

郭小雨, 李梦丽, 张涛. 百香果发酵型果酒制备及其风味品质分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(20): 290–299. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120089

GUO Xiaoyu, LI Mengli, ZHANG Tao. Preparation of Fermented Passion Fruit Wine and Its Flavor Quality Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(20): 290–299. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120089

· 分析检测 ·

百香果发酵型果酒制备及其风味品质分析

郭小雨¹, 李梦丽¹, 张涛^{1,2,*}

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122;

2. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要: 为了探究发酵型百香果果酒品质特征, 本研究利用高效液相色谱法、气相色谱-质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 和电子鼻技术, 结合感官评价方法, 通过检测有机酸含量、氨基酸含量、挥发性物质及感官特性等指标综合分析发酵型百香果果酒的风味与品质。结果表明, 酒精发酵后, 百香果果酒柠檬酸含量最高, 总游离氨基酸含量为 22.08 mg/100 g, 样品色泽强度显著 ($P<0.05$) 降低。感官评价表明, 酒体整体感觉凉爽、酒香浓郁。在风味方面, 百香果果酒中共检测出 88 种挥发性物质, 主要为酯、醇和酮。其中, 主要呈香物质 (OAV>1) 为丁酸乙酯、苯乙醇、己酸乙酯等。综上, 经酵母发酵后的百香果果酒风味与原果汁区别较大, 果酒的香气更丰富。

关键词: 百香果, 发酵果酒, 有机酸, 氨基酸, 风味

中图分类号: TS262.7; O657.63 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2024)20-0290-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120089



本文网刊:

Preparation of Fermented Passion Fruit Wine and Its Flavor Quality Analysis

GUO Xiaoyu¹, LI Mengli¹, ZHANG Tao^{1,2,*}

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To explore the quality characteristics of fermented passion fruit wine, this study used high performance liquid chromatography, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), electronic nose technology and sensory evaluation methods to determine its organic acid content, amino acid content, volatile substances and sensory properties. The results showed that passion fruit wine had the highest citric acid content and a total free amino acid content of 22.08 mg/100 g after alcoholic fermentation. The color intensity of the samples was significantly ($P<0.05$) reduced. Sensory evaluation indicated that the whole feeling of the wine was soft and refreshing, and the aroma was rich. In terms of flavor, a total of 88 volatile substances were detected in passion fruit wine, mainly including esters, alcohols and ketones. Among them, the main aromatic substances (OAV>1) were ethyl butyrate, phenethyl alcohol and ethyl caproate. In summary, the flavor of passion fruit wine fermented by yeast was quite different from that of the original fruit juice, and the aroma of fruit wine was richer.

Key words: passion fruit; fermented fruit wine; organic acids; amino acid; flavor

百香果 (*Passiflora edulis Sims*) 属于西番莲属^[1], 在中国栽培于广东、海南和中国台湾等地区。百香果通常作为新鲜水果或果汁食用, 因其独特的风味特性而广受欢迎。百香果富含有机酸、氨基酸和生物

活性物质等各种营养成分, 具有提神醒脑、润肠通便等多种功能特性^[2]。百香果是世界上含有芳香物质最多的水果之一, 已经鉴定出有超过 165 种芳香物质^[3], 具有花香和果香的气味特征。目前, 百香果的

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 广西壮族自治区崇左市科技计划项目 (崇科 20210711)。

作者简介: 郭小雨 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工新技术, E-mail: 6200113028@stu.jiangnan.edu.cn。

* 通信作者: 张涛 (1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: zhangtao@jiangnan.edu.cn。

利用方式主要以现吃现配型原果汁调配饮品和果汁调配型饮料为主, 以及少量的果脯、果酱产品。因此, 为扩大百香果的应用范围, 发酵型果酒开发引起了广泛关注。

果酒发酵是水果深加工的一种有前景的方法。TANGÜLER 等^[4]使用不同的酿酒酵母菌株生产苹果酒, 从而产生了最终的苹果酒。酿酒酵母菌株利用果汁原料发酵成果酒, 经过发酵丰富了产品的风味化合物^[5]。其次, 发酵过程中, 微生物代谢释放出具有抗氧化特性的生物活性化合物^[6], 例如柠檬酸和抗坏血酸和生育酚。因此, 与果汁相比, 发酵果酒可以保留或改善发酵水果产品的营养价值, 延长其保质期, 保留其品质。

目前国内外对百香果酒的研究局限于酿造工艺和抗氧化性能, 鲜见其果汁酒与原果汁间风味特征差异比较的相关报道。另外, 可以通过发酵挖掘百香果的应用潜力。本文以广西百香果为原料, 创制百香果特色发酵型果酒, 采用主要理化指标分析、现代食品风味分析技术等对百香果果酒品质进行评价, 以期促进百香果果酒产业发展。这将有助于进一步调整百香果加工产业结构, 对加快地方农产品加工产业经济发展和增效、增收起到积极的推动作用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

百香果 市售; 果酒专用酵母(SY 型) 安琪酵母有限公司; 果胶酶(30000 U/g, 食品级) 河南万邦实业有限公司; 2,4,6-三甲基吡啶(内标) 美国 Merck 公司; 焦亚硫酸钾(食品级) 河南天源生物科技有限公司; 乙酸钠 分析纯, 其他所有化学品均为国药集团化学试剂有限公司(中国上海)。

高速冷冻离心机、小型超高速离心机 德国 Eppendorf 公司; DR-A1-Plus 型阿贝折光仪 日本 ATAGO 公司; GCMS-QP2010 气质联用仪 日本 Shimadzu 公司; Heracles II 快速气相电子鼻 法国

Alpha MOS 有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 百香果酒发酵工艺 参考文献 [7] 中的方法, 设计工艺如下。预处理: 挑选无虫害、新鲜成熟的百香果, 清水冲洗两遍后, 切开展取出果肉备用。调节 pH: 用小苏打调节百香果果汁 pH 为 3.5 左右。酶解: 加入 0.2% 的果胶酶, 50 ℃ 酶解 2 h。主发酵: 将果酒专用酵母于 37 ℃ 无菌水中活化 0.5 h。百香果果汁中接种 1.0% 活化后的酵母, 初始糖度用白砂糖调整至 20°Brix, 22 ℃ 恒温发酵 7 d。后发酵: 倒罐密封后于 4 ℃ 发酵 30 d。澄清灌装: 添加 0.2 g/L 壳聚糖澄清果酒, 过 0.22 μm 滤膜精滤, 巴氏杀菌后灌装。

1.2.2 百香果果酒感官评价 百香果果酒感官评价参考 GB/T 15038-2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》进行评定。感官评价由经过培训的 10 人(5 男 5 女)完成, 对其从色泽、香气、口感和典型性进行感官评分, 评分标准见表 1。

