

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80225

贮藏期赛买提杏酒褐变关键物质变化及其原因

蒋艺轩^{1,2} 冯作山^{1,2} 陈计峦³ 白羽嘉⁴ 武 进¹ 冶明珠^{1,2}

(1. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆果品采后科学与技术重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 石河子大学食品学院, 新疆 石河子 832061; 4. 新疆维吾尔自治区农业科学院农产品加工研究所, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的] 探究不同贮藏条件下赛买提杏酒非酶褐变相关物质及指标的变化规律及其对酒体品质的影响。[方法] 以新疆喀什赛买提杏为原料酿制的杏酒为试验试材, 分别采用低温(4℃)、常温(20℃)和高温(38℃)3种避光环境对赛买提杏酒进行贮藏, 以第0天为对照(CK), 每10 d测定杏酒的理化指标, 分析杏酒在贮藏期间品质的变化规律, 结合通径分析对杏酒中导致非酶褐变的内源因子进行解析。[结果] 较对照组, 3种贮藏条件下杏酒均存在一定程度的褐变现象。不同处理组赛买提杏酒贮藏效果: 低温处理组>常温处理组>高温处理组。总酚、总酸、氨基肽氮、抗坏血酸和5-羟甲基糠醛(5-HMF)参与了赛买提杏酒非酶褐变的化学反应。通过通径分析可知, 在多种复杂贮藏环境中, 美拉德反应、酚类物质的氧化聚合以及维生素C的氧化分解是赛买提杏酒贮藏过程中非酶褐变的主要原因。[结论] 在低温(4℃)避光条件下贮藏能有效抑制赛买提杏酒褐变。

关键词: 杏酒; 非酶褐变; 通径分析; 贮藏温度

Changes and causes of key browning substances in Saimaiti apricot wine during storage period

JIANG Yixuan^{1,2} FENG Zuoshan^{1,2} CHEN Jiluan³ BAI Yujia⁴ WU Jin¹ YE Mingzhu^{1,2}

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Fruit Post-harvest Science and Technology, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 3. School of Food Science and Technology, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832061, China; 4. Institute of Agro-Products Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objective] To explore the variation patterns of non-enzymatic browning-related substances and indicators in Saimaiti apricot wine under different storage conditions, and the effect of these patterns on the wine body quality. [Methods] The apricot wine made from Saimaiti apricots in Kashgar, Xinjiang is used as the test material and preserved in three kinds of dark conditions: low temperature (4℃), normal temperature (20℃), and high temperature (38℃). Then, the physicochemical indicators are measured every 10 days, with the 0-day as reference (CK), to analyze the variation patterns of apricot wine quality during storage. Finally, endogenous factors leading to non-enzymatic browning are resolved by combining with the path analysis. [Results] Compared with the control group, the wine preserved under all three conditions exhibits a browning phenomenon to a certain extent. The order of preservation quality under different treatments is: low-temperature treatment > normal-temperature treatment > high-temperature treatment. Additionally, total phenolics, total acids, amino nitrogen, ascorbic acid, and 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) are all involved in the chemical reactions of non-enzymatic browning. The path analysis indicates that in a variety of complex storage environments, the primary causes of non-enzymatic browning during storage

基金项目: 自治区天山英才科技创新团队—新疆特色果蔬绿色、低碳加工技术体系创新团队(编号:2023TSYCTD0005); 新疆杏产业体系专项基金项目(编号:XJCYTX-03-2021)

通信作者: 冯作山(1963—), 男, 新疆农业大学教授, 博士。E-mail: fengzuoshan@126.com

收稿日期: 2025-03-13 **改回日期:** 2026-03-21

引用格式: 蒋艺轩, 冯作山, 陈计峦, 等. 贮藏期赛买提杏酒褐变关键物质变化及其原因[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 121-129.

Citation: JIANG Yixuan, FENG Zuoshan, CHEN Jiluan, et al. Changes and causes of key browning substances in Saimaiti apricot wine during storage period[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 121-129.

are the Maillard reaction, the oxidative polymerization of phenolics, and the oxidative decomposition of vitamin C. **[Conclusion]** The browning of Saimaiti apricot wine can be effectively inhibited by preserving under low temperature (4 °C) and dark condition.

Keywords: apricot wine; non-enzymatic browning; path analysis; storage temperature

赛买提杏酒是以新疆特产赛买提杏为原料酿造的一种特色果酒^[1],因其独特的风味和营养价值而备受消费者喜爱。然而,在贮藏过程中,赛买提杏酒常常会出现非酶褐变现象,导致酒体颜色加深、风味劣化及营养成分损失,严重影响其感官品质和市场价值。非酶褐变主要由美拉德反应、焦糖化反应和抗坏血酸氧化等化学反应引起^[2],这些反应会不同程度地受到酒体种类、贮藏温度、pH、氧气质量浓度等的影响,进而影响酒的外观品质,甚至导致其风味和营养成分损失。研究^[2-3]表明,贮藏条件(如温度、光照、氧气接触)对非酶褐变的发生具有显著影响,但不同贮藏条件下非酶褐变的主导因素及其相互作用机制尚不明确。

非酶褐变是一个多因素交互作用的复杂过程,传统单一因素分析方法难以全面揭示其机理^[2]。通径分析作为一种多变量统计方法,被广泛应用于食品品质变化的影响因素解析中。该方法能够量化非酶褐变过程中各因素之间的直接和间接作用,为揭示复杂反应机制提供了有力工具。研究拟采用通径分析手段系统解析赛买提杏酒不同贮藏条件(常温、低温、避光)下非酶褐变的原因,量化不同贮藏条件下各影响因素(如糖类、酸类、酚类物质等)对非酶褐变的直接和间接作用,明确不同贮藏条件下非酶褐变的主要驱动因素,旨在为赛买提杏酒的贮藏提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 试验材料

赛买提杏:转黄率>80%,硬度(117.68±10.79) kPa,可溶性固形物(15.0±0.3) °Bx,市售。

1.1.2 主要试剂

KI酵母、HC果胶酶:法国Lallemand公司;

纤维素酶:700 U/mL,诺维信(中国)生物技术有限公司;

甲醛、无水乙醇、次甲基蓝、盐酸:分析纯,天津市致远化学有限公司;

