

黑化桃酒工艺优化及其与鲜桃酒品质特性的对比研究

米靖洁,宋梦茹,王宇晓,孙欣,张仁堂*

山东农业大学食品科学与工程学院, 山东 泰安 271018

摘要: 我国桃资源丰富但耐储性差,易导致大量鲜果浪费。黑化技术通过高温高湿诱导美拉德反应,在传统食品中已被证实可显著提升营养成分及风味特性。本研究将发酵工艺和黑化技术结合,系统开展了黑化桃酒发酵工艺优化,分析其理化指标、抗氧化能力、感官品质和挥发性成分,并与鲜桃酒对比。结果表明,通过单因素与正交试验确定黑化桃酒最佳发酵方案为料液比1:2、可溶性固形物含量22%,添加FR平酸酵母0.4 g/L,发酵温度26 °C,发酵时间12 d,所得酒液的酒精度13.6% vol。发酵过程中,可溶性固形物、还原糖、pH值、黄酮含量有所下降,多酚最终含量与发酵初始相当,而酒精度、总酸含量上升。黑化桃酒在可溶性固形物、还原糖、总酸、多酚及黄酮含量等方面均优于鲜桃酒;其DPPH和ABTS自由基清除能力的IC₅₀值显著低于鲜桃酒,表明其抗氧化能力显著优于鲜桃酒;同时,黑化桃酒的色泽、香气浓郁度、口感丰富度和风味典型性评分均领先;电子鼻和GC-MS分析进一步揭示黑化处理赋予其独特焦香、酸香和果香复合风味。综上,黑化技术不仅改善了桃酒的理化性质和抗氧化活性,还显著提升了其感官品质与风味特征,为鲜桃深加工提供了创新思路。未来可进一步探讨黑化桃酒的保健功能及提升黑化技术在果酒、果醋等领域的应用潜力。

关键词: 黑化技术; 黑化桃酒; 发酵工艺优化; 理化成分; 抗氧化能力

中图分类号: TS255.46

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)02-0271-12

Fermentation Process Optimization of Blackened Peach Wine and Comparison of Its Quality Characteristics with Fresh Peach Wine

MI Jing-jie, SONG Meng-ru, WANG Yu-xiao, SUN Xin, ZHANG Ren-tang*

College of Food Science and Engineering/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Abstract: China boasts abundant peach resources, but their poor storability often leads to significant waste of fresh fruit. The blackening technology, which induces Maillard reactions under high temperature and humidity, has been proven to significantly enhance the nutritional components and flavor characteristics of traditional foods. This study combines the fermentation process with the blackening technology to systematically optimize the blackened peach wine fermentation process, analyzes its physicochemical indicators, antioxidant capacity, sensory quality and volatile components, and compares them with fresh peach wine. The results show that through single-factor and orthogonal experiments, the optimal fermentation conditions for blackened peach wine are determined as follows: solid-to-liquid ratio of 1:2, soluble solids content of 22%, addition of FR flat-acid yeast at 0.4 g/L, fermentation temperature of 26 °C, and fermentation duration of 12 d. The resulting wine achieves an alcoholic strength of 13.6% vol. During fermentation, the levels of soluble solids, reducing sugars, pH, and flavonoid content decrease, while the final polyphenol content remains comparable to the initial level. Conversely, alcohol content and total acidity increase. Blackened peach wine outperforms fresh peach wine in terms of soluble solids, reducing sugars, total acids, polyphenols and flavonoids. The IC₅₀ values of its DPPH and ABTS free radical scavenging capacities are significantly lower than those of fresh peach wine, indicating that its antioxidant capacity is significantly better than that of fresh peach wine. Meanwhile, blackened peach wine scores higher in color, aroma intensity, taste richness and flavor typicality. E-nose and GC-MS analyses further reveal that the blackening treatment imparts a unique combination of burnt, sour and fruity flavors. In conclusion, the blackening technology not only improves the physicochemical properties and antioxidant activity of peach wine, but also significantly enhances its sensory quality and flavor characteristics, providing innovative insights for the deep processing of fresh peaches. Future studies can further explore the health benefits of blackened peach wine and the potential for extending the application of blackening technology to other fruit-based products, such as fruit wines and fruit vinegars.

收稿日期: 2025-05-28

修回日期: 2026-03-07

基金项目: 山东省泰山产业领军人才项目(TSCY20241184); 山东农发君祥健康产业有限公司委托“固-液分步绿色发酵肥桃深加工与综合利用研究”项目(SSH20250074)

第1作者简介: 米靖洁(2001-),女,硕士研究生,研究方向: 果蔬精深加工。E-mail:m15554416807@126.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail:rentangzhang@163.com

Keywords: Blackening technology; blackened peach wine; fermentation process optimization; physicochemical components; antioxidant capacity

我国桃(*Prunus persica* (L.) Batsch)资源丰富且栽培历史悠久。桃果富含多种生物活性成分,具有抗氧化、抗菌、抗糖尿病、抗炎、抗高血压和抗癌等多重益处^[1,2]。目前,桃的种植已经遍及 80 多个国家和地区^[3]。在我国,2023 年桃树种植面积达到 82.67 万 hm^2 ,年产量超过 1 600 万 t ^[4],2024 年鲜桃的出口贸易价值超过 6.38 亿元(<http://stats.customs.gov.cn/>)。桃子耐储性差且易腐烂,销售和加工的时效问题导致大量桃果浪费^[5]。因此,通过创新加工方式解决桃果储存问题,已成为当务之急。发酵工艺不仅促进某些功能性成分的释放,增强其效能,还能生成新的生物活性物质^[6]。桃的发酵产品主要包括桃酒、桃醋和桃酱等,其中,桃酒以其浓郁、独特的香气和顺滑的口感,成为比其他桃发酵制品更具吸引力的选择,是鲜桃理想的深加工形式^[7]。

黑化果蔬通过在恒温恒湿条件下处理一定时间制得。已有研究表明,黑化技术能显著提高部分营养成分及功能物质的含量,在黑化红枣^[8-10]、黑蒜^[11-13]、黑洋葱^[14,15]等果蔬中的效果显著。黑化过程的主要反应为美拉德反应,这是一种涉及一系列复杂反应的非酶褐变现象,不仅赋予食品褐色或黑色,还能增添独特的焦香风味,改善果蔬的加工适应性,并使其更符合现代消费者对营养与健康的需求^[16]。美拉德反应为白酒和啤酒赋予独特的风味^[17,18]。近年来,黑化枣酒和黑化桃酒的研发将美拉德反应引入果酒生产。黑化桃酒作为一种新型桃酒,以黑化桃为原料经液态发酵制成,桃香浓郁、风味独特,在感官品质和营养价值上优于传统桃酒。

