

赵敏惠, 易媛, 张强, 等. 枳椇高粱共酿蒸馏酒酿造工艺优化及其特征风味物质和体外抗氧化活性 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 224–232. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030118

ZHAO Minhui, YI Yuan, ZHANG Qiang, et al. Optimization of Brewing Technology of *Hovenia acerba*-Sorghum Co-fermented Distilled Liquor and Its Characteristic Flavor Substances and Antioxidant Activity *in Vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 224–232. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030118

· 工艺技术 ·

枳椇高粱共酿蒸馏酒酿造工艺优化及其特征风味物质和体外抗氧化活性

赵敏惠¹, 易媛¹, 张强¹, 陈静², 左勇^{1,3,*}

(1. 四川轻化工大学生物工程学院, 四川宜宾 644000;

2. 固态发酵资源利用四川省重点实验室, 四川宜宾 644000;

3. 四川师范大学生命科学学院, 四川成都 610000)

摘要: 以枳椇和高粱为原料, 中温大曲为发酵剂, 通过单因素实验和正交试验对枳椇高粱共酿蒸馏酒进行工艺优化, 利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术 (HS-SPME-GC-MS) 结合气味活性阈值 (OAV) 对其风味组分进行检测分析, 并探究其体外抗氧化能力。结果表明: 枳椇高粱共酿蒸馏酒最佳发酵工艺为枳椇添加量 20%、大曲添加量 15%、发酵时间 35 d, 此时感官评分为 93.91 分, 出酒率为 40.21%, 果香浓郁, 酒味协调; 优化后的枳椇高粱共酿蒸馏酒共检测出 48 种挥发性成分, 其中 20 种挥发性物质 OAV 值>1, 丁酸乙酯、辛酸乙酯、正己酸乙酯、愈创木酚等被认为是枳椇高粱共酿蒸馏酒特征风味物质。相较于纯高粱蒸馏酒, 苯乙醇、2,3-丁二醇、9-癸烯酸乙酯、10-溴代癸酸乙酯等为枳椇高粱共酿蒸馏酒中特有的挥发性成分。体外抗氧化活性实验结果表明, 枳椇高粱共酿蒸馏酒总酚含量、DPPH 自由基清除能力、ABTS 自由基清除能力、总还原力均显著高于纯高粱蒸馏酒。本研究为枳椇酒工业化生产提供了科学参考, 为新型保健蒸馏酒的开发提供了新思路。

关键词: 枳椇, 蒸馏酒, 风味, 工艺优化, 抗氧化活性

中图分类号: TS262.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)01-0224-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030118



本文网刊:

Optimization of Brewing Technology of *Hovenia acerba*-Sorghum Co-fermented Distilled Liquor and Its Characteristic Flavor Substances and Antioxidant Activity *in Vitro*

ZHAO Minhui¹, YI Yuan¹, ZHANG Qiang¹, CHEN Jing², ZUO Yong^{1,3,*}

(1. School of Biological Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China;

2. Solid-state Fermentation Resource Utilization Key Laboratory of Sichuan Province, Yibin 644000, China;

3. College of Life Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610000, China)

Abstract: A new type of distilled liquor was brewed using *Hovenia acerba* and sorghum as raw materials, medium-temperature Daqu as starter. Fermentation parameters were optimized by single factors experiment and orthogonal test. The flavor components were detected and analyzed by headspace solid phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and odor activity threshold (OAV). And the antioxidant capacity *in vitro* was evaluated. The results showed that the optimal preparation conditions were determined as follows: Addition of *Hovenia acerba* was 20% and Daqu was 15%, and fermentation time was 35 d. Under the optimized conditions, the sensory score of 93.91, the product yield of 40.21%. A total of 48 flavor substances were identified in the liquor prepared under the optimized conditions, of which 20 were OAV>1. Ethyl butyrate, ethyl octanoate, ethyl hexanoate ethyl and guaiacol were considered as

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 固态发酵资源利用四川省重点实验室应用研究项目 (2020GTY002); 四川省科技成果转化示范项目 (2021ZHCG0075)。

作者简介: 赵敏惠 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: 810714951@qq.com。

* 通信作者: 左勇 (1972-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 发酵食品, E-mail: sgzuoyong@tom.com。

the characteristic flavor substances of the *Hovenia acerba*-sorghum co-fermented distilled liquor. Compared with pure sorghum distilled liquor, phenylethanol, 2,3-butanediol, 9-ethyl decanolate, 10-bromodecanoic acid ethyl ester and other volatile components were special in the *Hovenia acerba*-sorghum co-fermented distilled liquor. In addition, the total phenol content, DPPH and ABTS free radical scavenging ability, and total reducing power of the *Hovenia acerba*-sorghum co-fermented distilled liquor were higher than the pure sorghum distilled liquor. This study provides a scientific reference for the industrial production of liquor and a new idea for the development of new health distilled spirits.

Key words: *Hovenia acerba*; distilled liquor; flavor; process optimization; antioxidant activity

枳椇(*Hovenia acerba*)又名拐枣、万寿果、鸡爪果,富含维生素、氨基酸、蛋白质、黄酮、生物碱、三萜皂苷等生物活性成分^[1],具有解酒保肝、降血糖、抗氧化等功效^[2-4],是药食两用中药品种。枳椇果香浓郁,碳水化合物含量极高,总糖和还原糖含量分别可达 249.24 和 167.57 mg/g^[5],总多酚含量更是高达 376.27 mg GAE/100 g FW^[6],是制备发酵酒的优良原料。

目前,枳椇主要用于制备发酵型果酒和泡制露酒,其在蒸馏酒中的应用研究较少。国内蒸馏酒一般以高粱为原料,经蒸煮、发酵、蒸馏等工序酿造而成,而纯高粱所制蒸馏酒体外抗氧化能力相比葡萄酒、黄酒等较弱^[7],且远远小于已知的人工合成抗氧化剂。大量研究表明,枳椇富含酚类物质,加工成发酵酒或露酒后仍能保持较强的抗氧化性能^[8],且枳椇富含多糖、生物碱等活性成分,但在酿酒原料中加入枳椇是否能提高蒸馏酒的抗氧化能力及改善其风味感官品质还有待进一步研究。

因此,本实验拟采用枳椇和高粱为酿酒原料,以中温大曲为发酵剂,在单因素实验的基础上利用正交试验对枳椇高粱共酿蒸馏酒发酵工艺进行优化,并对酒中特征风味物质和体外抗氧化活性与纯高粱蒸馏酒进行对比分析,以期枳椇酒工业化生产提供科学参考,为新型保健蒸馏酒的开发提供新思路。

