

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2026.80110

火龙果红茶复合发酵酒的研制及其风味物质分析

卫春会 李筱熠 杨易坤 桑时鑫 曾仕燕

(四川轻化工大学酿酒科学与技术四川省重点实验室, 四川 宜宾 644000)

摘要: [目的] 研制一款融合火龙果与红茶风味的复合发酵酒, 优化发酵工艺, 解析其挥发性风味物质构成。 [方法] 以红心火龙果和红茶为主要原料, 经混合调配、接种酵母后进行发酵。通过单因素和正交试验对发酵工艺参数进行优化, 并采用 HS-SPME-GC-MS 分析其挥发性风味成分。 [结果] 最佳发酵条件为火龙果汁与红茶汤体积比 1:5、初始糖度 24 °Brix、酵母接种量 8%、初始 pH 3.8、发酵时间 13 d、发酵温度 28 °C, 所得酒精度约 10.6%vol, 色泽透亮, 香气协调。成品中共鉴定出 56 种挥发性化合物, 以酯类 (57.53%) 为主, 辅以酮类、酚类等成分; 其中癸酸乙酯、辛酸乙酯贡献热带果香与奶油香, 2,4-二叔丁基酚等物质共同构成了酒体独特的风味轮廓。 [结论] 最佳工艺条件下, 火龙果红茶复合发酵酒的风味独特, 其挥发性风味物质以酯类、酮类和酚类为主。

关键词: 复合型茶果酒; 红茶; 火龙果; 正交优化; 风味物质

Optimization of fermentation process and analysis of flavor compounds in pitaya-black tea wine

Wei Chunhui Li Xiaoyi Yang Yikun Sang Shixin Zeng Shiyan

(Brewing Science and Technology Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: [Objective] To develop a composite fermented wine integrating the flavors of pitaya and black tea, optimize the fermentation process, and analyze its volatile flavor compounds. [Methods] The mixture of red-fleshed pitaya juice and black tea infusion is inoculated with yeast for fermentation. Single-factor and orthogonal experiments are employed to optimize the fermentation parameters, and the volatile flavor components are analyzed by headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). [Results] The optimal fermentation conditions are determined as follows: a volume ratio of pitaya juice to black tea infusion of 1:5, an initial sugar degree of 24 °Brix, a yeast inoculation amount of 8%, initial pH 3.8, and fermentation for 13 days at 28 °C. Under these conditions, the resulting wine has the alcohol content of 10.6%vol, a bright and clear color, and a well-balanced aroma. A total of 56 volatile compounds are identified in the final product, with esters being the predominant group (57.53%), supplemented by ketones, phenols, and others. Among them, ethyl decanoate and ethyl octanoate contribute tropical fruity and creamy notes, while compounds such as 2,4-di-tert-butylphenol, together with other constituents, shape the unique flavor profile of the wine. [Conclusion] The pitaya-black tea wine produced with the optimal process exhibits a distinctive flavor, with volatile compounds dominated by esters, ketones, and phenols.

Keywords: composite tea-fruit wine; black tea; pitaya; orthogonal optimization; flavor compound

通过微生物发酵技术, 茶叶加工制品能够被转化为 仍采用传统配制工艺, 但发酵型茶酒的研发探索从未停
拥有独特香气特征的功能性饮料。尽管市场上主流产品 歇。陈艳等^[1]选取金桔与红茶为原料, 利用酿酒酵母 SY

基金项目: 安徽省功能性果饮生态发酵工程研究中心开放课题 (编号: FYKFKT24021); 四川轻化工大学省级大学生创新创业训练计划项目 (编号: S202310622081)

通信作者: 卫春会 (1980—), 女, 四川轻化工大学正高级实验师, 硕士。E-mail: wei_chunhui@suse.edu.cn

收稿日期: 2026-02-03 **改回日期:** 2026-08-24

引用格式: 卫春会, 李筱熠, 杨易坤, 等. 火龙果红茶复合发酵酒的研制及其风味物质分析[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 205-213.

Citation: Wei Chunhui, Li Xiaoyi, Yang Yikun, et al. Optimization of fermentation process and analysis of flavor compounds in pitaya-black tea wine[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 205-213.

发酵,通过响应面法优化工艺,最后研制出酒精度为 11.83%vol、总多酚含量为 0.25 mg/mL 的金桔红茶酒,该酒实现了金桔果香、红茶茶香与酒香的融合。李维等^[2]将绿茶汤与柠檬汁混合发酵,经过单因素与正交试验研制出橙红透亮、口感优良的柠檬绿茶酒。魏鑫等^[3]以猕猴桃和红茶为主要原料研制复合茶酒,其酒精度达 11.9%vol,总多酚含量为 1.57 mg/mL,且 DPPH 自由基与 ABTS⁺ 自由基清除率均超过 90%,表现出良好的抗氧化活性。此外,柑橘红茶酒、仙人掌果红茶酒、雪梨茶酒等品类也逐渐涌现,但针对火龙果与红茶复合发酵酒的研究尚未见报道。

