

不同贮藏条件对浓缩桃汁非酶褐变的动态变化分析

张小希, 李根, 孔天宇, 师恩娟, 赵岩, 赵晓丹, 吕绪强, 马寅斐*, 初乐*

(中华全国供销合作总社济南果品研究所, 山东济南 250014)

摘要: 为深入研究贮藏期浓缩桃汁非酶褐变的变化规律, 该研究利用紫外可见分光光度计、色差仪、高效液相色谱仪和液质联用仪分别进行不同贮藏温度下影响浓缩桃汁外观和非酶褐变的相关指标进行分析。随着温度升高, 浓缩桃汁 $OD_{420\text{ nm}}$ 值、 ΔE 逐渐升高。在 4、25 和 37 °C 下贮藏期间, 随着贮藏时间的增加, 抗坏血酸、还原糖、氨基酸和氨基酸态氮作为产生褐变的主要前提物质含量明显降低; 5-羟甲基糠醛 (5-Hydroxymethylfurfural, 5-HMF) 含量与其相反。除此之外, 相关性分析表明 ΔE 与还原糖、 a^* 、 b^* 、褐变度和 5-HMF 之间具有正相关性; 而 L^* 与总酚、4 种氨基酸、氨基酸态氮和抗坏血酸之间具有正相关性; 随着贮藏温度的提高, 浓缩桃汁的非酶褐变指标聚类之间差距越大。因此, 该研究发现抑制 5-HMF 生成可以明显改善浓缩桃汁的褐变程度, 并且适量提高总酚、氨基酸和抗坏血酸的含量可以提高浓缩桃汁的光泽。该研究结果为浓缩桃汁的贮藏提供了一定科学依据, 也有利于对市场果汁保存提供理性引导。

关键词: 浓缩桃汁; 非酶褐变; 贮藏; 主成分分析

文章编号: 1673-9078(2026)07-122-131

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0542

Analysis of Dynamic Changes in Non-enzymatic Browning of Concentrated Peach Juice under Different Storage Conditions

ZHANG Xiaoxi, LI Gen, KONG Tianyu, SHI Enjuan, ZHAO Yan, ZHAO Xiaodan, LYU Xuqiang, MA Yinfei*, CHU Le*

(Jinan Fruit Research Institute, All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives, Jinan 250014, China)

Abstract: To explore in-depth the alterations in the non-enzymatic browning of concentrated peach juice during storage, a range of analytical techniques, including UV-visible spectrophotometry, colorimetry, high-performance liquid chromatography, and liquid chromatography-mass spectrometry, were employed to assess indicators relevant to the visual characteristics and non-enzymatic browning of the juice at different storage temperatures. The results showed that as the storage temperature increased, both the optical density at 420 nm ($OD_{420\text{ nm}}$) and color difference (ΔE) of the concentrated peach juice increased gradually. During storage at 4, 25, and 37 °C, significant reductions in the levels of ascorbic acid, reducing sugars, amino acids, and amino acid nitrogen-key precursors to browning-were observed over time. Conversely, the concentration of 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) increased. Correlation analysis further demonstrated that ΔE was positively correlated with reducing sugars, the color parameters a^* and b^* , browning degree, and 5-HMF, whereas the lightness parameter (L^*) was positively correlated with total phenolic content, four types of amino acids, amino acid nitrogen, and ascorbic acid. Notably, as the storage temperature increased, the disparities in the

引文格式:

张小希,李根,孔天宇,等.不同贮藏条件对浓缩桃汁非酶褐变的动态变化分析[J].现代食品科技,2026,42(7):122-131.

ZHANG Xiaoxi, LI Gen, KONG Tianyu, et al. Analysis of dynamic changes in non-enzymatic browning of concentrated peach juice under different storage conditions [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 122-131.

收稿日期: 2025-04-16; 修回日期: 2025-05-29; 接受日期: 2025-06-03

基金项目: 山东省重点研发计划项目 (科技型中小企业创新能力提升工程) (2024TSGC0409); 山东省重点研发计划 (乡村振兴科技创新提振行动计划) (2023TZXD064)

作者简介: 张小希 (1998-), 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: caslu_98@163.com

通讯作者: 马寅斐 (1986-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 果品加工技术, E-mail: 149423305@qq.com; 共同通讯作者: 初乐 (1987-), 女, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬精深加工技术, E-mail: 785536270@qq.com

clusters of non-enzymatic browning indicators for concentrated peach juice became increasingly pronounced. Therefore, it was concluded that inhibiting the formation of 5-HMF could significantly reduce the browning degree of concentrated peach juice. At the same time, an appropriate increase in the levels of total phenols, amino acids, and ascorbic acid could improve the glossiness of the juice. The results of this study can serve as a scientific foundation for the storage of concentrated peach juice and offer practical recommendations for the preservation of commercially available fruit juices.

Key words: concentrated peach juice; non-enzymatic browning; storage; principal component analysis

桃 [*Prunus persica* (L.) Batsch] 是蔷薇科桃属植物, 在我国拥有悠久的种植历史^[1]。作为一种常见的鲜食水果, 新鲜度是影响桃品质的关键因素。然而, 桃的采收季节相对集中, 易受果实表皮微生物及内源酶类等因素的影响, 导致其在贮运过程中腐烂率较高^[2], 造成了较大的经济损失。近年来, 桃加工产品的种类日益丰富, 对桃进行深加工是充分发挥其资源优势的必然选择。浓缩桃汁凭借其高糖特性和良好的防腐能力, 逐渐成为一种受欢迎的桃类加工品。据 Business Research Insights 在 2024 年发布的浓缩果汁市场报告, 全球浓缩果汁市场规模在 2023 年已达 763.9 亿美元, 预计到 2032 年将达到 1 164.9 亿美元。由此可见, 浓缩桃汁市场前景广阔, 但仍需不断提升产品品质, 以更好地满足市场需求。

果汁的非酶褐变是一个复杂的化学过程, 涉及多种反应, 主要包括美拉德反应、抗坏血酸降解以及酚类物质的氧化聚合等^[3,4]。在浓缩果汁的贮藏过程中, 非酶褐变会导致果汁色泽加深、营养价值降低, 并对风味和品质产生不利影响。例如, Paravisini 等^[5]在苹果汁中发现了美拉德反应中特定反应性羰基物种与褐变之间的因果关系; Xu 等^[6]研究了多酚化合物抑制非酶褐变的潜在作用机制; Wu 等^[7]也发现谷胱甘肽能明显降低葡萄汁加工贮藏过程中的非酶褐变现象。同样, 浓缩桃汁在贮藏过程中也容易发生非酶褐变, 导致产品品质和感官特性下降, 严重影响其市场销售。阮卫红^[8]分析了浊汁桃汁贮藏期间非酶褐变变化发现了 5-羟甲基糠醛 (5-Hydroxymethylfurfural, 5-HMF) 和色差值等指标可以作为评价浊汁桃汁的关键褐变指标。但是, 对于果汁稳定性更优异的浓缩桃汁贮藏期间非酶褐变变化的关键指标很少有人探究。目前国内对桃的研究仍主要集中在干燥加工和风味特征方面, 对桃加工贮藏过程中的非酶褐变研究相对较少。与此同时, 响应消费者健康需求, 全球浓缩果汁市场规模持续上涨, 需要探究浓缩桃汁贮藏期间非酶褐变的关键指标以延长贮藏期。

