入挖掘。因此，综合评价模型的选择，需要根据试材获取难易程度、样本数量、研究目标等因素综合考虑。聂继云等[20] 通过对 122 个苹果品种进行相关分析、因子分析、概率分级等方法，建立了以果实 SSC、固酸比、出汁率和单宁含量为指标的苹果品种鲜榨汁加工适宜性评价体系，从中筛选出 59 个适宜加工鲜榨汁的苹果品种。果浆的品质和制浆原料的加工适宜性通常通过色泽、质地、风味、流变学[21] 及营养功能品质指标等进行综合评价，这些品质指标取决于原料的物质基础和初始品质，特别是果实色泽[22]、硬度[6,23]、SSC/TA 比值[24] 及糖、酸和酚类物质等[25]。制浆/汁是西梅加工的主要方式，但西梅浆/汁尚无统一的产品标准，影响其品质的重要因素—加工用原料品质特性不清晰，缺乏加工适宜性评价的方法和标准体系。

因此，本研究结合西梅鲜果供应链和产业结构特点，在鲜果采后的不同贮藏时期，检测果实及其制备的果浆的可溶性固形物、还原糖、总糖、总酚、花色苷、色泽、硬度、流变特性等品质指标，以明确西梅制浆原料品质特性，阐明西梅果实在贮藏中品质动态变化对果浆色泽、流变特性等加工指标的影响规律，构建西梅果浆综合品质评价模型并明确原料制浆适宜性，探索西梅果浆形成物质基础，为西梅制浆原料、成品标准化及加工过程品质调控提供理论支撑和技术指导。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与仪器

西梅　品种为‘法兰西’，购于北京新发地，采收商业成熟度（硬度：7.33±0.25 N；可溶性固形物：22.10%±0%）；L-抗坏血酸（食品级）　北京萃锋科技有限公司；葡萄糖（D(+)-Glucose）、浓硫酸、苯酚、没食子酸、碳酸钠、氯化钾、无水乙酸钠、盐酸、氢氧化钠、甲醇、冰醋酸　国药集团化学试剂有限公司；3,5-二硝基水杨酸试剂　北京索莱宝科技有限公司；福林酚　上海源叶生物科技有限公司；所有有机溶剂均为分析纯。

WZB 45 折光仪　上海精密科学仪器有限公司; MCKZ-JD6 精工电热蒸柜　北京美厨厨具有限公司; TA.HDplus 质构仪　英国 Stable Micro Systems; DHG-9023A 恒温干燥箱　上海一恒科学仪器有限公司; UV-1900i 紫外分光光度计　岛津(香港)有限公司; HH-4 水浴锅　常州荣华仪器制造有限公司; JM-30A 胶体磨　廊坊市廊通机械有限公司; Metrohm 907 Titrando 电位滴定仪　瑞士 Metrohm 公司; Sigma 3K15 离心机　德国 Sigma 公司; 2100N TURBIDIMETER 浊度仪　美国哈希公司; Microtrac S3500 粒度分析仪　美国 Microtrac 公司; JYZ-V18 九阳打浆机　九阳股份有限公司; Physica MCR 301 流变仪　奥地利 Anton Paar 有限公司; SB25-12DTN 超声波清洗机　宁波新芝生物科技股份有限公司; Spark@多功能微孔板检测仪　瑞士 Tecan 公司; 电子天平(精度 0.1 mg)　德国 Sartorius 公司; LGJ-20BP 冻干机　北京八方中大科技发展有限公司; lensEye-NET version1.5.5.0 电子眼　美国 LensEye-NET 公司; CM-700d 手持色差仪　日本 KONICA 公司。

## 1.2　实验方法

1.2.1　处理方法　西梅置于 4 ℃ 冷库中贮藏, 每隔 7 d 取一次样, 连续取 7 周。每次取样 4000 g, 分为三份, 一份用于检测果实硬度、水分、色泽和可溶性固形物; 一份果实冷冻干燥打粉用于检测花色苷含量; 其余部分洗净去核切块液氮速冻置于−40 ℃ 冰箱中备用制浆。

1.2.2　西梅果浆制备　参考李瑞平[26] 的方法稍作修改, 西梅果实先采用高温蒸汽 5 min 灭酶, 冷却后, 经破碎打浆机初破碎 2 min, 添加 0.3% 抗坏血酸, 再采用胶体磨 40 Hz 进行二次研磨 3 min。用 100 目尼龙网过滤, 去除研磨残余的皮渣, 装入耐高温铝箔袋中沸水浴 5 min, 确保果浆中心温度达到 85 ℃ 并维持 30 s。以备后续品质检测和评价试验。

1.2.3　西梅果实、果浆理化指标检测

1.2.3.1　西梅果实硬度和水分含量测定　每批样品随机选取 10 颗西梅洗净擦干, 用质构仪检测果实硬度(均在同一部位), 采用 P/2 柱状探头, 直径为 2 mm, 测试速率为 1 mm/s(前/中/后), 测试选取时间为 5~10 s 间的平均值为果肉硬度, 最大峰值力为果皮硬度, 结果表示为 N; 鲜果水分含量参考 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》[27] 中的直接干燥法测定。

1.2.3.2　西梅果实和果浆色泽测定　果实色泽采用电子眼设备, 从每批样品中随机取 5 颗大小一致的西梅果实, 一分为二切开去核, 分别采集果皮和果肉的图片。采用 lensEye-NET version1.5.5.0 软件进行图像数据处理, 取全果的平均值, 即为每个果实的果皮色泽和果肉色泽。$L^*$称为明度指数, $a^*$表示红绿值, $b^*$表示黄蓝值, $\Delta E$ 为色差值, 其中 $L_0^*$、$a_0^*$和 $b_0^*$ 为第 0 d 西梅色泽。果浆色泽采用手持色差仪测定。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad \text{式(1)}$$

1.2.3.3　西梅果实和果浆可萃取酚含量、花色苷含量的测定　采用福林酚法测定总酚含量[28], 取 50 g 西梅果肉样品研磨匀浆, 称取 2.5 g 西梅果肉匀浆(西梅果浆 2.5 g), 加入 20 mL 80% 甲醇溶液, 在室温下水浴超声 90 min, 11000 r/min 12 min 离心取上清液, 重复提取一次, 合并上清液定容至 50 mL, 即为待测液。取上述待测样品 0.4 mL 于棕色离心管中, 加入 2 mL 10% 福林酚显色剂, 充分摇匀, 6 min 后加入 2 mL 7.5%( w/w) $Na_2CO_3$ 溶液, 混匀定容至 10 mL, 75 ℃ 水浴 10 min, 于 765 nm 波长下测其吸光度, 以甲醇为空白对照, 绘制标准曲线(Y=0.4951X+0.0613, $R^2$=0.9993)。可萃取酚含量以每克样品的毫克没食子酸当量(Gallic acid equivalents, GAE)表示。

采用酸碱差示法测定花色苷含量[29], 称取 0.5 g 西梅冻干粉(西梅果浆 2 g)于 50 mL 棕色离心管中, 加 20 mL 60% 酸化乙醇, 调节 pH2.0, 在 60 ℃ 水浴下浸提 2 h, 离心取上清液, 定容至 20 mL, 4 ℃ 备用。取 2 只 10 mL 棕色离心管, 各加 4 mL 提取液, 分别用 pH1、pH4.5 缓冲液定容至 10 mL, 反应平衡 15 min, 在 510 nm 和 700 nm 下测吸光值。花色苷含量以毫克矢车菊素-3-O-葡萄糖苷当量每 100 g 样品表示。

$$\Delta A=(A_{510}^{pH1.0} - A_{700}^{pH1.0}) - (A_{510}^{pH4.5} - A_{700}^{pH4.5}) \quad \text{式(2)}$$

$$X(mg/100\ g) = \frac{\Delta A \times Mw \times DF \times 100 \times V}{\varepsilon \times 1 \times m} \quad \text{式(3)}$$

式中: A 为溶液吸光度; $\varepsilon$ 为矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的摩尔吸收系数(26900 $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$); l 为比色皿的光程(1 cm); $M_w$ 为矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的相对分子质量(449.2); DF 为稀释倍数; V 为溶液体积(mL); m 为样品质量(g)。

1.2.3.4　西梅果实和果浆可溶性固形物(SSC)、可滴定酸(TA)、固酸比、总糖含量、还原糖含量的测定　采用手持式折光仪测定法测定可溶性固形物。参考 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》[30] 中自动电位滴定法测定可滴定酸含量, 以苹果酸计。固酸比为可溶性固形物与可滴定酸比值。采用苯酚硫酸法[31] 测定总糖含量。参考 NY/T 2742-2015《水果及制品可溶性糖的测定 3,5-二硝基水杨酸比色法》[32] 行业标准, 采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法测定还原糖含量。

1.2.3.5　西梅果浆粒径测定　参照 Augusto 等[33] 的方法, 采用激光粒度分析仪测定西梅果浆的颗粒粒径分布, 并绘制粒径分布图, 西梅果浆粒径参数包括平均粒径(D50)、面积平均直径(D[4,3])和体积平均直径(D[3,2]), 结果表示为 μm。