火龙果中富含维生素 C、番茄红素等多种生物活性成分,具有抗氧化、免疫调节等功能,有助于增强机体免疫力、维护皮肤健康与机体细胞稳定^[4-9]。红茶中约含有 60 种活性成分,包括酚类、萜类、呋喃类及酮类化合物,这些物质不仅构成其独特风味,也赋予其较高的营养与功能价值^[10-14]。二者混合发酵过程中,酵母的代谢活动不仅转化糖类生成酒精,还会与原料中的次生代谢产物发生交互作用,生成酯、酮、酚类等挥发性风味物质,最终影响酒体的香气特征和感官表现。因此,发酵条件的控制直接关系到产品的品质稳定性,而风味物质的构成则是理解其感官特征的基础。

试验拟以红心火龙果与四川特色川红功夫红茶为主要原料,通过单因素及正交试验,以酒精度和感官评分为主要指标,系统优化火龙果红茶复合发酵酒的发酵工艺。在此基础上,利用 HS-SPME-GC-MS 技术对成品酒的挥发性风味物质进行全谱分析,旨在揭示其核心风味物质与特征标识物,从而开发出一款香气协调、风味独特的火龙果红茶酒,为复合型功能性发酵饮品的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

红茶(川红功夫红茶)、火龙果(国产红心火龙果)、白砂糖:市售;

果酒酵母:保藏于酿酒科学与技术四川省重点实验室。

1.2 主要仪器设备

榨汁机: MJ-25BM05C 型,广东美的精品电器有限公司;

恒温培养箱: XMT-100C 型,重庆市永生试验仪器厂;

正置生物显微镜: DM3000 型,德国 Leica 公司;

紫外可见分光光度计: A360 型,翱艺仪器上海有限公司;

气相色谱质谱联用仪: 7890A-5975B 型,美国安捷伦公司;

酒精计: LM79-J10 型,成都东立恒达科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

红茶→浸提→过滤→冷却→加入火龙果汁→调节糖度与 pH→接种酵母→发酵→过滤→陈酿→澄清→灭菌→成品火龙果红茶酒

1.3.2 操作要点

(1) 红茶汤提取:称取红茶,按料液比 1:10 (g/mL) 加入纯净水,清洗 2~3 次后沥干;再按料液比 1:50 (g/mL) 加入 85~90 °C 热水,80 °C 密闭浸提 30 min,趁热经 4 层纱布过滤,收集滤液,冷却至室温备用。

(2) 火龙果果汁制备:选取成熟度一致的红心火龙果,洗净、去皮后切块,经打浆机破碎,向果浆中加入质量分数 0.04% 的抗坏血酸护色,搅拌均匀后添加质量分数 0.003% 的果胶酶,45~50 °C 酶解 1.5~2.0 h,以提高出汁率与澄清度。

(3) 基料调配:将火龙果汁与红茶汤按体积比 1:5 混匀,使用柠檬酸溶液调节混合液 pH 至 3.4,并添加白砂糖调整初始糖度为 24 °Brix。

(4) 酵母活化:称取果酒干酵母,复溶于质量分数 4% 的葡萄糖溶液中,28 °C 恒温活化 1~2 h,期间每 30 min 摇匀一次,镜检确认酵母细胞形态正常,且出芽率>20% 后停止活化。

(5) 主发酵:将活化后的酵母液按 8% (体积分数) 接种量接入调配好的基料中,轻轻摇匀,28 °C 发酵 11~13 d,每天定时摇瓶 1 次。

(6) 粗滤:主发酵结束后,采用 8 层经灭菌的洁净棉纱布过滤,去除酒脚及大颗粒固形物。

(7) 陈酿:将滤液转入洁净容器中,15 °C、避光密闭陈酿 15 d,促进风味融合与酒体老熟。

(8) 低温澄清:将酒液转移至 4 °C 冷柜中密闭冷藏 15 d,促使胶体物质沉降,获得澄清酒体。

(9) 巴氏灭菌:采用水浴巴氏杀菌法,将酒液于 65 °C 水浴 20 min,冷却,灌装即得成品火龙果红茶酒。

1.3.3 火龙果红茶酒发酵条件优化

(1) 单因素试验:固定火龙果汁和红茶汤体积比 1:5、初始糖度 24 °Brix、初始 pH 3.4、酵母接种量 8%、发酵温度 28 °C,发酵时间 13 d。以酒精度和感官评分为评价指标,分别考察火龙果汁和红茶汤体积比(5:1,1:1,1:5,1:10,1:15)、发酵时间(9,10,11,12,13 d)、初始糖度(18,20,22,24,26 °Brix)、初始 pH 值(3.0,3.4,3.8,4.2,4.6)和酵母接种量(6%,7%,8%,9%,10%)对火龙果红茶酒品质的影响。

(2) 正交试验:在单因素试验基础上,固定火龙果汁与红茶汤体积比 1:5、发酵温度 28 °C、发酵时间 13 d,以酒精度和感官评分为评价指标,进一步采用 L₉(3³) 正交试验,考察初始糖度、酵母接种量和初始 pH 3 个因素对火龙

果红茶酒品质的综合影响。采用综合评分法作为正交试验的评价指标。

1.3.4 理化指标测定

- (1) 总糖、总酸含量:参照文献[15]。
- (2) 酒精度:参照文献[16]。
- (3) 茶多酚含量:参照文献[17]。

1.3.5 综合评分方法

(1) 感官评分:由10名经培训的评价人员组成感官品评小组,按表1对不同酒样进行独立评分,结果取平均值。感官评价在专用的感官分析实验室内进行,环境温度为(22±2)℃,采用白色日光灯照明,评价员之间设置隔板避免相互干扰,样品以随机3位数编码呈送,评价员独立评分后取平均值。

