

龙眼果酒发酵工艺的优化及相关品质分析

刘佳艺¹, 陈奕杉¹, 高浩祥¹, 陈南¹, 何强^{1,2}, 曾维才^{1,2*}

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 成都 610065; 2. 四川大学食品科学与技术四川省高校重点实验室, 成都 610065)

摘要: **目的** 优化龙眼果酒的发酵工艺并对其相关品质进行分析。**方法** 通过单因素实验, 考察发酵温度、糖度、酵母接种量及柠檬酸添加量对龙眼果酒的酒精度和感官品质的影响; 采用正交实验对龙眼果酒的发酵工艺进行优化; 通过食品分析方法与技术, 测定最优发酵条件下的龙眼果酒的相关理化品质, 评价其抗氧化活性, 分析其挥发性风味成分。**结果** 龙眼果酒的最优发酵条件为: 发酵温度 26 °C、糖度 36°Brix、酵母接种量 0.04 g/g、柠檬酸添加量 0.6 g/g; 最优发酵条件下的龙眼果酒的酒精度为 8.32%vol, pH 为 3.32, 总糖含量为 16.68 g/L, 还原糖含量为 15.15 g/L, 总酸含量为 14.05 g/L, 色泽为透亮的金黄色。该果酒具有良好的抗氧化活性, 可有效清除 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸) 二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]和 1,1-二苯基-2-三硝基苯胍(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, DPPH)自由基并展现出较高的还原能力, 共检测到 32 种挥发性风味物质, 其中醇类、酯类和酸类是主要成分, 占总挥发性风味物质的 99.39%。**结论** 最优发酵条件下的龙眼果酒具有良好的感官性状、抗氧化活性及丰富的挥发性风味物质, 为龙眼果酒的开发与生产提供实验基础与支撑。

关键词: 龙眼果酒; 发酵; 工艺优化; 抗氧化活性; 挥发性风味物质

Study on fermentation process optimization of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine and analysis of its qualities

LIU Jia-Yi¹, CHEN Yi-Shan¹, GAO Hao-Xiang¹, CHEN Nan¹, HE Qiang^{1,2}, ZENG Wei-Cai^{1,2*}

(1. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. The Key Laboratory of Food Science and Technology of Sichuan Province of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the fermentation process of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine and analyze its related qualities. **Methods** Using the single factor test, the effects of fermentation temperature, sugar content, yeast inoculation quantity, citric acid content on the alcohol content and sensory quality of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine were investigated. The fermentation process was optimized by orthogonal experiments. Through food analysis methods and technologies, the relevant physicochemical quality of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine under the optimal fermentation conditions was determined, its antioxidant activity was evaluated, and its volatile flavor components were analyzed. **Results** The optimal fermentation parameters of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine were determined to be fermentation temperature of 26°C, sugar concentration of 36°Brix, yeast inoculation

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801548)、四川省科技计划项目(2021YFH0072)、国家重点研发计划项目(2019YFE0103800)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31801548), the Science and Technology Program of Sichuan Province (2021YFH0072), and the National Key Research and Development Program of China (2019YFE0103800)

*通信作者: 曾维才, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品化学和绿色加工技术。E-mail: weicaizeng@qq.com

*Corresponding author: ZENG Wei-Cai, Ph.D, Associate Professor, Department of Food Engineering, Sichuan University, No.24, South First Section, First Ring Road, Chengdu 610065, China. E-mail: weicaizeng@qq.com

quantity of 0.04 g/g, and citric acid content of 0.6 g/g. Under the optimal fermentation condition, the alcohol of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine was 8.32%vol, pH was 3.32, total sugar content was 16.68 g/L, reducing sugar content was 15.15 g/L, total acid content was 14.05 g/L, and the color was bright golden. The fruit wine had good antioxidant activity and could effectively remove 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt (ABTS) and 1-diphenyl-2-picrylhydrazine (DPPH) free radicals and showed high reducing ability, a total of 32 kinds of volatile flavor substances were detected, of which alcohols, esters and acids were the main components, accounting for 99.39% of the total volatile flavor substances. **Conclusion** The *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine under the optimal fermentation conditions has good sensory properties, antioxidant activity and rich volatile flavor substances, its provides experimental basis and support for the development and production of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine.

KEY WORDS: *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine; fermentation; process optimization; antioxidant activity; volatile flavor

0 引言

龙眼(*Dimocarpus longan* Lour.), 又称桂圆, 是无患子科(Sapindaceae Juss.)植物^[1], 主要分布在四川、广西及福建等地。龙眼在我国有着悠久的食用和药用历史, 其果肉中富含糖类、氨基酸、维生素、酚类化合物和矿物质等营养成分^[2], 具有抗氧化、延缓机体衰老和预防心血管系统疾病等多种有益人体健康的生物活性^[3-5]。目前, 龙眼主要以鲜果或干果的形式在市场进行销售, 一方面鲜果不易贮藏和保鲜^[6], 干果又容易虫蛀和霉变, 另一方面鲜果和干果的销售方式附加值较低, 不利于相关行业与地方特色农产品的长足发展。因此, 通过有效的加工技术与方法, 在保持龙眼果实营养价值的同时, 又能有利于其产品的贮藏与保鲜, 还能在一定程度上改善产品的功能与品质并提升龙眼的深加工利用价值, 已成为龙眼等特色果蔬产品深加工与贮藏领域的研究热点^[7]。