1.2.3.6　西梅果浆浊度测定　参照 Reiter 等[34] 的方法稍作修改。取 1.5 mL 西梅果浆，稀释 20 倍后，使用哈希浊度仪测定其浊度，结果表示为 NTU。

1.2.3.7　西梅果浆悬浮稳定性测定　取 10 mL 西梅果浆于 15 mL 离心管中，在 11000 r/min 转速下，离心 12 min，取上清液，稀释 20 倍，使用哈希浊度仪测定其浊度。采用离心前、后的浊度差来表示果浆的悬浮稳定性，结果表示为 NTU。

1.2.3.8　西梅果浆流变特性测定　静态流变学测定：参照 Ahmed 等[35] 的方法，采用流变仪对样品流变学数据进行测定。平行板（直径 50 mm）的间隙尺寸为 1 mm，样品测定温度为 25±1 ℃。取 3.5 mL 西梅果浆置于夹具和平板转子之间，在稳态剪切模式下，测定从 0.1~100 $s^{-1}$ 范围内剪切应力和表观黏度随剪切速率的变化。

动态流变学特性测定：采用流变仪、平板转子（直径 50 mm，间隙 1 mm），用水循环系统控制测定温度为 25±1 ℃。在振荡剪切模式下，测定储能模量（G'）和损耗模量（G"）随角频率（0.1~100 rad/s）的变化情况。

### 1.3　数据处理

所有实验重复 3 次，数据以平均值±标准差表示，采用 Excel 软件进行数据统计，Origin 2021 软件作图。通过 SPSS 27.0 软件进行数据分析：采用单因素方差分析结合 Duncan 检验进行多组间差异显著性分析，$P$<0.05 为差异有统计学意义，Pearson 法进行相关性分析，运用主成分分析（PCA）进行降维分析，并采用多元线性回归建立预测模型。

## 2　结果与分析

### 2.1　贮藏期果实及制浆理化品质指标

2.1.1　果实硬度和水分含量　果实硬度是反映西梅采后后熟的重要指标。不同贮藏期西梅果皮、果肉硬度的变化趋势如图 1A 所示，西梅果皮和果肉的硬度均呈现下降趋势，果皮硬度 0 d 到 49 d 从 7.33 N 下降到 2.54 N，果肉的硬度从 0.63 N 下降到 0.08 N。西梅成熟过程中硬度下降，果实软化，可能与果实采后成熟过程中细胞壁结构和组成发生改变，果胶、纤维素和半纤维素等细胞壁多糖部分或完全溶解有关[36]。马燕燕[6] 研究发现随贮藏时间延长西梅果实硬度持续下降，其中水溶性果胶含量持续上升，螯合性果胶、碱溶性果胶、纤维素和半纤维素含量持续下降。水分含量是影响果实质地的因素之一，本研究检测了果实贮藏期间水分含量的变化（图 1B）。果实水分含量始终维持在 75%~77% 的稳定范围内，变异系数为 0.8%，其波动幅度对硬度测定结果的影响较小。

2.1.2　果实和果浆色泽、可萃取酚、花色苷　如图 2A~图 2D 所示，西梅在贮藏过程中果皮、果肉和果浆 $L^*$、$a^*$、$b^*$ 和 $\Delta E$ 的变化显著（$P$<0.05），果皮和果肉 $L^*$ 值呈现出先升高后降低的趋势，果浆 $L^*$ 值呈现出降低的趋势，变异系数为 1.46%，离散程度较小，这与 Ruiz 等[37] 的研究结果一致，其研究表明杏果肉 $L^*$ 值的降低与类胡萝卜素的积累过程密切相关。果皮和果肉 $a^*$ 值整体呈现出先升高后降低的趋势，果浆 $a^*$ 值在第 21 d 和第 42 d 达到峰值。果皮和果肉 $b^*$ 值呈先升高后降低的趋势，果浆 $b^*$ 值呈缓慢下降趋势，变化较小。Ayour 等[38] 研究发现，杏果皮 $a^*$ 值的增加与 $L^*$ 值的降低表明果实的颜色加深，这一变化与成熟过程中叶绿素的降解及类胡萝卜素的合成密切相关，并发现 $a^*$ 值与 $b^*$ 值之间存在强相关性。Krapfenbauer 等[39] 发现当 $\Delta E$>2~3.5 时，果浆色泽呈现肉眼可见的变化。如图 2D 所示果皮和果肉 $\Delta E$ 均大于 2，果浆 $\Delta E$ 逐渐增加。

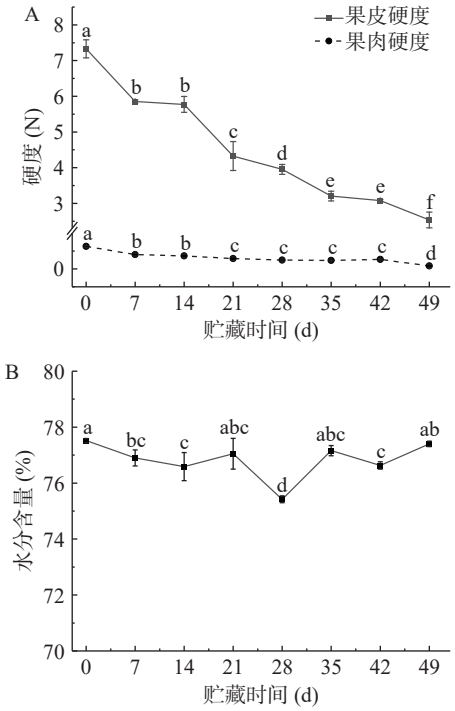



图 1　不同贮藏期西梅果皮、果肉硬度和水分含量的变化趋势

Fig.1　Variation trends of peel firmness, flesh firmness, and moisture content of prune plums during different storage periods

注：不同小写字母表示不同贮藏时间下有显著性差异（$P$<0.05），图 2 同。

如图 2E 所示，随贮藏时间的延长，西梅果实和果浆的可萃取酚含量发生显著的变化（$P$<0.05）。西梅果实可萃取酚含量呈波动性变化，总体呈上升趋势。果浆可萃取酚含量均大于果实可萃取酚含量，这与鲜果易发生酶促褐变[40]，导致酚类降解有关，而果浆加工过程中的烫漂处理抑制了酶促褐变，促进果胶纤维素等大分子降解，提高了酚类含量[26]。果浆可萃取酚含量在 42 d 达到较高水平后，于 49 d 显著下降，而同期果实可萃取酚含量仅小幅度降低，该变化可能与贮藏后期果实软化加剧及组织完整性下降有关，导致原料在灭酶处理过程中与氧气的接触面积增大，更易发生酚类氧化损失。果浆花色苷含量与可萃取酚含量变化趋势一致，在第 21 d 和第 42 d 较高，

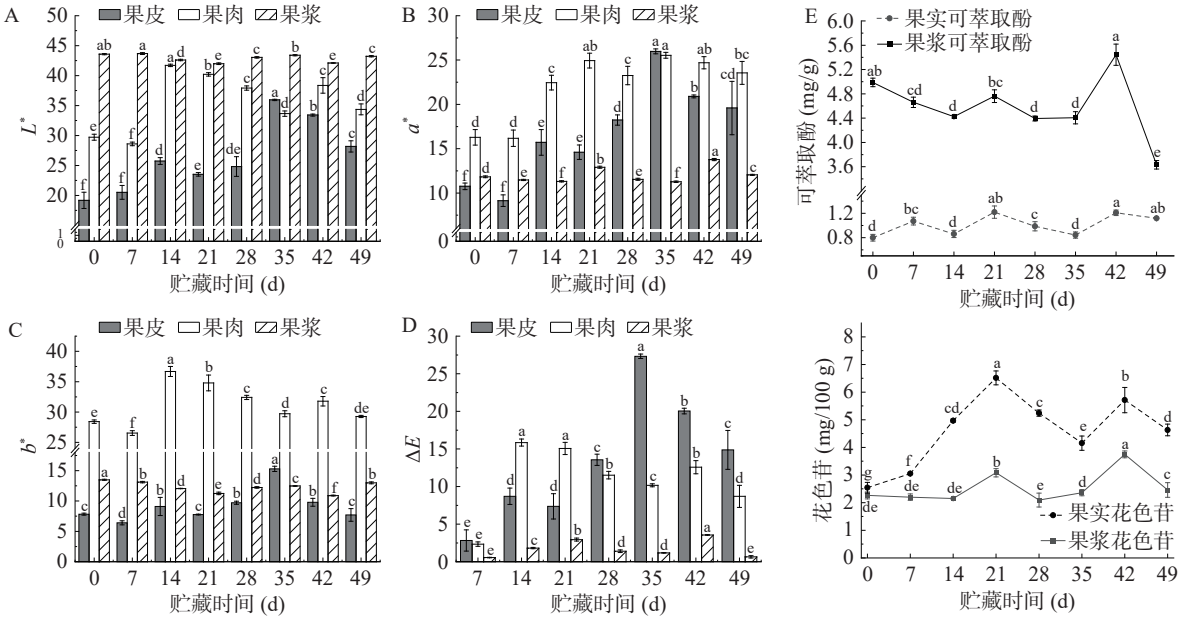



图 2 不同贮藏期西梅果实及其制备果浆色泽、可萃取酚、花色苷含量的变化趋势

Fig.2 Variation trends of color, extractable phenols, and anthocyanins of fresh and processed prune plum pulp during different storage periods