(2) 理化指标评分:选取酒精度作为关键理化指标,分别对各指标进行标准化处理,再按权重加权求和。综合感官品质和理化指标的重要性,感官评分赋予60%的权重,理化指标评分赋予40%的权重,计算各组的综合得分。

1.3.6 风味物质测定 参照康明丽等^[18]的方法,并稍作改进。

(1) 样品处理:采用顶空—固相微萃取(HS-SPME)法。准确量取5 mL火龙果红茶酒样于15 mL专用顶空瓶

中,加入2 g氯化钠、20 μL 2-辛醇(内标)及磁力搅拌子。SPME萃取前,将老化后的萃取头在进样口于230℃活化30 min。将装有样品的顶空瓶于50℃恒温加热台,插入SPME萃取头,50℃顶空吸附45 min,期间保持磁力搅拌。萃取完成后,将萃取头迅速插入气相色谱进样口,230℃解吸5 min,进行GC-MS分析。

(2) 气相色谱条件:采用DB-WAX毛细管色谱柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm),进样口温度230℃,不分流进样,载气为高纯氦气(99.999%),流速1.0 mL/min。程序升温:起始温度40℃保持1 min,以5℃/min升至180℃保持1 min,再以10℃/min升至230℃保持7 min。

(3) 质谱条件:电子轰击离子源(EI),电子能量70 eV;离子源温度230℃,四级杆温度150℃;传输线温度230℃;质量扫描范围 m/z 20~500;溶剂延迟3 min。

(4) 定性定量分析:采集的质谱数据通过NIST 11.7标准谱库进行检索比对,结合保留指数及相关文献进行定性;采用内标法(2-辛醇)进行半定量分析。重点对酯类、醇类、酮类、酚类等关键香气成分进行解析。

1.3.7 数据处理 所有试验均设置3次重复,结果以“平均值±标准差”表示。使用Excel 2022进行基础数据处理,采用GraphPad Prism10.6软件进行方差分析(ANOVA),差异显著性水平设为 $P<0.05$ 。使用Origin 2021软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 火龙果汁与红茶汤体积比 由表2可知,不同体积比下火龙果红茶酒酒样的感官特征具有显著差异。当火龙果汁与红茶汤体积比为5:1时,火龙果风味过重,茶香不显,酒体浑浊;当火龙果汁与红茶汤体积比为1:5时,酒体呈深红色、清澈透明,果香与茶香协调,口感细腻,感官评分达85±1.18,显著高于其他体积比的($P<0.05$)。因此,确定最佳火龙果汁与红茶汤体积比为1:5。

2.1.2 发酵时间 由图1可知,发酵时间对酒精度和感官品质影响显著。随着发酵时间的延长,酒精度先上升后趋稳。感官评分在发酵第13天达到峰值,此时酒精度为(10.53±0.16)%vol,酒体醇厚协调;发酵时间>13 d后酒精度变化不大,但出现苦涩味,感官评分下降。故确定13 d为最佳发酵时间。

2.1.3 初始糖度 初始糖度直接影响酵母的生长代谢与酒精生成,进而决定酒样的风味与感官品质。由图2可知,当初始糖度为18~26 °Brix时,酒精度与感官评分均呈先升后降趋势,酒精度在24 °Brix时最高,但感官评分在22 °Brix时最佳(风味协调)。糖度过高(26 °Brix)会抑制酵母活性,导致酒精度下降且口感甜腻。综合考虑,选取20, 22, 24 °Brix进行正交试验。

表1 火龙果红茶感官品评标准
Table 1 Sensory evaluation criteria for pitaya-black tea wine

项目	标准	分值	加权值/%
外观	透明发亮,呈深红色(红茶与火龙果汤色),无浑浊	85~100	20
	透明,呈深红色,稍有浑浊	75~84	
	颜色暗淡、混浊	<74	
香气	酒香怡人,红茶香与火龙果香协调突出	85~100	30
	酒香较淡,红茶香与火龙果香稍弱	75~84	
	酒香单薄,缺乏茶香与果香,略带不良气味	60~74	
	无特征香气,不良气味明显	<59	
口感	口感丰富协调,红茶与火龙果风味适中,酒体醇和	85~100	30
	口感较好,红茶味明显,略带苦涩	75~84	
	无明显缺陷,酒体较细腻,但缺乏茶味,略有苦涩	60~74	
	酒体单薄,风味不足,苦涩味突出	<59	
风格	典型性突出,风格独特、优雅	85~100	20
	典型性明确,风格完整	75~84	
	略有典型性,风格不够优雅	60~74	
	缺乏典型风格	<59	

表 2 火龙果汁与红茶汤体积比对感官品评的影响

火龙果汁与红茶汤体积比	外观	香气	口感	风格	评分
5:1	火龙果汤色突出,混浊	酒香突出,火龙果香浓郁,茶香较淡	火龙果味浓,红茶味寡淡,酒体醇和	稍有典型性,不够优雅	75±1.61
1:1	火龙果汤色较突出,较混浊	酒香怡人,火龙果香浓郁,茶香浅	火龙果味浓,红茶味适中,酒体较醇和	典型明确,风格完好,比较优雅	77±1.04
1:5	有红茶和火龙果汤色,透明	酒香怡人,火龙果香适中,茶香宜人	火龙果味适中,红茶味浓郁,酒体细腻	典型较完美,风格独特,比较优雅	85±1.18
1:10	有红茶和火龙果汤色,较透明	酒香较单薄,火龙果香浅,茶香浓郁	火龙果味少许,红茶味浓郁,酒体细腻,稍有涩感	典型明确,风格完好,比较优雅	80±2.36
1:15	红茶汤色突出,透明发亮,颜色较暗淡	酒香单薄,火龙果香较淡,茶香浓郁	火龙果味寡淡,红茶味浓郁,涩味较重	稍有典型性,风格单一,不够优雅	78±1.11

