

# 微波催陈对黑米酒中酚类、有机酸类和酯类含量的影响

## Effects of microwave aging on the content of phenols, organic acids and esters in black rice wine

汤林月<sup>1</sup> 原江锋<sup>1,2,3</sup> 赖钰婷<sup>1</sup>

TANG Lin-yue<sup>1</sup> YUAN Jiang-feng<sup>1,2,3</sup> LAI Yu-ting<sup>1</sup>

龚明贵<sup>1,2,3</sup> 孙建瑞<sup>1,2,3</sup>

GONG Ming-gui<sup>1,2,3</sup> SUN Jian-rui<sup>1,2,3</sup>

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南科技大学食品与生物工程学院微生物资源开发与利用重点实验室, 河南 洛阳 471023;

3. 河南省食品微生物工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Key Laboratory of Microbial Resources Exploitation and Utilization, Luoyang, Henan 471023, China; 3. Henan Engineering Research Center of Food Microbiology, Luoyang, Henan 471023, China)

**摘要:**目的: 解决自然陈酿过程耗时长、成本高的问题。

**方法:**采用不同的微波功率、时间和温度对黑米酒进行处理, 对微波技术处理后的黑米酒中主要酚类、有机酸类和酯类物质的含量进行分析。**结果:**微波处理可以增加总酯、原儿茶酸、没食子酸、丁香酸、乙酸、戊酸乙酯、乙酸乙酯的含量, 降低总酚、总酸、咖啡酸、柠檬酸、酒石酸、乳酸和乳酸乙酯的含量, 对草酸、苹果酸的含量影响较小。**结论:**采用 100 W、40 °C 和 3 min 或 6 min 微波处理能够在短时间生产出 3 类物质变化趋势与自然陈酿相似的黑米酒。

**关键词:**微波催陈; 黑米酒; 酚类; 有机酸类; 酯类

**Abstract; Objective:** This study aimed to solve the problems of time consuming and high cost in the natural aging process. **Methods:** Black rice wine was treated with different microwave power, time and temperature. The contents of main phenols, organic acids, and esters in black rice wine treated by microwave technology were analyzed. **Results:** Microwave treatment could increase

the contents of total esters, protocatechuic acid, gallic acid, syringic acid, acetic acid, ethyl valerate and ethyl acetate, reduce the contents of total phenols, total acids, caffeic acid, citric acid, tartaric acid, lactic acid and ethyl lactate, and have little effect on the contents of oxalic acid and malic acid. **Conclusion:** Three kinds of black rice wine with similar substance change trend to the natural aging can be produced in a short time, by using microwave treatment at 100 W, 40 °C, for 3 min or 6 min.

**Keywords:** microwave aging; black rice wine; phenols; organic acids; esters

黑米酒是以黑米为主要原料, 糯米、黑豆等为辅料, 甜酒曲和黄酒曲为发酵剂, 经灰霉菌和酵母菌发酵得到的低度饮料酒<sup>[1]</sup>。黑米酒富含多种营养成分, 如维生素、氨基酸、微量元素、酚类、有机酸类、酯类化合物等<sup>[2]</sup>, 且具有较强的抗氧化、抗炎症、延缓衰老、调节生理节律、预防心脑血管疾病等保健功能<sup>[3]</sup>。

与其他酒类一样, 新酿的黑米酒需要陈化过程, 在此过程中黑米酒的活性成分会发生一定变化, 使其口感、风味和色泽进一步提升。传统陈酿技术耗时长、成本高, 因而限制了黑米酒企业的发展。微波催陈是近几年发展起来的具有前景的催陈技术<sup>[4]</sup>, 已被应用于黑米酒的催陈研究中<sup>[5]</sup>。目前, 对于微波催陈的研究主要集中在微波

**基金项目:**国家自然科学基金项目(编号:31870093); 河南省青年人才托举工程项目(编号:2021HYTP027)

**作者简介:**汤林月, 女, 河南科技大学在读硕士研究生。

**通信作者:**原江锋(1978—), 女, 河南科技大学副教授, 博士。

E-mail: jiangfengyuan@163.com

**收稿日期:**2022-01-08

条件下黑米酒中酚类、黄酮类、理化特性等指标的变化; Yuan 等<sup>[6]</sup>用 EPR 研究微波诱导模型酒产生羟乙基自由基,从内在机制阐述了微波催陈的原理;王婷婷等<sup>[7]</sup>研究了微波对酒中模式蛋白氧化特性的影响;侯增超等<sup>[8]</sup>研究了微波对小分子酚酸和大分子化合物相互作用的影响;陈卓瑶等<sup>[4]</sup>研究了微波技术对黑米酒中主要活性成分、物化特性和活性的影响。

