

钟思彦, 徐玉娟, 余元善, 等. 酶解对香蕉果酒发酵前后风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 98–106. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030300

ZHONG Siyan, XU Yujuan, YU Yuanshan, et al. Effect of Enzymatic Hydrolysis on Flavor of Banana Wine before and after Fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 98–106. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030300

· 研究与探讨 ·

酶解对香蕉果酒发酵前后风味的影响

钟思彦¹, 徐玉娟¹, 余元善¹, 吴继军¹, 李璐¹, 卢楚强², 陈从贵², 邹波^{1,*}

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610;
2. 广东源丰食品有限公司, 广东茂名 525000)

摘要: 本研究针对香蕉浆粘度高不易取汁的特点, 分别对香蕉浆进行酶解和直接加水处理, 制备酶解香蕉汁和非酶解香蕉汁, 比较不同处理的香蕉果酒发酵前后理化指标和挥发性成分的变化。结果表明, 经果胶酶处理的香蕉汁(果酒)可溶性固形物(TSS)和总酸(TA)分别为 24.91°Brix (8.40°Brix) 和 4.70 g/L (5.67 g/L) 高于非酶解处理的香蕉汁(果酒), pH 则低于非酶解的香蕉汁(果酒); 酶解样品酒精度 11.5% vol, 高于非酶解样品。采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)分析样品中的挥发性成分, 在四个样品中共检出 87 种挥发性物质, 其中酯类 43 种, 醇类 13 种, 其他种类物质相对较少, 结合香气活度值(OAV)和主成分分析(PCA), 共发现 OAV>1 的香气物质 15 种, 正己醇、乙酸乙酯、乙酸异丁酯、乙酸丁酯、丁酸异戊酯、反式-2-己烯醛、己醛等 10 种物质是果汁中主要的挥发性成分, 这些物质主要与甜香、香蕉香、覆盆子香、梨香、桃香、青草味相关, 经果胶酶处理后的果汁中与青草味相关的己醛含量更少; 苯乙醇、异戊酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸异戊酯等 7 种物质对果酒香气有较大贡献值, 这些物质主要为果酒提供苹果香、玫瑰香、香蕉香、杏香、奶油香, 经果胶酶处理的样品香气浓度更大, 整体香气更加平衡丰富。综上所述, 将香蕉浆酶解后再进行酒精发酵, 所得果酒的整体香气会更加丰富和谐, 本研究结果可为香蕉果酒的生产提供科学依据。

关键词: 香蕉, 酶解, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用, 挥发性化合物, 主成分分析

中图分类号: TS262.7; O657 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-0306(2024)03-0098-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030300



本文网刊:

Effect of Enzymatic Hydrolysis on Flavor of Banana Wine before and after Fermentation

ZHONG Siyan¹, XU Yujuan¹, YU Yuanshan¹, WU Jijun¹, LI Lu¹, LU Chuqiang², CHEN Conggui², ZOU Bo^{1,*}

(1. Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China;
2. Guangdong Yuanfeng Food Co., Ltd., Maoming 525000, China)

Abstract: Due to the high viscosity of banana pulp and the difficulty of extracting juice, banana pulp was pectinase-treated or supplemented with water to prepare enzymatic hydrolysis banana juice and non-enzymatic hydrolysis banana juice, respectively. The changes of physicochemical parameters and volatile components of banana wine with different treatments were compared before and after fermentation. The results showed that the total soluble solids (TSS) and total acid (TA) of the banana juice (fruit wine) treated with pectinase were 24.91°Brix (8.40°Brix) and 4.70 g/L (5.67 g/L), respectively, which were higher than those of the banana juice (fruit wine) without pectinase treatment. While a lower pH value was found in

收稿日期: 2023-03-28

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2022B0202050001); 广东省农业科学院人才培养项目(R2022PY-QY009); 广东省农业科学院学科团队建设项目(202109TD); 高州市香蕉产业园加工科技支撑项目。

作者简介: 钟思彦(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: 1079429186@QQ.com。

* 通信作者: 邹波(1986-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: skzoubo@163.com。

pectinase treatment groups. Meanwhile, the alcohol content of pectinase-treated samples was 11.5% vol, which was higher than that of the non-enzymolysis samples. Then headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was used to analyze the volatile components of different samples. A total of 87 volatile components were detected in the four samples, including 43 esters, 13 alcohols, and relatively few other types of substances. Combined with odor activity value (OAV) and principal component analysis (PCA), a total of 15 aroma substances with OAV>1 were found. Ten substances such as 1-hexyl alcohol, ethyl acetate, isobutyl acetate, butyl acetate, isoamyl butyrate, trans-2-hexenal, and hexal were the main volatile components in banana juice. These substances were mainly related to sweet aroma, banana aroma, raspberry aroma, pear aroma, peach aroma and grass aroma. Compared with untreated banana juice, the content of hexal in banana juice treated with pectinase was less, which was mainly related to grass aroma. Seven aroma components such as phenylethanol, ethyl isovalerate, ethyl caprylate, ethyl caprylic acid and isoamyl acetate had a great contribution to the aroma of banana wine. These substances mainly provided apple, rose, banana, apricot and cream aroma for banana wine. The aroma concentration of banana wine treated with pectinase was higher, and its overall aroma was more balance and rich. In conclusion, the overall aroma of banana wine fermented from pectinase-treated banana pulp was richer and more harmonious, which provided scientific basis for the production of banana wine.

Key words: banana; enzymatic hydrolysis; headspace solid-phase microextraction coupled to gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS); volatile compounds; principal component analysis (PCA)

香蕉属芭蕉科植物, 主要分布在印度、菲律宾、巴西、中国和印度尼西亚等热带和亚热带地区。我国是世界上第三大香蕉生产国, 在香蕉全球贸易中起重要作用^[1-2]。香蕉果肉香甜软滑, 营养丰富, 富含酚类、矿物质、类黄酮、膳食纤维等^[3-5], 具有降低血脂、防止心脑血管疾病、润肠通便的作用^[6]。但是, 香蕉是典型的呼吸跃变型水果, 采收时间集中, 成熟后不易贮藏, 一般 2~4 d 会腐烂变质^[7]。因此, 开展香蕉精深加工对延长香蕉产业链具有重要意义。

果酒酒精度较低, 富含果香味和水果中的活性物质, 深受消费者喜爱。目前, 市场上果酒的种类几乎涵盖了所有水果品种。香蕉糖度高, 适用于果酒发酵, 但香蕉果肉含有较多果胶, 打浆后果浆粘稠, 取汁不易, 未经处理的原浆直接酿酒较难。目前香蕉果酒的加工工艺主要采用酶解后再发酵, 或者加水制汁后发酵。果胶酶能将果浆中的果胶大分子降解成小分子, 降低果浆的粘度, 提高出汁率, 同时对果酒的品质也有提升。程拯良^[8]发现果胶酶能促进原浆中芳香物质的释放, 丰富香气组成; 还有研究^[9]发现果胶酶使火龙果酒的产量提高 16%, 且果酒香气更丰富。然而, 酶解和非酶解对香蕉果酒发酵前后理化性质尤其是风味变化的对比研究鲜见报道。

