

# 热杀菌条件对朝鲜族传统米酒呈香品质的影响

夏伟良 金铁岩 熊思瑞

(延边大学农学院, 吉林 延吉 133002)

**摘要:** [目的] 从香气成分的角度, 探究朝鲜族米酒热杀菌的优选条件。[方法] 通过电子鼻与顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用(HS-SPME-GC-MS)相结合比较不同热杀菌条件对朝鲜族传统米酒呈香品质的影响, 并测定电子鼻传感器响应值、挥发性化合物种类及含量。[结果] 传感器 R7(无机硫化物)、R9(有机硫化物)、R2(氮氧类化合物)、R6(甲基类)和 R8(醇和醛酮)对不同热杀菌样品响应信号普遍较强。线性判别分析(LDA 分析)显示, 65℃杀菌 5 min 的米酒样品与未杀菌样品的挥发性成分最相似, 经 85℃杀菌 30 min、125℃灭菌 5 s 可明显改变样品的原风味轮廓。4 组米酒样品中共鉴定出 106 种香气化合物, 其中醇类和酯类最丰富, 相对含量分别为 25.53%~40.67% 和 33.49%~44.75%。热杀菌对样品挥发性化合物种类及相对含量均有影响, 65℃杀菌 5 min 的米酒与未杀菌米酒最为相似, 化合物总质量浓度分别为 7.26, 8.74 mg/L。[结论] 从香气成分角度确定 65℃杀菌 5 min 为米酒优选的热杀菌条件。

**关键词:** 朝鲜族传统米酒; 热杀菌; 香气成分; 挥发性化合物

## Effects of thermal sterilization conditions on the aromatic quality of traditional Korean rice wine

XIA Weiliang JIN Tieyan XIONG Sirui

(College of Agriculture, Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the preferred conditions for thermal sterilization of Korean rice wine from the perspective of aroma component preservation. [Methods] The effects of different thermal sterilization conditions on the aroma quality of traditional Korean rice wine are evaluated by combining an electronic nose with headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). The response values of the electronic nose sensors, as well as the types and content of volatile compounds, are determined. [Results] The response signals of the sensors R7 (inorganic sulfides), R9 (organic sulfides), R2 (nitrogen oxides), R6 (methyls), and R8 (alcohols and aldehydes and ketones) to different heat sterilized samples are generally strong. Linear discriminant analysis (LDA) shows that the volatile compounds of the rice wine samples sterilized at 65℃ for 5 min are the most similar to those of the unpasteurized samples. In contrast, the original flavor profiles of the samples are significantly altered by sterilizing the samples at 85℃ for 30 min and 125℃ for 5 s. A total of 106 aroma compounds are identified in the four groups of rice wine samples, with alcohols and esters being the most abundant. Their relative content is 25.53%~40.67% and 33.49%~44.75%, respectively. Thermal sterilization affects both the types and relative content of volatile compounds in the samples. The rice wine sterilized at 65℃ for 5 min exhibits the closest similarity to unsterilized rice wine, with total mass concentrations of compounds being 7.26 and 8.74 mg/L, respectively. [Conclusion] Based on aroma component analysis, sterilization at 65℃ for 5 min is identified as the preferred thermal sterilization condition for traditional Korean rice wine.

**Keywords:** traditional Korean rice wine; thermal sterilization; aroma component; volatile compound

朝鲜族米酒以低酒精度、清爽口感及独特风味为特色, 富含维生素、多酚、低聚糖等营养成分, 兼具食用与营养价值。其香气特征作为决定感官品质与消费者偏好的核心参数, 受原料类型、发酵微生物、工艺条件等多因素影响,

通信作者: 金铁岩 (1968—), 男, 延边大学副教授, 博士。E-mail: jintieyan@ybu.edu.cn

收稿日期: 2025-06-13 改回日期: 2025-11-17

引用格式: 夏伟良, 金铁岩, 熊思瑞. 热杀菌条件对朝鲜族传统米酒呈香品质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 167-175.

Citation: XIA Weiliang, JIN Tieyan, XIONG Sirui. Effects of thermal sterilization conditions on the aromatic quality of traditional Korean rice wine[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 167-175.

酯类、高级醇类等挥发性化合物构成了其风味主体<sup>[1-2]</sup>。

目前,国内外研究聚焦于多种杀菌技术对米酒品质的影响。非热杀菌技术(如紫外杀菌<sup>[3]</sup>、超高压杀菌<sup>[4]</sup>)虽能较好保留营养成分,但存在设备成本高、效果不稳定等局限,制约了产业化应用。相较而言,热杀菌技术在朝鲜族米酒产业化应用中更具可行性,热力杀菌通过破坏微生物蛋白质结构实现高效灭活,65℃低温加热5 min可稳定控制米酒贮藏期微生物指标,且总酸、pH值与总糖变化幅度显著低于非热杀菌组<sup>[5]</sup>。而热杀菌技术中,65℃低温加热5 min的米酒在10周贮藏期内总酸(1.32%)、pH值(4.13)和总糖(8.21%)变化最小,感官综合评价最优<sup>[6]</sup>。超高温瞬时灭菌虽能高效灭菌,但会导致氨基酸含量显著损失,影响营养价值<sup>[7]</sup>。尽管上述研究明确了不同杀菌方法的理化与微生物指标变化,但关于热杀菌对挥发性风味化合物的系统性研究仍存在不足,尤其缺乏对酯类、高级醇等关键香气物质的定量解析,限制了杀菌工艺的精细化优化。研究拟选取热杀菌米酒作为试验样本,将未杀菌朝鲜族传统米酒经65℃杀菌5 min(低温短时杀菌)、85℃杀菌30 min(巴氏杀菌)和125℃灭菌5 s(超高温瞬时灭菌)处理,通过电子鼻和HS-SPME-GC-MS技术相结合,从宏观和微观上对比米酒挥发性风味化合物并进行定性定量分析,旨在填补现有研究空白,为杀菌工艺的精细化优化提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

#### 1.1.1 材料

安琪酵母:食品级,安琪酵母股份有限公司;

米酒:自制。

#### 1.1.2 化学试剂

2-辛醇:分析纯,美国Sigma公司;

氯化钠:分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;

正构烷烃混合标品(C<sub>7</sub>~C<sub>40</sub>):美国Sigma公司;

