

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

张序 袁倩 李嘉欣 俞柏含 杨学山 祝霞

(甘肃农业大学食品科学与工程学院, 兰州 730070)

摘要: 为探讨低醇早酥梨酒贮藏期间褐变因子和挥发性香气化合物的变化,将早酥梨酒分别在4、25℃下避光贮藏60 d,每隔7 d测定 PPO、POD、PAL 酶活力,总氨基酸、还原糖、总酚、5-羟甲基糠醛质量浓度及褐变度,并采用 SPME-GC/MS 检测贮藏结束时的挥发性香气化合物。结果表明,早酥梨酒在贮藏期间 POD 活力下降速度极快,总氨基酸质量浓度、总酚质量浓度分别下降 62% ~ 70% 和 23% ~ 31%,5-羟甲基糠醛质量浓度和褐变度不断增加。总氨基酸、总酚、5-羟甲基糠醛质量浓度及褐变度变化均符合零级动力学方程,且拟合效果良好。相关性分析显示总氨基酸、总酚与 5-HMF 质量浓度对早酥梨酒褐变的影响最大。贮藏 60 d 后早酥梨酒中萜烯类、酯类、羰基化合物质量浓度有所增加,醇类、酸类化合物质量浓度显著降低;15 种关键香气物质(OAV 大于 0.1)质量浓度与主要褐变因子之间的相关系数均大于 0.8。研究结果对控制早酥梨酒褐变具有应用价值。

关键词: 低醇早酥梨酒; 挥发性香气化合物; 动态模型拟合; 非酶促褐变

中图分类号: TS262.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)12-0451-11

OSID:



Analysis of Browning Factors in Low-alcohol Zaosu Pear Wine and Its Effect on Volatile Aroma Compounds

ZHANG Xu YUAN Qian LI Jiaxin YU Baihan YANG Xueshan ZHU Xia

(College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The low-alcohol Zaosu pear wine was prepared and stored at 4℃ and 25℃ for 60 days respectively to investigate the changes in browning factors and volatile aroma compounds. The activity of polyphenol oxidase, peroxidase and phenylalanine ammonia lyase, and the content of total amino acids, reducing sugar, total phenols, 5-hydroxymethylfurfural as well as the browning degree were measured every seven days during the storage of wine samples. The volatile aroma compounds in pear wine were detected at the end of storage by using SPME-GC/MS. Results showed that the POD activity of Zaosu pear wine was rapidly decreased and the content of total amino acids and polyphenols was reduced by 62% ~ 70% and 23% ~ 31%, respectively. Meanwhile, 5-hydroxymethylfurfural content and browning degree were constantly increased during the storage of pear wine. The evolutions of total amino acids, polyphenol, 5-hydroxymethylfurfural and browning degree were perfectly fitted to the zero order kinetic equation. Correlation analysis showed that total amino acids, polyphenols and 5-hydroxymethylfurfural had a significant impact on the browning of pear wine. The content of terpenes, esters and carbonyl compounds was increased, while the level of higher alcohol and volatile fatty acids was significantly decreased in wine samples after 60 days of storage. The correlation coefficients between 15 key aroma compounds (OAV > 0.1) and the main browning factors were greater than 0.8. The research results had potential application value for controlling the browning of Zaosu pear wine.

Key words: low-alcohol Zaosu pear wine; volatile aroma compounds; dynamic model fitting; non-enzymatic browning

收稿日期: 2024-01-19 修回日期: 2024-01-30

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目(32060581, 32260637)、甘肃省葡萄酒产业发展基金项目(20180820-08, 20180820-07)和甘肃农业大学校列科研项目(GSAU-ZL-2018-8)

作者简介: 张序(1999—),男,硕士生,主要从事葡萄酒/果酒品质调控研究,E-mail: 542409298@qq.com

通信作者: 祝霞(1977—),女,教授,主要从事葡萄与葡萄酒风味品质调控研究,E-mail: zhux@gsau.edu.cn

0 引言

早酥梨 (Zaosu pear) 作为甘肃省的第二大水果资源^[1], 果品产量高, 果实皮薄而脆、汁液甘甜, 富含氨基酸、维生素和酚类等功能成分, 具有较高的营养和经济价值^[2]。目前, 早酥梨的市场消费主要以鲜食为主, 但 20% 左右品相欠佳的非商品化果和采收期相对集中引起的滞销导致鲜果浪费较为严重^[3]。利用早酥梨生产酒精含量较低 (酒精度小于 7% vol)、健康时尚的低醇果酒, 既能为消费者提供富含生物活性成分的特色果酒, 还可以延伸产业链、提高附加值。然而, 早酥梨酒在贮藏期间容易产生褐变, 颜色逐渐变暗, 不仅影响酒体外观品质, 而且丧失了部分营养成分, 无法充分体现其商业价值。

果酒褐变是一个涉及酶促和非酶促反应的复杂氧化过程。其中多酚氧化酶 (Polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 和苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine ammonia lyase, PAL) 是催化果蔬及其制品发生酶促褐变的主要生物酶^[3]。一些学者对 PPO、POD、PAL 与酒类制品褐变的关系进行了研究^[4-5]。文献 [6-9] 则研究了总多酚、总糖、5-羟甲基糖醛 (5-HMF) 含量以及贮藏温度与褐变的关系。

果酒褐变后不仅使色泽产生不可逆的劣变, 也会影响其风味特征^[10]。多酚和有机酸在过氧化氢 (H₂O₂) 存在下容易氧化成相应的醌。醌类物质会增强果酒的苦味^[11]。此外, 一些香气化合物在褐变过程中发生氧化还原反应, 也会改变或掩盖酒体原有的芳香特征^[12]。然而, 也有学者认为, 果酒氧化褐变也可能会产生新的复杂香气, 增加果酒层次感^[13]。总体而言, 虽然目前已对果酒褐变进行了一定的探索, 但对早酥梨酒褐变主要因子及香气化合物变化的相关研究还十分欠缺。

本文以早酥梨为原料, 接种酵母完成酒精发酵后, 分别在 4、25℃ 下避光贮藏 60 d, 定期取样分析监测早酥梨酒的酶促和非酶促褐变反应动力学及挥发性香气化合物, 分析筛选低醇早酥梨酒褐变的主要因子, 探究关键褐变因子与香气化合物之间的潜在联系, 以期有效控制早酥梨酒的褐变提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

早酥梨原料于 2023 年 9 月购自甘肃省景泰条山生态农场, 挑选成熟度高、无虫和无损伤的果实用于酿酒发酵。梨汁还原糖质量浓度 87.55 g/L, 糖度

9.1°Brix, 总酸质量浓度 3.58 g/L, pH 值 4.01。

酿酒酵母 *Saccharomyces cerevisia* (ES488) 购自意大利 Enartis 公司; 非酿酒酵母 *Metschnikowia pulcherrima* 346 (MP346) 购自法国 Lallemand 公司。

果胶酶 (100 000 U/g), 购自上海源叶生物科技有限公司; 茚三酮比色法氨基酸检测试剂盒, 购自上海酶联生物科技有限公司; 2-辛醇为色谱纯, 购于美国 Sigma 公司; 氢氧化钠、偏重亚硫酸钠、无水葡萄糖、硫酸铜、酒石酸钾钠、邻苯二酚、过氧化氢、L-苯丙氨酸、亚铁氰化钾、乙酸锌、亚硫酸氢钠均为分析纯, 购自天津市光复精细化工研究所; 轻质碳酸钙、柠檬酸、白砂糖均为食品级 (一级), 购自河南万邦实业有限公司。

1.2 仪器与设备

SPX-150-II 型生化培养箱, 上海跃进医疗器械有限公司; PAL-2 型数显手持折光仪, 日本爱宕 ATAGO 公司; S-3C 型精密 pH 计, 上海雷磁仪器厂; CP214 型电子天平, 上海奥豪斯仪器有限公司; H2050R 型台式冷冻离心机, 长沙湘仪离心机有限公司; V-5100 型紫外可见分光光度计, 上海精科实业有限公司; DF-101S 型恒温加热磁力搅拌器, 郑州市亚荣仪器有限公司; TRACE 1310-ISQ 型气相色谱-质谱联用仪, 美国 Thermo Scientific 公司; DB-WAX 型气相色谱柱, 美国 Agilent Technologies 公司; DVB-PDMS HS-SPME 型固相微萃取头, 上海安谱实验科技股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 早酥梨酒酿酒工艺