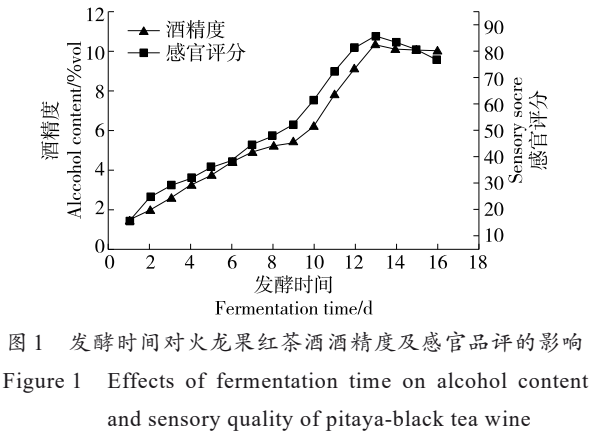


图 1 发酵时间对火龙果红茶酒酒精度及感官品评的影响
Figure 1 Effects of fermentation time on alcohol content and sensory quality of pitaya-black tea wine

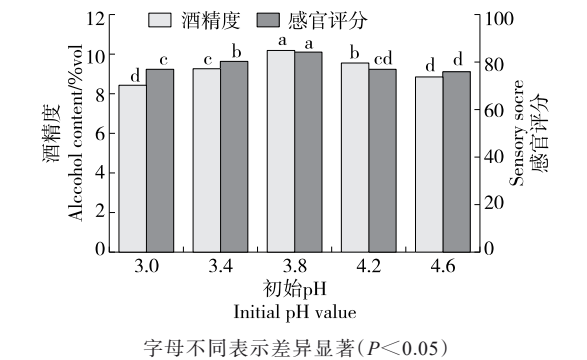


图 3 初始 pH 对火龙果红茶酒酒精度及感官品评的影响
Figure 3 Effects of initial pH on alcohol content and sensory quality of pitaya-black tea wine

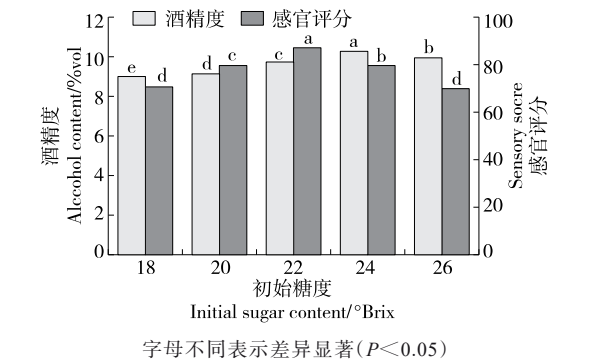


图 2 初始糖度对火龙果红茶酒酒精度及感官品评的影响
Figure 2 Effects of initial sugar degree on alcohol content and sensory quality of pitaya-black tea wine

2.1.4 初始 pH pH是影响酵母生长代谢与发酵过程的关键环境因子。过低的 pH(<3.0)会显著抑制酵母繁殖与酶活性,而过高的 pH(>5.0)则可能削弱其代谢活力并增加杂菌污染风险^[19]。由图 3 可知,由于酵母菌对酸碱环境极具敏感性,随着初始 pH 的升高,酒精度与感官评分

均呈先上升后下降趋势,表明 pH 对酒精转化与火龙果红茶酒品质具有显著影响。当 pH 为 3.8 时,酒精度与感官评分均达最高($P<0.05$),酒体风味协调;pH 低于 3.4 或高于 4.2 均导致酒精度下降,酸味或苦涩味突出。故选取 pH 3.4,3.8,4.2 进行正交试验。

2.1.5 酵母接种量 酵母接种量直接影响其生长代谢与发酵进程。接种量过高虽可加速发酵初期酵母增殖,但也易导致糖源过早耗尽,引发酵母早衰,从而削弱后续发酵能力;接种量不足则会延长发酵周期,并增加杂菌污染风险^[20]。由图 4 可知,随着酵母接种量的增加,酒精度和感官评分均呈先升高后降低趋势,表明酵母接种量对发酵效率及火龙果红茶酒品质具有显著调控作用。当接种量为 6%~10% 时,酒精度与感官评分先升后降,酒精度在 7% 时最高,但感官评分在 8% 时最佳($P<0.05$);接种量过高(10%)会导致发酵过快、风味失衡,接种量过低(6%)则延长发酵时间且制品酸味突出。因此,选取 7%,8%,9% 进行正交试验。