注: A 为不同贮藏期果皮、果肉和果浆 $L^*$的变化趋势; B 为不同贮藏期果皮、果肉和果浆 $a^*$的变化趋势; C 为不同贮藏期果皮、果肉和果浆 $b^*$的变化趋势; D 为不同贮藏期果皮、果肉和果浆 $\Delta E$ 的变化趋势; E 为不同贮藏期西梅果实和果浆可萃取酚、花色苷的变化趋势。

这与果浆色泽 $a^*$值(图 2B)变化一致。

果浆色泽与花色苷、酚类物质紧密相关。前人研究表明果实花色苷[41]、叶绿素、类胡萝卜素[42] 等呈色物质共同决定果实的颜色。

2.1.3 果实和果浆可溶性固形物(SSC)、可滴定酸(TA)、固酸比、总糖和还原糖 如表 1 所示, 在贮藏期间, 西梅果实的 SSC 含量从 22.10% 上升至第 14 d 达到峰值 23.97%, 之后维持较高水平。第 35 d 的 SSC 含量相对偏低, 可能与生鲜原料随机取样过程中果实个体差异有关。Xiong 等[43] 发现在 4 ℃ 下西梅呼吸速率和乙烯释放速率于第 14 d 达到峰值。Ma 等[44] 也发现在 4 ℃ 下西梅乙烯产量于第 9 d 左右达到峰值。SSC 峰值出现时间点与呼吸跃变高峰高度同步, 这与呼吸跃变产生大量乙烯, 促进淀粉、果胶等大分子有机物转变为可溶性糖和其他小分子物质有关[45]。跃变高峰后, 虽然糖作为呼吸底物被消耗, 但同时其他大分子物质的持续降解和水分蒸发可能补偿或超过消耗量, 使得 SSC 得以维持。果实 TA 呈现持续下降趋势, 从初始 0.59% 降至 0.43%, 在呼吸跃变峰值(第 14 d)后降幅增加。在呼吸跃变期, 为了满足急剧增加的能量需求, 三羧酸循环活动增强, 苹果酸、柠檬酸等有机酸被加速氧化分解, 呼吸速率越高, 酸的消耗速率也越快[46]。果浆 TA 虽然也呈下降趋势(从 0.71% 降至 0.56%), 但其整体水平始终高于果实, 这与果浆制备过程中添加抗坏血酸有关。固酸比的变化趋势显示, 果实和果浆分别从

表 1 不同贮藏期西梅果实及其制备果浆可溶性固形物、可滴定酸、固酸比、总糖和还原糖的变化

Table 1 Changes of soluble solids, titrable acid, solid-acid ratio, total sugar, and reducing sugar of prune plum and pulp during different storage periods

| 贮藏时间(d) | 鲜果 | | | | | 果浆 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 可溶性固形物(%) | 可滴定酸(%) | 固酸比 | 总糖(mg/g) | 还原糖(mg/g) | 可溶性固形物(%) | 可滴定酸(%) | 固酸比 | 总糖(mg/g) | 还原糖(mg/g) |
| 0 | 22.10±0.00$^{d}$ | 0.59±0.00$^{a}$ | 37.25±0.22$^{f}$ | 149.32±3.17$^{bcd}$ | 70.81±2.15$^{d}$ | 22.25±0.12$^{c}$ | 0.71±0.00$^{a}$ | 31.36±0.10$^{f}$ | 114.46±9.78$^{ef}$ | 104.47±1.86$^{c}$ |
| 7 | 23.70±0.10$^{b}$ | 0.57±0.00$^{b}$ | 41.36±020$^{e}$ | 151.26±4.23$^{ab}$ | 71.53±3.30$^{bc}$ | 21.38±0.10$^{e}$ | 0.66±0.00$^{b}$ | 32.33±0.06$^{e}$ | 107.48±1.91$^{f}$ | 100.90±0.10$^{d}$ |
| 14 | 23.97±0.06$^{a}$ | 0.58±0.00$^{b}$ | 41.30±0.27$^{e}$ | 145.45±4.02$^{bcd}$ | 75.46±0.42$^{ab}$ | 22.81±0.06$^{b}$ | 0.65±0.00$^{b}$ | 35.010±0.26$^{d}$ | 118.94±2.26$^{e}$ | 108.80±2.26$^{b}$ |
| 21 | 23.63±0.06$^{b}$ | 0.52±0.00$^{c}$ | 45.55±0.13$^{d}$ | 140.11±2.86$^{cd}$ | 75.58±0.61$^{a}$ | 22.91±0.12$^{b}$ | 0.66±0.00$^{b}$ | 34.730±0.41$^{d}$ | 171.53±9.67$^{b}$ | 107.37±2.05$^{b}$ |
| 28 | 23.87±0.06$^{a}$ | 0.48±0.00$^{d}$ | 49.91±0.52$^{c}$ | 139.38±8.82$^{d}$ | 71.61±1.38$^{bc}$ | 22.25±0.12$^{c}$ | 0.61±0.00$^{c}$ | 36.29±0.41$^{c}$ | 152.45±6.43$^{cd}$ | 100.13±1.80$^{d}$ |
| 35 | 18.97±0.15$^{e}$ | 0.44±0.01$^{e}$ | 51.86±1.44$^{b}$ | 149.19±1.32$^{bcd}$ | 68.71±1.66$^{d}$ | 20.78±0.00$^{f}$ | 0.57±0.00$^{d}$ | 36.26±0.40$^{c}$ | 148.44±2.75$^{d}$ | 94.47±0.764$^{e}$ |
| 42 | 23.47±0.06$^{c}$ | 0.43±0.00$^{f}$ | 54.44±0.08$^{a}$ | 161.90±12.27$^{a}$ | 71.59±1.52$^{bc}$ | 23.35±0.06$^{a}$ | 0.58±0.00$^{d}$ | 40.10±0.58$^{a}$ | 160.92±6.59$^{c}$ | 106.53±0.25$^{bc}$ |
| 49 | 23.40±0.00$^{c}$ | 0.43±0.01$^{f}$ | 54.60±0.67$^{a}$ | 150.60±0.63$^{bc}$ | 72.18±3.41$^{abc}$ | 21.98±0.02$^{d}$ | 0.56±0.00$^{e}$ | 39.14±0.42$^{b}$ | 184.68±3.10$^{a}$ | 115.80±1.71$^{a}$ |
| 变异系数(%) | 7.37 | 13.79 | 14.07 | 4.80 | 3.20 | 3.78 | 8.31 | 8.44 | 19.56 | 6.15 |

注: 不同小写字母表示不同贮藏时间下有显著性差异($P$<0.05), 表2~表3同。

37.25 和 31.36 升至 54.60 和 39.14，证实贮藏过程酸甜口味持续改善。但果浆固酸比始终低于果实，这与其较高的 TA 水平直接相关。果实总糖含量变异系数为 4.80%，变化较小。果浆总糖含量在贮藏期间呈上升趋势，增幅为 61.35%。这与果实软化有关，呼吸跃变高峰后，果实硬度急剧下降，果胶、半纤维素等细胞壁多糖被水解为可溶性小分子糖，在制浆过程中与果实本身的糖一起被充分研磨释放，导致了果浆总糖含量在贮藏中后期（第 21 d 后）急剧上升。西梅果实在贮藏期间还原糖含量保持相对稳定（68.71~75.58 mg/g），而果浆的还原糖不仅整体水平显著高于果实（94.47~115.80 mg/g），还呈现“降低-升高-降低-升高”的波动模式（$P$<0.05）。这种差异主要源于加工过程中的烫漂处理：高温条件一方面促进多糖水解，加剧还原糖的释放[47]；另一方面也可能加速美拉德反应[48]，导致还原糖的消耗。两种相反作用的动态平衡最终表现为果浆还原糖含量的波动特征。

2.1.4　果浆粒径、浊度和悬浮稳定性　西梅果浆粒径分布特征如图 3 所示，其粒径分布表现为单峰正态分布。随着贮藏时间的延长，颗粒粒径分布更趋向于集中在 300~350 μm 区间内，颗粒粒径在 1400~2000 μm 的体积百分比增多。表 2 显示了平均粒径（D50）、面积平均直径（D[4,3]）和体积平均直径（D[3,2]）的值。D[4,3] 主要受大颗粒的影响，D[3,2] 主要受小颗粒的影响[49]，所有样品的 D[4,3] 均约为

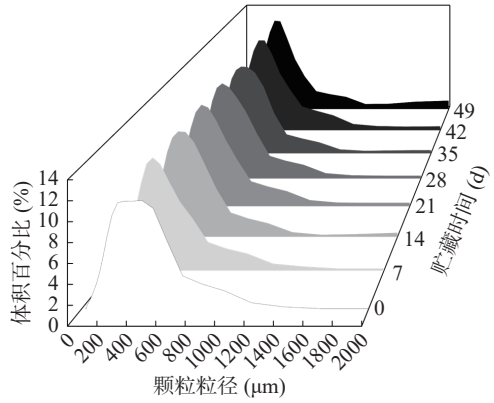



图 3　西梅果实贮藏期对制浆粒径分布的影响

Fig.3　Effect of storage period of prune plum fruit on particle size distribution in pulp