1.2.3 香果果酒的理化性质分析 参照程新^[8]的方法利用 HPLC 检测有机酸含量。样品过 0.22 μm 滤膜待用。色谱条件为: Ecosil C₁₈ 柱; 柱温 30 ℃、UV 检测器(波长为 210 nm); 流动相: 5% 甲醇(v/v)、pH 用磷酸调至 3.0、流速为 0.8 mL/min; 进样量为 10 μL。色差测定仪可以对百香果果酒色度进行检测^[9]。检测光源为 D65, 色度空间选取 L^* , a^* , b^* 。白度(WI)计算公式如下:

$$WI=100-\sqrt{(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}}$$

1.2.4 百香果果酒中的游离氨基酸含量的检测

1.2.4.1 样品制备 百香果果酒中游离氨基酸含量的检测参考张宾乐^[10]的方法。用 10% 三氯乙酸(w/v)等体积稀释样品, 静置 1 h。取试液进行 10000 r/min 离心 10 min。将适量上清液用 0.22 μm 滤膜过

表 1 百香果果酒感官评定标准
Table 1 Sensory evaluation standards of passion fruit wine

指标	评价标准	感官评分(分)
色泽(20分)	百香果果酒呈浅红色或黄色, 澄清透明, 光泽度好, 酒液均匀	15~20
	百香果果酒呈浅红色或黄色, 澄清度良好, 光泽度一般, 酒液较均匀	8~14
	百香果果酒应有的浅红色或黄色不明显, 酒液浑浊, 缺少自然感	0~7
香气(30分)	百香果果酒果香和酒香协调, 香气浓郁, 纯正	25~30
	百香果果酒果香和酒香协调, 香气不浓郁	16~24
	百香果果酒果香和酒香非常淡, 但无不良气味	7~15
	百香果果酒没有酒香和果香, 但无不良气味	0~7
	百香果果酒酒体丰满, 口感舒适, 纯正爽口, 无涩味	25~30
口感(30分)	百香果果酒酒体较完整, 口感较好, 纯正爽口, 无涩味	16~24
	白香果果酒酒体较完整, 口感平淡, 无涩味	7~15
	百香果果酒酒体较完整, 口感粗糙, 有稍微涩味	0~7
	酒体组分完整协调, 具有独特百香果的风格	15~20
典型性(20分)	酒体组分比较完整, 具有良好的百香果风格	8~14
	酒体组分完整, 但百香果风格不突出	0~7

滤,后续用于色谱分析。

1.2.4.2 色谱条件 色谱柱: Hypersil ODS-2 色谱柱、柱温为 40 ℃、UV 检测器(波长为 338 nm); 流动相 A: 27.6 mmol/mL 乙酸钠(醋酸调节至 pH7.2); 三乙胺:四氢呋喃=500:0.11:2.5(v/v/v)混合均匀。流动相 B: 80.9 mmol/mL 乙酸钠(醋酸调节至 pH7.2), 然后再加入 2 倍体积的乙腈和甲醇混合备用。流速为 1.0 mL/min、进样量为 10 μ L。

1.2.5 电子鼻 取 5.0 mL 百香果果酒于 20 mL 样品瓶中,采用 Heracles II 快速气相电子鼻分析 2 个样品的气味特征^[11]。采用两根不同极性的色谱柱 DB-5 和 DB-1701(10 m $\pm$ 0.18 mm; DB-5 为非极性色谱柱, DB-1701 为低/中等极性色谱柱), 一次性注射进样, 双柱同时分析。使用烷烃 C6~C16 标准溶液计算 Kovats 指数, 即保留指数, 是使用最广泛并被国际上公认的定性分析法, 为色谱定性分析的重要参数之一。再利用仪器自带数据处理软件 Alphasoftware V 12.44 和数据 Aroma Chem Base 对检测的化合物进行分析。

1.2.6 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)检测 称取 3.0 mL 样品于 20 mL 样品瓶中密封, 插入已经老化的 80 μ m CAR/PDMS 萃取头, 60 ℃ 顶空萃取 40 min, 进行 GC-MS 分析^[12]。

1.2.6.1 GC 条件 色谱条件: DB-WAX 毛细管色谱柱(30.0 m $\times$ 320 μ m, 0.25 μ m), 载气为氦气。升温程序: 40 ℃ 保温 2 min, 以 5 ℃/min 升温至 160 ℃ 后保温 2 min, 以 10 ℃/min 升温至 230 ℃ 后保温 7 min。

1.2.6.2 MS 条件 质谱条件及分析: 质谱电离方式为 EI, 电子能量为 70 eV, 温度设定在 230 ℃。通过计算机和人工检索处理, GC-MS 鉴定出的挥发性化合物使用 NIST Library 和 Wiley Library 进行定性分析, 香气物质的 RI 值与保留指数网站(<https://webbook.nist.gov/chemistry>)上的 RI 值对照定性, 使用 2,4,6-三甲基吡啶作为内标进行相对定量。香气物质含量计算公式如下:

$$C_i = \frac{A_i}{A_s} \times C_s$$

式中: C_i 为待测物的质量浓度, μ g/L; C_s 为内标物(2,4,6-三甲基吡啶)质量浓度, μ g/L; A_i 为待测物的峰面积; A_s 表示内标物的峰面积。

1.2.7 气味活性值(OAV)的计算 参考 Ye 等^[13] 的方法检测气味活性值。气味活性值(OAV)是通过 GC-MS 等仪器定量的风味物质含量与其嗅觉阈值(人所能闻到的最低浓度)的比值来评估该风味物质对于整体风味的贡献大小。当 OAV>1 时, 表明挥发性化合物对样品挥发性风味特征的形成起主要作用, 而 OAV<1 化合物的贡献较小。

1.3 数据处理

采用 Origin Pro 2018、SIMCA 14.1 以及 SPSS

26 等软件对数据进行绘图及分析, 所有样品进行 3 次平行试验, 结果以平均值 $\pm$ 标准差形式。单因素方差分析、Tukey 检验比较各组之间的差异, 显著性差异水平取 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 百香果果酒的感官评价

专业评价小组根据感官评分标准进行综合评定, 结果见图 1。色泽: 18 分, 酒体呈橙红色且透亮清明; 香味: 27 分, 百香果发酵型果酒百香果风味突出、酒香浓郁; 口感: 28 分, 整体丰满, 口感舒适, 无涩味; 典型性: 17 分, 酒体组分完整协调, 具有独特百香果风味。百香果果酒整体口感风味较优, 综合评分为 90 分。

