

牛德宝, 张梓杰, 彭寅啸, 等. 天然增香物质对甘蔗果酒香气的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 11-20. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050291

NIU Debao, ZHANG Zijie, PENG Yinxiao, et al. Effect of Natural Aroma Substances on Aroma of Sugarcane Fruit Wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 11-20. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050291

· 特邀主编专栏—地方特色食品:加工技术、感官品质、风味特性和营养健康 (客座主编:易俊洁、和劲松、郭超凡) ·

天然增香物质对甘蔗果酒香气的影响

牛德宝^{1,2,3}, 张梓杰^{1,3}, 彭寅啸¹, 王双飞¹, 李 凯¹, 杭方学¹, 陈智能², 俸 斌^{2,*}

(1. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004;

2. 广西广业贵糖糖业集团有限公司, 广西贵港 537102;

3. 广西大学甘蔗与制糖产业学院, 广西南宁 530004)

摘要:为解决目前商品甘蔗果酒普遍存在的果香味淡、酒体单薄等问题, 本研究旨在探讨百香果和六堡茶作为增香物质对甘蔗果酒香气成分的影响。通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术 (headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 和气相色谱-离子迁移谱联用技术 (gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS), 对三组样品进行香气成分的定性和定量分析, 共检测出 98 种挥发性化合物, 其中甘蔗果酒 71 种, 六堡茶组 83 种, 百香果组 80 种。香气活度值结果显示 (odor activity value, OAV) 大于 1 的有 14 种, 相对气味活性值 (relative odor activity value, ROAV) 大于 1 的有 15 种。结合正交偏最小二乘法判别分析 (orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA) 筛选出 25 种关键性风味物质 (variable importance in projections, VIP>1)。其中 γ -松油烯和 3-羟基-2-丁酮等为六堡茶组增加了青草和柑橘的气味; 大马士酮、 β -紫罗兰酮等则增强了百香果组中果味和花香。百香果和六堡茶均能有效丰富甘蔗果酒的香气组成, 增香效果各有侧重。综合香气品质分析表明, 百香果的增香效果更优, 更适合作为提升甘蔗果酒的增香物质。


关键词: 甘蔗果酒, 百香果, 六堡茶, 挥发性风味化合物, 香气, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0011-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050291

本文网刊: 

Effect of Natural Aroma Substances on Aroma of Sugarcane Fruit Wine

NIU Debao^{1,2,3}, ZHANG Zijie^{1,3}, PENG Yinxiao¹, WANG Shuangfei¹, LI Kai¹, HANG Fangxue¹, CHEN Zhineng², FENG Bin^{2,*}

(1. College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Guangye Guitang Sugar Group Co., Ltd., Guigang 537102, China;

3. Academy of Sugarcane and Sugar Industry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to solve the common problems of commercial sugarcane wine, such as light fruit aroma and thin wine body, this study aimed to investigate the effects of passion fruit and Liu Pao tea as flavor enhancers on the aromatic components of sugarcane fruit wine. The aromatic components of three sample groups were qualitatively and quantitatively analyzed using headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). The results showed that a total of 98 volatile compounds were

收稿日期: 2025-05-29

基金项目: 广西科技基地和人才专项 (桂科 AD23026214); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32102133); 广西自然科学基金面上项目 (2022GXNSFAA035559); 国家现代农业产业技术体系广西大豆油料产业创新团队油料岗位功能专家项目 (nycytxgxcxt-2023-22-03); 广西大学甘蔗与制糖产业学院专项科研项目 (ASSI-2023002, 2024007, 2022018)。

作者简介: 牛德宝 (1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品非热加工与生物酿造, E-mail: happyndb@gxu.edu.cn。

* 通信作者: 俸斌 (1970-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 甘蔗制糖及相关产业链延伸项目、环保项目, E-mail: fengbin999@126.com。

detected, with 71 in the sugarcane fruit wine group, 83 in the Liu Pao tea group, and 80 in the passion fruit group. Odor activity value (OAV) analysis revealed that 14 compounds exhibited an OAV greater than 1, while 15 compounds showed a relative odor activity value (ROAV) greater than 1. Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) identified 25 key flavor compounds (VIP>1). Among these, γ -terpinene and 3-hydroxy-2-butanone contributed grassy and citrus aromas to the Liu Pao tea group, whereas damascenone and β -ionone enhanced fruity and floral aromas in the passion fruit group. Both passion fruit and Liu Pao tea were found to effectively enrich the aromatic composition of sugarcane fruit wine, with each enhancing the aroma profile in distinct ways. Comprehensive aromatic quality analysis indicated that passion fruit exhibited superior aromatic enhancement effects and was determined to be more suitable as an aromatic enhancer for sugarcane fruit wine.

Key words: sugarcane fruit wine; passion fruit; Liu Pao tea; volatile compounds; aroma; headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry

甘蔗是世界上种植最广泛的糖料作物之一,主要分布在热带和亚热带地区^[1],在我国广西、海南、广东等地区被大量种植,年产量超过 12.4 亿吨。甘蔗目前主要以制作食用糖和鲜食为主,我国食用糖产量的 90% 以上来自甘蔗制糖。目前关于甘蔗的研究主要集中在甘蔗渣的多元化利用,甘蔗的育种研究^[2]。甘蔗面临加工附加值低的问题仍尚未被解决,其深加工产品的多元化发展已成为产业升级的重要方向。甘蔗果酒是以甘蔗汁为原料,经发酵、过滤、澄清、杀菌等工艺加工而成的酒精饮料,与朗姆酒相比,甘蔗果酒未经过蒸馏,酒精度较低,口感更加轻盈。甘蔗汁是酿酒的优良材料,不仅富含蔗糖,还含有多种氨基酸、B 族维生素和钙、铁、锌等营养成分以及多酚、黄酮、多糖等活性成分^[3]。研究证明,甘蔗具有较好的抗炎、抗氧化、降血脂等功效,成为近年来国内外研究热点^[4]。

香气是评价果酒质量的重要指标之一。香气的组成以及丰富度往往影响消费者的购买行为^[5]。但由于甘蔗汁的香气成分易分解,在发酵过程中难保留,目前市面上的甘蔗果酒普遍存在果香味淡、酒体单薄等问题。在国外,酿酒师会利用迷迭香、肉桂等香料增加朗姆酒的风味,但是这些外国所常用的香辛料不被我国大部分人群所接受^[6]。已有研究表明水果和茶类的添加能作为有效的增香手段,且以它们作为增香物质更符合国人的口味习惯。国内研究者陈碧等^[7]以茶酒为研究对象,优化了甘蔗甜茶酒的工艺,研究发现甜茶增加可以丰富甘蔗酒中的香气成分。李嘉欣等^[8]以美乐葡萄汁和富士苹果汁进行复配发酵,解决苹果酒香气不足的问题。前人的研究已证明水果以及茶类作为果酒增香物质的潜力以及可行性。然而目前有关甘蔗果酒的研究大多集中于发酵工艺条件的优化^[9-11],鲜见有关甘蔗果酒增香问题的研究报道。