表 2　西梅果实贮藏期对制浆 D50、D[4,3] 和 D[3,2] 的影响

Table 2　Effect of prune plum storage period on pulp D50, D[4,3] and D[3,2]

| 贮藏时间(d) | D50(μm) | D[4,3](μm) | D[3,2](μm) |
|---|---|---|---|
| 0 | 276.53±4.44$^{a}$ | 317.70±9.37$^{abc}$ | 210.43±2.66$^{a}$ |
| 7 | 261.67±0.40$^{cd}$ | 313.07±3.81$^{abc}$ | 195.1±0.87$^{d}$ |
| 14 | 266.4±2.6$^{bcd}$ | 303.7±1.80$^{bc}$ | 204.0±1.30$^{ab}$ |
| 21 | 267.27±3.97$^{bc}$ | 328.37±6.05$^{ab}$ | 201.43±3.40$^{bcd}$ |
| 28 | 266.23±0.86$^{bcd}$ | 325.97±2.05$^{ab}$ | 203.23±0.93$^{bc}$ |
| 35 | 260.73±4.97$^{d}$ | 293.5±0.10$^{c}$ | 196.67±1.62$^{cd}$ |
| 42 | 275.67±2.87$^{a}$ | 333.00±10.51$^{a}$ | 205.57±2.53$^{ab}$ |
| 49 | 268.16±6.25$^{ab}$ | 336.40±33.50$^{a}$ | 203.57±8.79$^{ab}$ |

D[3,2] 的 1.5 倍，表明果浆大颗粒数量多于小颗粒。D50 变异系数为 2.3% 相对稳定。贮藏后期 D[4,3] 显著增加（$P$<0.05），与果胶等大分子降解，胶体稳定性下降，进而促进颗粒（尤其是大颗粒）聚集加剧有关。

浊度是反映果浆中悬浮胶体颗粒含量的重要指标，悬浮稳定性反映了果浆的稳定性。如图 4 所示，随着贮藏时间的延长，西梅果浆浊度呈现显著上升趋势，而悬浮稳定性则相应下降（表现为果浆离心前后浊度差不断增大）。这一现象与可滴定酸含量的逐渐降低密切相关。Yu 等[50] 在研究酸化处理对胡萝卜汁品质及保质期的影响中发现，可滴定酸含量高的胡萝卜汁样品表现出较低浊度，这可能源于酸性环境下颗粒表面电荷状态的改变，从而影响了胶体颗粒的聚集行为[51]。除此之外，浊度升高还与果胶有关，根据 Yamasaki 等[52] 的研究，苹果汁悬浮颗粒主要由蛋白质-碳水化合物复合物组成，其表面是带负电荷的果胶类物质。Zhao 等[53] 的研究表明，亲水胶体（如果胶）可通过增加体系黏度来维持果汁稳定性。在本研究中，随着贮藏时间延长，果胶分子逐渐降解，导致体系黏度下降、胶体稳定性降低。这一机制可进一步由斯托克斯定律（$v=2r^2g(\rho_p-\rho_0)/9\eta$）解释，颗粒粒径（r）和表观黏度（$\eta$）是影响沉降速率（v）的主要因素[54]。颗粒越小，黏度越大，沉降速率越小，系统越稳定。果浆稳定性降低主要是由于颗粒间发生了聚集使粒径增加和体系黏度因高分子物质降解而下降，从而在宏观上表现为悬浮稳定性降低与浊度升高。

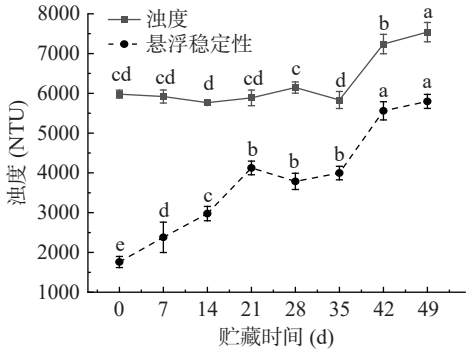



图 4　西梅果实贮藏期对制浆浊度和悬浮稳定性的影响

Fig.4　Effect of storage period on pulp turbidity and suspension stability of prune plum

注：不同小写字母表示不同贮藏时间下有显著性差异（$P$<0.05），悬浮稳定性为果浆离心前后浊度差值。

2.1.5　果浆流变特性　如图 5A 所示，西梅果浆的剪切应力随着剪切速率的增加而增加，并且有剪切变稀的趋势（0<n<1），说明果浆表现出假塑性行为。如图 5B 所示，在 0.1~100 $s^{-1}$ 的范围内，所有处理样品的表观黏度均随剪切速率的增加而降低，果浆表现出剪切稀化行为。

不同贮藏时间的西梅果浆储能模量 G'和损耗模量 G"的变化如图 5C~图 5D 所示。从图中可以看出 G'始终大于 G"，表示体系属于凝胶体系。并且随着角频率的增大，G'和 G"值呈现上升的趋势。从第

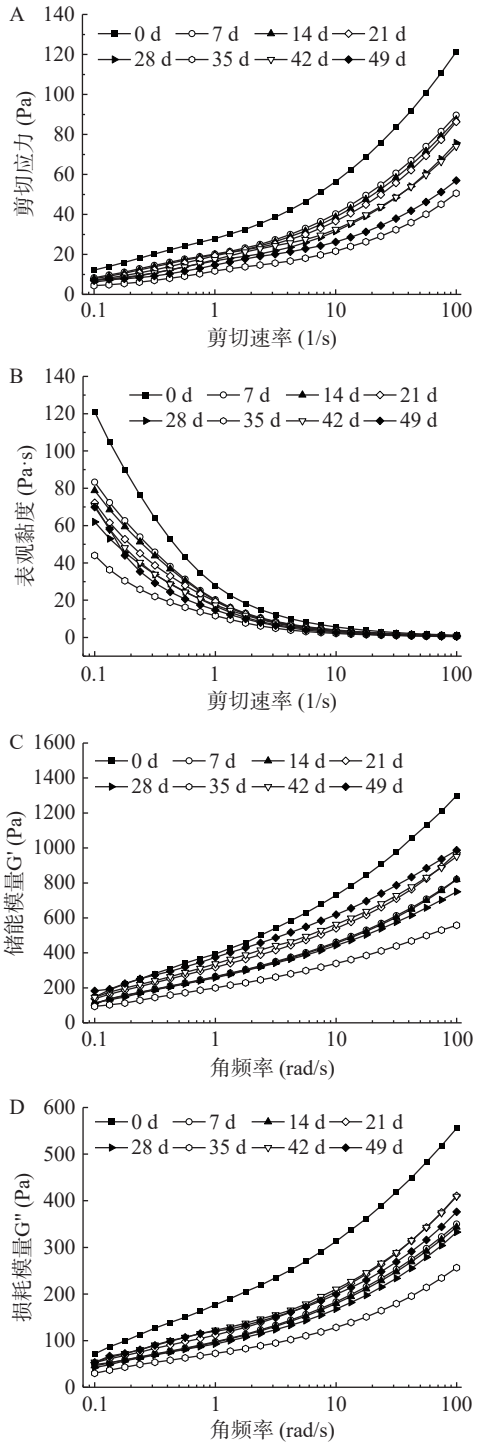



图 5 西梅果实贮藏期对制浆流变特性的影响

Fig.5 Effect of storage period of prune plum on rheological characteristics of pulp

注: A 西梅果实贮藏期对制浆剪切应力的影响; B 西梅果实贮藏期对制浆表观黏度的影响; C 西梅果浆储能模量(G')与角频率的关系; D 西梅果浆损耗模量(G")与角频率的关系。

0 d 到第 35 d, G'和 G"值呈现降低的趋势, 可能与果浆体系中果胶含量下降及其网络结构的降解有关。do Nascimento 等[55] 研究发现随着果胶添加量由 3% 增至 8%, G'和 G"值显著上升。Massa 等[56] 通过对比桃浆稀释前后流变特性发现, 当可溶性固形物从 21% 稀释到 11.9% 时, G'和 G"值大幅降低, 表明较高浓度果肉和果胶有助于形成更完善的三维网络结构。第 42 和 49 d, G'和 G"值出现回升, 该现象可能与流变行为的主导因素发生转变有关。在贮藏前期, 果胶构成的凝胶网络是体系黏弹性的主要贡献者, 其降解直接导致 G'与 G"下降。然而, 进入贮藏后期, 尽管果胶网络可能已严重破坏, 但持续上升的总糖含量开始主导体系的流变特性。Nourmohammadi 等[57] 研究发现 G'和 G"值随着糖浓度的增加而增加, 糖浓度的增加会降低果胶-糖-酸混合物中的水分, 从而降低氢键的可能性以及水与果胶聚合物链结合的可能性[58]。