根据文献 [14] 方法, 稍作修改。
早酥梨挑选、清洗→切块、去核→用 1 g/L 柠檬酸溶液护色→榨汁 (加 60 mg/L SO₂)→酶解 (50 mg/L 果胶酶)→用 4 层纱布过滤澄清→梨汁成分测定及调整 (使用白砂糖调整糖度为 12.5°Brix, 利用碳酸钙调整初始 pH 值为 4)→梨汁分装于 5 L 可取样发酵罐中→接种酵母 (先接种非酿酒酵母 *M. pulcherrima* 346, 48 h 后接种酿酒酵母 ES488, 接种量均为 0.20 g/L)→20℃ 混菌发酵至残糖质量浓度小于 4 g/L 后, 置于 4℃ 使酵母及果渣完全沉淀→3 500 r/min 离心 20 min→补加 30 mg/L SO₂ 进行贮藏→装瓶。将装瓶后的早酥梨酒置于 4、25℃ 下避光贮藏 60 d。定期取样测定相关指标。所有处理平行 3 份。

1.3.2 理化指标测定

还原糖、总酸、挥发酸含量以及 pH 值测定采用国标 GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》^[15]。酒精度测定采用 GB 5009.225—2016《食

品安全国家标准 酒中乙醇浓度的测定》^[16]。

1.3.3 PPO、POD、PAL 酶活力测定

根据文献[17]的方法测定 3 种酶活力。以每分钟光密度(OD 值)的变化计算酶活力单位,结果以 U/mL 表示。

1.3.4 5-HMF 含量测定

参照文献[18]的方法。取 5 mL 梨酒酒样,依次加入 0.5 mL 15 g/(100 mL)亚铁氰化钾溶液,0.5 mL 30 g/(100 mL)乙酸锌溶液,并摇匀。使用蒸馏水定容至 50 mL,将其以 9 000 r/min 离心 10 min,分别取上清液 5 mL 放入两个离心管中。在一个离心管中加入 5 mL 0.20 g/(100 mL)亚硫酸氢钠溶液并充分混匀,作为参比液。在另一个离心管中加入 5 mL 蒸馏水并混合,作为待测液。用紫外-可见分光光度计分别在 284 nm 和 336 nm 波长下测定待测样品的吸光度。5-HMF 质量浓度测定计算公式为

$$X = \frac{(A_{284} - A_{336}) \times 14.97 \times 5}{V}$$

式中 X——5-HMF 质量浓度,mg/(100 mL)

V——样品体积,mL

A₂₈₄、A₃₃₆——284、336 nm 波长下吸光度

1.3.5 总酚、总氨基酸含量测定

总酚含量测定采用 Folin-酚法^[19];总氨基酸含量采用氨基酸检测试剂盒测定。

1.3.6 褐变度测定

早酥梨酒以 10 000 r/min 离心 10 min 后,取上清液,采用紫外-可见分光光度计测量 420 nm 波长处的吸光度 A₄₂₀,以蒸馏水作为空白对照^[19]。

1.4 动态模型拟合分析

动力学模型可以定量描述反应速率与实验变量之间的相关性^[20],有助于更详细了解早酥梨酒褐变过程中重要参数的动态变化过程。参照文献[21]的方法,采用零级反应和一级反应动力学模型方程^[22-23],对果酒贮藏过程中 POD 活力,总氨基酸、还原糖、总酚和 5-HMF 质量浓度以及褐变度的变化进行动态模型拟合分析。

1.5 挥发性香气化合物测定

参照文献[24]的挥发性香气化合物测定方法,分别在早酥梨酒酒精发酵结束和贮藏结束时测定。取 8 mL 梨酒样品于顶空瓶中,同时加入 2.50 g 氯化钠、10 μL 2-辛醇(质量浓度为 81.06 mg/L),加磁力搅拌转子后封口摇匀,放入恒温加热磁力搅拌器中,40℃水浴 30 min,萃取 30 min。采用质谱全离子扫描图谱,根据目标化合物保留指数(Retention index, RI)、NIST-11、Wiley 和香精香料谱库进行定性分析,确定挥发性香气物质种类。采用内标-标准曲线法定量,无标准品的化合物以化学结构相似和分子质量相近为原则选择标准品曲线进行定量。

1.6 数据处理

采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较分析检验,P<0.05 代表差异显著,数据为平均值±标准差形式;相关性分析、图表及相关性网格图通过 Origin 2021 软件及 <https://www.omicstudio.cn/>网站完成;主成分分析(Principal components analysis,PCA)、正交偏最小二乘法判别分析(Orthogonal partial least squares-discriminant analysis,OPLS)分析和变量投影重要度(Variable importance in the projection,VIP)图采用 SIMCA 14.1 软件完成。

2 结果与分析

2.1 理化指标变化

早酥梨酒贮藏前后理化指标如表 1 所示。早酥梨酒酒精发酵结束时与贮藏 60 d 后,还原糖质量浓度差异不显著(P>0.05);pH 值与挥发酸质量浓度显著上升(P<0.05);酒精度贮藏结束与酒精发酵结束相比,显著下降(P<0.05),且温度越高,酒精度下降越多,这可能与酒精的挥发性有关;早酥梨酒贮藏后总酸质量浓度为 3.35~3.47 g/L,与酒精发酵结束时(3.51 g/L)相比显著下降(P<0.05),与文献[7]的结果相似。这可能是由于果酒在贮藏期间有机酸分解、氧化或与其他成分反应导致。

表 1 早酥梨酒基本理化指标

Tab.1 Physicochemical indicators of Zaosu pear wine

参数	梨酒样品类型		
	酒精发酵结束	4℃贮藏 60 d	25℃贮藏 60 d
还原糖质量浓度/(g·L ⁻¹)	(0.60±0.10) ^a	(0.73±0.06) ^a	(0.62±0.02) ^a
酒精度/% vol	(6.57±0.01) ^a	(6.52±0.01) ^b	(6.49±0.04) ^b
pH 值	(3.60±0.01) ^b	(3.62±0.01) ^b	(3.66±0.01) ^a
总酸质量浓度/(g·L ⁻¹)	(3.51±0.01) ^a	(3.47±0.01) ^b	(3.35±0.01) ^c
挥发酸质量浓度/(g·L ⁻¹)	(0.63±0.01) ^b	(0.64±0.01) ^{ab}	(0.65±0.01) ^a

注:表中同行数据后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 褐变因子及褐变度变化

早酥梨酒在贮藏期间,没有检测到 PPO 与 PAL 活力,与文献[4]在砀山梨酒中的结果一致。POD 活力如图 1a 所示。在贮藏前 28 d 内,2 种贮藏温度下梨酒 POD 活力迅速下降,28 d 后达到 4.00 U/mL,酶活力较低且后期再无明显变化。在 25℃ 下贮藏的早酥梨酒 POD 活力相比 4℃ 下贮藏的早酥梨酒 POD 活力下降趋势更快,说明酶促褐变对早酥梨酒的影响不大。

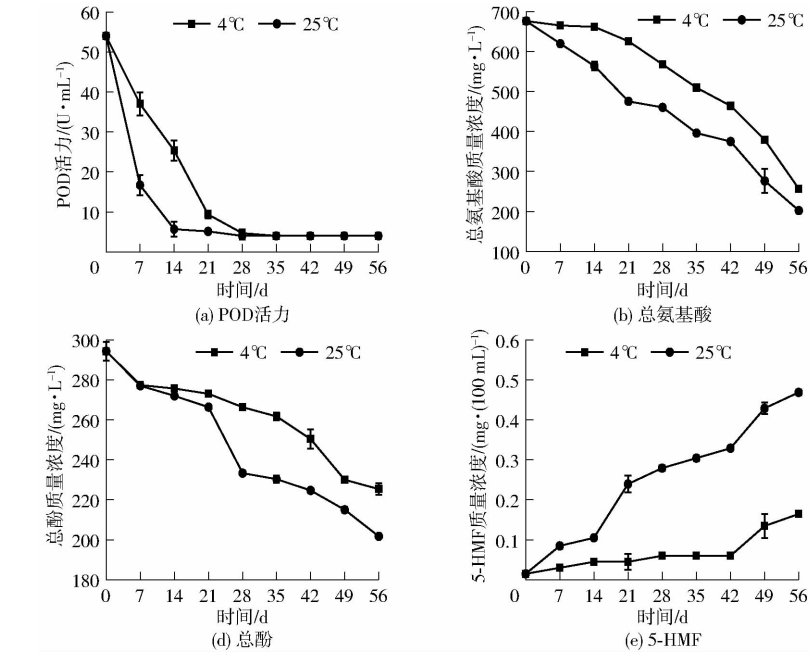


图1 早酥梨酒贮藏期间褐变因子及褐变度的变化

Fig.1 Changes in browning factors and browning degree during storage of Zaosu pear wine