香气是决定果酒风味, 影响消费者接受度最关键的因素。现有报道主要集中于香蕉酒香气成分相对含量的测定, 如温海洋等^[10]采用液-液萃取的方法提取香蕉酒中的香气成分, 用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)分析得出酯类和醇类是香蕉酒中主要的香气成分; 韦璐等^[11]发现香蕉果酒在低温发酵期间, 香气总相对含量呈现先升后降, 最后趋势平稳。尽管这些研究有助于辨析香蕉酒中香气成分的种类, 但挥发性成分在整体香气中的强度还取决于成分的浓度和在介质中的阈值^[12], 通常以香气活度值(OAV)表示, 当 OAV<1 时, 该挥发性成分对整体香气无贡献,

OAV>1 时, 该挥发性成分对整体香气有直接贡献, 且挥发性成分 OAV 值越大, 对整体香气贡献越大^[13]。目前, 关于香蕉果酒发酵前后香气成分的浓度变化、OAV 值及香气主成分分析(PCA)鲜见报道, 本研究在分析常规理化指标的同时, 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)技术, 通过定量分析、OAV 和 PCA 系统探究了酶解和非酶解处理香蕉果酒发酵前后挥发性成分的变化规律, 为香蕉果酒发酵工艺提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

香蕉 广东源丰食品有限公司提供; 酿酒酵母 FX10 法国 Laffort 公司; 氢氧化钠、果胶酶(500 U/mg) 分析纯, 上海源叶生物科技有限公司; 二氯甲烷(色谱纯)、氯化钠(分析纯) 天津市科密欧化学试剂有限公司; C5~C32 系列正构烷烃混标 上海安谱瑞世标准技术服务有限公司; 仲辛醇 色谱纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 果葡糖浆、偏重亚硫酸钾 食品级, 湖南岳阳三湘化工有限公司。

PB-10 型 pH 计 德国 Sartorius 公司; SW-CJ-2FD 无菌工作台 苏净集团苏州安泰空气技术有限公司; HWS-24 电热恒温水浴锅 上海一恒科学仪器有限公司; ALC-210.4 电子分析天平 德国 ACCU-LAB 公司; SPX-250B-Z 生化培养箱 上海博迅实业有限公司医疗设备厂; H-200-BIA03 榨汁机 上海韩惠人爱家电科技有限公司榨汁机; RFM3400 阿贝折光仪 英国 Stanley 公司; JW-1042 型离心机 安徽嘉文仪器装备有限公司; DMA 35 便携式密度计 奥地利安东帕(中国)有限公司; DB-5 非极性毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm) 美国 Restek; 7890B-5977B 型气相色谱-质谱联用仪 美国 Agi-

lent 科技公司; 57330-U 型三相固相微萃取头(PDMS/DVB/CAR) 美国 Supelco 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 香蕉酒工艺流程 香蕉去皮→打浆/加水打浆→酶解/不酶解→过滤→调配→酒精发酵→过滤→澄清。

1.2.2 样品分组及制备 经前期对果胶酶、纤维素酶和淀粉酶的筛选及酶用量和酶解时间的研究, 将样品进行以下分组处理:

参考柏建玲等^[14]的研究, 将香蕉去皮, 加 2 倍质量水打浆, 过滤, 所得香蕉汁为样品 1*; 香蕉去皮打浆后, 加入 0.03% 果胶酶, 50 ℃ 水浴加热处理 2 h, 然后过滤, 所得香蕉汁为样品 2*。

在所得两组香蕉汁中加入果葡糖浆调节 TSS 到 22°Brix; 加入偏重亚硫酸钾, 用量为 100 mg/kg; 接入活化的酿酒酵母 FX10, 酵母用量为 250 mg/kg, 发酵温度 20±2 ℃, 发酵 7 d, 酒精发酵结束 5000 r/min 离心 10 min 后取上清液备用; 样品 1*发酵所得果酒标记为样品 3*, 样品 2*发酵所得果酒标记为样品 4*。果汁和果酒分别取样储存于-20 ℃ 进行后续实验。

1.2.3 pH、总酸(TA)和可溶性固形物(TSS)的测定

各处理组样品的 pH 采用 pH 计直接测定; 总酸采用 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》^[15]方法测定; TSS 采用数字阿贝折射仪测定。

1.2.4 酒精度的测定 酒精度的测定参考 GB 5009.225-2016《食品安全国家标准 酒中乙醇浓度的测定》^[16], 选择酒精计法进行测定。

1.2.5 挥发性成分测定 顶空固相微萃取(HS-SPME)条件参照 Wu 等^[17]的方法稍作改变: 准确称取 5.00 g 样品于 15 mL 顶空萃取瓶中, 加入 1 g 氯化钠、1 μL(50 mg/L)仲辛醇内标溶液及磁力搅拌转子, 于 40 ℃ 水浴中平衡 10 min; 随后将装有纤维头的手柄插入萃取瓶中, 置于样品上方的空气中(距离样品液面约 2.5 cm), 40 ℃ 下萃取 30 min 后, 迅速将萃取纤维头插入气相色谱仪的进样口, 解析 5 min, 同时启动气相色谱仪采集数据。

GC-MS 条件参照 Kanjana 等^[18]的方法略作修改: 采用 DB-5MS 弹性毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)对样品进行分析, 载气为氦气, 载气流速为 1.7 mL/min, 进样口温度为 250 ℃, 色谱柱升温程序: 初始温度为 40 ℃, 保持 5 min, 随后以 4 ℃/min 的速度升温至 120 ℃, 保持 2 min, 再以 10 ℃/min 的速度升温至 260 ℃, 保持 5 min。采用不分流进样模式。质谱条件设定如下: 采用全扫描模式采集信号, 电离方式 EI, 电子轰击能量为 70 eV; 接口温度 280 ℃, 离子源温度为 230 ℃, 四级杆温度为 150 ℃, 扫描质量范围为 35~350 amu, 倍增器电压(自动调谐+200 V); 扫描速度: 5.2 次/秒。

挥发性成分定性分析: 与标准信息库 NIST 14 进行比对; 采用正构系列烷烃混合标样 C5~C32

计算挥发性成分的保留指数, 并与参考文献进行对比; 根据所记录香气描述以及利用标准品的质谱信息进行定性。保留指数(LRI)计算。

$$LRI = 100N + \frac{100n(t_{Ra} - t_{RN})}{(t_{R(N+n)} - t_{RN})}$$

式中, N 是目标物质左侧正构烷烃的碳原子数, n 为位于目标物质两侧的正构烷烃的碳分子数之差, t_{Ra} , t_{RN} 和 $t_{R(N+n)}$ 分别是待测物质, 待测物质左侧和右侧正构烷烃的保留时间。

挥发性成分定量分析: 参照程宏桢等^[19]的内标法对化合物进行定量, 各挥发物质相对含量=(待求成分物质峰面积×内标物含量)/内标物峰面积之比。

香气活度值(OAV)的计算方法:

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

式中, OAV 为挥发性成分的香气活力值; C_i 为香气成分的含量; OT_i 为香气成分在参考文献中的香气阈值。

1.2.6 感官评定 参照李祥雨等^[13]的方法略作修改, 感官评价小组成员由 10 位(女性 6 人, 男性 4 人)食品专业学生组成。首先, 感官评价员通过嗅闻果汁果酒, 成员讨论并确定果汁果酒的 7 个风味描述词, 分别是: 青草味、水果香、花香、奶油香、酒精味、甜香和香气丰富度。然后将 5 mL 香蕉果汁或果酒放在 30 mL 的嗅闻瓶中随机编号, 让成员嗅闻打分。评分采用五点标度法(5 代表感受味道很强, 0 代表感受不到味道), 取三次重复实验平均值绘制香气轮廓雷达图。

1.3 数据处理

用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行显著性分析, Microsoft office Excel 2021 和 Origin 2022 进行统计分析、主成分分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 香蕉果酒发酵前后理化指标比较

如表 1 所示, 样品 2*的 pH 显著低于样品 1* ($P<0.05$), 可溶性固形物含量和总酸显著高于样品 1* ($P<0.05$), 可能是因为样品 2*是香蕉浆直接酶解后制备的汁, 对香蕉中的有机酸和可溶性固形物保留较好, 而样品 1*是香蕉浆加水后过滤所得, 可溶性固形物和有机酸被稀释。不同前处理的果汁经酒精发

表 1 香蕉果酒发酵前后理化指标

Table 1 Physicochemical indexes of banana wine before and after fermentation

样品	pH	TSS(°Brix)	总酸(g/L)	酒精度(% vol)
1*	4.74±0.01 ^a	8.55±0.05 ^b	1.85±0.01 ^d	—
2*	4.48±0.01 ^b	24.91±0.05 ^a	4.70±0.02 ^b	—
3*	4.73±0.01 ^a	7.05±0.01 ^d	3.22±0.03 ^c	10.8±0.2 ^b
4*	4.39±0.01 ^c	8.40±0.01 ^c	5.67±0.05 ^a	11.5±0.2 ^a

注: 1*: 非酶解香蕉汁, 2*: 酶解香蕉汁, 3*: 非酶解果汁发酵成的果酒, 4*: 经酶解果汁发酵的果酒; 同一列中不同字母表示存在显著性差异 ($P<0.05$)。

酵后 pH 略有下降, 总酸含量有所升高, 这可能与酵母繁殖和酒精发酵过程中产生 CO_2 、有机酸相关^[20]。酶解香蕉汁发酵的果酒酒精度略高, 有研究表明^[21], 在一定添加范围内, 酒精度和果胶酶添加量呈正相关, 本文的研究结果与之一致, 这可能与果胶酶分解果胶, 促进小分子糖的释放有关。

2.2 香蕉果酒发酵前后挥发性成分比较

2.2.1 挥发性物质种类和数量比较 对两种香蕉汁和两种香蕉酒进行 GC-MS 分析, 将 GC-MS 检测到的物质根据内标法算出百分含量, 由于不同样品中物质含量差异较大, 数据进行归一化后再绘制热图^[22], 如图 1 所示, 蓝色到红色表示物质含量依次增加, 蓝色越深含量越低, 红色越深含量越高。热图横坐标为四组样品, 纵坐标表示香蕉汁和香蕉酒一共检测出

的 87 种挥发性成分。从图可知, 四组样品挥发性成分种类和含量均不相同, 其中样品 1*和样品 2*较为相似, 样品 3*和样品 4*较为接近, 表明不同前处理方式及发酵对香气成分均有影响, 其中发酵影响较大。结合图 2 分析, 从四个样品中分别鉴定出 49、47、43 和 43 种挥发性成分, 总体分为醇类、醛类、酯类、酮类和其他类。其中样品 1*检测到的挥发性成分最多, 包括醇类 8 种、酯类 20 种、醛类 4 种、酮类 8 种和其他类 9 种, 样品 3*和样品 4*检测到的物质数量较少, 都是 43 种。样品 3*中包括醇类 9 种、酯类 24 种、醛类 0 种、酮类 3 种和其他类 7 种, 样品 4*中包括醇类 9 种、酯类 26 种、醛类 0 种、酮类 4 种和其他类 4 种。从含量上看, 四个样品挥发性成分的含量差异显著, 样品 4*的挥发性成分总含量

