

甘蔗凤梨糯米甜酒酿造工艺优化及其品质分析

卢珍兰, 吴丹丹, 吴艳交, 杨露露, 农惠菲, 张旅娇, 莫稼华, 余森艳*

(广西民族师范学院 化学与生物工程学院, 广西 崇左 532200)

摘要: 以甘蔗、凤梨和糯米为原料, 甜酒曲为发酵剂, 通过单因素试验和正交试验, 研究甘蔗凤梨糯米甜酒酿造的最佳工艺参数, 研制一款水果风味的甜酒酿。结果表明, 甜酒酿的最佳工艺为糯米与甘蔗凤梨混合汁质量比 1:0.4、发酵温度 32 °C、甜酒曲添加量 0.4%、甘蔗汁与凤梨汁质量比 1:5、发酵时间 3 d, 在此工艺下制得的甜酒酿色泽均匀, 醇厚香甜可口, 酒香味和果香味浓郁, 总糖含量为 115.625 g/L, pH 值为 4.22, 酒精度为 2.1% vol, 可溶性固形物含量为 33.6 g/100 g, 均符合相关标准, 且对 DPPH 自由基、羟自由基和 ABTS⁺ 自由基的清除能力 IC₅₀ 值分别为 11.51%、28.28% 和 4.11%, 说明此甜酒酿具有良好的抗氧化能力。

关键词: 甘蔗; 凤梨; 糯米; 甜酒酿; 感官评分

Optimization of Brewing Process and Quality Analysis of Sweet Wine Made from Sugarcane, Pineapple, and Glutinous Rice

LU Zhenlan, WU Dandan, WU Yanjiao, YANG Lulu, NONG Huifei, ZHANG Lujiao,

MO Jiahua, YU Senyan*

(College of Chemical and Biological Engineering, Guangxi Minzu Normal University, Chongzuo 532200, Guangxi, China)

Abstract: With sugarcane, pineapple, and glutinous rice as raw materials and liqueur koji as the starter, the optimal process parameters for brewing sweet wine made from sugarcane, pineapple, and glutinous rice were explored through single factor and orthogonal tests, and a fruit-flavored sweet wine was developed. The results showed that the best formula of sweet wine was as follows: The mass ratio of glutinous rice to mixed juice of sugarcane and pineapple was 1:0.4; the fermentation temperature was 32 °C; the addition of liqueur koji was 0.4%; the mass ratio of sugarcane juice to pineapple juice was 1:5, and the fermentation time was three days. The sweet wine produced under these conditions had uniform color, mellow and sweet taste, and rich wine flavor and fruit flavor. The total sugar content was 115.625 g/L; the pH value was 4.22; the alcohol content was 2.1% vol, and the soluble solid content was 33.6 g/100 g, all of which complied with relevant standards. In addition, the IC₅₀ values of DPPH, hydroxyl, and ABTS⁺ free radical scavenging ability were 11.51%, 28.28%, and 4.11%, respectively, indicating that this sweet wine had good antioxidant ability.

Key words: sugarcane; pineapple; glutinous rice; sweet wine; sensory scoring

引文格式:

卢珍兰, 吴丹丹, 吴艳交, 等. 甘蔗凤梨糯米甜酒酿造工艺优化及其品质分析[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 147-154.

LU Zhenlan, WU Dandan, WU Yanjiao, et al. Optimization of Brewing Process and Quality Analysis of Sweet Wine Made from Sugarcane, Pineapple, and Glutinous Rice[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 147-154.

基金项目: 2020 年度广西民族师范学院科学研究人才启动项目(2020FG001); 2023 年度广西民族师范学院课程思政示范课程、教学名师和团队项目(KCSZSFKC202304)

作者简介: 卢珍兰(1982—), 女(壮), 高级工程师, 硕士, 研究方向: 食品微生物发酵产品。

*通信作者: 余森艳(1977—), 女, 副教授, 硕士, 研究方向: 发酵食品、农产品贮藏与加工。

甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)属于禾本科甘蔗属植物^[1],在我国华南地区广泛种植。广西甘蔗产量居全国首位,广西崇左市是我国最大的甘蔗种植、生产基地,被誉为“中国糖都”^[2-3]。甘蔗中含有丰富的糖分与水分,具有清热解毒、生津止渴、和胃止呕、滋阴补阳等功效^[4-5],还具有抗炎、抗氧化、正向调节血脂水平等功效^[6-10]。

凤梨别名菠萝,属凤梨科,是一种热带水果,普遍种植于南方地区,在海南、云南、福建等地均有栽培^[11]。凤梨酸甜多汁,营养丰富,富含果糖、葡萄糖、蛋白质、维生素、膳食纤维以及钙、铁、钾、磷等多种等矿物质,具有清热解暑、益气生津^[12-14]、改善消化不良、缓解头昏眼花^[15-16]、稳定情绪^[17]等功效。此外,凤梨含有的酯类风味物质香气诱人,深受消费者的喜爱^[18]。凤梨水分含量高,成熟后以及运输过程中极易发生腐烂,不耐长久贮存运输,所以目前对凤梨的利用大多是鲜果销售或制成果汁销售,对凤梨深加工产品研发较少。近年来,凤梨的种植面积和产量均增加,导致收获季节大量鲜果上市,造成部分滞销。因此为了缓解收获季节产量过剩滞销,尤其是对于糖酸比值低、鲜食商品性差的次级果类,对其开展深加工研究非常有必要,而且也具有重要现实意义。