1 材料与方法

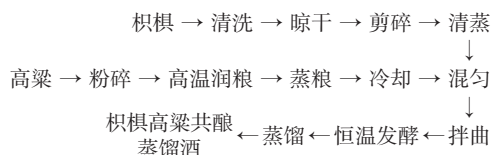
1.1 材料与仪器

枳椇 10 月份采于四川省万源市秦巴山区,筛选成熟、无霉烂枳椇;糯高粱 购于山西晋城;中温大曲 取于山西杏花村晋源晋大曲酒曲厂;DPPH、ABTS 标准品(≥98%) 美国 Sigma 公司;福林酚(BR)、没食子酸标准品(>99%) 麦克林生化科技有限公司;其他试剂均为分析纯。

DB-WAX-UI 石英毛细柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)及 TSQ8000 型气相色谱-质谱联用仪 美国 Thermo Fisher 公司;T6 新世纪紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;AR 1140 电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 枳椇高粱共酿蒸馏酒发酵工艺流程



操作要点:将清洗后的枳椇用剪刀剪为 1 cm 左右小段,上锅蒸煮 40 min,晾凉至室温;将高粱破碎 4~6 瓣后过 20 目筛,用 70 ℃ 热水浸润 1 h 后投入蒸锅内蒸煮 1 h,蒸好后向高粱中泼入原料质量 40% 的无菌水,翻拌后晾凉至室温;将枳椇和高粱按不同比例与大曲混匀后投入发酵桶中,28 ℃ 密闭发酵。将发酵结束的酒醅上甑蒸馏,收集馏出液进行测定。

参照上述发酵工艺,不加入枳椇,制备纯高粱蒸馏酒。

1.2.2 单因素实验 通过控制变量法进行单因素实验,以添加 30% 枳椇、15% 大曲、发酵 28 d 为基础发酵条件,固定其他条件不变,分别探究枳椇添加量(0%、10%、20%、30%、40%)、大曲添加量(5%、10%、15%、20%、25%)、发酵时间(7、14、21、28、35 d)各因素对枳椇高粱共酿蒸馏酒感官评价、出酒率、总酸和总酯的影响。

1.2.3 正交试验 在单因素实验的基础上进行正交试验,以感官评价、出酒率为指标,确定枳椇高粱共酿蒸馏酒最佳工艺参数。利用正交试验表 $L_9(3^4)$ 进行试验,正交试验因素水平如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Orthogonal experimental factors and level design

水平	A 枳椇添加量(%)	B 大曲添加量(%)	C 发酵时间(d)
1	10	10	21
2	20	15	28
3	30	20	35

1.2.4 感官评价 参考魏劲松等^[9]的方法,对不同发酵工艺的枳椇高粱共酿蒸馏酒样品进行感官评价。感官评价小组由 10 名(5 名男性,5 名女性)经过感官评定分析专业培训且具有相关经验的人组成。评分结果参照马宁原等^[10]的方法,采用模糊数学感官评价法进行分析,如表 2 所示。

1.2.5 风味物质分析 检测参照郭世鑫等^[11]的方法,并略有改进。HS-SPME 萃取:取 5 mL 酒样于顶空进样瓶中,加入 2 g NaCl 和 20 μL 0.4 g/L 2-辛醇,置于 50 ℃ 恒温水浴锅中加热平衡 5 min。将已活化平衡好的萃取头(250 ℃ 老化 15 min)插入样品瓶中吸附 45 min,将萃取头迅速插入 GC-MS 进样口,热解析,进行采集数据状态。

GC 条件:色谱柱为 DB-Wax(60 m×250 μm×

表2 综合感官评价标准

Table 2 Criteria for comprehensive sensory evaluation

项目	等级	评分标准	分值(分)
香气(30分)	优秀	果香和谐, 酒香醇和, 香气协调浓郁	27~30
	良好	具明显的枳椇果香和酒香	24~26
	中等	果香较淡, 但无异香异味	17~23
	较差	香气不足, 稍有异香和异味	<17
	优秀	酒体丰满, 醇厚, 无异杂味	27~30
滋味(30分)	良好	酒质较柔和, 丰满度欠佳, 无异杂味	24~26
	中等	酒质较为柔顺, 略有异杂味	17~23
	较差	酒质寡淡, 有明显异杂味	<17
色泽(20分)	优秀	无色透明, 无悬浮物, 无沉淀	18~20
	良好	无色, 较为澄清	16~17
	中等	浑浊, 有少量悬浮物或沉淀	14~15
	较差	浑浊, 有沉淀	<14
	优秀	具本品独特典型的风格	18~20
典型性(20分)	良好	具本品明显的风格	16~17
	中等	风格一般, 或略有出格	14~15
	较差	个性不突出, 无明显风格	<14

0.25 μm)毛细管柱, 升温程序: 初始温度为 50 $^{\circ}\text{C}$, 保持 2 min, 然后以 2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升到 60 $^{\circ}\text{C}$, 保持 1 min, 再以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升到 105 $^{\circ}\text{C}$, 保持 3 min, 再以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升到 180 $^{\circ}\text{C}$, 保持 3 min, 最后以 6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升到 230 $^{\circ}\text{C}$, 保持 1 min; 进样口温度 230 $^{\circ}\text{C}$; 载气高纯 He(99.999%), 流速 1.00 mL/min, 不分流。

MS 条件: 电离方式 EI; 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$; 接口温度 230 $^{\circ}\text{C}$ 。

定性: 通过与标准谱库(NIST05)的谱图进行比较鉴定, 保留匹配度大于 80 的结果。

定量: 以 2-辛醇为内标, 对枳椇酒香气成分含量进行计算, 公式如(1)所示。

$$C = \frac{A_x \times C_0 \times V_0}{A_0 \times V \times 1000} \quad \text{式(1)}$$

式中: C 为所测挥发性物质浓度(g/L); A_x 为所测挥发性物质峰面积; C_0 为内标物浓度, 0.4 g/L; V_0 为内标物进样量, 20 μL ; A_0 为内标物峰面积; V 为酒样萃取体积, 5 mL。

1.2.6 关键风味化合物确定 参照张秀玲等^[12]的方法, 采用香气活性阈值(odor activity value, OAV)来确定酒中关键风味化合物, 公式如(2)所示。通常, OAV 值>1 表示该物质对香气贡献度较大, 为关键风味化合物。

$$\text{OAV} = \text{香气化合物浓度} / \text{嗅觉阈值} \quad \text{式(2)}$$

1.2.7 描述性剖面分析 参照 GB/T 33404-2016《白酒感官品评导则》对枳椇高粱共酵蒸馏酒进行感官定量描述分析。取 10 mL 样品装入 15 mL 编码的玻璃瓶中, 在室温下平衡 20 min, 然后随机提供给评定人员评定。根据评定结果, 花香、果香、酸香、酒香、粮香、异味被选在香气剖面中, 然后评定人员被