采用 Power-Law 模型对剪切应力随剪切速率的变化曲线进行拟合, $R^2$>0.99 表明该模型拟合效果良好。从表 3 可知, 西梅果浆的流动特性指数(n)和稠度指数(k)随贮藏时间的变化呈现不同结果。随着贮藏时间的增加, 西梅果浆 n 提高, k 下降, 表明果浆黏度逐渐降低, 流动性提高。这可能是由于贮藏过程中果胶降解导致果实软化[59], 进而降低所制果浆黏度。Bezerra 等[60] 研究了果胶添加量对百香果果浆流变特性的影响, 结果表明, 果胶添加量越多, 剪切应力随剪切速率的变化更大, 这与果胶在酸性条件下与蔗糖产生的强相互作用有关。在贮藏后期西梅果浆 n 下降, k 上升, 主要源于悬浮颗粒聚集与糖浓度增加的协同效应。颗粒聚集增大了粒径, 增强了流体内部阻力[61]。与此同时, 糖含量增加提升了果浆体系的密度和黏度[62]。二者共同作用导致贮藏后期黏度增加和流动性降低。

表 3 西梅果实贮藏期对制浆静态流变拟合参数的影响

Table 3 Effect of storage period of prune plum on static rheological fitting parameters of pulp

| 贮藏时间(d) | k(Pa·s$^n$) | n | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 27.2079±2.2490$^a$ | 0.3241±0.0004$^{cd}$ | 0.9968 |
| 7 | 20.6000±0.5529$^b$ | 0.3329±0.0015$^b$ | 0.9934 |
| 14 | 18. 4424±1.2216$^c$ | 0.3349±0.0001$^b$ | 0.9927 |
| 21 | 15.7424±0. 7675$^d$ | 0.3402±0.0003$^a$ | 0.9922 |
| 28 | 13.5998±0.6425$^e$ | 0.3421±0.0025$^a$ | 0.9919 |
| 35 | 9.6733±0.3398$^f$ | 0.3266±0.0052$^c$ | 0.9950 |
| 42 | 15.9714±0.6974$^d$ | 0.3275±0.0047$^c$ | 0.9954 |
| 49 | 12.1571±0.3301$^e$ | 0.3203±0.0022$^e$ | 0.9954 |

## 2.2 西梅果浆综合品质评价

### 2.2.1 西梅果浆核心品质评价指标筛选

2.2.1.1 西梅果实和果浆品质指标相关性分析 西梅果实相关性如图 6A 所示。果皮果肉硬度与可滴定酸呈极显著正相关($P$<0.001), 与固酸比、可萃取酚、花色苷、果皮色泽及果肉 $a^*$值呈显著负相关($P$<0.05), 说明果实软化伴随着酸降解、色素积累及酚类物质增加。花色苷含量与可溶性固形物呈极显著正相关($P$<0.01), Shi 等[63] 的研究表明, 杨梅果实成熟过程中花色苷的积累与糖分含量呈正相关, 高糖水平可能通过调控次生代谢途径促进花色苷的生物合成; Huang 等[42] 研究发现糖类与花青素含量存在

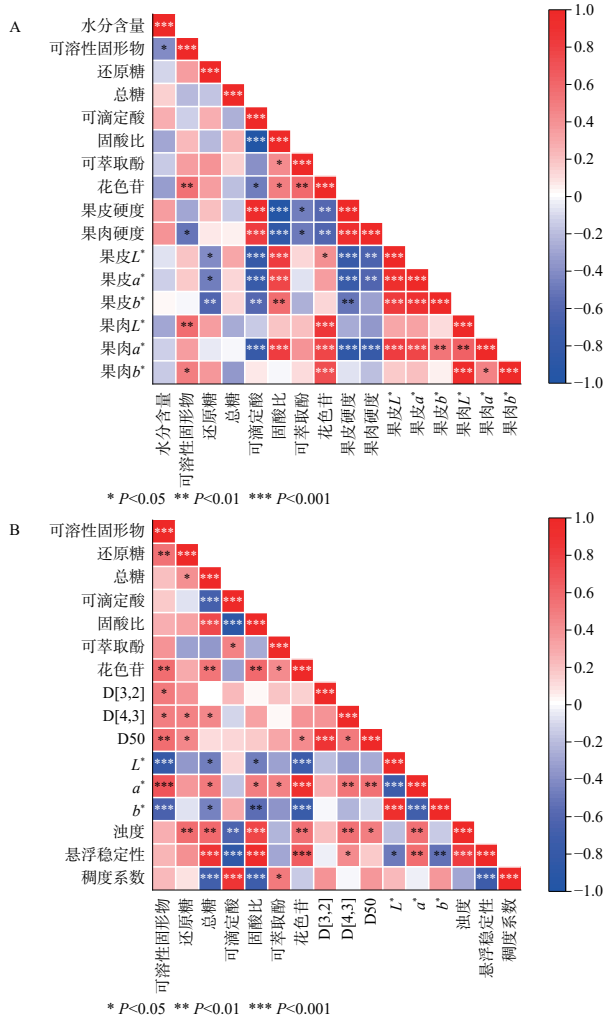



图 6　西梅鲜果(A)和果浆(B)品质指标相关性热图

Fig.6　Correlation heatmap of quality indicators of fresh prune fruit (A) and prune pulp (B)

显著相关性，表明糖类可能在杏花青素合成中起到信号分子的作用，本研究在西梅果实中观察到类似现象。

西梅果浆相关性如图 6B 所示，固酸比与花色苷、总糖、浊度及悬浮稳定性呈极显著正相关($P$<0.01)，与可滴定酸、稠度系数呈极显著负相关($P$<0.001)。即固酸比越高，果浆中花色苷和总糖含量越高，可滴定酸含量越低，且浊度和悬浮稳定性增加，稠度系数降低；花色苷与 $a^*$值呈极显著正相关($P$<0.001)，与 $L^*$、$b^*$值呈极显著负相关($P$<0.001)，表明其含量直接影响果浆色泽。

果实与果浆相关性如图 7 所示。果实可萃取酚和花色苷含量与果浆 $a^*$值呈正相关，与 $L^*$、$b^*$值呈负相关；果皮硬度与果浆固酸比、总糖含量、浊度和悬浮稳定性呈极显著负相关($P$<0.01)，与果浆可滴定酸、稠度系数呈极显著正相关($P$<0.001)。随着后熟程度的增加，果胶酶等细胞壁水解酶活性增强[64]，导致果实软化，硬度降低，同时糖分持续积累，酸度下降[65]，进而使果浆浊度增加。果实花色苷积累会提升果浆 $a^*$值，导致果浆偏红。说明果实后熟状态直接影响果浆的颜色、口感、稳定性和加工适宜性。

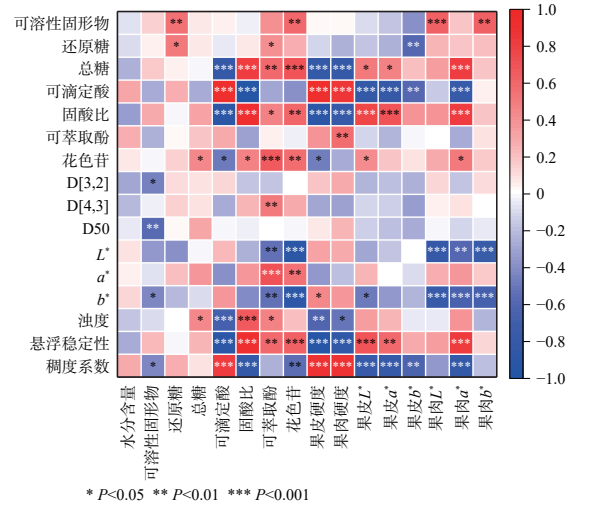



图 7　不同贮藏期下西梅鲜果(X 轴)与同期制备果浆(Y 轴)品质指标的相关性热图

Fig.7　Heat map of quality indexes of prune plum fruit (X axis) and pulp prepared at the same period (Y axis) under different storage periods

2.2.1.2　西梅果浆品质指标主成分分析　西梅果浆指标间的相关性分析结果说明测定指标所反映的信息存在重叠现象，所以有必要对 16 项品质指标进行归类和简化。本研究采用主成分分析(PCA)对西梅果浆品质指标进行降维处理[14]，通过消除指标间的冗余信息来筛选影响综合品质评价的核心指标。由表 4 所示，对果浆 16 项理化指标进行主成分分析，前 3 个主成分的特征值大于 1，累计方差贡献率为 82.187%。PC1 与 PC2 的二维分析见图 8A，与 PC3 的二维分析见图 8B。综合图 8A、图 8B 可以将 $L^*$、

表 4　西梅果浆品质指标的主成分载荷矩阵、特征值和方差贡献率

Table 4　Principal component load matrix, eigenvalue and variance contribution rate of prune plum pulp quality index

| 指标 | PC1 | PC2 | PC3 |
|---|---|---|---|
| 悬浮稳定性 | 0.894 | −0.426 | 0.051 |
| 固酸比 | 0.856 | −0.42 | 0.032 |
| 花色苷 | 0.832 | 0.243 | −0.3 |
| $a^*$ | 0.824 | 0.4 | −0.197 |
| 总糖 | 0.796 | −0.39 | 0.079 |
| 浊度 | 0.761 | −0.154 | 0.47 |
| $L^*$ | −0.738 | −0.3 | 0.454 |
| $b^*$ | −0.711 | −0.14 | 0.644 |
| D[4,3] | 0.591 | 0.255 | 0.366 |
| 稠度系数 | −0.446 | 0.82 | 0.201 |
| 可滴定酸 | −0.584 | 0.75 | −0.031 |
| 可萃取酚 | 0.016 | 0.724 | −0.52 |
| 可溶性固形物 | 0.621 | 0.652 | −0.088 |
| D50 | 0.452 | 0.644 | 0.462 |
| D[3,2] | 0.252 | 0.624 | 0.493 |
| 还原糖 | 0.529 | 0.196 | 0.56 |
| 特征值 | 6.989 | 3.956 | 2.205 |
| 贡献率(%) | 43.680 | 24.724 | 13.783 |
| 累积贡献率(%) | 43.680 | 68.404 | 82.187 |