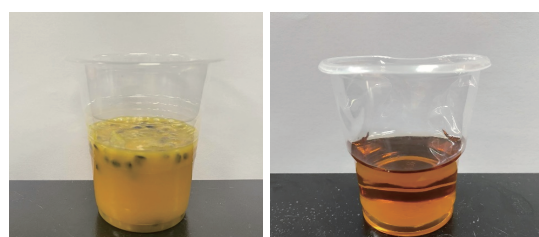


图 1 百香果果汁(左)和果酒(右)的对比
Fig.1 Comparison of passion fruit juice (left) and fruit wine (right)

2.2 百香果果汁和果酒的理化性质分析

百香果中的有机酸对化学稳定性和营养、风味

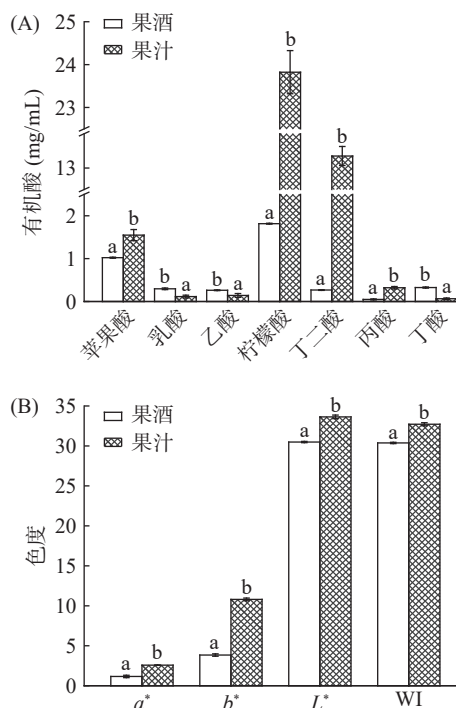


图 2 百香果果汁及果酒中的有机酸含量(A)和色泽变化(B)

Fig.2 Organic acid concentration (A) and color change (B) in passion fruit juice and fruit wine

注: 相同类别内的不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$); $L^*=0$ 为黑色, $L^*=100$ 为白色; $-a^*$ 表示偏绿程度, $+a^*$ 表示偏红程度; $-b^*$ 表示偏蓝程度, $+b^*$ 表示偏黄程度, WI 表示白度。

的贡献方面至关重要^[14-15]。由图 2A 可知,发酵结束时,样品中检测到多种有机酸,主要为柠檬酸、苹果酸和丁酸等。其中柠檬酸含量最高(1.82 mg/mL),属柠檬酸优势型,这种优势和总体比例与文献[16]中研究结果一致。其次为苹果酸(1.02 mg/mL),富马酸含量最低。发酵后,柠檬酸、丁二酸和苹果酸含量均显著下降,但乳酸显著增加($P<0.05$)。上述现象是因为苹果酸在酒精发酵过程中被转化成酒精或生成可改善果酒感官特征的乳酸,此过程可降低酒体酸度,且乳酸是酵母酒精发酵过程中的主要羧酸^[17]。如图 2B 所示,发酵后观察到样品色泽强度显著($P<0.05$)降低。发酵后的 L^* 、 a^* 和 b^* 值均降低。其中,与原百香果果汁相比,亮度和 a^* 均降低,这与样品花青素色素的减少有关^[18]。果酒的蓝色调增加,可能是与百香果种子经发酵后释放出深色色素导致 b^* 值的

变化有关^[19]。

2.3 百香果果汁和果酒中的氨基酸分析

由图 3 可知,果汁酒和原果汁中均检测到 18 种游离氨基酸,总游离氨基酸含量为 22.08~325.61 mg/100 g,8 种必需氨基酸含量为 5.28~43.17 mg/100 g。其中,与百香果果汁相比,百香果果酒的甜味氨基酸(Thr、Gly、Ala、Pro、Ser)的占比增加了 5.90%,苦味氨基酸(His、Met、Arg、Val、Leu、Ile、Tyr、Phe)含量也显著下降($P<0.05$)。这些变化对于果酒的感官品质产生了正面贡献。发酵过程中,酵母菌利用百香果中的营养物质促进了自身生长,间接地消耗了部分氨基酸。GABA 是一种新型功能性因子,具有促进睡眠等功效^[20]。检测发现发酵果酒中的 GABA 含量为 1.38 mg/100 g。经完全水解后。两个样品中的氨基酸含量都有所增加。

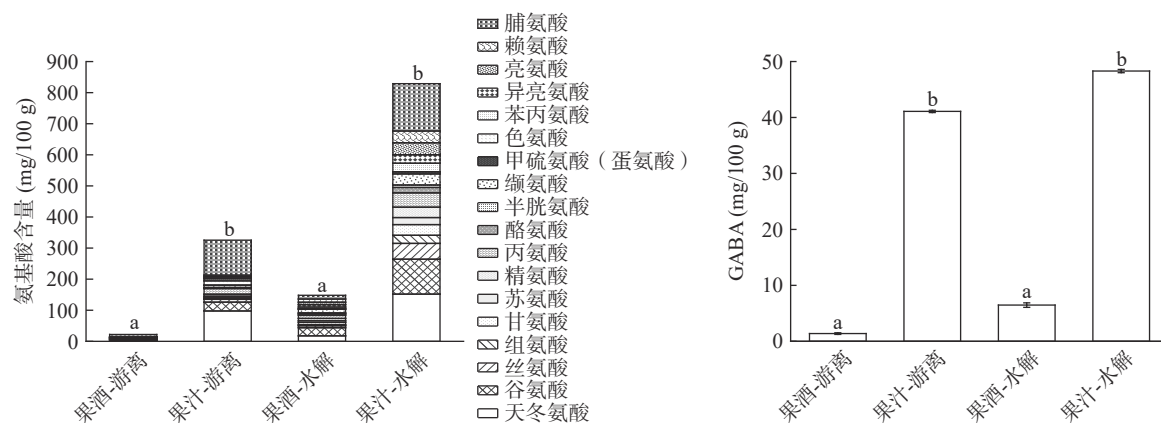


图 3 百香果果汁及果酒的氨基酸含量

Fig.3 Amino acid concentration of passion fruit juice and fruit wine

注:不同小写字母表示,果汁与果酒的游离氨基酸或水解氨基酸数据差异显著, $P<0.05$; 水解指水解氨基酸;游离指游离氨基酸。

2.4 电子鼻分析

运用 Heracles II 快速气相电子鼻分析两组样品的风味特征,并进行主成分分析(PCA)。如图 4 所示,电子鼻雷达图中数字 1 和 2 表示 DB-5 色谱柱和 DB-1701 色谱柱,14.80-1-A 表示 DB-5 柱子保留时间为 14.80 的出峰信息。由检测器 1 检测出的主要差异性特征风味物质为 1-丁醇(22.97-1-A)和 1-戊醇(34.45-1-A);由检测器 2 检测出的主要差异性特征风味物质为丙酮(31.03-2-A)和丁酸己酯(47.51-2-A),综合两种检测器的结果可知样品间的特征性风味物质为 1-丁醇、1-戊醇和丙酮、丁酸己酯。其中,1-丁醇具有甜味、酒精味^[21];1-戊醇具有甜美宜人的气味和烘烤味,且醇类物质的风味阈值较大,对整体风味贡献较小^[22];丙酮具有甜味、芬芳的气味,峰面积差异大且风味阈值较大,由此对果酒的风味贡献较小^[23];丁酸己酯具有果味和甜味,峰面积差异大且风味阈值较小,由此对果酒的风味贡献较大^[24]。这表明经过发酵后百香果果酒的风味物质比百香果果汁中更为丰富,与马懿等^[7]发酵猕猴桃果酒电子鼻结论一致。