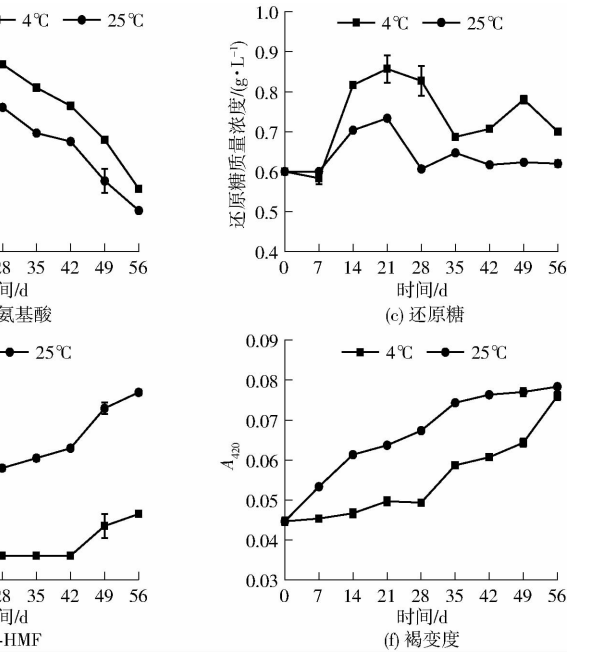
有在高温(140~170℃)条件下会发生^[25],早酥梨在酿造过程中并没有经过高温处理,故本研究不考虑早酥梨酒的焦糖化反应。如图 1c 所示,2 种贮藏温度下的早酥梨酒,在贮藏前期还原糖质量浓度有上升趋势,21~35 d 后逐渐下降达到稳定,呈波动趋势变化。这可能是由果酒在贮藏过程中还原糖与其他成分发生化学反应和转化所导致^[26]。

早酥梨酒酒精发酵结束时总酚质量浓度为 294.33 mg/L,不同温度条件下贮藏时,总酚含量均呈下降趋势(图 1d)。前 28 d 内,不同温度贮藏下的早酥梨酒中总酚质量浓度变化差异不显著($P > 0.05$);28 d 后 25℃ 下贮藏的早酥梨酒总酚质量浓度迅速下降至 201.67 mg/L。贮藏结束时,4℃ 及 25℃ 条件下贮藏早酥梨酒总酚质量浓度分别下降 23% 和 31%。

5-HMF 是美拉德反应的重要中间产物,其产生量受糖种类、温度、pH 值和水分活度等因素的影响^[27]。25℃ 贮藏条件下 5-HMF 质量浓度随着时间逐渐上升;4℃ 下贮藏酒样中 5-HMF 在前 42 d 无显

氨基酸与果蔬制品中的美拉德反应及褐变密切相关。图 1b 显示了不同温度贮藏的早酥梨酒在贮藏过程中氨基酸质量浓度变化。在贮藏过程中,4℃ 和 25℃ 中的总氨基酸质量浓度分别下降 62% 和 70%,56 d 时,2 种温度下早酥梨酒氨基酸质量浓度分别为 256.69、202.36 mg/L,变化差异显著($P < 0.05$)。由此表明,贮藏温度越高,氨基酸与还原糖发生美拉德反应速率越大。

还原糖还可参与焦糖化反应,但焦糖化反应只



著变化,上升缓慢(图 1e)。贮藏结束时,2 种早酥梨酒 5-HMF 质量浓度分别上升 15% 和 46%。

果酒褐变度可用吸光度 A_{420} 表示, A_{420} 越大,褐变程度越严重^[28]。4℃ 下贮藏的早酥梨酒在 7~28 d 内褐变度进展缓慢,28 d 后显著上升;25℃ 下贮藏的早酥梨酒样中 A_{420} 逐步持续上升(图 1f),与 5-HMF 质量浓度的变化趋势一致。

2.3 褐变因子变化的动力学模型拟合

通过建立数学模型可合理预测褐变进程,有助于更详细了解早酥梨贮藏过程中褐变因子参数的动态变化。动力学方程成功拟合的关键在于选择合适的模型和高质量的实验数据,而早酥梨酒在贮藏期间 POD 活力变化与还原糖质量浓度变化呈波动趋势,故不宜进行动力学模型拟合。如表 2 所示,总氨基酸质量浓度、总酚质量浓度、5-HMF 质量浓度和褐变度呈线性趋势变化,均符合零级反应动力学模型。褐变度、氨基酸质量浓度与总酚质量浓度 R^2 均不小于 0.871,方程拟合效果良好。

表 2 动力学参数描述早酥梨酒贮藏过程中各指标的变化

Tab.2 Dynamics parameters of physicochemical indicators during storage of Zaosu pear wine

指标	温度/℃	动力学模型	动力学参数		
			A_0	K	R^2
总氨基酸质量浓度	4	零级	676.47 ± 0.18	-50.8271 ± 5.9464	0.900
	25	零级	676.47 ± 0.18	-56.3831 ± 2.6895	0.982
总酚质量浓度	4	零级	294.33 ± 4.71	-8.0000 ± 0.8018	0.924
	25	零级	294.33 ± 4.71	-11.4556 ± 0.8454	0.958
5-HMF 质量浓度	4	零级	0.015 0	0.0159 ± 0.0031	0.762
	25	零级	0.015 0	0.0503 ± 0.00551	0.911
褐变度	4	零级	0.045 ± 0.01	0.003 7	0.871
	25	零级	0.045 ± 0.01	0.004 1	0.914

2.4 褐变因子与褐变度的相关性分析

不同贮藏温度下早酥梨酒贮藏过程中,POD 活力、总氨基酸质量浓度、还原糖质量浓度、总酚质量浓度、5-HMF 质量浓度与褐变度之间的相关性如图 2 所示。氨基酸、总酚质量浓度与褐变度呈负相关,5-HMF 质量浓度与褐变度呈正相关,且相关系数均大于 0.9。POD 活力与褐变度的相关系数较低,说明早酥梨酒在贮藏期间的褐变主要由非酶促褐变反应主导。

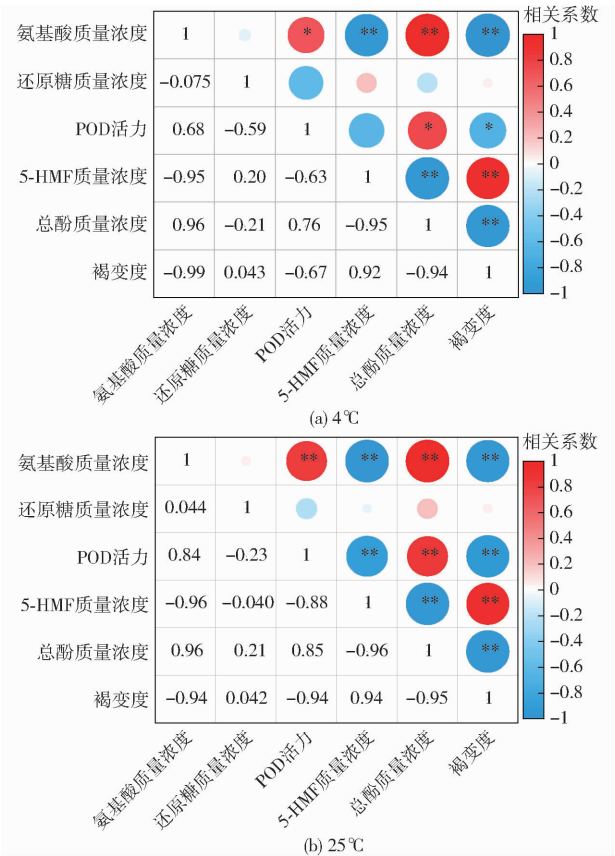


图 2 早酥梨酒样品中各指标之间的相关性分析
Fig.2 Correlation analysis between indicators in
Zaosu pear wine samples

