

# 浓香型白酒糟黄酮的超声波—微波联合双水相提取工艺优化与体外活性研究

钱跃飞<sup>1,2</sup> 王 凤<sup>1,2</sup> 王玉虹<sup>1</sup> 龙淳渝<sup>1,2</sup> 张宇轩<sup>1,2</sup>

(1. 邵阳学院食品与化学工程学院, 湖南 邵阳 422000;

2. 生态酿酒技术与应用湖南省高校重点实验室, 湖南 邵阳 422000)

**摘要:** [目的]旨在缩短浓香型白酒糟黄酮的提取时间和提高黄酮提取量, 鉴定黄酮的成分, 并明确该类黄酮的功效强弱。[方法]以浓香型白酒糟为原料, 采用超声波—微波联合双水相提取法, 以总黄酮提取量为指标, 通过响应面试验对提取工艺进行优化; 利用超高效液相色谱—三重四极杆串联质谱(UPLC-QQQ-MS)鉴定酒糟黄酮的成分, 并检测黄酮对抗氧化试剂、 $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的作用效果。[结果]酒糟黄酮的最佳提取工艺条件为: 液料比 49:1 (mL/g), 双水相乙醇体积分数 66%, 硫酸铵用量 2.5 g, 超声功率 120 W, 超声时间 25 min, 微波功率 385 W, 微波时间 42 s; 此条件下酒糟黄酮提取量为 14.75 mg/g。UPLC-QQQ-MS 鉴定结果显示, 酒糟黄酮中含有 30 种不同黄酮成分, 其中桔皮素含量最高(8 745.58 ng/g), 有 9 种黄酮兼具抗氧化和降糖降脂功效。活性检测显示, 酒糟黄酮对 DPPH 自由基、ABTS<sup>+</sup> 自由基和羟自由基的清除率分别为 81.78%, 92.53%, 81.37%, 对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶的 IC<sub>50</sub> 值分别为 0.42, 0.32, 3.70 mg/mL。[结论]与常规的超声提取法比较, 超声波—微波联合双水相法可缩短酒糟黄酮提取时间并提高黄酮提取量, 所提取黄酮具有较强的抗氧化和降糖降脂活性, 表明酒糟黄酮具备较大的应用潜能。

**关键词:** 浓香型白酒糟; 黄酮; 超声波; 微波; 双水相提取; 抗氧化; 降糖; 降脂

## Ultrasound-microwave-assisted aqueous two-phase extraction process optimization and *in vitro* activity of flavonoids from Nongxiangxing Baijiu Zaopei

Qian Yuefei<sup>1,2</sup> Wang Feng<sup>1,2</sup> Wang Yuhong<sup>1</sup> Long Tingyu<sup>1,2</sup> Zhang Yuxuan<sup>1,2</sup>

(1. School of Food Science and Chemical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000, China;

2. Hunan Provincial Higher Education Key Laboratory of New Technology and Application for Ecological Baijiu Production, Shaoyang, Hunan 422000, China)

**Abstract:** [Objective] To shorten the extraction time and increase the extraction yield of flavonoids from Nongxiangxing Baijiu Zaopei, and to identify the components and clarify the effectiveness of these flavonoids. [Methods] Nongxiangxing Baijiu Zaopei is used as the raw material and treated by the ultrasound-microwave-assisted aqueous two-phase extraction. With the total flavonoid extraction yield as the indicator, the extraction process is optimized by a response surface experiment. Then, the composition of the flavonoids from Zaopei is identified by ultra-high performance liquid chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry (UPLC-QQQ-MS). Additionally, their effects on antioxidant reagents,  $\alpha$ -amylase, and  $\alpha$ -glucosidase are detected. [Results] The optimal extraction conditions for flavonoids

**基金项目:** 国家自然科学基金(编号:32402103); 湖南省自然科学基金青年基金项目(编号:2022JJ40410); 研究生科研创新项目(编号: CX2024SY025)

**通信作者:** 王凤(1989—), 女, 邵阳学院副教授, 博士。E-mail: 411517552@qq.com

**收稿日期:** 2025-05-30 **改回日期:** 2026-06-07

**引用格式:** 钱跃飞, 王凤, 王玉虹, 等. 浓香型白酒糟黄酮的超声波—微波联合双水相提取工艺优化与体外活性研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 133-142.