目前,国内外对于甘蔗和凤梨的研究集中于单一的优化及两者复合型果酒和发酵产品的研究,而关于甘蔗凤梨糯米甜酒酿的研究鲜见报道。甜酒酿是糯米经发酵而成,具有多种对人体健康有益的成分,含有多种有机酸、氨基酸、多肽以及酯类物质,其酒精度低,甘醇味美,是一种常见的酒精饮料,具有促进食欲、温胃健脾、抗衰老等功效。目前,甜酒的酿造已从单一的选材拓展到了多种原料混合发酵的水果复合型甜酒,如发酵型桂花甜酒酿^[19]、百香果大黄米酒^[20]等。这不仅增加了甜酒酿的品种,还提高了甜酒酿的品质风味。凤梨富含芳香气味但味酸,而甘蔗气味平淡但富含糖分,将两者和糯米结合发酵制成水果甜酒酿,一方面可以充分发挥凤梨和甘蔗的特点,另一方面通过发酵有利于凤梨和甘蔗中有效成分析出,从而提高甜酒酿的营养价值^[21]。

本研究以甘蔗、凤梨和糯米为原料,以甜酒曲为发酵剂,通过单因素试验和正交试验进行优化设计,研制出一款具有甘蔗凤梨风味的糯米甜酒酿,旨在拓宽甘蔗、凤梨和糯米制品的应用范围,并提高水果和大米的利用率,开发以水果和糯米为原料的功能性食品提供理论依据。

1 材料与方

1.1 材料与试剂

甘蔗、凤梨:市售,无腐烂霉变;糯米:五常市兴旺米业有限公司;果胶酶(30 000 U/g,食品级):南宁庞博

生物工程有限公司;甜酒曲:安琪酵母股份有限公司;1,1-二苯基-2-苦味基胍(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氮基双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-diazobis(3-ethyl benzothiazole line-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS]、L(+)抗坏血酸(均为分析纯):上海麦克林生化科技股份有限公司;无水乙醇、30%过氧化氢、硫酸亚铁、四水合酒石酸钾钠、无水硫酸铜(均为分析纯):广东光华科技股份有限公司;氢氧化钠、草酸、葡萄糖、水杨酸、过二硫酸钾、浓盐酸、亚甲基蓝、二水磷酸二氢钠、二水磷酸氢二钠(均为分析纯):成都市科隆化学品有限公司;甲基红(分析纯):西陇科学股份有限公司;酚酞(分析纯):天津市光复科技发展有限公司。

1.2 仪器与设备

SXZ-80 甘蔗榨汁机:佛山市乐狗电子商务有限公司;L18-Y915S 高速破壁调理机:九阳股份有限公司;C21-WK2102 多功能电磁炉:广东美的生活电器制造有限公司;HH-S6 数显电热恒温水浴锅:江苏金怡仪器科技有限公司;FA2004 电子分析天平:上海力辰邦西仪器科技有限公司;UV-5200 紫外分光光度计:上海元析仪器有限公司;H1650 台式高速离心机:长沙高新技术产业开发区湘仪离心机仪器有限公司;ATC 手持折光仪:衡水正旭电子科技有限公司;PAL-1 手持糖度计:广州市爱拓科技有限公司;PHS-3E pH 计:上海佑科仪器仪表有限公司;SPX-260 智能生化培养箱:宁波扬辉仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 甘蔗凤梨糯米甜酒的酿造工艺流程及操作要点

1.3.1.1 工艺流程

1)黑皮甘蔗→筛选清洗→去皮榨汁→加酶水解→过滤→灭菌→甘蔗汁。

2)凤梨→去皮、去眼→清洗→切片→榨汁→加酶水解→过滤→灭菌→凤梨汁。

3)糯米→清洗→浸泡→蒸饭→淋冷。

4)将以上3种料液混匀→拌曲→恒温发酵→成品。

1.3.1.2 操作要点

1)甘蔗汁制备:挑选无腐烂霉变的黑皮甘蔗,清洗沥干水分后削皮榨汁,加入0.1%果胶酶在40℃水浴酶解2h,然后过滤,经巴氏杀菌后得到甘蔗汁,备用。

2)凤梨汁制备:选择无腐烂霉变的凤梨果,去皮去眼用清水洗干净后,切片榨汁,加入0.1%果胶酶在40℃水浴酶解2h,然后过滤,经巴氏杀菌后得到凤梨汁,备用。

3)糯米饭制备:选择米粒大、饱满整齐、杂质少品质优良的糯米,洗净,用凉开水浸泡4h,捞出清洗1~2次,放入铺有纱布的蒸锅内,铺匀后在糯米的表面

垂直向下戳几个孔,大火烧开、中小火蒸 20 min,直到饭粒膨胀熟透、松散柔软,饭粒不能夹生或过烂。然后迅速用凉开水浇在蒸熟的糯米上使其冷却,使糯米温度降低至 28 °C 左右,备用。

4)混匀、拌曲:将甘蔗汁、凤梨汁按一定的比例加入到淋冷后的糯米饭中,再加入一定比例的甜酒曲搅拌使其混合均匀。

5)恒温发酵:将拌好甜酒曲的甘蔗凤梨糯米饭装入发酵罐中,在一定温度下发酵一定的时间,获得甘蔗凤梨糯米甜酒酿。

1.3.2 甘蔗凤梨糯米甜酒酿造工艺单因素试验

设定糯米与甘蔗凤梨混合汁质量比 1:0.6、发酵温度 30 °C、甜酒曲添加量 0.5%、甘蔗汁与凤梨汁质量比 3:5、发酵时间 3 d 为基础条件,改变单一条件,以酒精度和感官评分为指标,分别考察糯米与甘蔗凤梨混合汁质量比(1:0.2、1:0.4、1:0.6、1:0.8、1:1.0)、发酵温度(26、28、30、32、34 °C)、甜酒曲添加量(0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%)、甘蔗汁与凤梨汁质量比(1:5、2:5、3:5、4:5、5:5)、发酵时间(1、2、3、4、5 d)对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响。