2.5 褐变因子 PCA 分析

以早酥梨酒 POD 活力、总氨基酸质量浓度、还

原糖质量浓度、总酚质量浓度和 5-HMF 质量浓度为自变量 X ,以褐变度为因变量 Y ,对早酥梨酒褐变因子进行 PCA 分析,以考察褐变度数据的动态分布状况。由图 3 可知,在 60 d 贮藏时间里,早酥梨酒的褐变度随着第一主成分向左迁移,梨酒样品的褐变程度逐渐加深。这说明早酥梨酒褐变度的变化与褐变因子的变化有一定相关性,可以进一步建立褐变度的 OPLS 回归模型。

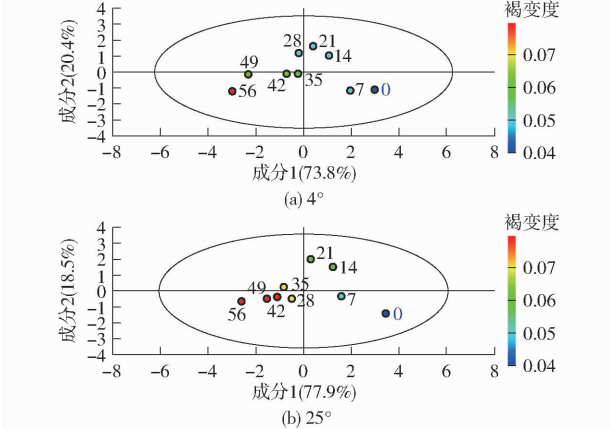


图 3 2 组早酥梨酒褐变度变化主成分分析
Fig.3 Principal component analysis of browning degree
in pear wines stored at different temperatures

2.6 褐变因子 OPLS 分析

以早酥梨酒贮藏过程中 POD 活力、总氨基酸、还原糖、总酚、5-HMF 质量浓度分别作为自变量 X ,以早酥梨酒褐变度为因变量 Y ,建立不同温度条件下早酥梨酒样品的 OPLS 回归模型。如图 4 所示,比较散点图可以看出实际测量值和预测值均比较接近,在 25℃ 下的预测方程式中, R^2 为 0.961,4℃ 贮藏条件下,预测方程的 R^2 为 0.881,说明 OPLS 模型可以根据早酥梨酒样品的各项指标准确预测梨酒的褐变度,预测结果可靠。

图 5a、5b 分别为 4℃ 与 25℃ 条件下贮藏的早酥梨酒中褐变因子的 VIP 图。VIP 值大小可以判断各因子对褐变度的影响程度。在 4℃ 下,第一影响因

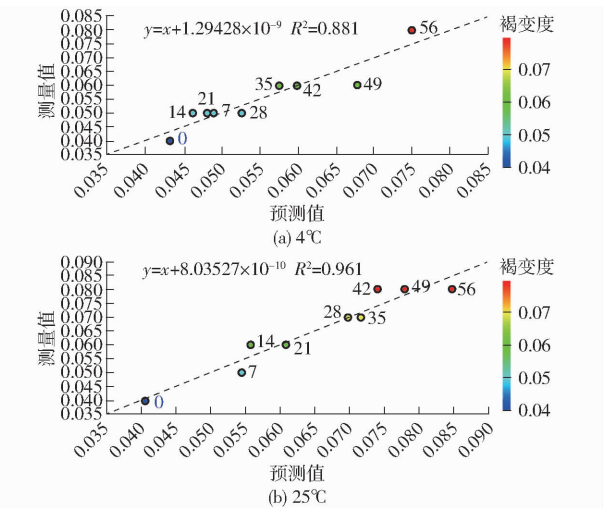


图 4 早酥梨酒褐变度测量值与预测值比较散点图
Fig. 4 Scatter plot of comparison between measured and predicted values of Zaosu pear wine browning degree

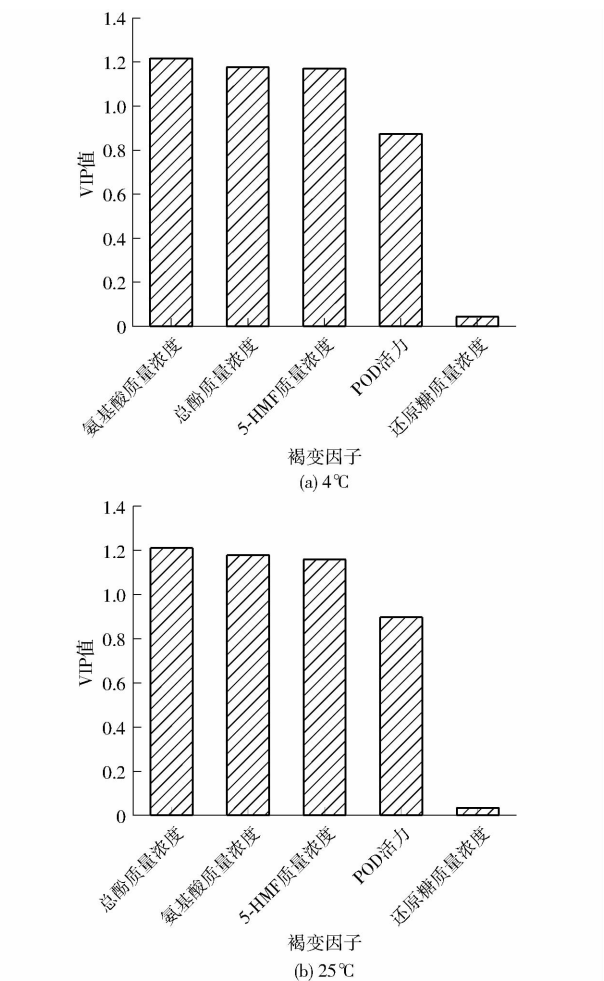


图 5 早酥梨酒各项指标对褐变度影响的 VIP 图
Fig. 5 VIP value of impact of various Zaosu pear wine indicators on browning degree

素为氨基酸质量浓度,第二影响因素是总酚质量浓度,其次为 5-HMF 质量浓度;在 25℃ 下,第一影响因素为总酚质量浓度,第二影响因素为氨基酸质量浓度,其次是 5-HMF 质量浓度。综合相关性分析、

PCA 和 OPLS 分析结果,可确定多酚的氧化聚合以及氨基酸参与的美拉德反应是早酥梨酒褐变的主要原因。

2.7 挥发性香气化合物变化

2.7.1 发酵香气化合物

发酵香气化合物是果酒香气的主要贡献者。酒精发酵结束(CK - AF)和 2 种温度条件下贮藏 60 d 后(4℃ - 60d、25℃ - 60d)的早酥梨酒中,共检测出 67 种发酵香气化合物。图 6a 显示了早酥梨酒发酵香气化合物的分布变化(upset 图),左侧条形图表示 3 组梨酒香气化合物数量,下方点阵图表示各组梨酒之间种类是否存在交集(圆圈连线表示为有交集)。与 CK - AF 相比,2 种温度下贮藏 60 d 后酒样发酵香气化合物种类增加。25℃ - 60d 种类高于 4℃ - 60d,但总含量明显低于 CK - AF 与 4℃ - 60d,可能是由于贮藏期间各香气化合物之间发生水解与转化所致。如图 6b 所示,早酥梨酒酒精发酵结束时,高级醇质量浓度最高;在 4℃ 和 25℃ 贮藏 60 d 后,质量浓度分别下降 3.90% 和 6.83%。而羰基化合物(醛酮类)质量浓度分别上升 46.34% 和 53.57%,说明由于装瓶、取样等操作过程中与空气接触后,酒样在贮藏期间发生氧化褐变反应,导致高级醇分解转化为某些醛类。果酒在发酵和贮藏过程中产生的酯类化合物,可以赋予果酒花香与果香^[29]。经贮藏结束后,早酥梨酒酯类化合物质量浓