**Citation:** Qian Yuefei, Wang Feng, Wang Yuhong, et al. Ultrasound-microwave-assisted aqueous two-phase extraction process optimization and *in vitro* activity of flavonoids from Nongxiangxing Baijiu Zaopei[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 133-142.

from Zaopei are as follows: a liquid-to-material ratio of 49:1 (mL/g), an ethanol volume fraction of 66% in the aqueous two-phase system, 2.5 g of ammonium sulfate, ultrasonic treatment at 120 W for 25 min, followed by microwave treatment at 385 W for 42 s. Under these conditions, the flavonoid extraction yield reaches 14.75 mg/g. Thirty different flavonoid components are found in the flavonoids from Zaopei, with tangeretin being the most abundant (8 745.58 ng/g). Nine of these flavonoids are reported to possess both antioxidative and hypoglycemic/hypolipidemic effects. Activity assays show that the free radical scavenging activities of flavonoids from Zaopei against DPPH, ABTS<sup>+</sup>, and hydroxyl are 81.78%, 92.53%, and 81.37%, respectively. Their IC<sub>50</sub> values against  $\alpha$ -amylase,  $\alpha$ -glucosidase, and pancreatic lipase are 0.42 mg/mL, 0.32 mg/mL, and 3.70 mg/mL, respectively. [Conclusion] Compared with conventional ultrasound extraction, the ultrasound-microwave-assisted aqueous two-phase method significantly shortens the extraction time and increases the extraction yield of flavonoids from Zaopei. The extracted flavonoids demonstrate strong antioxidant, hypoglycemic, and hypolipidemic activities, indicating high application potential.

**Keywords:** Nongxiangxing Baijiu Zaopei; flavonoid; ultrasound; microwave; aqueous two-phase extraction; antioxidant activity; hypoglycemic activity; hypolipidemic activity

中国白酒是世界六大蒸馏酒之一。白酒酿制后会产生大量的原料固体残渣,称为酒糟或丢糟。据报道<sup>[1]</sup>,2024年中国规模以上酿酒企业的白酒总产量超过 $4.145 \times 10^9$  L,产生的酒糟约为 $1.2 \times 10^7$  t,而目前酒糟大部分被用作动物饲料,附加值低,综合应用性较差,因此酒糟的合理高值化利用是各酿酒企业亟待解决的问题。且酿酒原料的差异,对不同酒糟中功效成分的提取、鉴定及功效判别至关重要。研究发现酒糟中含有多种功效成分,包括活性肽、多糖和黄酮等,尤其是黄酮类被报道有抗氧化、降血糖以及降血脂等作用<sup>[2-4]</sup>,具有较高的应用潜力。因此,近年来有研究人员着手从白酒酒糟中提取酒糟黄酮,其中主要用到的提取方法有微波辅助法、超声辅助法、有机溶剂法等,但酒糟黄酮的提取时间长且提取量较低,只能达到4.73~7.37 mg/g<sup>[5-7]</sup>,同时对于酒糟黄酮的成分分析和功能强弱不够明确。研究<sup>[8-9]</sup>表明,乙醇—硫酸铵双水相法在物质的提取和分离方面表现出良好的特点,通过双水相中无机相的盐析效应能够将蛋白等物质沉淀或分离,同时促进酒糟黄酮向有机相迁移,提高酒糟黄酮的提取量,再辅以超声波和微波能够缩短酒糟黄酮的提取时间。

研究拟利用超声波—微波联合乙醇—硫酸铵双水相法来提取酒糟黄酮,通过单因素和响应面法优化提取工艺,进一步利用超高效液相色谱—三重四极杆串联质谱(UPLC-QQQ-MS)法将纯化的酒糟黄酮进行组分分析,根据成分特点对其功效作用进行验证研究,以为酒糟实现高值化利用提供一定的理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂材料与仪器

#### 1.1.1 原料与试剂

酒糟:浓香型酒糟,湖南湘窖酒业有限公司;

芦丁、过硫酸钾、4-硝基苯丁酸酯、HPD400大孔树脂、奥利司他、维生素C(V<sub>C</sub>):分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;

DPPH、ABTS:纯度 $\geq 98\%$ ,合肥巴斯夫生物科技有限公司;

水杨酸、对硝基苯基- $\alpha$ -D-吡喃葡萄糖苷:分析纯,大连美仑生物技术有限公司;

$\alpha$ -葡萄糖苷酶、胰脂肪酶:2万U/g,大连美仑生物技术有限公司;

$\alpha$ -淀粉酶:4 000 U/g,大连美仑生物技术有限公司;

阿卡波糖:分析纯,酷尔化学科技(北京)有限公司;

甲醇、乙腈:色谱级,美国Sigma公司;

黄酮标品:色谱级,上海源叶生物科技有限公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

高速冷冻离心机:TGL-16型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

可见分光光度计:722型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

电热恒温水浴锅:DZKW-4型,北京中兴伟业世纪仪器有限公司;

全波长酶标仪:EPOCH型,BioTek Instruments, Inc;

液相色谱:Waters Acquity UPLC H-Class型,美国Waters公司;