1.3.3 甘蔗凤梨糯米甜酒酿造工艺优化正交试验

在单因素试验结果基础上,选择发酵温度(A)、甜酒曲添加量(B)、甘蔗汁与凤梨汁质量比(C)和发酵时间(D)为 4 个影响因素,以感官评分为指标,设计五因素四水平(含一个空列) $L_{16}(4^5)$ 正交试验,正交试验因素与水平见表 1。

表 1 甘蔗凤梨糯米甜酒酿造工艺优化正交试验因素与水平
Table 1 Factors and levels of orthogonal test for optimizing brewing process of sweet wine made from sugarcane, pineapple, and glutinous rice

水平	A 发酵温度/°C	B 甜酒曲添加量/%	C 甘蔗汁与凤梨汁质量比	D 发酵时间/d
1	26	0.3	1:5	1
2	28	0.4	2:5	2
3	30	0.5	3:5	3
4	32	0.6	4:5	4

1.3.4 指标测定

1.3.4.1 甜酒酿的感官评价

选取 10 名经过培训的食品专业人士作为感官评价人员,从色泽(20 分)、形态(20 分)、澄清度(20 分)、香味(20 分)、口感(20 分)5 个方面依次对甜酒酿成品进行评分,满分为 100,甜酒的感官评分标准见表 2。

1.3.4.2 理化指标测定

酒精度:参考 GB 5009.225—2023《食品安全国家标准 酒和食用酒精中乙醇浓度的测定》^[22]中的酒精计

表 2 甘蔗凤梨糯米甜酒酿感官评分标准

Table 2 Sensory scoring criteria for sweet wine made from sugarcane, pineapple, and glutinous rice

项目	评分标准	分值
色泽(20分)	色泽均匀为米白色或浅黄色	17~20
	色泽均匀,少量米粒泛黄	12~<17
	色泽为浅黄色,部分米粒为黄色	8~<12
	色泽为黄色,大部分米粒为黄色	1~<8
形态(20分)	颗粒完整,没有杂质	17~20
	颗粒完整,有少量浑浊物	12~<17
	颗粒松散,有少量糯米断粒漂浮	8~<12
澄清度(20分)	颗粒松散,有部分浑浊物	1~<8
	澄清透亮,没有悬浮物	17~20
	澄清透亮,有少量悬浮物	12~<17
	澄清透亮,有部分悬浮物	8~<12
香味(20分)	浑浊,有大量悬浮物	1~<8
	酒香和原果实香味浓郁,协调纯正	17~20
	酒香和原果实香味协调	12~<17
	酒香和原果实香味淡薄,有轻微酸味	8~<12
口感(20分)	酒香和甜香不纯正或有酸、臭等异味	1~<8
	口感醇厚香甜可口,回味持久	17~20
	口感爽滑,甜度适宜,有微弱的苦味	12~<17
	口感协调,甜度较淡,酒苦味明显或有弱酸味	8~<12
	口感粗糙,酒苦味较重或有较强的酸味	1~<8

法测定;可溶性固形物含量:采用折光仪测定;总糖含量:参照 GB/T 13662—2018《黄酒》^[23]中的廉爱农法(仲裁法)测定。

1.3.4.3 抗氧化活性测定

1) DPPH 自由基清除能力的测定

参照文献[24]方法进行改进,分别取 3 mL 浓度为 20%、40%、60%、80%、100% 的甜酒酿和 2.2 mL 0.3 mmol/L 的 DPPH 工作液混合作为测定样品,在暗处反应 0.5 h 后在 517 nm 波长下测定吸光度 A_i ;用乙醇代替 DPPH 工作液测定吸光度为 A_j ;用乙醇代替样品测其吸光度为 A_c 。以 V_c 溶液作为阳性对照进行测定。DPPH 自由基清除率($D, \%$)计算公式见公式(1)。

$$D = (1 - \frac{A_i - A_j}{A_c}) \times 100 \quad (1)$$

2) 羟自由基清除能力的测定

参考文献[25]方法进行改进,分别取 1.5 mL 浓度为 20%、40%、60%、80%、100% 的甜酒酿,分别加入 2.0 mL 浓度为 9 mmol/L $FeSO_4$ 和 2.0 mL 9 mmol/L 水杨酸溶液作为反应体系,再加入 2.0 mL 8.8 mmol/L 的 H_2O_2 溶液启动反应,于 37 °C 下反应 0.5 h,在 510 nm 波长下测定其吸光度 A_x ;用蒸馏水代替 H_2O_2 溶液测其吸光度为 A_o ;用蒸馏水代替样品测其吸光度为 A_o 。以 V_c 溶液作为阳性对照进行测定。羟自由基清除率

($O, \%$)计算公式见公式(2)。

$$O = \left(1 - \frac{A_x - A_{x_0}}{A_0}\right) \times 100 \quad (2)$$

3) ABTS⁺自由基清除能力的测定

参考文献[26]的方法进行改进,取 7.4 mmol/L ABTS 储备液和 2.6 mmol/L K₂S₂O₈ 按 1:1(体积比)混合,避光反应 14 h,用 pH7.4 磷酸盐缓冲液稀释直至在 734 nm 处吸光度为 0.70±0.02,此为 ABTS 工作液。分别取 0.5 mL 浓度为 5%、10%、15%、20%、25% 的甜酒酿,分别加入 6.0 mL ABTS 工作液,充分振荡,然后避光反应 8 min,在 734 nm 处测定溶液吸光度 B_i ;蒸馏水代替样品测定吸光度为 B_0 。以 V_c 溶液作为阳性对照进行测定。ABTS⁺自由基清除率($A, \%$)计算公式见公式(3)。

$$A = \left(1 - \frac{B_0 - B_i}{B_0}\right) \times 100 \quad (3)$$

1.4 数据处理

本研究所有试验均重复进行 3 次,采用 Microsoft Office 2019 Excel 进行数据分析并绘图,用 IBM-SPSS Statistics 19.0 软件进行一般线性模型单变量方差分析。

