

## 甜酒曲发酵小米酒精饮料工艺优化及其品质分析

张 瑞, 刘敬科, 刘俊利, 常世敏

### Process Optimization and Quality Analysis of Fermented Foxtail Millet Alcoholic Beverage with Liqueur Koji

ZHANG Rui, LIU Jingke, LIU Junli, and CHANG Shimin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060142>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

一种特色猴头菇小米酒的研制

Development of a Special Flavored *Hericium erinaceus* Millet Wine

食品工业科技. 2019, 40(15): 89-93,99 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.15.015>

小米挤压粉与小米生粉理化性质及营养品质的差异比较

Difference of Physicochemical Properties and Nutritional Quality between Raw and Extruded Foxtail Millet Flour

食品工业科技. 2019, 40(22): 13-18,23 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.22.003>

柚子全果果酒发酵工艺优化及其抗氧化活性、挥发性成分分析

Optimization of Fermentation Process of Grapefruit Whole Fruit Wine and Analysis of Its Antioxidant Activity and Volatile Components

食品工业科技. 2021, 42(13): 149-155 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110155>

不同米色小米营养品质与蒸煮特性研究

Nutritional Quality Evaluation and Analysis on the Cooking Quality of Foxtail Millet with Different Color

食品工业科技. 2020, 41(24): 298-303 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030234>

柚子菊芋果蔬发酵饮料的制备及其抗氧化活性

Fermented beverage of shaddock and jerusalem artichoke preparation and its antioxidant activity analysis

食品工业科技. 2017(19): 136-141 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.19.026>

三种发酵酒活性成分、抗氧化活性及其香气成分对比分析

Comparative Analysis of Active Ingredients, Antioxidant Activity and Aromatic Components of Three Kinds of Fermented Wine

食品工业科技. 2020, 41(21): 253-260,265 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020040237>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张瑞, 刘敬科, 刘俊利, 等. 甜酒曲发酵小米酒精饮料工艺优化及其品质分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 186–195. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060142

ZHANG Rui, LIU Jingke, LIU Junli, et al. Process Optimization and Quality Analysis of Fermented Foxtail Millet Alcoholic Beverage with Liqueur Koji[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 186–195. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060142

· 工艺技术 ·

# 甜酒曲发酵小米酒精饮料工艺优化 及其品质分析

张 瑞<sup>1,2</sup>, 刘敬科<sup>1</sup>, 刘俊利<sup>1,\*</sup>, 常世敏<sup>2,\*</sup>

(1. 河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所, 河北石家庄 050000;

2. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北邯郸 056038)

**摘要:** 为增加小米资源利用率, 本文以小米为原料用甜酒曲发酵成小米酒精饮料, 采用可溶性固形物、总酸及感官评分为综合评价指标, 通过单因素实验和响应面试验研究小米酒精饮料的最佳工艺, 并对其营养品质、抗氧化能力和挥发性风味物质进行测定。结果表明: 甜酒曲添加量 1%、发酵时间 3 d、发酵温度 32 °C 为最佳。所得产品可溶性固形物为 22.05%, 总酸为 19.33 g/L, 感官评分为 89.37 分, 酒精度 0.7%vol, 黄酮含量 66.78 mg/L, 多酚含量 65.13 mg/L。所测矿物质中钾含量最高, 所测维生素中烟酰胺含量最高, DPPH 自由基清除率 73.19%, ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率 34.29%, 羟自由基清除率 53.72%。此外, 共检测到 46 种挥发性风味物质, 种类最多的为酯类和醇类, 它们共同赋予小米酒精饮料特有的香气。该产品营养丰富且滋味浓郁、酸甜适中, 可为开发以小米为原料的功能性食品提供理论参考。

**关键词:** 小米, 甜酒曲, 发酵酒精饮料, 活性成分, 抗氧化, 挥发性风味

中图分类号: TS213.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)09-0186-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060142



本文网刊:

## Process Optimization and Quality Analysis of Fermented Foxtail Millet Alcoholic Beverage with Liqueur Koji

ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, LIU Jingke<sup>1</sup>, LIU Junli<sup>1,\*</sup>, CHANG Shimin<sup>2,\*</sup>

(1. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences,  
Shijiazhuang 050000, China;

2. College of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** In order to increase the utilization rate of foxtail millet resources, the brewing conditions of fermented foxtail millet alcoholic beverage were optimized by single-factor experiment and response surface methodology. For the fermentation of the liquor koji, foxtail millet was used as the primary ingredient. As part of the comprehensive evaluation index, which included the soluble solid, total acid, and sensory score, the nutritional value, antioxidant potential, and volatile flavoring compounds were also identified. Results showed that the optimal fermentation conditions of foxtail millet alcoholic beverage were as follows: addition amount of liqueur koji 1%, fermentation time 3 d, fermentation temperature 32 °C. The soluble solids of the beverage were 22.05%, total acid was 19.33 g/L, sensory score was 89.37, alcohol level of 0.7%vol, flavone was 66.78 mg/L, and polyphenol was 65.13 mg/L. In the beverage, potassium was the most abundant mineral and nicotinamide was the most abundant vitamin. The clearance rates for DPPH radical, ABTS<sup>+</sup> radical, and hydroxyl radical were 73.19%, 34.29% and 53.72%, respectively. In addition, a total of 46 volatile flavor compounds were

收稿日期: 2023-06-14

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金资助 (CARS-06-14.5-A29); 河北省农林科学院科技创新专项课题资助 (2022KJCZX-SSS-1)。

作者简介: 张瑞 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 304632558@qq.com。

\* 通信作者: 刘俊利 (1997-), 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 微生物发酵, E-mail: Junliu2022@163.com。

常世敏 (1977-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养品质评价与功效, E-mail: keyancsm@126.com。

found in the beverage, with esters and alcohols being the most prevalent ones. These molecules were recognized as flavor compounds giving the fermented foxtail millet alcoholic beverage a distinct scent. As a result, the product serves as a theoretical guide for the creation of functional foods using foxtail millet as a raw ingredient. It is nutrient-dense and has a pleasing aroma and flavor.