目前,黑化果蔬产品的研发主要聚焦于黑化菊芋^[19]、黑化荸荠^[20]、黑枣、黑洋葱和黑蒜等,但黑化桃及黑化桃酒的研究尚显稀缺。基于此,本文以黑化桃和鲜桃酒的加工技术为基础研发黑化桃酒,主要探讨了黑化桃酒的最佳发酵工艺条件,并研究了发酵过程中理化指标的变化。同时,本文对比分析了黑化桃酒和鲜桃酒的异同。该研究旨在制备优质的新型桃酒,不仅为提升产品附加值做出贡献,也为拓展果蔬黑化技术的应用提供了理论依据,为鲜桃精深加工产品的创新开发奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蒙阴水蜜桃,选取品质优良、成熟度适宜的新鲜果,购于山东临沂;安琪 SY 酵母、安琪 BV 818 葡萄酒活性干酵母,购于安琪酵母股份有限公司;FR 平酸酵母、B2 葡萄酒酿酒酵母、L13 葡萄酒酿酒酵母,购于法国 LAMOTHE ABIET 有限公司;纯度 $\geq 98\%$ 葡萄糖标准品、纯度 $\geq 99\%$ 芦丁标准品,购于上海源叶生物科技有限公司;优级纯 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼,购于上海华蓝化学科技有限公司;色谱纯乙醇购于山东禹王实业有限公司;优级纯 2,2'-联氨基双二铵盐,购于合肥博美生物科技有限公司;分析纯没食子酸、Folin 酚试剂、氢氧化钠,购于天津市凯通化学试剂有限公司;果胶酶,购于宁夏和氏璧生物技术有限公司

1.2 仪器与设备

GC-MSTQ803 气质联用仪,日本岛津公司;气相毛细管柱,日本岛津仪器有限公司;水分测定仪,宁波鄞州华丰电子仪器厂;KQ2200DE 型数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;DVB/CAR/PDMS 萃取头,美国色谱科有限公司;PEN3 型电子鼻,北京盈盛恒泰科技有限责任公司;754N 紫外可见分光光度计,上海奥普勒仪器有限公司;PAL-1 糖度计,南京晓晓仪器设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 黑化桃酒发酵工艺流程及工艺优化 经过清洗、切分、去核等预处理后的桃块浸于 3 倍体积 40% 糖液中,以中火煮 35 min 至果块呈半透明状。沥去糖液后将果块置于 65 $^{\circ}\text{C}$ 的鼓风干燥箱中黑化,持续 8 d 至水分含量 30%,制得黑化桃。然后根据所需的料液比加入适量的纯净水,混合均匀,温度保持在 55 $^{\circ}\text{C}$ 。使用榨汁机充分破碎桃肉,随后按照 0.2 g/L 加入果胶酶,酶解 4 h 后用 6 层纱布过滤桃汁,添加适量的白砂糖调整至所需的可溶性固形物含量。再按照 40 mg/L 加入 SO_2 ,混匀后静置 24 h。26 $^{\circ}\text{C}$ 下加入适量的酿酒酵母,发酵制得黑化桃酒。

实验针对料液比(1:2、1:3、1:4、1:5、1:6)、可溶性固形物含量(20%、21%、22%、23%、

24%)、酿酒酵母种类(FR平酸酵母、B2葡萄酒酿酒酵母、L13葡萄酒酿酒酵母、安琪SY酵母、安琪BV818葡萄酒活性干酵母)以及酵母添加量(0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 g/L)四个因素进行条件选择和优化。酒精度和感官评分是衡量桃酒质量的关键指标。因此,综合评价不同发酵条件下黑化桃酒的酒精度和感官评分,确定最佳的工艺条件。在确保酒精度符合标准的前提下,以感官评分最高的工艺参数作为最终的优化选择。

1.3.2 感官评定 由10名具备品酒能力的感官评定员(男、女各5名)完成,所有评定员均具备丰富的品酒经验和良好的感官分辨能力。每名评定员参照GB/T15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》,独立对样品的色泽、香气、口感和典型性进行评价,并根据评分标准打分^[21]。每种酒样的评分满分为100分,最终得分取所有成员的算术平均值。感官评定的具体指标及评分标准如表1所示。

表1 感官评定表
Table 1 Sensory evaluation form

评价项目 Evaluation item	评价标准 Evaluation criteria	评分范围 Scoring range
色泽(20分) Color and lustre (20 points)	色泽亮丽、自然、悦目,无沉淀物及悬浮物,无杂色,有光泽	16~20
	澄清,透明,无沉淀物,颜色稍暗沉,有少许杂色	11~15
	澄清,色泽较淡,沉淀物较明显	6~10
	浑浊、失光,无应有的色泽	1~5
香气(30分) Fragrance (30 points)	香气清新和谐,浓郁优雅,纯正协调,有明显的桃香、果香	23~30
	香气较浓或较淡,口味一般,醇香不够浓郁,桃香、果香不显著	16~22
	香气寡淡、不协调,醇香不明显,无桃香、果香	7~15
口感(35分) Taste (35 points)	香气缺乏,有明显的刺激性或其他不愉快气味	1~6
	酸甜适中,入口柔顺,酒体平衡,口感醇厚浓郁,余味绵长,有新鲜感	29~35
	酒质柔和爽口,较寡淡,些许油腻感,余味短暂	19~28
典型性(15分) Typicality (15 points)	酒味不够浓郁,柔和度不足,有明显的油腻感	9~18
	酒味淡薄,有厚重的油腻感,无余味	1~8
	典型性完美,风格独特,优雅无缺	11~15
	典型性不明显,风格不够优雅	6~10
	酒性不协调,无典型性	1~5

1.3.3 黑化桃酒发酵过程中理化指标变化的测定 采用优化后的发酵工艺生产黑化桃酒,并在发酵期内每隔1 d取样1次,分别获取第0、2、4、6、8、10和12 d的黑化桃酒样品,用于测定理化指标。

酒精度、可溶性固形物含量和pH值分别使用酒精计、手持式糖度计和pH计直接测定。还原糖和总酸含量的测定则分别参考GB/T 15038-2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》中的直接滴定法和指示剂法。

多酚含量的测定采用福林-酚比色法^[22]。分别移取1 mL黑化桃酒样品和1 mL稀释一倍的Folin-酚试剂至20 mL具塞比色管中,充分摇匀后静置5 min。随后加入5 mL 10%的Na₂CO₃溶液,以去离子水定容至刻度并摇匀,于暗处反应1 h后,在760 nm波长下测定吸光度值。以没食

子酸为标准品,建立标准曲线回归方程: $y = 4.25x + 0.0282, R^2 = 0.9989$ 。

黄酮含量的测定参考马懿等^[23]的方法,并进行了适当调整。分别移取2.0 mL黑化桃酒样品、0.6 mL 5%的NaNO₂溶液和0.3 mL 10%的Al(NO₃)₃溶液至20 mL具塞比色管中,充分摇匀后静置6 min。加入8.0 mL 4%的NaOH溶液,以70%的乙醇溶液定容至刻度并摇匀,于暗处反应15 min后,在510 nm波长下测定吸光度值。以芦丁为标准品,建立标准曲线回归方程: $y = 4.825x - 0.0103, R^2 = 0.9987$ 。

1.3.4 黑化桃酒与鲜桃酒理化指标的测定 以相同的发酵工艺参数制备鲜桃酒。鲜桃果块清洗、切分和去核后加入适量水,使用榨汁机充分破碎桃肉。随后,按照0.2 g/L添加果胶酶,酶解4 h。然后用6层纱布过滤,并添加适量白砂糖以调整

可溶性固形物含量至所需水平。按照 40 mg/L 加入 SO₂, 混匀后静置 24 h。26 °C 下加入适量酿酒酵母发酵 12 d。发酵期间每隔 1 d 取样 1 次, 分别获取第 0、2、4、6、8、10 和 12 d 的酒样。鲜桃酒的酒精度、pH 值、可溶性固形物、还原糖、总酸、多酚和黄酮含量的测定方法与 1.3.3 一致。