果酒是一种对果蔬进行深加工和高附加值利用的重要产品形式, 不仅能够有效利用果蔬中的各种营养成分, 还能改善产品的品质^[8]。同时, 果酒产品的加工对果蔬原料的外形和品相没有特殊要求, 在提升产品利用率及附加值的基础上, 还能有益于对果蔬的贮藏、运输与销售。此外, 在果酒的加工中, 通过微生物参与的发酵, 还能产生部分有益人体健康的物质, 在一定程度上提升产品的功能性^[9]。可见, 采用果酒的形式对龙眼进行深加工, 不仅有利于丰富龙眼的相关产品形式, 有益于产品的贮藏与销售, 还能提升产品的附加值并延长龙眼开发利用的产业链, 对龙眼的种植与深加工有积极的影响。

目前, 有关龙眼发酵果酒的研究报道较少, 仅有一些关于龙眼果酒工艺优化、抗氧化活性及风味品质的研究报道。有研究表明, 与浸泡龙眼果酒相比, 发酵龙眼果酒具有更好的龙眼水果特征风味, 能够较好地保留龙眼水果的营养成分^[10]。同时, 也有研究表明, 以龙眼果干为原料, 通过对初始糖度、pH、酵母接种量及发酵时间的优化, 得到

的龙眼果酒的品质优良, 具有龙眼特殊酒香^[11]; 此外, 有研究表明, 以龙眼果汁进行发酵优化, 得到的龙眼果酒具有清除自由基的能力及富含龙眼独特的风味成分^[12]; 这些研究为龙眼果酒的生产与品质评价提供了理论与实验基础, 也为龙眼果酒的营养功能提供了科学依据。但已有研究主要以龙眼干果及龙眼果汁为原料进行果酒发酵, 同时少有研究对龙眼发酵果酒进行系统性的研究。因此, 以龙眼鲜果肉为原料, 系统性地探究龙眼发酵果酒的工艺、品质及功能特性, 不仅可以完善龙眼发酵果酒的理论基础, 也能够为龙眼果酒的加工与生产提供新的指导方向。

本研究以龙眼鲜果果肉为原料, 通过单因素和正交实验对龙眼果酒的制备工艺进行探究与优化, 并对其理化指标、抗氧化活性及香气成分等品质与功能特性进行测定与分析, 为龙眼在食品加工领域的资源化开发与利用提供实验基础与参考, 并为龙眼果酒的产业化生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

龙眼鲜果(四川省泸州市); 白砂糖(上海谷欣食品有限公司); 酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)(安琪酵母股份有限公司); 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, DPPH)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]、抗坏血酸、果胶酶(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 三氯乙酸、氢氧化钠、无水硫酸铜、葡萄糖等试剂(分析纯, 成都金蜀都试剂有限公司); 实验用水为蒸馏水。

1.2 仪器与设备

ESJ210-4A 型电子天平(感量 0.0001 g, 沈阳龙腾电子有限公司); HH-4 型电热恒温水浴锅(北京科伟永兴仪器有限公司); HN-36BS 电热恒温培养箱(上海力辰邦西仪器科技有限公司); PHS-3C pH 计(上海仪电科学仪器股份有限

公司); WZS 手持式折射仪(上海仪电物理光学仪器有限公司); UV-1800BPC 型紫外可见分光光度计(上海美谱达仪器有限公司); XH-B 旋涡混合器(江苏天翎仪器有限公司); GC-QP 2010 Plus 型气相色谱质谱仪(日本岛津公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 龙眼果酒发酵工艺

龙眼鲜果→分选→剥壳去核→打浆→调 pH→酶解→调糖→巴氏杀菌→冷却→酵母活化→接种→发酵→分离酒脚→澄清→龙眼果酒

龙眼鲜果: 新鲜采摘的龙眼鲜果经剥皮、去核后打浆。

调 pH、调糖: 根据实验需要用柠檬酸调整龙眼浆的初始 pH, 用白砂糖调整龙眼浆的初始糖度。

酶解: 按果浆总质量的 0.2% 加入果胶酶, 混匀于 40°C 下保持 2 h。

巴氏杀菌: 75°C 水浴锅中恒温灭菌 5 min。

酵母活化: 将干酵母溶于 10 mL 质量分数为 5% 的蔗糖水溶液中, 38°C 活化 20 min, 每隔 10 min 轻轻搅动一次。

接种: 将活化好的 10 mL 酵母液倒入冷却后的龙眼果浆中, 并用 2 mL 纯水润洗容器后倒入龙眼果浆中。

发酵: 将接种后的龙眼果浆放入恒温培养箱中发酵, 每 1 d 进行放气处理。

分离酒脚: 将发酵好的龙眼果酒用 4~5 层纱布过滤, 弃去滤渣, 留下滤液。

澄清: 将滤液用离心机进行离心, 转速为 3000 r/min, 时间为 2 min。去除沉淀即得到龙眼果酒。

1.3.2 单因素实验

选取酵母接种量、糖度、柠檬酸添加量和发酵温度为因素, 酒精度和感官评分为评价指标进行单因素实验, 具体如下:

酵母接种量: 在发酵温度 28°C、柠檬酸添加量 0.4 g/g、初始糖度 33°Brix、发酵时间 7 d 的条件下, 考察不同的酵母接种量(0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 g/g)的影响。

糖度: 在发酵温度 28°C、柠檬酸添加量 0.4 g/g、酵母接种量 0.02 g/g、发酵时间 7 d 的条件下, 考察不同糖度(27、30、33、36、39°Brix)的影响。