因此,本研究立足于广西地理产地优势,以甘蔗果酒作为研究对象。同时选取广西特色热带水果百香果和广西梧州特色黑茶六堡茶,通过在发酵过程中分别添加百香果和六堡茶两种特色天然增香物质,来研究其对甘蔗果酒挥发性成分的影响。国内研究者任玲等^[12]以工夫红茶为研究对象,发现在发酵前后

添加百香果均可以提高红茶的香气品质,为红茶增加了 8 种特有香气物质。六堡茶作为中国广西地区传统的茶饮料,其中鉴定出超过 37 种香气成分,具有良好的甘蔗果酒增香潜力^[13-15]。本研究使用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)和气相色谱-离子迁移谱联用技术(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)结合多元统计分析,全面探究百香果和六堡茶两种广西特色天然增香物质对甘蔗果酒香气的改善效果,以期为优质甘蔗果酒和其他果酒的生产提供有价值的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

酿酒酵母(SY) 购自安琪酵母公司;甘蔗汁 中国广西南宁当地的明阳糖厂(添加 0.09 g/L 偏重亚硫酸钾,防止在运输过程中腐败变质);百香果(钦蜜 9 号)、白砂糖、陈香型六堡茶(2013 年陈化) 市售;柠檬酸、酒石酸、偏重亚硫酸钾(均为食品级) 嘉禾旭日食品有限公司;2-辛醇(色谱纯)、氯化钠(分析纯)、C7~C40 正构烷烃标准品 上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

LRH-250F 生化培养箱 海一恒科学仪器有限公司;FlavourSpec@Flavour 气相离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)

德国 G.A.S.公司;CTC-PAL 3 静态顶空自动进样装置 瑞士 CTC Analytics AG 公司;7890B 气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、老化装置 美国 Agilent Technologies 公司;FCLW6-20 水浴锅 山东海能科学仪器有限公司;CP214 型电子天平 上海奥豪斯仪器有限公司;WYA-2S 阿贝折光仪 上海仪电物理光学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 根据预实验结果和参照梁振荣等^[16]的方法,确定了百香果的添加量。将 100 g 百香果果肉混合到 1 L 甘蔗汁中,为百香果组。参照李雄宇等^[17]方法,确定了茶水比及添加量。取 5 g 茶

叶, 使用 95 °C 热水冲洗一遍后, 在 90 °C 的 300 mL 热水中加热浸提 15 min 得到六堡茶汤, 冷却后混合到 0.7 L 甘蔗汁中, 为六堡茶组。甘蔗果酒组保持不变。利用白砂糖调整发酵液总糖质量浓度为 150 g/L, 使用柠檬酸和酒石酸按质量比(1:1)混合, 调整发酵液总酸为 3 g/L。按质量分数的 0.02% 加入酿酒酵母, 在 28~32 °C 温水中活化 15 min, 将活化后的酵母加入到发酵液中搅拌, 在 100~150 r/min 条件下搅拌 5~10 min, 确保混合均匀。20 °C 恒温发酵。残糖含量连续 3 d 不变时, 结束发酵。倒罐澄清后装瓶, 三组样品分别做三个平行。

1.2.2 理化性质的测定 根据国标 GB/T 15038-2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》对样品的理化指标(酒精度、还原糖、挥发酸、总酸)进行测定。使用阿贝折光仪测定可溶性固形物; 采用斐林试剂滴定法测定还原糖; 采用指示剂法对挥发酸进行测定; 采用酒精计法测定酒精度, 采用电位滴定法测定总酸。

1.2.3 气相色谱离子迁移谱测定 气相色谱采用 DB-MAX 毛细管柱(30 m×0.53 mm, 1.00 μm)。测定方法参考 Hao 等^[18]的研究, 并稍作修改。将样品(1.0 mL)加入顶空瓶中, 在 60 °C 下孵育 15 min, 然后在 85 °C 下通过加热注射器自动注入 500 μL 顶空。载气按照设定的流量: 2 mL/min, 0~2 min, 线性增加到 15 mL/min, 2~8 min, 线性增加到 100 mL/min, 8~18 min, 线性增加到 150 mL/min, 18~28 min, 保持 150 mL/min, 28~30 min。漂移气(氮气)设置为 150 mL/min。每个样品在相同的条件下测试三次。通过与 GC-IMS 数据库中的标准化合物比较保留指数(RI)和漂移时间(DT)来鉴定挥发性成分。采用面积归一化法计算挥发性化合物的相对百分含量。

1.2.4 气相色谱质谱测定 测定方法参考 Hao 等^[18]的研究, 并稍作修改。将酒样(5 mL)置于顶空瓶中, 并添加 3 g 氯化钠用于促进挥发性成分挥发, 在 60 °C 孵育 15 min, 然后加入 10 μL 的 2-辛醇(80 μg/mL)作为内标, 采用 CAR/DVB/PDMS 萃取头, 将已老化的萃取头插入样品瓶, 在 60 °C 下提取 30 min。然后立即将萃取头插入气相色谱-质谱进样器, 在 260 °C 下解吸 5 min。色谱柱为 HP-INNOWax (30 m × 0.25 mm, 0.25 μm), 进样温度为 260 °C。色谱分离按以下程序进行: 温度在 40 °C 下保持 1 min, 然后以 10 °C/min 的速率升高至 60 °C。该温度保持 20 min, 然后以 5 °C/min 的速率增加到 80 °C。然后保持 10 min, 最后以 4 °C/min 的速率增加到 250 °C。根据正构烷烃的保留时间计算保留指数(RI)。根据质谱和保留指数鉴定挥发性化合物, 参考 NIST 2014 数据库。根据峰面积与内标(2-辛醇)和挥发性化合物浓度之间的线性关系, 对样品中挥发性化合物进行半定量分析。

1.2.5 气味活性值和相对气味活性值的计算 进行

气味活性的相关分析, 以获得每种化合物对整体风味的贡献。气味活性值(odor activity value, OAV)的公式为^[19]:

$$OAV_i = \frac{C_i}{OT_i}$$

式中, C_i 和 OT_i 分别表示为挥发性物质质量浓度和该挥发性物质的阈值。

相对气味活性值(relative odor activity value, ROAV)的公式为^[19]:

$$ROAV_i = \frac{C_i}{T_i} \times \frac{T_{\max}}{C_{\max}} \times 100$$

式中, C_i 和 T_i 分别为该挥发性物质的相对含量和该挥发性物质的阈值, $\frac{T_{\max}}{C_{\max}}$ 为所有化合物中 $\frac{T_i}{C_i}$ 的最大值。

1.2.6 感官分析 对三组不同的甘蔗果酒样品进行定量描述分析^[20], 评价小组由 10 名葡萄酒、果酒研究方向的研究生组成(5 名男性与 5 名女性, 年龄 23~26 岁), 在感官品评前进行了专业的嗅闻培训, 能够准确描述酒样的香气属性以及辨别对应的香气强度。要求评价员嗅闻三组甘蔗果酒, 讨论并得出 6 种香气属性(酒精味、果味、甜味、酸味、糖浆味、麦芽味)。测试前均获得小组成员同意, 品评选在专业的食品感官品评实验室中, 三组酒样随机顺序呈递给评价员, 要求评价员根据 1(低强度)~9(高强度)的点数对香气属性的强度进行打分, 分数从高到低表示感觉由强到弱, 其中 0~3 代表低强度, 4~6 代表中强度, 7~9 代表高强度, 结果经标准化处理后进行分析。