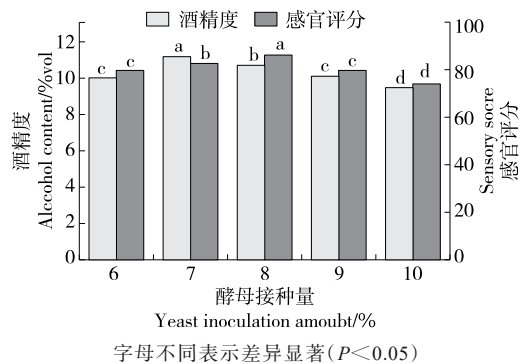


图4 酵母菌接种量对火龙果红茶酒酒精度及感官品评的影响

Figure 4 Effects of yeast inoculation amount on alcohol content and sensory quality of pitaya-black tea wine

2.2 正交试验

在单因素试验基础上,以综合评分为评价指标,进行 $L_9(3^3)$ 正交试验,系统评估初始糖度、酵母接种量和初始pH 3个因素对火龙果红茶酒品质的影响。正交试验因素水平见表3,正交试验设计及结果见表4。

由表4和表5可知,各因素对其品质的影响程度存在

表3 正交试验因素水平

Table 3 Factors and levels of orthogonal experiment			
水平	A 初始糖度/°Brix	B 接种量/%	C 初始 pH
1	20	7	3.4
2	22	8	3.8
3	24	9	4.2

表4 正交试验设计及结果

Table 4 Orthogonal design and experimental results						
试验号	A	B	C	感官评分	理化指标评分	综合评分
1	1	1	1	79	93	84.6
2	1	2	2	84	94	88.0
3	1	3	3	79	92	84.2
4	2	1	2	82	97	88.0
5	2	2	3	86	95	89.6
6	2	3	1	80	96	86.4
7	3	1	3	86	99	91.2
8	3	2	1	91	100	94.6
9	3	3	2	86	98	90.8
k_1	85.6	87.9	88.3			
k_2	88.0	90.7	88.9			
k_3	92.2	87.1	88.5			
R	6.6	3.6	0.6			

表5 火龙果红茶酒发酵正交试验因素方差分析

Table 5 Analysis of variance of factors in orthogonal experiment of pitaya-black tea wine fermentation					
因素	平方和	自由度	均方	F值	P值
A	66.96	2	33.48	119.57	0.008
B	21.44	2	10.72	38.29	0.025
C	0.56	2	0.28	1.00	0.500
误差	0.56	2	0.28		

差异性。其中,A对发酵品质的影响最为显著($P<0.01$),B的次之($P<0.05$),而C对酒样品质的影响最小($P>0.05$)。综合极差分析与方差分析,确定最优工艺参数组合为 $A_3B_2C_2$,即初始糖度24 °Brix、酵母接种量8%、初始pH 3.8。该组合可在保证发酵效率的同时,最大程度提升火龙果红茶酒的感官品质。

2.3 火龙果红茶酒发酵工艺验证实验

采用单因素及正交试验对火龙果红茶酒的发酵工艺进行优化,确定了以火龙果汁和红茶汤体积比1:5、初始糖度24 °Brix、初始pH 3.8、酵母接种量8%的最佳发酵参数,在发酵温度28 °C、发酵13 d条件下制备的酒样色泽明亮,呈现火龙果与红茶协调的汤色;香气层次丰富,果香突出,兼具淡雅红茶风味;口感绵密匀稳,酒体细腻,整体品质优良。相关理化指标检测结果见表6,表明该工艺稳定可靠,产品综合品质符合预期。

表6 火龙果红茶酒的质量指标检测结果

Table 6 Quality indexes of pitaya-black tea wine		
检测项目	单位	检测结果
总酯	g/L	2.97±0.05
酒精度	%vol	10.62±0.17
还原糖(以葡萄糖计)	g/L	14.25±0.07
总酸(以酒石酸计)	g/L	3.13±0.48
茶多酚含量	mg/kg	973.61±32.81

2.4 火龙果红茶酒风味物质分析

茶树品种、生态条件及加工工艺等多元因素的共同作用,构成红茶风味特征化。芳樟醇、水杨酸甲酯、香叶醇和苯乙醇等挥发性成分对其花香和蜜香特性具有显著影响^[21]。不同产区红茶呈现显著的地域香型差异:湖南红茶形成的标志性“花蜜香”主要是由香叶醇、苯乙醇、苯乙醛、芳樟醇和壬醛5类物质所提供;滇红茶则因苯甲醛、樱花醇与水杨酸甲酯含量较高,形成了甜香与焦糖香相互交融的复合香气特征;祁门红茶富含苯甲醛和香叶醇等主要成分,有着典型的花蜜香气^[22-25]。试验采用川红茶为原料,经复合发酵后,检出少量芳樟醇和水杨酸甲酯

等物质,表明这些成分在构成该酒香气特征中仍发挥着基础作用。

由表 7 可知,酒体中共鉴定出 56 种风味物质,涵盖醇、酯、酮、酚、醛、烯及酸类,初步构建了火龙果红茶酒较为完整的香气物质谱。酯类(57.53%)、酮类(19.54%)与酚类(11.82%)构成了其风味骨架,醇类(8.9%)则为重要的风味协调成分,共同塑造了火龙果红茶酒酒体浓郁、复杂且协调的香气特征。

在风味组分上,酯类物质是以癸酸乙酯(2.57%)和辛酸乙酯(2.40%)为主,赋予了酒体典型的葡萄、菠萝等热带果香;同时检出的乙酸苯乙酯进一步增添了优雅的玫瑰甜香特征。酮类物质中丁烯酮(2.19%)与 2-辛酮(1.11%)含量突出,与 β -紫罗兰酮等物质共同贡献了酒体复合的花果香气。值得注意的是,酚类物质虽占比较低,但其与酸性成分分子间的协同效应,显著提升了酒体香气的层次感与协调性^[26-27]。

