

基于线性功效系数法及响应面法优化香蕉桃金娘酒发酵工艺及其营养、风味成分分析

孙钦菊¹, 韦璐¹, 成显波², 唐婷¹, 黄杰¹, 莫国微¹, 覃梦莎³, 杜丽娟^{1*}

(1. 广西农业职业技术大学食品药品工程学院, 广西南宁 530007)(2. 广西工商职业技术学院粮油康旅学院, 广西南宁 530029)(3. 贺州学院食品与生物工程学院, 广西贺州 542800)

摘要: 为增加果酒品类, 丰富果酒口感, 以香蕉、桃金娘果实为主要原料发酵制作复合果酒, 通过单因素和线性功效系数法结合响应面法优化香蕉桃金娘酒发酵工艺, 测定其理化指标、抗氧化能力及挥发性风味成分。结果表明, 香蕉桃金娘酒发酵最佳工艺参数为: 发酵菌种 *Saccharomyces cerevisiae* CECA, 香蕉汁桃金娘果汁配比 3:1, 初始糖度 25 °Bx, 酵母添加量 0.15%, 初始 pH 值 4.90, 在此条件下, 香蕉桃金娘酒综合评分达 99.9 分, 酒精度为 11.81%vol, 糖度为 4.73 °Bx, 总酸含量为 6.14 g/L, 黄酮和多酚含量分别为 0.15 g/L、2.65 g/L, ABTS⁺ 清除率为 93.41%。香蕉桃金娘酒中共检测出 72 种挥发性香气成分, 占比约 95.94%, 其中异戊醇(苹果香、白兰地香、辛辣味)和乳酸乙酯(玫瑰花香)为主要呈香化合物。该最佳工艺酿制的香蕉桃金娘酒较香蕉酒, 呈现出较高的抗氧化活性, 具有独特的风味, 可为香蕉和桃金娘的开发应用提供理论依据。

关键词: 香蕉; 桃金娘; 复合果酒; 线性功效系数法; 抗氧化活性; 风味成分

文章编号: 1673-9078(2025)10-338-351

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.1085

Optimization of Banana-myrtle Wine Fermentation Using Linear Efficacy Coefficient and Response Surface Methodology and Nutritional and Flavor Component Analysis

SUN Qinju¹, WEI Lu¹, CHENG Xianbo², TANG Ting¹, HUANG Jie¹, MO Guowei¹, QIN Mengsha³, DU Lijuan^{1*}

(1. College of Food and Drug Engineering, Guangxi Agricultural Vocational and Technical University, Nanning 530007, China)(2. College of Grain and Oil Health and Tourism, Guangxi Vocational College of Technology and Business, Nanning 530029, China)(3. College of Food and Bioengineering, Hezhou University, Hezhou 542800, China)

Abstract: To diversify and enhance the taste of fruit wine, banana and myrtle fruit were used as primary ingredients to produce a composite fruit wine. The fermentation process was optimized using single-factor testing and the linear efficiency coefficient method in conjunction with response surface methodology. Physicochemical properties, antioxidant activity, and volatile

引文格式:

孙钦菊, 韦璐, 成显波, 等. 基于线性功效系数法及响应面法优化香蕉桃金娘酒发酵工艺及其营养、风味成分分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(10): 338-351.

SUN Qinju, WEI Lu, CHENG Xianbo, et al. Optimization of banana-myrtle wine fermentation using linear efficacy coefficient and response surface methodology and nutritional and flavor component analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 338-351.

收稿日期: 2024-07-25; 修回日期: 2024-09-06; 接受日期: 2024-09-13

基金项目: 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY1193); 广西农业科技自筹经费项目(Z202230)

作者简介: 孙钦菊(1991-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 食品发酵技术, E-mail: sqj201211@163.com

通讯作者: 杜丽娟(1989-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 食品加工及副产物综合利用, E-mail: dlj2015bys@163.com

flavor components were also analyzed. The optimal fermentation parameters were as follows: *Saccharomyces cerevisiae* CECA as the yeast strain, banana juice to myrtle juice ratio of 3:1, initial sugar content of 25 °Bx, yeast addition rate of 0.15%, and initial pH of 4.9. The resulting banana-myrtle wine had a comprehensive score of 99.9, with an alcohol content of 11.81% vol, sugar content of 4.73 °Bx, total acid content of 6.14 g/L, flavonoid content of 0.15 g/L, polyphenol content of 2.65 g/L, and ABTS⁺ radical scavenging rate of 93.41%. Seventy-two volatile aroma components were detected, accounting for approximately 95.94% of the aroma profile, with isoamyl alcohol (apple, brandy, and spicy scent) and ethyl lactate (rose scent) as the dominant aroma compounds. Compared with banana wine, the banana-myrtle wine produced under the optimized conditions exhibited higher antioxidant activity and a unique flavor profile. This study provides a theoretical foundation for the development and application of banana and myrtle in fruit wine production.

Key words: banana; myrtle; composite fruit wine; linear efficiency coefficient method; antioxidant activity; flavor component

香蕉广泛种植于印度、巴西、中国等热带和亚热带地区^[1], 富含维生素、矿物质、酚类和类黄酮等活性物质^[2,3], 营养价值高, 具有降血糖血脂、润肠通便等功效^[4]。研究表明香蕉中乙酸异戊酯、乙酸乙酯等挥发性风味组分表现优异, 其挥发性香气组分达 40 多种, 富含果香、甜香、青香^[5], 但抗氧化能力不突出。桃金娘果实富含黄酮类、多糖类、抗坏血酸、氨基酸等活性成分和营养物质, 兼具药用价值和保健作用^[6], 研究表明桃金娘果实具有较高的抗氧化能力, 每克桃金娘果实自由基 (ABTS⁺) 清除能力相当于 30.4 μmol 的抗坏血酸和 7.8 μmol 没食子酸^[7], 但桃金娘果实风味不如香蕉浓郁。因此, 香蕉与桃金娘果实均是果酒酿造的优良原料, 两者结合可发挥原料优势, 提升果酒的营养风味及功能活性。

果酒是经酵母发酵的低酒精度饮品^[8], 风味独特, 富含营养物质, 极受消费者喜爱^[9]。香蕉、桃金娘果实均存在货架期短、不易贮藏、易霉变腐烂等问题, 导致资源浪费, 影响果农经济效益。将其发酵成果酒, 可延长货架期, 提升水果利用价值及附加值, 助农增收。目前香蕉、桃金娘果实单一水果酿酒研究广泛, 方向集中于酵母菌种优选^[10,11]、酿造工艺优化^[12]、功能性^[13]、香气成分分析^[14]等方面, 针对香蕉复合果酒研究也逐年增多, 董法宝等^[15]对火龙果香蕉刺梨复合果酒酿造工艺进行优化, 获得具有风味及营养优势的复合果酒; 黄腾欢等^[16]研究发现百香果-香蕉复合果酒花香、玫瑰、蜂蜜等香味浓郁; Purohit 等^[17]研究香蕉、木瓜和甜瓜酿酒工艺, 复合果酒口感丰富; Adeyem 等^[18]将香蕉、西瓜、菠萝和黄瓜混合发酵果酒, 感官特征突出, 但目前尚未发现香蕉、桃金娘果实复配酿酒的报道。

香蕉、桃金娘果实为广西特色水果, 资源丰富, 可为复合果酒的酿制提供充足原料, 香蕉香气浓郁但抗氧化能力不突出, 桃金娘果实抗氧化能力强但无宜人风味, 将香蕉、桃金娘果实进行组合发酵可从风味和营养价值 (抗氧化能力) 提升果酒品质, 提高香

蕉、桃金娘果实附加值, 助力广西特色水果产业振兴。本研究选用香气特殊的香蕉和抗氧化活性高的桃金娘果实作为原料, 筛选果酒最佳发酵菌种, 采用单因素及线性功效系数法结合响应面法优化发酵工艺, 对香蕉桃金娘酒多酚和黄酮活性成分及抗氧化活性进行检测, 并以顶空固相微萃取 (Headspace Solidphase Microextraction, HS-SPME) 和气相色谱质谱联用 (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) 手段分析鉴定香蕉桃金娘酒的风味成分, 明确不同香气的主要呈味物质, 为香蕉桃金娘酒的生产奠定实验基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