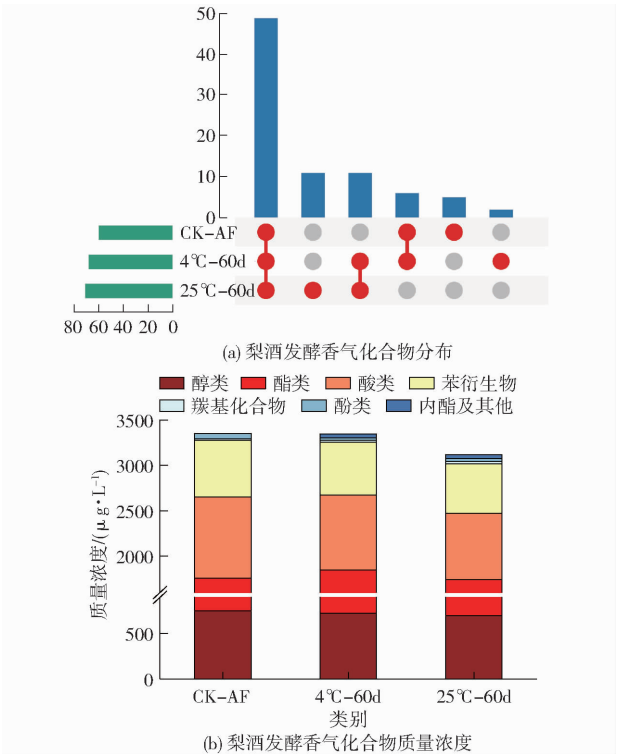


图 6 早酥梨酒发酵香气化合物分布及含量变化
Fig. 6 Distribution and content of fermentative aroma compounds in Zaosu pear wine

度均高于 CK - AF; 4℃ - 60d 明显高于另 2 组。酸类香气化合物对平衡果酒的感官特性至关重要, 通常用来调节果酒的适口性, 酸类香气过高会产生“腐败味”、“奶酪味”、“脂肪味”等不良气味^[30]。早酥梨酒贮藏后酸类化合物质量浓度有所下降, 且 25℃ - 60d 明显低于 4℃ - 60d。与此同时, 苯衍生物在贮藏后也显示出相同趋势。挥发性酚类化合物在梨酒中含量较低, 2 种温度贮藏后, 其质量浓度下降 50% 左右, 这可能与酚类的自身氧化有关。内酯与某些呋喃类化合物均在贮藏后才出现, 且温度越高, 含量越大。

2.7.2 品种香气化合物

萜烯类、C₆ 化合物及 C₁₃-降异戊二烯等品种香气化合物的阈值很低, 会使果酒呈现典型的香气特征^[31]。供试酒样共测得 13 种品种香气化合物, 图 7a、7b 分别显示了早酥梨酒品种香气化合物的分布及质量浓度变化, 经贮藏后, 品种香气化合物数量有所减少。C₆ 化合物包括 (Z)-3-己烯-1-醇和正己醇 2 种, 所占品种香气化合物总质量浓度最高, 且经不同温度贮藏后, C₆ 化合物质量浓度均有所上升, 但 4℃ - 60d 较 25℃ - 60d 无明显变化; 与 CK - AF 相比, 萜烯类质量浓度在不同温度贮藏后分别下降 46.34% (4℃ - 60d) 和 53.57% (25℃ - 60d)。另外, 还检测出 β-大马士酮、β-紫罗兰酮 2 种 C₁₃-降异戊二烯, 其中 β-大马士酮在 CK - AF 和贮藏后一直存

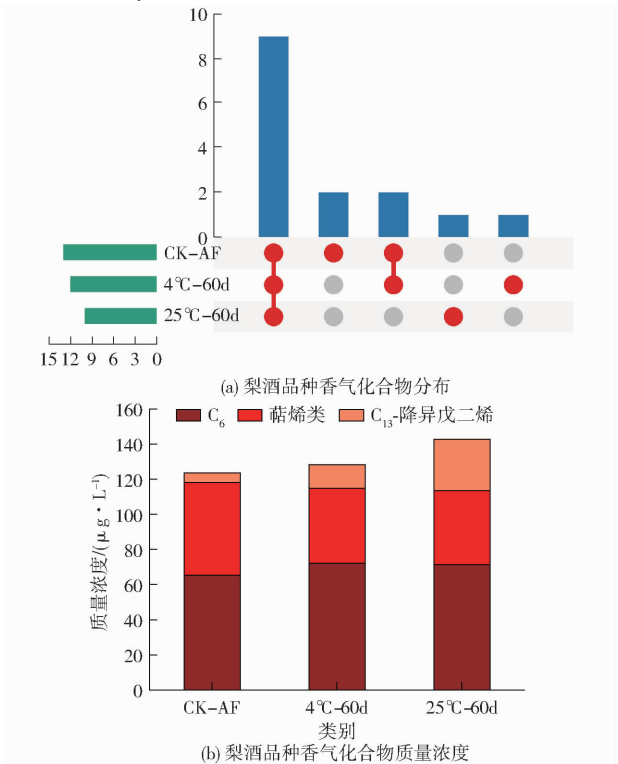


图 7 早酥梨酒品种香气化合物分布及含量变化
Fig.7 Distribution and content of varietal aroma compounds in Zaosu pear wine

在。与 4℃ 下贮藏的早酥梨酒相比, 25℃ 下贮藏后, β-大马士酮质量浓度显著上升 ($P < 0.05$)。然而, β-紫罗兰酮在贮藏后消耗殆尽, 可能是由于氧化分解所致。

2.7.3 关键香气化合物

气味活性值 (Odor activity value, OAV) 可以从质量浓度和阈值 2 个维度揭示单体成分对香气体系的贡献^[32]。当挥发性物质 OAV 大于 0.1 时, 具有相似芳香特征的化合物之间存在叠加和协同效应, 可作为酒样的关键香气化合物^[33]。OAV 大于 0.1 的芳樟醇、香茅醇、香叶醇、β-大马士酮在 2 种温度贮藏后均显著增高 ($P < 0.05$), 且 OAV 贮藏后也有相同趋势; 另外, β-大马士酮 OAV (102.50 ~ 586.16) 远超过其他关键香气化合物, 为早酥梨酒赋予了典型的花香 (表 3)。异戊醇作为梨酒中阈值与质量浓度最高的高级醇, 在贮藏后显著下降 ($P < 0.05$), 而正辛醇显著上升, 说明高级醇类并不是都会通过氧化分解而转化为其他化合物。与 CK - AF 酒样相比, 乙酸异戊酯、丁酸乙酯、辛酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯质量浓度在不同贮藏温度下均显著增加 ($P < 0.05$), 且 25℃ 贮藏酒样质量浓度高于 4℃ 贮藏酒样; 与之相反的是乙酸苯乙酯、乙酸叶醇酯, 它们赋予早酥梨酒玫瑰、热带水果、蜂蜜等浓郁香气, 在 25℃ 贮藏下显著下降 ($P < 0.05$)。阈值较高的辛酸在贮藏前后质量浓度变化不显著 ($P > 0.05$), 正癸酸质量浓度显著下降 ($P < 0.05$), 且在 25℃ 贮藏下变化最明显。丁香酚具有香草、香料等特殊香味, 在贮藏前后, 有显著增加趋势 ($P < 0.05$); 2-甲氧基-4-乙基苯酚贮藏后有所下降, 但变化不显著 ($P < 0.05$)。R-γ-癸内酯具有杏子、桃子等“核果”香味, 通常在陈酿后会产生, 且时间越长, 含量越多, 但在本实验 4℃ 贮藏酒样中未检出。