氢氧化钠:分析纯,天津市光复科技发展有限公司;

硫酸铜:分析纯,天津市北联精细化学品开发有限公司;

酚酞:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

酒石酸钾钠:分析纯,天津市北联精细化学品开发有限公司;

磷酸、磷酸二氢钾:分析纯,天津福晨化学试剂厂;

30%过氧化氢:分析纯,四川西陇科学有限公司;

磷酸氢二钠、碳酸钠、抗坏血酸:分析纯,天津市鑫铂特化工有限公司;

没食子酸、芦丁:分析纯,上海源叶生物科技有限公司;

巴比妥酸:分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

无水葡萄糖:分析纯,天津永晟精细化工有限公司;

硝酸铝:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

5-羟甲基糠醛、福林酚:分析纯,北京索莱宝科技有限公司;

对甲基苯胺:分析纯,德国Sigma-Aldrich公司;

2,6-二氯酚:分析纯,上海如吉生物科技发展有限公司;

碘酸钾:分析纯,天津市化学试剂三厂;

磷酸二氢钠:分析纯,上海冠戈实业有限公司。

1.1.3 仪器设备

色差仪:CR-10Plus型,深圳市三恩时科技有限公司;

紫外分光光度计:TU-1810型,北京普析通用仪器有限责任公司;

气相色谱仪:3420A型,北京北分瑞利分析仪器(集团)有限责任公司;

电热恒温水浴锅:XMTD-7000型,北京市永光明医疗仪器有限公司;

离心机:4K15C型,德国希格玛公司;

电子天平:ME204/02型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

酸度计:FE20型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

水浴锅:DZKW-S-4型,北京市永光明医疗仪器有限公司;

电热鼓风干燥箱:101型,北京市永光明医疗仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 赛买提杏酒酿造 赛买提杏经挑选、清洗后榨汁取上清液,冷冻浓缩得20 °Bx的浓缩汁,添加纤维素酶和果胶酶(各添加0.25%)酶解24 h。取0.02 g K1干酵母至1 L发酵液中,于38 °C下活化45 min,将活化好的酵母添加至发酵醪中,置于恒温(20 °C)生化培养箱中发酵11 d。酒样避光低温(4 °C)静置15 d,取上清液经板框过滤机过滤,巴氏杀菌(65 °C,30 min)后用无菌膜过滤(0.45 μm),灌装后用于贮藏试验。

1.2.2 样品分组及贮藏方法 将赛买提杏酒成品分为以下3组,以0 d赛买提杏酒作为对照,每隔10 d取样(整瓶)测定色泽、还原糖、5-羟甲基糠醛(5-HMF)、褐变度、总酚、总黄酮、抗坏血酸、总酸、氨基态氮,共贮藏60 d。

(1) 低温:选用灌装好的赛买提杏酒(整瓶),置于4℃避光条件下贮藏。

(2) 常温:选用灌装好的赛买提杏酒(整瓶),置于20℃避光条件下贮藏。

(3) 高温:选用灌装好的赛买提杏酒(整瓶),置于38℃避光条件下贮藏。

1.2.3 理化指标测定

(1) 色泽:采用全自动色差仪。

(2) 还原糖、总酸和抗坏血酸:分别按GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》中的直接滴定法、电位滴定法和2,6-二氯酚法执行。

(3) 总酚:参考农玉萍等^[4]的方法。

(4) 褐变度:参考宁珊珊等^[5]的方法。以蒸馏水为对照,取上清液测定420 nm处的吸光值。

(5) 总黄酮:参考安军^[6]的方法。

(6) 氨基态氮:按GB/T 12143—2008《饮料通用分析方法》中甲醛值法执行。

1.2.4 5-HMF质量分数测定 称0.100 g HMF溶解定容至100 mL并稀释100倍,依次吸取0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mL稀释后的标准溶液且加入蒸馏水使每支试管混合溶液均为2.0 mL, 550 nm下测定吸光度并绘制标准曲线^[7]($y=0.0011x+0.00003$, $R^2=0.9991$)。取样品4 mL分别置于2个不同的比色管定容至10 mL并加入5 mL对甲苯胺,其中一支加入1.0 mL蒸馏水作为空白对照,另一支加入1.0 mL的巴比妥酸在550 nm下测定吸光度,根据标准回归方程计算赛买提杏酒中5-HMF的质量,再按式(1)计算赛买提杏酒中5-HMF的质量分数。

$$\omega_{\text{HMF}} = \frac{m_s \times V_t}{m_{\text{HMF}} \times V_a} \quad (1)$$

式中:

ω_{HMF} ——5-HMF质量分数, $\mu\text{g/g}$;

m_s ——标准曲线求得的样品测定液中5-HMF质量, μg ;

V_t ——溶液总体积, mL;

m_{HMF} ——取样质量, g;

V_a ——测定时分取的溶液体积, mL。

1.2.5 数据处理 采用IBM SPSS Statistics 26和DPS数据处理系统进行数据分析,用Origin Pro 2021绘制图形,所有数据分析均使用重复3次后获得的平均值,以 $P>0.05$ 作为差异显著的标准。

2 结果与分析

2.1 贮藏期间赛买提杏酒色泽变化

赛买提杏酒在不同贮藏环境下CIE颜色指数变化如表1所示。随着贮藏温度的上升, L^* 值减小,赛买提杏酒的亮度变暗,酒体澄清度降低,高温处理组 L^* 值下降最显著,褐变反应最剧烈。 a^* 和 b^* 值变大,推动赛买提杏酒的色调向红色方向偏移,可能生成微量红色调的苯醌类物质;同时色调向黄色方向偏移,色泽饱和度升高,由柠檬黄色转变为琥珀色,美拉德反应或焦糖化反应活跃,褐变程度升高。从总体来看,杏酒在高温组发生褐变现象更明显,主要是因为温度促进美拉德反应和焦糖化反应生成褐色聚合物,使色泽受到一定程度的损失。因此,低温处理可以减少色素合成量,减缓赛买提杏酒颜色加深速度。

表1 贮藏期间赛买提杏酒色泽的变化[†]