Saccharomyces cerevisiae NS-D、*Saccharomyces bayanus* BV818、*Saccharomyces cerevisiae* CECA, 安琪酵母股份有限公司; *Saccharomyces cerevisiae* vitilevure KD, 烟台帝伯仕自酿机有限公司; 焦亚硫酸钾 (食品级), 烟台帝伯仕自酿机有限公司; 氢氧化钠、过硫酸钾等 (分析纯), 西陇科学股份有限公司; 果胶酶 (1 万 U/g)、纤维素酶 (1 万 U/g)、白砂糖等 (食品级), 南宁东恒华道生物科技有限责任公司; 香蕉、桃金娘, 南宁市西乡塘区市场。

DFY-1000C 高速多功能粉碎机, 温岭市林大机械有限公司; WZS32 手持阿贝折光仪, 上海仪电物理光学仪器股份有限公司; PHS-3CPH 计, 上海仪电科学仪器股份有限公司; ME204E 电子天平, 梅特勒托利多仪器 (上海) 有限公司; MJ-250-11 恒温培养箱, 上海齐欣科学仪器有限公司; TRACE DSQ 气相色谱-质谱 (Gas Chromatography -Mass Spectrometry, GC-MS) 联用仪、DB-WAX 毛细管柱 (30 m×0.25mm, 0.25 μm), 美国 Finnigan 公司; 固相微萃取 (Solid-Phase Microextraction, SPME) 装置手柄、固定搭载装置、50/30 μm CAR/PDMS/DVB 萃取头, 美国 Supelco 公司。

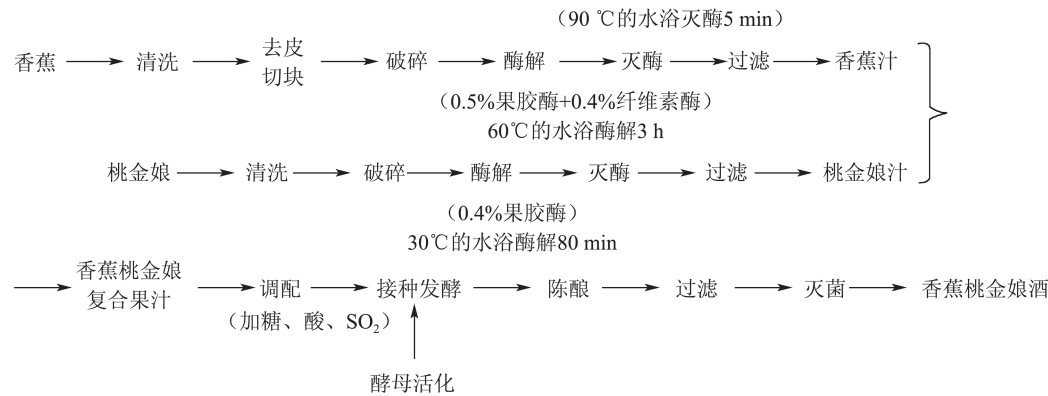


图 1 香蕉桃金娘酒发酵工艺流程

Fig.1 Fermentation process of banana myrtle wine

1.2 实验方法

1.2.1 香蕉桃金娘酒发酵工艺流程

香蕉及桃金娘果实前处理参考韦璐等^[9]和胡梦琪^[11]的研究，香蕉桃金娘酒发酵工艺流程如图 1。

1.2.2 香蕉桃金娘酒发酵工艺操作要点

(1) 原料挑选、清洗：挑选成熟度适中、无腐烂的香蕉和桃金娘果实，0.9% 盐水浸泡消毒，清水清洗，沥干后备用。

(2) 去皮破碎：香蕉去皮切块、破碎，获得香蕉果浆；桃金娘果实按 $m_{\text{桃金娘}}:m_{\text{水}}=1:1$ 加水破碎，获得桃金娘果浆。

(3) 酶解：香蕉果浆添加质量分数 0.5% 果胶酶和质量分数 0.4% 纤维素酶于 60℃ 恒温水浴中酶解 3 h；桃金娘果浆添加质量分数 0.4% 果胶酶于 30℃ 恒温水浴中酶解 80 min。

(4) 灭酶：酶解结束，将果浆置于 90℃ 恒温水浴中灭酶 5 min。

(5) 过滤：将灭酶后果浆于 100 目滤袋一次过滤，300 目滤袋二次过滤，获得澄清果汁。

(6) 调配：将香蕉、桃金娘果汁按比例混合，添加白砂糖、柠檬酸或柠檬酸钠分别调节糖度和 pH，加入 120 mg/L 焦亚硫酸钾，用于抑菌防腐。

(7) 酵母活化：酿酒酵母接种于质量分数 2% 糖水，37℃ 恒温水浴活化约 15 min，至酵母冒泡。

(8) 接种发酵：将活化酵母接种至复合果汁发酵罐（5 L），置于 20℃ 恒温培养箱密封发酵一周，留样作后续检测。

(9) 陈酿：将果酒置于常温下陈酿 40 d。

(10) 过滤：采用硅藻土过滤机过滤香蕉桃金娘酒后灌装。

(11) 灭菌：过滤后果酒采用巴氏灭菌法（70~80℃，

30 min），即得香蕉桃金娘酒成品。

1.2.3 酿酒酵母菌种筛选

以酒精度、糖度为评价指标，结合前期研究结果，在香蕉汁桃金娘果汁配比（V/V）3:1，酵母添加量（质量分数）0.25%，初始糖度 25 °Bx，初始 pH 值 4.5 的发酵条件下，探讨 *Saccharomyces cerevisiae* NS-D、*Saccharomyces bayanus* BV818、*Saccharomyces cerevisiae* CECA 及 *Saccharomyces cerevisiae* vitilevure KD 4 种酿酒酵母对香蕉桃金娘酒的影响，于 20℃ 恒温培养箱发酵至酒精度处于稳定值为一周期，每间隔 1 d 测定香蕉桃金娘酒糖度和酒精度。

1.2.4 单因素实验

1.2.4.1 香蕉汁桃金娘果汁比对香蕉桃金娘酒的影响

在酵母添加量（质量分数）0.25%，初始糖度 25 °Bx，初始 pH 值 4.5，香蕉汁桃金娘果汁配比（V/V）分别为 1:1、2:1、3:1、4:1、5:1、6:1 条件下，考察香蕉汁桃金娘果汁比对香蕉桃金娘酒酒精度和感官评分的影响。

1.2.4.2 酵母添加量对香蕉桃金娘酒的影响

在香蕉汁桃金娘果汁配比（V/V）3:1，初始糖度 25 °Bx，初始 pH 值 4.5，酵母添加量（质量分数）0.05%，0.15%、0.25%、0.35%、0.45%、0.55% 条件下，考察酵母添加量对香蕉桃金娘酒酒精度和感官评分的影响。

1.2.4.3 初始糖度对香蕉桃金娘酒的影响

在香蕉汁桃金娘果汁配比（V/V）3:1，酵母添加量（质量分数）0.25%，初始 pH 值 4.5，初始糖度 15、20、25、30、35、40 °Bx 条件下，考察初始糖度对香蕉桃金娘酒酒精度和感官评分的影响。

1.2.4.4 初始 pH 对香蕉桃金娘酒的影响

在香蕉汁桃金娘果汁配比（V/V）3:1，初始糖度 25 °Bx，酵母添加量（质量分数）0.25%，初始 pH 值 3.5、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 条件下，考察初始 pH 值对香

蕉桃金娘酒酒精度和感官评分的影响。

1.2.5 响应面试验

根据 Box-Behnken 试验设计原理^[20]，综合单因素试验结果，选取香蕉汁桃金娘果汁配比（A）、初始糖度（B）、酵母添加量（C）、初始 pH（D）这 4 个因素为自变量，采用四因素三水平的响应面分析方法对香蕉桃金娘酒的发酵工艺进行优化。因素与水平见表 1。

表 1 香蕉桃金娘酒响应面分析因素与水平
Table 1 Factors and levels of response surface analysis of banana-myrtle complex fruit wine

因素	水平		
	-1	0	1
A 香蕉汁桃金娘果汁配比（V/V）	2:1	3:1	4:1
B 初始糖度/°Bx	20	25	30
C 酵母添加量/%	0.05	0.15	0.25
D 初始 pH 值	4.5	5.0	5.5

1.2.6 线性功效系数法

香蕉桃金娘酒发酵过程中香蕉汁桃金娘果汁配比、酵母添加量、初始糖度和初始 pH 值等因素对果酒酒精度和感官评分影响较大，适宜的酒精度和较高的感官评分是香蕉桃金娘酒的最终要求。为获得香蕉桃金娘酒最优发酵工艺参数，对酒精度和感官评价进行加权分配，由于酒精度是果酒酒精发酵的重要指标之一，而作为产品同样需要满足消费者对产品的感官需求，采用变异系数法^[21]确定酒精度和感官评分两项指标的权重系数，并利用线性功效系数法对各指标进行无量纲指数化^[22]，计算综合评分作为最终评价结果。