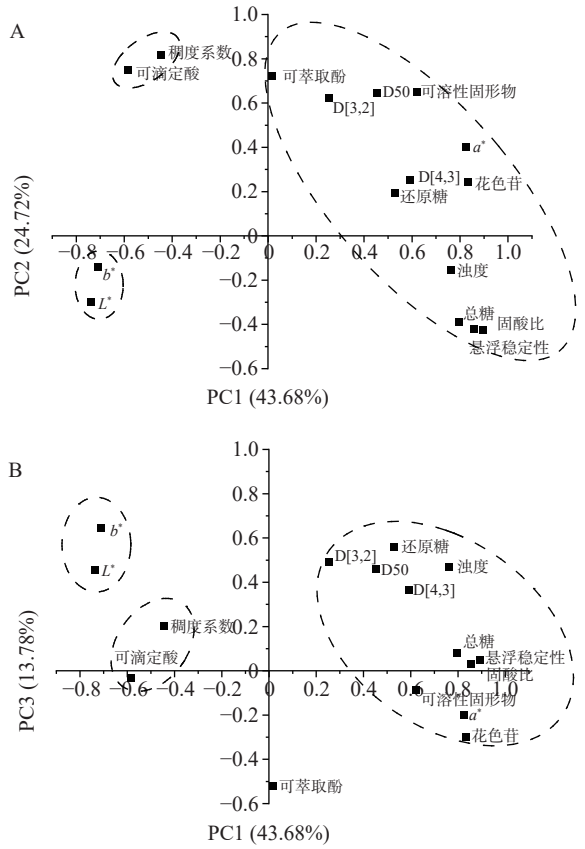



图 8 主成分分析 PC1 vs. PC2(A)与 PC1 vs. PC3(B)二维排序图

Fig.8 Two-dimensional ordination plots of PC1 vs. PC2 (A) and PC1 vs. PC3 (B) from principal component analysis

$b^*$值归为一类, 稠度系数和可滴定酸归为一类, 悬浮稳定性、固酸比、花色苷、$a^*$值、总糖、浊度、D[3,2]、D[4,3]、D50、可溶性固形物、还原糖归为一类。

$L^*$值与 $b^*$值中, $L^*$值变异系数为 1.43%, 而 $b^*$值变异系数为 6.92%, 因此选择 $b^*$值为核心因子; 可滴定酸和稠度系数之间呈显著正相关, 变异系数分别为 7.91% 和 31.11%, 考虑到果浆的流体黏度对综合品质也有很大影响, 因此选择稠度系数为核心评价因子。悬浮稳定性、浊度、D[3,2]、D[4,3]、D50 与果浆的物理性质有关, 因此物理性质以稠度系数为代表, 而固酸比、可溶性固形物、总糖、还原糖与果浆的酸甜口感有关, 固酸比为可溶性固形物和可滴定酸的比值, 因此选择固酸比作为核心评价因子。

2.2.2 西梅果浆综合品质评价模型构建 为准确评估筛选得到的 3 项果浆核心品质指标(固酸比、稠度系数、$b^*$值)对西梅果浆综合品质的重要程度, 需考虑各指标对品质影响的差异性。由于直接赋予相同权重会导致评价结果偏离实际品质特征, 因此本研究采用层次分析法中的 1~9 标度法建立 Y-P 判断矩阵(表 5), 对筛选出的 5 个核心指标赋予权重。计算得出其一致性比率(consistency ratio, CR)为 0.037, CR< 0.1, 认为判断矩阵一致性可接受。对矩阵特征向量归一化处理后得到的西梅果浆核心品质指标固酸比、稠度系数、$b^*$值的权重分别为 0.6333、0.2605、0.1062, 因此西梅果浆综合品质评价模型表示为 Y(果浆综合得分)=固酸比×0.6333+稠度系数×0.2605+$b^*$值×0.1062。对原始数据进行标准化后, 计算不同贮藏期果实制浆得分如表 6 所示。在第 0~7 d, 果浆的固酸比较低, 但第 0 d 较高的稠度系数有效弥补了其在风味属性上的不足, 对综合得分起到了关键的支撑作用, 因此得分相对较高(−0.28)。贮藏至第 21 d 时, 果浆品质处于一个关键的过渡阶段: 其固酸比虽略有回升, 但仍未恢复至理想水平; 同时, 前期作为主要支撑的稠度系数出现明显下降, 而表征色泽的 $b^*$值亦处于整个贮藏期的最低点。在此阶段, 三项核心指标均未表现出优势, 未能对综合得分形成有效拉动, 从而导致该时间点出现暂时的品质低谷(−0.38)。

表 5 西梅果浆判断矩阵 Y-P

Table 5 Prune plum pulp judgment matrix Y-P

| Y | P1 | P2 | P3 | 权重 |
|---|---|---|---|---|
| P1 | 1 | 3 | 5 | 0.6333 |
| P2 | 1/3 | 1 | 3 | 0.2605 |
| P3 | 1/5 | 1/3 | 1 | 0.1062 |

注: Y代表西梅果浆综合品质, P代表果浆核心指标; P1~P3分别代表果浆指标中固酸比、稠度系数、$b^*$。

表 6 不同贮藏期西梅果实制浆综合品质得分

Table 6 Comprehensive quality scores of prune plum pulp after different storage periods

| 贮藏期(d) | 0 | 7 | 14 | 21 | 28 | 35 | 42 | 49 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Y | −0.28 | −0.44 | −0.08 | −0.38 | −0.02 | 0.19 | 0.77 | 0.62 |

## 2.3 基于西梅果浆综合品质得分的果浆品质形成物质基础探索

基于西梅果浆综合品质得分, 通过多元线性回归分析, 构建果浆综合品质得分与果浆物质含量之间的定量关系模型($Y_1$)及果浆综合品质得分与果实基础理化指标之间的定量关系模型($Y_2$)。采用数学统计学分析, 挖掘影响西梅果浆综合品质的物质基础。通过 SPSS 软件进行多元线性回归模型分析, 以西梅果浆综合得分(Y)为因变量, 相关物质组成指标为自变量, 对所有候选变量分别进行统计学检验(除去变化不显著的量, 统计学上不显著的“t”值也被删除)。其中 $X_1$、$X_2$、$X_3$、$X_4$ 分别代表果浆可溶性固形物、可滴定酸、还原糖和总糖; $x_1$、$x_2$、$x_3$ 分别代表果实固酸比、总糖含量、果皮 $b^*$值。

如表 7 所示, 果浆综合品质得分与果浆物质组分及果实原料特性间的定量关系模型极显著相关, 表明所建立的回归方程具有统计学意义。$Y_1$ 与 $Y_2$ 存在紧密的内在关联。$Y_1$ 模型中, 可溶性固形物回归系数为 0.189, 呈正向贡献, 可滴定酸回归系数为−0.423, 呈负向相关, 表明“高糖低酸”的物质组分能够提升果浆品质, 本质是与固酸比关联的物质组分对综合品质产生显著影响。而 $Y_2$ 模型中, 果实固酸比的回归系数为 0.382, 与 $Y_1$ 的核心结论一致, 果实原料的固

酸比决定了果浆的糖、酸含量从而影响果浆综合品质。同时 $Y_2$ 模型中果皮 $b^*$值的负向影响（$b^*$值越低，黄色调越弱）揭示了果实色泽对果浆品质的重要作用。果皮 $b^*$值与果实固酸比为西梅采收期判断和加工原料筛选提供了重要的量化依据。

表 7　西梅果浆综合品质得分与果浆物质组分、果实原料特性间的多元线性回归方程

Table 7　Multiple linear regression equation of prune-plum pulp comprehensive quality score, pulp chemical components and raw fruit characteristics

| 模型 | 回归方程 | $R^2$ | Sig |
|---|---|---|---|
| $Y_1$ | $Y_1=0.189X_1-0.423X_2+0.150X_3-0.135X_4$ | 0.816 | 0.001 |
| $Y_2$ | $Y_2=0.382x_1-0.157x_2-0.179x_3$ | 0.726 | 0.001 |

$Y_1$（$R^2$=0.816）对品质变异的解释度高于 $Y_2$（$R^2$=0.726），表明果浆物质组分是品质形成的直接决定因素，而 $Y_2$ 则揭示了果浆品质形成的原料品质关键参数。$Y_2$ 模型的预测效果优化，应更广泛挖掘影响果浆品质形成的果实物质组分，例如果胶多糖等与质构特性相关的成分对品质的贡献的量化；其次，品质参数间可能存在复杂的非线性关系或交互作用，而线性回归模型难以完全捕捉这些复杂关系。尽管当前模型的解释已能为原料筛选和品质调控提供可靠指导，但通过引入更多关键变量、尝试非线性建模方法、扩大样本量或采用深度挖掘算法等措施，有望进一步提升模型的预测精度和理论价值。基于本研究结论，用于指导采用更大规模数据和更新算法建模，对深入理解果浆品质形成机制具有重要意义。