**Key words:** foxtail millet; liqueur koji; fermented alcoholic beverage; active ingredients; antioxidant; volatile flavor

小米又称谷子,是中国主要杂粮作物之一。它具有耐干旱、耐贫瘠的特点,能够缓解农业用水压力问题和解决干旱、半干旱土地资源利用问题<sup>[1]</sup>。《本草纲目》中记载,小米有“养肾气,去脾胃中热,益气,陈者苦寒,治胃热消渴,利小便”的功效<sup>[2]</sup>,且小米中的营养成分含量高于大米、小麦,并含有多种生物活性物质<sup>[3]</sup>,是很好的营养食品源。

在谷物饮料的生产中,微生物发酵是常用的一种加工方式<sup>[4]</sup>。谷物作为优良益生元,通过发酵可以增加谷物饮料中营养素的含量从而提高其营养价值,还可以提高谷物饮料的感官特性,使其产生特有的风味<sup>[5]</sup>。在国外,用小米发酵的饮料已有很长的历史,像尼日利亚和印度地区的传统本土饮料就是由小米发酵制作而成,这些饮料能够让人们在夏季保持凉爽并远离疾病<sup>[6-7]</sup>。在我国,对小米液体发酵食品研究主要集中在小米黄酒和小米醋上,利用酒曲或醋酸菌,通过固态或液态发酵工艺生产制成,但对以小米发酵的饮料进行研究的报道很少。

本文利用甜酒曲发酵开发出一种小米酒精饮料,对其活性成分和抗氧化能力进行测定并对其风味进行分析。本研究可以拓宽小米加工产品并提高小米利用率,也为开发以小米为原料的功能性食品提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

小米 市售;甜酒曲 安琪酵母股份有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS)、没食子酸、芸香叶苷、3,5-二硝基水杨酸 上海易恩化学技术有限公司;氢氧化钠 上海沃凯生物技术有限公司;酚酞 天津市大茂化学试剂厂;其他化学试剂均为分析纯。

AG285 电子天平 梅特勒-托利多上海仪器有限公司;WPL-125BE 电热恒温培养箱 天津市泰斯特仪器有限公司;LB32T 手持糖度折光仪 广州市铭睿电子科技有限公司;Thermo Multifuge 3 Plus 高速台式离心机 美国赛默飞世尔科技公司;Agilent 1290-6470 液相色谱仪质谱仪 美国 Agilent 公司;PEN3 紫外分光光度计 德国 AIRSENSE 公司;AGILENT7890-5975C 气相色谱-质谱联用仪 恩特斯分析仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 小米酒精饮料制作工艺 小米→浸泡→蒸煮→冷却→拌曲→发酵→离心→灌装→灭菌→成品

#### 1.2.2 操作要点

1.2.2.1 原料浸泡 称取筛选好无杂质的小米,浸泡 8 h。捞出已浸泡好的小米,去掉多余水分。

1.2.2.2 蒸煮 冲洗好的小米按 1:1.5 比例加水,蒸煮 30 min。

1.2.2.3 拌曲 蒸熟的小米冷却至室温,置于密闭容器中,拌入 1.0% 安琪甜酒曲,拌匀压实,搭成“倒 V”形的凹窝,密封好,放入恒温培养箱中进行发酵。

1.2.2.4 发酵 在 30 ℃ 培养箱中培养 3 d,使小米得到充分的发酵。

1.2.2.5 离心灭菌 将发酵好的小米培养物进行离心,转速 4500 r/min,时间 20 min。取清液灌装于玻璃瓶中,放入 80 ℃ 的水浴锅中恒温灭菌 30 min,密封装罐,将成品放在 4 ℃ 冰箱中方便备用。

#### 1.2.3 单因素实验设计

1.2.3.1 确定甜酒曲添加量 小米经浸泡冲洗后按 1:1.5 比例加水蒸煮 30 min,分别拌入 0.4%、0.7%、1.0%、1.3%、1.6% 甜酒曲,拌匀压实,密封好。放入 30 ℃ 恒温培养箱中发酵 3 d,以感官评分、可溶性固形物和总酸为指标,探究甜酒曲添加量对饮料的影响。

1.2.3.2 确定发酵时间 小米浸泡冲洗后按 1:1.5 比例加水蒸煮 30 min,拌入 1.0% 甜酒曲,拌匀压实,密封好。放入 30 ℃ 恒温培养箱中分别发酵 2、3、4、5、6 d,以感官评分、可溶性固形物和总酸为指标,探究发酵时间对饮料的影响。

1.2.3.3 确定发酵温度 小米浸泡冲洗后按 1:1.5 比例加水蒸煮 30 min,拌入 1.0% 甜酒曲,拌匀压实,密封好。分别放入 28、30、32、34、36 ℃ 恒温培养箱中分别发酵 3 d,以感官评分、可溶性固形物和总酸为指标,探究发酵温度对饮料的影响。

1.2.4 响应面优化试验 在单因素实验的基础上,以甜酒曲添加量(A)、发酵时间(B)、发酵温度(C)为自变量,以综合评分为响应值,借助 Design Expert 10 软件进行响应面优化,试验设计见表 1。

表 1 响应面试验因素和水平

Table 1 Factors and levels of the response surface test

水平	因素		
	A甜酒曲添加量 (%)	B发酵时间 (d)	C发酵温度 (℃)
-1	0.7	2	30
0	1.0	3	32
1	1.3	4	34

1.2.5 小米酒精饮料感官评价 由10名食品专业人员分别从色泽、气味、味道和组织状态4个方面来进行评分,评分标准参考相关文献<sup>[8]</sup>,结合产品自身情况进行修改,具体感官评分标准见表2。

表2 小米酒精饮料感官评分标准  
Table 2 Sensory scoring criteria for foxtail millet alcoholic beverages

项目	评分标准	分值
色泽(20分)	色泽均匀纯正,颜色呈淡黄色	15~20
	色泽较淡或较深,较为均匀	9~14
	色泽很淡或很深,颜色不均匀	0~8
气味(30分)	具有典型的发酵小米香和淡淡的酒香,不刺激	21~30
	发酵小米香稍淡,酒味稍重或稍轻,无异味	11~20
	无发酵小米香,酒味偏重,有异味	0~10
味道(30分)	风味柔和,酸甜比例适度,口感好	21~30
	风味不够柔和,稍偏酸或偏甜,口感略差	11~20
	风味不够柔和,过酸过甜,口感差,有苦涩感	0~10
组织状态(20分)	质地均一,无沉淀,无杂质	15~20
	质地较均一,有少量沉淀、杂质	9~14
	质地不均,有大量杂质	0~8

1.2.6 多指标综合法 以感官评分、总酸和可溶性固形物作为试验优化指标,采用多指标加权综合评分法对小米酒精饮料的加工品质进行综合评价<sup>[9]</sup>。为使指标有相同的贡献,将感官评分(a)、总酸(t)和可溶性固形物(s)的权重系数均设计为0.1,综合评分(Q)=感官评分×0.1+总酸×0.1+可溶性固形物×0.1。

### 1.2.7 基础指标测定

1.2.7.1 总酸测定 按照GB12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》<sup>[10]</sup>。

1.2.7.2 可溶性固形物测定 按照GB/T 12143-2008《饮料通用分析方法》<sup>[11]</sup>。

1.2.7.3 酒精度测定 按照GB5009.225-2016《酒中乙醇浓度的测定》。

### 1.2.8 活性成分及体外抗氧化测定

1.2.8.1 矿物质测定 按照GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》<sup>[12]</sup>。