各项指标的变异系数公式如下：

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i} (i=1,2,\cdots,n)$$

式中：

V_i ——第 i 项指标的变异系数、也称为标准差系数；

σ_i ——第 i 项指标的标准差；

$\bar{x}_i$ ——第 i 项指标的平均数。

各项指标的权重为：

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

各指标进行无量纲指数化及综合评分计算公式如下：

$$Y'_i = \frac{Y_i - Y_{i\min}}{Y_{i\max} - Y_{i\min}} (i=1,2,\cdots,n)$$

式中：

$Y_{i\min}$ 、 $Y_{i\max}$ （ $i=1,2$ ）——表示试验中各指标的最小值与最大值；

Y_i （ $i=1,2$ ）——表示试验中各指标的试验值。

综合评分公式如下：

$$Y = W_1 Y'_1 + W_2 Y'_2 \tag{4}$$

式中：

Y'_1 、 Y'_2 ——分别表示试验中酒精度、感官评分的试验值，

W_1 、 W_2 ——分别表示酒精度、感官评分的权重系数。

1.2.7 理化指标、抗氧化活性及风味成分分析方法

样品预处理：将发酵后的香蕉桃金娘酒样品于 5 000 r/min 离心 5 min，取上清液，留作后续指标检测使用。

（1）酒精度、总酸测定：参考《GB/T 15038-2006 葡萄酒、果酒通用分析方法》进行测定^[23]；

（2）糖度测定：取预处理样品，采用手持阿贝折光仪测定；

（3）pH 值测定：采用 pH 计测定；

（4）多酚和黄酮测定：参考齐习超^[24]测定方法，多酚含量采用 Folin-Ciocalteu 法测定，黄酮含量采用 $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3$ 比色法测定；

（5） ABTS^+ 清除能力测定：根据文献^[25]，修改如下：

移取 2.9 mL ABTS^+ 稀释液与 0.1 mL 待测样品混合，于黑暗处 30 ℃反应 10 min，在 734 nm 波长测定其吸光度 A_s ，以去离子水为空白对照 A_B ， ABTS^+ 清除率（ I_{ABTS} ，%）由公式（5）计算得出：

$$I_{\text{ABTS}} = (1 - \frac{A_s}{A_B}) \times 100\%$$

式中：

I_{ABTS} —— ABTS^+ 清除率，%；

A_B ——空白对照吸光度；

A_s ——待测样品吸光度。

（6）香蕉桃金娘酒香气成分 HS-SPME-GC-MS 分析，参考韦璐等^[14]香气成分测定方法。

样品制备：取 5 mL 样品置于 20 mL 顶空瓶中，将老化后的 50/30 μm CAR/PDMS/DVB 萃取头插入样品瓶顶空部分，于 50 ℃吸附 30 min，吸附后的萃取头取出后插入气相色谱进样口，于 250 ℃解吸 3 min，采集数据。

色谱条件：毛细管柱为 DB-WAX（30 m×0.25 mm×0.25 μm ），进样口温度 250 ℃，载气：He，流速 1 mL/min，恒定流量模式。程序升温：初始温度 40 ℃，初始时间 3 min，以 5 ℃/min 升至 90 ℃，再以 10 ℃/min 升至 230 ℃，保持 6 min。

质谱条件：电离模式电子电离（Electron Ionization, EI）源；离子源温度 200 ℃；接口温度 250 ℃；电子能量 70 eV；发射电流 1 mA；检测器电压 2.0 kV，质量扫描范围 33~400 u。

定性定量方法：采用美国国家标准与技术研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）14 谱库和香精香料库作检索匹配进行定性；采用峰面积归一法进行定量。

1.2.8 感官评价

感官评分标准根据文献^[23],选取 10 名（5 男 5 女）经过感官培训的专业人员，参考香蕉桃金娘酒感官评价标准（表 2），以百分制对香蕉桃金娘酒的外观、滋味、香气、典型性进行评分，样品取平均分作为参考值。

表 2 香蕉桃金娘酒感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation standard of banana myrtle wine		
评价指标	评价标准	参考评分
外观 (20分)	浅黄色，均匀，有光泽，无浑浊	16~20
	黄色，稍有浑浊，光泽不明显	11~15
	深暗黄色，浑浊，无光泽	≤10
滋味 (40分)	酒体丰满，口感协调醇厚	36~40
	酒体较柔和，口感纯正	31~35
	酒体较协调，口感一般	26~30
	酒体不协调，口感差	≤25
香气 (30分)	果香与酒香和谐浓郁，纯正愉悦	26~30
	果香与酒香纯正，香气较愉悦	21~25
	果香与酒香微弱，无异味	16~20
典型性 (10分)	气味混杂，有异味	≤15
	具有明显香蕉、桃金娘果实特征香气，风味独特	8~10
	香蕉、桃金娘果实特征香气微弱	5~7
	无香蕉、桃金娘果实特征香气	≤4

1.3 数据处理

本研究中所有实验和检测均重复进行三次，数值以平均值±SD表示，当 $P<0.05$ 时数值具有显著性差异。实验所得数据采用 Origin 9.1、Design Expert 13 和 SPSS 20 软件进行绘图、数据处理及分析。

2 结果与分析

2.1 酵母菌种筛选

图 2 显示 *Saccharomyces cerevisiae* NS-D、*Saccharomyces bayanus* BV818、*Saccharomyces cerevisiae* CECA 及 *Saccharomyces cerevisiae* vitilevure KD 4 种酿酒酵母发酵香蕉桃金娘酒过程中酒精度和糖度随时间的变化趋势。随着发酵时间增加，各组酒精度不断上升，糖度随之下降，通过监测各菌种发酵能力发现，*Saccharomyces cerevisiae* CECA

> *Saccharomyces bayanus* BV818 > *Saccharomyces cerevisiae* NS-D > *Saccharomyces cerevisiae* Vitilevure KD，当发酵时间达 7 d 时，酒精度处于相对稳定值，糖度值变化较小，4 种酵母发酵液酒精度值差异显著 ($P<0.05$)，其中 *Saccharomyces cerevisiae* CECA 酵母发酵液酒精度比其他三种酵母高，为 11.6%vol。发酵末期，终产物乙醇提高会破坏酵母菌体内的蛋白质，随酒精度升高，反馈抑制作用逐渐加强，酵母产酒精能力减退^[26]，因此后期发酵酒精度无明显上升趋势。综上，选择 *Saccharomyces cerevisiae* CECA 为香蕉桃金娘酒的发酵菌种。

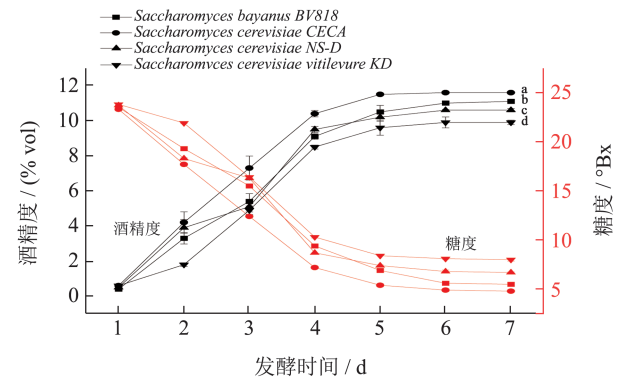


图 2 酵母菌种对香蕉桃金娘酒酒精度和糖度的影响

Fig.2 Effects of yeast strains on alcohol content and brix of banana myrtle wine

注：同一图中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 单因素试验

2.2.1 香蕉汁桃金娘果汁对比对香蕉桃金娘酒品质的影响

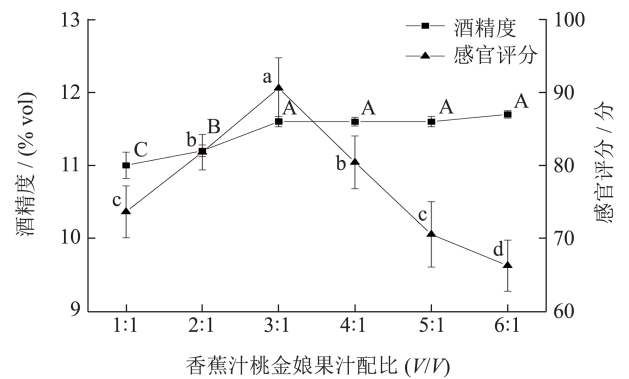


图 3 香蕉汁桃金娘果汁对比对香蕉桃金娘酒品质的影响

Fig.3 Effects of banana juice myrtle juice ratio on the quality of banana myrtle wine