在我国, 浓缩桃汁的需求量和出口量逐年上升, 但贮藏期内发生的非酶褐变是制约其进一步发展的重

要因素。因此, 本研究主要针对贮藏期浓缩桃汁褐变的问题, 旨在探究浓缩桃汁在贮藏期内与非酶褐变相关的因素变化, 分析非酶褐变与关键指标的变化规律, 为改善我国浓缩桃汁的非酶褐变品质提供一定的理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与主要仪器

桃品种为蒙阴 8 号, 购自山东省临沂市蒙阴县; 福林酚标准品、甲醇 HPLC 级购自于上海麦克林生化科技有限公司; 抗坏血酸标准品、5-HMF 标准品和 2,6-二氯酚酞醌标准品购自于国药集团化学试剂有限公司; 果浆酶 (成分为果胶酶、纤维素酶, 活力 20 000 U·g⁻¹) 和淀粉酶 NBSG (活力 300 AGU·mL⁻¹) 购自于诺维信生物技术有限公司; 其它试剂均为分析级。

UV-5500 紫外可见分光光度计, 上海元析仪器有限公司; S210 pH 计, 梅特勒托利多仪器有限公司; CM-5 色差仪, 日本柯尼卡美能达公司; 1200 型高效液相色谱仪、UV 检测器, 美国安捷伦科技有限公司; QTRAP5500 液质联用仪 (Liquid Chromatograph Mass Spectrometer, LC-MS), 美国 ABSCIEX 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 桃汁制备与预处理

挑选果形饱满、表皮无损伤、成熟度高的桃子, 清洗去核后利用破碎机破碎处理 30 s, 取破碎后的桃浆经过 0.01% 果浆酶和淀粉酶常温酶解 1 h 后榨汁, 在温度 20 °C, 压力 0.5 MPa, 进料流量 5.0 L·min⁻¹ 条件下, 通过截留分子量为 100 kDa 超滤膜浓缩后 100 °C 热杀菌 15 min, 得到的桃浓缩汁分装于 120 mL 样品瓶中, 存入 4 °C 冰箱备用。取 3 组等量的桃汁, 分别置于 4、25 和 37 °C 下恒温贮藏 3、6、9、12、15、20、25 和 30 d, 每组取 3 份平行样品。其中, 37 °C 贮藏条件旨在通过加速老化实验, 模拟果汁饮料在长期贮藏过程中可能发生的品质变化。相比于常温 (25 °C) 和冷藏 (4 °C) 条件, 高温能够加速果汁饮料中各种化

学反应和微生物活动,从而在较短时间内预测产品在更长时间内的贮藏稳定性。

1.2.2 浓缩桃汁外观指标检测

1.2.2.1 褐变度的测定

褐变度测定参考 Zhang 等^[9]的研究,并根据实际情况进行了调整。具体如下,将浓缩桃汁样品摇匀后取 10 mL,加入等量的无水乙醇,摇匀后过滤,取滤液用分光光度计在 420 nm 波长处测定其吸光值。

1.2.2.2 色差测定

取一定量的桃汁样品,利用 CM-5 型色差计测定样品 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值,其中 L^* 值表示亮度, L^* 值越大,表示色泽越亮; a^* 表示红绿值,正值偏红,负值偏绿; b^* 值表示黄蓝值,正值偏黄,负值偏蓝。色差值大小用 ΔE 值表示,计算公式如下:

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

式中:

ΔE ——色差值;

L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——浓缩桃汁在贮藏开始(即 0 天)时的亮度值、红绿值以及黄蓝值;

L^* 、 a^* 、 b^* ——浓缩桃汁在经历一定贮藏时间后的亮度值、红绿值以及黄蓝值。

1.2.3 浓缩桃汁相关指标检测

1.2.3.1 抗坏血酸测定

浓缩桃汁中抗坏血酸的含量通过参考 GB 5009.86-2016《食品中抗坏血酸含量的测定》进行检测。主要反应机理为抗坏血酸具备还原性,在酸性条件下与 2,6-二氯酚靛酚发生氧化还原反应产生脱氢抗坏血酸使反应体系褪色。具体操作如下,通过滴定样品溶液至显现出稳定的淡粉红色,结合消耗的标准滴定剂体积,计算出样品中抗坏血酸的含量。

1.2.3.2 总酚测定

总酚测定参考 Peng 等^[10]的方法,并进行了适当修改。首先,进行标准曲线的绘制,吸取 0~50.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 没食子酸标准液(质量浓度梯度为 10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 递增)各 1.0 mL,并分别加入 5.0 mL 去离子水、1.0 mL 20% 福林酚混合溶液(m/V)和 3.0 mL Na_2CO_3 溶液混匀,放置 2 h 进行显色,以 0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为空白,在 765 nm 下测定标准溶液的吸光度。以吸光度值为纵坐标,没食子酸浓度为横坐标绘制标准曲线。没食子酸标准曲线方程: $y=0.012x-0.0013$, $R^2=0.9992$ 。

吸取均匀的浓缩桃汁 1 mL,并且添加 9 mL 去离子水稀释样品。然后,利用与测定没食子酸标准液吸光度值相同的方法测定样品的吸光度值,并且以 0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 没

食子酸标准溶液作为空白,并由标准曲线计算出样品溶液中的总酚含量(以没食子酸计)。试样中总酚(以没食子酸计)含量计算公式如下:

$$\omega = \rho \times 10 \times \frac{A}{m} \quad (2)$$

式中:

ω ——试样中总酚含量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

ρ ——试样测定液中没食子酸的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

10——试样测定液定容体积, mL;

A ——样品稀释倍数;

m ——样品体积, mL。

1.2.3.3 还原糖测定

浓缩桃汁中还原糖的测定通过参考 GB5009.7-2016《食品中还原糖的测定》进行直接滴定测定。

1.2.3.4 氨基酸测定

氨基酸组分提取参考 Liu 等^[11]的方法,并利用 QTRAP5500 高效液相色谱-质谱联用仪与 Intertsil OSD-4 C18 色谱柱(150 mm×3.0 mm, 3.5 μm)连用测定提取样品中氨基酸组成^[12]。其中,色谱条件为流动相 A: 甲醇;流动相 B: 0.5% 甲酸水,进样量 2 μL ,流量 0.3 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$,柱温箱 25 $^{\circ}\text{C}$ 。质谱条件为电喷雾电离源,正离子模式,离子化电压 5.5 kV,采用多反应监测(Multiple Reaction Monitoring, MRM)的扫描方法进行待测分子碎裂和扫描。

1.2.3.5 氨基态氮测定

将酸度计接通电源,预热 30 min 后,用 pH 值为 6.8 的缓冲溶液校正酸度计。取 10 mL 浓缩桃汁于 250 mL 烧杯中,加适量 30% 过氧化氢(m/V)溶液并混匀。进行实验时,首先提前使用 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠(m/V)溶液来中和浓缩桃汁中存在的有机酸。然后,当观察到溶液的 pH 值接近 7.5 时,更换为 0.05 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠(m/V)溶液,并调整溶液的 pH 值至其稳定达到 8.1。最终,缓慢地向溶液中加入 10 mL 的中性甲醛溶液。待溶液与甲醛充分混合并静置 1 min 后,再使用 0.05 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠标准滴定溶液进行滴定至 pH 值至 8.1。记录氢氧化钠标准滴定溶液的消耗量。

$$X = \frac{C \times V \times K \times 14}{B} \times 100 \quad (3)$$

式中:

X ——每 100 mL 浓缩桃汁中氨基态氮的毫克数, $\text{mg}/100 \text{ mL}$;

C ——氢氧化钠标准滴定溶液的浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$;

V ——加入中性甲醛溶液后,滴定试样消耗 0.05 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氢氧化钠标准滴定溶液的体积, mL;

B ——试样的体积, mL;

K ——稀释倍数;

14——1 mL 1 mol·L⁻¹ 氢氧化钠标准滴定溶液相当于氮的毫克数。

1.2.3.6 5-HMF测定

5-HMF 测定参考 Chen 等^[13]方法并稍加改正, 具体如下, 将浓缩桃汁用甲醇-水 (V/V , 1/4) 按照 1:100 比例稀释后, 取 1 mL 稀释液, 使用 0.45 μm 有机相膜进行过滤, 然后分装到液相小瓶中等待上样。使用 1200 型高效液相色谱仪连用 Agilent ZORBAX 300 SB-C 18 色谱柱 (4.6 mm×250 mm, 5 μm) 检测 5-HMF 含量。其中, 流动相为甲醇-水 (V/V , 1/9), 进样量 20 μL , 流量 0.8 mL·min⁻¹, 柱温 35 $^{\circ}\text{C}$, 检测波长 282 nm。

通过 5-HMF 标准品比对进行定性分析, 利用外标法进行定量分析, 单位为 mg·g⁻¹, 5-HMF 标准曲线方程: $y=0.0704x-0.0717$, $R^2=0.9956$ 。

1.3 数据处理

结果以平均值 $\pm$ 标准差 (S.D) 表示 ($n=3$)。使用 GraphPad Prism 10.1 和 IBM SPSS Statistics 27 软件进行 Tukey 检验和单因素方差分析, 无相同字母的组别间具有显著性差异 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏条件对浓缩桃汁色泽稳定性的影响

2.1.1 不同贮藏条件对浓缩桃汁褐变度的影响

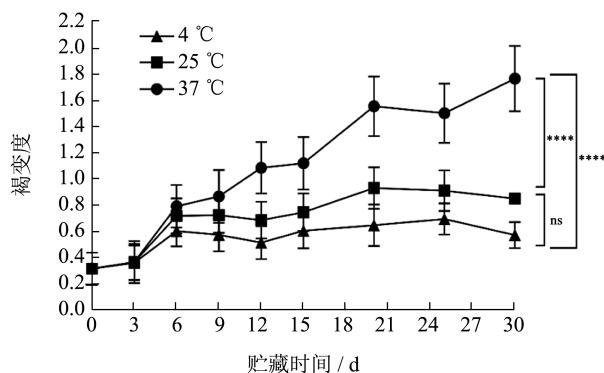


图1 浓缩桃汁贮藏期间褐变度变化过程

Fig.1 Browning degree change process of concentrated peach juice during storage

注: **** 为 $P<0.0001$ 。

褐变度作为衡量果汁褐变程度的重要指标, 能够直观地反映果汁的品质变化。本研究检测浓缩桃汁分别在 4、25 和 37 $^{\circ}\text{C}$ 下储存 30 d 浓缩桃汁的 420 nm 处吸光度, 结果如图 1 所示。在各项色泽参数中, 褐变程度能够通过人体感观直接观察^[14], 本研究浓缩桃汁

在贮藏期间褐变度总体呈上升趋势。随着温度升高, 浓缩桃汁褐变现象愈发显著。特别地, 当样品在 37 $^{\circ}\text{C}$ 下贮藏 30 d 过程中, 其褐变度激增, $\text{OD}_{420\text{ nm}}$ 达到了 1.765, 与初始值相差 5.62 倍。相比之下, 4 和 25 $^{\circ}\text{C}$ 下的褐变程度则变化得较为缓慢, 即 4 和 25 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏期下 30 d 的褐变度 $\text{OD}_{420\text{ nm}}$ 分别为 0.571 和 0.850, 与初始褐变度相差 1.81 倍和 2.07 倍。由此可见, 当贮藏时间达到 30 d, 温度对浓缩桃汁褐变度的影响表现出了不同的敏感度。

2.1.2 不同贮藏条件对浓缩桃汁色差的影响

在评估色泽的各项参数中, L^* 值代表亮度。具体而言, L^* 值越小, 表明桃汁的色泽越暗; 反之, L^* 值越大则色泽越明亮。 a^* 值则用于描述红绿色调的偏向, 其中 a^* 值 >0 时, 表示桃汁色泽偏红; 而当 a^* 值 <0 时, 则意味着色泽偏绿。同样地, b^* 值反映了黄蓝色调的偏向, b^* 值 >0 时, 桃汁色泽偏向黄色; 而 b^* 值 <0 时, 则色泽偏向蓝色。上述参数共同构成了能够对物体色泽的进行全面描述^[15]。在 4、25 和 37 $^{\circ}\text{C}$ 下 30 d 浓缩桃汁色差变化如图 2 所示。结果表明可以清晰地看到浓缩桃汁在初始时, L^* 值偏高, 说明浓缩桃汁具有明亮的色泽。同时, a^* 和 b^* 值均为正数, 共同构建了一种浅褐色的视觉效果。然而, 随着贮藏时间的延长, L^* 值逐渐降低, 这预示着浓缩桃汁正逐步向褐色转变。随着贮藏时间的增加, L^* 值持续下降, 而 a^* 和 b^* 值则逐步上升, 这种变化在贮藏的前 3 d 尤为显著。进一步分析发现, 桃汁在贮藏期间的色泽变化与温度有着紧密的联系。在 37 $^{\circ}\text{C}$ 的高温下贮藏 30 d 后, L^* 值显著下降至初始值的 0.67 倍, 而 a^* 和 b^* 值则分别激增到初始值的 13.03 倍和 1.99 倍, 这凸显了高温环境下桃汁褐变速度的提升。相对而言, 在 4 和 25 $^{\circ}\text{C}$ 下, 经过 30 d 的贮藏, L^* 值的下降和 a^* 、 b^* 值的上升都表现得较为平缓。其中, L^* 值分别降至初始值的 0.87 倍和 0.86 倍, a^* 值上升为初始值的 16.8 倍和 6 倍, b^* 值则分别增加至初始值的 1.05 倍和 1.59 倍。Ibarz 等^[16]对热处理影响苹果泥的研究中也印证了这一观点, 研究人员发现热处理后会使得样品变得更红, 而黄色略有损失。另外, 这些数据还揭示了 3 类色差对温度变化的敏感度有所不同。其中 a^* 值对温度的变化最为敏感, 即在相同的贮藏时长下, 不同温度下的 a^* 值差异较大。这一发现为评估浓缩桃汁的褐变程度及选择适宜的贮藏条件提供了重要的参考依据。在 4、25 和 37 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏下, 浓缩桃汁的 ΔE 总体呈上升趋势, 分别上升至初始值的 3.6 倍、29.97 倍和 57.11 倍。综上可知, 4 $^{\circ}\text{C}$ 下浓缩桃汁非酶褐变不明显, 25 和 37 $^{\circ}\text{C}$ 下浓缩桃汁非酶