要求根据相应标准溶液来确定香气属性的强度(花香对应乙酸苯乙酯、果香对应十二酸乙酯、酸香对应乙酸、酒香对应异戊醇、粮香对应糠醛), 以 5 点为尺度, 从 0(极弱)到 5(极强)。每位评定人员的感官评定结果超出相对标准差(RSD)20% 被排除在外。

1.2.8 指标测定方法

1.2.8.1 总酸、总酯含量测定 按照 GB/T 10345-2007《白酒分析方法》。

1.2.8.2 出酒率测定 参照游湘淘等^[13]的方法, 公式如(3)所示。

$$\text{出酒率}(\%) = \frac{s \times V}{50 \times M} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中: s 为酒精度数, %Vol; V 为酒精体积, mL; 50 以酒精度 50%Vol 计; M 为原粮质量, g。

1.2.8.3 总酚含量测定 参照蔡荫等^[14]的方法, 采用 Folin-Ciocalteu 法进行测定。取 1 mL 待测液, 加入 1 mL Folin-Ciocalteu 试剂和 3 mL 10% Na_2CO_3 , 混匀后定容至 10 mL, 避光反应 2 h 后于 765 nm 处测定吸光度。以 0~20 mg/L 没食子酸标准溶液建立标准曲线, 得到回归方程为 $y=0.1308x+0.0193$, $R^2=0.9978$ 。根据线性回归方程计算总酚含量。

1.2.8.4 DPPH 自由基清除能力测定 参照郭睿等^[15]的方法, 公式如(4)所示。取 0.2 mL 待测液, 加入 7.8 mL DPPH 无水乙醇溶液, 混匀后避光反应 30 min, 于 517 nm 处测定吸光度值, 记为 A_1 ; 以无水乙醇溶液代替 DPPH 乙醇溶液, 测定吸光度值, 记为 A_2 ; 以蒸馏水代替待测液, 记录吸光度值为 A_0 。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式(4)}$$

1.2.8.5 ABTS 自由基清除能力的测定 参照 Višnja 等^[16]方法, 公式如(5)所示。取 0.2 mL 待测液, 与 7.8 mL ABTS⁺工作液混匀后避光反应 5 min, 于 734 nm 处测定吸光度值, 记为 A_1 ; 以无水乙醇溶液代替 ABTS⁺工作液, 测定吸光度值, 记为 A_2 ; 以蒸馏水代替待测液, 记为 A_0 。

$$\text{ABTS自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式(5)}$$

1.2.8.6 总还原能力的测定 参照石亚林等^[7]的方法。取 1 mL 待测液, 加入 2.5 mL 磷酸缓冲液(0.2 mol/L, pH6.6)和 2.5 mL 1% 亚铁氰化钾溶液, 混匀后置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中水浴 20 min。冷却后加入 1 mL 10% 三氯乙酸, 3000 r/min 离心 10 min。取 2.5 mL 上清液, 加入 2.5 mL 蒸馏水和 0.1% FeCl_3 混匀后静置 5 min, 于 700 nm 处测定吸光度值。

1.3 数据处理

实验数据均为 3 次重复实验结果的平均值,

结果表示为平均值 $\pm$ 标准偏差。采用 SPSS 20.0 软件对数据进行显著性分析, $P < 0.05$ 为差异显著, 采用 Origin 2018 软件进行数据图形化处理。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 枳椇添加量对枳椇高粱共酿蒸馏酒感官评价、出酒率、总酸和总酯的影响 由图 1-a 可知, 蒸馏酒中总酸含量随着枳椇的增加而增加, 当枳椇添加量为 30% 时趋于平稳, 此时总酸含量为 0.48 g/L。枳椇添加量对总酯的影响差异不显著 ($P > 0.05$), 总酯含量为 1.75 g/L 左右, 高于中国传统特级清香型白酒中总酯含量 (1.10 g/L)。导致这一现象的原因可能是枳椇中有机酸含量丰富, 其有机酸与发酵过程中生成的醇类物质发生酯化反应导致总酯含量较高^[17]。由图 1-b 所示, 随着枳椇添加量的增加, 酒体中枳椇蒸煮后特有的香味越发浓郁, 感官评分随着枳椇添加量呈现先增加后降低的趋势, 于添加量为 30% 时达到最高, 为 95.11 分。出酒率随枳椇添加量的增加而降低, 当枳椇添加量为 30% 时, 出酒率仅为 37.24%; 当枳椇添加量为 20% 时, 出酒率可达 39.5%, 差异显著 ($P < 0.05$)。其原因可能与可发酵性糖供给不足有关^[18], 枳椇的发酵性能低于高粱, 其总糖含量虽高但大多可能为不可发酵性糖。因此, 综合经济考虑, 选择枳椇最佳添加量为 20%。

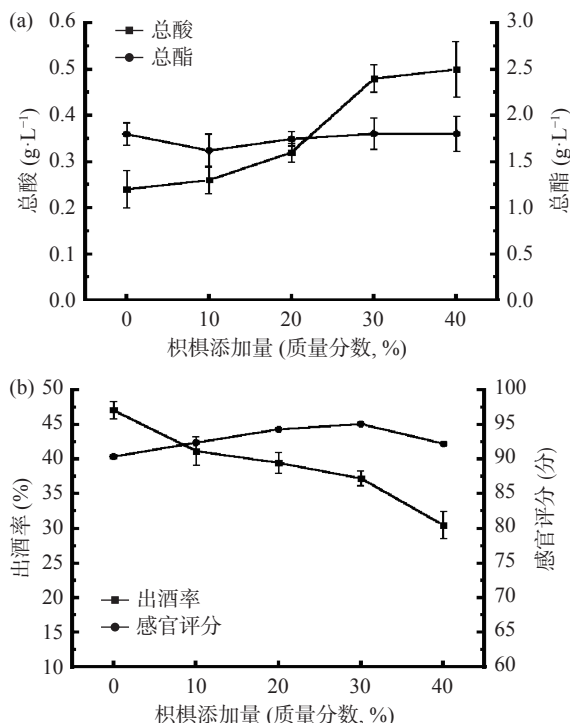


图 1 枳椇添加量对枳椇高粱共酿蒸馏酒的影响

Fig.1 Effect of *Hovenia acerba* addition on the quality of *Hovenia acerba*-sorghum co-fermented distilled liquor

注: (a) 对总酸、总酯的影响; (b) 对出酒率、感官评分的影响; 图 2、图 3 同。

2.1.2 大曲添加量对枳椇高粱共酿蒸馏酒感官评价、出酒率、总酸和总酯的影响 由图 2-a 可知, 大

曲添加量对酒样中总酯含量影响较大。蒸馏酒中总酯含量随大曲添加量增加而增加, 于大曲添加量为 15% 时趋于平稳, 此时总酯含量为 2.62 g/L。大曲添加量对蒸馏酒总酸的影响差异不显著 ($P > 0.05$)。由图 2-b 可知, 出酒率和感官评分均呈先增后减的趋势, 大曲添加量为 15% 时, 出酒率为 39.08%, 感官评分为 94.27 分。当大曲添加量大于 15% 时, 出酒率逐渐下降。因此, 大曲最佳添加量为 15%。