2 结果与分析

2.1 甘蔗凤梨糯米甜酒酿工艺单因素试验结果与分析

2.1.1 糯米与甘蔗凤梨混合汁质量比对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响

糯米与甘蔗凤梨混合汁质量比对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响见图 1。

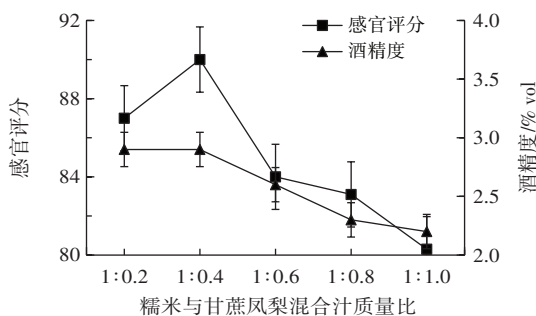


图 1 糯米与甘蔗凤梨混合汁质量比对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响

Fig.1 Effect of mass ratio of glutinous rice to mixed juice of sugarcane and pineapple on sweet wine made from sugarcane, pineapple, and glutinous rice

由图 1 可知,随着甘蔗凤梨混合汁添加量的增加,酒精度逐渐下降。当糯米与甘蔗凤梨混合汁质量比为 1:0.4 时,感官评分最高,为 90,此时酒香和甘蔗凤梨香味浓郁,香气协调纯正,口感最佳;随着甘蔗凤梨混合汁的添加量继续增加,感官评分逐渐下降,口感变粗糙,协调性也下降,酒苦味逐渐明显并有弱酸味产生。原因可能是甘蔗凤梨混合汁的增加导致发酵体系的

pH 值下降,不适合甜酒曲的生长,反而适合一些杂菌的生长,最终导致口感、风味、品质以及酒精度下降。综合酒精度和感官评分结果,糯米与甘蔗凤梨混合汁最适质量比为 1:0.4。

2.1.2 发酵温度对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响

发酵温度对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响见图 2。

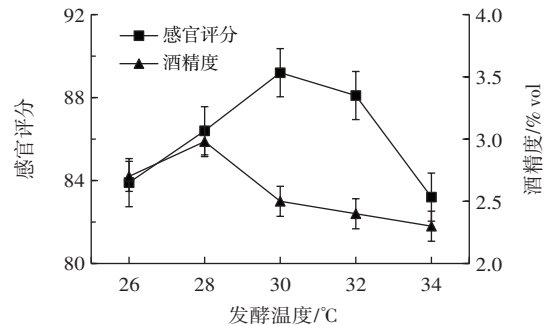


图 2 发酵温度对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响

Fig.2 Effect of fermentation temperature on sweet wine made from sugarcane, pineapple, and glutinous rice

由图 2 可知,随着发酵温度的升高,酒精度呈先上升后下降的趋势。当发酵温度为 28 °C 时,酒精度达最高值,为 2.98% vol。而当发酵温度为 30 °C 时,感官评分达最高值,为 89.2,此时甜酒酿口感醇厚,酒香和凤梨果的香味浓郁。当发酵温度大于 30 °C,感官评分逐渐下降,口感甜腻,酒苦味逐渐明显,不协调。原因可能是发酵温度超过 30 °C,不利于甜酒曲中根霉菌的生长和产酶发酵,反而适合耐高温杂菌的生长,所以酒精度和口感均下降。综合酒精度和感官评分结果,选择 26、28、30、32 °C 4 个水平进行正交优化试验。

2.1.3 甜酒曲添加量对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响

甜酒曲添加量对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响见图 3。

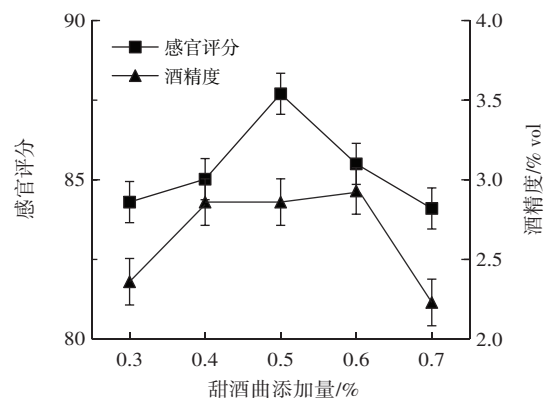


图 3 甜酒曲添加量对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响

Fig.3 Effect of addition of liqueur koji on sweet wine made from sugarcane, pineapple, and glutinous rice

由图 3 可知,随着甜酒曲添加量的增加,酒精度呈现上升的趋势,随后趋于平稳,最后下降,原因可能是

甜酒曲添加量为 0.3% 时,添加量过少,根霉菌发酵作用微小,所以酒精度较低,而甜酒曲添加量为 0.7% 时,过高的接种量导致根霉菌之间相互争夺养分而不能正常生长和产生酒精,从而抑制了酒精发酵。当甜酒曲添加量为 0.6% 时,酒精度达最高值,为 2.93% vol。而甜酒曲添加量为 0.5% 时,感官评分最高,为 87.7,此时,口感醇厚,具有酒香和凤梨果的香味。当甜酒曲添加量大于 0.5% 时,感官评分开始下降,口感过甜,协调性下降。综合酒精度和感官评分结果,选用甜酒曲添加量为 0.3%、0.4%、0.5%、0.6% 4 个水平进行正交优化试验。