酚类物质的组成和含量不仅影响黑米酒的颜色、香气和口感等感官特性,还影响黑米酒的生理活性<sup>[9]</sup>。黑米酒的酸性特性主要由有机酸的种类、浓度及组成决定,进而影响黑米酒的口感<sup>[10]</sup>。黑米酒的香气主要由酯类物质的浓度和组成来衡量,与黑米酒的品质密切相关<sup>[3]</sup>。研究拟以黑米酒为研究对象,探究不同微波处理条件对黑米酒中主要酚类、有机酸类和酯类含量的影响,为将微波技术应用于黑米酒并改善黑米酒感官品质提供理论依据,以期解决黑米酒传统陈酿技术存在的耗时长、成本高等弊端。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

黑米酒:酿造年份为 2019 年,酒精含量为 9%(体积分数),陕西朱鹮黑米酒业有限公司;

没食子酸、原儿茶酸、咖啡酸和丁香酸:色谱纯( $\geq 98.00\%$ ),合肥博美生物科技有限责任公司;

乙酸、酒石酸、草酸、苹果酸、乳酸、柠檬酸:分析纯,中国食品药品检定研究院;

乙酸乙酯、戊酸乙酯、乳酸乙酯:分析纯,天津市德恩化学试剂有限公司;

Folin-Ciocalteu 试剂、碳酸钠、氢氧化钠、盐酸、无水乙醇、磷酸二氢钾、磷酸二氢钠、磷酸、甲酸:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

甲醇、乙腈:色谱纯( $\geq 98.00\%$ ),美国默克公司。

### 1.2 仪器设备

NewClassic 电子天平:ME104E 型,上海梅特勒—托利多仪器有限公司;

紫外—可见分光光度计:UV1800PC 型,上海菁华科技仪器有限公司;

高效液相色谱:1260 型,安捷伦科技有限公司;

微波合成仪:XH-MC-1 型,北京祥鹤科技发展有限公司;

大扭矩调速型蠕动泵:WT600S 型,保定雷弗流体科技有限公司;

低温冷却液循环泵:DLSB-10L 型,巩义市予华仪器有限责任公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 样品微波处理过程 采用实验空自建的封闭式磁

力搅拌控温冷却系统(CMCC-MI)<sup>[11]</sup>,将样品(50 mL)置于 CMCC-MI 系统样品瓶中,于不同微波条件下处理样品,每组重复 3 次。处理条件:设定微波温度 40 ℃、时间 3 min,在功率为 100,200,300 W 条件下处理;设定微波时间 3 min、功率 100 W,在微波温度为 30,40,50 ℃条件下处理;设定微波功率 100 W、温度 40 ℃,在微波时间为 1,3,6 min 条件下处理。

#### 1.3.2 酚类物质含量测定

(1) 总酚含量测定:Folin-酚比色法<sup>[12]</sup>。

(2) 流动相的制备:流动相 A 为 1%甲酸的水溶液,流动相 B 为 1%甲酸的甲醇溶液,经 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤,超声脱气 20 min 后使用。

(3) 酚类标准溶液的配制:精密称取原儿茶酸(2.5 mg)、没食子酸(25.0 mg)、丁香酸(5.4 mg)、咖啡酸(2.6 mg),用甲醇溶解并定容于 50 mL 容量瓶中,得原儿茶酸、没食子酸、丁香酸、咖啡酸的质量浓度分别为 0.050, 0.500, 0.108, 0.052 mg/mL 的混合标准品溶液 I。

(4) 色谱条件:色谱柱为反相液相色谱柱(安捷伦 ZORBAX SB-C<sub>18</sub>, 4.6 mm $\times$ 250 mm, 5  $\mu\text{m}$ );柱温 25 ℃,进样量 20  $\mu\text{L}$ ,流速 1.0 mL/min;检测波长 280 nm,梯度洗脱条件:0 min, 100% A;3 min, 98% A + 2% B;18 min, 90% A + 10% B;28 min, 80% A + 20% B;43 min, 70% A + 30% B;63 min, 30% A + 70% B;64 min, 0% A;69 min, 0% A;74 min, 98% A + 2% B。