柠檬酸添加量: 在发酵温度 28°C、酵母接种量 0.02 g/g、初始糖度 33°Brix、发酵时间 7 d 的条件下, 考察不同的柠檬酸添加量(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 g/g)的影响。

温度: 在柠檬酸添加量 0.4 g/g、酵母接种量 0.02 g/g、初始糖度 33°Brix、发酵时间 1 d 的条件下, 考察不同的温度(24、26、28、30、32°C)的影响。

1.3.3 正交实验

在单因素实验的基础上, 以发酵温度、柠檬酸添加量、酵母接种量、初始糖度为因素进行四因素三水平的 $L_9(3^4)$ 正交实验, 采用酒精度和感官评分为评价指标。正交实验因素水平如表 1 所示。

表 1 正交实验因素及水平
Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	A 柠檬酸 添加量/(g/g)	B 糖度 /°Brix	C 酵母 接种量/(g/g)	D 发酵 温度/°C
1	0.2	30	0.02	24
2	0.4	33	0.03	26
3	0.6	36	0.04	28

1.3.4 理化指标

pH 的测定采用酸度计法^[13]; 酒精度的测定采用酒精计; 总糖、总酸、还原糖的测定参照 GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》中规定的方法进行测定。

1.3.5 感官评价

由 10 位经过培训的感官评价分析人员对龙眼果酒进行感官评定, 评价小组对龙眼果酒的外观、香气和口感等感官指标进行评价, 评分细则见表 2。

表 2 感官评分表
Table 2 Sensory evaluation standards

项目	评分标准	分值
外观	呈金黄色, 有光泽	0.8~1.0
	呈黄色, 有光泽	0.5~0.7
	呈淡黄色, 无光泽	0.1~0.4
	澄清透明, 无悬浮物, 有光泽	0.8~1.0
澄清度(1分)	澄清透明, 无悬浮物, 光泽较差	0.5~0.7
	有少许悬浮物或沉淀, 无光泽暗哑	0.1~0.4
果香(2分)	具有龙眼果香, 浓郁优雅	1.6~2.0
	果香较淡, 不持久	1.0~1.5
	无果香或有异香	0.1~0.9
香气	酒香醇厚清雅, 与果香协调适宜	1.6~2.0
	酒香(2分)	酒香较淡, 和谐纯正
口感	酒香不足, 与果香协调性差	0.1~0.9
	酸甜适中, 丰满醇厚	1.6~2.0
	略酸或略甜, 略带苦味	1.0~1.5
	无酸味甜味, 苦味严重	0.1~0.9
协调性(2分)	协调优雅, 饱满醇厚, 心旷神怡	1.6~2.0
	协调, 回味不足	1.0~1.5
	突兀, 令人不悦	0.1~0.9

1.3.6 龙眼果酒抗氧化活性的测定

ABTS 自由基清除能力、DPPH 自由基清除能力、铁离子还原能力测定均参考文献[14]进行。采用 10 μg/mL 维生素 C 溶液作为阳性对照。

1.3.7 挥发性风味物质的测定

采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法(headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)测定最优发酵条件下的龙眼果酒中的挥发性风味物质^[15-17]。称取 4 g 最优发酵条件下的龙眼果酒样品置于顶空瓶中,密封后置于 60°C 恒温水浴中预热 5 min,插入萃取头(DVB/CAR/PDMS 型)顶空萃取吸附 30 min。结束后,2 min 之内将萃取头插入 GC-MS 进样口,于 250°C 解析 10 min。

气相色谱条件:毛细管柱为 DB-5MS 型(30 m×0.25 mm, 0.25 μm);载气为氦气,恒定流速为 1 mL/min。柱箱采用程序升温,起始温度 25°C,以 5°C/min 升至 45°C,保持 5 min;再以 10°C/min 升至 80°C,保持 1 min;最后以 5°C/min 升至 240°C。进样口温度为 250°C,进样模式为不分流。

质谱条件:采用全扫描模式采集信号,电离方式为电子电离(electron ionization, EI);接口温度为 250°C;质量扫描范围 30~400 *m/z*。根据物质的保留时间和质谱结果与数据库(NIST, 14.0, Gaithersburg, MD, USA)比对进行样品挥发性成分的定性分析,通过峰面积的归一化积分法进行定量分析。

1.4 数据分析

每组实验重复 3 次,结果以“平均值±标准偏差”的形式表示。实验采用 Origin (version 2018 for Windows, OriginLab Corporation, MA, USA)进行作图和统计学分析,以 $P < 0.05$ 表示具有显著性差异。

2 结果与分析

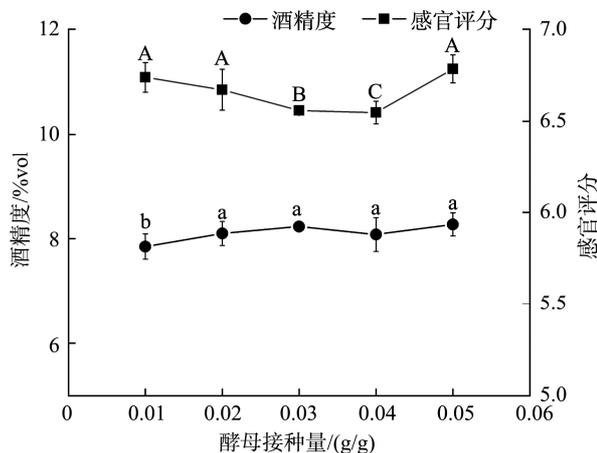
2.1 酵母接种量对龙眼果酒发酵的影响

酵母接种量对龙眼果酒发酵效果的影响如图 1 所示。由图 1 可知,随着酵母接种量的增加,酒精度先升高后降低再升高,在酵母接种量为 0.05 g/g 时达到最大,为 8.14%vol;感官得分先降低后升高,同样在酵母接种量为 0.05 g/g 时达到最大。相关研究表明,果酒发酵过程中,酵母接种量影响酵母的发酵速率和呼吸产能^[18]。分析可知,酵母接种量较低时,发酵体系中物质的利用速率较慢,导致龙眼果酒发酵不充分;酵母接种量过多时,菌群大量繁殖而消耗营养成分,破坏发酵环境致使酵母提前衰老并发生自溶^[19],从而影响果酒的发酵。