1.3.5 黑化桃酒与鲜桃酒抗氧化能力的测定 进行 DPPH 和 ABTS 自由基清除实验。首先, 取 10 mL 酒样并称重, 计算其浓度, 重复 3 次取平均值。随后分别测定不同浓度酒样的吸光度值, 计算 DPPH 和 ABTS 自由基的清除率。以清除率为纵坐标, 样品浓度为横坐标作图, 计算清除率为 50% 时酒样的浓度 (IC₅₀ 值)。最终结果以 IC₅₀ 值表示, IC₅₀ 值越小表明样品清除自由基的能力越强。

DPPH 自由基清除率的测定参照 Wu 等^[24]的方法并进行适当调整。吸取 0.1 mL 无水乙醇 (对照) 和 0.1 mL 酒样, 分别加入 5.0 mL DPPH 乙醇溶液 (39.4 mg/L), 混匀后在常温、避光条件下静置 0.5 h。517 nm 波长下测定吸光度值, 分别记为 A₀ 和 A₁。根据公式计算 DPPH 自由基清除率:

DPPH 自由基清除率 (%) = (A₀ - A₁) / A₀ × 100% (1)
式中: A₀—对照样品的吸光度; A₁—酒样反应后的吸光度。

ABTS 自由基清除率的测定参照 Re 等^[25]的方法。首先, 将 ABTS 溶液用 80% 乙醇稀释 53 倍。然后分别吸取 0.04 mL 去离子水 (对照) 和 0.04 mL 酒样, 加入 5.0 mL 稀释后的 ABTS 溶液, 混匀后避光静置 9 min。在 734 nm 波长下测定吸光度值, 分别记为 A₀ 和 A₁。根据公式计算 ABTS 自由基清除率:

ABTS 自由基清除率 (%) = 1 - (A₁ - A₀) × 100% (2)
式中: A₀—对照样品的吸光度; A₁—酒样反应后的吸光度。

1.3.6 黑化桃酒与鲜桃酒的电子鼻测定 采用 Zhang 等^[9]的方法并进行适当调整。在 25 °C 恒温条件下, 吸取 10 mL 酒样并密封于 30 mL 样品瓶中, 静置 0.5 h 以达到气体平衡。电子鼻的参数设置如下: 载气流速为 300 mL/min, 进样流速为 300 mL/min, 采样间隔为 1 s, 冲洗时间为 180 s, 调零时间为 5 s, 预采样时间为 5 s, 检测时间为 120 s。将电子鼻探头插入样品瓶的顶部

进行检测, 待传感器响应值在 100 s 后趋于稳定, 记录 101 s 时的响应值用于分析。每个样品重复测定 5 次, 取平均值为最终结果。

1.3.7 黑化桃酒与鲜桃酒的挥发性香气成分及相对含量测定 参考时文青^[26]的方法稍作修改。吸取 7.5 mL 酒样置于 30 mL 样品瓶中, 加入 1.0 g NaCl 后密封, 置于 50 °C 水浴锅中进行顶空萃取, 萃取时间为 0.5 h, 完成香气成分富集。随后, 将萃取头取出并插入气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 进行检测。香气物质通过分析测定结果进行鉴定, 其相对含量采用峰面积归一化法计算。GC 条件为: VF-Wax ms 色谱柱 (0.25 mm × 60 m, 0.25 μm); 进样口温度 230 °C; He 作载气; 流速 1.0 mL/min; 不分流进样; 升温程序为: 40 °C, 10 min, 以 5 °C/min 升至 140 °C, 5 min, 再以 10 °C/min 升至 230 °C, 15 min。MS 条件为: 四极杆温度 150 °C; 质量扫描范围 m/z 25-500; 质谱谱库 NIST 11 s; 电离方式为电子电离; 电子电离能量 70 eV; 离子源温度 230 °C。

1.4 数据统计与分析

使用 SPSS Statistics 23 (IBM, New York, USA) 进行数据处理和分析, 所有实验均重复 3 次, 显著性水平设为 0.05; 使用 Origin 2022、Adobe Illustrator 2024 作图。

2 结果分析

2.1 黑化桃酒发酵工艺优化

果汁自然发酵生产果酒涉及果汁中原生的多种菌株 (包括细菌和酵母) 间的相互作用, 其中酿酒酵母起核心作用, 选取合适的酿酒酵母可显著提升果酒的品质^[27]。如图 1(A), 不同酵母酿造的黑化桃酒的酒精度分别为 13.4、13.4、14.5、12.5、13.4 % vol, 感官评分分别为 78.0、64.1、60.9、49.5、87.1。其中 B2 酵母生产的黑化桃酒的酒精度最高, 但 FR 酵母酿造的黑化桃酒的色泽、香气、口感、典型性的评分均高于其他四种酿酒酵母, 获得最高评分, 且酒精度处于适宜范围, 因此确定 FR 酵母为最佳发酵菌种。

如图 1(B), 不同 FR 酵母添加量的黑化桃酒的酒精度分别为 11.6、13.4、12.7、12.5、12.5 % vol, 评分分别为 50.5、79.4、85.3、81.3、80.0。随着酵母添加量的增加, 酒精度和感官评分均呈现