萃取头:50/30 μm DVB/CAR on PDMS,西格玛奥德里奇公司;

DB-wax 毛细管柱:30 m×0.25 mm×0.25 μm,美国安捷伦公司;

水:符合GB 5749—2006标准饮用水。

### 1.2 仪器与设备

电子鼻:PEN3型,德国AIRSENSE公司;

气相色谱质谱联用仪:7890B-5977B型,美国安捷伦公司;

电子天平:BSA224S型,北京赛多利斯科学仪器有限公司;

顶空固相微萃取仪:HS-SPME型,西格玛奥德里奇公司;

数显恒温水浴锅:DK-8D型,无锡沃信仪器制造有限

公司。

### 1.3 方法

1.3.1 米酒酿造工艺流程及操作要点 朝鲜族米酒工艺流程如图1所示。

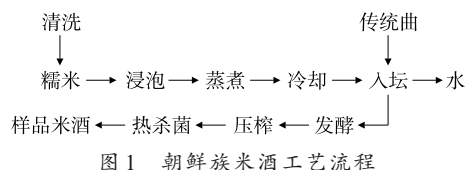


图1 朝鲜族米酒工艺流程

Figure 1 Technical process for Korean rice wine

操作要点:

(1) 原料筛选:挑选颗粒饱满且品质上乘的大米。

(2) 清洗与浸泡处理:大米洗涤干净后,浸泡5~6 h。

(3) 蒸煮:100℃蒸煮45 min。

(4) 入坛:待物料冷却至室温后,按 $V_{\text{大米}}:V_{\text{水}}$ 为1.0:1.5添加水分,以朝鲜族传统米曲作为发酵剂(添加量5%),同时加入少量安琪酵母并搅拌均匀,发酵温度为20~22℃。

(5) 压榨:发酵48 h后,采用4层纱布过滤压榨,所得米酒留存备用。

以上步骤均在无菌条件下进行,避免杂菌污染影响米酒品质。

(6) 未杀菌米酒:压榨后不做任何杀菌处理,直接得到样品酒。

(7) 65℃杀菌5 min米酒(低温短时杀菌):将压榨后的朝鲜族米酒,于65℃保持5 min后迅速冷却至4~5℃。

(8) 85℃杀菌30 min米酒(巴氏杀菌):将压榨后的朝鲜族米酒,于85℃保温30 min后急速冷却至4~5℃。

(9) 125℃灭菌5 s米酒(超高温瞬时灭菌):参照文献[8-9]的方法并修改。将过滤后的米酒通过离心泵注入高温瞬时灭菌机的冷热物料交换装置中,完成预热,于高温桶中将米酒迅速加热至125℃,保持5 s。

1.3.2 电子鼻检测 PEN3型电子鼻各传感器的特性参数见表1<sup>[10]</sup>。精确量取10 mL米酒样品于40 mL顶空瓶内,室温密封静置30 min,将电子鼻探头插入瓶口采集顶部气体,用于分析挥发性成分。电子鼻参数<sup>[11]</sup>:采样周期1 s,冲洗100 s,调零及预采样5 s,检测80 s,载气与进样流速300 mL/min。选取58~60 s检测数据进行分析,并做3次平行试验。

1.3.3 香气成分萃取 采用HS-SPME法<sup>[12]</sup>。分别将待测酒样稀释5倍,取6 mL稀释液和1.0 g NaCl于萃取瓶中,密封,将老化的萃取针插入萃取瓶。45℃水浴5 min后推出萃取针头,顶空萃取30 min后将萃取头插入GC-MS进样口,解吸5 min。

#### 1.3.4 GC-MS分析

(1) GC条件:DB-wax 毛细管柱(30 m×0.25 mm×

表1 电子鼻传感器特性参数

Table 1 Characteristic parameters of electronic nose sensors

| 序号  | 传感器 | 性能描述       |
|-----|-----|------------|
| R1  | W1C | 芳香成分苯类     |
| R2  | W5S | 对氮氧类化合物灵敏  |
| R3  | W3C | 氨类,对芳香成分灵敏 |
| R4  | W6S | 主要对氢化物有选择性 |
| R5  | W5C | 短链烷烃类芳香成分  |
| R6  | W1S | 对甲基类灵敏     |
| R7  | W1W | 对无机硫化物灵敏   |
| R8  | W2S | 对醇类、醛酮类灵敏  |
| R9  | W2W | 有机硫化物      |
| R10 | W3S | 烷烃         |

0.25  $\mu\text{m}$ );柱箱温度 40  $^{\circ}\text{C}$ ;进样口温度 250  $^{\circ}\text{C}$ ;升温程序:40  $^{\circ}\text{C}$ 保持 5 min,以 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 220  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 2.5 min,以 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至 250  $^{\circ}\text{C}$ ,保持 2.5 min;载气(He);流速 1.00 mL/min;压力 53.5 kPa;进样量 1  $\mu\text{L}$ ;不分流。

(2) MS 条件:电子电离源;离子源温度 230  $^{\circ}\text{C}$ ;溶剂延迟时间 3 min;质量扫描范围 29~400  $m/z$ ;扫描速率 1 000  $\mu\text{s}$ ;接口温度 260  $^{\circ}\text{C}$ 。

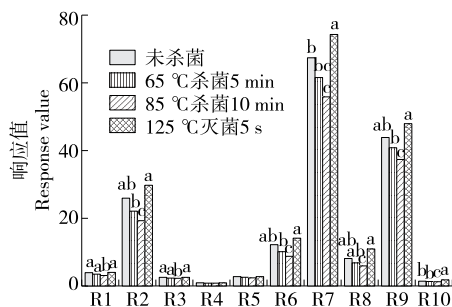
1.3.5 萃取定性定量分析 通过计算机谱库(NIST 05/NIST 05s)进行初步检索,与标准质谱相对照进行定性分析,以 2-辛醇为内标,用内标法进行半定量计算。

1.3.6 数据统计与分析 使用 Excel 2019 软件统计数据;使用 SPSS 26.0 软件进行数据显著性分析;使用 Winmuster 软件进行电子鼻数据的 PCA 分析、载荷分析和 LDA 分析;采用 GraphPad Prism 10.0 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 电子鼻传感器响应值变化