2.1.4 甘蔗汁与凤梨汁质量比对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响

甘蔗汁与凤梨汁质量比对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响见图 4。

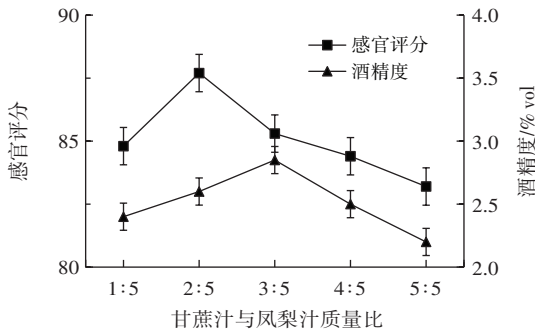


图 4 甘蔗汁与凤梨汁质量比对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响

Fig.4 Effect of mass ratio of sugarcane juice to pineapple juice on sweet wine made from sugarcane, pineapple, and glutinous rice

由图 4 可知,随着甘蔗汁添加量的不断增加,酒精度呈现先上升后下降的趋势,当甘蔗汁与凤梨汁质量比为 3:5 时,酒精度达到最高值,为 2.85% vol,随后,酒精度开始下降,原因可能是甘蔗汁过多的添加会使发酵体系含有较多的蔗糖,另外糯米本身发酵也会产生大量的糖分,导致可溶性糖浓度过高,反而抑制了甜酒曲的生长。而甘蔗汁与凤梨汁质量比为 2:5 时,感官评分最高,为 87.7,此时,酒香和原果实香味浓郁、纯正,口感醇厚。甘蔗汁本身较甜腻,甘蔗汁添加量过多会掩盖凤梨的清香,导致口感过甜,感官评分降低。综合酒精度和感官评分结果,选用甘蔗汁与凤梨汁质量比为 1:5、2:5、3:5、4:5 4 个水平进行正交优化试验。

2.1.5 发酵时间对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响

发酵时间对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响见图 5。

由图 5 可知,酒精度随着发酵时间的延长呈上升趋势,后期逐渐平稳,原因可能是营养物质消耗殆尽,根霉菌的生长或者发酵作用趋于停滞状态,酒精度不再上升,酒精度最大值为 2.5% vol。而当发酵时间为 3 d 时,感官评分最高,为 88.4,此时口感最佳,酒味果味香气十足。当发酵时间大于 3 d 时,感官评分逐渐

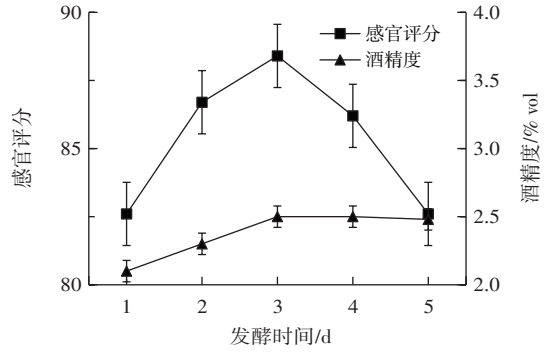


图 5 发酵时间对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响

Fig.5 Effect of fermentation time on sweet wine made from sugarcane, pineapple, and glutinous rice

下降,口感变粗糙,协调性也下降,酒苦味逐渐明显并有弱酸味产生。综合酒精度和感官评分结果,选用 1、2、3、4 d 4 个水平进行正交优化试验。

2.2 甘蔗凤梨糯米甜酒酿正交优化试验结果与分析
正交试验结果与分析见表 3,方差分析见表 4。

表 3 正交试验结果与分析
Table 3 Results and analysis of orthogonal tests

试验号	A 发酵温度	B 甜酒曲添加量	C 甘蔗汁与凤梨汁质量比	D 发酵时间	E 空列	感官评分
1	1	1	1	1	1	87.4
2	1	2	2	2	2	88.7
3	1	3	3	3	3	87.0
4	1	4	4	4	4	86.7
5	2	1	2	3	4	89.9
6	2	2	1	4	3	90.3
7	2	3	4	1	2	86.7
8	2	4	3	2	1	88.9
9	3	1	3	4	2	87.5
10	3	2	4	3	1	88.9
11	3	3	1	2	4	90.0
12	3	4	2	1	3	88.4
13	4	1	4	2	3	88.0
14	4	2	3	1	4	87.8
15	4	3	2	4	1	89.2
16	4	4	1	3	2	91.0
k ₁	87.450	88.200	89.675	87.575	88.600	
k ₂	88.950	88.925	89.050	88.900	88.475	
k ₃	88.700	88.225	87.800	89.200	88.425	
k ₄	89.000	88.750	87.575	88.425	88.600	
R	1.550	0.725	2.100	1.625	0.175	

表4 正交试验结果方差分析

Table 4 Analysis of variance for results of orthogonal tests

方差来源	III类平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
修正模型	26.135 ^a	12	2.178	68.776	0.003	**
A 发酵温度	6.370	3	2.123	67.053	0.003	**
B 甜酒曲添加量	1.625	3	0.542	17.105	0.022	*
C 甘蔗汁与凤梨汁质量比	12.105	3	4.035	127.421	0.001	**
D 发酵时间	6.035	3	2.012	63.526	0.003	**
误差	0.095	3	0.032	1.000		
总计	125 413.040	16				
校正后总计	26.230	15				

注:*表示影响显著($P<0.05$);**表示影响极显著($P<0.01$);a表示 $R^2=0.996$ (调整 $R^2=0.982$)。

由表3的极差分析可知,各因素对甘蔗凤梨糯米甜酒酿口感的影响主次顺序为C>D>A>B,即甘蔗汁与凤梨汁质量比是影响甘蔗凤梨糯米甜酒酿口感的最大因素,其次是发酵时间和发酵温度,甜酒曲添加量影响较小。由表4可知,因素A、C、D对甘蔗凤梨糯米甜酒酿感官评分的影响均呈极显著性($P<0.01$),而因素B对甘蔗凤梨糯米甜酒酿感官评分的影响呈显著性($P<0.05$),即甘蔗汁与凤梨汁质量比、发酵时间和发酵温度对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的影响大,甜酒曲添加量对甘蔗凤梨糯米甜酒酿影响较大。