1.2.8.2 B族维生素测定 称取样品2 mL,加入8 mL 1 mol/L 盐酸溶液,80 °C 水浴振荡30 min,过0.22 μm 微孔滤膜后上机测定。

色谱条件:色谱柱:Agilent C<sub>18</sub>(2.1 mm×100 mm, 3 μm);流速0.3 mL/min;流动相:A为0.1% 甲酸水溶液,B为甲醇,洗脱比例:0 min 99:1、3.2 min 60:40、3.6 min 5:95、4.7 min 99:1;流速:0.3 mL/min;进样量:5 μL;柱温:35 °C。

质谱条件:离子源(ESI)负离子电离模式;检测方式:多反应监测(MRM)模式;离子喷雾电压4000 V;离子源温度350 °C;气体:氮气。

定量分析:根据每个B族维生素标准品的浓度和出峰面积,计算样品含量。

1.2.8.3 黄酮含量测定 参考李若熙等<sup>[13]</sup>方法进行修改。取1 mL样品,用60%乙醇补至5 mL后加入0.3 mL的5% NaNO<sub>2</sub>溶液,摇匀静置5 min。然后加0.3 mL的10% Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>溶液,静置5 min。加入2 mL 4% NaOH溶液,用60%乙醇定容至10 mL,静置15 min后在510 nm波长处测定吸光度值,以芦丁为标准品,求得线性回归方程为Y=0.9779X+0.0017, R<sup>2</sup>=0.9991。

1.2.8.4 多酚含量测定 参考付依依等<sup>[14]</sup>方法进行修改。取0.5 mL样品,加入0.5 mL福林酚显色剂,摇匀后加入1.5 mL的7.5% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液,定容至10 mL,室温避光1 h后在765 nm波长处测定吸光度值,以没食子酸为标准品,求得线性回归方程为Y=13.49X+0.025, R<sup>2</sup>=0.9956。

1.2.8.5 DPPH 自由基清除率测定 参考鲍玉花等<sup>[15]</sup>的方法进行修改,制备0.2 mmol/L DPPH工作液,取样品和DPPH工作液各2 mL,混匀后避光静置30 min,在517 nm处测定其吸光度A<sub>1</sub>;用乙醇代替样品测其吸光度为A<sub>2</sub>;用乙醇代替DPPH工作液测其吸光度为A<sub>3</sub>。计算公式见公式(1)。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_3}{A_2}\right) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.8.6 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率测定 参考Huang等<sup>[16]</sup>的方法并进行修改,将7.4 mmol/L的ABTS溶液和2.6 mmol/L过硫酸钾溶液1:1混合,避光反应12 h,用无水乙醇稀释,其在734 nm处吸光值0.70±0.02,为ABTS工作液。取0.1 mL样品和4 mL ABTS工作液,混匀后避光静置10 min,在734 nm处测其吸光度B<sub>1</sub>;用乙醇代替样品测其吸光度为B<sub>2</sub>。计算公式见公式(2)。

$$\text{ABTS}^+\text{自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{B_1}{B_2}\right) \times 100 \quad \text{式(2)}$$

1.2.8.7 羟基自由基清除率测定 参考鲍玉花等<sup>[15]</sup>的方法,依次加入样品、6 mmol/L硫酸亚铁溶液、6 mmol/L过氧化氢溶液和6 mmol/L水杨酸-乙醇溶液各2 mL,充分混匀后,37 °C水浴30 min,于517 nm处测定吸光值为C<sub>1</sub>;用去离子水代替过氧化氢测其吸光值为C<sub>2</sub>;用去离子水代替样品测其吸光值为C<sub>3</sub>。计算公式见公式(3)。

$$\text{羟基自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{C_1 - C_2}{C_3}\right) \times 100 \quad \text{式(3)}$$

### 1.2.9 挥发性风味物质测定

1.2.9.1 SPME萃取方法 取4 mL样品于萃取瓶中,加入10 μL 4-甲基-2-戊醇(2000 mg/L)内标。使用DVB/PDMS/PDMS萃取头,萃取温度60 °C,萃取时间40 min,于250 °C解吸5 min<sup>[17]</sup>。

1.2.9.2 仪器条件 GC条件:色谱柱:DB-5MS毛细

管气相色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm); 进样口温度: 250 ℃; 程序升温: 初始温度 45 ℃ 保留 2 min, 再以 4 ℃/min 升温到 220 ℃ 保留 5 min。载气为氦气, 流速 1.0 mL/min, 不分流。

MS 条件: 接口温度为 250 ℃, 电离方式为电子电离(Electron Ionization, EI), 电子能量 70 eV, 灯丝发射电流为 200 μA, 离子源温度为 300 ℃, 扫描质量范围 33~450 amu。

1.2.9.3 定性定量方法 定性分析: 在相同 GC 条件下分析 C<sub>8</sub>~C<sub>20</sub> 烷烃混合标准溶液, 计算小米酒精饮料挥发性成分保留指数(Rentention Index, RI), 通过与美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)谱库的检索保留正反匹配度 800 以上的物质, 对比挥发性成分 RI, 进行定性分析。

定量分析: 采用加入内标法对饮料挥发性成分进行定量分析, 化合物浓度=(化合物峰面积/内标峰面积)×内标浓度。

### 1.3 数据处理

每个指标均做 3 次重复实验, 用 Origin 2019 软件处理所得数据, 单因素结果方差和显著性采用 SPSS 20 软件进行分析, 并应用 Design- Expert 10 统计软件进行响应面优化处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果

2.1.1 甜酒曲添加量对小米酒精饮料的影响 由图 1 可知, 小米酒精饮料的感官评分呈先上升后下降趋

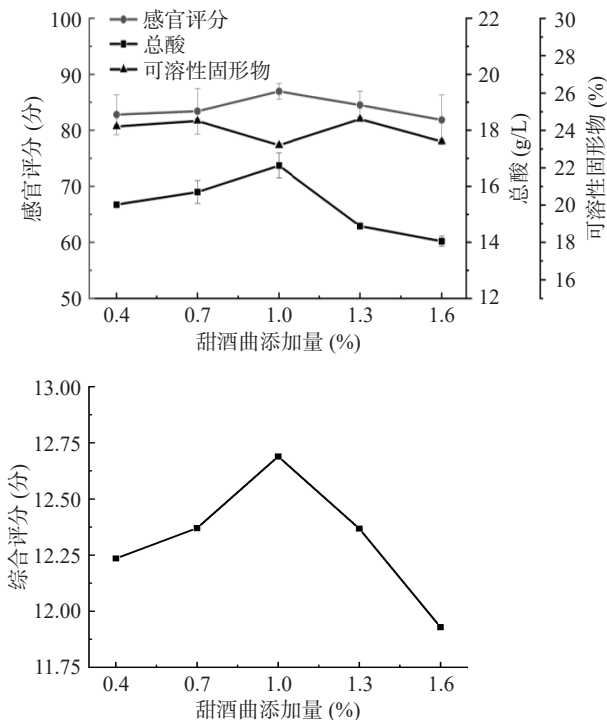


图 1 甜酒曲添加量对小米酒精饮料的影响

Fig.1 Effect of the addition amount of liqueur koji on the foxtail millet alcoholic beverages