2.2 糖度对龙眼果酒发酵的影响

糖度对龙眼果酒发酵效果的影响如图 2 所示。由图 2 可知,随糖度的增加,酒精度为先上升后下降再上升,在糖度为 33°Brix 时达到最大,为 10.65%vol;感官评分先上升后下降,同样在初始糖度为 33°Brix 时达到最大。有研究表明,糖分在酵母菌作用下可分解为酒精和二氧化碳等物质,且

适宜浓度的糖分有利于酵母的代谢^[20]。分析可知,当糖度太低时,酵母代谢的底物不足,龙眼果酒酒精度过低,并影响部分风味的形成;而过高糖度虽然也能使酵母生长代谢,但会增加成本,不利于工业化生产,且可能会对产品的口感带来负面影响。



注:同一指标不同字母表示具有显著性差异, $P < 0.05$, 下同。

图 1 酵母接种量对龙眼果酒发酵效果的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of yeast inoculation quantity on the fermentation of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine ($n=3$)

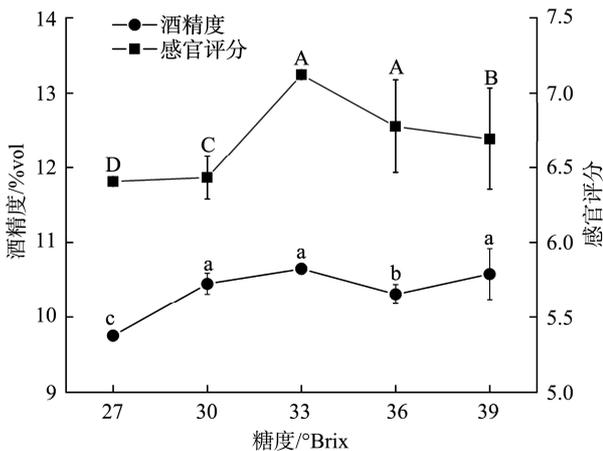


图 2 糖度对龙眼果酒发酵效果的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of sugar content on the fermentation of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine ($n=3$)

2.3 柠檬酸添加量对龙眼果酒发酵的影响

柠檬酸添加量对龙眼果酒发酵的影响如图 3 所示。由图 3 可知,随着柠檬酸添加量的增加,酒精度和感官评分均有所起伏。酒精度在柠檬酸添加量为 0.4 g/g 时达到最大,为 9.12%vol,此时感官评分也处于较优水平。相关研究表明,酵母菌在发酵过程中对有机酸、氨基酸等物质的利用会引起发酵液 pH 的上升,导致发酵逐渐减缓,可溶性固形物含量逐渐升高。通过调节发酵液的初始 pH,可促进发酵后期酵母的生长代谢^[21]。分析可知,当柠檬酸添加量较低

时, 初始 pH 偏高, 可能导致发酵体系中杂菌生长, 影响酵母的生长代谢情况, 进而影响龙眼果酒的品质; 当柠檬酸添加量过高时, 过低的 pH 可能抑制酵母的生长代谢, 进而影响果酒的发酵^[22]。

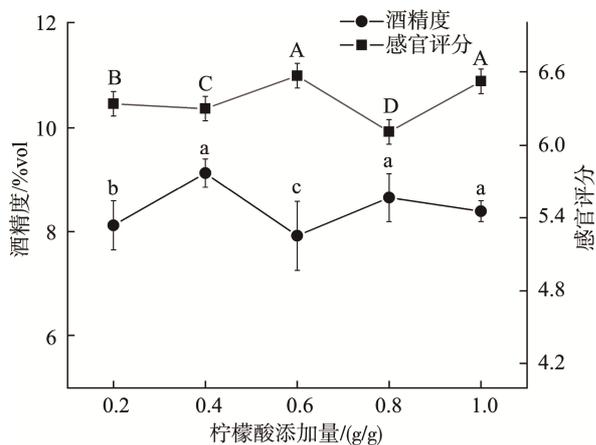


图 3 柠檬酸添加量对龙眼果酒发酵效果的影响(n=3)
Fig.3 Effects of citric acid content on the fermentation of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine (n=3)

2.4 发酵温度对龙眼果酒发酵的影响

发酵温度对龙眼果酒发酵效果的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 随着发酵温度的升高, 酒精度先升高后下降, 在 26℃时达到最高, 为 4.16%vol。由于发酵温度实验组的发酵时间为 1 d, 故其酒精度普遍低于其余实验组的酒精度。随着发酵温度的升高, 感官评分呈先下降后升高的趋势。相关研究表明, 微生物拥有最适生长温度, 温度影响其生长和代谢产物的合成, 从而影响果酒的感官品质和酒精度^[18]。分析可知, 低温发酵能够增加果酒的酒香和果