#### 1.3.3 有机酸类含量测定

(1) 总酸含量测定:采用酸碱滴定法<sup>[13]</sup>,以酒石酸为当量,计算总酸含量。

(2) 流动相的制备:用 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 溶液将 0.02 mol/L 的 NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 溶液的 pH 调至 2.70,滤膜过滤并超声脱气后使用。

(3) 有机酸类标准溶液的配制:精密称取乙酸(0.88 mL)、酒石酸(40.0 mg)、柠檬酸(60.0 mg)、乳酸(0.16 mL)、草酸(1.2 mg)、苹果酸(50.0 mg)标准品后混合,用 0.02 mol/L 的 NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (pH 2.70)定容至 20 mL,经 0.45  $\mu\text{m}$  微孔滤膜过滤,得乙酸(46.2 mg/mL)、酒石酸(2.0 mg/mL)、柠檬酸(3.0 mg/mL)、乳酸(9.6 mg/mL)、草酸(0.06 mg/mL)、苹果酸(2.5 mg/mL)的混合标准品溶液 II。

(4) 色谱条件:色谱柱(TSKgel ODS-100V, 4.6 mm $\times$ 250 mm, 5  $\mu\text{m}$ );流动相 0.02 mol/L NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>,柱温 40 ℃,进样量 10  $\mu\text{L}$ ,流速 0.6 mL/min,检测波长 220 nm。

#### 1.3.4 酯类物质含量测定

(1) 总酯含量测定:采用酸碱滴定法<sup>[14]</sup>,以乙酸乙酯为当量,计算总酯含量。

(2) 流动相的制备:精确称取 6.80 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>,用纯

净水溶解并定容至 1 L,得 0.05 mol/L  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  的流动相 A;乙腈为流动相 B,滤膜过滤并超声脱气后使用。

(3) 酯类标准溶液的配制:在 25 ℃ 条件下分别量取戊酸乙酯( $\rho=0.875\text{ g/mL}$ ),乳酸乙酯( $\rho=1.031\text{ g/mL}$ )和乙酸乙酯( $\rho=0.902\text{ g/mL}$ )标准品 0.229,0.485,0.554 mL,用乙腈定容至 10 mL,所得质量浓度分别为 20,50,50 mg/mL 的混合标准品溶液Ⅲ,避光置于 4 ℃ 备用。

(4) 色谱条件:色谱柱为反相液相色谱柱(安捷伦 ZORBAX SB-C<sub>18</sub>, 4.6 mm×250 mm, 5 μm);流动相:0.05 mol/L  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液;柱温 30 ℃;进样量 20 μL;流速 1.0 mL/min;检测器波长 210 nm,采用等度洗脱程序( $V_{\text{KH}_2\text{PO}_4}:V_{\text{乙腈}}=92:8$ )。

1.3.5 标准曲线的绘制 精密吸取 0.10,0.20,0.50,1.00,2.50,5.00 mL 的混合标准品溶液Ⅰ于容量瓶,用甲醇定容至 10 mL;精密吸取 0.20,0.40,0.50,1.60,3.20 mL 的混合标准品溶液Ⅱ于容量瓶,用 0.02 mol/L 的  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  溶液定容至 20 mL;精密吸取 0.50,1.00,2.00,4.00,8.00 mL 的混合标准品溶液Ⅲ于容量瓶,用 0.05 mol/L 的  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  溶液定容至 20 mL。上述溶液分别按相应的色谱条件检测,以样品的质量浓度为横坐标(X),峰面积为纵坐标(Y),得到黑米酒中主要活性成分的标准曲线方程、相关系数和线性范围(见表 1), $R^2>0.99$ ,说明黑米酒中的主要酚类、有机酸类和酯类化合物在相应的质量浓度范围内与峰面积呈现良好的线性关系。