试验进一步揭示了 3 类具有风味标识意义的特征物质:2,4-二叔丁基酚(2.03%)为关键酚类物质,其含量显著高于常见的发酵型酒,推测其形成可能与红茶多酚在酵母发酵体系中发生的特异性氧化重排反应有关^[28];红茶中富

含的儿茶素类多酚(如表没食子儿茶素没食子酸酯、表儿茶素等)在加工过程中经多酚氧化酶催化,生成茶黄素、茶红素等特征氧化产物。在后续酵母发酵体系中,这些多酚类物质可进一步发生非酶促氧化、酸催化裂解或与酵母代谢产物(如乙醇、有机酸)发生酯化、烷基化反应,进而生成烷基酚类化合物。在此基础上,儿茶素 B 环裂解后生成的酚酸中间体,在酸性发酵条件下可能发生叔丁基取代反应,最终形成 2,4-二叔丁基酚等稳定酚类产物^[29]。二甲基硅烷二醇(0.47%)和异氰酸甲酯(1.05%)作为稀有组分,其检出提示火龙果红茶酒在发酵过程中可能存在硅烷化副反应或含硫前体物的代谢转化路径^[30]。这些特征组分的协同存在,不仅强化了酒体风味的独特性,也为产品溯源与真伪鉴别提供了潜在的化学标记。

与葡萄酒、白酒等传统酒类相比,火龙果红茶酒在酯类组成上表现出明显的差异性,癸酸乙酯的高占比赋予了其突出的热带果香与奶油香;而醇类物质虽结构相似,但其组成比例迥异,这些差异共同塑造了火龙果红茶酒“茶韵主导、果香协调”的典型风格。此外,微量醛类、烯炔等组分虽占比不足 2%,却在香气空间扩散与整体协调性中发挥着不可忽视的增效作用^[31]。

表 7 火龙果红茶酒香味成分的 GC-MS 分析结果

Table 7 GC-MS analysis results of aroma components in pitaya-black tea wine

种类	化合物	保留时间/min	含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	香气特征
醇类	二甲基硅烷二醇	25.54	140.90	无特征香气
	异戊醇	14.54	58.00	不愉快的气味
	三甲基硅醇	9.95	46.30	无明显香味,有特殊气味
	异丁醇	11.46	42.30	微有戊醇味
	正庚醇	21.13	39.80	强烈芳香气味
	2-乙基己醇	21.97	23.20	甜味和淡淡的花香
	4-甲基-1-己醇	21.13	19.20	特殊的果香气味
	(±)-6-甲基-5-庚烯基-2-醇	21.26	12.40	甜油绿香菜味
	香茅醇	28.47	11.00	新鲜玫瑰似特殊香气
	3,7-二甲基辛-2-烯-1-醇	28.46	8.30	玫瑰样香甜气息
	芳樟醇	23.35	7.80	柑橘花香甜玫瑰气味
	正己醇	18.47	6.40	水果芬芳香气
	2-壬基醇	22.69	5.00	橙子奶酪果味
	1-壬醇	25.04	4.80	玫瑰柑橘气味
	正辛醇	23.68	3.60	强烈的油脂气味和柑橘气息
	十四醇	36.26	3.60	蜡质气味
	3-甲基-1-庚醇	25.05	3.40	具有强烈气味
	α -松油醇	27.12	1.50	紫丁香的气味
	月桂醇	32.78	1.50	月下香及紫罗兰的香气
	小计		439.00	

续表 7

种类	化合物	保留时间/min	含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	香气特征
酯类	癸酸乙酯	25.23	730.20	果香和蜡香香气
	辛酸乙酯	20.55	689.30	水果香气
	异氰酸甲酯	14.53	312.70	具有刺鼻气味,无香味
	己酸乙酯	15.30	276.60	菠萝、香蕉水果香气
	月桂酸乙酯	30.21	213.30	温和的果香和花香香气
	乙酸苯乙酯	29.80	190.80	甜蜜的玫瑰花香香气
	乙酸乙酯	7.04	190.30	浆果和梨样的青甜果香
	原甲酸三甲酯	9.99	71.40	刺激性气味
	乙酸异戊酯	12.35	59.00	类似香蕉的气味
	壬酸乙酯	23.11	42.60	强烈的葡萄香气
	正辛酸异戊酯	25.76	13.60	水果香味
	棕榈酸乙酯	37.51	13.40	果香和奶油香气
	十四酸乙酯	34.28	9.00	鸢尾油香气,并带有油脂气息
	癸酸异戊酯	30.66	7.50	浓郁的玫瑰香味
	水杨酸甲酯	29.05	6.70	冬绿薄荷味
	庚酸乙酯	18.02	5.30	果味干邑朗姆酒混合味
	3-己烯酸乙酯	17.13	4.70	清香的水果香气
	小计		2 836.40	
酮类	丁烯酮	14.57	598.00	刺激性味
	2-辛酮	16.75	319.30	花香和草香香气
	2-壬酮	19.54	13.50	水果、花、油脂和药草似香气
	2-十一酮	19.54	9.70	果味
	大马士酮	30.05	6.90	强烈的玫瑰花香,果香
	β -紫罗兰酮	32.58	4.60	花香、木质香、甜果香、浆果香
	苯乙酮	26.20	3.50	刺鼻的花香
	苯戊酮	26.20	3.50	草木香气
	香叶基丙酮	30.57	2.80	青甜香、微玫瑰香
	甲基庚烯酮	18.15	1.60	柑橘味,果味
	小计		963.40	
其他类	2,4-二叔丁基酚	38.27	579.20	强烈的芳香气味
	苯乙烯	16.01	69.60	树脂和花香的香气
	辛酸	34.60	15.40	汗臭味
	棕榈油酸	37.50	9.10	清淡油脂味
	癸醛	22.33	4.50	强烈的柑橘皮气味
	间苯二甲醛	29.89	3.60	芳香气味
	苯酚	33.53	3.30	臭味和燃烧味
	月桂烯	13.39	2.50	清淡的香脂香气
	正壬醛	19.62	2.40	强烈的油脂气息,稀释时则呈现出玫瑰和柑橘样的香气
	水芹烯	14.48	1.70	辛辣味
	小计		691.30	