由图 2 可知,传感器 R7(W1W)、R9(W2W)、R2(W5S)、R6(W1S)、R8(W2S)呈现出较高的响应强度,其



字母不同代表样品之间存在显著性差异( $P < 0.05$ )

图2 不同热杀菌米酒挥发性成分的传感器响应值

Figure 2 Sensor response values of volatile compounds of different heat-sterilized rice wines

中 R7(W1W)、R9(W2W)、R2(W5S)的  $G/G_0$  为 19~55,分别对无机硫化物、有机硫化物、氮氧化合物具有显著敏感性;其余传感器的响应值相对较低(0~5),与彭旭怡等<sup>[13]</sup>的结果基本一致。表明电子鼻对样品中的芳香族化合物、苯类、氨类物质、氢化物及烷烃类成分响应较弱,可能是样品中该类物质含量较低。

不同样品的挥发性成分对传感器的敏感性表现出相似规律,但各传感器的响应强度存在一定差异。除 R4 和 R5 外,经 85  $^{\circ}\text{C}$  杀菌 30 min 的样品与未杀菌的相比均显著下降( $P < 0.05$ )。R2、R6、R7、R8、R9 显示样品经 125  $^{\circ}\text{C}$  灭菌 5 s 后,响应值显著上升( $P < 0.05$ )。综上,经不同热杀菌处理的样品存在挥发性成分的差异变化,从而影响米酒的整体风味。

### 2.2 电子鼻结合 PCA 区分不同热杀菌米酒

由图 3(a)可知,在相关性矩阵模式下:PC1 贡献率为 99.74%,PC2 贡献率为 0.19%,总贡献率为 99.98% $>$ 85%,表明经不同热杀菌处理后的米酒样品,其风味特征彼此独立,且两个主成分能够充分代表样品挥发性风味的关键特性。每组样品的测定数据均可聚集成团,表明电子鼻数据具备良好的稳定性与重复性。未杀菌米酒与 3 种热杀菌米酒香气成分区域无交叉,说明热杀菌处理导致

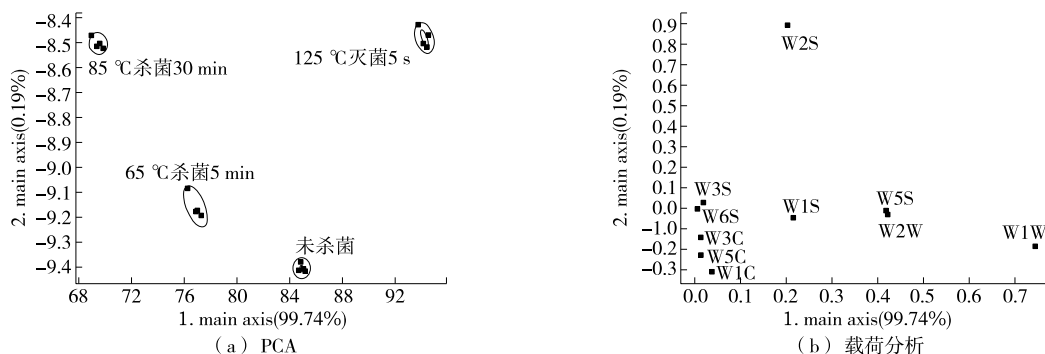


图3 不同热杀菌米酒电子鼻PCA和载荷分析图

Figure 3 PCA and load analysis of electronic nose of different heat-sterilized rice wines

样品间呈现出不同的风味特征。PCA 法可将 4 种样品米酒的香气物质完全区分,未杀菌米酒和 65 °C 杀菌 5 min 的米酒距离最近,其风味最相近。

在载荷分析图中,样品区分贡献率与各个传感器的坐标位置一一对应,传感器位置与坐标原点距离越远,对样品区分贡献率就越大,反之则越小<sup>[14]</sup>。由图 3(b)可知, W1W 对 PC1 贡献率最大, W2S 对 PC2 贡献率最大。W2S、W1W、W5S、W2W 和 W1S 距离原点较远,表明电子鼻区分不同热杀菌米酒的关键为醇类、醛酮类、有机硫化物、氮氧化合物和甲基类成分,与传感器响应值分析结果相一致。85 °C 杀菌 30 min 米酒的香气特性与其他 3 种米酒的差异主要体现在醇类和醛酮类物质中; 125 °C 灭菌 5 s 的米酒与其他 3 种米酒的差异主要体现在无机硫化物中; 65 °C 杀菌 5 min 和未杀菌米酒与其他两种米酒的差异主要体现在甲基类、氮氧化合物及有机硫类物质中。此外, W1C、W3C、W6S、W5C、W3S 传感器响应值差异较小,可能是热杀菌对该类挥发性组分的影响较小。

### 2.3 电子鼻线性判别分析 LDA 分析

由图 4 可知, PC1 贡献率为 71.76%, PC2 贡献率为 27.77%, 累计贡献率为 99.53%, 几乎反映了样品全部信息且 4 组样品之间无交叉, 样品区分明显。从各组样品的空间距离来看, 65 °C 杀菌 5 min 米酒与未杀菌米酒的距离最为接近, 125 °C 灭菌 5 s 和 85 °C 杀菌 30 min 与未杀菌米酒

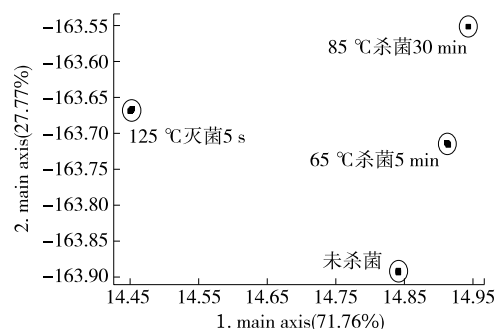


图 4 不同热杀菌米酒电子鼻 LDA 分析图

Figure 4 LDA analysis of electronic nose for different heat-sterilized rice wines

之间的距离较大,低温处理有利于保留样品原风味成分,与吴林等<sup>[15]</sup>的结论一致。说明 65 °C 杀菌 5 min 米酒的风味成分与未杀菌米酒最为接近,与 PCA 结果一致; 125 °C 灭菌 5 s 和 85 °C 杀菌 30 min 明显改变了米酒的原风味。