### 2.4　贮藏期西梅果实适宜制浆指标参数

通过对不同贮藏期西梅果实制浆综合品质得分（表 6）分析，发现贮藏初期（0~14 d），西梅果实硬度和酸度处于较高水平，导致所制果浆固酸比低，黏度高，口感较差，综合品质处于较低水平；贮藏中期（21~35 d），随着果实逐渐成熟软化，细胞壁结构降解，果浆黏度下降，果浆流动性有所提升，但总酸含量偏高，综合得分较初期虽有所上升但未达到峰值。当贮藏期达到 42 d 时，西梅果实达到最适宜制浆状态，该时期的西梅果实具有较高的可溶性固形物含量和较低的酸度，所制果浆固酸比高，具有适宜的口感和良好的色泽，综合得分最高。基于此研究结果，确定了西梅果实适宜制浆的关键指标参数，具体数据如表 8 所示。西梅原料与下表中相接近的品质指标，有利于加工制备综合品质较好的西梅果浆。

表 8　西梅果实适宜制浆指标参数

Table 8　Optimal indicator parameters for prune-plum fruit suitable for pulp

| 检测指标 | 参数 | 检测指标 | 参数 |
|---|---|---|---|
| 水分含量(%) | 76.63 | 果皮硬度(N) | 3.16 |
| 可溶性固形物(%) | 23.47 | 果肉硬度(N) | 0.24 |
| 可滴定酸(%) | 0.43 | 果皮$L^*$值 | 35.79 |
| 固酸比 | 54.44 | 果皮$a^*$值 | 21.40 |
| 总糖(mg/g) | 161.90 | 果皮$b^*$值 | 9.76 |
| 还原糖(mg/g) | 71.58 | 果肉$L^*$值 | 38.34 |
| 总酚(mg/g) | 1.21 | 果肉$a^*$值 | 24.68 |
| 花色苷(mg/100 g) | 5.71 | 果肉$b^*$值 | 31.65 |

## 3　结论

研究发现，随贮藏时间延长，西梅果实硬度显著下降，可溶性固形物、还原糖及固酸比上升，可滴定酸含量降低，可萃取酚和花色苷增加；细胞壁降解使果实软化，导致果浆体系黏度下降、胶体稳定性降低，浊度增加；而果实可萃取酚和花色苷影响果浆色泽。主成分分析结果表明，固酸比、稠度系数和 $b^*$值适宜作为核心品质指标用于评价果浆综合品质得分。果浆综合品质得分与果实基础理化指标之间的定量关系模型 $Y_2$ 可通过检测果实固酸比、总糖和果皮 $b^*$值实现对果浆品质的预测，为西梅采收期的判断和加工原料的筛选提供了重要量化依据。综合品质评价得分结果表明，贮藏 42 d 的西梅果实制浆品质最佳，具有适宜的酸甜口感和良好的色泽。综上所述，果实原料内在品质与制浆酸甜口感、流变特性及色泽密切相关。从科学研究支撑产业应用的深化需求来看，不同初始成熟度的果实在贮藏期、品质变化规律及制浆适宜性等方面均可能存在差异，未来可进一步研究并建立原料分级体系。

© 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] 王艺菡，王永刚，王剑瑞，等. 欧洲李 (西梅) 的原产地与保护利用[J]. 新疆林业，2021(4)：29−31. [WANG Yihan, WANG Yonggang, WANG Jianrui, et al. Origin, protection and utilization of European plum (*Prunus domestica* L.)[J]. Forestry of Xinjiang, 2021(4): 29−31.]

[2] 尼格尔热依·亚迪卡尔，朱璇，冯作山，等. '法兰西'西梅多酚组分鉴定及抗氧化活性评价[J]. 中国农学通报，2023, 39(34)：143−153. [NIGARY Y, ZHU X, FENG Z S, et al. Component identification and antioxidant activity evaluation of polyphenols from *Prunus domestica* 'French'[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(34): 143−153.]

[3] YANG Y Q, GALLAHER D D. Effect of dried plums on colon cancer risk factors in rats[J]. Nutrition and Cancer, 2005, 53(1): 117−125.

[4] PIIRAINEN L, PEUHKURI K, BÄCKSTRÖM K, et al. Prune juice has a mild laxative effect in adults with certain gastrointestinal symptoms[J]. Nutrition Research, 2007, 27(8): 511−513.

[5] 皇甫兆青. 不同保鲜处理方式对西梅果实品质及香气的影响[D]. 石河子：石河子大学，2023. [HUANGFU Zhaoqing. Effects of different preservation methods on fruit quality and aroma of ximei fruit[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.]

[6] 马燕燕. 近冰温贮藏对新疆西梅贮藏品质及软化的调控机制研究[D]. 石河子：石河子大学，2023. [MA Yanyan. Study on the regulation mechanism of near-freezing temperature storage on storage quality and softening of Xinjiang *Prunus domestica* L. Ximei[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.]

[7] WEI Kangli, MA Chen, SUN Ke, et al. Relationship between optical properties and soluble sugar contents of apple flesh during

storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 159: 111021.
[8] ALSHALLASH K S, ELNAGGAR I A, ABD EL-WAHED A E N, et al. Utilization of jojoba oil and salicylic acid as postharvest treatment on storability and fruit quality of 'Late Swelling' peach cultivar[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2023, 51(2): 12999.
[9] QIN Qiaoping, WANG Lili, WANG Qiankun, et al. Postharvest flavor quality changes and preservation strategies for peach fruits: A comprehensive review[J]. Plants, 2025, 14(9): 1310.
[10] JAN I, RAB A, SAJID M W. Storage performance of apple cultivars harvested at different stages of maturity[J]. Journal of Animal and Plant Sciences, 2012, 22: 438−447.
[11] 袁超, 李晓磊, 孟新涛, 等. 低温贮藏下不同 SSC 阿克苏富士苹果制汁的适宜性[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(4): 607−615. [YUAN Chao, LI Xiaolei, MENG Xintao, et al. Study on juice suitability of different SSC Aksu Fuji apples stored at low temperature[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(4): 607−615.]
[12] WANG Haifen, YUAN Junwei, CHEN Lan, et al. Effects of fruit storage temperature and time on cloud stability of not from concentrated apple juice[J]. Foods, 2022, 11(17): 2568.
[13] 胡隆孝, 刘琳, 谭葆瑶, 等. 催熟过程中芒果浆营养成分及流变学性质变化[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 233−239. [HU Longxiao, LIU Lin, TAN Baoyao, et al. Changes in the nutritional content and rheological properties of mango pulp during accelerated ripening[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 233−239.]
[14] ZHU Chun, SONG Xinshu, LIU Huaibo, et al. Optimize classification testing of apple juice combining derivative fluorescence spectroscopy with PCA[J]. International Journal of Modern Physics B, 2022, 36(9n11): 2240021.
[15] 李泰, 孙君茂, 黄家章, 等. 不同产地‘富士’苹果果实品质分析及评价[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(11): 23−29. [LI Tai, SUN Junmao, HUANG Jiazhang, et al. Fruit quality analysis and evaluation of 'Fuji' apples from different producing areas[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(11): 23−29.]
[16] 卢磊, 唐金. 基于灰色关联度和层次分析法的不同富士系品种果实品质评价[J]. 天津农业科学, 2024, 30(3): 43−47,52. [LU Lei, TANG Jin. Comprehensive evaluation of different Fuji apples based on grey interconnect degree analysis and analytic hierarchy process[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2024, 30(3): 43−47,52.]
[17] LI Bin, WAN Yirong, WAN Xia, et al. Study on the quantitative damage of apple based on convolutional neural network combined with mass compensative method[J]. Journal of Food Process Engineering, 2025, 48(5): e70128.
[18] 汪洋, 赵晓峰, 史妍妍, 等. 12 个苹果品种的果实品质综合评价[J]. 中国果树, 2025(5): 21−27. [WANG Yang, ZHAO Xiaofeng, SHI Yanyan, et al. Comprehensive evaluation of fruit quality for 12 apple varieties[J]. China Fruits, 2025(5): 21−27.]
[19] 郑霄, 闫新焕, 郑晓冬, 等. 基于灰色关联度分析的鲜食桃果实综合品质评价[J]. 中国果菜, 2023, 43(10): 36−41,52. [ZHENG Xiao, YAN Xinhuan, ZHENG Xiaodong, et al. Comprehensive quality evaluation of fresh peach fruits based on grey correlation analysis[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(10): 36−41,52.]
[20] 聂继云, 毋永龙, 李海飞, 等. 苹果品种用于加工鲜榨汁的适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 271−278. [NIE Jiyun, WU Yonglong, LI Haifei, et al. Suitability evaluation of apple cultivars for fresh juice-processing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 271−278.]
[21] NAWIRSKA-OLSZAŃSKA A, BIESIADA A, SOKÓŁŁĘTOWSKA A, et al. Effect of preparation and storage conditions on physical and chemical properties of puree, puree juices and cloudy juices obtained from pumpkin with added Japanese quince and strawberries[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2016, 44(1): 183−188.
[22] QIAO Qian, SHEN Bingxue, LIN Ke, et al. Detecting the physiological and molecular mechanisms by which abscisic acid (ABA) regulates the consistency of sweet cherry fruit maturity[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 6311.
[23] MOU Yulu, DONG Xingguang, ZHANG Ying, et al. Identification and evaluation of flesh texture of crisp pear fruit based on penetration test using texture analyzer[J]. Horticulturae, 2025, 11(4): 359.
[24] 刘志旭, 朱璇, 赵亚婷, 等. 高浓度 $CO_2$ 短时处理对西梅采后贮藏品质及抗氧化代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 311−318. [LIU Zhixu, ZHU Xuan, ZHAO Yating, et al. Effects of short-term treatment with high concentration $CO_2$ on postharvest storage quality and antioxidant metabolism of plums[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 311−318.]
[25] 黄余年, 张维, 张群, 等. 采前套袋与未套袋处理对黄桃采后贮藏品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 231−242. [HUANG Yunian, ZHANG Wei, ZHANG Qun, et al. Effects of pre-harvest bagging and non-bagging treatment on postharvest storage quality of yellow-flesh peach[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 231−242.]
[26] 李瑞平. 三种均细化处理对桃浆色泽和流变特性的影响[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2021. [LI Ruiping. Effect of three refining treatments on the color and rheological properties of peach pulp[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2021.]
[27] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-2. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Determination of moisture in food: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-2.]
[28] ISTRATI D, VIZIREANU C, IORDACHESCU G, et al. Physico-chemical characteristics and antioxidant activity of goji fruits jam and jelly during storage[J]. Annals of the University Dunarea de Jos of Galati, Fascicle VI: Food Technology, 2013, 37(2): 100−110.
[29] 周存山, 马海乐, 余筱洁, 等. 西梅花色苷浸提工艺及降解特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2013, 34(5): 536−542. [ZHOU Cunshan, MA Hale, YU Xiaojie, et al. Extraction technology and degradation characteristics of anthocyanin from *Prunus salicina* L.[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2013, 34(5): 536−542.]
[30] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中总酸的测定: GB 12456-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 3−4. [National Health Commission, State Administration for Market Regulation. National food safety standard-Determination of total acids in food: GB 12456-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 3−4.]
[31] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 食用菌中总糖含量的测定: GB/T 15672-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1−2. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of total saccharide in edible mushroom: GB/T 15672-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009: 1−2.]
[32] 中华人民共和国农业部. 水果及制品可溶性糖的测定 3,5-二硝基水杨酸比色法: NY/T 2742-2015[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 1−3. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of soluble sugar in fruits and derived products —3,5-dinitrosalicylic acid colorimetry: NY/T 2742-2015[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 1−3.]
[33] AUGUSTO P E D, IBARZ A, CRISTIANINI M. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the rheological properties of tomato juice: Creep and recovery behaviours[J]. Food Research