注：同一图中不同的字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下图同。

根据图 3 显示，香蕉桃金娘酒酒精度总体变化不明显，香蕉汁桃金娘果汁配比（V/V）在 1:1~3:1 范围

内, 感官评分呈现显著上升趋势 ($P < 0.05$)。当香蕉汁桃金娘果汁配比 (V/V) 为 3:1 时, 感官评分 (90.6 分) 达到最高值, 酒精度为 11.6%vol; 当香蕉汁桃金娘果汁配比 (V/V) 高于 3:1 时, 酒精度趋于平稳, 变化不显著 ($P > 0.05$), 但感官评分呈现显著下降趋势 ($P < 0.05$)。香蕉汁桃金娘果汁配比是影响香蕉桃金娘酒风味的一个重要因素, 对果酒香气、滋味及色泽等品质的影响较大。香蕉含糖量较高, 桃金娘果实酸甜适宜, 通过糖度调整, 二者配比对酒精度的影响不显著, 但对香蕉桃金娘酒的风味品质影响显著。桃金娘果汁偏少, 果香味不足; 桃金娘果汁过多, 滋味酸涩, 口感单薄。综上所述, 选择香蕉汁桃金娘果汁配比 (V/V) 为 2:1、3:1、4:1 进行后续响应面优化试验。

2.2.2 酵母添加量对香蕉桃金娘酒品质的影响

根据图 4 显示, 当酵母添加量 (质量分数) 处于 0.05%~0.15% 范围内, 香蕉桃金娘酒酒精度和感官评分均呈现显著上升趋势 ($P < 0.05$), 在酵母添加量 (质量分数) 为 0.15% 时, 其酒精度 (11.6%vol) 达到最高值, 感官评分 (90.2 分) 同样处于峰值, 此时果酒酒体纯正, 酒香与果香协调。随着酵母添加量 (质量分数) 增加至 0.55%, 感官评分逐渐下降, 酒精度变化不显著 ($P > 0.05$)。酵母添加量是影响香蕉桃金娘酒品质的重要因素之一, 酿酒酵母利用糖酵解途径将糖转化为乙醇, 若添加量过低, 酵母的生物量不足, 导致糖转化为酒精的速度缓慢, 同时也容易受到杂菌的污染; 若添加量过高, 在氧气充足的情况下, 糖主要用于酵母生长繁殖, 而用于酒精转化的糖会相对减少, 酒精度变化不明显, 由于菌体过多, 果酒滋味不和谐, 感官评分反而降低^[27]。综上考虑, 选择香蕉桃金娘酒酵母添加量 (质量分数) 为 0.05%、0.15%、0.25% 进行后续响应面优化试验。

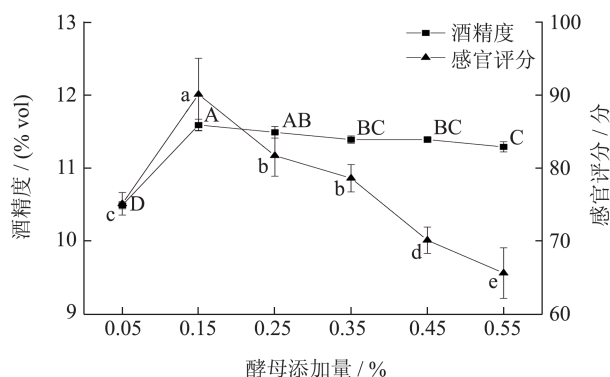


图 4 酵母添加量对香蕉桃金娘酒品质的影响

Fig.4 Effect of yeast addition amount on the quality of banana myrtle wine

2.2.3 初始糖度对香蕉桃金娘酒品质的影响

发酵液中含糖量一般用糖度来表示。根据图 5 显示, 初始糖度在 15 °Bx~25 °Bx 范围内, 香蕉桃金娘酒酒精度和感官评分均呈显著上升趋势 ($P < 0.05$)。当初始糖度为 25 °Bx 时, 其酒精度 (11.7%vol) 和感官评分 (91.0 分) 均达到最高值, 此时酒体协调, 口感柔顺。初始糖度继续增加至 40 °Bx 时, 酒精度转化受到显著抑制 ($P < 0.05$), 感官评分逐渐降低。糖作为酿酒酵母生长繁殖及酒精发酵的碳源和底物, 对香蕉桃金娘酒甜酸滋味和口感影响较大。在理论上增加糖量可以有效提高果酒酒精度, 若糖量过低, 酵母用于转化为酒精的底物不足, 酒精产量降低, 不利于酒精和风味形成; 若糖量过高, 发酵液渗透压提升, 反而对酵母活性造成抑制, 影响其发酵效率, 酒精度下降, 残糖量偏高, 影响果酒口感^[28]。综合考虑, 选择初始糖度为 20、25、30 °Bx 进行后续响应面优化试验。

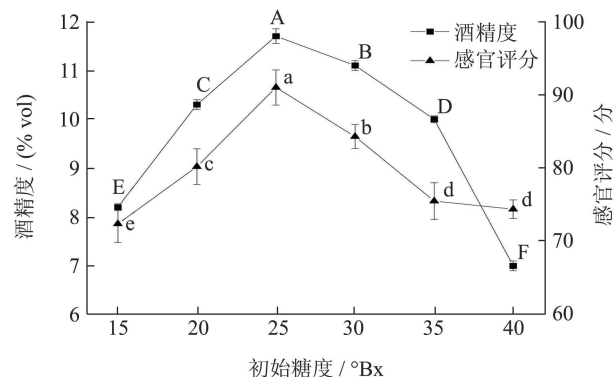


图 5 初始糖度对香蕉桃金娘酒品质的影响

Fig.5 Effect of initial brix on the quality of banana myrtle wine

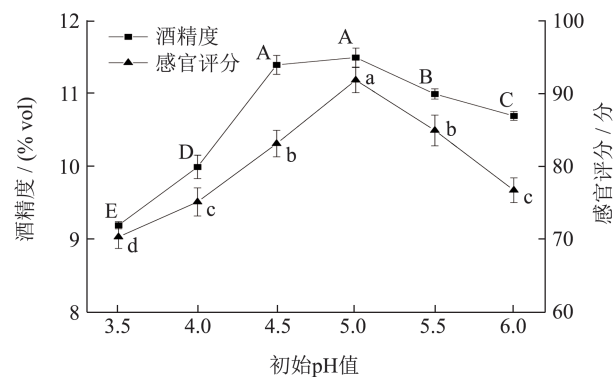


图 6 初始 pH 值对香蕉桃金娘酒品质的影响

Fig.6 Effect of initial pH value on the quality of banana myrtle wine

2.2.4 初始pH值对香蕉桃金娘酒品质的影响

根据图 6 显示, 在初始 pH 值 3.5~5.0 范围内, 香蕉桃金娘酒酒精度含量和感官评分均显著上升 ($P < 0.05$)。当初始 pH 值为 5.0 时, 其酒精度

(11.5%vol)和感官评分(91.9分)均达到最高值,该条件下酵母菌生长代谢状态最佳,酒精发酵旺盛,酒香馥郁。当初始pH值大于5.0,酒精度及感官评分均显著下降($P<0.05$)。酿酒酵母生长繁殖和代谢需要适宜的环境,当初始pH值过高或过低时,酵母菌生长代谢缓慢,体内酶活性下降,酒精度降低,代谢产物减少,影响风味^[29]。初始pH值较低时,酸性环境会抑制酵母菌的生长代谢,酒精转化率低,从而影响风味物质的形成;初始pH值偏高时,发酵初期酵母还未大量繁殖,此时低酸环境适宜杂菌生长,致使酵母菌生长代谢受到抑制,使香蕉桃金娘酒滋味混杂,降

低酒精度和感官评分。综上所述,选择初始pH值为4.5、5.0、5.5进行后续响应面优化试验。

2.3 响应面试验优化香蕉桃金娘酒发酵工艺

2.3.1 响应面试验设计及分析

根据单因素实验的最优结果数值,香蕉汁桃金娘果汁配比、初始糖度、酵母添加量、初始pH作为自变量,以采用线性功效系数法及变异系数法对酒精度和感官评分进行加权分配(分配系数分别为:0.53、0.47)后得到的综合评分作为响应值,根据Box-Behnken原理设计四因素三水平响应面试验,试验方案与结果如表3所示:

表 3 香蕉桃金娘酒发酵条件优化响应面试验设计与结果
Table 3 Results and analysis of response surface methodology for optimization of fermentation conditions of banana myrtle wine