褐变较明显。这也与不同贮藏条件下对浓缩桃汁褐变度影响规律一致。

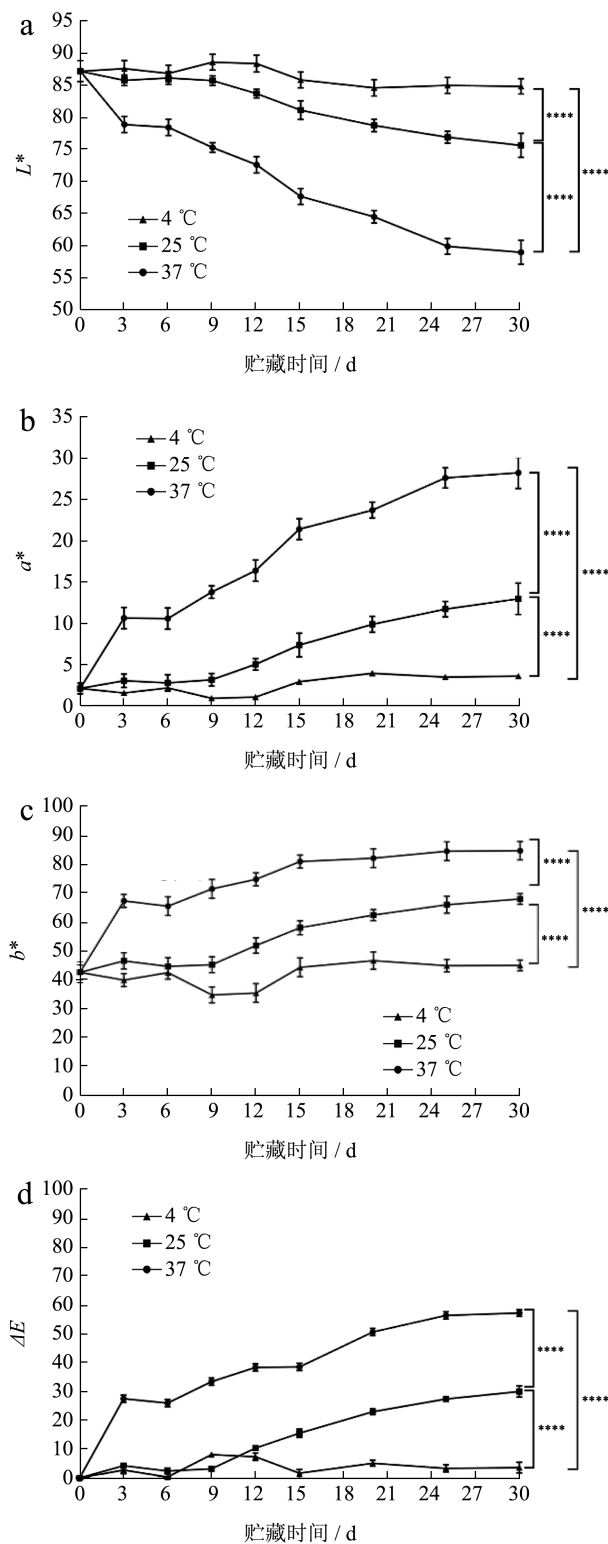


图2 浓缩桃汁贮藏期间色差的测定

Fig.2 Determination of color difference of concentrated peach juice during storage

注: a~d 分别表示不同贮藏条件下 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 值的变化过程, **** 为 $P < 0.0001$ 。

2.2 不同贮藏条件对浓缩桃汁中抗坏血酸的影响

抗坏血酸是果汁中一种重要的抗氧化活性物质^[17], 并且抗坏血酸通常被用作表征新鲜程度的标志性物质^[8]。在储藏过程中, 食物中的抗坏血酸有逐步减少的趋势, 随着温度的升高, 其下降的速率也可能加快^[18]。贮藏期间浓缩桃汁抗坏血酸含量的变化如图3所示。浓缩桃汁中抗坏血酸含量在初始贮藏阶段呈现出下降趋势, 随着时间的推移, 其下降速度逐渐趋于平缓。上述现象可能原因是贮藏初期抗坏血酸发生有氧降解, 导致其损耗率较高, 而贮藏后期以无氧降解为主导。在4、25和37 °C下贮藏30 d, 浓缩桃汁中抗坏血酸含量分别为129.52、90.36和35.00 mg/100 g, 分别约为初始含量0.43倍、0.30倍和0.12倍。在贮藏30 d后, 3个温度下抗坏血酸含量具有显著的差异, 37 °C下贮藏温度下抗坏血酸含量显著低于其它两个条件, 说明随着温度升高, 抗坏血酸降解的速率越快。Yin等^[19]也发现较高温度会导致抗坏血酸不稳定的现象。同时, 抗坏血酸随温度变化规律与褐变度和色差值基本一致。

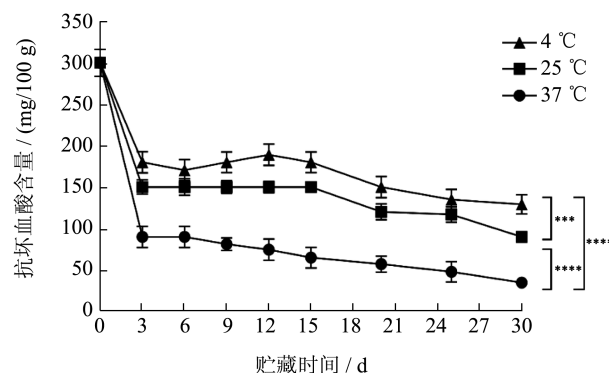


图3 浓缩桃汁贮藏期间抗坏血酸含量变化过程

Fig.3 Changes in ascorbic acid content during storage of concentrated peach juice

注: *** 为 $P < 0.001$, **** 为 $P < 0.0001$ 。

2.3 不同贮藏条件对浓缩桃汁中总酚的影响

酚类物质由于其固有的易氧化性质, 倾向于转化为黑色物质, 进一步地, 它们还易于与蛋白质发生络合反应, 形成较大的颗粒物质并导致沉淀的出现^[8]。这些化学变化不仅影响果汁的外观, 还对其贮藏稳定性造成不利影响。浓缩桃汁中总酚含量变化如图4所示, 在4 °C储藏下, 总酚含量呈现上升趋势, 并且30 d总酚含量为225.00 mg/100 mL; 在25 °C储藏下, 总酚含量一直呈缓慢下降趋势, 特别在贮藏后期, 含量明显下降, 最终总酚含量为99.21 mg/100 mL; 在37 °C储藏下, 总酚含量呈先稳定后缓慢下降趋势, 最终总

酚含量为 97.32 mg/100 mL。总体来说,浓缩桃汁中的总酚含量随着贮藏温度的升高总酚含量呈现下降趋势。Yin 等^[19]在对浆果类食品保鲜研究中也发现了温度会加速多酚的降解,从而加速食品的褐变。因此,褐变度和色差随着贮藏温度的升高而变差可能与浓缩桃汁中总酚含量密切相关。

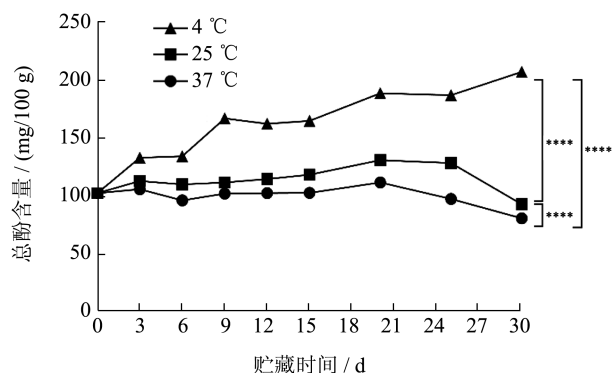


图 4 浓缩桃汁贮藏期间总酚含量变化过程

Fig.4 Changes in total phenols content during storage of concentrated peach juice