International, 2013, 54(1): 169−176.
[34] REITER M, STUPARIĆ M, NEIDHART S, et al. The role of process technology in carrot juice cloud stability[J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(2): 165−172.
[35] AHMED J, RAMASWAMY H S, ALLI I, et al. Effect of high pressure on rheological characteristics of liquid egg[J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(5): 517−524.
[36] 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.
[37] RUIZ D, EGEA J, TOMÁS-BARBERÁN F A, et al. Carotenoids from new apricot (*Prunus armeniaca* L.) varieties and their relationship with flesh and skin color[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(16): 6368−6374.
[38] AYOUR J, SAGAR M, ALFEDDY M N, et al. Evolution of pigments and their relationship with skin color based on ripening in fruits of different Moroccan genotypes of apricots (*Prunus armeniaca* L.)[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 207: 168−175.
[39] KRAPFENBAUER G, KINNER M, GÖSSINGER M, et al. Effect of thermal treatment on the quality of cloudy apple juice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(15): 5453−5460.
[40] KAYA E D. Biochemical properties of polyphenol oxidase purified from Sarali plum (*Prunus domestica*)[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(8): 6473−6484.
[41] 王艳蒙. 三种植物生长调节剂对设施葡萄果实品质与着色的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2024. [WANG Yanmeng. Effects of three plant growth regulators on the grape fruit quality and coloration in facility cultivation[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2024.]
[42] HUANG Zhenyu, WANG Qihai, XIA Lehan, et al. Preliminarily exploring of the association between sugars and anthocyanin accumulation in apricot fruit during ripening[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 248: 112−117.
[43] XIONG Zhongfei, LI Hui, LIU Zhenyuan, et al. Effect of 1-MCP on postharvest quality of French prune during storage at low temperature[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(8): e14011.
[44] MA Yanyan, ZHANG Xinling, LI Lingling, et al. Delaying fruit softening of 'France' prune (*Prunus domestica* L.) using near-freezing temperature storage[J]. LWT, 2022, 172: 114165.
[45] 寇单单, 李东东, 曹洪波, 等. 不同肉质类型桃果实贮藏期间品质指标与淀粉酶活性的变化[J]. 山东农业科学, 2025, 57(2): 90−96. [KOU Dandan, LI Dongdong, CAO Hongbo, et al. Changes of quality indexes and amylase activity of different fleshy types of peach fruits during storage[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2025, 57(2): 90−96.]
[46] FAMIANI F, CASULLI V, BALDICCHI A, et al. Development and metabolism of the fruit and seed of the Japanese plum Ozark premier (Rosaceae)[J]. Journal of Plant Physiology, 2012, 169(6): 551−560.
[47] 鲍若晗. 小白杏饮料的研制及加工和储藏过程中非酶褐变的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012. [BAO Ruohan. Preparation of functional magnetic nanoparticles and preliminary application of heavy metal and pathogens separation[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012.]
[48] CHEN Y Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. A simulation system to study the types and causes of browning in concentrated orange juice during storage[J]. Food and Bioproducts Processing, 2024, 146: 160−169.
[49] YU Zhenyu, JIANG Suwei, CAO Xinmin, et al. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the physical properties of taro (*Colocasia esculenta* (L). Schott) pulp[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 177: 1−8.
[50] YU L J, VASANTHA RUPASINGHE H P. Effect of acidification on quality and shelf-life of carrot juice[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2012, 92(6): 1113−1120.
[51] SHOMER I. Protein coagulation cloud in *Citrus* fruit extract. 1. Formation of coagulates and their bound pectin and neutral sugars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1991, 39(12): 2263−2266.
[52] YAMASAKI M, YASUI T, ARIMA K. Pectic enzymes in the clarification of apple juice: Part I. Study on the clarification reaction in a simplified model[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1964, 28(11): 779−787.
[53] ZHAO L, WANG Y, MAIMAITIYIMING R, et al. Stabilization of fermented tomato (*Solanum lycopersicum* L.) juice by differently charged hydrocolloids[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101748.
[54] BEVERIDGE T. Opalescent and cloudy fruit juices: Formation and particle stability[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2002, 42(4): 317−337.
[55] do NASCIMENTO G E, SIMAS-TOSIN F F, IACOMINI M, et al. Rheological behavior of high methoxyl pectin from the pulp of tamarillo fruit (*Solanum betaceum*)[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 139: 125−130.
[56] MASSA A, GONZÁLEZ C, MAESTRO A, et al. Rheological characterization of peach purees[J]. Journal of Texture Studies, 2010, 41(4): 532−548.
[57] NOURMOHAMMADI A, AHMADI E, HESHMATI A. Optimization of physicochemical, textural, and rheological properties of sour cherry jam containing stevioside by using response surface methodology[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(5): 2483−2496.
[58] BAYARRI S, DURÁN L, COSTELL E. Influence of sweeteners on the viscoelasticity of hydrocolloids gelled systems[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(4): 611−619.
[59] 魏雪妍. 基于果实成熟度和贮藏期差异的山楂果胶组成结构与功能性质研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024. [WEI Xueyan. Compositional, structural and functional characterization of hawthorn pectin induced by fruits maturity and storage period[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.]
[60] BEZERRA T S, FERNANDES T N, de RESENDE J V. Effects of added sucrose and pectin on the rheological behavior and freezing kinetics of passion fruit pulp studied by response surface methodology[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(6): 3350−3357.
[61] AHMED J, AL-FOUDARI M, AL-SALMAN F, et al. Effect of particle size and temperature on rheological, thermal, and structural properties of pumpkin flour dispersion[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 124: 43−53.
[62] BELOVIĆ M, TORBICA A, PAJIĆ-LIJAKOVIĆ I, et al. Development of low calorie jams with increased content of natural dietary fibre made from tomato pomace[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 1226−1233.
[63] SHI Liyu, CAO Shifeng, SHAO Jiarong, et al. Relationship between sucrose metabolism and anthocyanin biosynthesis during ripening in Chinese bayberry fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(43): 10522−10528.
[64] LIU Jun, ZHAO Yuhui, XU Hao, et al. Fruit softening correlates with enzymatic activities and compositional changes in fruit cell wall during growing in *Lycium barbarum* L.[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(6): 3044−3054.
[65] HU Chaoyi, GAO Xinhao, DOU Kaiwei, et al. Physiological and metabolic changes in tamarillo (*Solanum betaceum*) during fruit ripening[J]. Molecules, 2023, 28(4): 1800.