3 结论

试验成功研制了一款以红心火龙果与红茶为原料的复合型果茶酒,并系统解析了其风味物质构成与特征。结果表明,复合型果茶酒的最佳发酵条件为火龙果汁与红茶汤体积比 1:5、初始糖度 24 °Brix、初始 pH 3.8、酵母接种量 8%、发酵温度 28 °C、发酵时间 13 d,可稳定生产出酒精度约为 10.6%vol、感官品质优良的复合果茶酒,实现了果香与茶香的协调融合。在风味构成方面,火龙果红茶酒以酯类、酮类和酚类物质为主,其中酯类物质(如癸酸乙酯、辛酸乙酯)贡献了典型的热带果香与奶油香气;酚类与酮类则显著增强了酒体风味的层次感与醇厚感;特征组分 2,4-二叔丁基酚及微量特殊物质(二甲基硅烷二醇、异氰酸甲酯)的检出,为火龙果红茶酒提供了区别于常规果酒或茶酒的特征性风味指纹,推测其形成机制可能与红茶多酚的特定氧化转化途径或发酵过程中微生物代谢有关。复合果茶酒的风味物质谱与特征标识物可为后续产品的风味调控、品质控制及真伪鉴别提供科学依据。

参考文献

- [1] 陈艳,高嵩,刘秋妍,等.金桔红茶酒的研制及其体外抗氧化研究[J].中国酿造,2025,44(1):226-231.
Chen Y, Gao S, Liu Q Y, et al. Preparation and antioxidant activity *in vitro* of *Fortunella margarita* and black tea wine[J]. China Brewing, 2025, 44(1): 226-231.
- [2] 李维,赵敏,黎苹,等.柠檬绿茶酒发酵工艺研究[J].蚕桑茶叶通讯,2024(5):23-27.
Li W, Zhao M, Li P, et al. Fermentation technology of lemon green tea wine[J]. Newsletter of Sericulture and Tea, 2024(5): 23-27.
- [3] 魏鑫,杜勇,赖晓琴,等.猕猴桃茶酒工艺条件优化及抗氧化活性分析[J].食品研究与开发,2022,43(23):91-97.
Wei X, Du Y, Lai X Q, et al. Processing condition optimization and antioxidant activity determination of kiwifruit tea wine[J]. Food Research and Development, 2022, 43(23): 91-97.
- [4] Omidizadeh A, Yusof R M, Roohinejad S, et al. Anti-diabetic activity of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) fruit[J]. RSC Advances, 2014, 4(108): 62 978-62 986.
- [5] Shah K, Chen J Y, Chen J X, et al. Pitaya nutrition, biology, and biotechnology: a review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(18): 13986.
- [6] 周寿旭,肖文婧,吴欣宜,等.火龙果保健食品开发研究进展[J].农产品加工,2024(20):88-92,97.
Zhou S X, Xiao W J, Wu X Y, et al. Review on the research & development of healthcare foods of pitaya[J]. Farm Products Processing, 2024(20): 88-92, 97.
- [7] 何平,张友平,林倩倩,等.火龙果酒成分分析及品质鉴定[J].

酿酒科技,2022(1):81-85.