势, 在添加量为 1.0% 时达到最高, 感官评分的最高分为 87 分, 此时饮料的色泽、形态、滋味和风味较好。从整体上看, 可溶性固形物含量与总酸含量呈反比。当添加量>1.0% 时, 感官评分逐渐下降, 可能是因为甜酒曲添加过多, 根霉菌生长过快而发生衰亡, 使饮料的苦味较明显<sup>[18]</sup>, 可溶性固形物转化成总酸的能力也随之下降。从综合评分上看, 甜酒曲添加量在 1.0% 时分数最高。所以, 综合考虑, 选择甜酒曲的添加量为 1.0% 时作为响应面试验的“0”水平。

2.1.2 发酵时间对小米酒精饮料的影响 由图 2 可以看出, 随着发酵时间的增加, 总酸呈整体上升趋势, 而可溶性固形物含量在发酵过程中逐渐减少, 在第 3 d 时感官评分达到最大值, 然后逐渐降低。可能是因为发酵时间越长, 发酵越彻底。在发酵过程中, 微生物生长繁殖迅速, 利用饮料中的可溶性固形物, 将其转化成酒精、有机酸和其他风味物质<sup>[19]</sup>。同时, 发酵时间的延长增强了发酵体系中产酸菌的活性, 使饮料的酸味增加, 甚至产生涩味和苦味, 影响了饮料的整体风味。从综合评分上看, 发酵时间为 3 d 时分数最高。因此, 选择发酵时间为 3 d 时作为响应面试验的“0”水平。

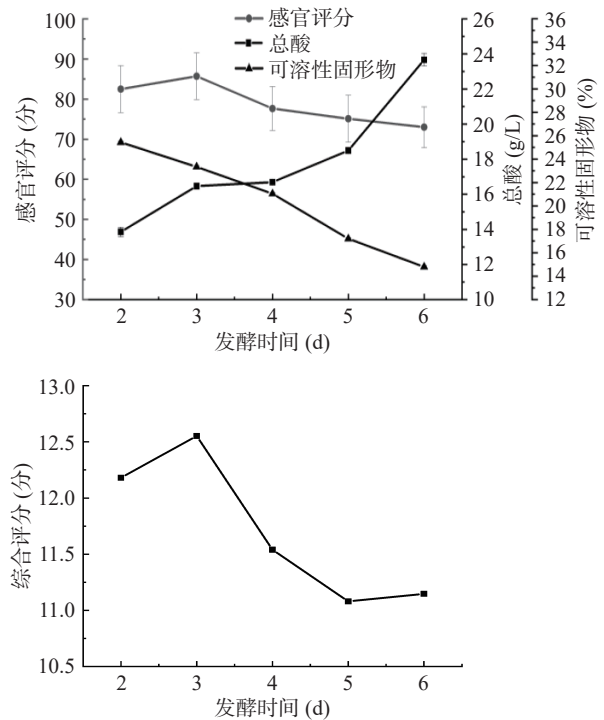


图 2 发酵时间对小米酒精饮料的影响

Fig.2 Effect of the fermentation time on the foxtail millet alcoholic beverages

2.1.3 发酵温度对小米酒精饮料的影响 由图 3 可知, 发酵温度在 28~34 ℃ 时, 可溶性固形物整体呈下降趋势, 总酸整体呈上升趋势, 当发酵温度达到 36 ℃ 时, 可溶性固形物直线上升, 而总酸直线下降, 可能是因为米根霉的最适发酵温度在 30~35 ℃ 范围内<sup>[20]</sup>, 当根霉菌生长受到抑制后, 可溶性固形物转化成酸性物质的能力也会降低。从感官评分上可以看出, 温度

在 32 °C 时评分是最高的。从综合评分上看,发酵温度 32 °C 时分数最高。综合考虑,选择发酵温度为 32 °C 时作为响应面试验的“0”水平。

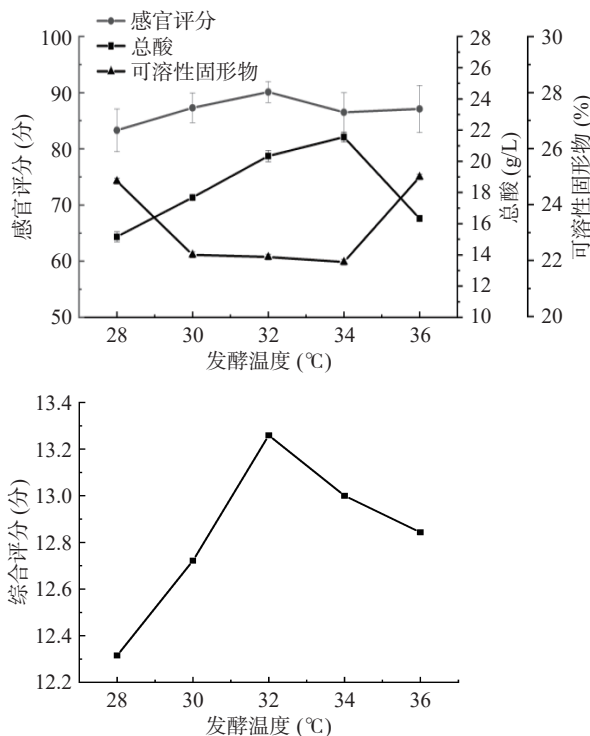


图3 发酵温度对小米酒精饮料的影响

Fig.3 Effect of the fermentation temperature on the foxtail millet alcoholic beverages

## 2.2 响应面优化结果

在单因素实验的基础上,以综合评分为指标,采用 Design-Expert 10 软件 Box-Benhnken 法进行试验设计,确定饮料的最佳工艺,试验设计及结果见表 3。

表 3 响应面试验设计及结果

Table 3 Response surface experimental design and results

试验号	A甜酒曲添加量	B发酵时间	C发酵温度	综合评分(分)
1	-1	-1	0	12.34
2	-1	0	-1	12.37
3	0	1	-1	11.52
4	1	0	-1	12.37
5	1	1	0	12.20
6	1	-1	0	12.39
7	1	0	1	12.54
8	0	0	0	13.12
9	-1	1	0	11.92
10	0	0	0	13.09
11	0	0	0	13.07
12	0	-1	1	12.22
13	0	0	0	13.17
14	0	-1	-1	12.18
15	-1	0	1	12.44
16	0	1	1	12.27
17	0	0	0	12.92

对表 3 试验数据进行二次多项回归拟合,获得综合评分对甜酒曲添加量(A)、发酵时间(B)、发酵

温度(C)的多元回归方程为:  $Y=13.07+0.054A-0.15B+0.13C+0.057AB+0.025AC+0.18BC-0.24A^2-0.62B^2-0.40C^2$ 。