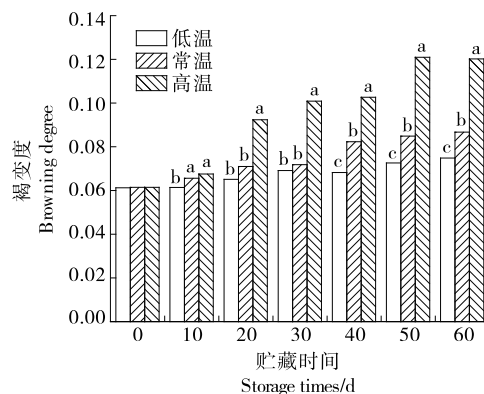
Table 1 Color changes of Saimaiti apricot wine during storage

组别	L^*	a^*	b^*
CK(0 d)	36.73±0.12 ^a	-0.63±0.06 ^c	4.01±0.06 ^c
低温(60 d)	35.99±0.05 ^b	-0.35±0.06 ^b	4.83±0.02 ^b
常温(60 d)	35.51±0.11 ^c	-0.29±0.06 ^{ab}	4.87±0.10 ^b
高温(60 d)	35.22±0.04 ^d	-0.21±0.03 ^a	5.04±0.01 ^a

[†] 同列字母不同代表不同贮藏条件之间数据在 $P<0.05$ 水平上有显著性差异。

2.2 贮藏期间赛买提杏酒非酶褐变主要致褐因子的变化

2.2.1 褐变度的变化 图1为贮藏期间不同贮藏温度对赛买提杏酒褐变度的影响。从整体来看,随着贮藏时间的增加,赛买提杏酒的褐变度变化明显,同时贮藏温度和



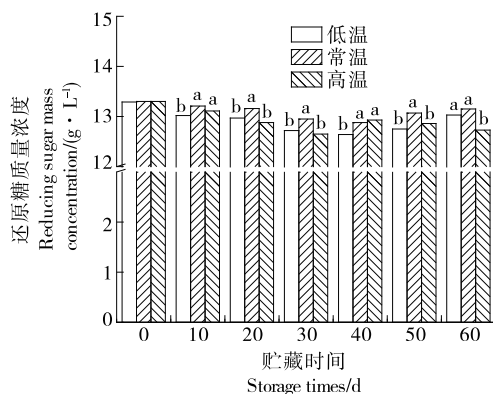
字母不同代表在同一时期不同贮藏条件之间数据在 $P<0.05$ 水平上有显著性差异

图1 贮藏期间赛买提杏酒褐变度的变化

Figure 1 Browning degree changes of Samiti apricot wine during storage

褐变程度呈正相关。从贮藏阶段来看,贮藏初期褐变度增长较慢,可能是由于反应底物(如还原糖、氨基酸、酚类物质)质量浓度较高,反应速率受限于反应条件;而在中后期,随着反应产物的积累,褐变反应速率加快。相较于其他条件,在低温条件下,褐变度增长缓慢,表明低温有效抑制了非酶褐变反应。贮藏 60 d 后,高温处理组褐变度最高,为 0.120,褐变程度分别比低温和常温处理组高出 37.46% 和 28.33%,主要原因是较高的温度加速了美拉德反应、焦糖化反应和抗坏血酸氧化等非酶褐变反应。而低温降低了分子运动速率,减缓了美拉德反应和焦糖化反应的速率,同时抑制了抗坏血酸的氧化分解。因此,降低贮藏温度可以抑制赛买提杏酒褐变,这与朱丹等^[7]的研究结果一致。

2.2.2 还原糖质量浓度的变化 图 2 为贮藏期间 3 种温度对赛买提杏酒还原糖的影响。总体来看,赛买提杏酒贮藏期间还原糖质量浓度随贮藏时间延长呈缓慢下降趋势,其间出现短暂且小幅的回升,可能与赛买提杏酒中残留糖分转变为其他类型糖分的过程有关^[8],整体变化较为平稳。低温贮藏 60 d 后,赛买提杏酒还原糖保持率较高,通过抑制美拉德反应和焦糖化反应,有效延缓了还原糖的消耗,同时低温通过降低分子运动速率,减缓反应进程。而高温条件下还原糖质量浓度降幅最大,可能是由于高温使反应底物(如还原糖、氨基酸)迅速参与反应,导致还原糖快速消耗,这与孔燕等^[9]在桑葚酒中的发现高度吻合。此外,还原糖出现“下降—回升—下降”的 3 阶段特征,初期美拉德反应消耗还原糖,中期可能是细胞壁多糖水解(如纤维素酶活性升高)导致糖分短暂回升,后期美拉德反应终产物积累抑制酶活性,糖分再次下降,这一动态平衡机制在低醇早酥梨酒贮藏中亦有报道^[10]。由此可知,赛买提杏酒贮藏期间还原糖的消耗呈现显著温度依

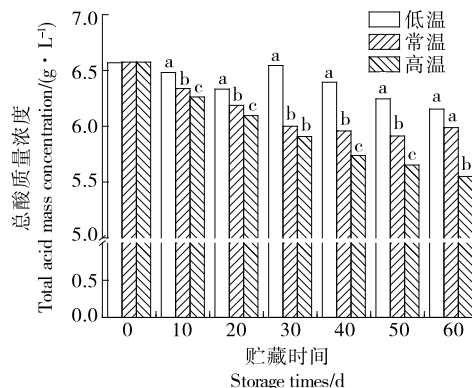


字母不同代表在同一时期不同贮藏条件之间数据在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异

图 2 贮藏期间赛买提杏酒还原糖质量浓度的变化
Figure 2 Ascorbic acid content changes of Saimaiti apricot wine during storage

赖性,其变化是美拉德反应消耗与潜在多糖水解补充共同作用的结果。低温通过抑制美拉德反应维持较高还原糖保留率,高温则通过加速美拉德反应和焦糖化反应导致糖类快速消耗,而糖分水解释放与消耗反应的竞争关系导致贮藏过程中出现浓度波动。贮藏过程中观测到的还原糖浓度波动,正是糖分水解补充与美拉德消耗之间动态竞争平衡的直接体现。