2.8 褐变因子与关键香气化合物的相关性分析

为了探究褐变度较高的低醇早酥梨酒中主要褐变因子与关键香气物质之间的潜在联系, 对 25℃ 贮藏 60 d 酒样中的总氨基酸、总酚、5-HMF 质量浓度与关键香气化合物质量浓度进行相关性分析。结果表明, 主要褐变因子与 15 种关键香气化合物质量浓度的相关性均满足 $|P| < 0.05$ 、 $|R| > 0.6$, 可建立相关性网络图。如图 8 所示, 红色圆圈代表褐变因子 (TAA (总氨基酸)、TP (总酚)、5-HMF); 绿色圆圈代表关键香气物质 (B1 表示芳樟醇, C1 表示 β-大马士酮, C2 表示 β-紫罗兰酮, D4 表示异戊醇, E5 表示乙酸苯乙酯, F2 表示丁酸乙酯, F5 表示辛酸乙酯, F12 表示 2-甲基丁酸乙酯, H2 表示辛酸, H3 表示正癸

表 3 早酥梨酒关键香气化合物含量变化

Tab.3 Changes in content of key aroma compounds in Zaosu pear wine

中文名	阈值 ^[24,34-35] / ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	香气化合物质量浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)			OAV			香气描述 ^[24,34-37]
		CK - AF	4℃-60d	25℃-60d	CK - AF	4℃-60d	25℃-60d	
芳樟醇	25	(2.04±0.21) ^c	(3.60±0.08) ^b	(9.85±0.31) ^a	0.08	0.14	0.39	花香、麝香、柠檬
香茅醇	7.5	(15.25±1.55) ^b	(19.42±2.02) ^a	(18.38±1.90) ^{ab}	2.03	2.59	2.45	蔷薇、柑橘、花香
香叶醇	20	(15.23±0.85) ^a	0.61 ^b	(0.77±0.07) ^b	0.76	0.03	0.04	玫瑰花、柠檬、天竺葵
β -大马士酮	0.05	(5.13±0.67) ^c	(13.25±1.73) ^b	(29.30±2.77) ^a	102.50	265.04	586.16	花香、甜果、李子干
β -紫罗兰酮	0.09	(0.38±0.18) ^a			4.24	<0.01	<0.01	悬钩子、紫罗兰、甜果
异戊醇	4 000	(695.72±20.00) ^b	(648.74±9.70) ^a	(617.59±13.13) ^a	0.17	0.16	0.15	香料味、苦杏仁味、果香
正辛醇	40	(11.96±0.20) ^c	(15.46±0.04) ^a	(14.67±0.24) ^b	0.30	0.39	0.37	柑橘、玫瑰、甜草药
乙酸异戊酯	30	(95.93±11.37) ^b	(124.75±2.05) ^a	(115.61±5.09) ^a	3.20	4.16	3.85	果香、香蕉
乙酸苯乙酯	250	(105.09±9.95) ^b	(101.59±9.77) ^b	(88.18±5.56) ^a	0.42	0.41	0.35	玫瑰、热带水果、蜂蜜
乙酸叶醇酯	13	(3.04±0.15) ^a	(3.44±0.02) ^a	(0.58±0.30) ^b	0.23	0.27	0.05	香蕉、糖果、花香
丁酸乙酯	20	(10.05±0.96) ^b	(11.63±0.71) ^a	(12.59±0.50) ^a	0.50	0.58	0.63	草莓、香蕉、苹果
己酸乙酯	5	(216.15±19.89) ^{ab}	(225.67±10.07) ^a	(188.76±9.25) ^a	43.23	45.13	40.23	花香、果香、草莓
辛酸乙酯	5	(440.66±22.09) ^b	(503.90±9.69) ^a	(529.14±7.89) ^a	88.13	100.78	105.83	苹果、花香、甜味、蜡味
癸酸乙酯	200	(64.05±11.40) ^a	(66.72±9.75) ^a	(30.82±6.54) ^b	0.32	0.33	0.15	蜡味、果香、玫瑰
2-甲基丁酸乙酯	1.1		(1.19±0.26) ^b	(2.92±0.15) ^a	<0.01	1.09	2.65	苹果、草莓、甜味、八角
辛酸	1 000	(530.17±5.50) ^a	(532.70±42.25) ^a	(496.04±26.90) ^a	0.53	0.53	0.50	奶酪、脂肪味、腐败味
正癸酸	1 000	(178.79±17.04) ^a	(100.73±14.56) ^b	(52.63±4.51) ^c	0.18	0.10	0.05	脂肪、令人不愉悦的气味
苯甲酸乙酯	60	(23.82±1.22) ^b	(36.89±1.66) ^a	(39.54±2.05) ^a	0.40	0.61	0.66	花香、果香
2-壬酮	15	(3.02±0.09) ^c	(3.94±0.07) ^b	(5.71±0.30) ^a	0.20	0.26	0.38	水果、生青味、热牛奶味
癸醛	0.1	(5.08±0.85) ^b	(8.36±0.60) ^a	(8.16±0.97) ^a	50.80	83.69	81.67	甜橙、柠檬油、生青味
丁香酚	5	(8.84±0.73) ^b	(12.44±3.14) ^{ab}	(14.86±1.04) ^a	1.77	2.49	2.97	香草、丁香、香料
2-甲氧基-4-烯基苯酚	3	(10.53±1.13) ^a	(8.20±1.39) ^a	(9.75±1.09) ^a	3.51	2.74	3.25	烟熏味、木香、咖喱
R- γ -癸内酯	1.1			0.20 ^a	<0.01	<0.01	0.19	杏、脂肪味、果香、桃子

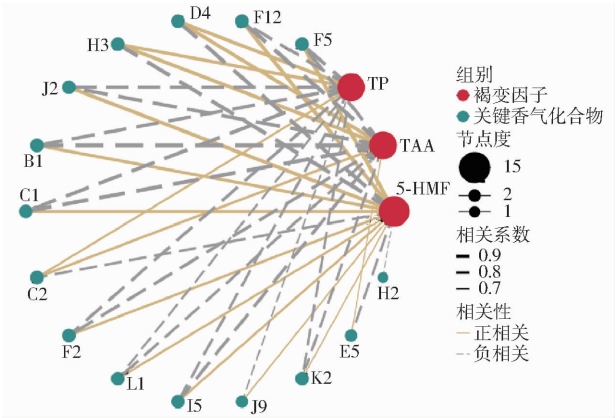


图 8 褐变因子与关键香气化合物相关性网络图

Fig.8 Correlation network between browning factor and key aroma compounds

酸,I5 表示苯甲酸乙酯,J2 表示 2-壬酮,J9 表示癸醛,K2 表示丁香酚,L1 表示 R- γ -癸内酯)。节点大小代表连接度,线条粗细代表相关性大小,黄色直线代表正相关,灰色虚线代表负相关。早酥梨酒褐变因子的链接度均为 15,关键香气化合物链接度均值为 1 和 2。

OAV 为 0.1 ~ 1 的香气化合物共 9 种,其中异戊醇、正癸酸与总氨基酸质量浓度的变化呈正相关;

芳樟醇、2-壬酮、丁酸乙酯、苯甲酸乙酯与总氨基酸质量浓度的变化呈现出较高的负相关性,相关系数 $|R| > 0.8$;芳樟醇、丁酸乙酯、2-壬酮与 5-HMF 质量浓度显示出强正相关性($|R| > 0.8$),而异戊醇、乙酸苯乙酯、正癸酸与之有高度负相关性。早酥梨酒总酚质量浓度与异戊醇、正癸酸质量浓度呈正相关,与芳樟醇、丁酸乙酯、苯甲酸乙酯、2-壬酮呈负相关,相关系数均大于 0.8。

OAV 大于 1 的香气化合物包括 β -大马士酮、 β -紫罗兰酮、辛酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、癸醛和丁香酚 6 种。其中癸醛、丁香酚质量浓度与 3 种褐变因子之间的相关性较低($|R| < 0.8$); β -大马士酮、辛酸乙酯和 2-甲基丁酸乙酯与氨基酸质量浓度呈负相关,而与 5-HMF 质量浓度呈强正相关性($|R| > 0.8$),说明美拉德反应可能会显著影响早酥梨酒香气化合物的变化。此外, β -大马士酮、辛酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯与总酚质量浓度有较高负相关性($|R| > 0.8$),故酚类的自身氧化对梨酒香气化合物的变化也有一定影响。总体而言,褐变因子与关键香气化合物存在一定相关性,二者之间的潜在联系机制需要进一步探究。