香, 但会降低酵母的活性, 一定程度上降低酵母对糖的利用率^[23], 从而降低果酒酒精度。发酵温度过高时, 酵母代谢速度快, 衰老速度也随之变快, 不利于相关风味物质的形成和代谢产物的生成, 从而在一定程度上使龙眼果酒的品质和酒精度下降^[24-25]。

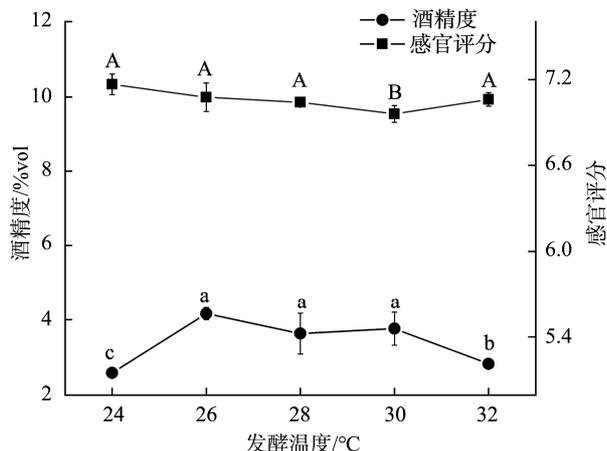


图 4 发酵温度对龙眼果酒发酵效果的影响(n=3)
Fig.4 Effects of fermentation temperature on the fermentation of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine (n=3)

2.5 龙眼果酒发酵工艺参数的正交实验优化

在单因素实验的基础上, 通过正交实验对龙眼果酒的发酵工艺参数进行优化, 正交实验结果如表 3 所示。对于感官评价和酒精度两大指标, 由于酒精度是评价果酒品质的最重要的指标, 故将酒精度赋以更大的权数, 感官评分赋以较小的权数。因此, 总分计算公式为: 总分=感官评分×0.3+酒精度×0.7。

表 3 正交实验结果
Table 3 Orthogonal experiment results

序号	A/(g/g)	B/°Brix	C/(g/g)	D/°C	感官评价	酒精度/%vol	总分
1	0.2	30	0.02	24	7.111	7.62	7.47
2	0.2	33	0.03	26	6.717	10.14	9.11
3	0.2	36	0.04	28	7.489	8.68	8.32
4	0.4	30	0.03	28	7.156	7.22	7.20
5	0.4	33	0.04	24	7.106	9.05	8.47
6	0.4	36	0.02	26	6.775	10.77	9.57
7	0.6	30	0.04	26	6.733	10.04	9.05
8	0.6	33	0.02	28	7.139	8.75	8.27
9	0.6	36	0.03	24	7.356	9.05	8.54
K ₁	24.90	23.72	25.31	24.48			
K ₂	25.24	25.85	24.86	27.73			
K ₃	25.86	26.44	25.84	23.79			
R	0.95	2.72	0.98	3.94			

影响龙眼果酒发酵的 4 个因素中,按各因素对酒精度和感官评分的综合影响,从大到小依次为 $D>B>C>A$,即发酵温度>糖度>酵母接种量>柠檬酸添加量。通过 K 值比较可知组合 $A_3B_3C_3D_2$ 最优,即柠檬酸添加量为 0.6 g/g、糖度为 36°Brix、酵母接种量为 0.04 g/g、发酵温度为 26 °C 为最佳工艺参数。在最佳发酵工艺下,所得龙眼果酒的理化指标如下:酒精度为 $(8.32\pm 0.01)\%$ vol, pH 为 3.32 ± 0.01 ,总糖含量为 (16.68 ± 0.25) g/L,还原糖含量为 (15.15 ± 0.16) g/L,总酸含量为 (14.05 ± 0.04) g/L。

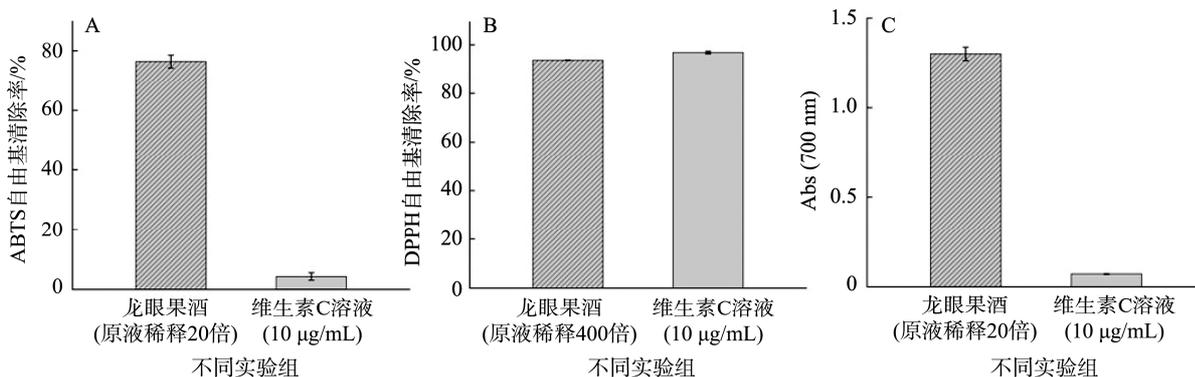


图 5 最优发酵条件下的龙眼果酒抗氧化能力($n=3$)

Fig.5 Antioxidant abilities of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine under optimal fermentation parameters ($n=3$)