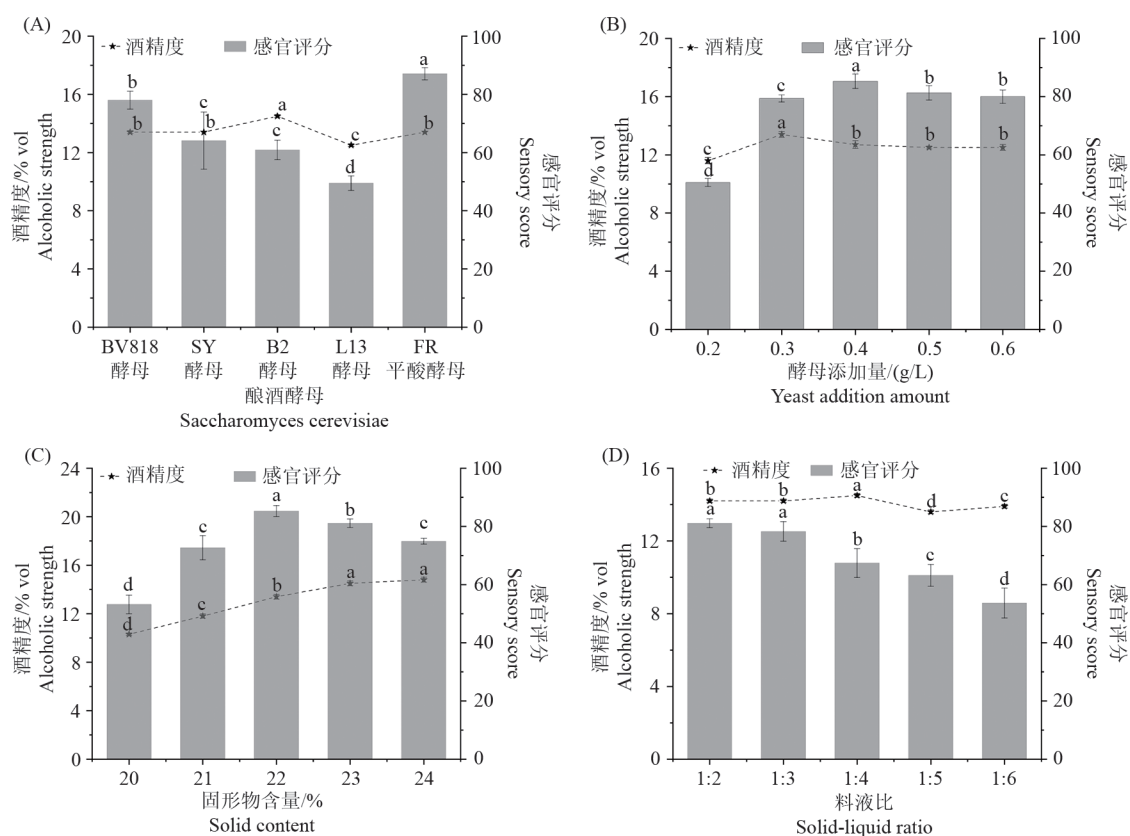


图1 不同酿酒酵母(A)、酵母添加量(B)、可溶性固形物含量(C)、料液比(D)的黑化桃酒的酒精度和感官评分

Fig. 1 Alcohol content and sensory scores of blackened peach wines with different brewer's yeasts (A), yeast additions (B), soluble solids content (C), and feed-to-liquid ratios (D)

注:不同字母代表显著性差异 $P < 0.05$ 。

Note: Different letters represent significant differences $P < 0.05$.

先升高后降低的趋势。这是由于当酵母添加量过少时,发酵过程缓慢,酒精产生较少,且易滋生杂菌消耗发酵液中的糖分,导致酒精产量降低;而酵母添加量过多时,发酵液中的糖分迅速被酵母大量用于自身的生长繁殖,产生过多代谢物并抑制无氧呼吸过程中酒精的产生^[28]。此外,糖分和营养物质的快速消耗以及大量代谢产物的积累会导致酵母老化死亡,产品口感变差,产生酵母味^[29]。虽然0.3 g/L FR酵母添加量的黑化桃酒的酒精度最高,但0.4 g/L FR酵母添加量的黑化桃酒感官评分最高,且酒精度处于适宜范围。因此确定0.4 g/L为最佳添加量。

如图1(C),不同可溶性固形物含量的黑化桃酒的酒精度分别为10.3、11.8、13.4、14.5、14.8% vol,评分分别为53.2、72.7、85.3、81.1、74.9。随着可溶性固形物含量的增加,酒精度持续升高,但感官评分呈现先升高后降低的趋势。这是因为糖分是可溶性固形物的主要成分,酵母通过发酵糖

分产生酒精和酯类等物质,这些物质为果酒增添了香气并提升了酒精度。然而,过高的可溶性固形物含量(通过添加白砂糖实现)会损害果酒的口感和风味。虽然24%可溶性固形物含量的黑化桃酒酒精度最高,但22%可溶性固形物含量的黑化桃酒获得最高的感官评分,且酒精度处于适宜范围。因此确定22%为最佳可溶性固形物含量。

如图1(D),不同料液比生产的黑化桃酒的酒精度分别为14.2、14.2、14.5、13.6、13.9% vol,评分分别为81.1、78.3、67.4、63.2、53.7。料液比过小时,会稀释酵母浓度,不仅对发酵过程产生消极影响,还会导致口感寡淡,且需添加更多白砂糖以满足发酵条件;而料液比过大时,黑化桃汁浓度过高,营养物质聚集导致酵母生长繁殖过快,代谢产物过多,不利于桃酒的口感^[30]。虽然1:4料液比生产的黑化桃酒酒精度最高,但1:2料液比的黑化桃酒感官评分最高,且酒精度处于适宜范围。因此确定1:2为最佳料液比。

2.2 黑化桃酒发酵过程中理化指标分析

黑化桃酒发酵过程中各理化指标的变化如图2所示。0-4 d酒精度显著升高($P<0.05$),4 d达12.8% vol,随后酒精度升高速率逐渐减缓,12 d酒精度为13.6% vol;0-6 d可溶性固形物含量迅速降低,从最初22%降至8.5%;0-6 d还原糖含量

由140.5 g/L骤降至13.2 g/L,随后极缓慢降低,趋于平稳;总酸含量在0-4 d显著上升($P<0.05$),随后趋向平稳,最终为5.23 g/L;pH由3.72保持缓慢下降,终pH为3.31;多酚、黄酮含量先升高后降低,2 d时最高,随后多酚含量降至与发酵初始相当,黄酮含量在2-8 d骤降之后基本保持稳定。

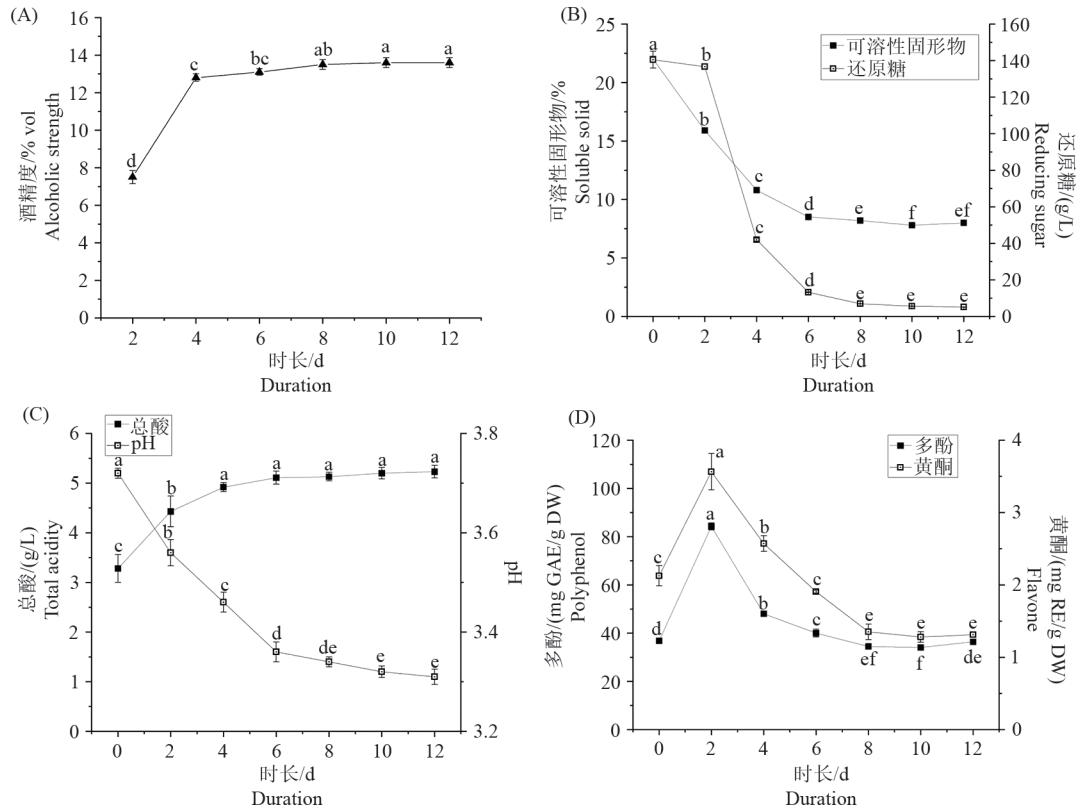


图2 黑化桃酒发酵过程中酒精度(A)、可溶性固形物和还原糖含量(B)、总酸含量和pH(C)、多酚和黄酮含量(D)的变化

Fig. 2 Changes in alcohol content (A), soluble solids and reducing sugars content (B), total acid content and pH (C), and polyphenol and flavonoid content (D) during fermentation of blackened peach wine

注:不同字母代表显著性差异 $P<0.05$ 。

Note: Different letters represent significant differences $P<0.05$.