注: **** 为 $P < 0.0001$ 。

2.4 不同贮藏条件对浓缩桃汁中还原糖的影响

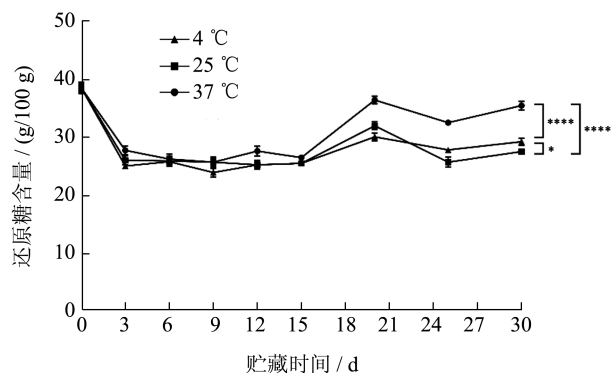


图 5 浓缩桃汁贮藏期间还原糖含量变化过程

Fig.5 Changes in reducing sugar content during storage of concentrated peach juice

注: * 为 $P < 0.05$, **** 为 $P < 0.0001$ 。

研究发现葡萄糖和果糖等还原糖在贮藏过程中容易发生美拉德反应,造成最终产品颜色和风味的变化^[20]。此外,浓缩桃汁中含有丰富的抗坏血酸(图 3),抗坏血酸在贮藏过程中容易发生氧化降解,生成糠醛等中间产物,这些中间产物可以进一步与氨基酸、酚类物质等发生反应进而加速褐变。不同贮藏条件下浓缩桃汁中还原糖的含量变化如图 5 所示,不同贮藏温度下,还原糖的含量均呈总体下降趋势。在贮藏的初始阶段,还原糖的含量逐渐减少,这可能是由于还原糖参与了上述的褐变反应,从而导致了其含量的减少。然而,随着贮藏时间的延长,可以观察到 3 个贮藏温

度下还原糖的含量开始逐渐回升,该现象可能与蔗糖开始发生水解反应,生成了更多的还原糖有关^[21]。此外,在贮藏期间还原糖下降的含量与贮藏温度密切相关,4 °C 下还原糖含量下降了 3.06 g/100 g,而其它两个温度下下降水平均高于该水平。因此,监测还原糖和总酚含量的变化趋势可以反映出浓缩桃汁的氧化和褐变程度。

2.5 不同贮藏条件对浓缩桃汁中氨基酸的影响

食品中氨基酸作为形成褐色成分的关键前驱物质,其含量变化一直广受关注。检测结果表明在浓缩桃汁中游离氨基酸主要由天冬酰胺、天冬氨酸、丝氨酸和谷氨酸构成,这与先前研究中浊汁桃汁的氨基酸组成具有相似性^[8],因此,本研究将重点关注以上几种氨基酸。浓缩桃汁在 25 和 37 °C 下贮藏 3~30 d 后,样品的总氨基酸损失率均超过 60%,而单个氨基酸的含量变化略有差异(表 1),这是由于氨基酸与浓缩桃汁中糖类和抗坏血酸发生反应造成的结果。在 25 和 37 °C 下,天冬酰胺、天冬氨酸、丝氨酸和谷氨酸的含量都会随着贮藏时间的增加呈现显著降低的趋势($P < 0.05$)。在 4 °C 下,除了天冬酰胺外,其它 3 种氨基酸的含量没有显著性变化,这可能与氨基酸的含量和其主要是酸性氨基酸相关。同时,Buedo 等^[22]研究表明在桃汁的贮藏期间天冬酰胺损失最严重,这进一步证明了本研究的结果。此外,低温和低 pH 值会明显降低非酶褐变反应,因此 4 °C 下浓缩桃汁褐变强度较弱也可能与氨基酸和还原糖/抗坏血酸发生反应不活跃密切相关。

2.6 不同贮藏条件对浓缩桃汁中氨基酸态氮的影响

在果汁的贮藏过程中,氨基酸态氮作为重要的含氮化合物,其变化对果汁的品质具有重要影响。氨基酸态氮可能参与多种反应,包括与糖类、抗坏血酸降解产物等的相互作用,从而影响果汁的风味、色泽等。浓缩桃汁在不同温度条件下,氨基酸态氮总体含量均随时间升高呈现下降趋势(图 6)。在 4、25 和 37 °C 下贮藏 30 d,氨基酸态氮含量分别下降至 263.73、230.91 和 175.02 mg/100 g,与初始含量相比分别下降至初始值的 42.58%、56.18% 和 64.16%,这一规律也与浓缩桃汁贮藏期间抗坏血酸含量和氨基酸组成变化结果一致。在浓缩桃汁的贮藏过程中,氨基酸会伴随抗坏血酸降解产生的脱氢抗坏血酸和二羰基化合物共同参与降解反应^[23]。另外,随着贮藏时间的延长和温度的上升,作为褐色成分的前体物质,氨基酸态氮的含量会随着褐变反应的进行而不断减少,符合降解过程中浓缩桃汁颜色加深的机制。