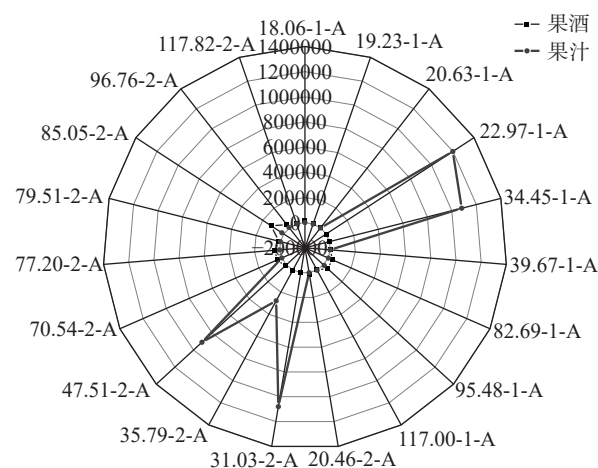


图 4 百香果果汁及果酒中的电子鼻雷达图
Fig.4 Electronic nasal radar diagram of passion fruit juice and fruit wine

由 PCA 分析图可知(图 5),第一主成分的方差贡献率为 99.79%,第二主成分的方差贡献率为 0.15%,两者的总贡献率为 99.94%,表明此结果能较好反应样品间的风味差异。两者风味差异较大,整体

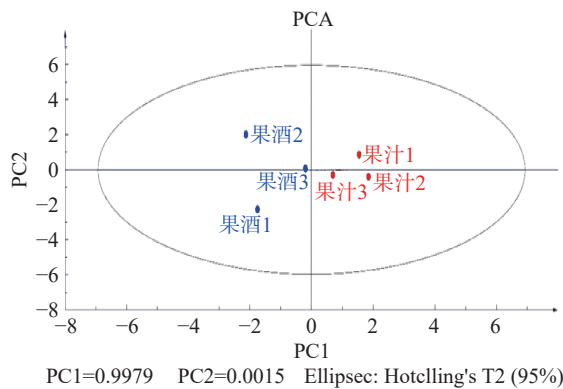


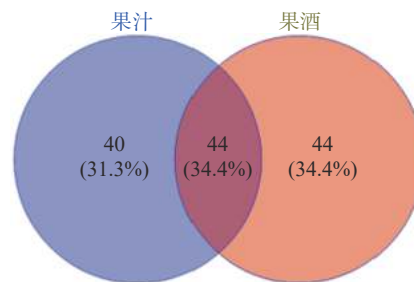
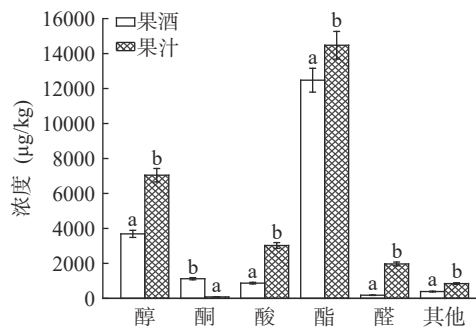
图 5 百香果果汁及果酒中的主成分分析结果

Fig.5 Analysis diagram of principal components of passion fruit juice and fruit wine

区分度较好,PCA 方法适用于百香果果酒发酵前后挥发性成分分析^[25]。由于 PC1 贡献率远远大于 PC2,因此样品差异主要体现在 PC1 轴方向每个样本簇之间的距离。果汁和果酒样品组则分别处于 PC1 正负半轴上,说明酵母发酵对百香果风味有较大影响^[26],与百香果果汁差异较大。因此,说明百香果果酒感官特征变化显著,可以采用电子鼻技术对原果汁和果汁酒进行区分。

2.5 百香果果汁和果酒中的 GC-MS 结果分析

香气是评价果酒品质的重要指标,也决定了消费者的接受程度和偏好。顶空固相微萃取气相色谱-质谱联用技术、气相色谱-嗅闻联用技术是研究食品中挥发性成分的主要方法^[27]。百香果果酒的挥发性物质分布主要与发酵、酶促反应和脂质氧化过程密切相关^[28]。由图 6 和表 2 可以看出,从这 2 种样品

图 6 百香果果汁及果酒中的挥发性物质含量和韦恩图
Fig.6 Volatile content diagram and Wayne diagram of passion fruit juice and fruit wine

中共检测出 128 种挥发性风味物质,包括 24 种醇类、12 种酸类、11 种醛类、46 种酯类、13 种酮类和 22 种其他物质。样品的香气描述可查阅文献^[29]和相关网站。

由表 2 可知,百香果果酒和百香果果汁中分别检测到 88 种和 84 种挥发性风味物质。经过发酵后的百香果果酒的风味物质种类比百香果果汁增加了 4.76%,主要增加了酮类和酯类。这些变化主要与酵母发酵过程中的酯化反应等有关,与马懿等^[7]研究结

表 2 百香果果汁及果酒中的 GC-MS 数据分析表及气味描述

Table 2 GC-MS data analysis table and odor description of passion fruit juice and fruit wine

编号	挥发性风味物质	气味描述	RI(文献值)	RI(计算值)	浓度(μg/L)		定性方式
					果汁	果酒	
醛类							
1	乙醛	果味	702	680	130.36±3.56	—	MS, RI
2	乙缩醛	果味、酒味	892	856	471.42±12.88	—	MS, RI
3	戊醛	果味、坚果味	979	954	—	92.21±2.52	MS, RI
4	己醛	脂肪、绿色	1083	1057	—	1.28±0.06	MS, RI
5	辛醛	脂肪、蜂蜜味	1289	1260	—	12.53±0.34	MS, RI
6	壬醛	脂肪、玫瑰	1391	1362	65.46±1.79	—	MS, RI
7	糠醛	杏仁味	1462	1439	203.94±5.57 ^b	45.16±1.23 ^a	MS, RI
8	安息香醛	苦杏仁、果味	1520	1499	1018.61±27.83	—	MS, RI
9	5-甲基糠醛	焦糖味、甜味	1570	1548	4.17±0.11	—	MS, RI
10	苯乙醛	绿色、风信子	1640	1617	64.24±1.76 ^b	28.16±0.77 ^a	MS, RI
11	月桂醛	脂肪、木质味	1711	1677	9.80±0.27	—	MS, RI
酮类							
12	丙酮	甜味	819	786	—	59.17±1.62	MS, RI
13	2-戊酮	果味	981	953	—	92.21±5.25	MS, RI
14	普莱贡酮	薄荷味	1661	1671	—	1.33±0.04	MS, RI
15	2-庚酮	果味、肉桂	1182	1155	—	155.45±4.25	MS, RI
16	3-辛酮	薰衣草	1253	1223	2.33±0.06	—	MS, RI
17	甲基庚烯酮	脂肪、绿色	1338	1309	—	136.51±3.73	MS, RI