各指标变化的原因分析如下:酵母菌发酵消耗糖类(包括可溶性糖、还原糖)而产生酒精。发酵初期,酵母菌活力旺盛,且发酵液中糖类物质丰富,因而发酵和美拉德反应迅速,可溶性固形物和还原糖迅速转化成酒精、有机酸和其他风味物质,导致可溶性固形物和还原糖含量迅速下降,而酒精度显著上升;糖类在发酵过程中通过戊糖磷酸途径分解产生有机酸,导致总酸含量升高、pH值下降;多酚、黄酮类物质逐渐被浸提出来,同时发酵产生大量酒精和二氧化碳进一步促进了这些物质的浸提,使其含量在发酵初期显著上升^[29, 31, 32]。发酵后期,随着发酵

产酸且糖类及其他营养物质的逐渐匮乏,酵母菌活性减弱,对糖类的消耗减少,发酵过程趋于平稳。因此,可溶性固形物和还原糖含量下降速率减缓,酒精生成速率降低;有机酸合成减少,总酸含量趋于稳定,pH值保持基本不变;多酚和黄酮类物质在发酵后期发生氧化反应或与单宁类物质发生聚合反应,导致其含量逐渐降低^[31-34]。

2.3 黑化桃酒与鲜桃酒理化指标的对比分析

2.3.1 黑化桃酒与鲜桃酒理化指标及抗氧化能力的对比分析

酒精度、可溶性固形物含量和还原

糖含量与酒的发酵状况密切相关;酸碱状态不仅影响酵母活性,还可作为判断发酵过程中是否被杂菌污染的依据;多酚和黄酮类物质具有抗氧化活性,能够影响酒的颜色、香气、苦味和澄清度等,对监控果酒的品质及明确其功能性具有重要意义^[35]。如表2,黑化桃酒的还原糖、总酸、多酚及黄酮含量均显著高于鲜桃酒($P<0.05$),而其

pH值显著低于鲜桃酒;黑化桃酒的酒精度略低于鲜桃酒,可溶性固形物含量略高于鲜桃酒。如图3,黑化桃酒的DPPH和ABTS自由基清除能力的 IC_{50} 值分别为0.342 mg/mL和0.514 mg/mL,显著低于鲜桃酒的0.425 mg/mL和0.628 mg/mL。 IC_{50} 值越小表明抗氧化能力越强。因此,黑化桃酒的抗氧化能力显著优于鲜桃酒。

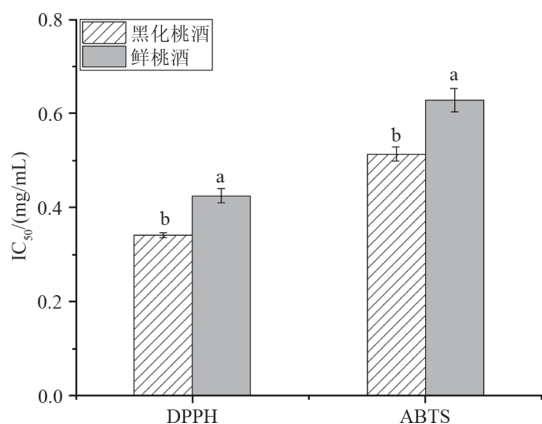
表2 黑化桃酒和鲜桃酒的理化指标

Table 2 Physicochemical indicators of blackened peach wine and fresh peach wine

样品 Samples	酒精度/ (% vol) Alcoholic strength	可溶性固形物/% Soluble solid	还原糖/(g/L) Reducing sugar	总酸/(g/L) Total acidity	pH	多酚/(mg GAE/ g DW) Polyphenol	黄酮/(mg RE/ g DW) Flavone
黑化桃酒	13.6±0.26a	8.0±0.17a	5.1±0.03a	5.23±0.13a	3.31±0.01a	36.404±0.57a	1.311±0.03a
鲜桃酒	13.8±0.26a	7.7±0.20a	4.4±0.02b	4.14±0.09b	3.66±0.03b	30.139±0.88b	0.246±0.01b

注:数据以平均值±标准误差值表示($n=3$),右上角标注相同字母者组间差异不显著($P>0.05$),标注不同字母者组间差异显著($P<0.05$)。

Note: Data are expressed as mean ± standard error values ($n=3$), with insignificant differences between groups for those labeled with the same letter in the upper right corner ($P>0.05$) and significant differences between groups for those labeled with different letters ($P<0.05$).

图3 黑化桃酒与鲜桃酒的DPPH、ABTS的 IC_{50} Fig. 3 IC_{50} of DPPH and ABTS of blackened peach wine and fresh peach wine

2.3.2 黑化桃酒与鲜桃酒的感官评定结果

黑化桃酒的感官评价总分为94.2分,显著高于鲜桃酒的86.3分。如图5所示,黑化桃酒的颜色、香气、口感和典型性四方面感官评分均优于鲜桃酒,具体评分分别为19.3、28.2、32.3和14.4,而鲜桃酒的对应评分分别为16.9、26.0、30.3和13.1。

具体分析如下:鲜桃酒呈淡黄色,而黑化桃酒因发生非酶褐变等反应呈现淡褐色,色泽更深,但黑化桃酒的沉淀物和悬浮物更少,且整体更具光泽,表明黑化过程可能改善酒液的澄清度和外观。黑化桃酒的香气比鲜桃酒更丰富浓郁,且柔和协调。这可能与黑化过程中挥发性成分

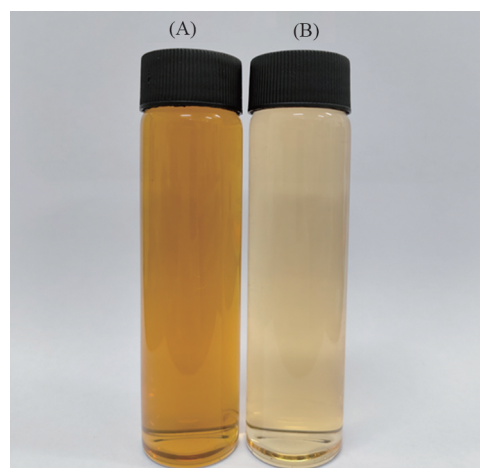


图4 黑化桃酒(A)和鲜桃酒(B)的实物图

Fig. 4 Physical images of blackened peach wine (A) and fresh peach wine (B)

的变化有关,Sun等^[8]在红枣黑化研究中指出,黑化处理12小时挥发性成分变化最显著,推测黑化桃酒的香气特征也经历了类似的变化。鲜桃酒口感偏甜,而黑化桃酒因黑化过程中总酸含量升高,呈现出酸甜适中、醇厚浓郁的口感,余味更加丰富。黑化桃酒在典型性评分上高于鲜桃酒,表明其风味特征更为突出,体现了黑化工艺带来的独特品质。综上,黑化桃酒的整体感官品质优于鲜桃酒。推测这主要源于桃子黑化与红枣黑化过程类似地发生了非酶褐变、化学氧化反应和大分子降解^[8]。两种桃酒的具体成分的差异仍需进一步研究。