表 1 浓缩桃汁贮藏过程中氨基酸含量的变化

Table 1 Changes in amino acid content during storage of concentrated peach juice

温度/℃	贮藏时间/d	含量/(μg·mL ⁻¹)				
		天冬酰胺	天冬氨酸	丝氨酸	谷氨酸	总氨基酸含量
4	CK	10.81 ± 0.01 ^{Aa}	0.71 ± 0 ^{Aa}	0.72 ± 0 ^{Aa}	0.58 ± 0.11 ^{Aa}	12.82 ± 0.11 ^{Aa}
	3	10.54 ± 0.25 ^{Aab}	0.71 ± 0.03 ^{Aa}	0.71 ± 0.08 ^{Aa}	0.56 ± 0.17 ^{Aa}	12.52 ± 0.13 ^{Ab}
	6	10.46 ± 0.06 ^{Aab}	0.69 ± 0.37 ^{Aa}	0.79 ± 0.03 ^{Aa}	0.56 ± 0.03 ^{Aa}	12.50 ± 0.12 ^{Ab}
	9	10.30 ± 0.04 ^{Ab}	0.75 ± 0 ^{Aa}	0.75 ± 0.01 ^{Aa}	0.61 ± 0.01 ^{Aa}	12.41 ± 0.02 ^{Ab}
	12	9.56 ± 0.76 ^{Ac}	0.72 ± 0.45 ^{Aa}	0.75 ± 0.02 ^{Aa}	0.60 ± 0.03 ^{Aa}	11.63 ± 0.31 ^{Ac}
	15	9.06 ± 0.05 ^{Ad}	0.68 ± 1.12 ^{Aa}	0.80 ± 0 ^{Aa}	0.61 ± 0.04 ^{Aa}	11.15 ± 0.30 ^{Ad}
	20	8.75 ± 0.05 ^{Ad}	0.65 ± 0.01 ^{Aa}	0.75 ± 0.15 ^{Aa}	0.59 ± 0.02 ^{Aa}	10.74 ± 0.06 ^{Ac}
	25	8.64 ± 0.08 ^{Ad}	0.71 ± 0.43 ^{Aa}	0.72 ± 0.07 ^{Aa}	0.59 ± 0.03 ^{Aa}	10.66 ± 0.15 ^{Ac}
25	30	8.15 ± 0 ^{Ac}	0.69 ± 0.50 ^{Aa}	0.72 ± 0.05 ^{Aa}	0.57 ± 0.01 ^{Aa}	10.13 ± 0.02 ^{Ac}
	3	9.54 ± 0 ^{Bab}	0.69 ± 0.01 ^{Aa}	0.65 ± 0.04 ^{Ab}	0.47 ± 0.08 ^{ABb}	11.35 ± 0.03 ^{Bb}
	6	8.69 ± 0 ^{Abc}	0.63 ± 0.50 ^{Aa}	0.57 ± 0.07 ^{Bc}	0.36 ± 0.01 ^{Bc}	10.25 ± 0.14 ^{Bc}
	9	7.99 ± 0 ^{Bbcd}	0.56 ± 0.50 ^{Aab}	0.51 ± 0.02 ^{Bd}	0.24 ± 0 ^{Bd}	9.30 ± 0.13 ^{Bd}
	12	7.12 ± 0.08 ^{Bcde}	0.52 ± 0 ^{ABab}	0.46 ± 0 ^{Bd}	0.11 ± 0 ^{Be}	8.21 ± 0.02 ^{Be}
	15	6.73 ± 2.9 ^{ABdef}	0.50 ± 0.03 ^{ABab}	0.37 ± 0 ^{Be}	ND	7.60 ± 0.73 ^{Bf}
	20	6.05 ± 0 ^{Bef}	0.39 ± 0 ^{Bab}	0.29 ± 0.05 ^{Bf}	ND	6.73 ± 0.01 ^{Bg}
	25	5.63 ± 1.00 ^{Bef}	0.30 ± 0.02 ^{ABab}	0.18 ± 0 ^{Bg}	ND	6.11 ± 0.26 ^{Bh}
37	30	4.95 ± 1.23 ^{Bf}	0.11 ± 0 ^{ABb}	0.10 ± 0.01 ^{Bh}	ND	5.16 ± 0.31 ^{Bi}
	3	8.45 ± 0.01 ^{Cb}	0.55 ± 0 ^{Bb}	0.47 ± 0 ^{Bb}	0.33 ± 0 ^{Bb}	9.8 ± 0.01 ^{Cb}
	6	6.26 ± 1.76 ^{Bc}	0.37 ± 0.04 ^{Ac}	0.32 ± 0.01 ^{Cc}	0.12 ± 0 ^{Cc}	7.07 ± 0.45 ^{Cc}
	9	5.38 ± 1.39 ^{Ccd}	0.20 ± 0.01 ^{Bd}	0.17 ± 0.13 ^{Cd}	ND	5.75 ± 0.38 ^{Cd}
	12	4.30 ± 1.54 ^{Cde}	0.07 ± 0 ^{Be}	0.04 ± 0 ^{Ce}	ND	4.41 ± 0.38 ^{Ce}
	15	3.56 ± 0.35 ^{Bef}	ND	ND	ND	3.56 ± 0.35 ^{Ce}
	20	2.53 ± 1.50 ^{Cfg}	ND	ND	ND	2.53 ± 1.50 ^{Cf}
	25	1.53 ± 0.01 ^{Cgh}	ND	ND	ND	1.53 ± 0.01 ^{Cg}
	30	0.08 ± 0 ^{Ch}	ND	ND	ND	0.08 ± 0 ^{Ch}

注：ND 代表未检测出；大写英文字母代表相同贮藏时间不同贮藏温度氨基酸组间显著性差异，小写英文字母代表相同贮藏温度不同贮藏时间氨基酸组内显著性差异。

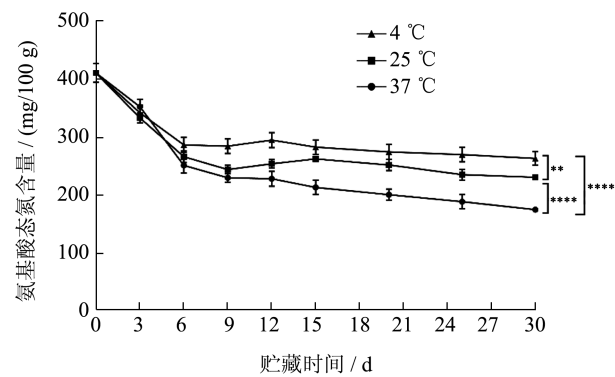


图 6 浓缩桃汁贮藏期间氨基酸态氮含量变化过程
Fig.6 Changes in amino nitrogen content during storage of concentrated peach juice

注：** 为 $P<0.01$ ，**** 为 $P<0.0001$ 。

2.7 不同贮藏条件对浓缩桃汁中5-HMF的影响

5-HMF 是酸性环境中葡萄糖或果糖脱水分解的产物。该物质不仅在美拉德反应的后期形成了褐色物质，而且还作为抗坏血酸氧化分解反应中间产物，这突显了它在多个化学反应中的核心作用^[24]。5-HMF 还被用作预估褐变速度的参考标准，并且与褐变密切相关^[25]。图 7 展现了不同贮藏温度下 5-HMF 含量随着贮藏时间的变化，结果表明在浓缩桃汁的贮藏过程中，5-HMF 含量随着温度的升高而显著增加。在 37 °C 下，5-HMF 含量增长尤为迅速，在 6 d，5-HMF 含量为 10.526 mg·g⁻¹，并且约为初始值的 10 倍。相比之下，4 和 25 °C 下的增长则较为缓慢，在 30 d，5-HMF 含量分别为 2.560 和 8.850 mg·g⁻¹，均明显低于 37 °C 下贮藏 6 d 的 5-HMF

含量。因此，储藏温度可能是调控 5-HMF 含量的关键因素。鉴于 5-HMF 有着多种前体物和复杂的生成路径，因此深入了解桃汁贮藏中 5-HMF 的主要形成途径可能对于控制桃汁褐变现象具有至关重要的意义，抑制 5-HMF 的生成可能会改善浓缩桃汁的褐变程度。