通过表3可知,最优组合为 $A_4B_2C_1D_3$,由于此最佳组合不在正交试验分析的范围内,所以对此最优组合进行验证试验,做3次平行试验。得到的甘蔗凤梨糯米甜酒酿口感醇厚香甜可口,酒香和原果实香味浓郁,色泽均匀为米白色,颗粒完整,没有杂质,感官评分为93,高于正交试验所有试验测得的分值。因此,甘蔗凤梨糯米甜酒酿的最佳工艺为发酵温度 $32\text{ }^\circ\text{C}$ 、甜酒曲添加量0.4%、甘蔗汁与凤梨汁质量比1:5、发酵时间3d。

2.3 抗氧化活性试验结果分析

2.3.1 甘蔗凤梨糯米甜酒酿对DPPH自由基的清除能力

DPPH自由基是一种高度稳定的氮中心自由基,其乙醇溶液呈紫色,可与能清除自由基的样品反应,使其颜色变浅,吸光度变小,以此来判断样品的抗氧化能力^[27]。不同浓度甜酒酿和 V_C 的DPPH自由基清除能力见图6。

由图6可知,甘蔗凤梨糯米甜酒酿对DPPH自由基有良好的清除作用,其清除率随着甘蔗凤梨糯米甜酒酿浓度的增大而增大,呈正相关,其清除DPPH自由基的半抑制浓度(half inhibition concentration, IC_{50})值为11.51%,当甘蔗凤梨糯米甜酒酿的体积浓度为

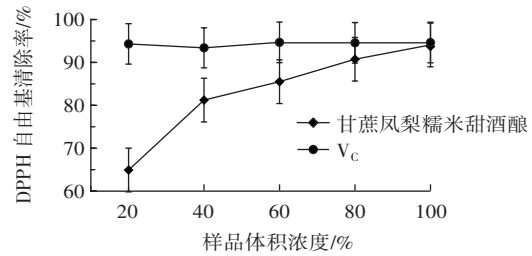


图6 不同浓度甜酒酿和 V_C 的DPPH自由基清除能力
Fig.6 DPPH free radical scavenging ability of sweet wine and V_C at different concentrations

100%时,对DPPH自由基的清除率最大,为94.08%; V_C 对DPPH自由基清除率为93.40%~94.68%,整体比甘蔗凤梨糯米甜酒酿对DPPH自由基的清除率强。

2.3.2 甜酒酿对羟自由基的清除能力

羟自由基是体内代谢活动产生的一种氧化性很强的自由基,能与机体细胞中大多数化合物发生反应,导致细胞死亡、组织损伤和疾病的发生,是对身体危害最大的自由基^[28]。不同浓度甜酒酿和 V_C 的羟自由基清除能力见图7。

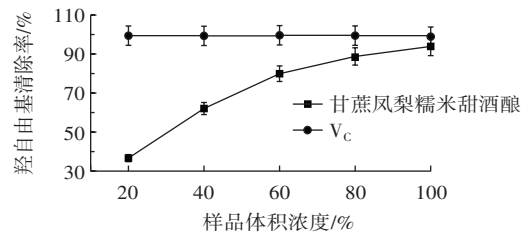


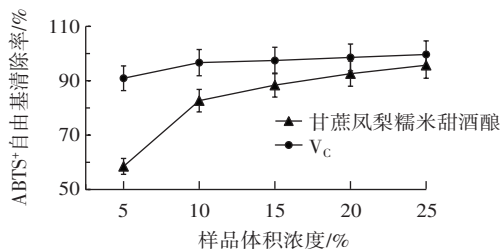
图7 不同浓度甜酒酿和 V_C 的羟自由基清除能力
Fig.7 Hydroxyl free radical scavenging ability of sweet wine and V_C at different concentrations

由图7可知,甘蔗凤梨糯米甜酒酿对羟自由基有较好的清除作用,其清除率随着甘蔗凤梨糯米甜酒酿浓度的增大而增大,呈正相关,其清除羟自由基的 IC_{50} 值为28.28%,当甘蔗凤梨糯米甜酒酿的浓度为100%时,对羟自由基的清除率最大,为93.88%; V_C 对羟自由基清除率为98.89%~99.4%,整体上比甘蔗凤梨糯米甜酒酿对羟自由基的清除率更强。

2.3.3 甜酒酿对ABTS⁺自由基的清除能力

ABTS经氧化后生成稳定的蓝绿色ABTS⁺自由基,在波长734nm处有最大吸收峰,当其与具有清除自由基能力的样品反应后会褪色,吸光度变小,以此来判断样品的清除能力,其清除能力是评判亲水性和亲脂性物质的抗氧化能力的指标之一^[29]。不同浓度甜酒酿和 V_C 的ABTS⁺自由基清除能力见图8。

由图8可知,甘蔗凤梨糯米甜酒酿对ABTS⁺自由基有很强的清除作用,其清除率随着甘蔗凤梨糯米甜酒酿浓度的增大而增大,呈正相关,其清除ABTS⁺自由

图8 不同浓度甜酒酿和V_c的ABTS⁺自由基清除能力Fig.8 ABTS⁺ free radical scavenging ability of sweet wine and V_c at different concentrations

基的IC₅₀值为4.11%,当甘蔗凤梨糯米甜酒酿的体积浓度为25%时,对ABTS⁺自由基的清除率达95.7%;V_c对ABTS⁺自由基清除率在90.92%~99.66%,整体上比甘蔗凤梨糯米甜酒酿对ABTS⁺自由基的清除率更强。