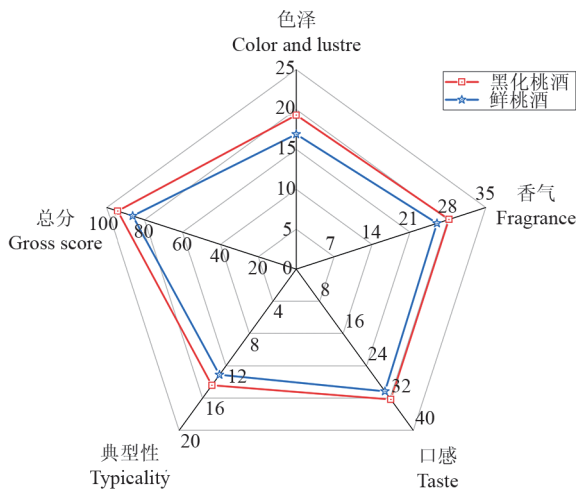


图5 黑化桃酒与鲜桃酒的感官评分雷达图

Fig. 5 Radar chart of sensory scores for blackened peach wine and fresh peach wine

2.3.3 黑化桃酒与鲜桃酒的电子鼻测定结果 图6展示了电子鼻各传感器对两种桃酒的响应值的整体与个体差异。PEN3型电子鼻的十个传感器(W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S)分别对不同的挥发性成分具有灵敏性。结果显示,W5S(对氮氧化物灵敏)、W1S(对甲烷灵敏)、W1W(对无机硫化物灵敏)、W2S(对醇类和醛酮类灵敏)和W2W(对芳香成分和有机硫化物灵敏)是PEN3电子鼻对两种桃酒的主要响应传感器,黑化桃酒在W5S、W1S、W1W和W2W传感器上的响应值显著高于鲜桃酒。相应地,推测黑化过程可能产生了更多的氮氧化物、甲烷、芳香成分和硫化物;两种桃酒的风味轮廓虽有相似性,但挥发性成分的含量和种类存在明显差异。

2.3.4 黑化桃酒与鲜桃酒的挥发性成分及其相对含量测定结果 酯类和醛类物质可赋予酒“果味”和“花香”,对酒的香气与风味贡献较显著;酚类、酸类及醇类物质均为酒的特征性香气化合物^[7, 26, 36]。如表3,两种酒均测得31种香气成分。黑化桃酒的香气成分包括6种醇类物质(33.08%)、15种酯类物质(62.44%)、6种酸类物质(3.26%)、3种醛类物质(1.14%)和1种酚类物质(0.07%);鲜桃酒的香气成分包括6种醇类物质(37.07%)、15种酯类物质(61.07%)、6种酸类物质(1.44%)、2种醛类物质(0.35%)和2种烷类物质(0.07%)。总体来看,黑化工艺使产品的挥发性物质的种类及含量较鲜桃酒更为丰富,产品

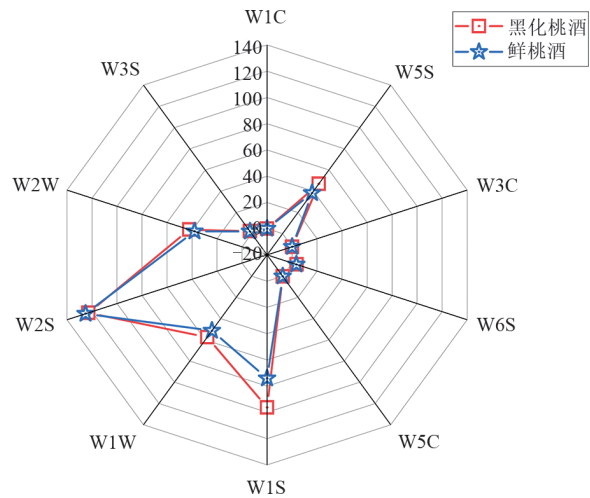


图6 黑化桃酒与鲜桃酒的电子鼻传感器响应值雷达图
Fig. 6 Radar plot of electronic nose sensor response values for blackened peach wine and fresh peach wine

风味更具典型性。

醇类物质是酿酒酵母发酵的主要挥发性产物^[7]。黑化桃酒的醇类物质总含量低于鲜桃酒,但正丁醇、苯乙醇含量高于鲜桃酒,还含有正辛醇和正癸醇,而鲜桃酒中未检出。正辛醇有甜而微带草香味的橘橙皮和玫瑰样气息,正癸醇的气味以柑橘香混合玫瑰脂蜡香甜味为主,稍带铃兰花、甜橙花香^[26, 37]。

酯类物质是酒精发酵最重要的副产物之一。黑化桃酒的酯类物质总含量高于鲜桃酒,且含有鲜桃酒中未检出的特征香气成分,如乳酸乙酯、壬酸乙酯、丁二酸二乙酯、月桂酸甲酯。此外,乙酸戊酯、辛酸甲酯、辛酸乙酯、癸酸甲酯、癸酸乙酯、辛酸异戊酯、乙酸苯乙酯、棕榈酸乙酯含量均高于鲜桃酒。两种桃酒的酯类物质含量的主要差别在于乙酸戊酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯的相对含量,黑化桃酒中含量更高。乙酸戊酯呈焦糖味带有菠萝香;辛酸乙酯果香浓郁且混合白兰地香味;癸酸乙酯可赋予黑化桃酒强烈的香甜果味^[7]。

桃酒中的酸类物质部分来源于桃子本身,部分为发酵副产物,是酒的主要呈香成分,能够柔化与协调酒体。更重要的是,酸类物质可作为酯类物质的原料,而酯类物质是酒中最关键的呈香物质^[26, 38]。黑化桃酒的酸类物质总含量高于鲜桃酒,主要体现在乙酸和辛酸含量更高;乙酸呈爽口带酸且微甜的醋酸气味,辛酸富有果香。此外,黑化桃酒还含有未在鲜桃酒中检出的十

表 3 黑化桃酒与鲜桃酒的挥发性成分及其相对含量
Table 3 Volatile components and their relative contents in blackened peach wine and fresh peach wines

分类 Category	序号 Serial number	挥发性成分名称 Names of volatile components	黑化桃酒 Blackened peach wine	鲜桃酒 Fresh peach wine
醇	1	异丁醇	4.23%	7.08%
	2	正丁醇	0.50%	0.16%
	3	异戊醇	26.00%	27.98%
	4	正己醇	-	0.65%
	5	苯甲醇	-	0.13%
	6	苯乙醇	2.16%	1.07%
	7	正辛醇	0.11%	-
	8	正癸醇	0.08%	-
酯	9	乙酸乙酯	-	4.04%
	10	乙酸戊酯	3.51%	1.86%
	11	己酸乙酯	3.62%	3.91%
	12	乙酸己酯	-	0.08%
	13	辛酸甲酯	0.22%	0.08%
	14	辛酸乙酯	30.94%	28.23%
	15	辛酸异丁酯	-	0.20%
	16	癸酸甲酯	0.16%	0.12%
	17	癸酸乙酯	20.68%	19.64%
	18	辛酸异戊酯	0.28%	0.22%
	19	苯甲酸乙酯	0.42%	0.79%
	20	乙酸苯乙酯	0.51%	0.34%
	21	月桂酸乙酯	1.30%	1.44%
	22	十三酸乙酯	-	0.06%
	23	棕榈酸乙酯	0.09%	0.06%
	24	乳酸乙酯	0.20%	-
	25	壬酸乙酯	0.04%	-
	26	丁二酸二乙酯	0.43%	-
27	月桂酸甲酯	0.04%	-	
酸	28	乙酸	1.06%	0.18%
	29	异丁酸	0.19%	0.08%
	30	己酸	0.27%	0.21%
	31	辛酸	1.14%	0.56%
	32	癸酸	0.53%	0.34%
	33	月桂酸	-	0.07%
	34	十三酸	0.07%	-
醛	35	糠醛	0.35%	0.08%
	36	苯甲醛	0.72%	0.27%
	37	5-甲基呋喃醛	0.07%	-
烷	38	茶螺烷	-	0.04%
	39	2-甲基十九烷	-	0.03%
酚	40	2,4-二叔丁基苯酚	0.07%	-

注:-表示未检测出。

Note: -indicates not detected.