### 2.4 热杀菌前后米酒香气成分的总离子流图

由图 5 可知, 4 组米酒样品香气组分种类相似, 但各类物质的相对含量有差异, 含量最高的香气组分为酯类, 其次为醇类和酸类。其中, 65 °C 杀菌 5 min 的米酒与未杀菌米酒香气组分及相对含量最为相似, 125 °C 灭菌 5 s 的米酒样品与其差异最大。姬中伟等<sup>[16]</sup>研究表明, 高温处理会导致黄酒中部分热敏性香气成分分解和小分子香味物

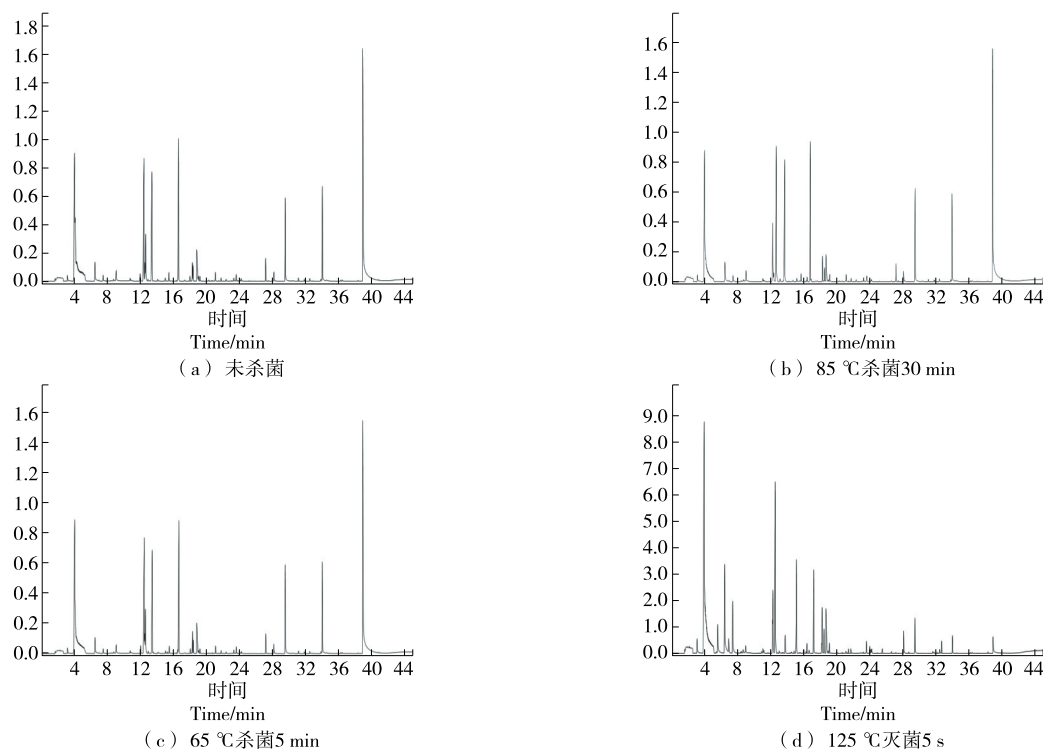


图 5 米酒香气成分的 GC-MS 总离子流图

Figure 5 GC-MS total ion chromatogram of aroma components of rice wine

质逸散。125℃灭菌5 s属于高温处理,或许是该组米酒香气成分与其他组差异最大的原因之一,高温使一些热敏性香气成分分解,从而改变了米酒香气成分的相对含量。

2.5 HS-SPME-GC-MS测定热杀菌前后米酒香气物质

由图6可知,未杀菌、65℃杀菌5 min、85℃杀菌30 min和125℃灭菌5 s米酒样品中分别检出65,68,62,71种挥发性风味物质。从各化合物种类数量比较来看,未杀菌米酒与65℃杀菌5 min和85℃杀菌30 min的米酒样品较为接近,125℃灭菌5 s的米酒样品中酯类化合物与醇类化合物种类均高于其他米酒样品,说明经短时高温杀菌的米酒产生的酯类和醇类物质的种类与低温杀菌米酒在香气上更加复杂多样。

由表2可知,4组米酒中共检出106种挥发性风味物质。85℃杀菌30 min和125℃灭菌5 s的米酒样品中挥发性风味物质总质量浓度分别为8.74,7.26,6.70,4.74 mg/L。

表2 热杀菌前后米酒香气成分的GC-MS鉴定结果<sup>†</sup>

| 种类 |                 | 质量浓度/(μg·L <sup>-1</sup> ) |               |                 |              |
|----|-----------------|----------------------------|---------------|-----------------|--------------|
|    |                 | 未杀菌                        | 65℃杀菌5 min    | 85℃杀菌30 min     | 125℃灭菌5 s    |
| 醇类 | 乙醇              | 1 568.41±166.52            | 1 665.01±5.09 | 2 397.91±254.82 | 905.84±85.63 |
|    | 异丁醇             | 16.62±2.31                 | 13.80±0.91    | 12.46±0.38      | 11.98±0.62   |
|    | S(-)-2-甲基-1-丁醇  | —                          | —             | —               | 60.65±2.97   |
|    | 2-甲基丁醇          | 104.53±7.79                | —             | —               | —            |
|    | 异戊醇             | 365.34±12.53               | 342.99±10.52  | 268.33±15.58    | 237.97±21.57 |
|    | 正己醇             | 20.10±1.96                 | 17.49±1.57    | 17.13±1.68      | 31.03±2.61   |
|    | 反式-3-己烯-1-醇     | —                          | —             | —               | 6.43±0.77    |
|    | 叶醇              | —                          | —             | —               | 193.74±5.99  |
|    | 正庚醇             | 32.63±1.82                 | 27.94±2.83    | 8.12±0.72       | 7.04±0.53    |
|    | 2-乙基己醇          | —                          | —             | —               | 3.56±0.51    |
|    | 芳樟醇             | 4.11±0.27                  | 3.09±0.76     | 2.34±0.29       | 8.10±0.79    |
|    | 正辛醇             | 17.96±0.89                 | 13.86±0.44    | 11.94±1.93      | 9.41±0.52    |
|    | 反式-(2-乙基环戊基)甲醇  | 13.84±1.02                 | 10.69±1.33    | 7.86±1.57       | —            |
|    | 4-萜烯醇           | —                          | —             | —               | 0.80±0.09    |
|    | 1-壬醇            | 14.67±0.82                 | 11.42±0.72    | 11.24±1.03      | 9.55±1.29    |
|    | (5-乙基环戊-1-烯基)甲醇 | 7.43±0.51                  | 6.67±0.85     | 5.60±0.63       | —            |
|    | α-松油醇           | —                          | —             | —               | 1.61±0.21    |
|    | 正癸醇             | 1.85±0.16                  | 1.44±0.11     | —               | 1.11±0.13    |
|    | 苯甲醇             | —                          | —             | —               | 4.39±0.62    |
|    | 苯乙醇             | 595.68±22.21               | 528.44±21.57  | 376.80±8.26     | 201.99±7.49  |
| 酯类 | 反式-橙花叔醇         | —                          | —             | —               | 2.60±0.19    |
|    | 十一甘醇            | —                          | —             | 0.13±0.02       | —            |
|    | 乙酸乙酯            | 491.52±31.58               | 473.05±18.12  | 398.25±11.96    | 421.62±25.89 |
|    | 丁酸甲硫醇酯          | —                          | —             | —               | 7.28±0.94    |
|    | 丁酸乙酯            | 182.06±12.80               | 127.41±13.52  | 111.18±6.49     | 319.33±17.59 |