- He P, Zhang Y P, Lin Q Q, et al. Component analysis and quality identification of pitaya liquor[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2022(1): 81-85.
- [8] Safira A, Savitri S L, Putri A R B, et al. Review on the pharmacological and health aspects of *Hylocereus* or pitaya: an update[J]. Journal of Drug Delivery and Therapeutics, 2021, 11 (6): 297-303.
- [9] 高曼,甘祖于,王维,等.红肉火龙果营养价值及产品研发现状[J].贵州农机化,2022(1):16-20.
Gao M, Gan Z Y, Wang W, et al. Nutritional value and product development status of red-fleshed pitaya[J]. Guizhou Agricultural Mechanization, 2022(1): 16-20.
- [10] 曾勇,郭嘉欣,韦冠宇,等.中国茶酒产业研究现状及展望[J].酿酒科技,2023(7):95-101.
Zeng Y, Guo J X, Wei G Y, et al. Present status and prospect of tea wine industry in China[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2023(7): 95-101.
- [11] Wu D, Bird M R. The interaction of protein and polyphenol species in ready to drink black tea liquor production[J]. Journal of Food Process Engineering, 2010, 33(3): 481-505.
- [12] Zhang H, Qi R L, Mine Y. The impact of oolong and black tea polyphenols on human health[J]. Food Bioscience, 2019, 29: 55-61.
- [13] Lin F J, Wei X L, Liu H Y, et al. State-of-the-art review of dark tea: from chemistry to health benefits[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 126-138.
- [14] 代丽凤,蒋洁琳,官兴丽,等.茶褐素理化性质及生物学活性研究进展[J].食品与机械,2023,39(6):227-233,240.
Dai L F, Jiang J L, Guan X L, et al. Research progress on physicochemical properties and biological activity of theabrownin[J]. Food & Machinery, 2023, 39(6): 227-233, 240.
- [15] 张利,蒋祥飞.GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》中铜的测定方法适应性验证[J].酿酒,2020,47(5):104-107.
Zhang L, Jiang X F. Verification on the adaptability of the determination method of copper in GB/T 15038—2006 general analysis method of wine and fruit wine[J]. Liquor Making, 2020, 47(5): 104-107.
- [16] GB 5009.225—2023 酒和食用酒精中乙醇浓度的测定[S].
GB 5009.225—2023 Determination of ethanol concentration in alcoholic beverages and edible alcohol[S].
- [17] 宋晓月,吴志锋,邱慕涛,等.不同年份武夷岩茶水仙主要滋味物质分析与感官评价[J].食品与机械,2024,40(6):170-175,191.
Song X Y, Wu Z F, Qiu M T, et al. Analysis of main taste substances and sensory evaluation of Shuixian Wuyi rock tea narcissus in different years[J]. Food & Machinery, 2024, 40 (6): 170-175, 191.
- [18] 康明丽,潘思轶,郭小磊.不同处理柑橘果汁发酵果酒中游

- 离态及键合态风味物质分析[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 153-159.
- Kang M L, Pan S Y, Guo X L. Analysis of free and bound flavor compounds in fruit wines produced from satsuma mandarin juice with different treatments[J]. Food Science, 2016, 37(2): 153-159.
- [19] 刘建学, 刘金科, 李璇, 等. 白酒酒醅高产酯酵母筛选鉴定及其发酵性能研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 42-49.
- Liu J X, Liu J K, Li X, et al. Screening, identification and fermentation performance of a high-yield yeast from fermented grains of Dukang wine[J]. Food & Machinery, 2020, 36(6): 42-49.
- [20] 金海炎, 王丰园, 鲁云凤, 等. 混菌发酵猕猴桃果酒工艺条件优化及抗氧化性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 177-185.
- Jin H Y, Wang F Y, Lu Y F, et al. Optimization of fermentation conditions for mixed bacteria of kiwifruit wine and its antioxidant activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(3): 177-185.
- [21] 王聪明. 基于风味组学的四川典型绿茶和红茶香型关键组分筛选及呈香特征评价[D]. 雅安: 四川农业大学, 2024: 60-68.
- Wang C M. Selection of key aroma components and evaluation of aroma characteristics of typical green and black teas in Sichuan based on flavor omics[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2024: 60-68.
- [22] Yin X, Huang J A, Huang J, et al. Identification of volatile and odor-active compounds in Hunan black tea by SPME/GC-MS and multivariate analysis[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 164: 113656.
- [23] Ma L J, Gao M M, Zhang L Q, et al. Characterization of the key aroma-active compounds in high-grade Dianhong tea using GC-MS and GC-O combined with sensory-directed flavor analysis[J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132058.
- [24] Su D, He J J, Zhou Y Z, et al. Aroma effects of key volatile compounds in Keemun black tea at different grades: HS-SPME-GC-MS, sensory evaluation, and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131587.
- [25] Chen Q C, Zhu Y, Liu Y F, et al. Black tea aroma formation during the fermentation period[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131640.
- [26] Hu T M, Gavahian M, Pradhan R, et al. Functional, antioxidant, and sensory properties of mixed-fruit (pitaya, watermelon, and mint) and pitaya wines[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(6): 3 442-3 449.
- [27] Gong X, Ma L N, Li L J, et al. Analysis of aroma compounds of pitaya fruit wine[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 100(1): 012125.
- [28] 邓明, 陈亮, 刘安, 等. 工夫红茶加工过程中主要非挥发性成分的动态变化[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 145-152.
- Deng M, Chen L, Liu A, et al. Dynamic changes of major non-volatile components during Gongfu black tea processing[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 145-152.
- [29] 安家乐, 丁阳平. 红茶发酵过程中茶黄素形成及氧化机制的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(13): 441-453.
- An J L, Ding Y P. Advances in formation and oxidation mechanism of theaflavins during black tea fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(13): 441-453.
- [30] 张磊, 张钟元, 刘天星, 等. 不同预处理对芥菜中二甲基硫醚类物质形成的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(8): 51-60.
- Zhang L, Zhang Z Y, Liu T X, et al. Effects of different pretreatments on the formation of dimethyl sulfide in shepherd's purse[J]. Food Science, 2025, 46(8): 51-60.
- [31] Fan S S, Tang K, Xu Y, et al. Characterization of the potent odorants in Tibetan Qingke Jiu by sensory analysis, aroma extract dilution analysis, quantitative analysis and odor activity values[J]. Food Research International, 2020, 137: 109349.