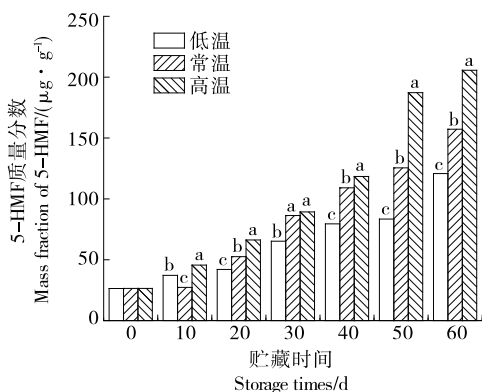
2.2.3 总酸质量浓度的变化 不同贮藏条件的赛买提杏酒总酸变化如图 3 所示。酒中的总酸主要由酒石酸、苹果酸和柠檬酸等有机酸组成,从整体来看,贮藏初期赛买提杏酒的总酸质量浓度较高(6.58 g/L),随着贮藏时间延长,一些酸类物质转化为酯类,同时化学降解(如脱羧反应)或酯化反应加速也会使酒中出现降酸现象,总酸质量浓度下降,这一现象与曾竟蓝^[11]在柑橘酒中观察到的温度驱动型脱羧反应规律一致。贮藏 60 d 后,高温处理组总酸快速消耗,显著加速化学反应速率,有机酸快速降解,与周雪燕等^[12]对冰葡萄酒高温酯化主导降酸机制形成对照,与其他处理组差异显著。综上可知,赛买提杏酒总酸消耗呈现显著温度依赖性,高温通过加速脱羧反应及酯化作用双重路径导致有机酸快速降解。



字母不同代表在同一时期不同贮藏条件之间数据在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异

图 3 贮藏期间赛买提杏酒总酸质量浓度的变化
Figure 3 Total acid content changes of Saimaiti apricot wine during storage

2.2.4 5-HMF 质量分数的变化 如图 4 所示,赛买提杏酒贮藏期间 5-HMF 质量分数与贮藏时间和温度呈显著正相关,高温避光组(205.64 $\mu\text{g/g}$)较低温和常温组显著增加,可能是由于高温下反应底物(如还原糖、氨基酸)迅速参与反应,这与褐变度变化趋势高度吻合,印证了 5-HMF 与氨基化合物通过美拉德反应生成类黑精的褐变机制^[10],但赛买提杏酒 HMF 累积速率显著高于孔燕等^[9]的研究结果。从贮藏阶段来看,贮藏中后期增长速度明显加快,可能与反应产物的自催化作用有关,美拉德反应的中间产



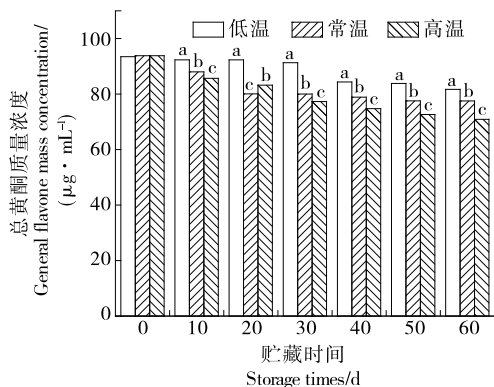
字母不同代表在同一时期不同贮藏条件之间数据在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异

图4 贮藏期间赛买提杏酒 5-HMF 质量分数的变化

Figure 4 5-HMF content changes of Saimaiti apricot wine during storage

物(如还原酮类物质)可能进一步加速反应速率;并且还还原糖的热分解同样会导致 5-HMF 质量分数非线性增长。值得注意的是,低温组(4°C)虽能抑制 HMF 的生成,但仍检测到微量积累。综上可知,低温贮藏环境一定程度上有利于抑制赛买提杏酒 5-HMF 质量分数的上升,从而延缓褐变。这与张序等^[10]的研究结果一致。

2.2.5 总黄酮质量浓度的变化 如图 5 所示,赛买提杏酒贮藏期间总黄酮质量浓度随贮藏时间延长呈温度依赖性递减趋势。贮藏 0~40 d 时,随着贮藏温度的升高,总黄酮质量浓度降幅加快,可能是因为反应产物的自催化作用中氧化反应的中间产物进一步加速了反应速率,并且美拉德反应中间体通过自由基链式反应加速黄酮分解;贮藏 40~60 d 时黄酮质量浓度下降趋势逐渐变缓,但仍有些许减少,可能是由于抗氧化物质(如抗坏血酸)耗尽导致



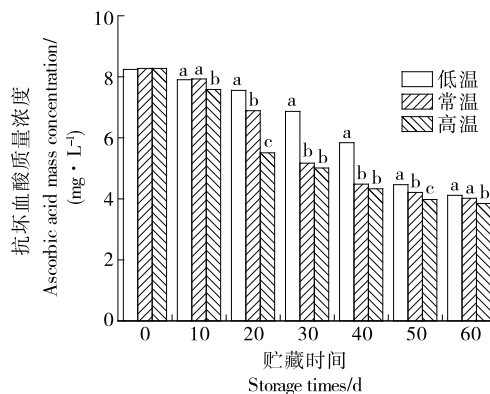
字母不同代表在同一时期不同贮藏条件之间数据在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异

图5 贮藏期间赛买提杏酒总黄酮质量浓度的变化

Figure 5 Total flavonoid mass concentration changes of Saimaiti apricot wine during storage

氧化反应底物限制,这与刘易伟等^[13]在刺梨原汁中的研究结果相印证。因此可以发现,赛买提杏酒在贮藏过程中总黄酮降解呈现典型温度—时间双调控特征,低温通过减缓分子扩散速率维持黄酮稳定,降低了氧化反应和酶促反应,减缓总黄酮的降解,低温贮藏更有利于赛买提杏酒总黄酮质量浓度的保持。