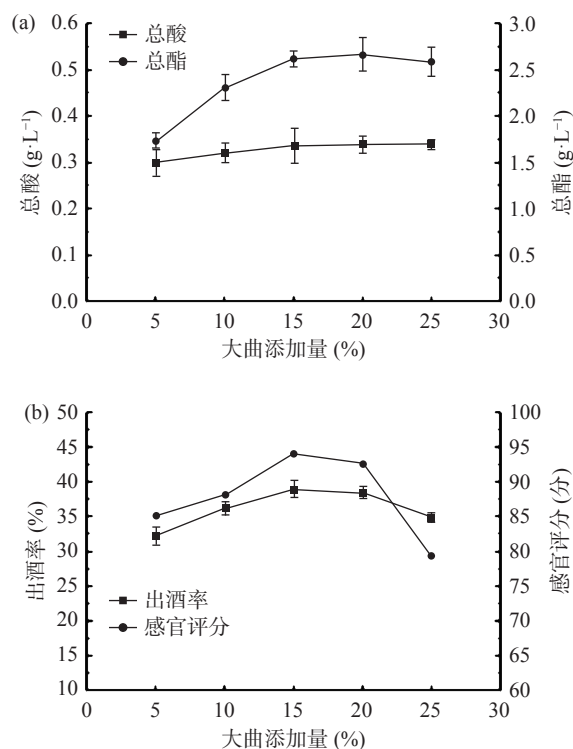


图 2 大曲添加量对枳椇高粱共酿蒸馏酒的影响

Fig.2 Effect of Daqu addition on the quality of *Hovenia acerba*-sorghum co-fermented distilled liquor

2.1.3 发酵时间对枳椇高粱共酿蒸馏酒感官评价、出酒率、总酸和总酯的影响 由图 3-a 可知, 总酸和总酯含量随发酵时间增加而增加, 第 7~21 d 增速较为平缓, 可能是由于酵母菌旺盛发酵从而抑制了产酸菌活性。第 21~28 d 总酸和总酯含量急剧升高, 并于 28 d 时趋于平稳, 此时总酸含量为 0.34 g/L, 达到一级清香型高度白酒的质量要求 0.30 g/L; 总酯含量为 2.61 g/L, 高于优级浓香型高度白酒的质量要求 2.00 g/L。由图 3-b 可知, 出酒率和感官评分随发酵时间增加而增加, 于 28 d 时达到最优, 此时出酒率为 39.1%, 感官评分为 94.37 分。随着发酵时间的延长, 感官评分略有下降, 可能是由于发酵时间过长酒醅中产生了杂味物质, 导致感官品质下降。因此, 选择发酵时间 28 d 为宜。

2.2 正交优化试验

根据单因素实验结果, 对枳椇添加量(A)、大曲添加量(B)、发酵时间(C)三个因素进行正交试验, 其结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 对枳椇高粱共酿蒸馏酒感官评分

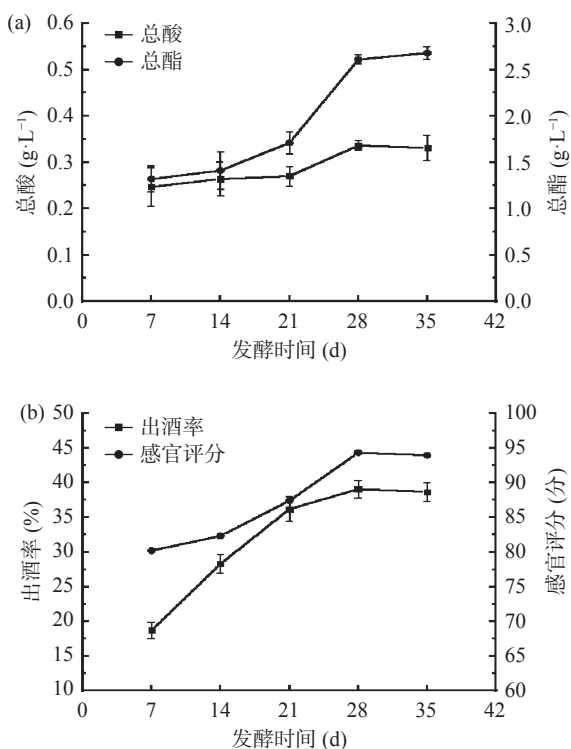


图3 发酵时间对枳椇高粱共酿蒸馏酒的影响

Fig.3 Effect of fermentation time on the quality of *Hovenia acerba*-sorghum co-fermented distilled liquor

表3 正交试验设计结果

Table 3 Results of orthogonal array design

试验号	A 枳椇添加量	B 大曲添加量	C 发酵时间	D 空白	感官评分(分)	出酒率(%)
1	1	1	1	1	80.21	38.21
2	1	2	2	2	93.91	39.98
3	1	3	3	3	92.31	41.09
4	2	1	2	3	84.17	38.11
5	2	2	3	1	94.31	39.99
6	2	3	1	2	92.87	38.45
7	3	1	3	2	79.31	35.21
8	3	2	1	3	87.31	36.37
9	3	3	2	1	92.61	37.52
感官评分	k ₁	88.810	81.230	86.797	89.043	
	k ₂	90.450	91.843	90.230	88.697	
	k ₃	86.410	92.597	88.643	87.930	
	R	4.040	11.367	3.766	1.113	
出酒率	k ₁	39.760	37.177	37.677	38.573	
	k ₂	38.850	38.780	38.537	37.880	
	k ₃	36.367	39.020	38.763	38.523	
	R	3.393	1.843	1.086	0.693	

影响因素的主次顺序为大曲添加量>枳椇添加量>发酵时间,最优酿造工艺为 A₂B₃C₂。对出酒率影响因素的主次顺序为枳椇添加量>大曲添加量>发酵时间,最优酿造工艺为 A₁B₃C₃。以直观分析感官评分最高的 5 号(A₂B₂C₃)做参照,以感官评分和出酒率为评价指标得出的最佳发酵工艺组合进行验证,结果如表 4 所示。A₂B₂C₃ 工艺的感官评分(93.91 分)和出酒率(40.21%)最高,因此确定枳椇高粱共酿蒸馏

酒最佳发酵工艺为枳椇添加量 20%、大曲添加量 15%、发酵时间 35 d。

表4 最优酿造工艺验证结果

Table 4 Verification test results of optimal brewing process

工艺组合	感官评分(分)	出酒率(%)
A ₂ B ₂ C ₃	93.91±0.57	40.21±1.31
A ₂ B ₃ C ₂	92.51±0.82	36.46±1.72
A ₁ B ₃ C ₃	92.27±1.04	37.65±0.93