3 讨论

褐变对果酒的质量、口感、色泽和稳定性都有着重要影响。早酥梨酒在贮藏期间 PPO、PAL 活力未检测出,POD 活力下降速度极快且活力较低,与火龙果酒在贮藏过程中,PPO 与 POD 活力很低的结果相一致^[38],说明早酥梨酒褐变主要是由非酶促反应主导。美拉德反应是还原糖与氨基酸发生分子间重排、脱水、缩合及聚合,生成黑褐色物质的反应过程^[39]。早酥梨酒在贮藏过程中,总氨基酸质量浓度随着美拉德反应的发生而逐步降低,但还原糖质量浓度呈波动变化趋势。这是因为酒精发酵后梨酒中残留的蔗糖可以水解为葡萄糖和果糖,而葡萄糖和果糖又参与了褐变反应^[26]。酚类物质是果酒的重要组成成分,对果酒整体质量有着重要影响^[40]。部分酚类物质具有抗氧化能力,而咖啡酸、儿茶素和表儿茶素可以通过酶促或非酶促途径加快果酒褐变^[41]。5-HMF 质量浓度与褐变度随着时间的变化而增加,且温度越高变化速率越快,与文献^[42]在杨梅酒贮藏期间的研究结果一致。总体而言,在早酥梨酒贮藏期间,影响早酥梨酒褐变的主要原因是美拉德反应和酚类物质的氧化聚合。但非酶褐变因素较为复杂,需要进一步探讨影响早酥梨酒褐变关键化合物之间的相互作用。

果酒在贮藏期间香气会发生复杂性的变化。早酥梨酒贮藏后高级醇类总体质量浓度下降,与文献^[43]在越桔酒中发现的结果相似。这可能是由于果酒分解代谢途径下高级醇和氨基酸之间相互转化,另外,还可能是被氧气分解为醛类所致^[44]。果酒在贮藏期间,酯化反应会提高酯类物质的总量^[45]。早酥梨酒中酯类含量贮藏后也有所上升。然而,部分乙酸酯(如乙酸苯乙酯与乙酸叶醇酯)贮藏后显著下降,而文献^[46]在霞多丽葡萄酒贮藏期

间也发现了相似结果,这可能是由于酒体氧化褐变及酯类物质水解所致。酸类香气化合物质量浓度的高低会直接影响果酒的感官特性。早酥梨酒在 4、25℃ 下贮藏 60 d 后,酸类香气化合物质量浓度分别降低了 8% 和 18%,其中正癸酸在 25℃ 贮藏时,下降率达到 70%,这与文献^[47]在里奥哈陈年红葡萄酒芳香成分和感官特征的影响研究的结果相似。但与文献^[48]在包装氧对装瓶后杨梅果酒挥发性成分的影响中的结果不一致。有研究表明,在白葡萄酒氧化过程中,丁香酚含量会增加^[49],与早酥梨酒褐变过程中的结果类似。也有研究表明:酚类化合物的自身氧化会造成芳香族化合物的损失,降低白葡萄酒的品质^[50],早酥梨酒在贮藏期间总酚与挥发性酚都有所下降,很可能与酚类的自身氧化有关。综合分析,香气物质在贮藏期间的变化十分复杂,其与褐变因子之间的相关性还需要更多的相关研究结果证实。

4 结论

- (1) 低醇早酥梨酒在 4℃ 和 25℃ 贮藏 60 d 期间,总氨基酸和总酚质量浓度随着时间的延长逐渐下降,褐变度和 5-HMF 质量浓度不断增加,变化规律均符合零级动力学方程。通过 PCA 与 OPLS 分析明确了影响早酥梨酒的褐变以美拉德反应和酚类物质的氧化聚合为主,主要褐变因子影响程度从大到小依次为氨基酸质量浓度、总酚质量浓度、5-HMF 质量浓度。
- (2) 低醇早酥梨酒贮藏 60 d 后,萜烯类、酯类和羰基化合物质量浓度相比酒精发酵结束时有所增加,高级醇和酸类化合物质量浓度显著降低。关键香气化合物与褐变因子相关性分析表明,香气物质的变化可能与酚类的自身氧化和美拉德反应有关。

参 考 文 献

[1] 马文明. 甘州区优质早酥梨高效丰产栽培技术研究[J]. 绿色科技,2023,25(13): 219-223.
MA Wenming. Study on high efficiency and high yield cultivation technology of high quality early crispy pear in Ganzhou District [J]. Green Technology, 2023, 25(13): 219-223. (in Chinese)

[2] 牛济军,毕淑海,王延基. 甘肃河西地区早酥梨优质高效栽培技术[J]. 甘肃农业科技,2018(4): 84-86.
NIU Jijun, BI Shuhai, WANG Yanji. High quality and efficient cultivation techniques for early crispy pear in Hexi region of Gansu Province[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2018(4): 84-86. (in Chinese)

[3] SAMARANAYAKE C P, MOK J H, HESKITT B F, et al. Nonthermal inactivation effects on oxidative enzymes in grape juice influenced by moderate electric fields: effect of constant exposure electrical treatments combined with temperature[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 340: 111288.

[4] YANG H, TIAN T T, GU H, et al. Analysis of factors related to browning of Dangshan pear (*Pyrus* spp.) wine[J]. Food Chemistry, 2019, 308: 125665.

[5] ZHANG Z W, LI J Y, FAN L P. Evaluation of the composition of Chinese bayberry wine and its effects on the color changes during storage[J]. Food Chemistry, 2018, 276: 451-457.

[6] 杨继伟. 甘蔗果酒发酵过程褐变机理及其控制研究[D]. 南宁: 广西大学,2017.