2.4 产品指标

用最佳工艺参数酿制获得的甘蔗凤梨糯米甜酒酿,色泽为均匀的米白色或浅黄色,颗粒完整,没有杂质,酒香味和果香味浓郁,凤梨、甘蔗、糯米香味纯正,口感醇厚香甜可口,回味持久。

用最佳工艺参数酿制获得的甘蔗凤梨糯米甜酒酿的总糖含量为115.625 g/L,pH值为4.22,均符合GB/T 13662—2018《黄酒》中的传统型甜黄酒理化要求;酒精度为2.1% vol,可溶性固形物含量为33.6 g/100 g,均符合DBS 52/063—2022《食品安全地方标准 醪糟(甜酒)》的要求。

3 结论

以甘蔗、凤梨和糯米为主要原料,甜酒曲为发酵剂,通过单因素试验和正交试验对甘蔗凤梨糯米甜酒酿的工艺参数进行优化。结果表明,最优工艺参数为糯米与甘蔗凤梨混合汁质量比1:0.4、发酵温度32℃、甜酒曲添加量0.4%、甘蔗汁与凤梨汁质量比1:5、发酵时间3 d。在此工艺下制得的甘蔗凤梨糯米甜酒酿色泽均匀,醇厚香甜可口,酒香味和果香味浓郁,总糖含量为115.625 g/L,pH值为4.22,酒精度为2.1% vol,可溶性固形物含量为33.6 g/100 g,均符合相关标准,对DPPH自由基、羟自由基和ABTS⁺自由基的清除能力IC₅₀值分别为11.51%、28.28%和4.11%,说明此甜酒酿具有良好的抗氧化能力。本研究可以拓宽甘蔗、凤梨和糯米制品的应用范围,并提高水果和大米的利用率,为开发以水果和大米为原料的功能性食品提供理论依据。

参考文献:

[1] 徐勇士,魏勃,魏甜甜,等.甘蔗原汁乳酸发酵饮料的工艺[J].食品工业,2021,42(5):186-191.
XU Yongshi, WEI Bo, WEI Tiantian, et al. Fermented beverage of sugarcane by lactic acid bacteria[J]. The Food Industry, 2021, 42(5): 186-191.

[2] 孙帅楠.甘蔗汁饮料混菌发酵工艺的研究[D].南宁:广西大学,2017.
SUN Shuainan. Study on mixed fermentation technology of sugarcane juice beverage[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.

[3] 曹敏,王元春,雷光鸿,等.甘蔗汁饮料澄清工艺研究[J].轻工科技,2017(6):1-3.
CAO Min, WANG Yuanchun, LEI Guanghong, et al. Study on clarification technology of sugarcane juice beverage[J]. Light Industry Science and Technology, 2017(6): 1-3.

[4] 林波,郑凤锦,方晓纯,等.甘蔗发酵制品的氨基酸对比及营养风味分析[J].农产品加工,2022,557(15):64-69.
LIN Bo, ZHENG Fengjin, FANG Xiaochun, et al. Comparison of amino acids and analysis of nutrition and flavor on sugarcane fermentation products[J]. Farm Products Processing, 2022, 557(15): 64-69.

[5] 李志春,陈赶林,郑凤锦,等.甘蔗醋对高脂饲养小鼠体质量、脏器系数和血清生化指标的影响[J].中国酿造,2020,39(1):50-54.
LI Zhichun, CHEN Ganlin, ZHENG Fengjin, et al. Effects of sugarcane vinegar on body mass, organ coefficient and serum biochemical index of mice fed with high-fat diet[J]. China Brewing, 2020, 39(1): 50-54.

[6] 吴悠.甘蔗叶多糖对NOD小鼠I型糖尿病的预防作用及其机制研究[D].南宁:广西中医药大学,2020.
WU You. Preventive effect of sugarcane leaf polysaccharide on type I diabetes in NOD mice and its mechanism[D]. Nanning: Guangxi University of Chinese Medicine, 2020.

[7] 郑瑞.甘蔗多酚抗氧化、降血糖、抗肿瘤细胞增殖活性研究[D].广州:华南理工大学,2017.
ZHENG Rui. Study on antioxidant, hypoglycemic and anti-tumor cell proliferation activities of sugarcane polyphenols[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.

[8] 王珊珊,吴昊,司月阳,等.响应面法优化甘蔗菠萝复合果酒的酿造工艺[J].中国酿造,2019,38(9):80-85.
WANG Shanshan, WU Hao, SI Yueyang, et al. Optimization of brewing process of sugarcane and pineapple compound fruit wine by response surface methodology[J]. China Brewing, 2019, 38(9): 80-85.

[9] 王小明,王利,覃逸明,等.甘蔗清汁发酵型保健酒配方工艺优化[J].食品工业,2020,41(4):104-108.
WANG Xiaoming, WANG Li, QIN Yiming, et al. Optimization of formula for sugarcane juice fermentation-type health wine[J]. The Food Industry, 2020, 41(4): 104-108.

[10] 张海龙,杨晓蕾.百香果甘蔗复合果酒的发酵工艺研究[J].酿酒科技,2022(2):24-29.
ZHANG Hailong, YANG Xiaolei. Fermentation technology of passion fruit-sugarcane wine[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2022(2): 24-29.

[11] 胡会刚,赵巧丽.菠萝皮渣多酚的提取分离及其抗氧化活性评价[J].食品科技,2020,45(1):286-293.
HU Hui gang, ZHAO Qiaoli. Extraction, separation and antioxidant activities of polyphenols from pineapple pomace[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(1): 286-293.

[12] PRABASARI I, PAMUNGKAS U R, SETIAWAN C K. Effect of pre-cooling and chitosan treatment on pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) quality during cold storage[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 985(1): 012046.