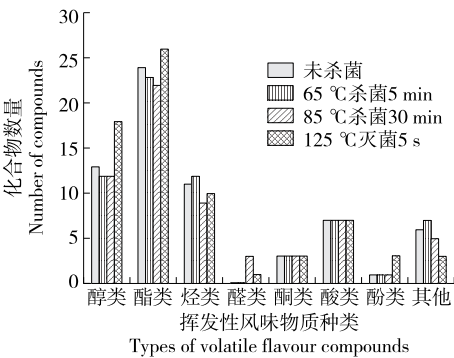


图6 不同热杀菌处理后米酒挥发性物质种类  
Figure 6 Volatile compounds of rice wine after different thermal sterilization treatments

续表 2

| 种类 | 名称                    | 质量浓度/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) |                |                 |               |
|----|-----------------------|------------------------------------------|----------------|-----------------|---------------|
|    |                       | 未杀菌                                      | 65 °C 杀菌 5 min | 85 °C 杀菌 30 min | 125 °C 灭菌 5 s |
| 酯类 | 乙酸异戊酯                 | 95.94±5.49                               | 65.63±6.17     | 59.27±3.59      | 35.61±0.18    |
|    | 己酸乙酯                  | 1 332.52±122.71                          | 932.47±91.25   | 786.88±25.48    | 584.51±72.59  |
|    | 丁酸异戊酯                 | 1 127.67±109.26                          | 825.77±49.17   | 656.80±18.26    | 423.70±53.77  |
|    | 乙酸己酯                  | —                                        | —              | —               | 49.67±5.11    |
|    | 乙酸叶醇酯                 | 20.85±1.58                               | 16.49±3.71     | 12.57±2.69      | 235.19±10.26  |
|    | 庚酸乙酯                  | 55.02±3.49                               | 40.07±3.89     | 32.11±4.15      | 2.35±0.35     |
|    | 己酸异丁酯                 | —                                        | —              | 1.58±0.23       | —             |
|    | 己酸丙烯酯                 | 1 333.58±133.23                          | 924.38±30.26   | 729.23±22.39    | —             |
|    | 辛酸乙酯                  | 87.05±7.25                               | 63.60±7.78     | 47.48±7.57      | 54.54±6.43    |
|    | 甲酸庚酯                  | 28.23±4.17                               | —              | —               | —             |
|    | 山梨酸乙酯                 | 9.21±0.88                                | 4.61±0.56      | —               | —             |
|    | 2,4-己二烯酸乙酯            | 7.97±1.25                                | 5.44±0.72      | —               | —             |
| 酯类 | 3-羟基丁酸乙酯              | —                                        | —              | 1.05±0.11       | —             |
|    | 壬酸乙酯                  | 48.84±6.81                               | 37.81±6.98     | 26.08±5.54      | 6.29±1.03     |
|    | 顺-3-己烯基丁酯             | —                                        | —              | —               | 24.43±2.59    |
|    | 癸酸乙酯                  | 39.13±2.62                               | 34.20±2.11     | 28.40±2.45      | 28.48±3.05    |
|    | 己酸叶醇酯                 | —                                        | —              | —               | 15.39±1.79    |
|    | 苯甲酸乙酯                 | 5.68±0.63                                | 3.83±0.15      | —               | 1.54±0.11     |
|    | 乙酸苄酯                  | —                                        | —              | —               | 10.52±0.89    |
|    | 菠萝酯(环己基丙烯酸丙酯)         | 123.79±8.19                              | 92.55±4.56     | 63.98±4.53      | 2.84±0.78     |
|    | 乙酸苯乙酯                 | 4.29±0.59                                | 4.08±0.58      | —               | —             |
|    | 月桂酸乙酯                 | —                                        | —              | 4.29±0.48       | 6.81±0.89     |
|    | 异戊酸 2-苯乙酯             | 18.65±3.64                               | 13.73±0.46     | 8.04±1.20       | 1.13±0.34     |
|    | 十四酸乙酯                 | —                                        | —              | —               | 0.85±0.15     |
|    | (E)-2-苯基-3-丙烯酸甲酯      | 1.70±0.61                                | 1.30±0.20      | —               | 25.89±1.13    |
|    | 肉桂酸甲酯                 | 1.70±0.17                                | 1.33±0.13      | 1.30±0.34       | —             |
|    | 反式肉桂酸乙酯               | —                                        | —              | —               | 0.80±0.07     |
|    | R- $\gamma$ -癸内酯      | —                                        | —              | —               | 57.93±2.59    |
|    | 异硫氰酸-2-苯乙酯            | —                                        | —              | 1.17±0.09       | —             |
|    | 棕榈酸乙酯                 | 7.01±1.11                                | 5.83±0.45      | 3.26±0.29       | 1.88±0.21     |
| 烯烃 | 椰子醛                   | 10.46±1.09                               | 8.79±0.77      | 6.32±0.97       | —             |
|    | (+)-柠檬烯               | 22.41±1.57                               | 18.07±1.57     | 16.63±2.01      | 3.90±0.51     |
|    | 环辛四烯                  | —                                        | —              | —               | 3.23±0.39     |
|    | (Z)-1,3-己二烯-3-乙基-2-甲基 | —                                        | 0.95±0.18      | —               | —             |
|    | 反式石竹烯                 | —                                        | —              | —               | 1.25±0.42     |
|    | $\alpha$ -姜黄烯         | 2.48±0.51                                | 2.51±0.49      | —               | —             |
|    | $\beta$ -红没药胺         | 1.74±0.23                                | 1.64±0.18      | 0.93±0.07       | —             |
|    | 甘菊蓝                   | 1.72±0.17                                | —              | —               | —             |
|    | 萘                     | —                                        | 0.93±0.06      | —               | —             |
| 醛类 | 正壬醛                   | —                                        | —              | 5.25±0.75       | —             |
|    | 苯甲醛                   | —                                        | —              | 5.13±0.89       | —             |
|    | $\beta$ -环柠檬醛         | —                                        | 4.20±0.77      | —               | —             |
|    | 3,4-二甲基苯甲醛            | —                                        | —              | 1.41±0.15       | —             |
|    | 桃醛                    | —                                        | —              | —               | 2.11±0.25     |