1.4 数据处理

以上所有试验均重复进行 3 次,使用 SPSS 24.0 对试验数据进行方差分析, $P<0.05$  表示具有显著性差异,

$P<0.01$  表示具有极显著性差异,使用 Origin 2018 软件进行相关图表绘制。

2 结果与分析

2.1 微波处理对黑米酒酚类物质的影响

黑米酒中总酚标准曲线回归方程为  $Y=13.92X-1.74$ , $R^2=0.992\ 6$ 。不同微波处理条件对黑米酒中酚类物质含量的影响如图 1 所示,黑米酒中含有较高浓度的酚类,其中原儿茶酸含量最高;经过不同微波条件处理的黑米酒,总酚和咖啡酸含量呈下降趋势,原儿茶酸、没食子酸和丁香酸含量呈上升趋势。酚类物质是黑米酒的骨架物质,参与形成浓郁的陈酿香气,可以提高酒体的结构感、抗氧化性和抗自由基能力等,但过多的酚类物质会使黑米酒的苦涩味加重,严重影响黑米酒的色泽和感官质量<sup>[15]</sup>。由图 1 可知,随着微波功率、温度和时间增加,微波处理后黑米酒中总酚含量与未处理的相比显著下降( $P<0.05$ )。总酚含量下降的原因可能是酒体中的介质在微波场下相互摩擦,诱导产生大量自由基<sup>[7]</sup>,导致酚类物质发生氧化或降解反应<sup>[11]</sup>,进而导致总酚含量下降,这与自然陈酿过程中总酚含量变化趋势一致<sup>[16-17]</sup>。

原儿茶酸是涩味与苦味的主要来源,其含量影响酒的滋味和口感<sup>[18]</sup>。由图 1 可知,黑米酒经较高功率和较长时间微波处理后原儿茶酸含量明显增加( $P<0.05$ ),由于原儿茶酸是合成某些复杂类分子如花青素的前体,在较高功率和较长时间条件处理下可能加速了这些大分子的解聚反应,导致原儿茶酸含量有所增高,从而改变了黑米酒的口感。

没食子酸与黑米酒的品质和口感密切相关<sup>[19]</sup>,其浓度、聚合度及化学结构影响酒的涩味和苦味。由图 1 可

表 1 13 种标准品的标准曲线、相关系数、线性范围

Table 1 Standard curve, correlation coefficient, linear range of 13 kinds of standards

| 物质名称 | 线性范围/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 标准曲线                  | 相关系数( $R^2$ ) |
|------|----------------------------|-----------------------|---------------|
| 没食子酸 | 5.00~250.00                | $Y=75.16X-5.45$       | 0.997 7       |
| 咖啡酸  | 0.52~26.00                 | $Y=81.56X+24.76$      | 0.996 2       |
| 丁香酸  | 1.08~54.00                 | $Y=67.29X+10.09$      | 0.998 1       |
| 原儿茶酸 | 0.50~25.00                 | $Y=41.75X+11.23$      | 0.999 8       |
| 草酸   | 0.60~9.60                  | $Y=3\ 300.60X-27.61$  | 0.993 2       |
| 酒石酸  | 20.00~320.00               | $Y=1\ 301.00X-19.06$  | 0.997 2       |
| 苹果酸  | 25.00~400.00               | $Y=552.90X-16.45$     | 0.998 2       |
| 乳酸   | 96.00~1 536.00             | $Y=348.00X-52.32$     | 0.997 2       |
| 乙酸   | 462.00~7 392.00            | $Y=252.68X+13.41$     | 0.995 5       |
| 柠檬酸  | 30.00~480.00               | $Y=660.26X-25.87$     | 0.993 3       |
| 戊酸乙酯 | 200.00~3 000.00            | $Y=468.04X+327.50$    | 0.992 9       |
| 乳酸乙酯 | 500.00~10 000.00           | $Y=1\ 149.80X+180.26$ | 0.998 1       |
| 乙酸乙酯 | 500.00~10 000.00           | $Y=631.11X-214.99$    | 0.999 3       |

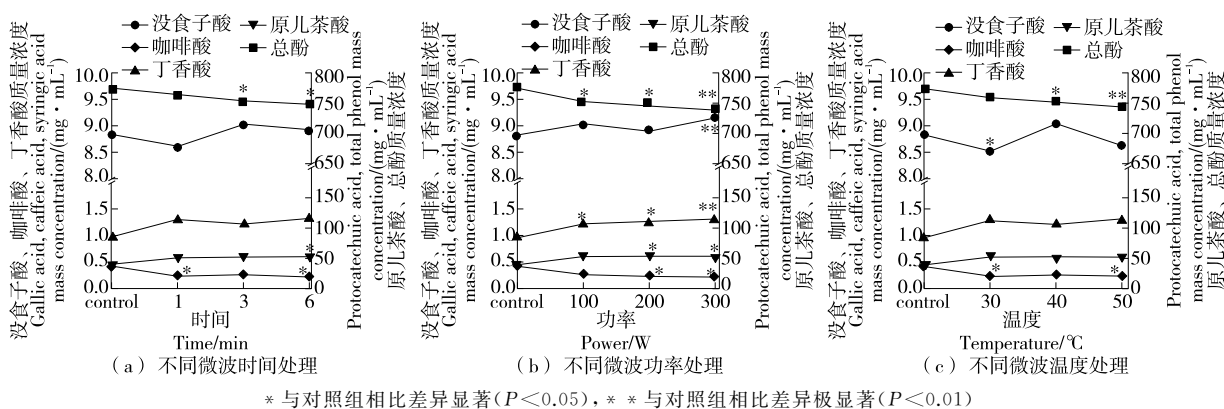


图 1 微波处理条件对黑米酒中酚类物质含量的影响

Figure 1 Effects of microwave treatment conditions on the content of phenols in black rice wine