1.3 数据处理

使用 Microsoft Office Excel 2024 进行数据整理归纳, 所有样品进行三次平行试验, 结果均以“平均值±标准差”表示; 使用 SPSS 27.0 进行单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)进行统计分析。采用 SIMCA14 软件, 进行主成分分析(principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)和 VIP 值分析, 以确定样品间的相似性和差异性。采用 Gallery Plot 和 Reporter 软件生成特征指纹图和差异指纹图。使用 Origin 2021 软件绘制相关图形和表格。

2 结果与分析

2.1 理化指标

所有样品均发酵至还原糖质量浓度基本不变, 且均降至 4 g/L 以下。酒精度和总酸是果酒的重要理化指标。有机酸是果酒香气成分的重要前体物质, 可以改善果酒的感官特性^[21-22], 各组样品挥发酸质量浓度为(0.18~0.25 g/L)。酒精度则是保证果酒风味的关键, 过高的酒精度会掩盖甘蔗果酒本身的风味, 同时增加灼烧感, 会对果酒的品质造成很大的负面影响^[23]。如表 1 所示, 三组样品的酒精度没有显著差

表1 甘蔗果酒理化指标

Table 1 Physical and chemical indexes of sugarcane wine

指标	甘蔗组	百香果组	六堡茶组
还原糖(g/L)	1.82±0.04 ^c	2.32±0.06 ^b	2.08±0.02 ^b
可溶性固形物(°Bx)	5.3±0.0 ^b	5.3±0.00 ^b	5.6±0.2 ^a
挥发酸(以乙酸计)(g/L)	0.21±0.04 ^b	0.25±0.07 ^a	0.18±0.02 ^c
总酸(以酒石酸计)(g/L)	6.70±0.01 ^b	11.21±0.10 ^a	4.31±0.14 ^c
酒精度(%Vol)	8.85±0.04 ^a	8.50±0.08 ^a	8.53±0.12 ^a

注: 每一行中不同小写字母表示数据之间差异显著($P < 0.05$), 表2同。

异, 但百香果组的总酸含量显著高于其他两组($P < 0.05$), 这可能与百香果本身含有较多酸性物质有关。

2.2 挥发性成分分析

香气是甘蔗果酒品质的重要指标之一, 不同的增香物质对其影响显著。通过 GC-MS 和 GC-IMS 对样品进行分析, 三组样品共定性出 98 种挥发性化合物, 其中醇类 19 种、酯类 38 种、酸类 7 种、酮类 8 种、醛类 11 种以及其他酚类、烯萜类物质 15 种。其中, 对照组的甘蔗果酒共定性出 71 种挥发性成分; 百香果增香组共鉴定出 80 种挥发性成分; 六堡茶增香组共鉴定出 83 种挥发性成分。GC-MS 鉴定出的挥发性成分总含量分别为 9.57 mg/L(甘蔗)、13.55 mg/L(百香果)以及 10.21 mg/L(六堡茶), 其中

表2 不同增香方式的甘蔗果酒挥发性成分检测结果

Table 2 Detection results of volatile components in sugarcane wine with different flavoring methods

序号	种类	化合物名称	含量(mg/L)		
			百香果组	甘蔗组	六堡茶组
醇类					
1		α -松油醇	0.23±0.08 ^a	—	0.06±0.01 ^b
2		异戊醇	5.66±1.81 ^a	1.44±0.60 ^b	2.47±0.04 ^b
3		癸醇	0.05±0.01 ^{ab}	0.07±0.00 ^a	0.04±0.02 ^b
4		庚醇	0.02±0.00	—	—
5		己醇	0.08±0.02	—	—
6		3-辛醇	0.01±0.00	—	—
7		丙醇	0.36±0.13 ^a	0.09±0.02 ^b	0.04±0.00 ^b
8		异丁醇	0.59±0.33 ^a	0.10±0.04 ^b	0.13±0.03 ^b
9		2,3-丁二醇	0.02±0.01	—	—
10		橙花醇	—	—	0.05±0.02
11		反式-3-己烯-1-醇	0.02±0.01	—	—
12		苯甲醇	0.02±0.01	—	—
13		香茅醇	0.06±0.01 ^a	0.03±0.00 ^b	0.07±0.02 ^a
14		芳樟醇	0.25±0.02 ^a	—	0.02±0.00 ^b
15		反式橙花叔醇	—	—	0.01±0.00
16		苯乙醇	0.83±0.34 ^a	0.30±0.08 ^b	0.45±0.21 ^{ab}
17		2-庚醇*	0.23±0.01 ^b	0.23±0.01 ^b	0.32±0.03 ^a
18		丁醇*	0.26±0.01 ^c	0.31±0.00 ^b	0.56±0.03 ^a
19		活性戊醇*	0.04±0.00 ^b	0.06±0.00 ^a	0.03±0.00 ^b
酯类					
20		乙酸异戊酯	0.07±0.02 ^a	0.06±0.02 ^a	0.02±0.01 ^b
21		肉桂酸乙酯	—	0.04±0.01	—
22		苯乙酸乙酯	—	—	0.06±0.02
23		3-苯丙酸乙酯	—	0.01±0.00 ^a	0.02±0.01 ^a
24		苯甲酸乙酯	—	0.03±0.01 ^b	0.15±0.04 ^a
25		琥珀酸乙酯	0.02±0.01 ^b	—	0.12±0.05 ^a
26		癸酸乙酯	1.34±0.22 ^b	2.91±0.32 ^a	1.53±0.51 ^b
27		月桂酸丙酯	—	0.01±0.00 ^b	0.13±0.11 ^a
28		月桂酸乙酯	0.17±0.05 ^a	0.28±0.07 ^a	0.29±0.13 ^a
29		乙酸乙酯	0.20±0.04 ^a	0.04±0.01 ^b	0.10±0.06 ^{ab}
30		乙酸香叶酯	—	—	0.08±0.01
31		棕榈酸乙酯	0.02±0.02 ^a	0.03±0.01 ^a	0.08±0.04 ^a
32		己酸乙酯	0.19±0.01 ^b	0.24±0.03 ^a	0.06±0.00 ^c
33		壬酸乙酯	—	0.04±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a
34		正辛酸异戊酯	0.04±0.01	—	—
35		辛酸乙酯	1.65±0.22 ^b	2.54±0.27 ^a	1.36±0.28 ^b
36		癸酸异戊酯	—	0.03±0.01 ^a	0.01±0.00 ^b
37		十四酸乙酯	0.02±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a	0.01±0.01 ^a