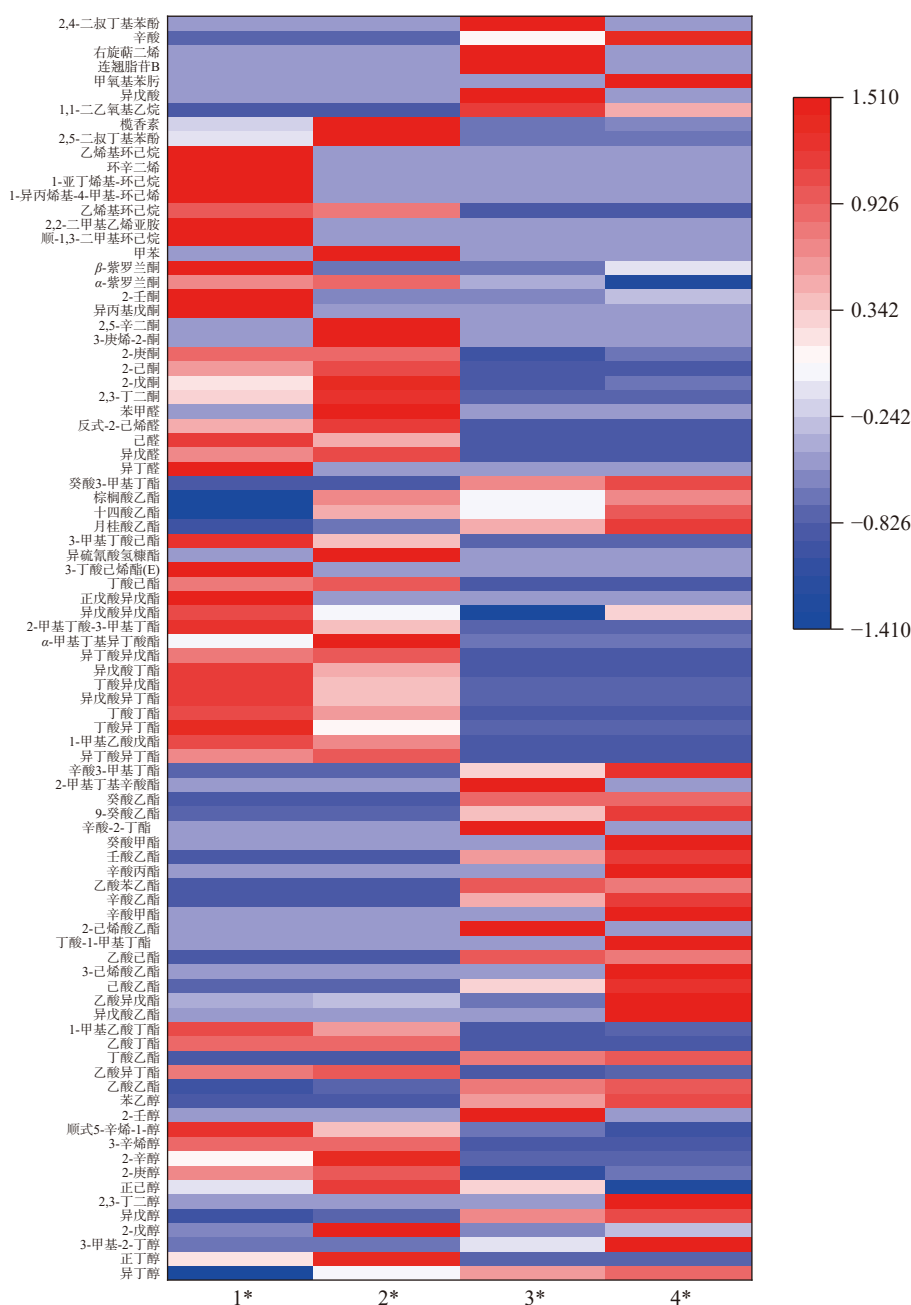


图 1 果汁果酒挥发性成分热图

Fig.1 Heat map of the volatile components of fruit juice and fruit wine

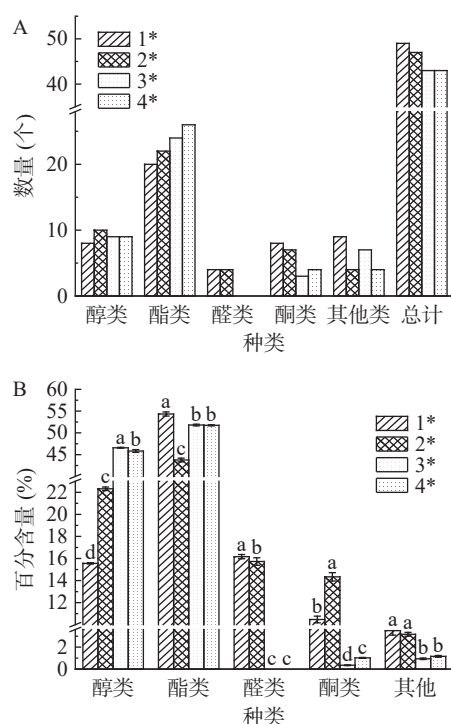


图2 香蕉果酒发酵前后挥发性成分的种类(A)及百分含量(B)

Fig.2 Types (A) and percentage contents (B) of volatile compounds before and after fermentation of banana wine

注: 图中不同字母表示不同样品同一种类物质的百分含量存在显著性差异($P < 0.05$)。

(3499.40 $\mu\text{g/kg}$) 最高, 其次为样品 3*(2748.47 $\mu\text{g/kg}$)、样品 2*(2362.30 $\mu\text{g/kg}$), 总含量最少的是样品 1*(1973.33 $\mu\text{g/kg}$), 其中酶解后发酵的果酒挥发性物质总量比发酵前提高了约 1.48 倍, 非酶解发酵果酒的挥发性物质总量比发酵前提高了约 1.39 倍。可见无论是发酵前还是发酵后, 经果胶酶处理的样品香气含量更高。

2.2.2 酯类物质比较 酯类物质是构成果汁果酒风味特征的基本香气化合物, 4 个样品中酯类的数量都远高于其他种类, 是香蕉汁和香蕉酒中重要的挥发性成分。结合图 2 进一步分析, 四种样品中酯类物质含量最大, 均占总物质的 40% 以上, 其中样品 1* 的酯类含量为 1068.20 $\mu\text{g/kg}$, 占比最高(54.33%), 含量最高的物质分别是异丁酸异戊酯、乙酸异戊酯、1-甲基乙酸丁酯、乙酸乙酯、乙酸异丁酯、乙酸丁酯等, 与之前学者的研究一致^[23-26]。样品 2*、3*、4* 酯类含量分别为 1038.45 $\mu\text{g/kg}$ (43.77%), 829.13 $\mu\text{g/kg}$ (51.80%), 1213.82 $\mu\text{g/kg}$ (51.73%)。果汁中酯类含量最高的物质均为异丁酸异戊酯, 该物质具有水果香、酯香^[26], 对香蕉汁香气有正向影响。结合酯类阈值可知异丁酸异戊酯、乙酸异戊酯、乙酸乙酯等上述 6 种酯类和丁酸乙酯是香蕉汁香味的重要组成部分。韦娜^[27] 采用 GC-MS 检测经果胶酶处理的香蕉酒, 发现果酒中含量最高的酯类是癸酸乙酯, 与本实验结果一致, 研究还指出随着存放时间延长, 癸酸乙酯含量会降低, 甚至消失。韦璐等^[11] 研究发现, 香蕉

经复合酶处理后再发酵, 果酒中相对含量最高的酯类为辛酸乙酯, 其次为癸酸乙酯, 与本实验结果存在差异。这可能与发酵前不同的酶处理、酿酒微生物及发酵工艺有关^[28]。

2.2.3 醇类物质比较 醇类物质同样是香蕉果汁果酒中重要的物质, 样品 3* 中醇类物质的总含量占比最高, 为 1282.27 $\mu\text{g/kg}$ (46.58%), 样品 1*、2* 及 4* 中含量和占比分别为 308.96 $\mu\text{g/kg}$ (15.56%)、530.51 $\mu\text{g/kg}$ (22.32%)、1609.35 $\mu\text{g/kg}$ (45.83%), 其中香蕉汁中含量最高的醇类物质为异戊醇, 具有花香和水果香气; 香蕉酒中含量最高的除乙醇外的醇类物质为苯乙醇, 具有玫瑰花香的面包香味和愉快的水果香气, 对果酒香味的形成有积极作用^[29]。

2.2.4 其他类物质比较 除了酯类和醇类, 果汁果酒中还含有其他的挥发性物质。由图 2 可知两种果汁分别都检出 4 种醛类物质, 样品 1* 中检出异丁醛、异戊醛、己醛和反式-2-己烯醛, 样品 2* 中检出异戊醛、己醛、反式-2-己烯醛和苯甲醛, 这些气味被描述为水果香和青草味, 果酒中未检出醛类物质, 说明果汁中醛类物质来自香蕉果实, 在发酵过程中转化为了其他物质。酮类和其他类物质含量较少, 不能单独对样品整体香气作出贡献, 但会与其他挥发性成分共同作用影响果汁果酒的风味。