试验号	A 香蕉汁桃金娘果汁配比(I/V)	B 初始糖度/°Bx	C 酵母添加量/%	D 初始 pH 值	酒精度/%vol	感官评分 / 分	综合评分 / 分
1	0	0	1	1	11.1	81.7	57.3
2	0	0	-1	1	9.3	77.5	5.5
3	0	-1	0	-1	11.1	76.1	41.2
4	0	1	0	1	9.8	79.8	23.2
5	0	1	-1	0	9.4	80.6	16.6
6	-1	0	0	-1	10.5	81.1	42.4
7	0	0	0	0	11.7	90.9	97.1
8	1	-1	0	0	10.3	81.5	39.1
9	0	0	0	0	11.8	89.9	96.4
10	0	0	1	-1	10.1	82.1	36.4
11	0	1	1	0	10.3	83.4	44.6
12	-1	0	1	0	10.7	81.2	47.1
13	0	0	-1	-1	11.1	81.8	57.6
14	1	0	0	-1	10.6	83.7	52.1
15	1	1	0	0	9.5	82.2	23.4
16	-1	0	0	1	10.6	79.1	38.8
17	0	0	0	0	11.5	91.2	93.6
18	0	-1	0	1	10.7	79.8	43
19	0	-1	1	0	10.3	77.7	28.1
20	1	0	-1	0	10.1	80.2	30.9
21	0	-1	-1	0	10.6	76.3	30.7
22	0	1	0	-1	11.1	83.9	63.7
23	1	0	0	1	9.8	78.3	18.8
24	0	0	0	0	11.7	91.6	99.1
25	0	0	0	0	11.6	91.9	97.8
26	-1	1	0	0	9.8	80.8	26
27	-1	0	-1	0	9.7	79.1	18.9
28	1	0	1	0	10.3	81.3	38.5
29	-1	-1	0	0	10.6	75.6	28.7

根据软件 Design-Expert 13 的分析对表数据进行多元回归方程拟合，得到综合评分的二次多项回归模型方程如下所示：

$$Y=96.80+0.0750A-1.11B+7.65C-8.90D-3.25AB-5.15AC-7.42AD+7.65BC-10.57BD+18.25CD-33.34A^2-32.89B^2-32.40C^2-23.93D^2$$

利用软件对模型进行了方差分析和回归系数显著性检验，分析响应值综合评分，结果如表 4 所示。根据分析，综合评分模型 $P<0.000\ 1$ ，模型极显著，失拟项 $P>0.05$ ($P=0.056\ 7$) 不显著，决定系数 $R^2=0.987\ 7$ 、校正决定系数 $R^2_{adj}=0.975\ 5$ ，说明模型可信度高，重现性较好，试验数据的可靠性及精准性较高，该模型可以用来预测香蕉桃金娘酒的综合评分。

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Variance analysis of regression model						
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	20 070.64	14	1 433.62	80.56	<0.000 1	**
A	0.067 5	1	0.067 5	0.003 8	0.951 8	
B	14.74	1	14.74	0.828 3	0.378 2	
C	702.27	1	702.27	39.46	<0.000 1	**
D	950.52	1	950.52	53.41	<0.000 1	**
AB	42.25	1	42.25	2.37	0.145 7	
AC	106.09	1	106.09	5.96	0.028 5	*
AD	220.52	1	220.52	12.39	0.003 4	**
BC	234.09	1	234.09	13.15	0.002 7	**
BD	447.32	1	447.32	25.14	0.000 2	**
CD	1 332.25	1	1 332.25	74.86	<0.000 1	**
A2	7 209.01	1	7 209.01	405.08	<0.000 1	**
B2	7 015.7	1	7 015.7	394.22	<0.000 1	**
C2	6 809.25	1	6 809.25	382.62	<0.000 1	**
D2	3 712.9	1	3 712.9	208.63	<0.000 1	**
残差	249.15	14	17.8			
失拟项	232.37	10	23.24	5.54	0.056 7	
纯误差	16.78	4	4.19			
总和	20 319.79	28				
R^2	0.987 7					
R^2_{Adj}	0.975 5					

注：“*”表示差异显著 ($0.01<P<0.05$)，“**”表示差异极显著 ($P<0.01$)。

根据 P 值分析，回归方程一次项 C、D 和交互项 AD、BC、BD、CD 及二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 均对综

合评分影响极显著性 ($P<0.01$)，二次项 AC 对综合评分影响显著性 ($P<0.05$)，而其他项影响均不显著 ($P>0.05$)。由 F 值分析，各因素对综合评分的影响程度依次为：初始 pH (D)>酵母添加量 (C)>初始糖度 (B)>香蕉汁桃金娘果汁配比 (A)。

香蕉桃金娘酒响应面结果显著性及方差结果结合响应面交互作用曲面图直观分析，可以进一步探究各因素之间交互作用影响的强弱。由图 7 可知，香蕉汁桃金娘果汁配比 (A) 与初始糖度 (B) 间交互作用形成的曲面较平缓，等高线接近圆形，表明 AB 因素间交互作用较弱；由图 8 可知，香蕉汁桃金娘果汁配比 (A) 与酵母添加量 (C) 交互作用形成的曲面较陡峭，等高线成微椭圆形，表明 AC 因素间交互作用较强；由图 9~12 可知，香蕉汁桃金娘果汁配比 (A) 与初始 pH (D)、初始糖度 (B) 与酵母添加量 (C)、初始糖度 (B) 与初始 pH (D)、酵母添加量 (C) 与初始 pH (D) 之间交互作用形成的曲面最陡峭，等高线成椭圆形，表明 AD、BC、BD、CD 因素间交互作用很强。综上可知，该模型响应面结果与显著性及方差分析结果相一致。

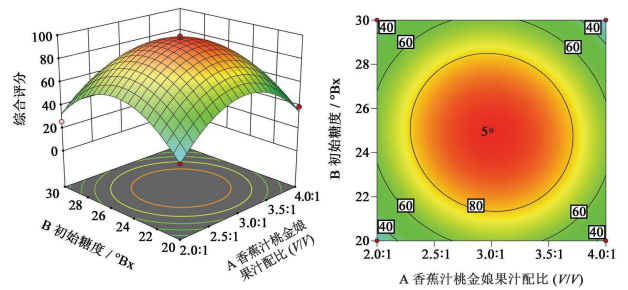


图 7 香蕉汁桃金娘果汁配比和初始糖度对综合评分影响的响应面和等高线

Fig.7 Response surface and contour of the effects of banana juice myrtle juice ratio and initial brix on comprehensive score

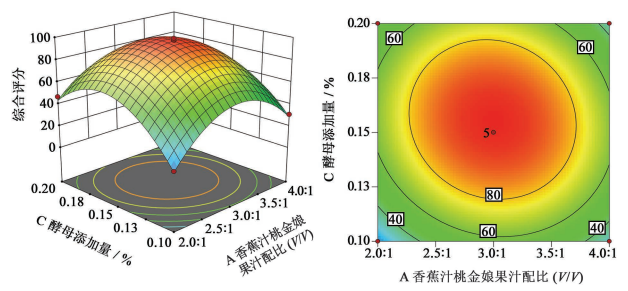


图 8 香蕉汁桃金娘果汁配比和酵母添加量对综合评分影响的响应面和等高线

Fig.8 Response surface and contour of the effects of banana juice myrtle juice ratio and yeast addition amount on comprehensive score

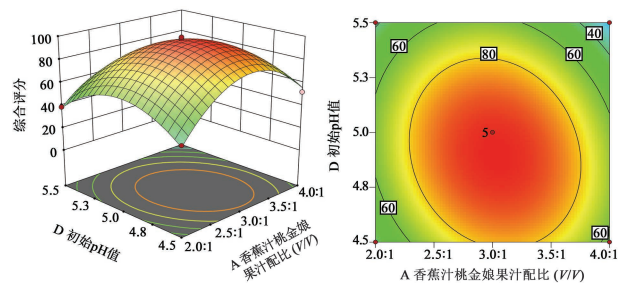


图 9 香蕉汁桃金娘果汁配比和初始 pH 值对综合评分影响的响应面和等高线

Fig.9 Response surface and contour of the effects of banana juice myrtle juice ratio and initial pH on comprehensive score