续表 2

序号	种类	化合物名称	含量(mg/L)		
			百香果组	甘蔗组	六堡茶组
38		巴豆酸乙酯*	0.61±0.01 ^a	0.15±0.00 ^b	0.11±0.01 ^c
39		巴豆酸乙酯[D]*	1.70±0.04 ^a	1.30±0.01 ^b	1.16±0.06 ^c
40		丙酸丙酯*	4.57±0.02 ^a	2.87±0.02 ^b	2.30±0.17 ^c
41		丙酸己酯*	0.64±0.01 ^a	0.46±0.02 ^b	0.39±0.01 ^c
42		丙酸己酯[D]*	0.18±0.05 ^b	0.32±0.02 ^a	0.14±0.01 ^b
43		丙酸乙酯*	2.06±0.01 ^c	3.07±0.01 ^a	2.36±0.13 ^b
44		丙酸异戊酯*	0.10±0.03 ^{ab}	0.14±0.00 ^a	0.07±0.01 ^b
45		丁酸丁酯*	11.36±0.28 ^a	10.82±0.12 ^b	7.33±0.20 ^c
46		丁酸丁酯[D]*	0.87±0.01 ^b	1.08±0.00 ^a	0.88±0.03 ^b
47		丁酸己酯*	7.26±0.17 ^b	6.70±0.01 ^c	10.28±0.11 ^a
48		丁酸异丁酯*	3.46±0.03 ^c	5.49±0.03 ^b	7.57±0.09 ^a
49		庚酸乙酯*	1.45±0.03 ^a	0.93±0.01 ^b	0.74±0.03 ^c
50		己酸丁酯*	9.90±0.53 ^b	13.36±0.10 ^a	13.33±1.17 ^a
51		己酸异戊酯*	0.73±0.14 ^b	1.42±0.04 ^a	0.75±0.04 ^b
52		戊酸丁酯*	0.30±0.01 ^b	0.20±0.01 ^c	0.49±0.01 ^a
53		乙酸丙酯*	1.35±0.02 ^a	1.35±0.00 ^a	1.19±0.05 ^b
54		乙酸己酯*	0.35±0.04 ^a	0.14±0.01 ^b	0.08±0.01 ^c
55		乙酸甲酯*	0.11±0.01 ^a	0.09±0.00 ^b	0.06±0.00 ^c
56		乙酸戊酯*	0.12±0.01 ^a	0.03±0.00 ^b	0.03±0.00 ^b
57		乙酸异丙酯*	0.14±0.00 ^b	0.15±0.00 ^b	0.20±0.04 ^a
58		乙酸异丙酯[D]*	0.83±0.01 ^a	0.49±0.00 ^b	0.33±0.02 ^c
59		乙酸异丁酯*	3.07±0.02 ^a	2.42±0.01 ^b	2.46±0.09 ^b
60		乙酸异戊酯*	5.88±0.04 ^a	5.47±0.02 ^b	5.04±0.10 ^c
61		异丁酸异丁酯*	1.11±0.25 ^b	1.55±0.12 ^b	2.06±0.54 ^a
	酸类				
62		冰醋酸	0.05±0.01 ^a	0.04±0.00 ^a	0.04±0.03 ^a
63		丁酸	0.02±0.01 ^a	0.01±0.00 ^a	—
64		月桂酸	0.05±0.02 ^a	0.01±0.01 ^b	—
65		己酸	0.48±0.15 ^a	0.18±0.06 ^b	0.03±0.02 ^c
66		异辛酸	—	—	0.03±0.02
67		壬酸	0.20±0.13 ^a	0.02±0.01 ^b	—
68		异丁酸	0.01±0.01	—	—
	酮类				
69		大马士酮	0.04±0.00 ^a	0.02±0.00 ^b	0.02±0.01 ^b
70		β -紫罗兰酮	0.18±0.02 ^a	0.01±0.00 ^b	—
71		(E)-3-戊烯-2-酮	0.04±0.01 ^b	0.09±0.02 ^a	0.10±0.02 ^a
72		香叶基丙酮	0.02±0.00	—	—
73		3-羟基-2-丁酮*	0.70±0.00 ^b	0.76±0.03 ^b	1.80±0.09 ^a
74		2-庚酮*	0.19±0.00 ^a	0.14±0.01 ^b	0.08±0.00 ^c
75		2-庚酮[D]*	0.65±0.00 ^b	0.70±0.00 ^a	0.36±0.02 ^c
76		2-戊酮*	0.39±0.03 ^b	0.68±0.01 ^a	0.25±0.01 ^c
77		3-甲基-2-戊酮*	0.24±0.02 ^c	0.47±0.00 ^b	0.64±0.02 ^a
78		2-戊酮[D]*	0.32±0.01 ^c	1.81±0.00 ^b	2.92±0.08 ^a
	醛类				
79		壬醛*	0.14±0.05 ^b	0.23±0.02 ^a	0.09±0.00 ^b
80		顺-4-庚烯醛*	0.68±0.03 ^a	0.51±0.00 ^b	0.40±0.00 ^c
81		庚醛*	0.73±0.04 ^a	0.14±0.00 ^b	0.13±0.00 ^b
82		己醛*	1.82±0.02 ^a	1.75±0.01 ^b	1.54±0.05 ^c
83		戊醛*	0.31±0.01 ^a	0.21±0.00 ^b	0.15±0.01 ^c
84		丁醛*	0.11±0.00 ^c	0.19±0.01 ^b	0.58±0.03 ^a
85		丁醛[D]*	0.04±0.01 ^a	0.04±0.00 ^a	0.04±0.00 ^a
86		丙醛*	0.30±0.01 ^b	0.35±0.00 ^a	0.27±0.02 ^c
87		丙醛[D]*	0.15±0.04 ^a	0.17±0.00 ^a	0.08±0.00 ^b

续表 2

序号	种类	化合物名称	含量(mg/L)		
			百香果组	甘蔗组	六堡茶组
88		椰子醛	-	-	0.02±0.01
89		苯甲醛	0.23±0.05 ^b	0.24±0.06 ^b	1.14±0.25 ^a
90		柠檬醛	-	-	0.01±0.00
91		糠醛	-	-	0.02±0.00
	其他				
92		3,7-二甲基-1,3,7-辛三烯	-	-	0.01±0.00
93		1,2,3-三甲氧基苯	-	-	0.01±0.01
94		2,4-二叔丁基酚	0.03±0.01 ^b	0.05±0.00 ^{ab}	0.08±0.03 ^a
95		2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	0.14±0.04	-	0.01±0.01
96		萘品油烯	0.01±0.01	-	-
97		柠檬烯	0.01±0.01 ^b	-	0.22±0.25 ^a
98		丁香酚	0.02±0.00 ^a	-	0.01±0.00 ^a
99		对伞花烯	-	-	0.02±0.01
100		愈创木酚	-	-	0.01±0.00
101		4-乙基苯酚	0.09±0.03 ^b	0.18±0.07 ^{ab}	0.37±0.19 ^a
102		萘品-4-醇	0.02±0.00	-	-
103		γ -松油烯*	0.42±0.01 ^b	0.48±0.01 ^b	1.12±0.05 ^a
104		月桂烯	0.22±0.00 ^c	0.34±0.01 ^b	0.48±0.04 ^a
105		2,6-二甲基吡嗪	0.29±0.01 ^b	0.18±0.01 ^c	0.61±0.01 ^a
106		4-乙基愈创木酚	-	0.45±0.14 ^b	0.63±0.34 ^a