2.3 香蕉果酒发酵前后挥发性成分 PCA 分析

主成分分析是利用降级的思维把多个指标转化为几个综合指标的统计方法, 可以反映组内样本重复性的好坏和组间样本差异性的大小^[30]。为了进一步研究香蕉果酒发酵前后的差异, 通过挥发性成分含量构建主成分分析模型, 如图 3 所示, PC1 方差贡献率为 61.3%, PC2 方差贡献率为 19.8%, 累计贡献率为 81.1%, 累计贡献率大于 80%, 判定该模型有效, 可用于后续分析。四个样品在 PCA 图中得到较好的区分, 样品 1* 位于第一象限, 样品 2* 位于第四象限, 样品 3* 和样品 4* 均位于第二、三象限。第一主成分将香蕉汁和香蕉酒区分, 第二主成分将两种工艺的香蕉汁区分。2-庚酮、乙酸异戊酯、乙酸异丁酯、异戊酸异戊酯、丁酸己酯、乙酸丁酯等挥发性成分对 PC1 正半轴贡献较大, 这些成分具有香蕉香、甜橙香、苹果香、热带水果香, 其中乙酸异戊酯是成熟香蕉果实的典型香气^[31]; 辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸己酯、异戊醇、苯乙醇、辛酸等挥发性成分对 PC1 负半轴贡献较大, 这些成分具有玫瑰香、蜂蜜香、酒精味、甜酒香、脂肪香和热带水果香^[32], 其中苯乙醇、辛酸乙酯、癸酸乙酯是发酵后才出现的挥发性成分。丁酸异丁酯、异丁醛、2-壬酮、 β -紫罗兰酮等挥发性成分对 PC2 正半轴贡献较大, 这些成分具有苹果香、菠萝香^[11]、朗姆酒的甜香、焦香、紫罗兰花香和香蕉香^[28-29]; 2-戊醇、正己醇、榄香素、反式-2-己烯醛等挥发性成分对 PC2 负半轴贡献较大, 这些成分具有水果香、花香^[28]、药香、油脂香和青草香^[33-34]。

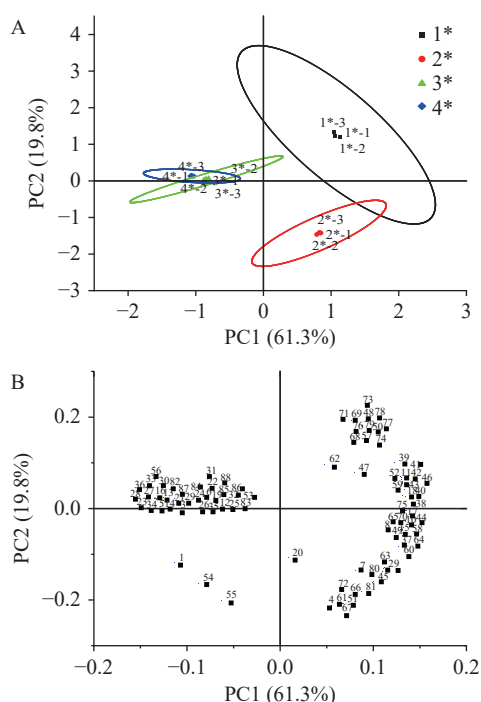


图3 香蕉果酒发酵前后 PCA 得分图(A)及载荷图(B)

Fig.3 PCA score diagram (A) and load diagram (B) before and after fermentation of banana wine

注: 1.异丁醇; 2.正丁醇; 3.3-甲基-2-丁醇; 4.2-戊醇; 5.异戊醇; 6.2,3-丁二醇; 7.正己醇; 8.2-庚醇; 9.2-辛醇; 10.3-辛烯醇; 11.顺式 5-辛烯-1-醇; 12.2-壬醇; 13.苯乙醇; 14.乙酸乙酯; 15.乙酸异丁酯; 16.丁酸乙酯; 17.乙酸丁酯; 18.1-甲基乙酸丁酯; 19.异戊酸乙酯; 20.乙酸异戊酯; 21.己酸乙酯; 22.3-己烯酸乙酯; 23.乙酸己酯; 24.丁酸, 1-甲基丁酯; 25.2-己烯酸乙酯; 26.辛酸甲酯; 27.辛酸乙酯; 28.乙酸苯乙酯; 29.辛酸丙酯; 30.壬酸乙酯; 31.癸酸甲酯; 32.辛酸, 2-丁酯; 33.9-癸酸乙酯; 34.癸酸乙酯; 35.2-甲基基辛酸酯; 36.辛酸 3-甲基丁酯; 37.异丁酸异丁酯; 38.1-甲基乙酸戊酯; 39.丁酸异丁酯; 40.丁酸丁酯; 41.异戊酸异丁酯; 42.丁酸异戊酯; 43.异戊酸丁酯; 44.异丁酸异戊酯; 45. α -甲基基异丁酸酯; 46.2-甲基丁酸-3-甲基丁酯; 47.异戊酸异戊酯; 48.正戊酸异戊酯; 49.丁酸己酯; 50.3-丁酸己烯酯 (E); 51.异硫氰酸氢糠酯; 52.3-甲基丁酸己酯; 53.月桂酸乙酯; 54.十四酸乙酯; 55.棕榈酸乙酯; 56.癸酸 3-甲基丁酯; 57.异丁醛; 58.异戊醛; 59.己醛; 60.反式-2-己烯醛; 61.苯甲醛; 62.2,3-丁二酮 2-戊酮; 63.2-己酮; 64.2-庚酮; 65.庚烯-2-酮; 66.2,5-辛二酮; 67.异丙基戊酮; 68.2-壬酮; 69. α -紫罗兰酮; 70. β -紫罗兰酮; 71.甲苯; 72.顺-1,3-二甲基环己烷; 73.2,2-二甲基乙烯基胺; 74.乙烯基环己烷; 75.1-异丙烯基-4-甲基-环己烯; 76.1-亚丁基-环己烷; 77.环辛二烯; 78.乙烯基环己烷; 79.2,5-二叔丁基苯酚; 80.榄香素; 81.1,1-二乙氧基乙烷; 82.异戊酸; 83.甲氧基苯酚; 84.连翘脂苷 B; 85.右旋萜二烯; 86.辛酸; 87.2,4-二叔丁基苯酚。

究其原因, 发酵生成的新的挥发性成分与酵母的生长代谢有关, 如苯乙醇是酵母代谢分解氨基酸(Ehrlich 途径)形成的代谢产物^[33,35], 脂肪酸乙酯等酯类物质则来源于酯化反应^[33]。

2.4 香蕉果酒发酵前后关键挥发性成分的确定

挥发性成分的强度能分析出香蕉汁和香蕉酒中重要的香气化合物, 但是不能全面真实地反映单个成分对整体香气的贡献大小, 为了进一步研究挥发性成分与感官评价之间的联系, 本研究通过测定香气活度

值来确定果汁和果酒中起主要作用的挥发性成分, 用挥发性成分的含量与阈值的比值来表示该物质在不同介质的香气活度值, 阈值取挥发性成分在水或 10% 乙醇中的阈值, 表 2 展示了果汁和果酒中 OAV 值大于 1 的挥发性成分, 分别是正己醇、乙酸乙酯、乙酸异丁酯、乙酸丁酯、丁酸异戊酯、异丁酸异戊酯、己醛、反式-2-己烯醛、丁酸乙酯、乙酸异戊酯、苯乙醇、异戊酸乙酯、己酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯, 这些物质一般被描述为花香、果香和青草味^[36]。其中果汁检出 10 种对风味有一定影响的挥发性成分, 包括 7 种酯类、2 种醛类和 1 种醇类; 果酒检出 7 种对风味有一定影响的挥发性成分, 包括 6 种酯类和 1 种醇类, 果汁和果酒共有物质有 2 种, 分别是丁酸乙酯和乙酸异戊酯。果汁与果酒中 OAV 值大于 1 的挥发性成分明显不同, 因此, 可以根据 OAV 值大于 1 的挥发性成分来区分果汁和果酒。