续表 2

编号	挥发性风味物质	气味描述	RI(文献值)	RI(计算值)	浓度(μg/L)		定性方式
					果汁	果酒	
18	2-壬酮	玫瑰	1390	1360	—	45.25±1.24	MS, RI
19	异佛尔酮	薄荷	1591	1376	—	5.89±0.16	MS, RI
20	1-辛烯-3-酮	蘑菇	1300	1306	40.87±1.12	—	MS, RI
21	苯乙酮	甜味、樱桃味	1647	1626	10.80±0.30	—	MS, RI
22	大马士革酮	果味、玫瑰	1801	1792	—	15.12±0.41	MS, RI
23	香叶丙酮	绿色、花香	1841	1821	1.78±0.05 ^a	713.05±19.48 ^b	MS, RI
24	2-十五烷酮	脂肪、花香	2019	1984	27.80±0.76 ^a	51.63±1.41 ^b	MS, RI
醇类							
25	乙醇	甜味、果味	932	908	471.42±1.88 ^b	419.33±11.46 ^a	MS, RI
26	2-戊醇	绿色	1119	1109	—	75.30±2.06	MS, RI
27	异丁醇	甜味、葡萄酒	1092	1131	709.68±19.39	—	MS, RI
28	1-丁醇	甜味、酒精味	1142	1133	—	30.83±0.84	MS, RI
29	桉油醇	樟脑	1213	1174	2.82±0.08 ^a	4.57±0.12 ^b	MS, RI
30	异戊醇	威士忌	1209	1193	2451.02±66.96	—	MS, RI
31	1-戊醇	甜美、燃烧味	1250	1226	—	33.27±0.91	MS, RI
32	2-庚醇	果味、绿色	1320	1292	45.58±1.25	—	MS, RI
33	1-己醇	绿色、果味	1355	1324	368.30±10.06 ^a	905.99±24.75 ^b	MS, RI
34	2-丁氧基乙醇	醚状	1405	1375	10.81±0.30 ^a	92.09±2.52 ^b	MS, RI
35	2-辛烯-1-醇	坚果味、绿色	1614	1617	13.59±0.37	—	MS, RI
36	2-乙基己醇	甜味、花香	1491	1457	11.21±0.31 ^a	134.11±3.66 ^b	MS, RI
37	2-壬醇	绿色、果味	1521	1484	37.27±1.02 ^a	210.05±5.74 ^b	MS, RI
38	芳樟醇	花香	1547	1512	258.44±7.06	—	MS, RI
39	1-辛醇	玫瑰、草本味	1557	1523	73.77±2.02	—	MS, RI
40	1-壬醇	橙子味、脂肪	1660	1623	43.81±1.20	—	MS, RI
41	糠醇	焦糖味	1660	1628	139.35±3.81 ^b	46.99±1.28 ^a	MS, RI
42	1-癸醇	花香、脂肪	1760	1724	31.17±0.85 ^a	133.87±3.66 ^b	MS, RI
43	香茅醇	玫瑰	1765	1728	24.06±0.66 ^a	55.25±1.51 ^b	MS, RI
44	橙花醇	玫瑰、苦味	1797	1765	93.41±2.55 ^a	99.18±2.71 ^b	MS, RI
45	苯甲醇	果味、甜味	1870	1845	1015.16±27.73 ^b	781.64±21.35 ^a	MS, RI
46	苯乙醇	花香、甜味	1906	1880	1179.30±32.22 ^b	354.27±9.68 ^a	MS, RI
47	呋喃醇	甜味、果味	2031	1993	10.38±0.28 ^a	312.34±8.53 ^b	MS, RI
48	反式橙花醇	花香、甜味	2033	1998	53.65±1.47	—	MS, RI
酯类							
49	乙酸甲酯	果味	828	801	—	59.17±1.26	MS, RI
50	乙酸乙酯	菠萝、甜味	888	854	1789.81±48.90 ^b	1043.29±28.50 ^a	MS, RI
51	丙酸乙酯	朗姆酒、菠萝	953	934	—	66.94±1.83	MS, RI
52	丁酸甲酯	果味	982	962	—	572.58±15.64	MS, RI
53	乙酸异丁酯	果味	1012	991	—	41.78±1.14	MS, RI
54	丁酸乙酯	菠萝、甜味	1035	1015	174.79±4.78 ^a	2696.22±73.66 ^b	MS, RI
55	3-甲基丁酸乙酯	果味、葡萄味	1068	1044	—	1.47±0.04	MS, RI
56	乙酸丁酯	果味、香蕉味	1074	1049	—	157.00±4.29	MS, RI
57	乙酸异戊酯	香蕉	1122	1093	21.25±0.58 ^a	128.27±3.50 ^b	MS, RI
58	戊酸乙酯	果味	1134	1104	—	7.44±0.20	MS, RI
59	异丁酸异丁酯	菠萝	1090	1114	—	1.18±0.03	MS, RI
60	丁酸异丁酯	果味、朗姆酒	1158	1127	17.54±0.48 ^b	10.48±0.29 ^a	MS, RI
61	乙酸戊酯	甜味、香蕉味	1176	1144	—	29.26±0.80	MS, RI
62	己酸甲酯	菠萝	1184	1157	—	906.67±24.77	MS, RI
63	丁酸丁酯	果味	1220	1186	—	363.36±9.93	MS, RI
64	己酸乙酯	果味	1233	1202	1613.50±44.08	—	MS, RI
65	丁酸异丙酯	甜味、果味	1043	1098	1908.67±52.15	—	MS, RI
66	己酸乙酯	果味	1233	1198	—	1907.34±52.11	MS, RI
67	庚酸甲酯	果味、花香	1284	1257	—	10.24±0.28	MS, RI
68	庚酸乙酯	果味	1331	1298	109.22±2.98 ^b	59.88±1.64 ^a	MS, RI