注: *: 由GC-IMS测定得出, 单位为%; -: 未检出; [D]: 二聚体。

百香果组产生了更多的挥发性成分总量, 而六堡茶组则产生了更多的挥发性成分种类。

酯是酒中主要呈香物质, 通常具有多种水果的香味、甜味、花香和白兰地气味, 在果酒香气的形成中起着关键作用^[24-25]。三组样品中共检测出 38 种酯类, 是甘蔗果酒的主要香气成分, 其中六堡茶组鉴定出 36 种酯类挥发性成分, 鉴定酯类物质种类最多。GC-MS 鉴定的酯类物质中, 癸酸乙酯(1.34~2.91 mg/L)和辛酸乙酯(1.36~2.53 mg/L)含量最高, 癸酸乙酯具有果味香气, 辛酸乙酯则赋予甘蔗果酒甜香与花香^[26]。己酸丁酯(9.9%~13.36%)和丁酸丁酯(8.21%~12.23%)则在 GC-IMS 的检测结果中占有较高的相对含量, 这二者均具有水果香味^[27]。高级醇通常是通过酵母糖代谢或氨基酸脱氢脱羧合成的, 具有典型的醇厚花、果香气, 使果酒的风味更加和谐。三组样品中共检测出 19 种醇类物质, 其中百香果组鉴定出最多的醇类物质, 共有 17 种。GC-MS 鉴定的醇类物质中异戊醇(1.44~5.66 mg/L)的含量最高, 其可为甘蔗果酒补充酒精气^[28]。GC-IMS 鉴定的醇类物质中丁醇(0.26%~0.56%)含量最高, 它可以为果酒带来一定的麦芽香气。酸类物质通常是由脂质或醛、酮类物质转化而产生的, 由于其较高的气味阈值, 一般在酒的香气组成中仅起到辅助作用^[29]。只有 GC-MS 鉴定出了酸类物质, 含量最高的是己酸(0.03~0.48 mg/L)。酮类物质共检测出 8 种, 其中百香果组中的酮类物质种类最全, 8 种酮类均有检出。醛类物质共检测出 11 种, 六堡茶组中 11 种醛类物质均有检出。在三组样品中, 己醛(1.54%~1.82%)是

相对含量最高的醛类物质, 其为果酒带来了类似苹果的香气。

甘蔗果酒中挥发性化合物的三维光谱如图 1A 所示, 俯视图如图 1B 所示, 其中漂移时间和保留时间分别用 x 轴和 y 轴表示。横坐标 8.0 处的红色竖线为反应离子峰(RIP)。该峰右侧的每个点代表一种挥发性化合物, 其颜色强度反映化合物的浓度(白

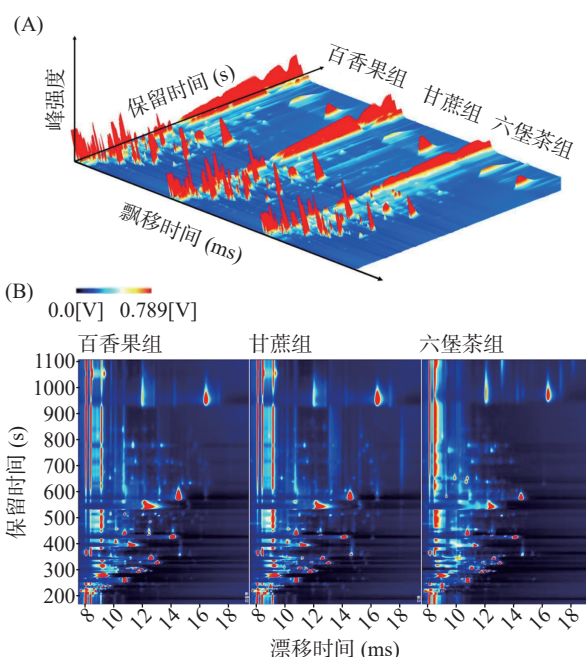


图 1 甘蔗果酒 GC-IMS 谱图

Fig.1 GC-IMS spectrum of sugarcane fruit wine

注: A: GC-IMS 3D 地形图; B: GC-IMS 俯视图。

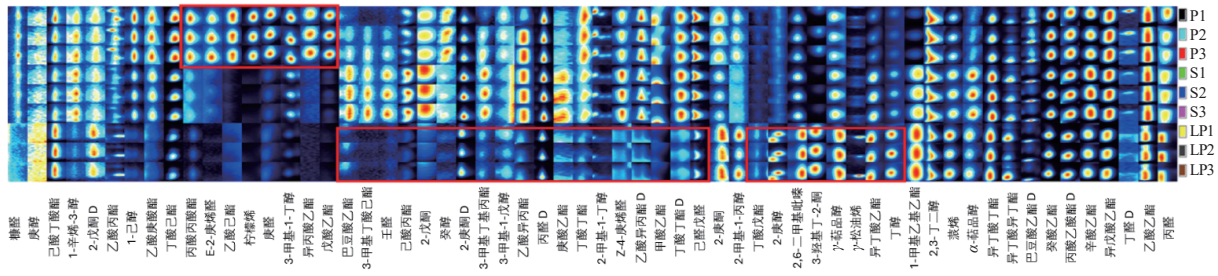


图 2 甘蔗果酒香气特征指纹图谱

Fig.2 Fingerprint of aroma compounds in sugarcane fruit wine
注: 百香果组(P); 甘蔗组(S); 六堡茶组(LP)。

色表示浓度较低, 红色表示浓度较高)。为了直观地比较甘蔗果酒样品挥发性成分的差异, 建立了香气特征指纹图谱。如图 2 所示, 乙酸己酯、柠檬烯、庚醛等 8 种物质在百香果组中的含量更高, 它们可以赋予甘蔗果酒更多的果味和甜香^[25]。丁醇、2-庚醇等 8 种物质在六堡茶组中含量更高, 它们带有少量刺激性气味和柠檬香气^[29]。但壬醛、丙醛、丁酸丁酯等 19 种物质在六堡茶组中含量偏低。

2.3 差异性分析

采用 PCA 分析不同样品中挥发性化合物的差异, 结果如图 3 所示。在 PCA 评分图中, 甘蔗组 (S) 位于正上方, 六堡茶组 (LP) 位于左下方, 百香果组 (P) 位于右下方。3 组样本分别位于不同的象限, 这说明三组样品间存在显著的聚类趋势。PCA 结果表明, 主成分 1 方差贡献率为 61.6%, 主成分 2 方差贡献率为 28.0%, 二者累计方差贡献率 89.6%, 说明降维分析时保留了挥发性风味成分的主要有效信息。

为了更好地筛选引起样品间差异的挥发性化合物, 对已识别的挥发性化合物进行了 OPLS-DA 多元统计分析^[30], 结果如图 3B 所示, 3 组样本呈现明显的聚类趋势, 且与 PCA 分析的结果吻合。数据处理结果显示, 模型解释变异度 R^2Y 为 0.997, 模型预测能力 Q^2 为 0.986, 说明模型拟合良好, 具有良好的预测特性。由图 3C 可知, 经过置换检验验证, 验证结果无过拟合现象。