续表 2

| 种类    | 名称              | 质量浓度/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) |                |                 |               |
|-------|-----------------|------------------------------------------|----------------|-----------------|---------------|
|       |                 | 未杀菌                                      | 65 °C 杀菌 5 min | 85 °C 杀菌 30 min | 125 °C 灭菌 5 s |
| 酮类    | 4-甲基-2-庚酮       | —                                        | 2.50±0.22      | —               | 2.74±0.41     |
|       | 2-辛酮            | —                                        | 2.83±0.68      | 4.52±0.57       | 1.25±0.09     |
|       | 苯乙酮             | 4.13±0.58                                | 3.65±0.39      | —               | 2.35±0.19     |
|       | 环十二酮            | —                                        | —              | —               | 2.28±0.21     |
|       | $\beta$ -二氢紫罗兰酮 | 1.83±0.39                                | 1.29±0.19      | 0.97±0.11       | —             |
|       | $\beta$ -紫罗兰酮   | 5.36±0.47                                | 4.86±0.91      | 1.60±0.22       | —             |
| 酸类    | 冰醋酸             | 301.93±15.81                             | 387.05±19.19   | 182.62±15.41    | 234.95±9.19   |
|       | 正丁酸             | 22.07±2.18                               | 20.76±3.77     | 15.32±1.87      | 5.13±0.87     |
|       | 正己酸             | 62.12±5.79                               | 54.73±6.13     | 36.42±3.28      | 56.58±5.72    |
|       | 庚酸              | —                                        | 3.75±0.45      | —               | —             |
|       | 辛酸              | 19.11±3.17                               | 15.16±2.92     | 12.94±2.11      | 12.10±1.71    |
|       | 山梨酸             | 2.12±0.18                                | 1.76±0.19      | 1.62±0.28       | —             |
|       | 正癸酸             | 9.35±1.72                                | 7.24±0.81      | 5.24±0.39       | 3.66±0.67     |
|       | 苯甲酸             | 277.08±15.79                             | 226.60±10.07   | 167.76±11.29    | 130.05±5.61   |
|       | —               | —                                        | —              | —               | —             |
| 烷烃    | 正十二烷            | —                                        | —              | —               | 4.43±0.41     |
|       | 正十三烷            | 13.59±1.26                               | 8.57±1.24      | 6.76±0.49       | 6.02±0.61     |
|       | 正十四烷            | 11.38±1.32                               | 10.38±1.09     | 4.65±0.84       | 3.80±0.13     |
|       | 正十六烷            | 3.28±0.84                                | 2.53±0.24      | 1.89±0.25       | —             |
|       | 正十七烷            | 2.53±0.45                                | 2.10±0.72      | 1.70±0.67       | —             |
|       | 3-甲基双环<4.1.0>庚烷 | —                                        | —              | —               | 1.34±0.12     |
|       | 1,3-二叔丁基苯       | 29.45±1.98                               | 23.94±1.19     | —               | 20.57±2.03    |
|       | 均四甲苯            | —                                        | —              | 1.70±0.41       | —             |
| 芳香烃   | 苯乙烯             | 14.66±1.01                               | 15.08±0.84     | 15.92±1.81      | 11.58±1.15    |
|       | 间伞花烃            | 3.59±0.47                                | 3.20±0.42      | 2.36±0.71       | 3.12±0.57     |
| 酚类    | 乙基麦芽酚           | —                                        | —              | —               | 3.10±0.81     |
|       | 4-乙基苯酚          | —                                        | —              | —               | 2.49±0.91     |
|       | 2,4-二叔丁基酚       | 1.24±0.26                                | 1.17±0.12      | 1.92±0.35       | 1.23±0.15     |
| 呋喃类   | 2-戊基呋喃          | 53.79±3.18                               | 46.41±5.12     | 42.15±2.64      | 5.96±0.84     |
|       | 2,3-二氢苯并呋喃      | —                                        | —              | 3.06±0.46       | 3.92±0.77     |
| 含硫化合物 | 3-甲硫基丙醇         | 2.64±0.19                                | 2.55±0.16      | 1.92±0.19       | —             |
|       | 二甲基砒            | 1.98±0.18                                | 1.77±0.31      | 1.41±0.22       | —             |
| 其他    | 六甲基环三硅氧烷        | 0.94±0.06                                | 1.28±0.19      | —               | —             |
|       | 八甲基环四硅氧烷        | —                                        | 2.16±0.11      | —               | —             |
|       | 环五聚二甲基硅氧烷       | 13.11±1.27                               | 12.85±0.82     | 16.94±1.54      | 11.33±0.14    |
|       | 苯代丙腈            | 1.54±0.37                                | 1.76±0.35      | —               | —             |

† —表示未检。

## 2.6 热杀菌前后米酒挥发性成分主成分分析

由图 7 可知,各样品的挥发性成分可以被显著区分,PC1 和 PC2 的贡献率分别为 86.90% 和 12.42%,综合贡献率达 99.32%,说明 PC1 和 PC2 能够很好地反映米酒样品风味物质数据的信息。每个样品内部聚集有良好的重复性,样品组组间无交叉,有良好的独立性,通过挥发性成分的检测能够很好地区分不同热杀菌米酒样品。从各组样品之间的空间距离来看,未杀菌米酒与 65 °C 杀菌 5 min