- YANG Jiwei. Study on the browning mechanism and control of sugarcane wine fermentation process[D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese)
- [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 Dan, YAN Feixiang, ZHU Libin, 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. (in Chinese)
- [8] 郭晓梦, 张一晟, 王菁, 等. 枸杞酒发酵过程中的褐变[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(11): 41–48.
- GUO Xiaomeng, ZHANG Yisheng, WANG Jing, et al. Study on the browning of medlar wine during fermentation[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(11): 41–48. (in Chinese)
- [9] 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, 2022.
- YAN Gongxin. Research on non-enzymatic browning and control of sea buckthorn wine during storage [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [10] TARKO T, DUDA-CHODAK A, SROKA P, et al. The impact of oxygen at various stages of vinification on the chemical composition and the antioxidant and sensory properties of white and red wines[J]. International Journal of Food Science, 2020 (1): 7902974.
- [11] BEGUM P, YANG L, MOROZUMI T, et al. PANI sensor for monitoring the oxidative degradation of wine using cyclic voltammetry[J]. Food Chemistry, 2023, 414: 135740.
- [12] KILMARTIN P. Impacts of phenolics and prefermentation antioxidant additions on wine aroma[M]//White wine technology. Academic Press, 2022: 301–312.
- [13] 张超, 邓星星, 马越, 等. 陈酿时间对打瓜酒风味的影响[J]. 酿酒科技, 2016(6): 38–41, 45.
- ZHANG Chao, DENG Xingxing, MA Yue, et al. Effects of aging time on the flavor of seed-watermelon wine [J]. Liquor-making Science & Technology, 2016(6): 38–41, 45. (in Chinese)
- [14] 赵婕, 袁倩, 张序, 等. 混合发酵对早酥梨-美乐低醇桃红果酒品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 119–127.
- ZHAO Jie, YUAN Qian, ZHANG Xu, et al. Effect of mixed fermentation on the quality of Zaosu pear–Merlot low-alcohol rose fruit wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(22): 119–127. (in Chinese)
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. GB 5009.225—2016《食品安全国家标准 酒中乙醇浓度的测定》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [17] 薛楚然. 影响荔枝及荔枝酒酶促褐变的因素及控制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- XUE Churan. Research on browning mechanism and brewing technology of cherry wine [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [18] 马永强, 魏婧, 王鑫, 等. 蓝莓汁抗坏血酸体系非酶褐变反应动力学[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 109–113.
- MA Yongqiang, WEI Jing, WANG Xin, et al. Kinetics of non-enzymatic browning reaction from ascorbic acid model system of blueberry juice[J]. Food Science, 2016, 37(1): 109–113. (in Chinese)
- [19] TOMIĆ D, GRIGORAKIS S, LOUPASSAKI S, et al. Implementation of kinetics and response surface methodology reveals contrasting effects of catechin and chlorogenic acid on the development of browning in wine model systems containing either ascorbic acid or sulphite[J]. European Food Research and Technology, 2017, 243(4): 565–574.
- [20] LIU W L, LI H M, JIANG D Q, et al. Effect of *Saccharomyces cerevisiae*, *Torulaspora delbrueckii* and malolactic fermentation on fermentation kinetics and sensory property of black raspberry wines[J]. Food Microbiology, 2020, 91: 103551.
- [21] BAI X, HAN M, YUE T, et al. Control of post-acidification and shelf-life prediction of apple juice fermented by lactobacillus [J]. Food Control, 2022, 139: 109076.
- [22] VAIKOUSI H, KOUTSOUMANIS K, BILIADERIS C. Kinetic modelling of non-enzymatic browning of apple juice concentrates differing in water activity under isothermal and dynamic heating conditions[J]. Food Chemistry, 2008, 107: 785–796.
- [23] GONCALVES E M, PINHEIRO J, ABREU M, et al. Carrot (*Daucus carota* L.) peroxidase inactivation, phenolic content and physical changes kinetics due to blanching[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(4): 574–581.
- [24] 杨学山, 李洁春, 杨柳, 等. 酿酒酵母抗氧化活性与发酵香气化合物研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 423–430.
- YANG Xueshan, LI Jiechun, YANG Liu, et al. Antioxidant activity and fermentation aroma compounds of *Saccharomyces cerevisiae* in simulated wine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 423–430. (in Chinese)
- [25] ELIODÓRIO K P, PENNACCHI C, ECUNHA G C G, et al. Effects of caramelization and Maillard reaction products on the physiology of *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Fungal Biology, 2023, 127(12): 1534–1543.
- [26] 杨华. 砀山梨酒氧化褐变的机制及调控[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- YANG Hua. Mechanism and regulation of oxidative browning of Dangshan pear wine[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021. (in Chinese)
- [27] CARRASCÓN V, BUENO M, FERNÁNDEZ P, et al. Oxygen and SO₂ consumption rates in white and rosé wines: relationship with and effects on wine chemical composition[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(43): 9488–9495.
- [28] YANG H, CHEN X X, LI X M, et al. Effects of 5 antibrowning agents on the color parameters of Dangshan pear (*Pyrus* spp.) wine during storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(5): 16582.
- [29] HU K, JIN G J, MEI W C, et al. Increase of medium-chain fatty acid ethyl ester content in mixed *H. uvarum*/*S. cerevisiae*

- fermentation leads to wine fruity aroma enhancement[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 495 – 501.
- [30] 袁倩, 李嘉欣, 柳秉红, 等. 不同酵母多糖添加条件下早酥梨-美乐低醇复合果酒品质研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 419 – 430.
- YUAN Qian, LI Jiabin, LIU Binghong, et al. Quality of low-alcohol Zaosu pear – Merlot wine under different yeast polysaccharide addition conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 419 – 430. (in Chinese)
- [31] 任学梅. 高产风味酶非酿酒酵母筛选、鉴定及其在葡萄酒增香酿造中的应用[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
- REN Xuemei. Screening and identification of non-*Saccharomyces* yeast with high yield flavor enzyme and its application in wine aroma enhancement brewing[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [32] HAO Z L, FENG J, CHEN Q L, et al. Comparative volatiles profiling in milk-flavored white tea and traditional white tea Shoumei via HS – SPME – GC – TOFMS and OAV analyses[J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100710.
- [33] VILANOVA M, CAMPO E, ESCUDERO A, et al. Volatile composition and sensory properties of *Vitis vinifera* red cultivars from North West Spain: correlation between sensory and instrumental analysis[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 720: 104 – 111.
- [34] HE Y, WANG X Y, LI P H, et al. Research progress of wine aroma components: a critical review[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134491.
- [35] WANG X C, LI A H, MARTA D, et al. Evaluation of aroma enhancement for “Ecolly” dry white wines by mixed inoculation of selected *Rhodotorula mucilaginosa* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Chemistry, 2017, 228: 550 – 559.
- [36] 牛佳佳, 张柯, 崔巍, 等. 不同品种梨发酵果酒品质评价及挥发性化合物分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(17): 5468 – 5476.
- NIU Jiajia, ZHANG Ke, WEI Wei, et al. Quality evaluation and volatile compounds analysis of fermented fruit wines of different pear varieties[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(17): 5468 – 5476. (in Chinese)
- [37] 尹荐, 陶永胜, 孙玮璇, 等. 优选非酿酒酵母胞外酶增香酿造干白葡萄酒效果[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 278 – 286.
- YIN Jian, TAO Yongshen, SUN Weixuan, et al. Effect of aroma enhancement for dry white wine by selected non-*Saccharomyces* extracellular enzymes[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 278 – 286. (in Chinese)
- [38] 龚霄, 殷俊伟, 刘洋洋, 等. 红心火龙果酒生产过程中的褐变机理探究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(1): 52 – 56.
- GONG Xiao, YIN Junwei, LIU Yangyang, et al. Study on the browning mechanism in pitaya wine production[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(1): 52 – 56. (in Chinese)
- [39] KATHURIA D, HAMID H, THAKUR A, et al. Maillard reaction in different food products: effect on product quality, human health and mitigation strategies[J]. Food Control, 2023, 153: 109911.
- [40] SETFORD P, JEFFERY D W, GRBIN P R, et al. Factors affecting extraction and evolution of phenolic compounds during red wine maceration and the role of process modelling[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 69: 106 – 117.
- [41] SIOUMIS N, KALLITHRAKA S, MAKRI D P, et al. Kinetics of browning onset in white wines: influence of principal redox-active polyphenols and impact on the reducing capacity[J]. Food Chemistry, 2006, 94: 98 – 104.
- [42] 张正伟. 杨梅酒颜色劣变与花色苷降解机理的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- ZHANG Zhengwei. Mechanisms of the color deterioration and anthocyanin degradation in Chinese bayberry wine[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021. (in Chinese)
- [43] WANG S Y, LI Y Q, REN J, et al. Comparison on evolution of volatile compounds and aroma attributes in different pH-adjusted fermented bog bilberry syrup wines during bottle-aging period[J]. Food Bioscience, 2018, 22: 121 – 128.
- [44] BURIKOV S, DOLENKO T, PATSAEVA S, et al. Raman and IR spectroscopy research on hydrogen bonding in water-ethanol systems[J]. Molecular physica, 2010, 108(18): 2427 – 2436.
- [45] 何琼. 无花果酒陈酿过程的品质变化及微波催陈研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
- HE Qiong. Study on the quality changes of fig wine aging process and microwave aging[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [46] ANCÍN-AZPILICUETA C, GONZÁLEZ-MARCO A, JIMÉNEZ-MORENO N, et al. Evolution of esters in aged Chardonnay wines obtained with different vinification methods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(14): 2446 – 2451.
- [47] MISLATA A M, PUXEU M, TOMÁS E, et al. Influence of the oxidation in the aromatic composition and sensory profile of Rioja red aged wines[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(6): 1167 – 1181.
- [48] ZHANG Z W, YU Q, LI J, et al. Effect of package oxygen on color, color-related compounds, and volatile composition of Chinese bayberry wine after bottling[J]. LWT—Food Science and Technology, 2020, 128(6): 109430.
- [49] COETZEE C, DU TOIT W J. Sauvignon blanc wine: contribution of ageing and oxygen on aromatic and non-aromatic compounds and sensory composition: a review[J]. South African Journal for Enology and Viticulture, 2015, 36(3): 347 – 365.
- [50] 高金鑫. 瓶贮葡萄酒酯化反应与氮杂环卡宾催化的氮-乙酰化反应的理论研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- GAO Jinxin. Theoretical study on esterification reactions in wine and N-acylation reaction catalyzed by NHC[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)