由 OPLS-DA 模型导出的重要投影变量 (VIP) 量化了各变量对分类的贡献。一般如果 VIP 值 > 1, 则可以将对应的变量定义为关键差异挥发性化合物^[31]。如图 3D 所示, 共筛选出 25 个关键差异挥发性化合物, 其中异戊醇、癸酸乙酯、丙酸丙酯、丁酸丁酯、丁酸己酯、丁酸异丁酯和己酸丁酯的 VIP 值大于 2。异戊醇带有酒精味, 是分析结果中 VIP 值最高的挥发性化合物, 在六堡茶组和百香果组中存在显著差异。异戊醇的前体物质主要是氨基酸或葡萄糖, 百香果为甘蔗果酒提供了更多的氨基酸物质可能是导致这一结果的原因, 酯类的合成也与原料中的有机酸密切相关, 6 种酯类在样品间存在巨大差异也可能是因为百香果为发酵液提供了更多的有机酸。

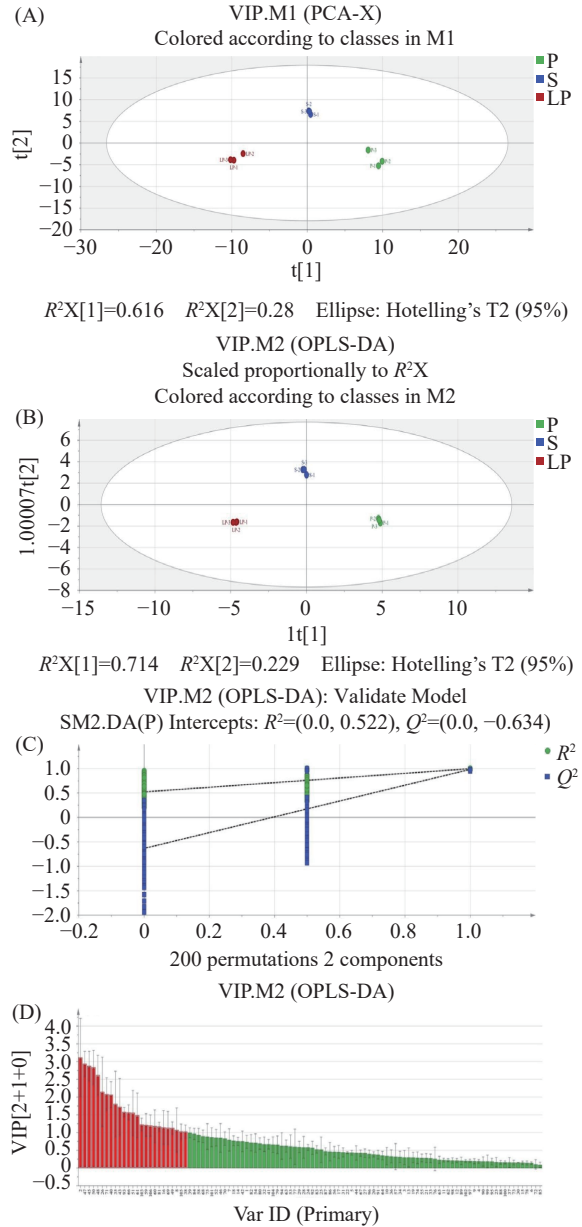


图 3 甘蔗果酒的多元统计分析

Fig.3 Multivariate statistical analysis of sugarcane fruit wine
注: A: PCA 散点图; B: OPLS-DA 散点图; C: 置换检验结果; D: 变量投影重要性值。

2.4 香气贡献分析

香气成分含量的高低通常不能用作辨别果酒香气特征的依据, 每种香气物质对甘蔗果酒整体香气特征的贡献可以用相对香气活性值 (ROAV) 或气味活

性值(OAV)表征,其与浓度和气味阈值相关。OAV或ROAV ≥ 1 的挥发性成分被认为对整体香气起着关键作用。0.1 \leq ROAV < 1 的挥发性成分则被认为起着关键修饰作用^[28]。OAV或ROAV值越高,对甘蔗果酒香气特性的贡献越大。

如表3所示,共有14种挥发性化合物的OAV大于1。其中,甘蔗果酒组8种,百香果组10种,六堡茶组12种,表明百香果及六堡茶的添加为甘蔗果酒有效地增添了更多的高活性香气成分,丰富了甘蔗果酒的香气组成。在甘蔗果酒组中,OAV更突出的是癸酸乙酯和己酸乙酯,它们能赋予甘蔗果酒更强的果味香气^[33-34]。在此基础上,大马士酮和 β -紫罗兰酮的OAV在百香果组的明显高于其他样品,且大马士酮OAV在其他两组中最高,这两者为甘蔗果酒带来了明显的果味与花香特性^[35]。此外,六堡茶组在 γ -松油烯、对伞花烯、3-羟基-2-丁酮等物质上显示出更高的OAV,这些物质为甘蔗果酒带来了更多的青草、柑橘的香气。

共有15种挥发性成分的ROAV大于1,这些物质主要为甘蔗果酒带来了果味和刺激性气味。除影响最大的丁酸异丁酯外,有最多的关键香气化合物在百香果组表现出更高的ROAV,这表明百香果组香气特征最为突出,为甘蔗果酒带来了更多的特征香气。

在百香果组中,乙酸异戊酯、 β -紫罗兰酮、芳樟醇、大马士酮、丁香酚等物质的OAV明显高于甘蔗果酒组,丁酸丁酯、乙酸戊酯、乙酸异戊酯、己醛的ROAV高于甘蔗果酒组。其中 β -紫罗兰酮、大马士酮的含量明显高于甘蔗果酒组,这些挥发性成分显著增强了甘蔗果酒中的果香、花香等香气特征。在六堡茶组中3-苯丙酸乙酯、3-羟基-2-丁酮、柠檬烯等物质OAV高于甘蔗果酒组,月桂烯、丁酸己酯的ROAV高于甘蔗果酒组,它们可以为甘蔗果酒带来青草味、果香、树脂的香气特征。