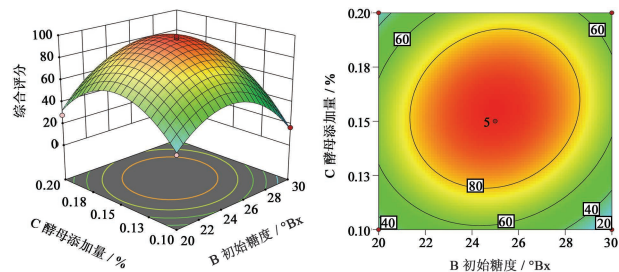


图 10 初始糖度和酵母添加量对综合评分影响的响应面和等高线

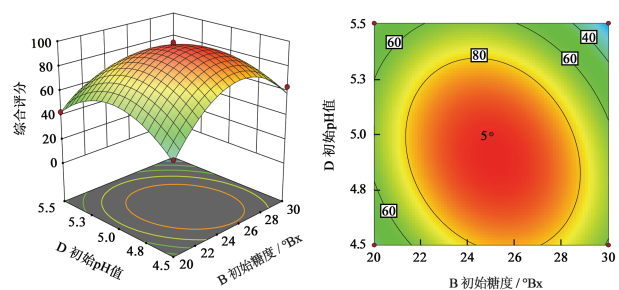


图 11 初始糖度和初始 pH 值对综合评分影响的响应面和等高线

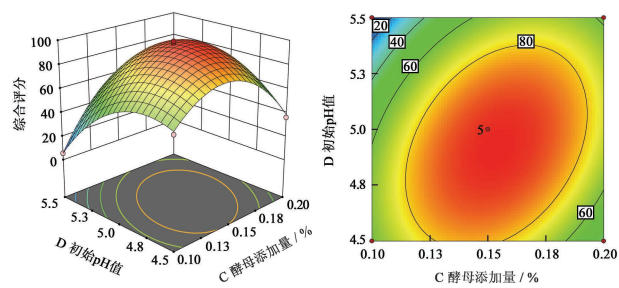


图 12 酵母添加量和初始 pH 值对综合评分影响的响应面和等高线

Fig.12 Response surface and contour of the effects of yeast addition amount and initial pH on comprehensive score

2.3.2 香蕉桃金娘酒发酵工艺验证试验

进一步使用 Design-Expert 13 软件对试验模型进行优化分析，得到发酵最佳工艺条件：香蕉汁桃金娘果汁配比 (V/V) 为 3:1，糖度为 25.133 °Bx，酵母添加量（质量分数）为 0.154%，初始 pH 值为 4.920，香蕉桃金娘酒酒精度为 11.7%vol，感官评分为 91.2，综合评分为 97.7。为检验该模型试验的可靠性，结合整体分析和实际可行性操作，调整工艺参数为香蕉汁桃金娘果汁配比为 3:1，糖度为 25 °Bx，酵母添加量（质量分数）为 0.15%，初始 pH 值为 4.9，该条件下香蕉桃金娘酒酒精度为 11.8%vol，感官评分为 91.1（图 13 显示 10 人感官评价雷达图），综合评分为 99.9，与理论值分相近，证明该模型可靠，可用于预测不同工艺参数下香蕉桃金娘酒综合评分的变化。

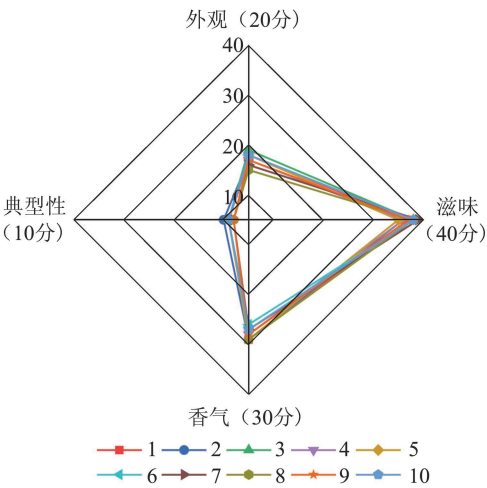


图 13 香蕉桃金娘酒感官评价

表 5 香蕉桃金娘酒理化和抗氧化指标

Table 5 Physicochemical and antioxidant indicators of banana myrtle wine	
指标	结果
酒精度/(%vol)	11.81 ± 0.17
糖度/(°Bx)	4.73 ± 0.058
总酸/(g/L) (以酒石酸计)	6.14 ± 0.085
黄酮/(g/L) (以芦丁计)	0.15 ± 0.015
多酚/(g/L) (以没食子酸计)	2.65 ± 0.096
ABTS ⁺ 清除率/%	93.41 ± 0.89

2.4 香蕉桃金娘酒品质分析及抗氧化活性

利用上述最佳工艺条件发酵香蕉桃金娘酒的理化及抗氧化活性指标见表 5，香蕉桃金娘的酒精度为

11.81%vol, 糖度为 4.73 °Bx, 总酸含量为 6.14 g/L, 黄酮含量为 0.15 g/L、多酚含量为 2.65 g/L, 卢登洋等^[30]研究表明, 梨果实抗氧化活性与多酚和黄酮类物质呈正相关关系, 结合香蕉桃金娘酒 ABTS⁺清除率为 93.41%, 对照课题组前期酿制香蕉酒^[19]的黄酮 (0.10 g/L)、多酚 (0.11 g/L) 含量及 ABTS⁺清除率 (88.22%) 表明, 香蕉桃金娘酒具有较好的抗氧化活性。

2.5 香蕉桃金娘酒风味成分分析

香气是衡量果酒风味品质的关键指标, 果酒的香气根据酿造阶段可分为三类: 品种香、发酵香和陈酿香。水果的品种香是果酒的重要组成部分, 有助于塑造其独特的风味^[31]; 果酒的香气主要由发酵过程产生的芳香物质构成, 这些香气化合物是果酒香气的核心部分, 包括酯类、醇类、有机酸类、醛酮类以及萜烯类等^[32]; 在陈酿过程中, 果酒的芳香成分会发生迁移和转化, 从而增加了香气的复杂性; 另外, 酿酒微生物和风味相关生物酶也会对果酒香气有一定的影响^[31]。本研究采用 HS-SPME-GC-MS 技术对其香气进行分析, 样品总离子流色谱图见图 14, 分析鉴定结果见表 6, 香蕉桃金娘酒中检测到 72 种挥发性香气成分, 约占总香气成分 (质量分数, 下同) 的 95.94%, 酯类 17 种 (16.01%); 醇类 7 种 (40.89%); 酸类 10 种 (6.20%); 羰基类 14 种 (9.90%); 烃类 16 种 (16.36%); 酚类 3 种 (0.40%); 醚类 1 种 (0.28%); 其他类 4 种 (5.90%)。其中酯类、醇类和烃类占主体地位。对照前期韦璐等^[14]香蕉酒 (51 种, 77.78%) 香气成分的研究发现, 香蕉桃金娘酒香气成分增加 21 种, 相对含量增加 18.16%; 李恺安^[33]研究不同葡萄品种对甜瓜-葡萄复合果酒香气的影响发现, 不同品种葡萄-甜瓜复合果酒 (51、50、57 种, 5 658.35、2 355.66、4 951.82 μg/L) 香气成分种类及总含量均高于单一甜瓜果酒 (41 种, 3 027.99 μg/L), 由此表明水果品种香在复合果酒增香过程中发挥重要作用, 使得复合果酒较单一果酒的香气品质更优, 但针对香蕉桃金娘酒较单一香蕉酒增香的影响机制是否受原料种类、发酵方式、酵母种类、生物酶添加量等因素影响, 有待进一步探究。

酯类物质主要来源于酵母代谢和陈酿中酸和醇酯化反应, 其为香蕉桃金娘酒赋予水果香和花香^[34,35]。酯类物质中, 以乳酸乙酯 (4.84%)、乙酸乙酯 (2.79%)、辛酸乙酯 (0.91%) 等含量较高, 可产

生令人愉悦的水果香和花香, 如乳酸乙酯具有玫瑰花香, 乙酸乙酯赋予柔和果香、酯香^[31], 辛酸乙酯具有有玫瑰花香和橙果香^[14], 对香蕉桃金娘酒的主体香型及风格具有显著的影响。

醇类物质主要来源于两个途径: 氨基酸降解代谢和丙酮酸合成代谢, 作为酯类化合物前体物质, 赋予香蕉桃金娘酒醇甜、花香、果香馥郁的味道和口感^[36], 其在果酒香气成分中占比最高, 是主要呈味物质。醇类物质中, 以异戊醇 (23.15%)、乙醇 (8.80%) 和苯乙醇 (5.91%) 占比最大, 异戊醇存在于天然植物中, 具有苹果香、白兰地香以及辛辣味, 是果酒辣味的主要呈现物质; 乙醇是果酒发酵过程的主产物, 香气柔和、甜润, 有助于果酒呈香, 具有成熟的果香和草香味; 苯乙醇具有鲜果香和玫瑰花香, 香味柔和持久^[35]。