知,在 300 W、40 °C 和 3 min 的微波条件下没食子酸含量明显增加( $P < 0.01$ ),说明在此微波处理条件下能达到较好的催陈效果,对黑米酒的口感起到关键作用。

黑米酒中含有多种抗氧化、消除自由基的花色苷单体,丁香酸作为辅色素可与花色苷单体结合产生辅色效应,使酒色度更深、色泽更稳定<sup>[20]</sup>。由图 1 可知,与未处理的黑米酒相比,经微波处理的丁香酸含量显著增加( $P < 0.05$ ),可能是因为微波场下的丁香酸花色苷聚合物发生部分降解,从而提高了黑米酒中丁香酸的含量;随着温度和时间的逐渐增加,丁香酸含量趋于稳定,说明丁香酸花色苷聚合物的降解速度和聚合速度基本一致。

咖啡酸是黑米酒中重要的酚类辅色素,可使花色苷聚合成稳定的化合物,提高花色苷的稳定性,从而影响黑米酒的色泽<sup>[21]</sup>。与未处理的黑米酒相比,经微波处理后黑米酒中咖啡酸含量呈明显下降趋势( $P < 0.05$ ),可能是因为咖啡酸与花色苷结合产生花色苷衍生物,从而提高花色苷的稳定性;随着微波功率、温度、时间的升高,咖啡酸的质量浓度逐渐趋于稳定,可能是因为咖啡酸的生成反应和咖啡酸的消耗反应处于动态平衡。由于咖啡酸辅色效果较好,在不同微波条件下咖啡酸含量的降低可以间接反映黑米酒的颜色趋于稳定,从而说明微波技术有催陈黑米酒的作用。

## 2.2 微波处理对黑米酒有机酸类物质的影响

有机酸是形成酒复合风味的主要成分,赋予酒体丰满度和酸爽感,与其他风味物质共同组成酒所特有的芳香,是酒体醇厚、优雅等风味形成的关键<sup>[22]</sup>。有机酸含量较少时酒味寡淡,可以使黑米酒变得舒适可口,若有机酸含量过高,酒味变得厚重粗糙,对喉部产生强烈的刺激性,因此有机酸的含量是评价酒体风味的重要指标之一<sup>[23]</sup>。微波处理后黑米酒中的总酸含量略低于未处理黑米酒总酸含量,可能是由于微波处理加快了黑米酒中的分子运动,黑米酒中某些挥发性有机酸挥发导致总酸浓度降低;也可能是黑米酒吸收微波能后,分子内能增加,

加速了酒体中的酯化反应,在一定程度上加速了黑米酒的熟化。从总酸含量变化来看,在功率 100 W、温度 30 °C 和较长时间微波处理条件下,总酸含量明显降低( $P < 0.05$ ),因此,采用低功率、低温和较长时间处理有利于黑米酒有机酸含量的控制。由图 2 可知,经微波处理后,黑米酒乙酸含量微弱上升;酒石酸、柠檬酸、乳酸和总酸含量呈下降趋势;草酸、苹果酸含量变化较小。

从乙酸含量变化可以看出(图 2),微波处理组中乙酸含量高于未处理组的,可能是由于微波能够诱导产生更多的自由基<sup>[6]</sup>加速了黑米酒中醇、醛、酸、酯之间的转化,导致黑米酒乙酸含量升高。

酒石酸含量在 100 W、30 °C、3 min 或者 6 min 微波条件下明显降低( $P < 0.05$ ),可能是因为吸收了微波能后的黑米酒,分子内能增加,导致较多酒石酸发生降解或以酒石酸盐结晶析出。

在 40 °C 或 50 °C 下微波处理 3 min 或 6 min 后,柠檬酸的含量降低可能是由于微波场使黑米酒分子内能增加,加速了柠檬酸的脱羧和酯化反应;较高功率的微波场诱导产生更多的自由基<sup>[6]</sup>,可能造成柠檬酸的分解速度大于合成速度。黑米酒经 6 min 微波处理后柠檬酸含量极明显降低( $P < 0.01$ ),说明长时间微波处理可以减少柠檬酸带来的酸涩感,这与自然陈酿过程中柠檬酸的变化趋势一致。