2.5 感官分析

由感官定量描述分析比较三组不同的甘蔗果酒的香气属性差异。图4可知,三组甘蔗果酒在麦芽

表3 甘蔗果酒样品中ROAV或OAV > 1 的挥发性化合物

Table 3 Volatile compounds with ROAV or OAV > 1 in sugarcane fruit wine samples

化合物名称	OAV			香气阈值 ^[22,24-26,29-30] (mg/L)	气味描述 ^[29,32,35]
	甘蔗组	百香果组	六堡茶组		
芳樟醇	未检出	16.398	1.005	0.015	花,果味,麝香
乙酸异戊酯	2.080	2.364	0.623	0.03	香蕉
苯乙酸乙酯	未检出	未检出	3.422	0.0185	-
3-苯丙酸乙酯	0.613	未检出	1.055	0.0185	果香
癸酸乙酯	14.550	6.722	7.650	0.2	果味
己酸乙酯	17.299	13.185	4.580	0.014	果味
辛酸乙酯	4.371	2.837	2.350	0.58	甜味、花香
大马士酮	313.28	793.53	362.34	0.00005	果香
β -紫罗兰酮	61.98	1944.08	未检出	0.00009	紫罗兰、玫瑰、香脂
3-羟基-2-丁酮	5.048	4.676	11.997	0.15	黄油、青草味
柠檬烯	未检出	0.071	1.103	0.2	甜味
丁香酚	未检出	3.043	1.308	0.005	柑橘
对伞花烯	未检出	未检出	3.506	0.005	-
γ -松油烯	1.85	1.62	4.31	0.26	柑橘、柠檬
		ROAV			
丙酸丙酯	1.12	2.83	0.65	0.44	-
丙酸乙酯	2.39	2.55	1.33	0.22	果味
丁酸丁酯	18.52	30.90	9.10	0.1	水果味
丁酸己酯	4.59	7.90	5.10	0.25	果味
丁酸异丁酯	100.00	100.00	100.00	0.0094	甜味、果味
庚酸乙酯	0.73	1.79	0.42	0.22	果味
乙酸戊酯	0.54	3.68	0.38	0.009	香蕉
乙酸异戊酯	31.17	53.32	20.85	0.03	香蕉
异丁酸异丁酯	8.81	10.09	8.50	0.03	果香
壬醛	2.66	2.45	0.72	0.015	青草味
己醛	59.78	99.12	38.27	0.005	苹果
戊醛	2.98	7.04	1.54	0.012	发酵味
丁醛	1.91	1.78	4.22	0.017	刺激
丙醛	3.99	5.50	2.23	0.015	刺激性
月桂烯	0.44	0.45	1.68	0.13	草本、树脂

注:-表示未查明相关香气阈值与气味描述。

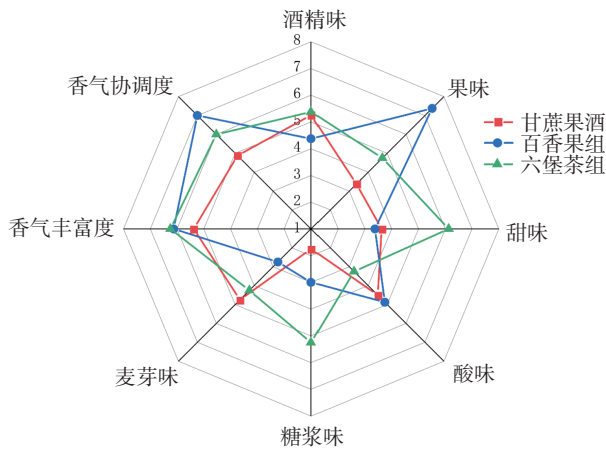


图 4 甘蔗果酒的感官定量描述分析

Fig.4 Quantitative description and analysis of sugarcane wine 味, 酸味, 酒精味三种香气属性中有相近的得分。从整体上看, 百香果组和六堡茶组的香气丰富度与协调度都高于甘蔗果酒组, 起到了有效的增香效果。相比之下, 百香果组的果味更为显著, 具有更高的香气协调度。这与香气贡献分析中, 大马士酮、丁酸丁酯、己醛、异丁酸异丁酯在百香果组中含量更高一致; 六堡茶组具有更高的甜味和糖浆味的得分, 这可能是六堡茶组中 3-羟基-2-丁酮、对伞花烯、丁醛等相较于其他组含量更高, 为六堡茶组增添了甜味、黄油味、刺激性气味等组合气味带来的结果。

3 结论

本研究基于 GC-IMS 和 GC-MS 结合多元统计分析, 系统评价了百香果和六堡茶对甘蔗果酒的增香效果, 成功筛选出 25 种关键差异化合物与 29 种关键香气活性化合物。具体来说, 百香果组通过显著提升大马士酮和 β -紫罗兰酮等关键花香、果香物质的含量, 有效强化了甘蔗果酒的花香与甜果香特征; 而六堡茶组则主要贡献 γ -松油烯、3-羟基-2-丁酮等物质, 为酒体增添了清新的青草香与柑橘香调。相较于现有主要依赖发酵工艺调控的增香策略, 本研究创新性地引入百香果与六堡茶进行增香。本研究结果为甘蔗果酒的增香技术方案提供了科学依据, 同时其思路也可拓展应用于其他香气特征相对匮乏的果酒产品的风味品质提升。本研究主要聚焦于香气化合物组成的解析, 后续可以对关键增香化合物(如大马士酮、 β -紫罗兰酮)在酒体中的具体形成或转化机制或长期储存过程中增香效果的稳定性进行进一步研究。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 黄齐, 房韬文, 罗怡雯, 等. 甘蔗多酚提取、纯化及生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 389-398. [HUANG Qiqi, FANG Taowen, LUO Yiwen, et al. Research progress on ex-

traction, purification and biological activities of sugarcane polyphenols[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 389-398.]

[2] 卢金华, 袁清霞, 杨珍珍, 等. 甘蔗叶、渣多糖提取、分离纯化、结构表征及生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 458-472. [LU Jinhua, YUAN Qingxia, YANG Zhenzhen, et al. Research progress on extraction, isolation, purification, structure characterization, and bioactivities of polysaccharides from sugarcane leaves and bagasse[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 458-472.]

[3] YANG Huafeng, WANG Songlei, YU Shujuan, et al. Characterization and semiquantitative analysis of volatile compounds in six varieties of sugarcane juice[J]. International Journal of Food Engineering, 2014, 10(4): 821-828.

[4] 李志春, 陈赶林, 郑凤锦, 等. 甘蔗醋对高脂小鼠血脂代谢及组织氧化还原的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 86-90. [LI Zhichun, CHEN Ganlin, ZHENG Fengjin, et al. Effect of sugarcane vinegar on lipid metabolism and redox state of mice fed high-fat diet[J]. Food Science, 2020, 41(9): 86-90.]

[5] PATIL P S, DESHANNAVAR U B, RAMASAMY M, et al. Production, optimization, and characterization of sugarcane (*Saccharum officinarum*)-Papaya (*Carica papaya*) wine using *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 21: 101290.

[6] MANGWANDA T, JOHNSON J B, MANI J S, et al. Processes, challenges and optimisation of rum production from molasses: A contemporary review[J]. Fermentation, 2021, 7(1): 21.

[7] 陈碧, 李炉娟, 郭松, 等. 甜香型甘蔗甜茶酒发酵工艺优化及品质分析[J]. 中国酿造, 2023, 42(12): 212-218. [CHEN Bi, LI Lujuan, GUO Song, et al. Optimization of fermentation process and quality analysis for sweet sugarcane tea wine[J]. China Brewing, 2023, 42(12): 212-218.]

[8] 李嘉欣, 徐彬艳, 俞柏含, 等. 果汁复配比例和混菌发酵对富士-美乐复合果酒品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(4): 81-90. [LI Jiaxin, XU Binyan, YU Bohan, et al. Effects of mixing ratio and mixed culture fermentation on the quality of fuji-merlot wine[J]. Food Science, 2025, 46(4): 81-90.]

[9] 张雪儿, 孙玉霞, 刘振宇, 等. 复合酵母发酵对草莓甘蔗果酒发酵速率和品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(10): 264-270. [ZHANG Xueer, SUN Yuxia, LIU Zhenyu, et al. Effects of compound yeast fermentation on fermentation rate and quality of strawberry-sugarcane wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(10): 264-270.]