酸类物质是酵母的次级代谢产物, 可以与醇类物质反应生成相应的酯类物质^[14]。从香蕉桃金娘酒中分析出乙酸、辛酸等酸类成分, 它具有刺激性的口感, 对果酒的酒体影响较大, 低体积分数乙酸 (3.56%) 赋予果酒浓郁的醋香, 辛酸 (0.52%) 则能够给果酒以奶酪香和水果香, 若其含量过高, 反而会对果酒品质造成消极影响^[14]。

羰基类物质是酒精发酵阶段由醇或酸类物质缩合而成, 可呈现奶油、甜味和果味的香气^[37]。香蕉桃金娘酒中主要的香气成分十六醛 (1.64%) 赋予杏、桃、莓等果香, 3-羟基-2-丁酮 (0.71%) 赋予愉悦奶香^[38], 2-庚酮 (0.55%) 赋予似梨果香^[14]。

除上述酯类、醇类、酸类和羰基类物质外, 香蕉桃金娘酒中还含有烃类、酚类、醚类和其他类物质, 对香气有一定补充和修饰作用, 用于丰富香蕉桃金娘酒的口感和味道。

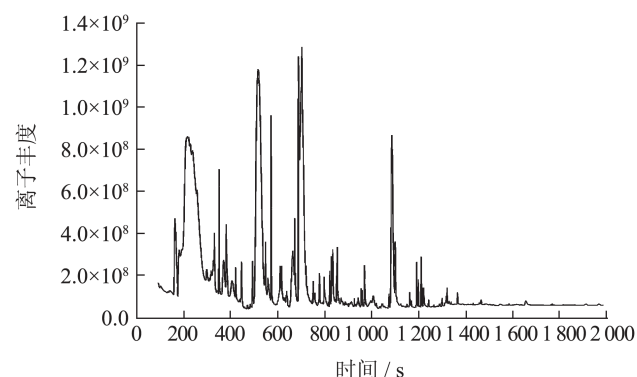


图 14 香蕉桃金娘酒样品香气成分的 GC-MS 总离子流色谱图
Fig.14 Total ion chromatogram of aroma components of banana myrtle wine by GC-MS

表 6 香蕉桃金娘酒香气成分GC-MS分析结果

Table 6 Analysis results of aroma components in banana myrtle wine by GC-MS

化合物种类	保留时间/s	RI (real)	RI (NIST)	名称	分子式	相对含量/%	总相对含量/%
酯类	162.07	855	—	乙酸乙酯	C ₄ H ₈ O ₂	2.79	16.01
	238.67	954	—	乳酸乙酯	C ₅ H ₁₀ O ₃	4.84	
	254.56	971	—	异氰酸酯	CHNO	1.81	
	296.14	1 013	1 027	丁酸乙酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	0.23	
	379.78	1 091	1 074	3-甲基-1-丁醇乙酸酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	0.76	
	492.33	1 199	1 185	己酸乙酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	0.39	
	557.85	1 269	1 294	(Z) -3-己烯酸乙酯	C ₈ H ₁₄ O ₂	0.38	
	558.91	1 271	—	2-甲基丁基乙酸酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	0.39	
	609.80	1 327	—	2-辛醇乙酸酯	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	0.80	
	671.75	1 399	1 435	辛酸乙酯	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	0.91	
	827.62	1 599	1 638	癸酸乙酯	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	0.38	
	830.62	1 603	1 617	γ-丁内酯	C ₄ H ₆ O ₂	0.15	
	833.79	1 608	—	乙酸 1-甲基丁酯	C ₉ H ₁₆ O ₃	0.84	
	854.08	1 636	1 647	苯甲酸乙酯	C ₉ H ₁₀ O ₂	0.50	
	954.25	1 781	1 813	乙酸苯乙酯	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	0.14	
	1 190.42	2 169	2 166	棕榈酸甲酯	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	0.33	
	1 210.27	2 204	—	棕榈酸乙酯	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	0.37	
醇类	236.00	952	940	乙醇	C ₂ H ₆ O	8.80	40.89
	329.69	1 045	1 045	1-丙醇	C ₃ H ₈ O	0.68	
	368.85	1 081	1 083	2-甲基丙醇	C ₄ H ₁₀ O	1.30	
	523.29	1 233	1 218	异戊醇	C ₅ H ₁₂ O	23.15	
	699.62	1 433	1 412	仲辛醇	C ₈ H ₁₈ O	0.55	
	853.24	1 635	1 647	3-戊烯-2-醇	C ₅ H ₁₀ O	0.50	
	1 085.49	1 988	—	苯乙醇	C ₈ H ₁₀ O	5.91	
酸类	687.77	1 418	—	乙酸	C ₂ H ₄ O ₂	3.56	6.20
	756.38	1 504	1 535	丙酸	C ₃ H ₆ O ₂	0.16	
	777.35	1 532	—	异丁酸	C ₄ H ₈ O ₂	0.35	
	821.64	1 591	—	4-氯丙酸	C ₄ H ₇ ClO ₂	0.25	
	850.56	1 631	—	异戊酸	C ₅ H ₁₀ O ₂	0.28	
	968.62	1 803	1 784	己酸	C ₆ H ₁₂ O ₂	0.50	
	1 099.73	2 012	—	辛酸	C ₈ H ₁₆ O ₂	0.52	
	1 161.01	2 116	—	壬酸	C ₉ H ₁₈ O ₂	0.18	
	1 219.39	2 221	—	癸酸	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	0.270	
	1 656.01	2 861	—	棕榈酸	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	0.13	

续表 6

化合物种类	保留时间/s	RI (real)	RI (NIST)	名称	分子式	相对含量/%	总相对含量/%
羰基类	383.77	1 095	1 136	2,3-己二酮	C ₆ H ₁₀ O ₂	0.25	9.90
	444.96	1 154	1 174	2-庚酮	C ₇ H ₁₄ O	0.55	
	510.22	1 219	1 249	5-庚烯-2-酮	C ₇ H ₁₂ O	3.91	
	530.29	1 240	—	1,1,1-三氟-2-丙酮	C ₃ H ₃ F ₃ O	1.35	
	560.05	1 272	1 272	3-羟基-2-丁酮	C ₄ H ₈ O ₂	0.71	
	560.51	1 272	—	3-庚烯-2-酮	C ₇ H ₁₂ O	0.17	
	615.77	1 334	—	5-十一烯-4-酮	C ₁₁ H ₂₀ O	0.41	
	750.34	1 497	1 506	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	0.27	
	802.72	1 566	1 575	异佛尔酮	C ₉ H ₁₄ O	0.10	
	838.50	1 614	1 627	苯乙醛	C ₈ H ₈ O	0.11	
	958.04	1 787	1 790	2,4-二甲基苯甲醛	C ₉ H ₁₀ O	0.14	
	970.07	1 805	—	肉桂醛	C ₉ H ₈ O	0.17	
	1 045.58	1 923	—	1-苯基十二 碳-1-烯-3-酮	C ₁₈ H ₂₆ O	0.12	
	1 084.48	1 986	—	十六醛	C ₁₆ H ₃₂ O	1.64	
烃类	138.63	812		1-乙氧基-1-甲氧 基乙烷	C ₅ H ₁₂ O ₂	0.15	16.36
	256.51	973	1 000	癸烷	C ₁₀ H ₂₂	2.20	
	298.60	1 016	1 031	甲苯	C ₇ H ₈	0.23	
	315.54	1 031	1 058	壬烷	C ₉ H ₂₀	0.31	
	325.24	1 040	1 048	3-甲基癸烷	C ₁₁ H ₂₄	0.54	
	349.20	1 063	—	正十一烷	C ₁₁ H ₂₄	0.84	
	517.89	1 227	1 227	苯乙烯	C ₈ H ₈	3.59	
	526.33	1 236	1 257	邻伞花烃	C ₁₀ H ₁₄	4.07	
	547.39	1 258	—	正十三烷	C ₁₃ H ₂₈	0.38	
	572.53	1 285	—	正癸烯	C ₁₀ H ₂₀	0.20	
	611.37	1 329	1 342	苯丙烯	C ₉ H ₁₀	0.85	
	619.55	1 338	—	1,4-噻恶烷	C ₄ H ₈ OS	0.14	
	656.54	1 381	1 419	戊基苯	C ₁₁ H ₁₆	0.16	
	663.65	1 389	—	丙基环丙烷	C ₆ H ₁₂	2.18	
	757.73	1 506	—	2,4-二乙酰氧戊烷	C ₉ H ₁₆ O ₄	0.16	
	797.19	1 559	—	正十六烷	C ₁₆ H ₃₄	0.36	
	1 044.33	1 921	1 956	2-甲氧基-4-甲基苯酚	C ₈ H ₁₀ O ₂	0.12	
酚类	1 073.78	1 969	—	苯酚	C ₆ H ₆ O	0.12	0.40
	1 321.05	2 412.3	—	4-异丙基苯酚	C ₉ H ₁₀ O	0.16	
醚类	323.67	1 039	—	二甲醚	C ₂ H ₆ O	0.28	0.28
其他类	240.27	956	940	甲基胂	CH ₆ N ₂	3.88	5.90
	329.81	1 045	1045	乙二胺	C ₂ H ₈ N ₂	1.54	
	850.73	1 632	—	丁腈	C ₄ H ₇ N	0.28	
	1 197.75	2 182	—	榄香素	C ₁₂ H ₁₆ O ₃	0.20	