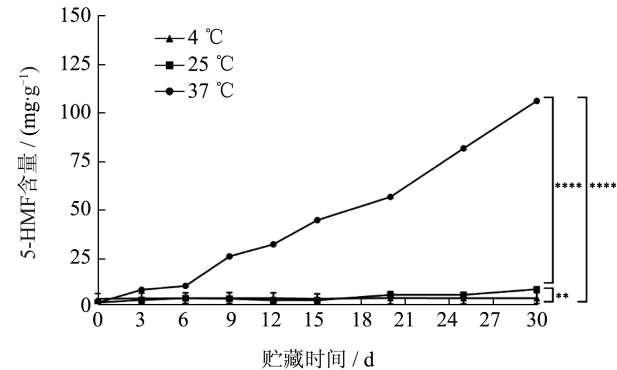


图 7 浓缩桃汁贮藏期间 5-HMF 含量变化过程

Fig.7 Changes in 5-HMF content during storage of concentrated peach juice

注: ** 为 $P<0.01$, **** 为 $P<0.0001$ 。

2.8 色泽变化和非酶褐变指标的相关性分析

为了深入剖析色泽变化与一系列理化指标之间存在的内在关联和相互影响，进行了各指标间的相关性分析^[26]。图 8 展示了褐变过程中相关指标的相关性分析， ΔE 与 a^* 、 b^* 存在极显著正相关性 ($P<0.01$)，说明这些参数在描述色泽变化时具有一致性，因此 ΔE 可以作为色泽变化的表征指标。同时， ΔE 与褐变度和 5-HMF 之间存在极显著正相关性 ($P<0.01$)，说明褐变度和 5-HMF 含量变化影响浓缩桃汁的色泽感官。研究表明 5-HMF 的生成与美拉德反应等非酶褐变过程密切相关，这些反应会导致贮藏过程中果汁颜色的加深^[24,25]。 ΔE 与抗坏血酸、还原糖和氨基酸态氮之间虽没有显著相关性，但抗坏血酸和还原糖正相关，说明了抗坏血酸和还原糖含量变化与浓缩桃汁的色泽感官略有正相关。虽然总酚和 4 种氨基酸（天冬酰胺、天冬氨酸、丝氨酸及谷氨酸）与 ΔE 之间存在负相关性 ($P<0.05$)，但是它们与 L^* 之间存在正相关性 ($P<0.05$)。研究表明 L^* 值代表亮度， L^* 值越小则表明果汁的色泽越暗^[27,28]。因此，总酚和 4 种氨基酸可能主要影响浓缩桃汁的亮度。同时，发现浓缩桃汁在 4 °C 贮藏条件下，总酚、天冬氨酸、丝氨酸和谷氨酸损失量明显较少，并且其中 L^* 值变化也较小。氨基酸态氮的含量与 4 种氨基酸的含量具有正相关性 ($P<0.05$)，说明本研究数据的可靠性，也揭示了 ΔE 与氨基酸态氮之间负相关原因。同时，冯亮等^[29]也利

用相关性分析揭示了抗坏血酸与非酶褐变反应之间的关系，证明了相关性分析能够展示出指标之间的关系。本研究利用指标之间相关性分析发现了浓缩桃汁贮藏期间各项检测指标与色泽量化中 ΔE 和 L^* 之间的相关性分析，剖析了各项指标的影响浓缩桃汁贮藏期非酶褐变影响色泽的关系，为浓缩桃汁贮藏期间温度对非酶褐变的影响提供了一定指导。

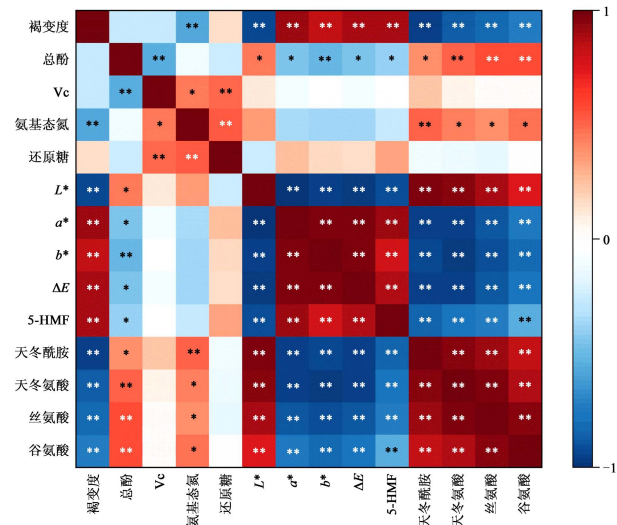


图 8 浓缩桃汁非酶褐变指标相关性分析结果

Fig.8 Correlation analysis results of non-enzymatic browning indexes of concentrated peach juice

注: * 代表显著相关 ($P<0.05$); ** 代表极显著相关 ($P<0.01$)。

图 9 展示了不同贮藏温度下，贮藏时间与非酶褐变指标的聚类相关性结果。非酶褐变指标的聚类结果主要分为两类，一类由还原糖、 ΔE 、 a^* 、 b^* 、褐变度和 5-HMF 构成，另一类由总酚、4 种氨基酸、氨基酸态氮、抗坏血酸和 L^* 构成。同时，在浓缩桃汁非酶褐变指标相关性分析中发现了 ΔE 与还原糖、 a^* 、 b^* 、褐变度和 5-HMF 之间具有正相关性；而 L^* 与总酚、4 种氨基酸、氨基酸态氮和抗坏血酸之间具有正相关性；说明该聚类分析与指标相关性分析结果一致，结果准确可靠。在不同贮藏温度和时间的聚类结果也主要分为两类，一类是以 4 °C 贮藏温度为主要代表，另一类是以 37 °C 贮藏温度为主要代表。同时，在 25 °C 贮藏温度下贮藏 3~15 d 主要与 4 °C 贮藏温度下为一类；在 25 °C 贮藏温度下贮藏 20~30 d 主要与 37 °C 贮藏温度下为一类。结果表明随着贮藏温度的提高，浓缩桃汁的非酶褐变指标聚类之间差距越大。同时，大量报道表明贮藏温度被认为是影响非酶褐变的主要指标之一^[30-32]。总的来说，随着温度升高，浓缩桃汁贮藏的非酶褐变指标越差，产品贮藏期可能越短。

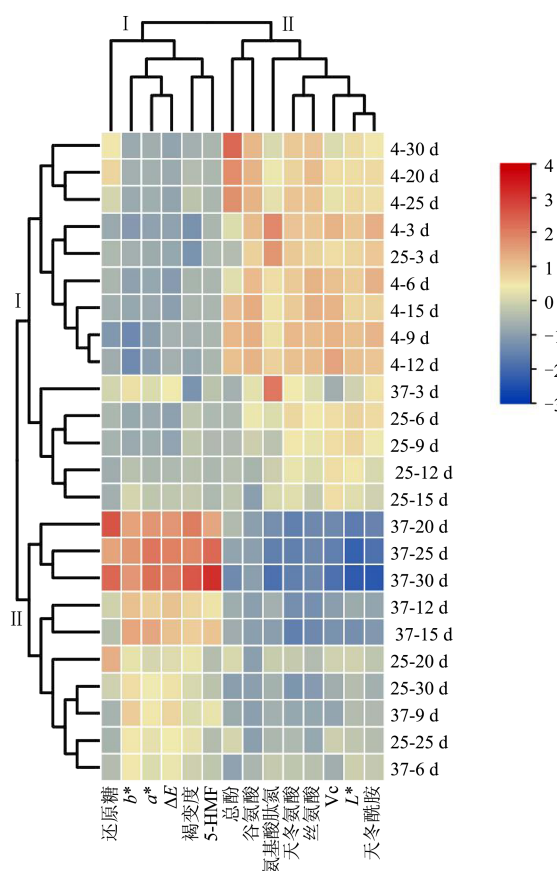


图 9 贮藏时间与非酶褐变指标的聚类相关性分析结果

Fig.9 Correlation analysis results between storage time and non-enzymatic browning indexes

注: 红-黑-绿颜色变化为标准化数据的最大值-中值-最小值; 样品表示为贮藏温度/°C-贮藏时间。

3 结论

在该研究中,深入探讨了不同温度(4、25和37℃)条件下浓缩桃汁在贮藏过程中的色泽及成分变化。经过系统分析发现,随着贮藏时间的增加,浓缩桃汁的 L^* 值在三个温度条件下均呈现出下降趋势,而 a^* 和 b^* 、 ΔE 值则均呈现出上升趋势,同时,在桃汁贮藏的中后期,5-HMF含量显著增长。上述现象说明了随着贮藏时间的增加其影响酶促褐变的5-HMF物质含量持续增加导致颜色变深,低温贮藏可以缓解上述现象。随着时间的推移,浓缩桃汁中还原糖、抗坏血酸和氨基酸态氮的含量均逐渐降低。在4℃下贮藏时,除天冬酰胺外,其它3种氨基酸含量没有明显变化;而其它贮藏温度下,4种氨基酸含量随着时间推移明显降低。在浓缩桃汁非酶褐变指标相关性分析中发现 ΔE 与还原糖、 a^* 、 b^* 、褐变度和5-HMF之间具有正相关性;而 L^* 与总酚、4种氨基酸、氨基酸态氮和抗坏血酸之间具有正相关性。同时,随着贮藏温度的提高,浓缩