2.2.6 抗坏血酸质量浓度的变化 贮藏期内抗坏血酸的降解也是赛买提杏酒褐变的重要原因之一。如图 6 所示,贮藏期间赛买提杏酒抗坏血酸质量浓度随贮藏时间呈温度依赖性减少。高温处理组贮藏 60 d 后抗坏血酸质量浓度显著低于低温组。在贮藏前期,赛买提杏酒瓶储时顶部酒液和塞子之间含有少量的氧气,使瓶内的赛买提杏酒中的抗坏血酸进行短暂的有氧降解,抗坏血酸经过脱氢、脱水、脱羧等一系列化学反应后产生还原酮并参与美拉德反应。当顶部的氧气消耗殆尽后,抗坏血酸无氧通过 β -消除反应生成 3-脱氧戊酮糖和糠醛与酒液中的氨基酸发生非酶褐变^[14],高温还促进了抗坏血酸的热分解等副反应,导致抗坏血酸迅速降解。因此,高温通过激活酶促氧化、无氧裂解及热分解复合加速抗坏血酸损耗,而低温(4°C)可同步抑制酶活性、减缓 β -消除反应速率,该温度敏感性为优化赛买提杏酒贮藏工艺提供了关键控制点^[14]。

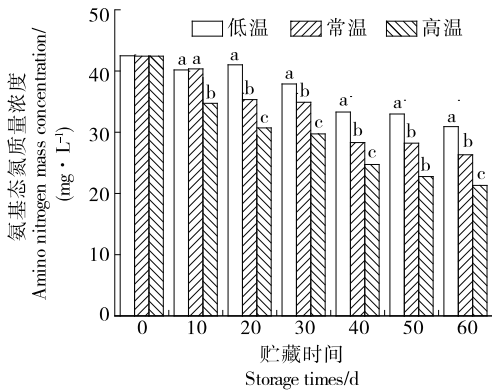


字母不同代表在同一时期不同贮藏条件之间数据在 $P < 0.05$ 水平上有显著性差异

图6 贮藏期间赛买提杏酒抗坏血酸质量浓度的变化

Figure 6 Ascorbic acid mass content changes of Saimaiti apricot wine during storage

2.2.7 氨基态氮质量浓度的变化 如图 7 所示,赛买提杏酒贮藏期间氨基态氮质量浓度随贮藏时间和温度升高呈显著递减趋势,这是由于赛买提杏酒在贮藏期间发生的非酶褐变主要是由美拉德反应产生,而在美拉德反应的过程中氨基态氮的质量浓度也会随之减少,并且微生物代谢和酶促反应是氨基态氮降解的主要途径,其速率受温度和贮藏时间的显著影响。从贮藏阶段来看,氨基肽



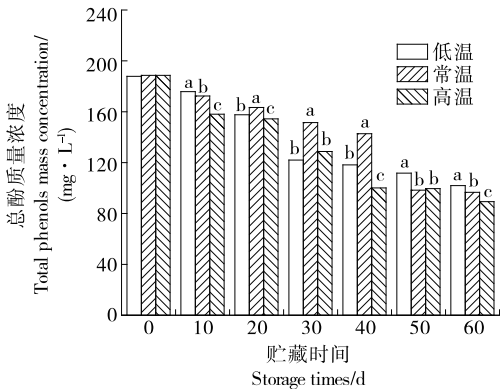
字母不同代表在同一时期不同贮藏条件之间数据在 $P<0.05$ 水平上有显著性差异

图 7 贮藏期间赛买提杏酒氨基态氮质量浓度的变化
Figure 7 Amino nitrogen mass concentration changes of Saimaiti apricot wine during storage

氮质量浓度在贮藏中后期下降速度明显加快,可能是样品中微生物代谢产物积累,某些微生物在适宜温度下代谢活动增强,产生了更多的酶类物质,加速了氨基态氮的降解。

经过 60 d 的贮藏,高温处理组氨基态氮质量浓度急剧下降,是由于高温加酶促反应,导致氨基态氮迅速降解。综上可知,高温通过激活美拉德反应加速氮损耗,而低温贮藏可抑制降解路径,说明贮藏温度可以影响赛买提杏酒中的氨基态氮质量浓度。这与罗昱等^[15]的研究结果一致。

2.2.8 总酚质量浓度的变化 如图 8 所示,赛买提杏酒贮藏期间总酚质量浓度与贮藏时间及温度呈显著负相关 ($P<0.05$)。温度对总酚质量浓度影响很大,低温处理组贮藏 60 d 后总酚质量浓度比其他处理组高 5.59% 和 12.75%,过高的温度能通过热氧化反应,促使表儿茶素等



字母不同代表在同一时期不同贮藏条件之间数据在 $P<0.05$ 水平上有显著性差异

图 8 贮藏期间赛买提杏酒总酚质量浓度的变化
Figure 8 Total phenolic mass concentration changes of Saimaiti apricot wine during storage

酚类物质通过邻苯二酚途径生成邻醌,进而与其他酚类化合物、氨基酸或还原糖发生聚合反应结合进行呈色^[16],形成有色物质(如类黑精)。因此,通过温度调控热氧化和酶促聚合双重复合路径驱动酚类降解,而低温(4°C)通过抑制酶活性和减缓分子扩散速率,显著延缓褐变进程。

2.3 褐变度与各主要致褐因子的相关分析

如表 2 所示,贮藏期间赛买提杏酒褐变度变化量与主要致褐因子的相关性分析揭示:总酚、总酸及氨基肽氮的降幅与褐变度增量呈显著正相关,印证了酚类氧化聚合通过邻醌—类黑精路径驱动褐变的核心机制。抗坏血酸变化量和 5-HMF 变化量与褐变度增量呈显著负相关,前者因抗氧化能力耗竭削弱自由基清除作用,后者则加速生成类黑精。相比之下,总黄酮变化量和还原糖变化量与褐变程度的变化之间的相关性不显著 ($P>0.05$),这意味着在赛买提杏酒中,黄酮类物质和还原糖不是主要的褐变原因。总酚、总酸、氨基肽氮、抗坏血酸和 5-HMF 都参与了赛买提杏酒非酶褐变的化学反应,这一发现与朱丹等^[7]的研究结果相吻合。

表 2 褐变度与各主要致褐因子变化量的相关系数[†]
Table 2 Correlation coefficients between browning degree values and the changing amount of each main browning factor

各因子间的相关性	低温	常温	高温
褐变度增量与总酚变化量	-0.918**	-0.863**	-0.879**
褐变度增量与总黄酮变化量	-0.698	-0.966	-0.946
褐变度增量与抗坏血酸变化量	0.944**	0.890**	0.935**
褐变度增量与还原糖变化量	-0.377	-0.413	-0.685
褐变度增量与 5-HMF 变化量	0.998*	0.997*	0.998*
褐变度增量与氨基肽氮变化量	-0.978**	-0.977**	-0.945**
褐变度增量与总酸变化量	-0.998**	-0.911*	-0.952**