续表 2

编号	挥发性风味物质	气味描述	RI(文献值)	RI(计算值)	浓度(μg/L)		定性方式
					果汁	果酒	
69	丙酸己酯	果味	1349	1307	1.142±0.03 ^a	6.77±0.18 ^b	MS, RI
70	乳酸乙酯	朗姆酒、果味	1347	1317	1.51±0.04 ^a	56.45±1.54 ^b	MS, RI
71	乙酸庚酯	花香	1377	1342	243.44±6.65 ^b	4.44±0.12 ^a	MS, RI
72	辛酸甲酯	酒香、橙子味	1385	1359	—	0.36±0.01	MS, RI
73	己酸丁酯	菠萝状	1407	1381	—	308.73±8.43	MS, RI
74	丁酸己酯	果味、甜味	1414	1384	3.11±0.08 ^a	908.24±24.81 ^b	MS, RI
75	2-丙烯酸甲酯	果味	938	984	9.50±0.26	—	MS, RI
76	2-甲基丁酸己酯	绿色、甜味	1433	1394	—	2.57±0.07	MS, RI
77	辛酸乙酯	葡萄酒、花香	1435	1402	1010.83±27.62 ^b	581.52±15.89 ^a	MS, RI
78	壬酸乙酯	坚果味、玫瑰	1531	1501	152.59±4.17	—	MS, RI
79	己酸己酯	草本气味	1602	1575	3.38±0.09 ^a	994.09±27.16 ^b	MS, RI
80	丁酸辛酯	橙子味、绿色	1621	1584	—	67.78±1.85	MS, RI
81	苯甲酸甲酯	果味	1612	1596	2.53±0.07 ^a	62.94±1.72 ^b	MS, RI
82	癸酸乙酯	葡萄味	1638	1603	852.17±23.28 ^b	57.22±1.56 ^a	MS, RI
83	丁内酯	黄油味、甜味	1632	1608	79.72±2.18	—	MS, RI
84	苯甲酸乙酯	果味	1658	1639	190.44±5.20 ^b	27.06±0.74 ^a	MS, RI
85	苯乙酸甲酯	蜂蜜	1720	1699	105.91±2.89 ^a	622.82±17.02 ^b	MS, RI
86	水杨酸甲酯	冬青味	1765	1751	213.56±5.83 ^b	174.06±4.76 ^a	MS, RI
87	乙酸苯乙酯	甜味、花香	1813	1786	177.20±4.84 ^a	413.00±11.28 ^b	MS, RI
88	苯乙酸乙酯	蜂蜜、苦甜味	1783	1755	101.90±2.78 ^b	2.96±0.08 ^a	MS, RI
89	苯丙酸乙酯	酒香、果香	1893	1854	69.23±1.89	—	MS, RI
90	γ-辛内酯	果味、甜味	1910	1892	14.32±0.39	—	MS, RI
91	肉豆蔻酸乙酯	花香、辣味	2049	2012	1531.69±41.85 ^b	20.49±0.56 ^a	MS, RI
92	肉桂酸乙酯	肉桂、香醋	2127	2100	20.79±0.57 ^a	48.86±1.33 ^b	MS, RI
93	棕榈酸乙酯	蜡味、甜味	2251	2212	4054.40±110.77 ^b	37.27±1.02 ^a	MS, RI
94	γ-十二内酯	桃子味、脂肪	2374	2346	—	15.86±0.43	MS, RI
酸类							
95	甲酸	醋酸	1503	1532	628.39±17.17	—	MS, RI
96	醋酸	酸味	1174	1126	1320.43±36.07 ^b	124.94±3.41 ^a	MS, RI
97	异丁酸	黄油、酸味	1570	1538	64.63±1.77	—	MS, RI
98	丁酸	黄油、酸味	1625	1597	20.52±0.56	—	MS, RI
99	异戊酸	奶酪	1666	1637	22.02±0.60	—	MS, RI
100	己酸	脂肪	1846	1808	—	474.91±12.97	MS, RI
101	辛酸	果味、酸味	2060	2018	587.84±16.06 ^b	61.68±1.69 ^a	MS, RI
102	壬酸	奶酪、脂肪	2171	2123	—	126.81±3.46	MS, RI
103	癸酸	脂肪	2276	2228	—	43.97±1.20	MS, RI
104	苯甲酸	芳香	2412	2397	233.59±6.38	—	MS, RI
105	肉豆蔻酸	油味	2694	2644	146.45±4.00 ^b	15.97±0.44 ^a	MS, RI
106	硬脂酸	脂肪	3136	2976	—	21.70±0.59	MS, RI
其他							
107	二甲醚	甜味	481	488	357.95±9.78	—	MS, RI
108	十一烷	—	1100	1066	—	0.40±0.01	MS, RI
109	乙酸酐	醋酸	1236	1239	183.52±5.01	—	MS, RI
110	十二烷	烷烃	1200	1155	0.36±0.01	—	MS, RI
111	邻二甲苯	芳香	1186	1152	—	1.03±0.03	MS, RI
112	柠檬烯	柠檬	1200	1153	8.95±0.24	—	MS, RI
113	D-柠檬烯	柠檬	1196	1159	—	100.26±2.74	MS, RI
114	2-戊基呋喃	果味、绿色	1231	1197	—	3.76±0.10	MS, RI
115	对西美尼	柑橘	1272	1238	—	46.20±1.26	MS, RI
116	壬烷	汽油	900	959	43.08±1.18	—	MS, RI
117	1,2,3-三甲基苯	芳香	1340	1303	—	—	MS, RI
118	2-乙酰基呋喃	焦糖味、咖啡	1499	1509	5.59±0.15 ^b	1.14±0.03 ^a	MS, RI
119	2-硝基丙烷	甜味、果味	1119	1183	37.90±1.04	—	MS, RI

续表 2

编号	挥发性风味物质	气味描述	RI(文献值)	RI(计算值)	浓度(μg/L)		定性方式
					果汁	果酒	
120	丙烯	大蒜	1703	1679	—	183.00±5.00	MS, RI
121	吡咯烷	氨味	1021	1049	44.39±1.21	—	MS, RI
122	1-甲基萘	芳香、泥土味	1884	1866	51.22±1.40	—	MS, RI
123	麦芽酚	焦糖、奶味	1969	1933	25.95±0.71	—	MS, RI
124	联苯	芳香	1986	1964	32.60±0.89	—	MS, RI
125	苯酚	甜味	2000	1973	6.69±0.18 ^a	44.40±1.21 ^b	MS, RI
126	丁子香酚	丁香味	2169	2133	47.76±1.30	—	MS, RI
127	对乙烯基愈创木酚	苹果、朗姆酒	2188	2163	—	9.58±0.26	MS, RI
128	3-正丁基苯酚	辣味、草本	2585	2528	—	0.22±0.01	MS, RI