[13] MHATRE M, TILAK-JAIN J, DE S, et al. Evaluation of the antioxidant activity of non-transformed and transformed pineapple: A comparative study[J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, 47(11): 2696-2702.

- [14] KUWATA T, HASHIMOTO T, OHTO N, et al. A metabolite of dietary glucosylceramide from pineapples improves the skin barrier function in hairless mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 30: 228-236.
- [15] 唐霄, 孙杨赢, 潘道东, 等. 酶法优化菠萝皮多酚提取工艺及其稳定性研究[J]. *核农学报*, 2018, 32(2): 335-343.
TANG Xiao, SUN Yangying, PAN Daodong, et al. Enzymatic extraction of polyphenols from pineapple peel and stability evaluation of the extracted polyphenols[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(2): 335-343.
- [16] 李璐, 徐玉娟, 温靖, 等. 益生菌对发酵菠萝果汁综合品质的影响[J]. *中国酿造*, 2021, 40(1): 105-110.
LI Lu, XU Yujuan, WEN Jing, et al. Effect of probiotics on the comprehensive quality of fermented pineapple juice[J]. *China Brewing*, 2021, 40(1): 105-110.
- [17] 金良奎, 杨洋, 张玉玲, 等. 凤梨风味乳优化工艺研究[J]. *现代农业科技*, 2021(8): 214-215, 222.
JIN Liangkui, YANG Yang, ZHANG Yuling, et al. Study on the optimum process of pineapple flavored milk[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2021(8): 214-215, 222.
- [18] 刘传和, 贺涵, 邵雪花, 等. 两种菠萝鲜果及其酿造果酒酯类风味物质差异性分析[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(7): 109-115.
LIU Chuanhe, HE Han, SHAO Xuehua, et al. Differences analysis of flavor esters of fresh fruits and wine-products from two pineapple cultivars[J]. *Storage and Process*, 2021, 21(7): 109-115.
- [19] 陆雨洁, 彭颖, 张元媛, 等. 发酵型桂花甜酒酿的工艺参数优化[J]. *农产品加工*, 2021(7): 40-44.
LU Yujie, PENG Ying, ZHANG Yuanyuan, et al. Optimization of processing parameters of sweet-scented osmanthus wine[J]. *Farm Products Processing*, 2021(7): 40-44.
- [20] 谭属琼, 谢勇武, 刘蒙佳, 等. 百香果大黄米酒酿发酵工艺优化[J]. *农产品加工*, 2023(3): 26-30.
TAN Shuqiong, XIE Yongwu, LIU Mengjia, et al. Optimization of fermentation technology of fermented glutinous rice with passion fruit and glutinous millet[J]. *Farm Products Processing*, 2023(3): 26-30.
- [21] 吕静, 杨洁茹, 陈亚蓝, 等. 玫瑰菠萝复合饮料的研发[J]. *农产品加工*, 2023(18): 27-29, 33.
LÜ Jing, YANG Jieru, CHEN Yalan, et al. Research and development of rose pineapple composite beverage[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2023(18): 27-29, 33.
- [22] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 酒和食用酒精中乙醇浓度的测定: GB 5009.225—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard Determination of ethanol concentration in wine and food alcohol: GB 5009.225—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 黄酒: GB/T 13662—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Huangjiu: GB/T 13662—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [24] 唐雅园, 王雪峰, 韦珍, 等. 香蕉花多糖抗氧化活性及稳定性研究[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(7): 100-107.
TANG Yayuan, WANG Xuefeng, WEI Zhen, et al. Study on antioxidant activity and stability of banana flower polysaccharide[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(7): 100-107.
- [25] 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.
ZHAO Guanghe, LU Xiwen, HU Mengqi, et al. Study of antioxidant stability of polysaccharides from *Rhodomyrtus tomentosa*(ait.) hassk berries[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(16): 65-70.
- [26] 曾巧辉, 宋玉琼, 刘壮彬, 等. 甜酒酿的研制及营养价值研究[J]. *佛山科学技术学院学报(自然科学版)*, 2020, 38(4): 28-35.
ZENG Qiaohui, SONG Yuqiong, LIU Zhuangbin, et al. Research on the development of sweet wine and its nutritional value[J]. *Journal of Foshan University (Natural Science Edition)*, 2020, 38(4): 28-35.
- [27] 田亮, 孙碧琪, 毛祥飞, 等. 不同品种诺丽果发酵前后品质、挥发性风味成分和抗氧化活性比较[J]. *中国酿造*, 2023, 42(9): 138-143.
TIAN Liang, SUN Biqi, MAO Xiangfei, et al. Comparison of quality, volatile flavor components and antioxidant activity of different varieties of Noni fruit before and after fermentation[J]. *China Brewing*, 2023, 42(9): 138-143.
- [28] 王楠, 徐巧红, 高颖瑞, 等. 党参黄酒的酿造工艺优化及体外抗氧化活性研究[J]. *中国酿造*, 2023, 42(6): 178-185.
WANG Nan, XU Qiaohong, GAO Yingrui, et al. Optimization of brewing process and *in vitro* antioxidant activity of *Codonopsis pilosula* Huangjiu[J]. *China Brewing*, 2023, 42(6): 178-185.
- [29] 王帅, 宋奇, 范影, 等. 桑葚酵素发酵过程中理化指标及抗氧化活性的变化[J]. *中国酿造*, 2022, 41(11): 84-88.
WANG Shuai, SONG Qi, FAN Ying, et al. Changes of physicochemical indexes and antioxidant activities of mulberry Jiaosu during fermentation process[J]. *China Brewing*, 2022, 41(11): 84-88.

责任编辑:张璐
收稿日期:2024-03-20