[†] *表示显著差异 ($P<0.05$), **表示极显著差异 ($P<0.01$)。

2.4 低温贮藏条件下赛买提杏酒非酶褐变的途径分析

低温贮藏条件下与褐变度呈显著或极显著相关的 5 个因子分别是总酚、抗坏血酸、5-HMF、氨基肽氮和总酸。将这些因素的变化量分别定义为自变量 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 ; 将褐变度变化量作为因变量 y 值,各变量间的相关系数见表 3, 途径系数分析结果见表 4。

直接途径系数用于表征自变量 x_i 对因变量 y 的直接作用强度,其中 $x_1 \sim x_5$ 各自对 y 的直接途径系数,依次用 $P_1 \sim P_5$ 表示;该系数可通过式(2)进行求解。

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & 1 & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & 1 & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

表3 低温贮藏条件下各变量间的相关系数[†]

Table 3 Correlation coefficients between variables under low-temperature conditions

因子	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
x_1	1.000					
x_2	0.974**	1.000				
x_3	-0.929**	-0.910**	1.000			
x_4	0.906**	0.901**	-0.968**	1.000		
x_5	0.665	0.782*	-0.783*	0.806*	1.000	
y	-0.834*	-0.794*	0.772*	-0.724*	-0.605	1.000

† *表示显著差异($P<0.05$), **表示极显著差异($P<0.01$)。

表4 低温贮藏条件下5个因素的通径分析[†]

Table 4 Path analysis of 5 factors under low-temperature conditions

因子	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
x_1	-8.487*	6.574	1.780	1.111	-1.811	-0.834
x_2	-8.266	6.750*	1.744	1.105	-2.129	-0.794
x_3	7.884	-6.143	-1.916*	-1.187	2.132	0.772
x_4	-7.689	6.082	1.855	1.226*	-2.195	-0.724
x_5	-5.113	5.279	1.500	0.988	-2.723*	-0.605

† *为直接通径系数(P_i),其余位置的值为间接通径系数(P_{ij})。

将表3中相关系数代入式(2)可得:

$$\begin{bmatrix} 1.000 & 0.974 & -0.929 & 0.906 & 0.665 \\ 0.974 & 1.000 & -0.910 & 0.901 & 0.782 \\ -0.929 & -0.910 & 1.000 & -0.968 & -0.783 \\ 0.906 & 0.901 & -0.968 & 1.000 & 0.806 \\ 0.665 & 0.782 & -0.783 & 0.806 & 1.000 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.834 \\ -0.794 \\ 0.772 \\ -0.724 \\ -0.605 \end{bmatrix} \quad (3)$$

解得 $P_1 = -8.487$, $P_2 = 6.750$, $P_3 = -1.916$, $P_4 = 1.226$, $P_5 = -2.723$, 将自变量 x_i 通过变量 x_j 对因变量的作用, 通过式(4)可以求得间接通径系数。

$$P_{ij} = r_{ij} P_j \quad (4)$$

由以上直接通径系数和间接通径系数可得通径系数分析表(见表4)。各因子褐变度变化量的直接通径系数分别为 $P_{\text{总酚}} = -8.487$, $P_{\text{抗坏血酸}} = 6.750$, $P_{5\text{-HMF}} = -1.916$, $P_{\text{氨基态氮}} = 1.226$, $P_{\text{总酸}} = -2.723$ 。通径分析结果显示, $P_{\text{总酚}}$ 最大(绝对值为8.487), 说明低温贮藏条件下对赛买提杏酒的褐变度变化量起首要作用的是总酚, 其次是抗坏血酸, 5-HMF所起的作用最小。

通过各单因子对褐变度变化量的决定系数($d_i = P_i^2$)来量化单个因素对褐变度变化的影响程度: $d_{\text{总酚}} =$

72.029 , $d_{\text{抗坏血酸}} = 45.563$, $d_{5\text{-HMF}} = 1.503$, $d_{\text{氨基态氮}} = 7.415$, $d_{\text{总酸}} = 3.671$; 通过两因子对褐变度变化量的决定系数($d_{ij} = 2r_{ij}P_iP_j$)来衡量两因子共同作用对褐变度变化的影响: $d_{\text{总酚和抗坏血酸}} = d_{12} = -111.596$, $d_{13} = 0.072$, $d_{14} = -30.213$, $d_{15} = -18.854$, $d_{23} = 23.538$, $d_{24} = 14.912$, $d_{25} = -28.747$, $d_{34} = 4.548$, $d_{35} = -8.170$, $d_{45} = -5.381$ 。根据各因素对褐变指数的决定系数的绝对值进行降序排列, 结果表明, 总酚和抗坏血酸的交互作用是影响赛买提酒低温贮藏过程褐变度增加的第一决定因素($d_{12} = -111.596$); 而总酚($d = 72.029$)和抗坏血酸($d = 45.563$)分别是影响赛买提酒低温贮藏过程褐变度的第2和第3决定因素。结合表3的变量相关系数与表4的直接通径系数, 累加单因子及两因子交互决定系数所得的总解释率 $\sum d = 0.954$, 由 $P_e = \sqrt{1 - 0.954}$ 可得剩余通径系数为0.214。

P_e 较小, 说明已找出影响赛买提杏酒褐变指数增加的主要因素。

2.5 常温避光贮藏条件下赛买提杏酒非酶褐变的通径分析

由相关系数求得5-HMF、总酸、抗坏血酸、总酚和氨基态氮对褐变度的直接通径系数分别为 $P_1 = 0.582$, $P_2 = -0.037$, $P_3 = -0.405$, $P_4 = 0.480$, $P_5 = -0.420$ 。再计算各因子的间接通径系数, 并得通径系数分析表5, 对常温贮藏条件下赛买提杏酒的褐变度作用由大到小排序分别为5-HMF(0.582) > 总酚(0.480) > 抗坏血酸(-0.405) > 氨基态氮(-0.420) > 总酸(-0.037)。对应的5个因素通径分析结果如表6所示。

表5 常温避光贮藏条件下各变量间的相关系数[†]