注: 同一行不同字母表示同个指标之间的差异显著($P<0.05$)。

果一致。经过发酵后,样品中的醛类物质的数量和相对含量均显著减少。其中,异丁醇、甲酸和乙醛等仅在百香果果汁中存在,乙酸甲酯、丙酸乙酯和 2-戊酮等仅百香果果酒中含有,前者说明其可以作为风味物质前体或者发酵使得部分风味物质消失,后者则说明发酵处理可以额外产生部分风味物质。发酵过程中会产生芳香前体和挥发性有机化合物,这些化合物可能源自微生物代谢、酶促反应和脂质氧化^[30]。从韦恩图可以看出,44 种化合物在 2 组样品中都存在,包括乙醇、苯乙醇、乙酸和己酸乙酯等,这些风味化合

物中以酯类居多。

2.6 百香果果汁和果酒的特征香气成分 OAV

利用 GC-MS 分析发酵前后特征香气成分和香气轮廓,以气味活度值(odor activity value, OAV)评判香气贡献大小,以期为百香果的深加工和百香果果酒的品质提升提供理论依据。挥发性物质的阈值查阅文献及相关网站,表 3 信息经计算分析可知,发酵百香果果酒中 OAV>1 的挥发性物质有 47 种,主要贡献风味为果味、花香、酒香。其中酯类物质 OAV>1 的有 21 种,丁酸乙酯的 OAV 最高,赋予果

表 3 百香果果汁及果酒中的特征香气成分 OAV 分析结果
Table 3 OAV analysis results of characteristic aroma components of passion fruit juice and fruit wine

编号	挥发性物质	OAV		
		阈值 ^[33] (μg/L)	果汁	果酒
1	丁酸乙酯	0.1	1652.36	25488.99
2	苯乙醇	0.015	74323.69	22327.06
3	呋喃醇	0.03	326.90	9842.20
4	己酸乙酯	0.3	—	6010.40
5	苯甲醇	1.2	799.74	615.77
6	丁酸甲酯	1	—	541.29
7	3-甲基丁酸乙酯	0.01	—	211.85
8	乙酸乙酯	5	338.40	197.26
9	2-庚酮	1	—	146.96
10	辛酸乙酯	5	191.12	109.95
11	己酸甲酯	10	—	85.71
12	乳酸乙酯	0.89	0.39	59.96
13	乙醇	8	55.71	49.55
14	2-十五烷酮	1	26.28	48.81
15	2-壬酮	5	—	39.15
16	庚酸乙酯	2	—	28.30
17	D-柠檬烯	4	—	23.69
18	苯乙酸甲酯	25	4.00	23.55
19	1-癸醇	6	4.91	21.09
20	大马士革酮	0.7	—	20.42
21	醋酸	6	208.05	19.69
22	乙酸丁酯	10	—	14.84
23	对乙烯基愈创木酚	0.75	—	12.07
24	香叶丙酮	60	0.03	11.23
25	2-乙基己醇	13	0.82	9.75
26	辛醛	1.4	—	8.46

续表 3

编号	挥发性物质	OAV		
		阈值 ^[33] (μg/L)	果汁	果酒
27	戊醛	12	—	7.26
28	丙酸乙酯	9	—	7.03
29	癸酸乙酯	8	100.70	6.76
30	苯乙醛	4	15.18	6.65
31	丁酸异丁酯	1.6	11.05	6.19
32	己酸	93	—	4.83
33	香茅醇	11	2.07	4.75
34	戊酸乙酯	1.5	—	4.69
35	桉油醇	1	2.67	4.32
36	1-己醇	200	1.15	4.28
37	水杨酸甲酯	40	5.05	4.11
38	丁酸丁酯	87	—	3.95
39	丁酸己酯	250	0.01	3.43
40	2-壬醇	58	0.61	3.42
41	肉桂酸乙酯	17	1.16	2.72
42	甲基庚烯酮	50	0.03	2.58
43	庚酸甲酯	4	—	2.42
44	γ-十二内酯	7	—	2.14
45	2-丁氧基乙醇	43	0.24	2.02
46	2-戊酮	70	—	1.25
47	糠醛	40	0.48	1.07

酒果味和甜味。百香果果酒中醇类物质 OAV>1 的有 11 种,主要贡献花香、果香、青草香气味。酵母菌可通过 Ehrlich 途径对部分氨基酸经转氨和脱羧反应形成异戊醇和苯乙醇等醇类物质^[31]。高级醇是重要的助香物质,从而改善了整体气味特性^[32]。果酒中酸类 OAV>1 的只有醋酸、己酸 2 种,赋予百香果果酒酸味和脂肪味。果酒中的酸类主要来源于水果本身及微生物发酵代谢产物,在果酒的风味及品质方面发挥重要作用。Hao 等^[22]认为酸在低于其气味阈值的水平下能积极促进葡萄酒的风味。适量的酸能带给酒体醇厚协调柔顺的口感,是酒类后味的重要组成部分。

3 结论

本研究以广西百香果作为原料,利用酵母对其果汁进行发酵制备成百香果果酒。将果汁与发酵果酒的理化特性、风味物质等进行对比。结果发现:与百香果果汁相比,百香果果酒的甜味氨基酸占比增加,苦味氨基酸占比降低,提升果酒风味品质。酒体呈橙红色且透亮清明,整体口感柔和、酒香浓郁。在风味物质种类及其相对含量方面,果酒组的挥发物种类最多为 88 种,产生的酮、酯类数量均优于果汁组。百香果发酵型果酒具有风味更突出、滋味更协调等优势,这为百香果深加工、副产物综合利用、延长产业链和提高经济效益提供了新思路和新方法。

参考文献

[1] DHAWAN K, DHAWAN S, SHARMA A. Passiflora; a review update[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2004, 94(1): 1–23.

[2] SHANMUGAM S, SANDES R D D, RAJAN M, et al. Volatile profiling and UHPLC-QqQ-MS/MS polyphenol analysis of *Passiflora leschenaultii* DC. fruits and its anti-radical and anti-diabetic properties[J]. *Food Research International*, 2020, 133: 109202.

[3] THOKCHOM R, MANDAL G. Production preference and importance of passion fruit (*Passiflora edulis*): A Review[J]. 2020, 4: 27–30.

[4] TANGÜLER H, ERTEN H. The influence of two yeast strains on fermentation and flavour composition of cider[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2022, 37(3): 144–153.

[5] ZHAO Y, YU X B, ZHU F T, et al. Effects of different wine-making yeasts on the composition of aroma-active compounds and flavor of the fermented jujube wine[J]. *Processes*, 2021, 9(6): 970.

[6] SANTOS D, BILAC C, BARBOSA T, et al. Physicochemical characterization of craft beers produced with passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) [J]. *Journal of Experimental Agriculture International*, 2022: 16-23.