选取上述 OAV 大于 1 的挥发性成分, 以其含量构建主成分分析模型, 如图 4 所示, 样品 1* 分布在二、三象限, 与己醛、丁酸异戊酯、异丁酸异戊酯相关性高, 这些物质主要与青草味、香蕉味、洋梨味、杏味和桃味相关^[28-29]; 样品 2* 分布在一、四象限, 与乙酸丁酯、乙酸异丁酯、丁酸乙酯、反式-2-己烯醛、乙酸乙酯、正己醇、乙酸异戊酯相关性高, 这些挥发性成分与水果香、梨香、覆盆子香、青草香、溶剂味相

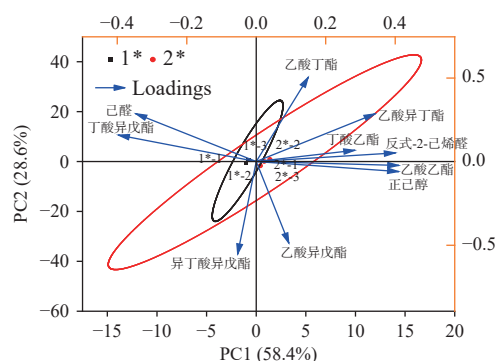


图4 果汁特征香气 PCA 载荷和得分双重图

Fig.4 PCA loading and score double plot of aroma characteristics of fruit juice

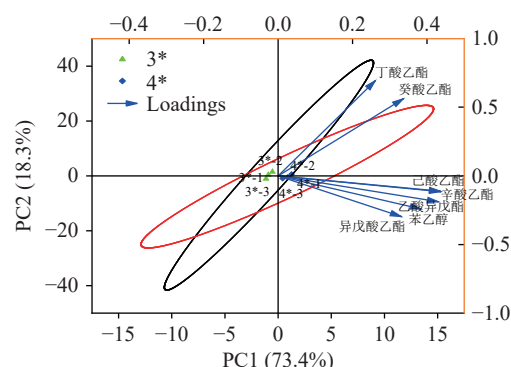


图5 果酒特征香气 PCA 载荷和得分双重图

Fig.5 PCA loading and score double plot of aroma characteristics of fruit wine

表 2 果汁果酒挥发性成分香气活度值
Table 2 Ador activity value of volatile compounds in fruit wine

挥发性成分	香气描述 ^[37-38]	含量(μg/kg)				阈值(μg/kg) ^[12,39-43]		OAV			
		1*	2*	3*	4*	水	10%乙醇	1*	2*	3*	4*
正己醇	水果香、甜香	49.36±1.52	76.37±4.63	—	—	5.6	—	13.64	8.14	—	—
乙酸乙酯	水果香、溶剂味	55.07±5.62	71.67±4.93	—	—	5	—	11.01	14.33	—	—
乙酸异丁酯	梨香、覆盆子香	47.01±2.05	52.39±1.93	—	—	25	—	1.88	2.09	—	—
乙酸丁酯	水果香	58.43±1.97	59.17±2.56	—	—	58	—	1.01	1.02	—	—
丁酸异戊酯	香蕉香、洋梨香	59.46±1.86	36.36±1.86	—	—	15	—	3.96	2.42	—	—
异丁酸异戊酯	杏香、桃香	368.06±10.2	402.71±18.9	—	—	200	—	1.84	2.01	—	—
己醛	水果香、青草味	100.4±2.67	64.95±5.66	—	—	5.17	—	20.08	12.99	—	—
反式-2-己烯醛	水果香、青草香	199.84±5.94	293.64±18.5	—	—	30	—	6.66	9.79	—	—
丁酸乙酯	强烈果香	24.35±2.3	26.77±1.36	22.59±1.03	24.31±4.14	20	20	1.22	1.34	1.13	1.22
乙酸异戊酯	香蕉香、苹果香、甜香	90.81±0.84	100.65±5.96	60.71±2.51	279.25±23.13	3	30	30.27	33.55	2.02	9.3
苯乙醇	玫瑰花香、特殊果香	—	—	752.12±72.36	1021.44±93.81	—	750	—	—	1	1.36
异戊酸乙酯	苹果香、桑葚香	—	—	3.02±0.62	4.36±1.06	—	3	—	—	1.01	1.45
己酸乙酯	甜香、果香、窖香	—	—	42.55±0.98	78.92±7.2	—	5	—	—	8.51	15.78
辛酸乙酯	杏香、奶香、甜酒香	—	—	16.25±2.86	24.97±6.22	—	2	—	—	8.13	12.49
癸酸乙酯	花香、甜香	—	—	872.72±3.85	910.02±16.2	—	200	—	—	4.36	4.55

注：“—”表示未检出。

关^[28-29,33]。如图 5 所示,样品 4*分布在一四象限,与丁酸乙酯、癸酸乙酯、己酸乙酯、辛酸乙酯、乙酸异戊酯、苯乙醇、异戊酸乙酯相关性强,这些物质主要给果酒带来杏香、奶油香、甜酒香、玫瑰花香、苹果香、香蕉香^[11,28-29]等积极的香气;样品 3*分布在二三象限,与样品 4*距离较近。由此可见,选取 OAV 值大于 1 的挥发性成分进行分析,可以更好地区分果汁和果酒,酶解和非酶解的样品,其中非酶解发酵果酒的整体风味偏弱,酶解后果汁和果酒中酯类成分香气较强,且发酵前后酯类成分有所变化。

2.5 香蕉果酒发酵前后感官评价

香蕉果酒发酵前后,感官评分有较大差异,如图 6 样品 1*的青草味评分明显高于样品 2*,这可能与样品 1*中含有较多己醛相关,该化合物的香气描述是水果香和青草香,样品 2*中含量升高的反式-2-己烯醛同样具有水果香和青草香,但己醛 OAV 值大于反

式-2-己烯醛的 OAV 值,因此己醛对香蕉果汁风味贡献值更大,样品 1*含己醛多,青草味就更重,感官评价结果与图 4 的 PCA 结果吻合;样品 3*除青草味和酒精味的评分高于样品 4*,其余香气描述分值均低于样品 4*,样品 3*青草味更重,推测与发酵前样品 1*己醛含量高相关,样品 4*酒精味更淡则推测与果胶酶的作用相关,果胶酶对香气种类的影响较小,但能促进香气间的相互作用,明显提高果酒香气的复杂性^[9],样品 4*中部分酒精味被丰满醇厚的花果香、甜香掩盖,因此闻起来酒精味更淡。两种果酒整体风味相似,但经果胶酶处理的果酒香气更加丰富饱满,结果与图 5 的 PCA 结果一致。由此可见,果胶酶前处理对果汁和果酒整体风味都有积极影响。