Table 5 Correlation coefficients between variables under normal temperature and dark conditions

因子	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
x_1	1.000					
x_2	-0.856**	1.000				
x_3	-0.957**	0.824**	1.000			
x_4	-0.947**	0.822**	0.988**	1.000		
x_5	-0.972**	0.895**	0.957**	0.927**	1.000	
y	0.954	-0.849	-0.919	-0.890	-0.961	1.000

† *表示显著差异($P<0.05$), **表示极显著差异($P<0.01$)。

决定系数计算结果: $d_{5\text{-HMF}} = 0.339$, $d_{\text{总酸}} = 0.001$, $d_{\text{抗坏血酸}} = 0.164$, $d_{\text{总酚}} = 0.230$, $d_{\text{氨基态氮}} = 0.176$, $d_{5\text{-HMF和总酸}} = d_{12} = 0.037$, $d_{13} = 0.451$, $d_{14} = -0.529$, $d_{15} = 0.475$, $d_{23} = 0.025$, $d_{24} = -0.029$, $d_{25} = 0.027$, $d_{34} = -0.384$, $d_{35} = 0.326$, $d_{45} = 0.374$; $\sum d = 0.936$, $P_e = \sqrt{1 - 0.936} = 0.800$ 。

由决定系数可知, 5-HMF和总酚的交互作用是影响常温贮藏条件下赛买提杏酒褐变度的第一决定因素, 绝

表 6 常温避光贮藏条件下 5 个因素的通径分析[†]
Table 6 Path analysis of 5 factors under normal temperature and dark conditions

因子	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	r
x_1	0.582*	0.032	0.388	-0.455	0.408	0.954
x_2	-0.498	-0.037*	-0.334	0.394	-0.376	-0.849
x_3	-0.557	-0.031	-0.405*	0.474	-0.402	-0.919
x_4	-0.551	-0.030	-0.400	0.480*	-0.389	-0.890
x_5	0.536	-0.033	-0.388	0.445	-0.420*	-0.961

† *为直接通径系数(P_i),其余位置的值为间接通径系数(P_{ij})。

对值为 0.529;而 5-HMF 和氨基态氮的交互作用是影响褐变度的第二决定因素,为 0.475;5-HMF 和抗坏血酸的交互作用是第三决定因素,为 0.451;其余依次类推。 $\Sigma d=0.936, P_e=0.800$,说明考虑了影响赛买提杏酒褐变度变化的主要因素。

2.6 高温避光贮藏条件下赛买提杏酒非酶褐变的通径分析

高温避光条件下 5-HMF、总酸、抗坏血酸、总酚和氨基态氮及褐变度之间的相关系数见表 7。由相关系数求得 5-HMF、总酸、抗坏血酸、总酚和氨基态氮对褐变度的直接通径系数分别为 $P_1=-0.498$ 、 $P_2=-3.613$ 、 $P_3=-1.747$ 、 $P_4=1.691$ 、 $P_5=2.233$ 。

表 7 高温避光贮藏条件下各变量间的相关系数[†]
Table 7 Correlation coefficients between variables under high-temperature and dark conditions

因子	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
x_1	1.000					
x_2	-0.927**	1.000				
x_3	-0.969**	0.974**	1.000			
x_4	-0.924**	0.988**	0.968**	1.000		
x_5	-0.917**	0.992**	0.978**	0.975**	1.000	
y	0.934**	-0.966**	-0.961**	-0.930**	-0.955**	1.000

† *表示显著差异($P<0.05$),**表示极显著差异($P<0.01$)。

再计算各因子的间接通径系数,通过式(4)得表 8,在研究的 5 个致褐变因子中,对高温避光贮藏条件下褐变度起首要作用的是总酸,其绝对值为 3.613;其次是氨基态氮,为 3.585;而 5-HMF 所起的作用最小,其绝对值为 -0.498。总酸与其他成分的相互作用同样显著,相比之下,5-HMF 与其他成分之间的交互作用较弱。

决定系数计算结果: $d_{5\text{-HMF}}=0.248, d_{\text{总酸}}=13.054, d_{\text{抗坏血酸}}=3.052, d_{\text{总酚}}=2.859, d_{\text{氨基态氮}}=4.986, d_{5\text{-HMF和总酸}}=d_{12}=-3.337, d_{13}=-1.687, d_{14}=1.556, d_{15}=2.040, d_{23}=12.290, d_{24}=-12.066, d_{25}=-16.011, d_{34}=-5.717, d_{35}=$

表 8 高温避光贮藏条件下 5 个因素的通径分析[†]
Table 8 Path analysis on 5 factors under high-temperature and dark conditions

因子	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	r
x_1	-0.498*	3.350	1.693	-1.562	-2.049	0.934
x_2	0.462	-3.613*	-1.701	1.670	2.216	-0.966
x_3	0.483	-3.517	-1.747*	1.636	2.184	-0.961
x_4	0.460	-3.568	-1.690	1.691*	2.177	-0.930
x_5	-0.422	-3.585	-1.709	1.649	2.233*	-0.955

† *为直接通径系数(P_i),其余位置的值为间接通径系数(P_{ij})。

$-7.632, d_{45}=7.363; \Sigma d=0.998, P_e=\sqrt{1-0.998}=0.020$ 。

由各致褐变因子对褐变度的决定系数可知:总酸和氨基态氮的交互作用是影响赛买提杏酒高温避光贮藏条件下褐变度的第一决定因素,绝对值最大为 16.011;总酸是影响褐变度的第二决定因素,为 13.054;总酸和抗坏血酸的交互作用是第三决定因素,为 12.290;其余依次类推。 Σd 为 0.998,剩余通径系数为 0.020,说明考虑了影响高温贮藏条件下赛买提杏酒褐变度变化的主要因素。