[10] 林波, 郑凤锦, 何洁, 等. 低醇甘蔗果酒发酵菌种的筛选与呈味特征分析[J]. 食品科技, 2022, 47(6): 16-23. [LIN Bo, ZHENG Fengjin, HE Jie, et al. Screening of fermentation yeast and analysis of flavor characteristics for low alcohol sugarcane wine[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(6): 16-23.]

[11] CHEN Ganlin, ZHENG Fengjin, LIN Bo, et al. Preparation and characteristics of sugarcane low alcoholic drink by submerged alcoholic fermentation[J]. Sugar Tech, 2013, 15(4): 412-416.

[12] 任玲, 田迪, 杨雪怡, 等. 发酵前后添加百香果果汁对工夫红茶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 60-68. [REN Ling, TIAN Di, YANG Xueyi, et al. Effect of adding passion fruit juice before and after fermentation on the quality of congou black tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 60-68.]

[13] 陈国和, 胡腾飞, 王乐涯, 等. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-嗅闻仪-质谱仪结合气味活力值鉴定槟榔香六堡茶关键香气物

- 质[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(8): 271-277. [CHEN Guohe, HU Tengfei, WANG Leya, et al. Identification of key aroma components in *Areca*-flavor Liupao tea based on HS-SPME-GC-O-MS and odor activity value[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(8): 271-277.]
- [14] 穆兵, 朱荫, 马士成, 等. 六堡茶香气成分的全二维气相色谱-飞行时间质谱分析[J]. 食品科学, 2017, 38(22): 169-177. [MU Bing, ZHU Yin, MA Shicheng, et al. Analysis of aroma components in Liubao tea by comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of flight mass spectrometry[J]. Food Science, 2017, 38(22): 169-177.]
- [15] LI Qin, HONG Xin, ZHENG Xuexue, et al. Characterization of key aroma compounds and core functional microorganisms in different aroma types of Liupao tea[J]. Food Research International, 2022, 152: 110925.
- [16] 梁振荣, 郝俊光, 叶静莹, 等. 红心火龙果百香果复合果酒发酵工艺优化[J]. 中国酿造, 2023, 42(4): 221-227. [LIANG Zhenrong, HAO Junguang, YE Jingxuan, et al. Optimization of fermentation technology for compound fruit wine of red pitaya and passion fruit[J]. China Brewing, 2023, 42(4): 221-227.]
- [17] 李雄宇, 牛森, 何雨洪, 等. 不同茶类茶酒的感官风味及挥发性成分差异[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(24): 158-167. [LI Xiongyu, NIU Miao, HE Yuqi, et al. Difference analysis of sensory flavor and volatile components of different tea wines[J]. Food Research and Development, 2024, 45(24): 158-167.]
- [18] HAO Yaofei, LI Jianxun, ZHAO Zhiheng, et al. Flavor characteristics of Shanlan rice wines fermented for different time based on HS-SPME-GC-MS-O, HS-GC-IMS, and electronic sensory analyses[J]. Food Chemistry, 2024, 432: 137150.
- [19] XI Bonan, ZHANG Jingjing, XU Xiao, et al. Characterization and metabolism pathway of volatile compounds in walnut oil obtained from various ripening stages via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137547.
- [20] 马宁原, 姚凌云, 孙敏, 等. 基于 GC-IMS 和 GC-MS 分析不同发酵方式对黄桃酒香气成分的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 306-314. [MA Ningyuan, YAO Lingyun, SUN Min, et al. Effect of different fermentation methods on aroma composition of yellow peach wine analyzed by gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2023, 44(12): 306-314.]
- [21] LI Penghui, JIA Yuanlong, CAI Donglin, et al. Study on the relationship between flavor components and quality of ice wine during freezing and brewing of 'beibinghong' grapes[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 101016.
- [22] 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 Xu, YUAN Qian, LI Jiixin, et al. Analysis of browning factors in low-alcohol zaosu pear wine and its effect on volatile aroma compounds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 451-461.]
- [23] 朱静, 陈顺心, 张一鸣, 等. 不同酵母对圣女果酒品质及挥发性风味物质的影响[J]. 中国酿造, 2024, 43(9): 177-184. [ZHU Jing, CHEN Shunxin, ZHANG Yiming, et al. Effect of different yeasts on the quality and volatile flavor substances of cherry tomato wines[J]. China Brewing, 2024, 43(9): 177-184.]
- [24] TIAN Huaixiang, XIONG Juanjuan, SUN Jiashu, et al. Dynamic transformation in flavor during hawthorn wine fermentation; Sensory properties and profiles of nonvolatile and volatile aroma compounds coupled with multivariate analysis[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 139982.
- [25] ZHOU Changlin, YU Yashu, AI Jingya, et al. Fruit wines classification enabled by combing machine learning with comprehensive volatiles profiles of GC-TOF/MS and GC-IMS[J]. Food Research International, 2025, 204: 115890.
- [26] SAM F E, MA T Z, WANG J, et al. Aroma improvement of dealcoholized Merlot red wine using edible flowers[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134711.
- [27] WANG Jun, YAN Juanjuan, ZHANG Wenjia, et al. Comparison of potential *Wickerhamomyces anomalus* to improve the quality of Cabernet Sauvignon wines by mixed fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*[J]. LWT, 2023, 173: 114285.
- [28] 樊静雅, 谷欣哲, 梁清文, 等. 白酒发酵过程中异戊醇合成机制与减控研究进展[J]. 中国酿造, 2023, 42(5): 1-8. [FAN Jingya, GU Xinzhe, LIANG Qingwen, et al. Research progress in mechanism of isoamyl alcohol synthesis and its reduction control during Baijiu fermentation[J]. China Brewing, 2023, 42(5): 1-8.]
- [29] FENG H, SKINKIS P A, QIAN M C. Pinot noir wine volatile and anthocyanin composition under different levels of vine fruit zone leaf removal[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 736-744.
- [30] XI H, HUANG Y M, GÓRSKA-HORCZYCZAK E, et al. Rapid analysis of Baijiu volatile compounds fingerprint for their aroma and regional origin authenticity assessment[J]. Food Chemistry, 2021, 337: 128002.
- [31] ZHANG Qian, MA Jian, YANG Yupei, et al. Effects of *S. cerevisiae* strains on the sensory characteristics and flavor profile of kiwi wine based on E-tongue, GC-IMS and 1H-NMR[J]. LWT, 2023, 185: 115193.
- [32] BELLINCONTRO A, MATARESE F, D'ONOFRIO C, et al. Management of postharvest grape withering to optimise the aroma of the final wine: A case study on Amarone[J]. Food Chemistry, 2016, 213: 378-387.
- [33] GUO Xiqing, ZHU Xueyun, QIAN Yunkai, et al. Enhancing variety aromatic characteristics of Muscat wine through cold maceration with indigenous cryotolerant *Metschnikowia pulcherrima* Mp0520[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141097.
- [34] BOWEN A J, REYNOLDS A G. Odor potency of aroma compounds in Riesling and vidal Blanc table wines and icewines by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(11): 2874-2883.
- [35] LIU Ruojin, LIU Yaran, ZHU Yuxuan, et al. Aromatic characteristics of passion fruit wines measured by E-nose, GC-quadrupole MS, GC-orbitrap-MS and sensory evaluation[J]. Foods, 2022, 11(23): 3789.