桃汁的非酶褐变指标聚类之间差距越大。

该研究结果不仅证明了浓缩桃汁非酶褐变过程的存在,还凸显了温度和贮藏时间作为影响桃汁褐变程度的关键外部因素的重要性。其中,浓缩桃汁中抗坏血酸、多酚类物质与其抗氧化等营养属性密切相关,而其糖类、氨基酸等是风味物质的前体物质,贮藏期间桃汁内在品质因子的结合作用使得桃汁颜色发生褐变、营养与香气受到影响。这些发现不仅为理解桃汁贮藏过程中的品质变化提供了重要依据,也为浓缩桃汁产品的贮藏提供了有价值的参考。此外,由于本文主要针对不同贮藏温度下影响浓缩桃汁非酶褐变的关键指标和指标变化趋势,没有重点关注长期贮藏的情况。后续研究中,将重点分析在长期贮藏条件下筛选的关键指标的变化趋势。

参考文献

- [1] 张慧琴, 早中熟黄桃新品种——黄金凤[J]. 中国果业信息, 2024, 41(3): 75-76.
- [2] ZHOU Y, ZHAO L, CHEN Y, et al. Study on the control effect and physiological mechanism of *Wickerhamomyces anomalus* on primary postharvest diseases of peach fruit [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2024, 413: 110575.
- [3] 王锋, 李鹏军, 哈益明. 浓缩苹果汁生产中褐变因素及其控制措施的探讨[J]. *食品科技*, 2006, 4: 85-87, 91.
- [4] BURDURLU H S, KARADENIZ F. Effect of storage on nonenzymatic browning of apple juice concentrates [J]. *Food Chemistry*, 2003, 80(1): 91-97.
- [5] PARAVISINI L, PETERSON D G. Role of reactive carbonyl species in non-enzymatic browning of apple juice during storage [J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 1010-1017.
- [6] XU Z, YANG Z, JI J, et al. Polyphenol mediated non-enzymatic browning and its inhibition in apple juice [J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134504.
- [7] WU S. Glutathione suppresses the enzymatic and non-enzymatic browning in grape juice [J]. *Food Chemistry*, 2014, 160: 8-10.
- [8] 阮卫红. 桃汁加工与贮藏期间非酶褐变及营养品质变化研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- [9] ZHANG Y, LI J, YAN S. Mechanism study on removal of browning pigment from high temperature sterilized lotus rhizome juice by lactic acid bacteria fermentation [J]. *Food Chemistry*, 2025, 473: 143073.
- [10] PENG Y, BIE S, CAI S, et al. Effects of high-pressure homogenization on phenolics profile, antioxidant activity, α -glucosidase inhibitory activity, and insulin resistance of peach juice during simulated gastrointestinal digestion [J]. *Food Chemistry: X*, 2025, 26: 102263.
- [11] LIU G, WU M, LI Y, et al. The effect of different pretreatment methods on jujube juice and lactic acid bacteria-fermented jujube juice [J]. *LWT*, 2023, 181: 114692.
- [12] 张莹, 孟园, 马艳蕊, 等. 不同品种红枣酿醋的品质差异分析[J]. *食*

- 品工业科技,2024,45(20):300-311.
- [13] CHEN 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 Bioprocess Processing, 2024, 146: 160-169.
- [14] 夏娜,周茜,魏健,等.不同储藏温度对NFC西梅汁品质变化的影响[J].保鲜与加工,2021,21(8):7-14.
- [15] LUO J, CHEN W, PAN Y, et al. Unraveling the color evolution and metabolic pathways of pelargonidin-3-O-glucoside during lactic acid fermentation of the strawberry juice color simulation system: A novel perspective through untargeted metabolomics [J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141740.
- [16] IBARZ A, PAGAN J, GARZA S. Kinetic models of non-enzymatic browning in apple puree [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(8): 1162-1168.
- [17] LI M, LIU Q, ZHANG W, et al. Evaluation of quality changes of differently formulated cloudy mixed juices during refrigerated storage after high pressure processing [J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 627-635.
- [18] GIANNAKOUREOU M C, TAOUKIS P S. Effect of alternative preservation steps and storage on Vitamin C stability in fruit and vegetable products: critical review and kinetic modelling approaches [J]. Foods, 2021, 10(11): 2630.
- [19] YIN X, CHEN K, CHENG H, et al. Chemical stability of ascorbic acid integrated into commercial products: a review on bioactivity and delivery technology [J]. Antioxidants, 2022, 11(1): 153.
- [20] PITOTTI A, ELIZALDE B E, ANESE M. EFFECT of caramelization and maillard reaction products on peroxidase activity [J]. Journal of Food Biochemistry, 1994, 18(6): 445-457.
- [21] ZAPPALÀ M, FALLICO B, ARENA E, et al. Methods for the determination of HMF in honey: a comparison [J]. Food Control, 2005, 16(3): 273-277.
- [22] BUEDO A P, ELUSTONDO M P, URBICAIN M J. Amino acid loss in peach juice concentrate during storage [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2000, 1(4): 281-288.
- [23] SINCHAIPANIT P, AHMAD M, TWICHATWITAYAKUL R. Kinetics of ascorbic acid degradation and quality changes in guava juice during refrigerated storage [J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2015, 3: 550-557.
- [24] 牛丽影,胡丽丽,李大婧,等.草莓脯贮藏期间非酶褐变的化学途径分析[J].食品科学,2022,43(17):248-254.
- [25] MARTINSEN B K, AABY K, SKREDE G. Effect of temperature on stability of anthocyanins, ascorbic acid and color in strawberry and raspberry jams [J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126297.
- [26] CHENG Y, LI P, HU B, et al. Correlation analysis reveals the intensified fermentation via *Lactobacillus plantarum* improved the flavor of fermented noni juice [J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101234.
- [27] JU C, LV J, WU A, et al. Effect of pH on betalain–anthocyanin mixture in bayberry juice: influences on pigments, colour, and antioxidant capacity [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(6): 3556-3566.
- [28] WANG Z, JIA H, YANG J, et al. Inactivation of *Alicyclobacillus* contaminans in apple juice by dielectric barrier discharge plasma [J]. Food Control, 2023, 146: 109475.
- [29] 冯亮,杨艳,刘双双,等.基于L-抗坏血酸非酶褐变反应研究进展[J].食品与发酵工业,2021,47(22):301-308.
- [30] AHAD T, GULL A, NISSAR J, et al. Effect of storage temperatures, packaging materials and storage periods on antioxidant activity and non-enzymatic browning of antioxidant treated walnut kernels [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(10): 3556-3563.
- [31] WANG C, ZHANG X, GAO Y, et al. Path analysis of non-enzymatic browning in Dongbei Suancai during storage caused by different fermentation conditions [J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127620.
- [32] LAMBERTS L, ROMBOUTS I, DELCOUR J A. Study of nonenzymic browning in α -amino acid and γ -aminobutyric acid/sugar model systems [J]. Food Chemistry, 2008, 111(3): 738-744.