3 结论

该研究针对贮藏过程中赛买提杏酒出现的色泽劣变问题,深入分析了赛买提杏酒在不同贮藏条件下主要致褐因子的质量浓度变化和非酶褐变的形成机制,明确了低温、常温和高温环境下杏酒褐变的主导因素。目前中国学者主要研究贮藏期间不同温度条件下各类酒中非酶褐变的主次原因,该研究在前人的基础上进一步通过通径分析量化了温度对褐变的直接贡献率。由研究结果可知,贮藏温度越高,褐变越严重。总酚、总酸、氨基态氮、抗坏血酸和 5-羟甲基糠醛为赛买提杏酒非酶褐变的主要致褐因子,酒中总酚质量浓度、总酸质量浓度和氨基态氮质量浓度的减少与褐变程度的加剧之间存在正相关关系,抗坏血酸和 5-羟甲基糠醛质量浓度的增加与褐变程度的加剧之间存在正相关关系,不同贮藏条件下引起非酶褐变的主次因素各不相同。在低温贮藏和常温贮藏条件下,赛买提杏酒非酶褐变主要是由酚类物质的氧化聚合引起,高温贮藏条件下引起非酶褐变的主要是美拉德反应。以上结果与朱丹等^[7]、刘易伟等^[13]和闫公昕^[16]对引起不同贮藏条件下刺梨原汁、沙棘酒、苹果汁的非酶褐变研究趋势和结论相似。

该研究仅观测 60 d 的各项致褐因子的变化动态,后续可将贮藏周期延长至 180 d,且进一步考察发酵过程中酶促褐变对赛买提杏酒品质的影响,并采取适当的调控或抑制措施以优化赛买提杏酒的品质。

参考文献

- [1] 廉苇佳, 韩琛, 郭红梅, 等. 新疆赛买提杏干发酵杏酒工艺优化[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(5): 47-54.
LIAN W J, HAN C, GUO H M, et al. Optimization of fermentation technology of apricot wine using Saimaiti dried apricot from Xinjiang[J]. Storage and Process, 2023, 23(5): 47-54.
- [2] 孟锋, 索铃兰, 李程, 等. 果蔬制品非酶褐变机理及控制技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(17): 219-224.
MENG F, SUO L L, LI C, et al. Progress in non-enzymatic browning mechanism and control technologies of fruits and vegetables[J]. Food Research and Development, 2024, 45(17): 219-224.
- [3] 马烁, 赵华. 果蔬汁防褐变的研究进展[J]. 农产品加工, 2023 (11): 76-79, 83.
MA S, ZHAO H. Research progress on anti-browning of fruit and vegetable juice[J]. Agricultural Products Processing, 2023 (11): 76-79, 83.
- [4] 农玉萍, 于洋. 红枣山楂蓝莓复合饮料工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 食品工业, 2025, 46(1): 1-7.
NONG Y P, YU Y. Process optimization and antioxidant activity analysis of jujube, hawthorn and blueberry compound beverage [J]. The Food Industry, 2025, 46(1): 1-7.
- [5] 宁珊珊, 蔡思涵, 孙武飞, 等. 不同水果混合发酵对紫薯酒品质及风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(17): 175-183.
NING S S, CAI S H, SUN W F, et al. Effect of mixed fermentation of different fruits on quality and flavor of purple sweet potato wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(17): 175-183.
- [6] 安军. 苦荞酒中总黄酮含量的测定[J]. 食品安全导刊, 2022 (23): 62-64, 68.
AN J. Determination of total flavonoids in Tartary buckwheat wine[J]. Journal of Food Safety Guide, 2022(23): 62-64, 68.
- [7] 朱丹, 颜飞翔, 朱立斌, 等. 沙棘酒贮藏期间非酶褐变研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 336-341.
ZHU D, YAN F X, ZHU L B, et al. Research on non-enzymatic browning of sea buckthorn wine during storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 336-341.
- [8] JUYAL S, SHARMA S K. Effect of cation exchange resin treatment on reduction of non-enzymatic browning of orange juice and semi-concentrates during storage[J]. International Journal of Food and Fermentation Technology, 2014, 4(1): 55-66.
- [9] 孔燕, 杨蕊羽, 张明慧, 等. 酵母菌株及陈酿时间对桑葚酒主要理化指标和抗氧化能力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6): 67-72.
KONG Y, YANG R Y, ZHANG M H, et al. Effects of yeast strains and aging time on main physicochemical indexes and antioxidant capability of mulberry wines[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(6): 67-72.
- [10] 张序, 袁倩, 李嘉欣, 等. 低醇早酥梨酒褐变因子分析及其对挥发性香气化合物的影响研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55 (12): 451-461.
ZHANG X, YUAN Q, LI J X, et al. Analysis of browning factors in low-alcohol early Zaosu pear wine and its effect on volatile aroma compounds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 451-461.
- [11] 曾竟蓝. 柑橘发酵酒陈酿过程的品质变化规律及催陈方法研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019: 25-34.
ZENG J L. Study on quality changes and accelerating aging method of citrus fermented wine during aging process[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019: 25-34.
- [12] 周雪燕. 陈宇. 林可, 等. ‘美乐’和‘威代尔’冰酒在贮藏过程中理化性质和挥发性风味物质的动态变化(英文) [J]. 食品科学, 2021, 42(2): 200-211.
ZHOU X Y CHEN Y, LIN K, et al. Dynamic changes in the physicochemical properties and the volatile flavor compounds in 'merlot' and 'vidal' icewines during storage[J]. Food Science, 2021, 42(2): 200-211.
- [13] 刘易伟, 陈萍, 卿云光, 等. 不同贮藏温度对刺梨原汁中总黄酮含量的影响[J]. 食品安全导刊, 2023(3): 98-100.
LIU Y W, CHEN P, QING Y G, et al. The effects of total flavonoids in rosa roxburghii juice in different storage temperature[J]. Journal of Food Safety Guide, 2023(3): 98-100.
- [14] SHINODA Y, KOMURA H, HOMMA S, et al. Browning of model orange juice solution: factors affecting the formation of decomposition products[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2005, 69(11): 2 129-2 137.
- [15] 罗昱, 徐素云, 李小鑫, 等. 刺梨果汁储藏中非酶褐变原因解析[J]. 食品科技, 2014, 39(10): 69-73.
LUO Y, XU S Y, LI X X, et al. Analysis of mechanism of non-enzymatic browning of Roxburgh rose juice during storage[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(10): 69-73.
- [16] 闫公昕. 沙棘酒贮藏期间非酶褐变影响因素及其控制措施 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2016: 37-46.
YAN G X. Research on non-enzymatic browning and control of sea buckthorn wine during storage[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2016: 37-46.