三酸。

醛类物质对桃酒的气味有显著影响,提供独特、丰富的香气^[38]。黑化桃酒中糠醛、苯甲醛的含量高于鲜桃酒。糠醛是白兰地的主体香气,类似于烘焙食品的香气;孙欣等^[39]曾证明红枣黑化后糠醛及其衍生物增加明显,因而推测黑化桃的制备过程中发生了与红枣黑化类似的物质转化,黑化后糠醛含量升高^[7, 37]。

3 讨论

黑化桃酒发酵过程中的酒精度、pH、可溶性固形物、还原糖和总酸含量变化与柳新宇^[31]测得的黑蒜酒发酵过程中各指标的整体变化趋势一致;多酚和黄酮含量的变化趋势与韦唯等^[40]得到的黄果梨果酒结论类似,均呈现先上升后下降的模式。黑化桃酒中还原糖、总酸和多酚含量高于鲜桃酒与 Sun 等^[8]对黑化红枣的研究结论相似:黑化过程显著提高还原糖、总酸和多酚的含量。发酵 12 d 后,酒精度为 13.6% vol,而剩余可溶性固形物 8% 左右,推测由于发酵过程中类黑精、酸和氨基酸等进一步溶出,影响了折光率,从而导致剩余可溶性固形物的检测值偏高^[41]。

同时,黑化桃酒与鲜桃酒抗氧化能力的对比分析结果与宋亚茹^[42]根据现有黑化红枣研究的总结一致:红枣黑化后总酚和总黄酮等抗氧化活性成分含量增加,抗氧化能力显著增强。同样地,黑菊芋中的多酚含量是鲜菊芋的 4.71 倍^[43];黑蒜的多酚含量比鲜蒜增加了近 3 倍^[44];荸荠加工成黑荸荠后黄酮、多酚的含量显著增加^[20]。此外,齐习超^[45]的研究也表明,黑枣酒的 DPPH 和 ABTS 清除能力显著高于红枣酒 ($P < 0.05$)。这些结果表明,黑化技术能够显著改善桃酒的理化性质和抗氧化活性。然而,具体的活性成分变化及其机制仍需进一步研究。

黑化桃酒与鲜桃酒的电子鼻传感器响应值结果与 Zhang 等^[9]的研究相似,他们在红枣黑化过程中发现 W1W 和 W2W 传感器的响应值随黑化时间显著升高,表明黑化处理促进枣中芳香成分和硫化物的生成。同理,桃子黑化后芳香成分和硫化物的含量增加。结合电子鼻、GC-MS 分析结果和人工嗅闻,推测黑化桃酒的典型特征香气物质包括乙醇(酒香)、异戊醇(酒香)、辛酸(酸香)、糠醛(焦香、麦芽甜香)、辛酸乙酯(甜橙香)、

癸酸乙酯(花果香),与鲜桃酒的特征香气物质的区别主要在于黑化桃酒的酸类物质和糠醛含量更高。此外,相比于鲜桃酒,黑化桃酒制备过程中产生更多苯乙醇,它具有清甜的玫瑰样花香,与酯类协同提升香气层次。苯甲醛为桃果实的重要呈味物质之一,在黑化桃酒中的相对含量更高,具有较显著的杏仁味和焦糖气味,增加典型性和风味辨识度^[46]。乳酸乙酯是黑化桃酒相对于鲜桃酒特有的香气成分,可以为黑化桃酒提供乳脂奶油香气,平衡黑化过程中产生的部分较刺激的风味,赋予酒体绵甜感。黑化桃酒中的丁二酸二乙酯丰富酒的果香,同时可以中和某些尖锐的风味,在鲜桃酒中未检出^[47]。5-甲基呋喃醛作为美拉德反应的产物和糠醛衍生物,为黑化桃酒增添了鲜桃酒没有的焦糖香味。综上所述,黑化桃酒表现出更丰富、和谐的香气和独特的风味特征,这进一步证实了黑化过程对风味的显著影响。结合先前的研究,黑化过程通过非酶褐变、化学氧化反应和大分子降解等机制,促使果蔬产生更多的挥发性化合物,黑化桃酒的风味特征变化可能是由于化学反应的协同作用^[8]。

4 结论

以料液比 1:2、可溶性固形物含量 22% 的黑化桃汁为发酵基质,添加 0.4 g/L 的 FR 平酸酵母进行发酵,可获得果香浓郁、典型性佳的黑化桃酒。发酵过程中可溶性固形物、还原糖、pH 值、黄酮含量有所下降,多酚最终含量与发酵初始相当,而酒精度、总酸含量上升。最终,黑化桃酒的酒精度为 13.6% vol,略低于鲜桃酒的 13.8% vol。在品质特性方面,黑化桃酒的 pH 值低于鲜桃酒,而可溶性固形物、还原糖、总酸、多酚和黄酮含量以及感官评分均高于鲜桃酒;其 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力的 IC_{50} 值显著低于鲜桃酒,表明黑化桃酒的抗氧化能力更强。测得黑化桃酒中挥发性物质的种类和含量有别于鲜桃酒,其特征香气物质中酸类物质和糠醛的相对含量高于鲜桃酒,且在 W5S、W1S、W1W、W2W 传感器的响应值均高于鲜桃酒;黑化桃酒表现出更丰富、和谐的香气和独特的风味特征。综上,黑化技术改善了桃酒的感官品质、风味特征和抗氧化活性等。未来的研究方向可包括:通过动物实验和临床试验评价黑化桃酒的功能性和安全性,进一步优化