由图 5 可知,稀释 20 倍后的龙眼果酒对 ABTS 自由基的清除率为 76.44%,阳性对照维生素 C (10 µg/mL)为 4.28%;稀释 400 倍的龙眼果酒对 DPPH 自由基的清除率为 93.73%,阳性对照维生素 C (10 µg/mL)为 96.87%;稀释 20 倍后龙眼果酒的吸光度为 1.30,阳性对照维生素 C (10 µg/mL)为 0.07。结果表明,龙眼果酒具有良好的 ABTS 和 DPPH 自由基清除能力及还原能力。相关研究报道,植物多酚是一类以苯环为分子骨架并含有大量酚羟基的化合物,广泛存在与蔬菜与水果中^[27-29]。植物多酚因其特殊的结构,而展现出以显著的抗氧化活性为代表的多种有益人体健康的作用^[30-32]。因此,龙眼果酒所具有的良好抗氧化活性可能与其含有的酚类化合物有关。

2.7 龙眼果酒的挥发性风味成分分析

挥发性风味成分是影响果酒质量和感官特性的重要因素,对消费者选购果酒类产品有着很大的影响^[33]。最优发酵条件下所得龙眼果酒的挥发性风味成分的分析结果如表 4 所示。

由表 4 可知,从龙眼果酒中共检测出 32 种挥发性成分,其中包括醇类 5 种,相对含量为 79.59%;酯类 19 种,相对含量为 4.05%;酸类 1 种,相对含量为 15.75%;醛类 3 种,相对含量为 0.16%;氧化物 1 种,相对含量为 0.18%;炔类 1 种,相对含量为 0.03%;炔类 1 种,相对含量 0.07%;酮类 1 种,相对含量 0.09%。其中,醇类、酯类和酸类物质

2.6 龙眼果酒的抗氧化活性

体内蓄积的自由基可通过电子转移、脱氢或者加成的方式同体内的蛋白质、脂类和糖类等多种生物大分子发生反应,从而造成人体细胞和组织的氧化损伤,进而诱发细胞的突变或组织坏死,影响人体健康^[26]。因此,若能有效清除体系中的自由基,则可阻断体系内自由基链式反应的发生和发展,预防机体的氧化损伤。最优发酵条件下所得龙眼果酒的抗氧化活性如图 5 所示。

为龙眼果酒中相对含量较大的挥发性物质,占总挥发性物质的 99.39%,可能是形成龙眼果酒特殊风味的基础。同时,酯类物质是构成果实和果酒香气的重要成分^[34-35],龙眼果酒中酯类物质种类较多,这可能也是龙眼果酒形成特殊香气的重要原因。

表 4 最优发酵条件下的龙眼果酒中挥发性风味成分的测定结果
Table 4 Analysis of volatile flavor components of *Dimocarpus longan* Lour. fruit wine under the optimal fermentation parameters

种类	序号	化合物	相对含量/%
醇类	1	乙醇	77.34
	2	乙酰甲基甲醇	0.42
	3	2,3-丁二醇	0.67
	4	1-辛烯-3-醇	0.13
	5	芳樟醇	1.03
酯类	6	1-丁醇, 3-甲基-醋酸酯	0.42
	7	己酸乙酯	0.19
	8	乙酸己基酯	0.09
	9	2-羟基-4-甲基戊酸乙酯	0.04
	10	苯甲酸乙酯	0.06
	11	丁二酸二乙酯	0.04
	12	水杨酸甲酯	0.34
	13	辛酸乙酯	1.21
	14	苯乙酸乙酯	0.04
	15	乙酸 2-苯乙酯	0.23

表 4(续)

种类	序号	化合物	相对含量/%
	16	2-羟基苯甲酸乙酯	0.05
	17	壬酸乙酯	0.05
	18	10-十一烯酸甲酯	0.18
	19	癸酸乙酯	0.29
	20	2-呋喃甲醇四氢乙酸酯	0.13
	21	癸酸乙酯	0.23
	22	十四酸乙酯	0.14
	23	十六酸乙酯	0.29
	24	9-十八烯酸乙酯	0.03
酸类	25	乙酸	15.75
醛类	26	正癸醛	0.04
	27	2-癸烯醛	0.06
	28	7-十四烯醛	0.06
氧化物	29	反式芳樟醇氧化物(呋喃类)	0.18
烃类	30	十四烷	0.03
炔类	31	2,7-二甲基-3-辛烯-5-炔	0.07
酮类	32	6,10-二甲基-5,9-十一烯-2-酮	0.09

3 结 论

本研究以龙眼鲜果果肉为原料, 系统性地探究了龙眼发酵果酒的工艺、品质及功能特性。研究以酿酒酵母为发酵菌种, 分析了发酵温度、糖度、酵母接种量和柠檬酸添加量对龙眼发酵果酒的影响; 并通过正交实验优化出了龙眼果酒的最优工艺条件。最优工艺条件下得到的龙眼果酒不仅色泽金黄, 风味较佳, 共检测出 32 种挥发性风味成分, 赋予了龙眼果酒特殊的果酒风味, 同时也具有良好的体外抗氧化活性, 可有效清除体系中的 ABTS 和 DPPH 自由基并展现较强的还原能力, 这可能与龙眼果酒中含有的酚类化合物有关。研究结果进一步完善了龙眼发酵果酒的理论基础并为龙眼果酒的加工与生产提供了新的指导方向。龙眼作为一种营养丰富的食品资源, 除了龙眼果肉具有较高的食用与加工价值, 其副产物果皮和果核也具有重要的利用价值, 但目前龙眼的综合加工利用技术尚不成熟, 龙眼副产物的综合利用存在空白, 以龙眼发酵果酒为基础, 引入副产物建立混合发酵体系研制复合型龙眼发酵果酒, 将会是未来提升龙眼综合利用价值的一种重要方式, 因此, 后续的研究工作将围绕混合发酵体系下复合型龙眼发酵果酒的制备来展开。