的米酒样品距离最近,85 °C 杀菌 30 min 和 125 °C 灭菌 5 s 的米酒样品与未杀菌米酒距离较远,说明经过 65 °C 杀菌 5 min 的米酒样品与未杀菌米酒二者挥发性成分最为接近,与电子鼻分析结果一致。

## 2.7 热杀菌前后米酒主要呈香物质分类比较

由图 8 可知,热杀菌后米酒的主体香气及其相对含量均发生了不同程度的变化,醇类和酯类在米酒中含量占比位居前两位。醇类物质是米酒的主要香气成分,可以

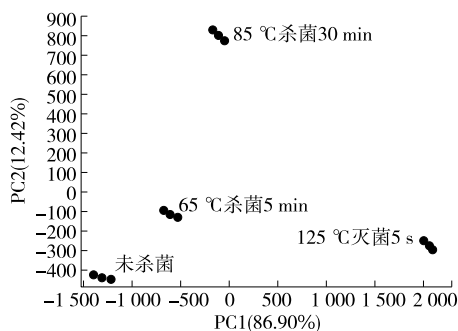


图7 不同热杀菌米酒挥发性成分主成分分析(PCA)

Figure 7 PCA analysis for volatile compounds of different heat-sterilized rice wines

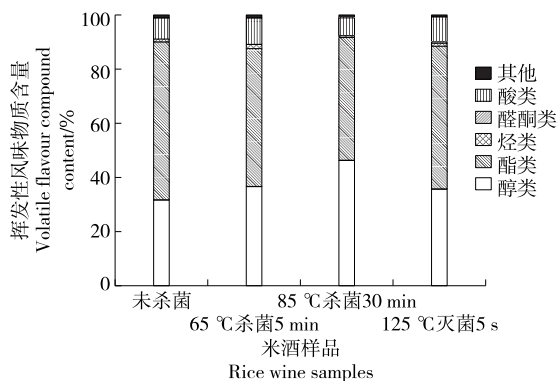


图8 米酒样品中挥发性风味物质比例图

Figure 8 Proportions of volatile flavor compounds in rice wine samples

衬托酯香,促进香气协调<sup>[17]</sup>。125 °C灭菌5 s的米酒样品杀菌前后相对含量最高的醇类物质为乙醇和异戊醇,二者之和占整体挥发性风味物质的24.12%,与糙米甜酒酿香气成分的结果相似<sup>[18]</sup>,其余3种米酒样品中相对含量最高的醇类物质为乙醇和苯乙醇,二者占比之和为24.75%~41.43%。经65 °C杀菌5 min、85 °C杀菌30 min和125 °C灭菌5 s的米酒样品中醇类物质含量较未杀菌米酒分别增加了4.79%、14.97%、4.19%。醇类物质含量的增加可能是由于加热导致某些以糖苷键结合的醇类释放以及氨基酸的脱羧脱氨反应<sup>[19]</sup>。

酯类物质一般具有果香。未杀菌米酒样品中含量相对较高的酯类物质为己酸乙酯(15.24%)、己酸丙烯酸酯(15.25%)和丁酸异戊酯(12.90%)。经65 °C杀菌5 min、85 °C杀菌30 min和125 °C灭菌5 s的米酒样品中3种酯类含量均有所下降且经125 °C灭菌5 s的米酒中未检出己酸丙烯酸酯,加热处理使得部分酯类风味损失,可能是高温下酯类发生水解,与吴琼等<sup>[20]</sup>的研究结果相吻合。经热杀菌处理后米酒中酯类香气成分均发生了损失,温度越高,损失率越大。

醛酮类也是米酒样品香气的重要组成部分。4种米酒样品中共检出5种醛类和6种酮类。醛类的气味阈值较低,且能与多种风味叠加,对米酒的整体风味起到修饰作用。酮类主要由脂质氧化生成,经过热杀菌处理相对含量呈下降趋势。酮类的阈值远高于醛类,对整体风味的贡献有限<sup>[21]</sup>。

酸是米酒中的重要呈味物质,有增加浓厚感、减少甜味以及协调其他香味物质的作用<sup>[22]</sup>。4种米酒样品中共检出8种酸类物质,其中冰醋酸的相对含量最高。热杀菌处理使得米酒中原有的酸类物质含量总体呈下降趋势。此外,4种米酒样品中共检出烷烃6种、烯烃8种、芳香烃8种,烃类物质种类较多但含量相对较少,对香气的贡献整体较小,且热杀菌过程对此类挥发性化合物的影响较大。根据各挥发性风味物质相对含量总体来看:未杀菌米酒和65 °C杀菌5 min米酒中挥发性风味物质相对含量最为相似。

### 3 结论

通过电子鼻与顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术,分析了不同热杀菌处理对米酒挥发性香气成分的影响。结果表明,传感器R7、R9、R2、R6、R8对热杀菌样品响应显著,线性判别分析可有效区分4种样品,其中65 °C杀菌5 min的米酒与未杀菌米酒的挥发性成分最相似;顶空固相微萃取—气相色谱—质谱共鉴定出106种香气化合物,醇类和酯类占比最高,热杀菌可显著改变香气化合物的种类及含量,65 °C杀菌5 min米酒的化合物总质量浓度与未杀菌组的最为接近。因此,65 °C杀菌5 min既能维持米酒原风味轮廓,又能实现有效杀菌。后续可通过开展长期贮藏试验监测风味与微生物变化、扩大样品范围验证工艺适配性、结合气相色谱—嗅闻联用技术与感官评价建立仪器数据与感官体验的关联模型,进一步完善工艺优化研究并提升其实际应用价值。

### 参考文献

- [1] HE Y, WANG X Y, LI P H, et al. Research progress of wine aroma components: a critical review[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134491.
- [2] HUANG M Z, LIU X Z, LI X, et al. Effect of *Hanseniaspora uvarum*- *Saccharomyces cerevisiae* mixed fermentation on aroma characteristics of *Rosa roxburghii* tratt, blueberry, and plum wines[J]. Molecules, 2022, 27(22): 8 097.
- [3] CHIOZZI V, AGRIPOULOU S, VARZAKAS T. Advances, applications, and comparison of thermal (pasteurization, sterilization, and aseptic packaging) against non-thermal (ultrasounds, UV radiation, ozonation, high hydrostatic pressure) technologies in food processing[J]. Applied Sciences, 2022, 12(4): 2 202.
- [4] BAO S H, YIN D Z, ZHAO Q Y, et al. Comprehensive