2.3 枳椇高粱共酿蒸馏酒挥发性成分及 OAV 分析

2.3.1 HS-SPME-GC-MS 分析酒体中挥发性成分

采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术对最佳工艺所得枳椇高粱共酿蒸馏酒和纯高粱蒸馏酒中挥发性成分进行检测分析,其鉴定结果如表 5 所示。枳椇高粱共酿蒸馏酒中鉴定出 48 种挥发性成分,其中醇类 7 种、酯类 22 种、酸类 5 种、醛酮类 8 种、烷烯烃类 6 种。根据香气活性阈值判定 48 种挥发性风味物质中有 21 种物质对酒体风味贡献度较大,包括 1 种醇类物质、13 种酯类物质、2 种酸类物质、3 种醛类物质和 2 种酚类物质。纯高粱蒸馏酒中鉴定出 32 种挥发性成分,其中醇类 6 种、酯类 13 种、酸类 2 种、醛酮类 6 种、烷烯烃类 5 种,其中有 20 种物质对酒体风味贡献度较大,包括 3 种醇类物质、7 种酯类物质、2 种醛类物质和 3 种酚类物质。

2.3.1.1 醇类物质 醇类物质在酒体中占比最大,但除乙醇外 OAV 值并不高,主要起呈味助香作用^[24]。正丙醇、异丁醇、正丁醇和异戊醇为两种蒸馏酒中共有的挥发性成分,2,3-丁二醇、苯乙醇为枳椇高粱共酿蒸馏酒中特有的挥发性成分。

2.3.1.2 酯类物质 由于白酒中乙醇含量较高,乙醇经过固态发酵形成了较多乙酯类挥发性成分。其中,乙酸乙酯、丁酸乙酯、乙酸异戊酯、乳酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、苯甲酸乙酯、丁二酸二乙酯、乙酸苯乙酯、月桂酸乙酯、棕榈酸乙酯为中国传统蒸馏酒典型挥发性物质^[25],因此枳椇高粱共酿蒸馏酒与纯高粱蒸馏酒具有一定的相似性。在枳椇高粱共酿蒸馏酒中肉豆蔻酸乙酯和棕榈酸乙酯质量浓度较高,分别为 0.0072 和 0.0613 g/L。有研究表明,枳椇原料中含有多种不饱和高级脂肪酸^[26],它们在酵母和酶的作用下能与乙醇发生酯化反应形成脂肪酸乙酯^[27],使酒体更具醇厚感。9-癸烯酸乙酯、10-溴代癸酸乙酯均未在纯高粱白酒中检出,可能与枳椇原料的引入有关。酯类物质是枳椇高粱共酿蒸馏酒中最丰富的类别之一,丁酸乙酯和辛酸乙酯 OAV 值更是高达 6750.26 和 2062.10,是枳椇高粱共酿蒸馏酒中最主要的特征风味,赋予酒体浓厚的花香与果香。

2.3.1.3 酸类物质 纯高粱蒸馏酒中仅检出乙酸,含量为 0.0042 g/L。枳椇高粱共酿蒸馏酒中的酸类物质从高到低依次为 L-丙氨酸(0.0139 g/L)、乙酸

表 5 挥发性成分检出结果
Table 5 Identification of volatile compounds

序号	风味化合物	枳椇高粱共酿蒸馏酒		纯高粱蒸馏酒		嗅觉阈值 (μg/L) ^[19-23]	香味描述
		质量浓度(g/L)	OAV	质量浓度(g/L)	OAV		
醇类							
1	乙醇	2.2075	88.66	2.4723	99.29	24900.00	醇香
2	异丁醇	0.0210	0.74	0.1090	3.85	28300.00	—
3	正丁醇	0.0022	0.81	0.0107	3.92	2730.00	—
4	仲丁醇	—	—	0.0157	0.08	188115.83	—
5	正丙醇	0.0331	0.61	0.0200	0.37	53952.63	—
6	异戊醇	0.0525	0.29	0.0307	0.17	179190.83	水果香, 花香, 臭
7	2,3-丁二醇	0.0044	—	—	—	—	甜味
8	苯乙醇	0.0116	0.40	—	—	28900.00	玫瑰花香
酯类							
9	乙酸乙酯	0.2757	8.46	0.3489	10.70	32600.00	菠萝香、苹果香
10	丁酸乙酯	0.0641	6750.26	0.0091	957.89	9.50	苹果香、菠萝香、水果香、花香
11	异丁酸乙酯	0.0015	25.82	—	—	57.50	果香, 酯香
12	乙酸异戊酯	0.0035	37.25	0.0005	5.32	93.90	愉快的蕉香
13	乙酸庚酯	0.0043	—	—	—	—	—
14	正己酸乙酯	0.0057	103.96	—	—	55.30	菠萝香气
15	异丁酸异戊酯	0.0023	—	—	—	—	呈杏子、菠萝和桃子似香甜味
16	L(-)-乳酸乙酯	0.0049	—	0.0027	—	—	—
17	乳酸乙酯	0.0149	0.12	0.0763	0.60	128000.00	甜香, 水果香, 青草香
18	辛酸乙酯	0.0266	2062.10	0.0038	294.57	12.90	梨子香、荔枝香、水果香、甜香、百合花香
19	癸酸乙酯	0.0241	21.83	0.0031	2.81	1102.00	果香、似白兰地的香韵
20	苯甲酸乙酯	0.0015	1.02	0.0009	0.63	1430.00	花香, 蜂蜜香
21	丁二酸二乙酯	0.0019	0.01	0.0013	0.00	353000.00	水果香, 花香, 花粉香
22	9-癸烯酸乙酯	0.0024	—	—	—	—	—
23	乙酸苯乙酯	0.0011	1.19	0.0189	20.79	909.00	玫瑰花香、花香、橡胶臭、胶皮臭
24	苯乙酸乙酯	0.0008	1.93	—	—	407.00	玫瑰花香
25	月桂酸乙酯	0.0091	22.85	0.0015	3.75	400.00	甜香、水果香
26	10-溴代癸酸乙酯	0.0013	—	—	—	—	—
27	肉豆蔻酸乙酯	0.0072	40.19	—	—	180.00	鸢尾油香
28	十五酸乙酯	0.0030	—	—	—	—	蜂蜜甜香
29	棕榈酸乙酯	0.0613	1.56	0.0097	0.25	39299.35	陈油香气
30	9-十六碳烯酸乙酯	0.0061	—	—	—	—	—
31	十四酸乙酯	—	—	0.0004	0.10	4000	蜡味
酸类							
32	L-丙氨酸	0.0139	—	0.0167	—	—	鲜味
33	乙酸	0.0055	0.03	0.0042	0.03	160000.00	酸味和辛辣刺激味
34	正丁酸	0.0021	2.20	—	—	964.00	酸味
35	异丁酸	0.0009	0.55	—	—	1580.00	酸味
36	正辛酸	0.0049	1.83	—	—	2700.00	水果香、花香、油脂臭
醛酮类							
37	异戊醛	0.0013	77.26	—	—	16.51	清香、麦芽香
38	乙偶姻	0.0008	3.23	—	—	259.00	奶油香
39	糠醛	0.0020	0.04	0.0482	1.09	44029.73	焦糊味
40	苯乙醛	0.0040	1.40	—	—	262.00	玫瑰花香
41	壬醛	—	—	0.0005	4.08	122.45	—
42	愈创木酚	0.0030	221.23	0.0015	111.86	13.41	水果香、花香、焦酱香、甜香、青草香
43	苯酚	0.0021	0.11	0.0007	0.04	18900.00	来苏水、墨汁味
44	4-乙基苯酚	—	—	0.0003	2.14	140	—
45	4-乙基愈创木酚	0.0095	45.24	0.0007	3.34	209.30	香瓜香、水果香、甜香、花香、烟熏味、橡胶臭
46	对乙烯基愈创木酚	0.0029	—	—	—	—	—
烷、烯烃类							
47	环辛四烯	0.0020	—	—	—	—	—