参考文献

- [1] 关博洋, 殷菲胧, 刘云芬, 等. 贮藏温度对采后龙眼果实糖代谢及其相关酶活性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 348–355.
GUAN BY, YIN FL, LIU YF, *et al.* Effects of storage temperature on sugar metabolism and related enzyme activities of postharvest longan

- fruits [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(5): 348–355.
- [2] 袁辛锐, 喻学淳, 杨芳, 等. 桂圆果酒的复合酵母发酵[J]. 食品科技, 2020, 45(1): 8–12.
YUAN XR, YU XC, YANG F, *et al.* Fermentation of longan fruit wine with a kind of complex yeast [J]. *Food Sci Technol*, 2020, 45(1): 8–12.
- [3] SACHINDRA NM, AIRANTHI MKWA, HOSOKAWA M, *et al.* Radical scavenging and singlet oxygen quenching activity of extracts from Indian seaweeds [J]. *J Food Sci Technol*, 2010, 47(1): 94–99.
- [4] ALVAREZ-SUAREZ JM, TULIPANI S, DIAZ D, *et al.* Antioxidant and antimicrobial capacity of several monofloral Cuban honeys and their correlation with color, polyphenol content and other chemical compounds [J]. *Food Chem Toxicol*, 2010, 48(8/9): 2490–2499.
- [5] PAN YM, WANG K, HUANG SQ, *et al.* Antioxidant activity of microwave-assisted extract of Longan (*Dimocarpus Longan* Lour.) peel [J]. *Food Chem*, 2008, 106(3): 1264–1270.
- [6] 彭健, 王蔚婕, 唐道邦, 等. 分段式远红外-热泵干燥对龙眼品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 118–123.
PENG J, WANG WJ, TANG DB, *et al.* Effect of multi-stage far-infrared radiation-assisted heat pump drying on the quality characteristics of longan [J]. *Food Sci*, 2020, 41(19): 118–123.
- [7] 杨国阳. 龙眼酒的酿造工艺要点[J]. 酿酒, 2007, (5): 60–61.
YANG GY. The brewing points of longan wine [J]. *Liquor Making*, 2007, (5): 60–61.
- [8] 梁艳玲, 陈麒, 伍彦华, 等. 果酒的研究与开发现状[J]. 中国酿造, 2020, 39(12): 5–9.
LIANG YL, CHEN Q, WU YH, *et al.* Research and development status of fruit wine [J]. *China Brew*, 2020, 39(12): 5–9.
- [9] 赵广河, 胡梦琪, 陆玺文, 等. 发酵果酒加工工艺研究进展[J]. 中国酿造, 2022, 41(4): 27–31.
ZHAO GH, HU MQ, LU XW, *et al.* Research progress on processing technology of fermented fruit wine [J]. *China Brew*, 2022, 41(4): 27–31.
- [10] 何思莲, 施灿璨, 李琼, 等. 龙眼果酒发酵工艺优化、抗氧化活性研究及品质分析[J]. 中国酿造, 2022, 41(5): 131–136.
HE SL, SHI CC, LI Q, *et al.* Optimization of fermentation technology, antioxidant activity and quality analysis of longan fruit wine [J]. *China Brew*, 2022, 41(5): 131–136.
- [11] 李进, 吴冬梅. 泸州晚熟龙眼果酒酿造工艺研究[J]. 食品工业, 2017, 38(6): 1–4.
LI J, WU DM. Optimization of fermentation technology of Luzhou longan wine [J]. *Food Ind*, 2017, 38(6): 1–4.
- [12] 罗汝锋, 赵雷, 胡卓炎, 等. 龙眼果酒发酵条件优化及其抗氧化活性[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2658–2665.
LUO RF, ZHAO L, HU ZY, *et al.* Optimization of fermentation parameters and the antioxidant capacity of longan wine [J]. *J Food Saf Qual*, 2015, 6(7): 2658–2665.
- [13] 王永华. 食品分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
WANG YH. *Food analysis* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [14] 曾维才, 石碧. 天然产物抗氧化活性的常见评价方法[J]. 化工进展, 2013, 32(6): 1205–1213, 1247.
ZENG WC, SHI B. Common methods of antioxidant activity evaluation for natural products: A review [J]. *Chem Ind Eng Prog*, 2013, 32(6): 1205–1213, 1247.
- [15] 何嘉敏, 于兰, 于新, 等. 顶空固相微萃取-气质联用法分析益生菌发酵复合果蔬汁挥发性成分[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(16): 275–280.