在 50 °C 时乳酸含量显著降低( $P < 0.05$ ),可能是由于较高温度的微波处理诱导黑米酒产生更多的自由基加速了乳酸的酯化反应,导致乳酸含量明显降低,因此 100 W、3 min、50 °C 微波条件有利于保持黑米酒的醇厚感。

微波处理后的黑米酒中草酸含量变化不明显。随着微波时间和温度的增加苹果酸含量呈现出先降低后增加的波动,而微波功率的变化对苹果酸含量影响较小。苹果酸对黑米酒的酸味、稳定性和品质等方面有着很大影响,在陈酿过程中部分苹果酸转化成琥珀酸造成苹果酸含量下降<sup>[24]</sup>。在 100 W、40 °C、短时间的微波处理条件

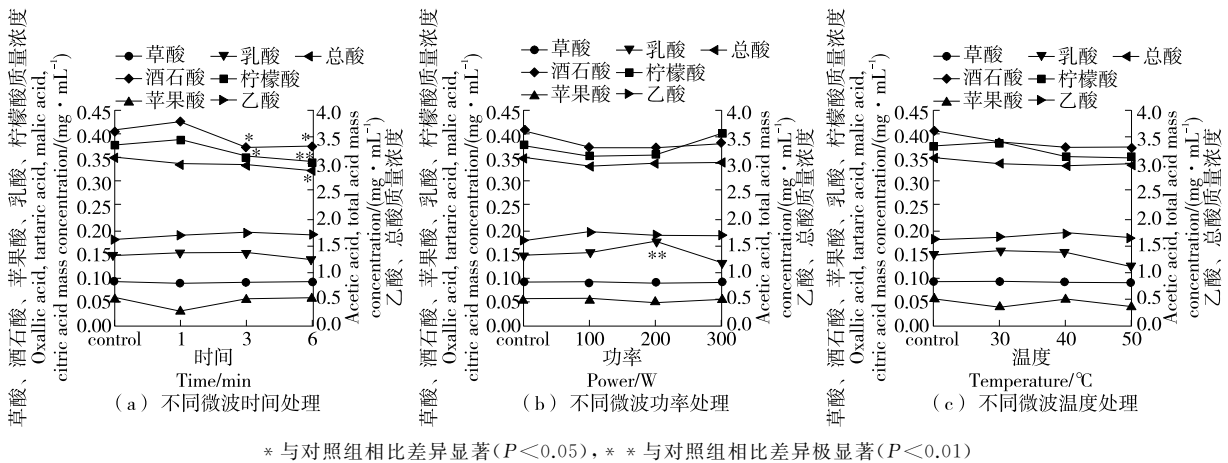


图2 微波处理条件对黑米酒中有机酸类物质含量的影响

Figure 2 Effects of microwave treatment conditions on the content of organic acids in black rice wine

下,苹果酸的含量最低,此条件符合苹果酸在陈酿过程中的含量变化趋势。

### 2.3 微波处理对黑米酒酯类物质的影响

在自然陈酿过程中,随着酒体贮藏时间的延长,总酯含量呈上升趋势<sup>[25]</sup>。由图3可知,与未经处理的黑米酒相比,微波处理后的黑米酒中总酯含量增加,并且随着微波功率、温度和时间的增加而逐步增加,可能是由于微波通过高频电磁场使黑米酒中的极性分子和水高频极化,使独立的难溶分子基团有机融合、相互渗透,加快了酒中化学反应<sup>[26]</sup>。因此,微波处理可以增加黑米酒的香气,使酒体更加浓郁。

黑米酒中酯类化合物能够丰富黑米酒香气,提高酒体品质。由图3可知,经过微波处理后的黑米酒中戊酸乙酯、乙酸乙酯和总酯含量呈上升趋势,乳酸乙酯含量呈下降趋势。

经微波处理后的黑米酒中的戊酸乙酯含量与未处理的相比极显著增加 ( $P < 0.01$ ),说明微波处理可以加速戊酸乙酯的形成,有利于增加黑米酒的香气。

随着微波时间的延长,乙酸乙酯的含量极显著增加 ( $P < 0.01$ ),可能是因为微波处理加速了乙酸与乙醇的酯化反应;低功率微波有利于乙酸乙酯的含量升高;随着微波温度的增加,乙酸乙酯含量逐渐上升,在 40 °C 时乙酸乙酯含量升高至 65.55%,但在 50 °C 时乙酸乙酯含量低于 40 °C 时的,可能是由于较高的温度条件下降解作用大于合成作用,因此造成了乙酸乙酯的含量降低。工业生产过程中采用 40 °C、短时间和低功率的微波条件来促进乙酸乙酯的形成,该条件也能够更好地改善黑米酒的感官特性、促进黑米酒的陈化。