- evaluation of the effect of five sterilization methods on the quality of black carrot juice based on PCA, TOPSIS and GRA models[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100604.
- [5] 孙方丹, 金铁岩. 2种杀菌处理对朝鲜族米酒品质影响的研究[J]. 延边大学农学报, 2019, 41(1): 73-78, 86.
- SUN F D, JIN T Y. Research on the effect of two sterilization treatment methods on the quality of Korean rice wine[J]. Agricultural Science Journal of Yanbian University, 2019, 41(1): 73-78, 86.
- [6] 张玲. 朝鲜族米酒最适杀菌方法研究[D]. 延吉: 延边大学, 2016: 13-15.
- ZHANG L. Study on optimum sterilization method of Korean ethnic rice wine[D]. Yanji: Yanbian University, 2016: 13-15.
- [7] 熊思瑞, 王龙宇, 王云峰, 等. 超高温瞬时灭菌对米酒品质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 183-188, 218.
- XIONG S R, WANG L Y, WANG Y F, et al. Effect of ultra-high temperature transient sterilization on quality of rice wine[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 183-188, 218.
- [8] 闫海峡, 杨钧翔, 刘彦君, 等. 乳脂肪含量对超高温瞬时灭菌乳感官品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(6): 741-747.
- YAN H Y, YANG J X, LIU Y J, et al. Effects of milk fat content on the sensory quality of ultra-high temperature milk[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(6): 741-747.
- [9] POLAK N, KALISZ S, KRUSZEWSKI B. High-temperature short-time and ultra-high-temperature processing of juices, nectars and beverages: influences on enzyme, microbial inactivation and retention of bioactive compounds[J]. Applied Sciences, 2024, 14(19): 8 978.
- [10] 吴吉玲, 黄一珍, 姜鹏飞, 等. 排序法在大西洋鲭鱼脱腥工艺筛选中的应用[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(23): 73-79.
- WU J L, HUANG Y Z, JIANG P F, et al. Application of ranking test in screening of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) deodorization process[J]. Food Research and Development, 2020, 41(23): 73-79.
- [11] FANG D L, YANG W J, KIMATU B M, et al. Comparison of flavour qualities of mushrooms (*Flammulina velutipes*) packed with different packaging materials[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 1-9.
- [12] 刘浩, 赵生满, 任贵兴. 顶空固相微萃取结合气质联用分析小米黄酒与黍米黄酒的香气成分[J]. 酿酒科技, 2015(1): 115-119, 123.
- LIU H, ZHAO S M, REN G X. Analysis of flavoring components of yellow rice wine made by millet or husked millet by head-space solid phase micro-extraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2015(1): 115-119, 123.
- [13] 彭旭怡, 郑绍绍, 刘宇航, 等. 基于电子鼻、顶空气相色谱—离子迁移谱分析比较不同杀菌处理紫米甜酒酿中的挥发性成分[J]. 现代食品科技, 2021, 37(7): 259-268.
- PENG X Y, ZHENG J S, LIU Y H, et al. Analysis and comparison of volatile components in purple rice sweet wine with different sterilization treatments by electronic nose and headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 259-268.
- [14] 管照奕珠, 方芳, 王耀耀, 等. 电子鼻技术结合化学计量学快速鉴别掺假茶籽油[J]. 食品与机械, 2023, 39(6): 31-36, 179.
- GUAN Z Y Z, FANG F, WANG Y Y, et al. Rapid identification of adulterated camellia seed oil by e-nose combined with chemometrics[J]. Food & Machinery, 2023, 39(6): 31-36, 179.
- [15] 吴林, 袁雪, 马靖童, 等. 猕猴桃苹果复合果酒低温发酵工艺优化及品质分析[J]. 中国酿造, 2023, 42(12): 153-160.
- WU L, YUAN X, MA J T, et al. Optimization of low-temperature fermentation technology and quality analysis of kiwi-apple compound fruit wine[J]. China Brewing, 2023, 42(12): 153-160.
- [16] 姬中伟, 衡洋洋, 周志磊, 等. 超高温瞬时杀菌对苏派黄酒风味物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(10): 16-21.
- JI Z W, HENG Y Y, ZHOU Z L, et al. Effect of ultra-high temperature instantaneous sterilization on flavor substances in Supai Huangjiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(10): 16-21.
- [17] 黄小兰, 何旭峰, 熊双, 等. 外碳源对猕猴桃酒品质及挥发性成分的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(10): 39-45.
- HUANG X L, HE X F, X S, et al. Effects of external carbon sources on the quality and volatile components of kiwi wine[J]. Food & Machinery, 2024, 40(10): 39-45.
- [18] 苏佳佳. 糙米酒酿制备工艺及其品质特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 23-28.
- SU J J. Study on preparation technology and quality characteristics of brown rice wine[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020: 23-28.
- [19] TUFARIELLO M, CAPONE S, SICILIANO P. Volatile components of Negroamaro red wines produced in Apulian Salento area[J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 2 155-2 164.
- [20] 吴琼, 冯卫敏, 蒋和体. 不同杀菌方式对桑葚原汁品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(9): 144-149.
- WU Q, FENG W M, JIANG H T. Effect of sterilization methods on the quality of mulberry juice[J]. Food Science, 2016, 37(9): 144-149.
- [21] 何洋, 冯怡婷, 吴昊文, 等. 云南米酒中优质酵母协同米根霉发酵对米酒理化性质及风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 173-183.
- HE Y, FENG Y T, WU H W, et al. Effects of synergistic fermentation of yeast in Yunnan rice wine and rhizopus oryzae on physicochemical properties and flavor substances of rice wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 173-183.
- [22] 屠婷瑶, 向玲, 王红梅, 等. 不同地区发酵型米酒挥发性风味化合物研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(20): 176-185.
- TU T Y, XIANG L, WANG H M, et al. Study on volatile flavor compounds of fermented rice wine in different regions[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(20): 176-185.