[7] 马懿, 禹潇, 魏鑫, 等. 发酵型猕猴桃红茶酒品质及风味感官分析[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(12): 265–274. [MA Y, YU X, WEI X, et al. Quality and flavor sensory analysis of fermented *Kiwi* blank tea wine[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(12): 265–274.]

[8] 程新. 湿热-多菌发酵对白芸豆面包营养及风味特性的影响[D]; 无锡: 江南大学, 2021. [CHENG X. Effect of Heat Moisture treatment and multi-bacterial fermentation on nutrition and flavor characteristics of white kidney bean bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[9] MARTÍNEZ-MENDOZA B I, PEREDO-LOVILLO A, ROMERO-LUNA H E, et al. Antioxidant and anti-inflammatory properties of yeasts fermented passion fruit and soursop pulps: A focus

- on bioactive volatile compounds profile[J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103112.
- [10] 张宾乐. 红豆酸面团乳酸菌发酵及其提高冷冻面团烘焙品质机制研究[D]; 无锡: 江南大学, 2021. [ZHANG B L. Red bean sourdough fermented by lactic acid bacteria and its mechanism studies on improving frozen dough baking properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [11] 祝闻旸. 海带腥味物质分析与生物法脱腥研究[D]; 无锡: 江南大学, 2022. [ZHU W Y. Analysis of kelp fishy-odor compounds and research on deodorization by biological method[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [12] 曹伟超, 张宾乐, OMEDI JACOB O, et al. 功能性乳酸菌发酵黑豆麦麸酸面团面包的营养及烘焙特性[J]. *食品科学*, 2022, 43(2): 142–150. [CAO W C, ZHANG B L, OMEDI JACOB O, et al. Nutritional and baking characteristics of black bean-wheat bran sourdough bread fermented by functional lactic acid bacteria[J]. *Food Science*, 2022, 43(2): 142–150.]
- [13] YE Y H, ZHENG S Y, WANG Y X. Analysis of aroma components changes in Gannan navel orange at different growth stages by HS-SPME-GC-MS, OAV, and multivariate analysis[J]. *Food Research International*, 2024, 175: 113622.
- [14] CODA R, NIONELLI L, RIZZELLO C G, et al. Spelt and emmer flours: Characterization of the lactic acid bacteria microbiota and selection of mixed starters for bread making[J]. *J Appl Microbiol*, 2010, 108(3): 925–935.
- [15] ASENCIO A D, SERRANO M, GARCÍA-MARTÍNEZ S, et al. Organic acids, sugars, antioxidant activity, sensorial and other fruit characteristics of nine traditional Spanish Citrus fruits[J]. *European Food Research and Technology*, 2018, 244(8): 1497–1508.
- [16] LEGUA P, MODICA G, PORRAS I, et al. Bioactive compounds, antioxidant activity and fruit quality evaluation of eleven blood orange cultivars[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(7): 2960–2971.
- [17] SAHIN A W, RICE T, ZANNINI E, et al. *Leuconostoc citreum* TR116: In-situ production of mannitol in sourdough and its application to reduce sugar in burger buns[J]. *Int J Food Microbiol*, 2019, 302: 80–89.
- [18] SURIANO S, BALCONI C, VALOTI P, et al. Comparison of total polyphenols, profile anthocyanins, color analysis, carotenoids and tocopherols in pigmented maize[J]. *LWT*, 2021, 144: 111257.
- [19] LIU Y T, ZHU S, LI Y, et al. Alterations in the multilevel structures of chickpea protein during fermentation and their relationship with digestibility[J]. *Food Research International*, 2023, 165: 112453.
- [20] BYUN J I, SHIN Y Y, CHUNG S E, et al. Safety and efficacy of Gamma-aminobutyric acid from fermented rice germ in patients with insomnia symptoms: A randomized, double-blind trial[J]. *Journal of clinical neurology (Seoul, Korea)*, 2018, 14(3): 291–295.
- [21] ZHAI Y L, GUO M Y, MENG Q, et al. Characterization of key odor-active compounds in high quality high-salt liquid-state soy sauce[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 117: 105148.
- [22] HAO Z Q, ZHANG X, PENG X Y, et al. Identification of the key off-flavor odorants for undesirable spoiled odor in thermally sterilized fermented soymilk[J]. *Food Research International*, 2023, 164: 112407.
- [23] WANG B S, YU M G, TANG Y, et al. Characterization of odor-active compounds in Dahongpao Wuyi rock tea (*Camellia sinensis*) by sensory-directed flavor analysis[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 123: 105612.
- [24] ZHANG X J, GAO P, XIA W S, et al. Characterization of key aroma compounds in low-salt fermented sour fish by gas chromatography-mass spectrometry, odor activity values, aroma recombination and omission experiments[J]. *Food Chemistry*, 2022, 397: 133773.
- [25] LIU L J F, TECHNOLOGY F. Evaluation of five kinds of whole milk domestic and abroad based on sensory and electronic nose, electronic tongue[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 42(5): 106021.
- [26] YI C P, ZHU H, TONG L T, et al. Volatile profiles of fresh rice noodles fermented with pure and mixed cultures[J]. *Food Research International*, 2019, 119: 152–160.
- [27] WELKE J E, NICOLLI K P, HERNANDES K C, et al. Adaptation of an olfactometric system in a GC-FID in combination with GC×GC/MS to evaluate odor-active compounds of wine[J]. *Food Chemistry*, 2022, 370: 131004.
- [28] MIAO M, ZHANG T, JIANG B. Characterisations of *Kabuli* and *Desi chickpea* starches cultivated in China[J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(4): 1025–1032.
- [29] LAN Y B, XIANG X F, QIAN X, et al. Characterization and differentiation of key odor-active compounds of 'Beibinghong' icewine and dry wine by gas chromatography-olfactometry and aroma reconstitution[J]. *Food Chemistry*, 2019, 287: 186–196.
- [30] LU Z H, CAO W, PENG H H, et al. Effect of fermentation metabolites on rheological and sensory properties of fermented rice noodles[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88: 2134–2141.
- [31] HERNÁNDEZ-ORTE P, CERSOSIMO M, LOSCOS N, et al. The development of varietal aroma from non-floral grapes by yeasts of different genera[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(3): 1064–1077.
- [32] JIANG X H, LU Y Y, LIU S Q. Effects of pectinase treatment on the physicochemical and oenological properties of red dragon fruit wine fermented with *Torulaspora delbrueckii*[J]. *LWT*, 2020, 132: 109929.
- [33] YANG Y J, AI L Z, MU Z Y, et al. Flavor compounds with high odor activity values (OAV>1) dominate the aroma of aged Chinese rice wine (Huangjiu) by molecular association[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132370.