微波处理时间和功率对乳酸乙酯含量的影响较小;乳酸乙酯的含量在不同的微波温度条件下均低于未处理的,可能在处理过程中微波能量被黑米酒吸收,加速了黑米酒的乳酸乙酯的分解,当微波温度为 30 °C 时,乳酸乙酯含量降低了 35.65%。微波温度为 40 °C 时,乳酸乙酯略微升高。因此,采用微波温度 40 °C、微波功率 200 W 有利于乳酸乙酯的形成。

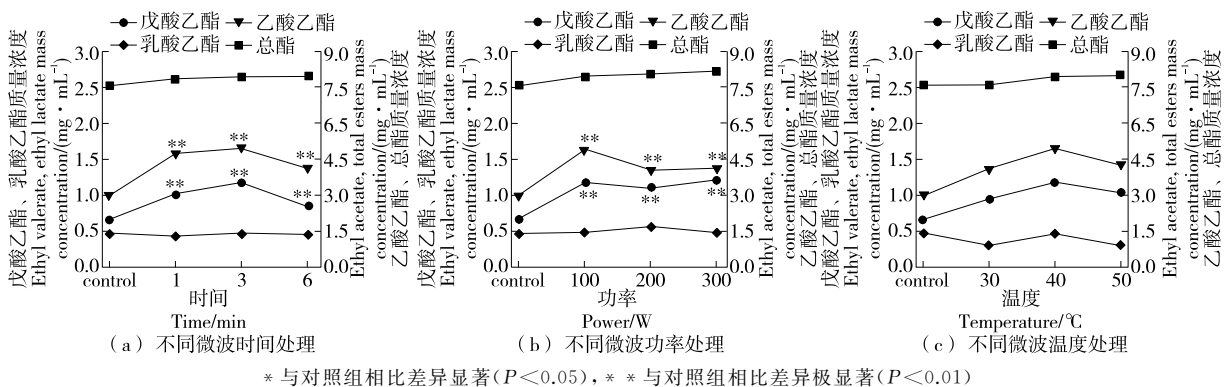


图3 微波处理条件对黑米酒中酯类物质含量的影响

Figure 3 Effects of microwave treatment conditions on the content of esters in black rice wine

### 3 结论

微波技术可以通过加速黑米酒活性成分的分解、氧化、聚合、酯化等反应快速改变黑米酒中酚类、有机酸、酯类物质以及相应的 13 个单体化合物的含量,从而快速改变黑米酒的感官品质。为了进一步科学调控黑米酒催化陈工艺后续需要对黑米酒理化特性的改变进行研究。