该模型的方差分析结果见表 4。

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance for the regression model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	3.27	9	0.36	31.17	<0.0001	**
A	0.023	1	0.023	1.97	0.2031	
B	0.18	1	0.18	15.52	0.0056	**
C	0.13	1	0.13	11.29	0.0121	
AB	0.013	1	0.013	1.11	0.3264	
AC	2.500E-003	1	2.500E-003	0.22	0.6544	
BC	0.13	1	0.13	10.86	0.0132	
A <sup>2</sup>	0.24	1	0.24	20.83	0.0026	**
B <sup>2</sup>	1.62	1	1.62	138.47	<0.0001	**
C <sup>2</sup>	0.69	1	0.69	58.97	0.0001	**
残差误差	0.082	7	0.012			
失拟项	0.046	3	0.015	1.69	0.3050	不显著
纯误差	0.036	4	8.998E-003			
总和	3.36	16				
	$R^2=0.9757$		$R^2_{adj}=0.9444$			

注: “\*\*”表示差异极显著( $P<0.01$ )。

以综合评分为评价指标,对模型进行统计学检验并分析,由表 4 可知,该回归模型  $P<0.01$ ,极显著,失拟项  $P=0.3050>0.05$ ,不显著,说明方程能准确反映综合评分与各因素之间的关系。回归模型相关系数  $R^2=0.9757$ ,  $R^2_{adj}=0.9444$ ,拟合程度良好。单因素 B 极显著( $P<0.01$ ),三因素的 F 值分别为 1.97、15.52、11.29,因此,对小米酒精饮料综合评分影响大小的因素依次为发酵时间(B)>发酵温度(C)>甜酒曲添加量(A)。二次项 A<sup>2</sup>、B<sup>2</sup>、C<sup>2</sup>对饮料的综合评分影响都极显著( $P<0.01$ )。

利用 Design-Expert 10 软件对表 4 的数据进行二元多次回归拟合,A、B、C 三个因素对综合评分(Y)的影响交互作用关系见图 4。

## 2.3 模型验证实验

经 Design-Expert 10 软件分析得出,在发酵工艺为甜酒曲添加量 1.03%、发酵时间 2.90 d、发酵温度 32.28 °C 时,测得饮料的综合评分为 13.09 分。考虑实际操作性,将工艺调整为甜酒曲添加量 1%、发酵时间 3 d、发酵温度 32 °C。在此工艺下进行验证实验,得出的饮料感官评分为 89.37 分,可溶性固形物为 22.05%,总酸为 19.33 g/L,综合评分为 13.08 分。与预测值的误差较小,在合理范围之内,所以此模型运用响应面优化得到的工艺具有可靠性。

## 2.4 小米酒精饮料酒精度

测得小米酒精饮料的酒精度为 0.7%vol, GB/T 17204-2021 中提到酒精度在 0.5%vol 以上的称为酒精饮料,说明该款饮料是小米酒精饮料。

## 2.5 发酵小米酒精饮料中活性成分及体外抗氧化能力

### 2.5.1 小米酒精饮料矿物质含量 矿物质是机体所

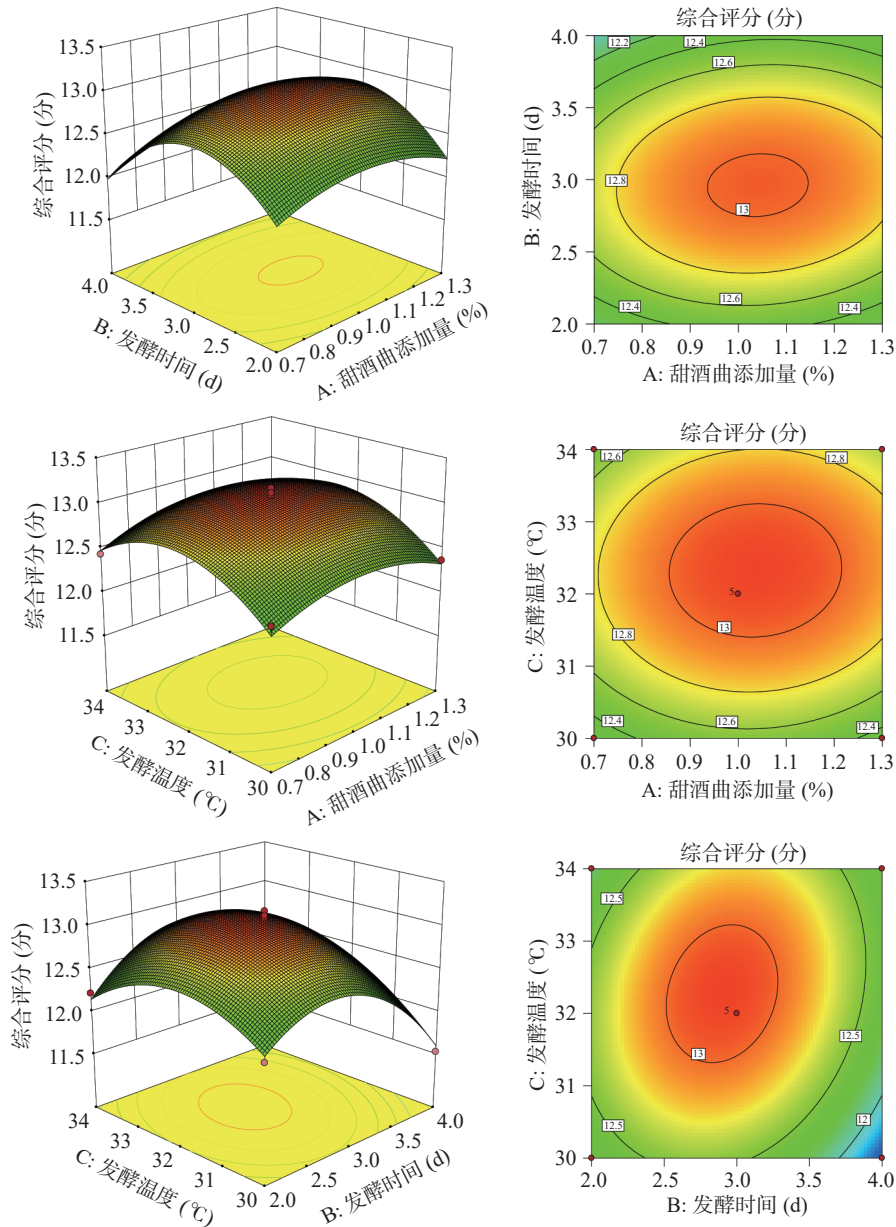


图 4 各因素交互作用对饮料综合评分影响的响应面图

Fig.4 Response surface diagram of the interaction of each factor on the comprehensive score of beverages

必需的营养元素, 对人体的正常发育至关重要, 但是矿物质不能自身合成, 需要不断地从食物中摄取。缺乏和过量摄入矿物质都会导致机体出现功能性障碍和紊乱, 所以需要适当均衡的从饮食中摄取一定数量的必需矿物质, 以维持机体正常的生命活动<sup>[21]</sup>。如表 5 所示饮料中矿物质含量由高到低依次为钾>镁>钙>锌>锰>硒。钾是所有元素中含量最高的元素, 与