续表 5

序号	风味化合物	枳椇高粱共酿蒸馏酒		纯高粱蒸馏酒		嗅觉阈值 ($\mu\text{g/L}$) ^[19-23]	香味描述
		质量浓度(g/L)	OAV	质量浓度(g/L)	OAV		
48	正十六烷	0.0012	—	0.0041	—	—	—
49	3,4-二甲基庚烷	0.0032	—	0.0008	—	—	—
50	二十一烷	0.0025	—	0.0037	—	—	—
51	十五烯	0.0064	—	—	—	—	—
52	萘	0.0090	—	0.0031	—	—	木香、樟脑及卫生球的气味
53	1,1,3-三乙氧基丙烷	—	—	0.0004	0.11	3700	—

(0.0055 g/L)、正辛酸(0.0049 g/L)、正丁酸(0.0021 g/L)和异丁酸(0.0009 g/L),其中仅正辛酸和正丁酸 OAV 值>1。适量正辛酸和正丁酸能赋予枳椇高粱共酿蒸馏酒花果香和“窖香”,过浓则会增加油脂臭和汗臭^[28]。L-丙氨酸是一种兼具咸味和甜味的鲜味氨基酸,在两种蒸馏酒中均有检出,可能是由大曲中链霉素或假单胞菌通过发酵产生的^[29]。

2.3.1.4 醛类物质 作为白酒中四大呈香物质之一,适量的醛类对白酒的香气起着平衡和协调作用。由表 5 可知,异戊醛、乙偶姻、苯乙醛、愈创木酚、4-乙基愈创木酚 OAV 值>1,对枳椇高粱共酿蒸馏酒风味具有一定贡献。其中,异戊醛、愈创木酚、4-乙基愈创木酚 OAV 值>40,对枳椇高粱共酿蒸馏酒的风味有显著贡献,为关键风味化合物。异戊醛具有麦芽香气。4-乙基愈创木酚、愈创木酚可以由阿魏酸、香草醛、香草酸经大曲中的酵母或细菌发酵产生,除了具有水果香、花草香、焦酱香和甜香外还具有一定抗氧化活性^[30],赋予白酒一定保健功能。

2.3.1.5 其他 此外,本实验还检测出一些烷、烯烃类挥发性化合物,推测其可能与枳椇经微生物发酵的代谢产物有关。枳椇含糖量高,其碳含量也相对较高,烷、烯烃类物质可能由碳原子经发酵后形成。由于在白酒中烷、烯烃类物质含量不多,因此其对白酒风味的影响还有待进一步研究。

2.3.2 整体风味轮廓 整体风味轮廓是用于将具有

相似气味特征的化合物划分为感官气味类别,以形成拥有几个芳香系列的芳香图谱。由图 4 可以看出,与纯高粱蒸馏酒相比,枳椇高粱共酿蒸馏酒酒体丰满,不仅具有纯高粱酒的典型香气,还具有果酒特有的果香和花香。在枳椇高粱共酿蒸馏酒中,果香的主要贡献化合物为丁酸乙酯、正己酸乙酯、辛酸乙酯、愈创木酚、乙酸异戊酯、异丁酸乙酯、月桂酸乙酯、癸酸乙酯。杨旖旎^[31]研究表明,异丁酸乙酯是枳椇中具有主要贡献的风味化合物,赋予了酒体枳椇特有风味,使枳椇高粱共酿蒸馏酒更具有典型性。根据 OAV 值分析,酒体中少量的异味可能来自于乙酸苯乙酯、正辛酸和 4-乙基愈创木酚。

2.4 体外抗氧化活性实验

对工艺优化后的两种蒸馏酒进行总酚含量、自由基清除率和总还原力的检测,结果见表 6。

表 6 体外抗氧化活性检测结果
Table 6 Results of antioxidant activity detection *in vitro*

样品	枳椇高粱共酿蒸馏酒	纯高粱蒸馏酒
总酚含量($\mu\text{g/mL}$)	21.001 $\pm$ 1.521 ^a	0.655 $\pm$ 0.014 ^b
DPPH 自由基清除率(%)	54.929 $\pm$ 0.04 ^a	26.197 $\pm$ 0.09 ^b
ABTS 自由基清除率(%)	21.86 $\pm$ 0.02 ^a	10.23 $\pm$ 0.01 ^b
总还原力	0.1827 $\pm$ 0.0046 ^a	0.1037 $\pm$ 0.0124 ^b

注:同行不同小写字母表示差异极显著($P<0.01$)。

自由基损伤是导致肝病、动脉粥样硬化及癌症的主要因素,若白酒中含有有效清除自由基的活性物质,便能有效抑制乙醇代谢过程中羟自由基的生成,保护机体免受自由基损伤^[32]。实验结果表明,纯高粱蒸馏酒体外抗氧化能力较弱,这与石亚林、张明珠等^[7,33]的研究结果一致。由表 6 可知,枳椇蒸馏酒总酚含量为 21.001 $\mu\text{g/mL}$,为纯高粱蒸馏酒总酚含量的 32 倍。导致这一现象的原因可能是由于枳椇果梗中阿魏酸含量和单宁含量很高,分别达到 9.66 和 62.70 mg/100 g FW^[6],这些物质经过微生物的发酵过程形成酚类物质^[34],使得酒体中总酚含量大大提升。枳椇高粱共酿蒸馏酒 DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率和总还原力分别为 54.929%、21.86% 和 0.1827,以上均约为纯高粱蒸馏酒的 2 倍。HS-SPME-GC-MS 检测结果显示,枳椇高粱共酿蒸馏酒中 4-乙基愈创木酚、对乙基愈创木酚、愈创木酚浓度均高于纯高粱蒸馏酒,这些物质作为自由基清除剂赋予了枳椇高粱共酿蒸馏酒良好的保健功能。