其功效以满足市场需求;以黑化桃为原料研发黑化桃醋等新型产品,拓展黑化技术的应用范围。

参考文献

- [1] Bento C, Gonçalves A C, Silva B, et al. Peach (*Prunus Persica*): phytochemicals and health benefits [J]. Food Reviews International, 2022, 38(8): 1703-1734.
- [2] Bento C, Gonçalves A C, Silva B, et al. Assessing the phenolic profile, antioxidant, antidiabetic and protective effects against oxidative damage in human erythrocytes of peaches from Fundao[J]. Journal of Functional Foods,2018,43:224-233.
- [3] Li Y, Wang L R. Genetic resources, breeding programs in China, and gene mining of peach: a review[J]. Horticultural Plant Journal, 2020, 6(4): 205-215.
- [4] 中研网.桃子行业市场发展现状及整体规模、投资前景分析 2025[EB/OL]. (2024-12-25). [2025-2-13]. <https://m.chinairm.com/hyzz/20241225/151724599.shtml>.
- [5] Gao H, Zhang Z K, Chai H K, et al. Melatonin treatment delays postharvest senescence and regulates reactive oxygen species metabolism in peach fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 118: 103-110.
- [6] Budak N H, Özdemir N, Gökirmaklı Ç. The changes of physicochemical properties, antioxidants, organic, and key volatile compounds associated with the flavor of peach (*Prunus cerasus* L. Batsch) vinegar during the fermentation process[J]. Journal of Food Biochemistry,2022,46(6):e13978.
- [7] Liu Q Y, Weng P F, Wu Z F. Quality and aroma characteristics of honey peach wines as influenced by different maturity[J].International Journal of Food Properties,2020,23(1):445-458.
- [8] Sun X, Gu D Y, Fu Q B, et al. Content variations in compositions and volatile component in jujube fruits during the blacking process[J]. Food Science & Nutrition,2019,7(4):1387-1395.
- [9] Zhang X, Wang Y X, Wu F, et al. Organic acid and aromatic compounds create distinctive flavor in the blackening process of jujube[J]. Food Chemistry, 2024,439:138199.
- [10] Gao L, Gu D, Sun X, et al. Investigation of processing technology for aged black jujube[J].Food Science and Nutrition Studies,2019,3(4):107.
- [11] Binici H I, Savas A, Erim B. Processing-induced modifications in bioactive compounds of black garlic: a comparative analysis with white garlic[J]. Italian Journal of Food Science,2025,37(1):432-440.
- [12] Medina M A T, Merinas-amo T, Fernández-bedmar Z, et al. Physicochemical characterization and biological activities of black and white garlic: in vivo and in vitro assays[J].Foods,2019,8(6):220.
- [13] Sasmaz H K, Sevindik O, Adal E, et al. Comparative assessment of quality parameters and bioactive compounds of white and black garlic[J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(9): 2393-2407.
- [14] Moreno-ortega A, Ordóñez J L, Moreno-rojas R, et al. Changes in the organosulfur and polyphenol compound profiles of black and fresh onion during simulated gastrointestinal digestion[J].Foods,2021,10(2):337.
- [15] Ülger T G, Çakiroglu F P. A comparative study on the antioxidative activity and phenolic content of fresh and black (fermented) allium vegetables[J]. Fermentation-Basel,2024,10(9):486.
- [16] 张琳,高琳,张仁堂.基于 Maillard 反应的发酵黑化技术在果蔬加工中的研究进展[J].中国调味品, 2021,46(01):170-176.
- [17] 陈心雨,刘念,王超凯,等.高温大曲中美拉德反应的研究进展[J].食品与发酵科技,2023,59(06): 109-112.
- [18] 庄名扬.再论美拉德反应产物与中国白酒的香和味[J].酿酒科技,2005,131(05):34-38.
- [19] 姬妍茹,杨庆丽,张正海,等.黑菊芋低聚糖对高脂血症小鼠的降血脂作用[J].食品工业科技,2023,44(04):403-409.
- [20] 魏连会,刘宇峰,姬妍茹,等.荸荠与黑荸荠营养成分的比较分析[J].食品科学技术学报,2018,36(05): 68-73.
- [21] 全国食品工业标准化技术委员会酿酒分技术委员会.葡萄酒、果酒通用分析方法:GB/T 15038-2006 [S].北京:中国标准出版社,2006.
- [22] Wabaidur S M, Obbed M S, Alothman Z A, et al. Total phenolic acids and flavonoid contents determination in Yemeni honey of various floral sources: Folin-Ciocalteu and spectrophotometric approach[J].Food Science and Technology, 2020, 40: 647-652.
- [23] 马懿,喻康杰,肖雄峻,等.二氢杨梅素对梨酒抗氧化活性及风味物质的影响[J].食品工业科技,2023, 44(10):107-115.
- [24] Wu C Y, Li T L, Qi J, et al. Effects of lactic acid

- fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity and flavor volatiles of apple juice[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2020,122:109064.
- [25] Re R, Pellegrini N, Re, R. et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay.[J]. *Free Radic Biol Med*,1999,26(9-10):1231-1237.
- [26] 时文青. 黑化红枣酒澄清及陈化技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学,2023.
- [27] Šuranská H, Vránová D, Omelková J. Isolation, identification and characterization of regional indigenous *Saccharomyces cerevisiae* strains[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*,2016,47(1):181-190.
- [28] Wu Y Z, Li Z G, Zou S B, et al. Chemical composition and flavor characteristics of cider fermented with *saccharomyces cerevisiae* and non-*Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Foods*,2023,12(19):3565.
- [29] 薛俊吉. 水蜜桃酒酿造工艺研究及品质分析[D]. 常州:常州大学,2023.
- [30] 温华婷,高娉娉,史肖,等. 欧李果露酒加工工艺优化[J]. *食品与发酵工业*,2021,47(16):196-202.
- [31] 柳新宇. 黑蒜发酵酒工艺研究[D]. 泰安:山东农业大学,2021.
- [32] 曹冉. 荞麦酿造酒及后处理过程中黄酮类物质变化规律的研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2019.
- [33] 徐晓裕. 蟠桃酒自然发酵过程中微生物多样性及其对品质的影响研究[D]. 石河子:石河子大学,2023.
- [34] 黄佳. 猕猴桃酒发酵及陈酿过程中多酚及多糖的变化规律[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [35] 黄婷,刘茗铭,王媚,等. 植物露酒中黄酮类化合物功效及检测技术研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021,47(21):303-311.
- [36] Wei Z, Liu X H, Huang Y, et al. Volatile aroma compounds in wines from Chinese wild/hybrid species[J]. *Journal of Food Biochemistry*,2019,43(10): e12684.
- [37] 谷翔欣,乔岩,王海绮,等. 不同酒精度波特酒品质及挥发性风味成分分析[J]. *中国酿造*,2023,42(08): 247-252.
- [38] Zhao L L, Ruan S L, Yang X K, et al. Characterization of volatile aroma compounds in litchi (Heiye) wine and distilled spirit[J]. *Food Science & Nutrition*,2021,9(11):5914-5927.
- [39] 孙欣,张承明,时川,等. 红枣黑变前后感官特性及功能和香气成分的比较[J]. *中国食物与营养*,2019, 25(01):72-75.
- [40] 韦唯,叶英,兰丽虹,等. 黄果梨果酒制备工艺优化[J]. *食品研究与开发*,2023,44(21):106-113.
- [41] Hu J X, Bi J F, Wang W Y, et al. Comparison of characterization and composition of melanoidins from three different dried apple slices[J]. *Food Chemistry*,2024,455:139890.
- [42] 宋亚茹,张仁堂. 红枣及其黑化制品抗氧化功能研究进展[J]. *保鲜与加工*,2021,21(12):140-143.
- [43] 姬妍茹,杨庆丽,魏连会,等. 黑菊芋加工前后营养成分分析[J]. *农产品加工*,2021(10):58-62.
- [44] 孙月娥,吕丹娜,王卫东,等. 美拉德反应对大蒜抗氧化活性的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(09): 119-123.
- [45] 齐习超. 黑化红枣酒加工品质研究[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
- [46] 董书甲,刘露,于正阳,等. 水蜜桃发酵酒及其蒸馏酒香气成分差异比较[J]. *中国酿造*, 2025,44(01): 169-176.
- [47] 赵永梅,郑万财,谢惠春,等. 不同酵母对香茶藨子果酒品质及挥发性成分的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024,50(12):142-150.