3 结论

本实验探究酶解对香蕉果酒发酵前后理化性质和挥发性成分的影响,结果表明经果胶酶处理的样品,发酵前香蕉汁的 TSS 和总酸较高,发酵后酒精度较高;通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术定量分析样品中的挥发性成分,在四个样品中共检出 87 种挥发性成分,其中酶解果汁和果酒香气成分分别有 47 和 43 种,非酶解果汁和果酒香气成分分别有 49 和 43 种;主成分分析及香气活度计算的结果表明异丁酸异戊酯、丁酸乙酯、丁酸异戊酯等 10 种物质是果汁的关键香气物质,发酵后关键香气物质转化为辛酸乙酯、癸酸乙酯、己酸乙酯等 7 种香气物质,发酵前后物质差异大,经果胶酶处理的香蕉汁青草味更淡,而且由该果汁发酵而成的果酒含更多对风味有积极影响的挥发性成分,与感官评价结果一致。由此可见,果胶酶处理可以有效去除果汁中的青草味,且后续发酵的果酒风味更佳。该研究可为香蕉果酒加工提供理论支持。

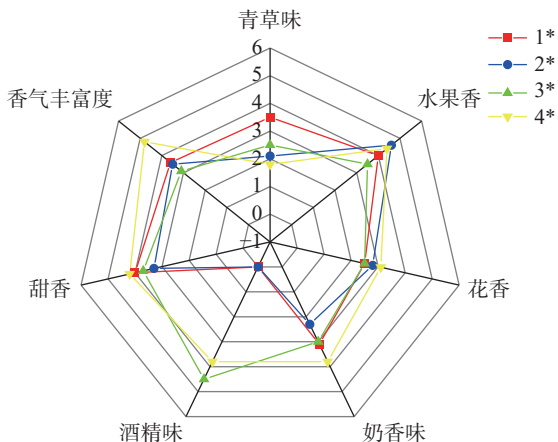


图 6 香蕉果酒发酵前后感官雷达图

Fig.6 Sensory radar chart of banana wine before and after fermentation

参考文献

- [1] FIALLOS-CÁRDENAS M, PÉREZ-MARTÍNEZ S, RAMIREZ A D. Prospectives for the development of a circular bioeconomy around the banana value Chain[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 30: 541–555.
- [2] 王全永, 欧燕芳. 我国香蕉产业标准化现状和对策[J]. *中国标准化*, 2021(3): 147–152. [WANG Quanyong, OU Yanfang. Present situation and countermeasures of banana industry standardization in China[J]. *China Standardization*, 2021(3): 147–152.]
- [3] ZOU F, TAN C, ZHANG B, et al. The valorization of banana by-products: Nutritional composition, bioactivities, applications, and future development[J]. *Foods*, 2022, 11(20): 3170.
- [4] ANA C, CRISTINA M R, FABIOLA C. Physicochemical and nutritional characteristics of banana flour during ripening[J]. *Food Chemistry*, 2018, 256: 11–17.
- [5] RANJHA M M A N, IRFAN S, NADEEM M, et al. A Comprehensive review on nutritional value, medicinal uses, and processing of banana[J]. *Food Reviews International*, 2020, 38(2): 199–225.
- [6] 杨凤, 刘灿灿, 邓贵明, 等. 香蕉营养品质与功能特性研究进展[J]. *广东农业科学*, 2022, 49(10): 146–154. [YANG Feng, LIU Cancan, DENG Guiming, et al. Research progress of banana nutritional quality and functional properties[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2022, 49(10): 146–154.]
- [7] 郝德兰. 香蕉采后催熟调控及低度香蕉酒的研制[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2019. [HAO Delan. Regulation of post-harvest ripening of banana and development of low-alcoholicity banana wine[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2019.]
- [8] 程拯艮. 果胶酶和浸渍处理对苹果酒品质特性影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. [CHENG Zhenggen. Effect of pectinase and maceration treatment on quality characteristic of apple wines[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.]
- [9] JIANG X H, LU Y Y, LIU S O. Effects of pectinase treatment on the physicochemical and oenological properties of red dragon fruit wine fermented with *Torulaspora delbrueckii*[J]. *LWT*, 2020, 132: 109929.
- [10] 温海祥, 江东文, 黄佳佳, 等. 香蕉果酒香气成分的 GC-MS 分析[J]. *酿酒科技*, 2012(2): 97–99. [WEN Haixiang, JIANG Dongwen, HUANG Jiajia, et al. GC-MS analysis of flavoring components of banana wine[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2012(2): 97–99.]
- [11] 韦璐, 杨昌鹏, 孙钦菊, 等. 香蕉果酒低温发酵过程中挥发性香气成分的变化[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(18): 231–238. [WEI Lu, YANG Changpeng, SUN Qiniu, et al. Changes of volatile flavor substances in fermentation process of banana wine produced by low temperature fermentation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(18): 231–238.]
- [12] 王轩, 周健, 明红梅, 等. 樱桃果酒酿酒酵母的筛选及香气成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(3): 124–130. [WANG Xuan, ZHOU Jian, MING Hongmei, et al. Screening of *saccharomyces cerevisiae* for the fermentation of cherry fruit wine and its aroma components analysis[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(3): 124–130.]
- [13] 李祥雨, 熊雅婷, 滕建文, 等. 基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析咸蛋黄热加工中的异味组分[J]. *食品科学*, 2022, 44(16): 292–300. [LI Xiangyu, XIONG Yating, TENG Jianwen, et al. Analysis of odor components in salted egg yolk during hot processing based on gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical analysis[J]. *Food Science*, 2022, 44(16): 292–300.]
- [14] 柏建玲, 莫树平, 张菊梅, 等. 香蕉酒发酵及胶清工艺技术研究[J]. *酿酒科技*, 2019(6): 86–90. [BAI Jianling, MO Shuping, ZHANG Jumei, et al. Fermentation & clarification technology of banana wine[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2019(6): 86–90.]
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 12456-2021 食品中总酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. [National Health and Family Planning Commission of the people's Republic of China. GB 12456-2021 Determination of total acids in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.]
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.225-2016 酒中乙醇浓度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the people's Republic of China. GB 5009.225-2016 Determination of alcohol concentration in wine[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.]
- [17] WU Y, PAN Q, QU W, et al. Comparison of volatile profiles of nine Litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) cultivars from southern China[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2009, 57(20): 9676–9681.
- [18] KANJANA M, PILAR RUIZ P C, THOMAS D, et al. Comparison of three lychee cultivar odor profiles using gas chromatography-olfactometry and gas chromatography-sulfur detection[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2007, 55(5): 1939–1944.
- [19] 程宏桢, 蔡志鹏, 王静, 等. 基于 GC-MS、GC-O 和电子鼻技术评价百香果酒香气特征[J]. *食品科学*, 2021, 42(6): 256–264. [CHENG Hongzhen, CAI Zhipeng, WANG Jing, et al. Combined use of GC-MS, GC-O and electronic nose technology to evaluate the aroma characteristics of passion fruit wine[J]. *Food Science*, 2021, 42(6): 256–264.]
- [20] 孙佳颢, 康文怀, 李慧, 等. 桑葚果酒发酵过程中的香气成分变化[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 307–316. [SUN Jiaxie, KANG Wenhui, LI Hui, et al. Changes of aroma composition during fermentation of mulberry wine[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(8): 307–316.]
- [21] 邹雪, 李然洪, 周靖, 等. 果胶酶处理对蓝莓半甜红酒风味成分影响的研究[J]. *酿酒科技*, 2013(9): 37–42. [ZOU Xue, LI Ranhong, ZHOU Jing, et al. Effects of pectinase addition on the flavoring components of blueberry semi-sweet red wine[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2013(9): 37–42.]
- [22] ZHANG L, MI S, LIU R, et al. Evaluation of volatile compounds during the fermentation process of yogurts by streptococcus thermophilus based on odor activity value and heat map analysis[J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 2020: 3242854.
- [23] 朱虹, 陈玉芬, 李雪萍, 等. 顶空固相微萃取气-质联用分析香蕉的香气成分[J]. *园艺学报*, 2007(2): 485–488. [ZHU Hong, CHEN Yufen, LI Xueping, et al. Determination of volatiles in harvested banana fruit by HS-SPME and GC-MS[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007(2): 485–488.]
- [24] 陶晨, 王道平, 杨小生, 等. 固相微萃取气相色谱质谱法分析香蕉中的香气成分[J]. *甘肃农业大学学报*, 2010, 45(4): 139–141. [TAO Cheng, WANG Daoping, YANG Xiaosheng, et al. Determination of aroma components of banana by SPME coupled with GC-MS[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2010, 45(4): 139–141.]
- [25] 张文灿, 林莹, 刘小玲, 等. 香蕉全果实果汁香气成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(3): 133–140. [ZHANG Wencan, LIN Ying, LIU Xiaoling, et al. Analysis of aroma components of