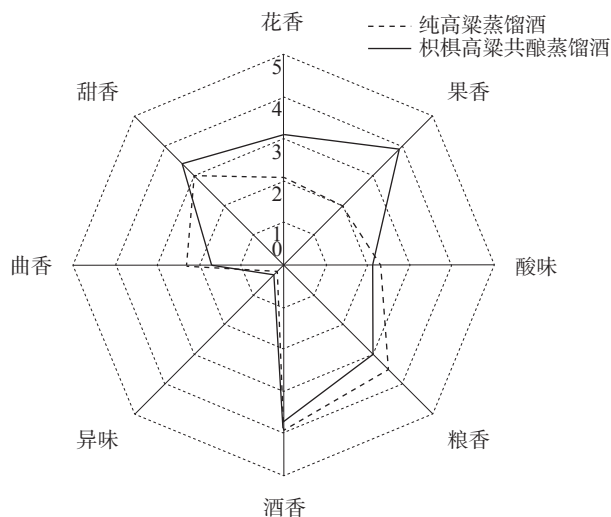


图 4 感官定量分析雷达图

Fig.4 Quantitative analysis of sensory flavor properties

3 结论

本研究以枳椇和高粱为原料,通过单因素和正交试验优化得到枳椇高粱共酿蒸馏酒最佳发酵工艺为枳椇添加量 20%、大曲添加量 15%、发酵时间 35 d,此时感官评分为 93.91 分,出酒率为 40.21%,果香浓郁,酒味协调,酒体澄清无浑浊。通过 HS-SPME-GC-MS 和描述性剖面分析对枳椇高粱共酿蒸馏酒和纯高粱蒸馏酒挥发性成分进行对比,结果表明,枳椇高粱共酿蒸馏酒检测到 48 种挥发性成分,而纯高粱蒸馏酒仅检测到 32 种挥发性成分,2,3-丁二醇、苯乙醇、异丁酸乙酯、乙酸庚酯、正己酸乙酯、异丁酸异戊酯、9-癸烯酸乙酯、苯乙酸乙酯、10-溴代癸酸乙酯、肉豆蔻酸乙酯、十五酸乙酯、9-十六碳烯酸乙酯、正丁酸、异丁酸、正辛酸、异戊醛、乙偶姻、苯乙醛、对乙烯基愈创木酚、环辛四烯、十五烯为枳椇高粱共酿蒸馏酒中特有成分。经 OAV 分析,在枳椇高粱共酿蒸馏酒中丁酸乙酯、辛酸乙酯、愈创木酚、正己酸乙酯、乙醇、异戊醛、4-乙基愈创木酚、肉豆蔻酸乙酯、乙酸异戊酯、异丁酸乙酯、月桂酸乙酯、癸酸乙酯的 OAV 值>20,对枳椇高粱共酿蒸馏酒的风味有显著贡献,为关键风味化合物,赋予酒体浓郁的花果香。枳椇高粱共酿蒸馏酒酒体丰满,不仅具有纯高粱酒的典型香气,还具有果酒特有的果香和花香。对枳椇高粱共酿蒸馏酒和纯高粱蒸馏酒体外抗氧化能力进行探究,结果表明,枳椇高粱共酿蒸馏酒总酚含量为纯高粱酒的 32 倍,DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率和总还原力均约为纯高粱蒸馏酒的 2 倍。总体而言,在酿酒原料中加入枳椇能赋予酒体浓郁的果味,提高其体外抗氧化活性。

参考文献

- [1] 陆石英,覃志高. 药食两用枳椇的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(6): 1865-1870. [LU S Y, QIN Z G. Research progress on *Hovenia dulcis* Lindl. for medicine and food[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(6): 1865-1870.]
- [2] DONG S, JI J, ZHANG B, et al. Protective effects and possible molecular mechanism of *Hovenia dulcis* Thunb. extract on acetaminophen-induced hepatotoxicity[J]. *Die Pharmazie*, 2018, 73(11): 666-670.
- [3] MENG Y, SU A, YUAN S, et al. Evaluation of total flavonoids, myricetin, and quercetin from *Hovenia dulcis* Thunb. as inhibitors of alpha-amylase and alpha-glucosidase[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2016, 71(4): 444-449.
- [4] 徐方方,刘博,张晓琦. 枳椇属化学成分和药理活性的研究进展[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(20): 4827-4835. [XU F F, LIU B, ZHANG X Q. Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of *Hovenia*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(20): 4827-4835.]
- [5] 王彦平,袁贵英,陈月英,等. 枳椇子营养成分和总黄酮含量分析及评价[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(24): 21-24. [WANG Y P, YUAN G Y, CHEN Y Y, et al. Analysis and evaluation of nutrition composition and total flavonoids on *Hovenia* seed[J]. *Food Research and Development*, 2016, 37(24): 21-24.]
- [6] MARTA D B, DARIO D, MARIA G M, et al. Emerging species with nutraceutical properties: Bioactive compounds from *Hovenia dulcis* pseudofruits[J]. *Food Chemistry*, 2020, 310: 125816.
- [7] 石亚林,范文来,徐岩. 白酒抗氧化性的初步研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(2): 95-97. [SHI Y L, FAN W L, XU Y. Preliminary study on antioxidant resistance of liquor[J]. *Food Industry Technology*, 2015, 36(2): 95-97.]
- [8] 唐兰芳,王锋,谭兴和,等. 两种工艺拐枣酒抗氧化成分及活性比较[J]. *中国酿造*, 2021, 40(1): 44-48. [TANG L F, WANG F, TAN X H, et al. Comparison of antioxidant components and activity of *Hovenia acerba* alcoholic beverage made by two technologies[J]. *China Brewing*, 2021, 40(1): 44-48.]
- [9] 魏劲松,徐洲,黄宪龙,等. 模糊数学结合响应面法优化葛根酒发酵工艺参数及其香气成分分析[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(5): 193-200. [WEI J S, XU Z, HUANG X L, et al. Analysis of fermentation parameters and aroma composition[J]. *Food Industry Technology*, 2019, 40(5): 193-200.]
- [10] 马宁原,马博文,姚凌云,等. 模糊综合评判结合响应面优化黄桃酒发酵工艺[J]. *中国酿造*, 2021, 40(10): 225-230. [MA N Y, MA B W, YAO L Y, et al. Fuzzy comprehensive evaluation combined with the response surface to optimize the yellow peach wine fermentation process[J]. *China Brewing*, 2021, 40(10): 225-230.]
- [11] 郭世鑫,张小娜,姚孟琦,等. 不同工艺酱香型白酒成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(1): 241-246. [GUO S X, ZHANG X N, YAO M Q, et al. Composition analysis of Maotai-flavor Baijiu with different processing technologies[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(1): 241-246.]
- [12] 张秀玲,汲润,李凤凤,等. 不同发酵工艺对蓝靛果酒功能性及香气成分影响[J]. *食品科学*, 2021, 43(10): 189-198. [ZHANG X L, JI R, LI F F, et al. Effect of different fermentation processes on the functionality and aroma composition of indigo fruit wine[J]. *Food Science*, 2021, 43(10): 189-198.]
- [13] 游湘淘,余信,张敏,等. 百合多粮白酒半固态酿造工艺及风味研究[J]. *食品与机械*, 2021, 37(3): 168-174, 227. [YOU X T, YU J, ZHANG M, et al. Study on semi-solid brewing technology and flavor analysis of lily multigrain liquor[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(3): 168-174, 227.]
- [14] 蔡萌,杜双奎,柴岩,等. 黄土高原小粒大豆抗氧化活性研究[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(8): 108-115. [CAI M, DU S K, CHAI Y, et al. Study on the antioxidant activity of small-grain soybean in the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Food Products*, 2014, 14(8): 108-115.]
- [15] 郭睿,杨玲,郭旭凯,等. 糯高粱黄酒糖化工艺优化及抗氧化活性分析[J]. *中国酿造*, 2018, 37(3): 101-106. [GUO R, YANG L, GUO X K, et al. Optimization of saccharification process and analysis of antioxidant activity of glutinous sorghum rice wine[J]. *China Brewing*, 2018, 37(3): 101-106.]
- [16] VISNJA K, SONJA S M, DANIJELA S, et al. Polyphenolic profile, antioxidant properties and antimicrobial activity of grape skin extracts of 14 *Vitis vinifera* varieties grown in Dalmatia (Croatia)[J]. *Food Chemistry*, 2009, 119(2): 715-723.
- [17] XU Y, ZHAO J, LIU X, et al. Flavor mystery of Chinese tra-