- HE JM, YU L, YU X, *et al.* Headspace solid phase microextraction-gas chromatography/mass spectrometry analysis of the volatile components in probiotics fermented fruit and vegetable juice [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(16): 275–280.
- [16] 苗榕芯, 孙莹, 石长波, 等. 顶空固相微萃取气质联用技术在谷物食品中的应用研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(4): 219–224.
- MIAO RX, SUN Y, SHI CB, *et al.* Application research progress of HS-SPME-GC-MS technology in cereal food [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(4): 219–224.
- [17] 冒德寿, 牛云蔚, 姚征民, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用和气相色谱嗅闻技术鉴定清香型白酒特征香气物质[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(7): 251–261.
- MAO DS, NIU YW, YAO ZM, *et al.* Characterization of the key aroma compounds in Chinese light aroma-type liquors by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography mass spectrometry, gas chromatography-olfactometry [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2019, 19(7): 251–261.
- [18] 金海英, 王丰园, 鲁东风, 等. 混菌发酵猕猴桃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.
- JING HY, WANG FY, LU YF, *et al.* Optimization of fermentation conditions for mixed bacteria of kiwifruit wine and its antioxidant activity [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(3): 177–185.
- [19] PENG BZ, LI FL, CUI L, *et al.* Effects of fermentation temperature on key aroma compounds and sensory properties of apple wine [J]. *J Food Sci*, 2015, 80(12): 2937–2943.
- [20] 宋志姣, 周艺垠, 郭燕, 等. 红泡刺藤果酒酿造、抗氧化性评价及挥发性风味物质分析[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(21): 62–68.
- SONG ZJ, ZHOU YY, GUO Y, *et al.* Study on brewing of *Rubus niveus* wine, evaluation of antioxidant activity and volatile flavor substances [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(21): 62–68.
- [21] 黄艳丽, 尹锦荣, 赵秀, 等. 多依果红心火龙果复合果酒发酵工艺优化及抗氧化活性分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(8): 2672–2679.
- HUANG YL, YING JR, ZHAO X, *et al.* Fermentation process optimization and antioxidant activity analysis of *Docynia delavayi* (Franch.) Schneid. and red dragon fruit compound wine [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(8): 2672–2679.
- [22] 梁敏, 包怡红. 蓝靛果酒发酵工艺优化及发酵过程对花色苷的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(10): 151–157.
- LIANG M, BAO YH. Optimization of fermentation process of *Lonicera berry* wine and effect of fermentation on anthocyanin composition [J]. *Food Sci*, 2018, 39(10): 151–157.
- [23] 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 MX, LIU CF, WANG R, *et al.* Optimization of fermentation process and analysis of aroma components of yellow peach wine [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2021, 40(10): 39–49.
- [24] 魏文倩, 张冰, 李利强, 等. 响应面法优化蓝靛果红树莓复合发酵汁的研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(8): 172–179.
- WEI WQ, ZHANG B, LI LQ, *et al.* Study on the optimization of the compound fermentation juice mixed with blue hazelnut and red raspberry using response surface method [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(8): 172–179.
- [25] 李少鹏, 夏婷, 张竹君, 等. 枸杞果酒发酵工艺优化及营养成分分析[J]. *中国酿造*, 2021, 40(7): 94–100.
- LI SP, XIA T, ZHANG ZJ, *et al.* Optimization of fermentation process and analysis of nutritional and functional ingredients of wolfberry fruit wine [J]. *China Brew*, 2021, 40(7): 94–100.
- [26] QUE F, MAO L, PAN X. Antioxidant activities of five Chinese rice wines and the involvement of phenolic compounds [J]. *Food Res Int*, 2006, 39(5): 581–587.
- [27] AMIT KD, DEEPTI B, VINEET K, *et al.* Antioxidant potential and radioprotective effect of soy isoflavone against gamma irradiation induced oxidative stress [J]. *J Funct Foods*, 2012, 4(1): 197–206.
- [28] FAN ZL, WANG ZY, LIU JR. Cold-field fruit extracts exert different antioxidant and antiproliferative activities *in vitro* [J]. *Food Chem*, 2011, 129(2): 402–407.
- [29] GIRI L, DHYANI P, RAWAT S, *et al.* *In vitro* production of phenolic compounds and antioxidant activity in callus suspension cultures of *Habenaria edgeworthii*: A rare Himalayan medicinal orchid [J]. *Ind Crop Prod*, 2012, 39: 1–6.
- [30] JACKSON RS. *Wine science* [M]. London: Elsevier, 2008.
- [31] AVELLONE G, DI-GARBO V, CAMPISI D, *et al.* Effects of moderate sicilian red wine consumption on inflammatory biomarkers of atherosclerosis [J]. *Eur J Clin Nutr*, 2005, 60(1): 41–47.
- [32] MUDNIC I, MODUN D, RASTIJA V, *et al.* Antioxidative and vasodilatory effects of phenolic acids in wine [J]. *Food Chem*, 2010, 119(3): 1205–1210.
- [33] 张秀玲, 汲润, 李凤凤, 等. 发酵工艺对蓝靛果酒功能性及香气成分的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(10): 189–198.
- ZHANG XL, JI R, LI FF, *et al.* Effects of fermentation processes on the functional and aroma components of *Lonicera edulis* wine [J]. *Food Sci*, 2022, 43(10): 189–198.
- [34] 孙佳妮, 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, 201.
- SUN JX, KANG WH, LI H, *et al.* Changes of aroma composition during fermentation of mulberry wine [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2020, 36(8): 307–316, 201.
- [35] 佟尧, 吴紫薇, 陈娟, 等. 雪梨枇杷果酒主发酵工艺优化及挥发性成分分析[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(9): 193–199.
- TONG Y, WU ZW, CHEN J, *et al.* Optimization of main fermentation technology and volatile compounds analysis of snow pear loquat wine [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(9): 193–199.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



刘佳艺, 主要研究方向为食品化学。

E-mail: 2096189207@qq.com



曾维才, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品化学和绿色加工技术。

E-mail: weicaizeng@qq.com