之前的研究一致<sup>[22]</sup>。

2.5.2 小米酒精饮料 B 族维生素含量 B 族维生素通常以辅酶或辅助因子的形式参与脂肪、蛋白质、碳水化合物等的代谢过程, 对维持机体的健康生长起到积极作用<sup>[23]</sup>。但 B 族维生素易受到环境的影响, 在加工制备过程中可能造成一部分 B 族维生素的流失<sup>[24]</sup>。从表 6 中可以看出, 饮料中含有 431.36 μg/L

表 5 小米酒精饮料中矿物质元素含量

Table 5 Mineral element content in foxtail millet alcoholic beverages

元素	Se	Ca	Zn	Mn	Mg	K
含量(mg/500 mL)	0.044±0.001	24.250±0.012	1.865±0.020	0.750±0.020	37.300±0.013	92.500±0.039

表 6 小米酒精饮料中 B 族维生素含量

Table 6 B vitamin content in foxtail millet alcoholic beverages

元素	维生素B1	维生素B2	烟酸	烟酰胺	泛酸	维生素B6
含量(μg/L)	41.42±0.01	29.41±0.02	17.14±0.01	431.36±2.25	97.84±0.75	150.29±1.07

的烟酰胺。烟酰胺是维生素 B3 进入人体后转化的物质,除具有抗氧化、美白的功效外,对视网膜神经节细胞也有较强的保护作用<sup>[25]</sup>。小米酒精饮料中 B 族维生素含量由高到低依次为烟酰胺>维生素 B6>泛酸>维生素 B1>维生素 B2>烟酸。

### 2.5.3 小米酒精饮料黄酮、多酚及抗氧化能力分析

如表 7 所示,该饮料的黄酮含量为 66.78 mg/L,多酚含量为 65.13 mg/L。研究表明,酚类、黄酮类等营养成分在抗氧化过程中起到了重要的作用<sup>[26]</sup>。通过测定 DPPH 自由基、ABTS<sup>+</sup>自由基及羟自由基清除率来检测其抗氧化活性,结果显示小米酒精饮料具有一定的抗氧化活性,该饮料的 DPPH 自由基及羟自由基的清除率均较高于彭新颜等<sup>[27]</sup>研究的褐色乳饮料,可以得出此款饮料的抗氧化活性总体较高。

表 7 小米酒精饮料黄酮、多酚及抗氧化能力

Table 7 Flavonoids, polyphenols and antioxidant capacity of foxtail millet alcoholic beverages

抗氧化活性指标	测定值
黄酮(mg/L)	66.78±2.21
多酚(mg/L)	65.13±2.86
DPPH自由基清除率(%)	73.19±1.50
ABTS <sup>+</sup> 自由基清除率(%)	34.29±0.13
羟自由基清除率(%)	53.72±0.32

## 2.6 小米酒精饮料挥发性风味物质分析

利用 SPME/GC-MS 对饮料挥发性成分进行分析,从表 8 中可以看出,共检测到 46 种挥发性成分,其中包括 14 种酯类、3 种酸类、11 种醇类、8 种醛类、5 种酮类和 5 种其他类物质。研究表明,小米中

挥发性成分主要集中于醛类物质,苯乙醛、反-2-辛烯醛、壬醛、癸醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛等这几种醛类物质是小米自有的挥发性香味成分<sup>[28]</sup>。经甜酒曲发酵后可以看出酯类、醇类、醛类种类最多,是饮料中的主要挥发性物质,这与龚燕川等<sup>[29]</sup>探究不同品牌醪糟挥发性成分所得的结果一致。

**2.6.1 酯类物质** 酯类物质一般是由醇类物质酯化产生,具有水果甜香或花香气味<sup>[30]</sup>。饮料中酯类物质最多,以乙酯类和丙酯类的饱和酯类物质为主,它们主要呈现水果香、花香、酒香和脂香等。乙酸异戊酯、正己酸乙酯、棕榈酸乙酯、亚油酸乙酯这几种酯类物质在小米酒精饮料中含量相对较高,说明这几个酯类成分可能对饮料香气具有重要贡献。

**2.6.2 醇类物质** 醇类物质也是饮料中主要挥发性物质之一,大部分的醇类物质都是由酒精发酵阶段产生的,而且醇类是生成酯类物质的前体物质。在饮料中可以看出,正己醇、3-甲硫基丙醇、1-辛醇是含量最多的醇类物质,含量分别为 112.75、153.78、122.87 μg/L,它们主要贡献的风味为果香、花香和草木香等。1-壬醇有橙子和玫瑰香气,1-辛烯-3-醇有蘑菇、玫瑰和甘草香气,这些醇类赋予饮料鲜香醇厚的特征香气,对饮料香气的形成有促进作用<sup>[31]</sup>。

**2.6.3 醛类物质** 醛类物质主要来自于氨基酸的代谢或不饱和脂肪酸的氧化<sup>[32]</sup>,不同的氨基酸在相应的酶作用下可产生不同的醛类物质,它们能协调各香气组分,促进其释放。在饮料中,影响其风味最重要的醛类化合物是苯甲醛,其含量最高,具有苦杏仁、櫻桃的香味。

表 8 小米酒精饮料挥发性风味物质分析

Table 8 Analysis of volatile flavor substances in foxtail millet alcoholic beverages

序号	名称	呈味	RT值(min)	RI值	CAS号	化学式	物质含量(μg/L)
<b>酯类</b>							
1	乙酸异戊酯	香蕉	7.11	876	123-92-2	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	5403.53±402.93
2	惕各酸乙酯	花香、焦糖	9.134	939	5837-78-5	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	0.88±0.18
3	戊酸烯丙酯	菠萝	10.416	963	6321-45-5	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	1.74±0.19
4	正己酸乙酯	菠萝、香蕉	11.28	1000	123-66-0	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	757.26±99.11
5	乙酸己酯	苹果、香蕉	11.777	1011	142-92-7	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	12.63±1.36
6	丁二酸二乙酯	熟苹果味	17.899	1182	123-25-1	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub>	5.02±0.18
7	醋酸辛酯	脂味、蔬菜、干酪	19.011	1210	112-14-1	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	8.36±0.68
8	苯乙酸乙酯	蜂蜜、玫瑰、热可可	20.099	1246	101-97-3	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	1.75±0.23
9	壬酸乙酯	果味、玫瑰、葡萄酒	21.966	1296	123-29-5	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	2.13±0.08
10	癸酸正丙酯	果味、脂味	28.276	1490	30673-60-0	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	0.76±0.14
11	癸酸3-甲基丁酯	果香、白兰地香	32.826	1646	2306-91-4	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	34.73±1.79
12	十四酸异丙酯	脂味	37.697	1827	110-27-0	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	0.07±0.02
13	棕榈酸乙酯	果香、脂味	41.928	1993	628-97-7	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	2263.26±288.59
14	亚油酸乙酯	果香	46.948	2162	544-35-4	C <sub>20</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	128.69±5.19
<b>酸类</b>							
1	辛酸	脂味、蔬菜、干酪	17.916	1180	124-07-2	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	734.88±37.89
2	壬酸	奶酪、牛奶	21.218	1273	112-05-0	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	161.48±19.11
3	癸酸	脂味、柑橘	24.443	1373	334-48-5	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	104.34±3.55