- ditional fermented Baijiu: The great contribution of ester compounds[J]. *Food Chem*, 2022, 369: 130920.
- [18] RABEMANOLONTSOA H, SAKA S. Various pretreatments of lignocellulosics[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 199: 83–91.
- [19] ZHAO D, SHI D, SUN J, et al. Characterization of key aroma compounds in Gujinggong Chinese Baijiu by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements, and sensory evaluation[J]. *Food Res Int*, 2018, 105: 616–627.
- [20] LI H, QIN D, WU Z, et al. Characterization of key aroma compounds in Chinese Guojing sesame-flavor Baijiu by means of molecular sensory science[J]. *Food Chemistry*, 2019, 284: 100–107.
- [21] WANG X, FAN W, XU Y. Comparison on aroma compounds in Chinese soy sauce and strong aroma type liquors by gas chromatography-olfactometry, chemical quantitative and odor activity values analysis[J]. *European Food Research & Technology*, 2014, 239(5): 813–825.
- [22] 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 D S, NIU Y W, YAO Z M, et al. Top space solid phase microextraction-gas chromatography mass spectrometry and gas chromatography smell technology to identify the characteristic aroma substances of fragrant liquor[J]. *Chinese Journal of Food Products*, 2019, 19(7): 251–261.]
- [23] 张晓婕, 邱树毅, 曾庆军, 等. 不同工艺酱香型白酒挥发性物质差异分析[J]. *食品科学*, 2022, 43(18): 279–285. [ZHANG X J, QIU S Y, ZENG Q J, et al. Analysis of the difference of volatile substances of Maotai-flavor liquor with different processes[J]. *Food Science*, 2022, 43(18): 279–285.]
- [24] LIU H, SUN B. Effect of fermentation processing on the flavor of Baijiu[J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(22): 5425–5432.
- [25] 曹玉发, 孙怡辰, 魏轩, 等. 3个年份浓香型白酒香气成分比较研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(2): 769–779. [CAO Y F, SUN Y C, WEI X, et al. Comparative study on the aroma composition of Luzhou-flavor liquor in 3 years[J]. *Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2021, 12(2): 769–779.]
- [26] 王佳豪, 谢超, 张敏, 等. 拐枣功能作用及开发利用的研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2020, 26(19): 121–123. [WANG J H, XIE C, ZHANG M, et al. Research progress on the function and development and utilization of jujube trafficking[J]. *Anhui Agriculture Bulletin*, 2020, 26(19): 121–123.]
- [27] KAI H, GUO J J, WEN C M, et al. Increase of medium-chain fatty acid ethyl ester content in mixed *H. uvarum*/*S. cerevisiae* fermentation leads to wine fruity aroma enhancement[J]. *Food Chemistry*, 2018; 239.
- [28] 王震, 叶宏, 朱婷婷, 等. 清香型白酒风味成分的研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(7): 232–244. [WANG Z, YE H, ZHU T T, et al. Progress on flavor composition of fragrant liquor[J]. *Food Science*, 2022, 43(7): 232–244.]
- [29] 蒋光玉. 发酵法生产 L-丙氨酸提取工艺的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2011(3): 101–106. [JIANG G Y. Study on the extraction process of L-alanine produced by fermentation method[J]. *China Food Additives*, 2011(3): 101–106.]
- [30] 郭学武, 范恩帝, 马冰涛, 等. 中国白酒中微量成分研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 267–276. [GUO X W, FAN E D, MA B T, et al. Research progress in Chinese liquor[J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 267–276.]
- [31] 杨旖旎. 武陵地区五种天然产物游离和键合风味成分的研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2019. [YANG Y N. Study on free and bonded flavor composition of five natural products in Wuling region[D]. Enshi: Hubei University for Nationalities, 2019.]
- [32] 李露, 单义民. 白酒中各种风味物质对健康的影响[J]. *酿酒科技*, 2020(6): 30–36. [LI L, SHAN Y M. Healthcare effects of various flavoring substances in Baijiu[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2020(6): 30–36.]
- [33] 张明珠, 吴学风, 穆冬冬, 等. 不同香型白酒的风味物质及抗氧化作用分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(11): 218–225. [ZHANG M Z, WU X F, MU D D, et al. Analysis of flavor substances and antioxidant effects of different flavor liquor[J]. *Food Industry Technology*, 2021, 42(11): 218–225.]
- [34] 耿平兰, 黄卫红, 程化鹏. 白酒中酚类物质及检测方法的研究进展[J]. *酿酒科技*, 2020(8): 83–88. [GENG P L, HUANG W H, CHENG H P. Research progress of phenols and detection methods in liquor[J]. *Brewing Technology*, 2020(8): 83–88.]