- whole banana juice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2010, 36(3): 133–140.]
- [26] 陈海婷. 香蕉特征香气成分分析及对甜味感知的影响[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021. [CHEN Haiting. Characterization of the aroma-active compounds in banana and their influence on perception of sweetness[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021.]
- [27] 韦娜. 减硫型香蕉果汁酒酿制关键技术及产品品质变化研究[D]. 海口: 海南大学, 2011. [WEI Na. Study on the brewing key technologies of sulfur-reduction banana wine mixed with juice and its quality changes during storage[D]. Haikou: Hainan University, 2011.]
- [28] 王飞, 王晓宇, 赵擎豪, 等. 果酒增香酿造技术研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 244–252. [WANG Fei, WANG Xiaoyu, ZHAO Qinghao, et al. Research progress on aroma-enhancing techniques of fruit wine brewing: A review[J]. *Food Science*, 2023, 44(13): 244–252.]
- [29] 谢欣雨, 胡新, 石潇瀑, 等. 果酒香气形成影响因素研究进展[J]. 阜阳师范大学学报(自然科学版), 2022, 39(2): 39–47. [XIE Xinyu, HU Xin, SHI Xiaopu, et al. Research progress in the study of factors influencing aroma formation of fruit wines[J]. *Journal of Fuyang Normal University (Natural Science)*, 2022, 39(2): 39–47.]
- [30] 杨玉, 李红艳, 邓泽元, 等. 基于主成分分析方法筛选乳酸菌发酵葛根酵素[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(3): 196–205. [YANG Yu, LI Hongyan, DENG Zeyuan, et al. Screening of *Pueraria lobata* enzymes fermentation by lactic acid bacteria based on principal component analysis[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(3): 196–205.]
- [31] YIMING F, MIN L, YANAN O, et al. Comparative study of aromatic compounds in fruit wines from raspberry, strawberry, and mulberry in central shaanxi area[J]. *Food & Nutrition Research*, 2015, 59(1): 29290.
- [32] HUGUES G, PASCAL P, LAURIE L, et al. *Brettanomyces anomalus*, a double drawback for cider aroma[J]. *LWT*, 2018, 102: 214–222.
- [33] 马宁原, 姚凌云, 孙敏, 等. 基于 GC-IMS 和 HS-SPME-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. Analysis of the effect of different fermentation methods on the aroma composition of yellow peach wine based on headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Science*, 2023, 44(12): 306–314.]
- [34] 陈臣, 田同辉, 刘政, 等. 基于感官评价、GC-IMS 和 GC-MS 的中式酸凝奶酪挥发性风味比较研究[J]. *食品科学*, 2023, 44(16): 228–236. [CHEN Chen, TIAN Tonghui, LIU Zheng, et al. Comparative study on volatile flavor of Chinese acid-curd cheese using sensory evaluation, gas chromatography-ion mobility spectrometry and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2023, 44(16): 228–236.]
- [35] 程思琦, 叶冬青, 孙悦. 功能微生物对葡萄酒风味的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2023, 42(11): 2756–2766. [CHENG Siqi, YE Dongqing, SUN Yue. Progresses on the effects of functional microorganisms on wine flavor[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(11): 2756–2766.]
- [36] 李涛, 李昀哲, 冯翰杰, 等. 不同发酵工艺对石榴酒香气质量的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(8): 137–147. [LI Tao, LI Yunzhe, FENG Hanjie, et al. Effect of different fermentation processes on aroma quality of pomegranate wine[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(8): 137–147.]
- [37] TAN F, WANG P, ZHAN P, et al. Characterization of key aroma compounds in flat peach juice based on gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O), odor activity value (OAV), aroma recombination, and omission experiments[J]. *Food Chemistry*, 2021, 366: 130604.
- [38] SALASMILLÁN J Á, AZNAR A, CONESA E, et al. Fruit wine obtained from melon by-products: Physico-chemical and sensory analysis, and characterization of key aromas by GC-MS[J]. *Foods*, 2022, 11(22): 3619.
- [39] JAGATIĆ K A, PREINER D, TOMAZ I, et al. Aroma profile of monovarietal pét-nat ciders: The role of croatian traditional apple varieties[J]. *Horticulturae*, 2022, 8(8): 689.
- [40] AZHU V Z, FAN X, ZHANG H Q, et al. Impact of thermal and nonthermal processing technologies on unfermented apple cider aroma volatiles[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(3): 924–929.
- [41] 李明瑕, 刘春风, 王壬, 等. 黄桃果酒发酵工艺优化及香气成分分析[J]. *食品与生物技术学报*, 2021, 40(10): 39–49. [LI Mingxia, LIU Chunfeng, WANG Ren, et al. Optimization of fermentation process and analysis of aroma components of yellow peach wine[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2021, 40(10): 39–49.]
- [42] 李曼祎, 张亚萌, 刘春风, 等. 枸杞果酒发酵工艺优化及香气成分分析[J]. *安徽农业大学学报*, 2021, 48(5): 865–872. [LI Manyi, ZHANG Yameng, LIU Chunfeng, et al. Optimization of Fermentation process and analysis of aroma components in wolfberry wine[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2021, 48(5): 865–872.]
- [43] CAO W, SHU N, WEN J, et al. Characterization of the key aroma volatile compounds in nine different grape varieties wine by headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS), odor activity values (OAV) and sensory analysis[J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2767.