续表 8

序号	名称	呈味	RT值(min)	RI值	CAS号	化学式	物质含量(μg/L)
醇类							
1	正己醇	松香、花香、青草	6.886	868	111-27-3	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	112.75±17.52
2	1-辛烯-3-醇	香菇、玫瑰、甘草	10.634	980	3391-86-4	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	4.15±0.93
3	3-甲硫基丙醇	洋葱、甜汤、蔬菜	10.644	981	505-10-2	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> OS	153.78±6.67
4	2-乙基己醇	柑橘、花香	12.369	1030	104-76-7	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	6.96±0.98
5	1-辛醇	橙子、玫瑰、蘑菇	13.943	1071	111-87-5	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	122.87±7.1
6	甲基苯甲醇	风信子	16.399	1061	98-85-1	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	1.15±0.18
7	1-壬醇	玫瑰、橙子、脂味	17.65	1173	143-08-8	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	13.04±0.1
8	(±)-1-苯基-2-丙醇	玫瑰	19.654	1212	698-87-3	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	0.48±0.03
9	1-癸醇	橙子	21.208	1273	112-30-1	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> O	21.74±0.05
10	α-(2-甲基丙基)苯乙醇	芹菜、奶油	23.619	1366	7779-78-4	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> O	36.01±6.38
11	A-毕橙茄醇	草本	32.799	1653	481-34-5	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	2.07±0.17
醛类							
1	苯甲醛	苦杏仁、樱桃	9.906	963	100-52-7	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	1113.16±137.83
2	苯乙醛	蜂蜜、可可	12.902	1045	122-78-1	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	21.73±0.57
3	反-2-辛烯醛	黄瓜、草本、香蕉	13.45	1060	2548-87-0	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub> O	21.29±0.01
4	壬醛	玫瑰、橘皮	15.202	1104	124-19-6	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	45.5±15.69
5	癸醛	柑橘、花香	18.854	1206	112-31-2	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O	31.63±2.04
6	(E,E)-2,4-壬二烯醛	柑橘、花香	19.194	1216	5910-87-2	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	0.69±0.04
7	2-苯基巴豆醛	坚果、萝卜	21.004	1279	4411-89-6	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O	31.92±1.43
8	(E,E)-2,4-癸二烯醛	南瓜、坚果、甜瓜	22.738	1317	25152-84-5	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O	0.58±0.00
酮类							
1	2-庚酮	香草、椰子	7.474	891	110-43-0	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O	0.42±0.07
2	仲辛酮	泥土、草木	10.957	990	111-13-7	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	4.18±0.05
3	苯乙酮	山楂	13.732	1065	98-86-2	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	23.34±1.45
4	对甲基苯乙酮	山楂、樱桃	16.787	1183	122-00-9	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	4.41±0.36
5	香叶基丙酮	果味、玫瑰木质	26.918	1453	3796-70-1	C <sub>13</sub> H <sub>22</sub> O	4.97±0.57
其他							
1	均三甲苯	NF	10.175	972	108-67-8	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	175.62±5.21
2	2-正戊基吡喃	泥土、豆、蔬菜	10.933	993	3777-69-3	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O	8.65±1.05
3	1,2,3-三甲苯	NF	11.059	1013	526-73-8	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	4.19±0.06
4	3-甲基十一烷	NF	17.372	1170	1002-43-3	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	1.7±0.07
5	1-石竹烯	木质、丁香	26.061	1419	87-44-5	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	1.59±0.03

注: NF表示未查到该物质呈味。

### 3 结论

本文以小米为原材料,通过加入甜酒曲发酵研制出一款谷物酒精饮料,并对其营养品质和挥发性风味物质进行评价。实验结果表明,发酵工艺的最优条件为:甜酒曲添加量 1%、发酵时间 3 d、发酵温度 32 ℃。该谷物酒精饮料酒精度为 0.7%vol,还富含多种生物活性成分,且 DPPH、ABTS<sup>+</sup>和羟自由基清除率分别为 73.19%、34.29%、53.72%,说明该饮料具有较好的抗氧化能力。利用 SPME/GC-MS 对饮料挥发性成分进行分析,共检测到 46 种挥发性成分,这些成分构成小米酒精饮料特有的风味。该研究为开发以小米为原料的功能性食品提供理论依据,为实现农产品资源的深度开发开辟有效途径。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] 刘敬科,张爱霞,赵巍,等. 糙小米发芽过程中游离氨基酸的变化分析[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(4): 85-94. [LIU J K, ZHANG A X, ZHAO W, et al. Variations of free amino acids during the germination of brown foxtail millet[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(4): 85-94.]
- [2] 刘小飞,田文静,孙玉清,等. 小米生物学功能活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(23): 177-182. [LIU X F, TIAN W J, SUN Y Q, et al. Research progress on biological activities of foxtail millet[J]. Food Research and Development, 2021, 42(23): 177-182.]
- [3] 金子灿. 发芽富硒糙小米及其乳酸菌发酵饮料的风味及抗氧化研究[D]. 锦州:渤海大学, 2021. [JIN Z C. Study on flavor and antioxidation of germinated selenium enriched Rough millet and its fermented beverage by lactic acid bacteria[D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.]