#### 参考文献

- [1] JIANG Li, MU Ying-chun, WEI Su, et al. Study on the dynamic changes and formation pathways of metabolites during the fermentation of black waxy rice wine[J]. Food Sci Nutr, 2020, 8(2): 2 288-2 298.
- [2] JHA P, DAS A J, DEKA S C. Optimisation of fermentation process for production of black rice wine and evaluation of its phenolic and volatile compounds[J]. J I Brewing, 2018, 124(4): 485-491.
- [3] 王玉堂, 牛雅杰, 金宇泉, 等. 黑米酒挥发性成分分析及其变化规律研究[J]. 中国酿造, 2016, 35(9): 59-63.  
WANG Yu-tang, NIU Ya-jie, JIN Yu-xiao, et al. Analysis of volatile components in black rice wine and the change rules[J]. China Brewing, 2016, 35(9): 59-63.
- [4] YUAN Jiang-feng, WANG Ting-ting, CHEN Zhuo-yao, et al. Microwave irradiation: impacts on physicochemical properties of red wine[J]. CYTA-J Food, 2020, 18(1): 281-290.
- [5] 陈卓瑶, 原江锋, 候增超, 等. 微波处理对黑米酒物理化学特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 194-199, 215.  
CHEN Zhuo-yao, YUAN Jiang-feng, HOU Zeng-chao, et al. Impacts of microwave treatment on physicochemical properties of black rice wine[J]. Food & Machinery, 2020, 36(3): 194-199, 215.
- [6] YUAN Jiang-feng, CHEN Zhuo-yao, WANG Da-hong, et al. Microwave-induced free radicals production in red wine and model wine by electron paramagnetic resonance spin trapping[J]. J Food Process Pres, 2021, 45(5): e15407.
- [7] 王婷婷, 原江锋, 汪伦记, 等. 微波对模式蛋白自由基生成及氧化特性的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 11-15, 74.  
WANG Ting-ting, YUAN Jiang-feng, WANG Lun-ji, et al. Effect of microwave on free radical production and oxidation properties of model protein[J]. Food & Machinery, 2018, 34(12): 11-15, 74.
- [8] 候增超, 原江锋, 赖钰婷, 等. 微波对没食子酸和 PPO 相互作用特性的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 68-75, 83.  
HOU Zeng-chao, YUAN Jiang-feng, LAI Yu-ting, et al. Effect of microwave on interaction between gallic acid and polyphenoloxidase[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 42(6): 68-75, 83.
- [9] WANG Yu-tang, LIU Yuan-yuan, XIAO Chun-xia, et al. Simultaneous determination of 15 phenolic constituents of Chinese black rice wine by HPLC-MS/MS with SPE[J]. J Food Sci, 2014, 79(6): C1 100-C1 105.
- [10] 王洪琳, 苏伟, 母应春, 等. HPLC 法快速检测黑糯米酒中有机酸含量[J]. 中国酿造, 2020, 39(6): 196-203.  
WANG Hong-lin, SU Wei, MU Ying-chun, et al. Rapid determination of organic acids content in black glutinous rice wine by HPLC[J]. China Brewing, 2020, 39(6): 196-203.
- [11] YUAN Jiang-feng, WANG Ting-ting, WANG Da-hong, et al. Effect of microwave on changes of gallic acid and resveratrol in a model extraction solution[J]. Food Bioprocess Tech, 2020, 13(4): 1 246-1 254.
- [12] AINSWORTH E A, GILLESPIE K M. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent[J]. Nat Protoc, 2007, 2(4): 875-877.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 葡萄酒、果酒通用分析方法: GB/T 15038—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Analysis methods of wine and fruit wine: GB/T 15038—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [14] 郭建华, 郭宏文, 邹东恢, 等. 白酒酒醅发酵过程中酶活与酯类生成的相关性分析与主成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(11): 44-49.  
GUO Jian-hua, GUO Hong-wen, ZOU Dong-hui, et al. The correlation analysis and principal component analysis between enzyme activities and esters production during fermentation of liquor fermented grains[J]. Food and Fermentation Industry, 2013, 39(11): 44-49.
- [15] 潘天全, 程伟, 张杰, 等. 一种桂花风味黑米酒香气成分的 GC-MS 分析[J]. 酿酒, 2020, 47(1): 64-67.  
PAN Tian-quan, CHENG Wei, ZHANG Jie, et al. Analysis of aroma components of a kind of Osmanthus flavor black rice wine by gas chromatography/mass spectrometry [J]. Liquor Making, 2020, 47(1): 64-67.
- [16] ÁNGELES F, R ANA S M, LOURDES G, et al. The effect of time and storage conditions on the phenolic composition and colour of white wine[J]. Food Res Int, 2005, 39(2): 220-229.
- [17] 兰玉倩, 薛洁, 江伟, 等. 黄酒陈酿过程中主要成分变化的研究[J]. 中国酿造, 2011(5): 165-170.  
LAN Yu-qian, XUE Jie, JIANG Wei, et al. Changes of main components in the process of rice wine aging[J]. China Brewing, 2011(5): 165-170.
- [18] 刘一健, 孙剑锋, 王颖. 葡萄酒酚类物质的研究进展[J]. 中国酿造, 2009(8): 5-9.  
LIU Yi-jian, SUN Jian-feng, WANG Jie. Progress of research in phenolic compounds in wine[J]. China Brewing, 2009(8): 5-9.
- [19] 回学宽, 王艳丽, 祝贺, 等. 葡萄酒中酚类物质的研究进展[J]. 中国果菜, 2019, 39(11): 65-71, 79.  
HUI Xue-kuan, WANG Yan-li, ZHU He, et al. Progress in polyphenol of wines[J]. China Fruit & Vegetable, 2019, 39(11): 65-71, 79.

(下转第 20 页)