3 结论

本研究通过单因素和线性功效系数法结合响应面试验确定香蕉桃金娘酒发酵最佳工艺条件：*Saccharomyces cerevisiae* CECA 为发酵菌种，香蕉汁桃金娘果汁配比（*V/V*）3:1，初始糖度 25 °Bx，酵母添加量（质量分数）0.15%，初始 pH 值 4.9，在此条件下酿制香蕉桃金娘酒综合评分达 99.9 分，酒精度 11.81%vol，糖度 4.73 °Bx，总酸 6.14 g/L，黄酮 0.15 g/L，多酚 2.65 g/L，ABTS⁺ 清除率 93.41%，较香蕉酒的黄酮（0.10 g/L）、多酚（0.11 g/L）含量及 ABTS⁺ 清除率（88.22%）有显著提升。经 HS-SPEM-GC-MS 技术测定香蕉桃金娘酒含 72 种挥发性香气成分，占比（质量分数）约 95.94%，与香蕉酒相比，香蕉桃金娘酒香气成分增加 21 种，相对含量增加 18.16%，其中主要呈香化合物为异戊醇（苹果香、白兰地香、辛辣味）和乳酸乙酯（玫瑰花香）。综合表明，香蕉桃金娘酒较香蕉酒，呈现出较高的抗氧化活性，风味独特，具有良好的开发潜力。

参考文献

- [1] MANUEL F C, SIMON P M, ANGEL D R. Prospectives for the development of a circular bioeconomy around the banana value chain [J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 30: 541-555.
- [2] CHEN J, LI F, LI Y, et al. Exogenous procyanidin treatment delays senescence of harvested banana fruit by enhancing antioxidant responses and *in vivo* procyanidin content [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 158(10): 110-122.
- [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] LI X X, PU Y J, XU Y, et al. Potential hypolipidemic effects of banana condensed tannins through the interaction with digestive juice components related to lipid digestion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(31): 8703-8713.
- [5] 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.
- [6] 赵广河, 陆玺文, 胡梦琪, 等. 桃金娘果实多糖抗氧化稳定性的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 65-70.
- [7] 罗爽妍, 王超, 段翰英, 等. 野生桃金娘主要抗氧化成分及其抗氧化能力[J]. 食品科学, 2015, 36(17): 77-82.
- [8] HAN X, PENG Q, YANG H, et al. Influence of different carbohydrate sources on physicochemical properties and metabolites of fermented greengage wines [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 121(8): 108-120.
- [9] PAWEL S, DOROTA S S, TOMASZ T, et al. Influence of selected *Saccharomyces* and *Schizosaccharomyces* strains and their mixed cultures on chemical composition of apple wines [J]. Journal of Food Science, 2018, 83(2): 424-431.
- [10] NANNYONGA S, TCHUENBOU M F, GOODE K, et al. Growth kinetics and modelling of *S. cerevisiae* during de-lignified waste banana fermentation and chemical characterization [J]. Biochemical Engineering Journal, 2018, 137(2): 255-261.
- [11] 胡梦琪. 桃金娘果酒加工技术研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2022.
- [12] REYNALDI K, TITRI S M. Fruit wine characteristics with variety of banana type along with banana and water ratio [J]. Geisem Proceeding, 2022, 1: 186-199.
- [13] MAHESWARI T U, KARUPPAIYA M, SUBHAGAR S, et al. Potent inhibitory action of banana wine polyphenols on colon cancer cells (HCT-15) [J]. Research Journal of Pharmacy and Technology, 2020, 11: 13.
- [14] 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.
- [15] 董法宝, 李声威, 刘元昊, 等. 火龙果香蕉刺梨复合果酒酿造工艺优化及其风味品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(14): 155-165.
- [16] 黄腾欢, 韦美晴, 董佩佩, 等. 百香果-香蕉复合果酒工艺研究及其品质分析[J]. 农产品加工, 2024, 8: 33-40, 44.
- [17] PUROHIT H K. Studies on production of wine from mixed fruit (banana, papaya and muskmelon) [J]. An Institutional Repository of Indian National Agricultural Research System, 2016, 1: 1-70.
- [18] ADEYEM P A, GABRIEL O A, FOLASADE O A. Chemical, microbiological and sensory profiles of mixed fruit wine from banana (*Musa acuminata*), watermelon (*Citrullus vulgaris* L.), pineapple (*Ananas comosus* L.) and cucumber (*Cucumis sativus*) [J]. Acta Scientific Nutritionai Heath, 2020, 4(3): 25-30.
- [19] 韦璐, 孙钦菊, 黄杰, 等. 香蕉果酒发酵过程中主要成分变化规律的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(23): 37-43.
- [20] ZHENG S D, CHEN G, QUE F X, et al. Optimization of fermentation process for whole navel orange wine and comparative analysis of flavor components with navel orange juice wine [J]. Food Science, 2019, 10: 171-177.
- [21] 袁越锦, 李沈沈, 徐英英, 等. 基于变异系数法评价不同湿热处理对大豆干燥品质的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(6): 55-61.
- [22] 马璐璐, 刘瑜, 王海, 等. 基于线性功效系数法及响应面法优化扇贝柱太阳能干燥工艺[J]. 中国调味品, 2023, 48(5): 104-109.
- [23] GB/T 15038-2006, 葡萄酒、果酒通用分析方法[S].
- [24] 齐习超. 黑化红枣酒加工品质研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [25] AYTURSUM A, REHEBATI N, PAIHEERDING M, et al. Isolation, structural modification, characterization, and bioactivity of polysaccharides from folium isatidis [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 176: 114319.
- [26] 杨辉, 黄丽梅, 罗建华. 海红果酒酵母筛选及其发酵工艺的响应面法优化[J]. 食品工业科技, 2014, 35(9): 221-225.
- [27] 郭明遗, 邓艳, 杜前红, 等. 青李薄荷酒发酵工艺优化及风味成分分析[J]. 食品与机械, 2023, 39(6): 201-209.
- [28] 吴均, 吴俊葶, 黄传书, 等. 桑葚玫瑰果酒发酵工艺优化及体外抗氧化活性测定[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(22): 93-100.

- [29] 卫春会,郑自强,郭燕,等.橄榄果酒的研制及其风味物质分析[J].现代食品科技,2020,36(12):234-242,313.
- [30] 卢登洋,王鑫,唐章虎,等.梨果实发育过程中酚类物质组成及抗氧化活性比较[J].中国农业科技导报,2023,25(9):97-104.
- [31] RUIZ J, KIENE F, BELDA I, et al. Effects on varietal aromas during wine making: a review of the impact of varietal aromas on the flavor of wine [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(18): 7425-7450.
- [32] 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.
- [33] 李恺安,张瑜,任学梅,等.不同葡萄品种对甜瓜-葡萄复合果酒香气影响[J/OL].甘肃农业大学学报,1-16[2024-09-27].
- [34] LU Y Y, CHAN L J, LI X, et al. Effects of different inoculation strategies of *Saccharomyces cerevisiae* and *Williopsis saturnus* on chemical components of mango wine [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 87: 85-92.
- [35] TANG Z S, ZENG X A, BRENNAN M A, et al. Characterization of aroma profile and characteristic aromas during lychee wine fermentation [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(8): 1-14.
- [36] 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-Food Science and Technology, 2020, 132: 109929.
- [37] LI C, SAM A D, WANG Z P, et al. Investigation of volatile flavor compounds and characterization of aroma-active compounds of water-boiled salted duck using GC-MS-O, GC-IMS, and E-nose [J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132728.
- [38] EDUARDO D, ORIOL T, LAURA F, et al. Pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.) wine production in angola: Characterisation of volatile aroma compounds and yeast native flora [J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 241: 161-167.