- [4] LIU N, QIN L, LU X, et al. Physicochemical components and flavor properties of acid rice soup (rice-acid) fermented with *Lactobacillus paracasei* and/or *Kluyveromyces marxianus*[J]. *Food Bio-science*, 2021, 43: 101278.
- [5] KUNTAL G, MOUSUMI R, ATANU A, et al. Role of probiotic *Lactobacillus fermentum* KKL1 in the preparation of a rice based fermented beverage[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 188: 161–168.
- [6] ADAKOLE M I, OGORI A F, IKYA J K, et al. Fermented millet “Ibyer” beverage enhanced with ginger powder: An assessment of microbiological, pasting, proximate, and sensorial properties[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(7): 3151.
- [7] POORNIMA S, PARAS Y, RAKESH K V, et al. Effect of *Prosopis cineraria* (L) druce pods and camel milk for nutritional enrichment in traditionally fermented minor millet's drink[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2020, 22: 100251.
- [8] 傅金凤, 黄美娜, 朱培渤, 等. 响应面法优化发芽糙米酒茶复合饮料制备工艺[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(15): 193–201. [FU J F, HUANG M N, ZHU P B, et al. Response surface method optimization study on composite beverage technology of germinated brown rice wine tea[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(15): 193–201.]
- [9] 张丽华, 李珍珠, 乜晓爽, 等. 植物乳杆菌发酵杜仲鲜叶饮料的研制[J]. *食品科技*, 2019, 44(2): 129–133. [ZHANG L H, LI Z Z, NIE X S, et al. The process technology of *Eucommia ulmoides* leaves beverage fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(2): 129–133.]
- [10] 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. GB 12456-2021 食品安全国家标准 食品中总酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1–3. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 12456-2021 National food safety standard determination of total acid in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 1–3.]
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12143-2008 饮料通用分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1–2. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12143-2008 General analytical method for beverages [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1–2.]
- [12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.268-2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1–4. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. GB 5009.268-2016 National food safety standard determination of multiple elements in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1–4.]
- [13] 李若熙, 王洋, 康旭, 等. 南酸枣乳酸菌饮料发酵条件的优化[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(24): 134–141. [LI R X, WANG Y, KANG X, et al. Optimization of fermentation conditions for a lactic acid bacteria beverage with *Choerospondias axillaris*[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(24): 134–141.]
- [14] 付依依, 王永霞, 张笑莹, 等. 植物乳杆菌发酵对沙棘原浆主要成分、抗氧化性及挥发性物质的影响[J]. *中国酿造*, 2022, 41(2): 125–131. [FU Y Y, WANG Y X, ZHANG X Y, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the main components, antioxidant properties and volatile substances of sea buckthorn pulp[J]. *Brewing in China*, 2022, 41(2): 125–131.]
- [15] 鲍玉花, 闫世芳, 肖明, 等. 萌发对青稞甜醅饮料的活性成分及其抗氧化活性的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(13): 4383–4389. [BAO Y H, YAN S F, XIAO M, et al. Effects of germination on the active components and antioxidant activity of fermented beverage from highland barley[J]. *Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2022, 13(13): 4383–4389.]
- [16] HUANG C W, LIN I J, LIU Y M, et al. Composition, enzyme and antioxidant activities of pineapple[J]. *International Journal of Food Properties*, 2021, 24(1): 1244–1251.
- [17] 李少辉, 赵巍, 张爱霞, 等. 5种不同萃取头对小米白酒挥发性成分的分析比较[J]. *食品科技*, 2022, 47(3): 290–296. [LI S H, ZHAO W, ZHANG A X, et al. Comparison of five different extraction fibers for the analysis of volatile components of foxtail millet Baijiu[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(3): 290–296.]
- [18] 张阳阳, 侯贺丽, 王荣荣, 等. 响应面法优化桂花酒酿造工艺[J]. *中国酿造*, 2021, 40(11): 217–222. [ZHANG Y Y, HOU H L, WANG R R, et al. Optimization of brewing process for *Osmanthus fragrans* wine by response surface methodology[J]. *Chinese brewing*, 2021, 40(11): 217–222.]
- [19] 苏安祥, 张传伟, 刘春利, 等. 糯米与糯玉米发酵酒品质的比较[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(17): 26–32. [SU A X, ZHANG C W, LIU C L, et al. Quality comparison of glutinous rice fermented wine and waxy maize fermented wine[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(17): 26–32.]
- [20] 中孟林, 张超, 王玉霞. 白酒大曲微生物研究进展[J]. *中国酿造*, 2016, 35(5): 1–5. [SHEN M L, ZHANG C, WANG Y X. Research progress on microorganism in Daqu liquor[J]. *Chinese Brewing*, 2016, 35(5): 1–5.]
- [21] ADRIAN F G, ADELIN P, SILVIA M. A review of micronutrients and the Immune system—working in harmony to reduce the risk of infection[J]. *Nutrients*, 2020, 12(1): 236.
- [22] 潘少香, 孟晓萌, 刘雪梅, 等. 基于电感耦合等离子体质谱法对不同产地小米矿物元素的差异性分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(1): 72–79. [PAN S X, MENG X M, LIU X M, et al. Differential analysis of millet mineral elements in different origins based on inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *The Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2022, 13(1): 72–79.]
- [23] 李宁, 李梦雅, 彭全辉. B族维生素在反刍动物营养中的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(9): 4909–4919. [LI N, LI M Y, PENG Q H. Progress of B vitamins in ruminant nutrition[J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(9): 4909–4919.]
- [24] 于文龙, 刘卫华, 章丽, 等. B族维生素微胶囊的制备及其缓释动力学研究[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(12): 122–132. [YU W L, LIU W H, ZHANG L, et al. Preparation of B vitamin microcapsules and its sustained release kinetics[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(12): 122–132.]
- [25] PIETRIS J. The role of NAD and nicotinamide (vitamin B3) in glaucoma: A literature review[J]. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)*, 2022, 68(3): 151–154.
- [26] MENG F, ZHOU L, LI J, et al. The combined effect of protein hydrolysis and *Lactobacillus plantarum* fermentation on antioxidant activity and metabolomic profiles of quinoa beverage[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111416.
- [27] 彭新颜, 于海洋, 周夕冉, 等. 抗氧化活性褐色乳饮料的研制及其对肝脏的保护作用[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(3): 156–162. [PENG X Y, YU H Y, ZHOU X R, et al. Development of the antioxidant active brown milk beverage and its protective ef-

- fect on the liver[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(3): 156-162. ]
- [ 28 ] 刘敬科, 李云, 张玉宗, 等. 谷子中挥发性气味物质的分析与研究[J]. *河北农业科学*, 2012, 16(1): 6-9. [ LIU J K, LI Y, ZHANG Y Z, et al. Analysis and study of volatile aroma compounds in foxtail millet[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2012, 16(1): 6-9. ]
- [ 29 ] 龚燕川, 符东, 蔡光容, 等. 不同品牌醪糟感官评定及挥发性成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(23): 281-287. [ GONG Y C, FU D, CAI G R, et al. Sensory evaluation and volatile components analysis of different brands of fermented glutinous rice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(23): 281-287. ]
- [ 30 ] NIU Y W, YAO Z M, XIAO Z B, et al. Sensory evaluation of the synergism among ester odorants in light aroma-type liquor by odor threshold, aroma intensity and flash GC electronic nose[J]. *Food Research International*, 2018, 113: 102-114. ]
- [ 31 ] 宋虹, 李一雪, 李然, 等. 顶空固相微萃取/气质联用结合电子鼻分析类干酪乳杆菌发酵豆渣饮料过程中风味特征[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(5): 253-262. [ SONG H, LI Y X, LI R, et al. Headspace solid phase microextraction/temperature combination combined with electronic nose to analysis the flavor characteristics of okara beverages fermented by *Lactobacillus casei*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(5): 253-262. ]
- [ 32 ] 丹彤, 包秋华, 孟和毕力格, 等. 发酵乳风味物质乙醛、双乙酰的合成途径及其调控机制[J]. *食品科技*, 2012, 37(7): 75-79. [ DAN T, BAO Q H, MENG H B L G, et al. Gene regulation to increase acetaldehyde and diacetyl production by lactic acid bacteria [J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(7): 75-79. ]