质谱:AB SCIEX5500 QQQ-MS Triple Quad™ 5500型,美国SCIEX公司;

旋转蒸发器:RE-52AA型,上海雅荣生化设备仪器有限公司。

## 1.2 试验方法

1.2.1 芦丁标准曲线的绘制及总黄酮提取量测定 参照马雪洁等<sup>[10]</sup>的方法并加以修改。配制质量浓度为0.2 mg/mL的芦丁标准溶液,分别吸取标准溶液0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mL于5 mL的试管中,并在各试管中加入体积分数为80%的乙醇至2.5 mL,摇匀。先量取0.25 mL质量浓度为5 g/100 mL的NaNO<sub>2</sub>溶液加入试管,混合均匀后静置6 min,再量取0.25 mL质量浓度为10 g/100 mL的Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>溶液加入试管,混合均匀后静置6 min,最后

加入 2 mL 质量浓度为 4 g/100 mL 的 NaOH 溶液混合均匀静置 15 min。并且做空白对照,测定 510 nm 条件下的吸光值,经过分析可得芦丁质量浓度  $C$  (mg/mL) 与吸光度  $A$  之间的关系式,建立标准曲线。吸取 1.0 mL 酒糟黄酮提取液于 5 mL 比色管中,按前述方法进行操作,同时做空白对照,在 510 nm 波长处测定吸光度值。按式(1)计算样品液中总黄酮提取量。

$$Y = \frac{N \times C \times V}{m}, \quad (1)$$

式中:

$Y$ ——总黄酮提取量,mg/g;

$N$ ——稀释的倍数;

$C$ ——根据标准曲线回归方程计算黄酮类成分质量浓度,mg/mL;

$V$ ——吸取的稀释滤液体积,mL;

$m$ ——酒糟质量,g。

1.2.2 单因素试验 在原料质量 0.22 g,乙醇体积分数 65%,液料比 45:1 (mL/g),硫酸铵用量 4 g,超声时间 40 min,超声功率 120 W,超声温度 40 °C,微波功率 385 W,微波时间 45 s 的条件下,采用控制变量法进行单因素试验。分别设置乙醇体积分数梯度 35%,50%,75%,80%,95%;液料比梯度 75:1,60:1,45:1,30:1,15:1 (mL/g);硫酸铵用量梯度 1.0,2.5,4.0,5.5,7.0 g;超声时间 10,25,40,55,70 min;微波时间 15,30,45,60,70 s,分析乙醇体积分数、液料比、硫酸铵用量、超声时间和微波时间 5 个因素对酒糟黄酮提取量的影响。

1.2.3 Plackett-Burman 试验 在单因素试验的基础上,确认研究对象并设计 Plackett-Burman 试验,以酒糟黄酮提取量为响应值,考察单个因素对酒糟黄酮提取量影响的显著性。

1.2.4 响应面优化设计试验 基于单因素试验和 Plackett-Burman 试验,筛选出对酒糟黄酮提取量影响显著的因素并设计 Box-Behnken 试验。

1.2.5 基于 UPLC-QQQ-MS 的酒糟黄酮组分分析 酒糟黄酮提取液经过 HPD400 大孔吸附树脂纯化后,冷冻干燥,称取样本 81.2 mg 置于 2 mL 离心管,向样本中加入 1.2 mL 体积分数 80% 甲醇水,充分振荡 5 min,4 °C,300 W 超声 30 min;在 4 °C 条件下静置 60 min,5 000 r/min 离心 10 min,取上清液备用;将上清液放置于浓缩仪内浓缩至干,再次加 0.2 mL 体积分数 80% 甲醇重新溶解,振荡 5 min;5 000 r/min 离心 10 min,吸取离心后的上清液测定。色谱条件:在色谱柱 Acquity UPLC HSS T3 (1.8  $\mu$ m, 2.1 mm  $\times$  100 mm) 上进行分离,流动相 A 为水(甲酸体积分数 0.1%),流动相 B 为乙腈(甲酸体积分数 0.1%),洗脱梯度程序:0~1.0 min 10% B;1.0~14.0 min 10% B;14.0~15.1 min 90% B;15.1~18.0 min 10% B。柱温 40 °C,上清

液进样量 5  $\mu$ L,流量 0.3 mL/min。质谱条件:离子源为 ESI 离子源,气帘气压 241.3 kPa,碰撞气压 62.1 kPa,离子喷雾电压 4 500 V,离子源温度 450 °C,离子源气压 310.2 kPa。利用 MultiQuant 软件进行积分,根据内标法进行含量计算,内标物为槲皮素 D5。根据测试样和内标物的质量比及其相应的色谱峰面积之比及相对校正因子来计算被测组分的含量。再取含有内标物的待测组分溶液进样,记录色谱图,根据含内标物的待测组分溶液色谱峰响应值,计算待测物含量。

$$f = \frac{m_s \times A_r}{A_s \times m_r}, \quad (2)$$

$$m_i = \frac{f \times m_r \times A_i}{A_r}, \quad (3)$$

式中:

$f$ ——内标系数;

$A_s, A_r$ ——对照品和内标物的峰面积或峰高;

$m_s, m_r$ ——加入对照品和内标物的量,ng;

$A_i$ ——待测物的峰面积或峰高;

$m_i$ ——待测物含量,ng/g。

1.2.6 体外抗氧化试验 分别配制质量浓度为 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 g/L 的纯化酒糟黄酮、未纯化酒糟黄酮和维生素 C 溶液,备用。根据叶佳丰等<sup>[11]</sup>的方法测定 DPPH 自由基清除能力;根据 Deseo 等<sup>[12]</sup>的方法测定 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力;根据朱月等<sup>[13]</sup>的方法测定羟自由基清除能力。

1.2.7 体外降糖试验 分别配制质量浓度为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mg/mL 的纯化酒糟黄酮、未纯化酒糟黄酮和阿卡波糖溶液,备用。根据刘馥源<sup>[14]</sup>的方法测定  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制率;根据 Chen 等<sup>[15]</sup>的方法测定  $\alpha$ -淀粉酶抑制率。

1.2.8 体外降脂试验 分别配制质量浓度为 2, 4, 6, 8, 10 mg/mL 纯化酒糟黄酮、未纯化酒糟黄酮溶液,以及质量浓度为 20, 40, 60, 80, 100  $\mu$ g/mL 的奥利司他溶液,备用。根据晏幸等<sup>[16]</sup>的方法测定胰脂肪酶抑制率。

### 1.3 数据处理

每次试验均设 3 次平行并借助软件 SPSS 26.0 进行显著性分析,  $P < 0.05$  被认为差异有统计学意义。采用 Design-Expert 13 软件设计响应面试验,并对数据进行回归分析,同时利用 Origin 2021 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 酒糟黄酮提取方式确定及工艺优化

2.1.1 单因素试验 如图 1(a) 所示,随超声时间的变化,酒糟黄酮提取量呈先增加后降低趋势,在超声时间为 25 min 时达到最大 (7.80 mg/g),当超声时间超过 40 min 时酒糟黄酮提取量显著下降,可能是一定时间范围内的超声波处理能破坏酒糟残渣组织细胞,使黄酮尽快溶出,达到最高提取量,超声时间过长会导致黄酮结构被破坏,

降低其提取量<sup>[17]</sup>。如图 1(b)所示,随硫酸铵用量增加酒糟黄酮提取量同样呈先增加后降低的趋势,当其用量为 2.5 g 时,酒糟黄酮提取量达最高(10.40 mg/g)。推测原因是硫酸铵用量增加会改变双水相体系的相能力,加入适量硫酸铵会增加水相极性,促使黄酮分子向极性较低的乙醇相迁移,使酒糟黄酮含量升高,而过量的硫酸铵使双水相体系的稳定性遭到破坏,乙醇相体积过小,且硫酸铵过饱和后会析出,导致酒糟黄酮提取量降低<sup>[18]</sup>。如图 1(c)所示,随着微波时间增加黄酮提取量逐步增加,微波时间为 45 s 时酒糟黄酮提取量达到最大值(8.55 mg/g),当微波时间进一步增加,乙醇受热沸腾挥发,酒糟黄酮在剩余乙醇中达到饱和,提取量保持不变<sup>[19]</sup>。如图 1(d)所示,液料比为 45:1 (mL/g) 时,酒糟黄酮提取量最大,为 8.43 mg/g。液料比高时,随着酒糟的增加,黄酮含量也增加,而液料比太小,乙醇的体积不足以完全浸润酒糟,导致部分酒糟无法被充分提取,从而使得黄酮类成分提取量下降。如图 1(e)所示,随着乙醇体积分数的变化,整个体系的极性会发生改变,当乙醇体积分数为 65% 时,酒糟黄酮提取量最大(8.15 mg/g),乙醇体积分数为 80% 及以上时,黄酮提取量显著下降,推测是因为随着乙醇体积分

数增加,黄酮更容易溶出,提取量升高,过高的乙醇体积分数会使醇溶性的杂质浓度升高,从而影响黄酮的提取量<sup>[20]</sup>。如图 1(f)所示,4 种提取方式中超声波—微波联合(乙醇—硫酸铵)双水相法的酒糟黄酮提取量最高,所以选择超声波—微波联合双水相法进行后续优化试验。

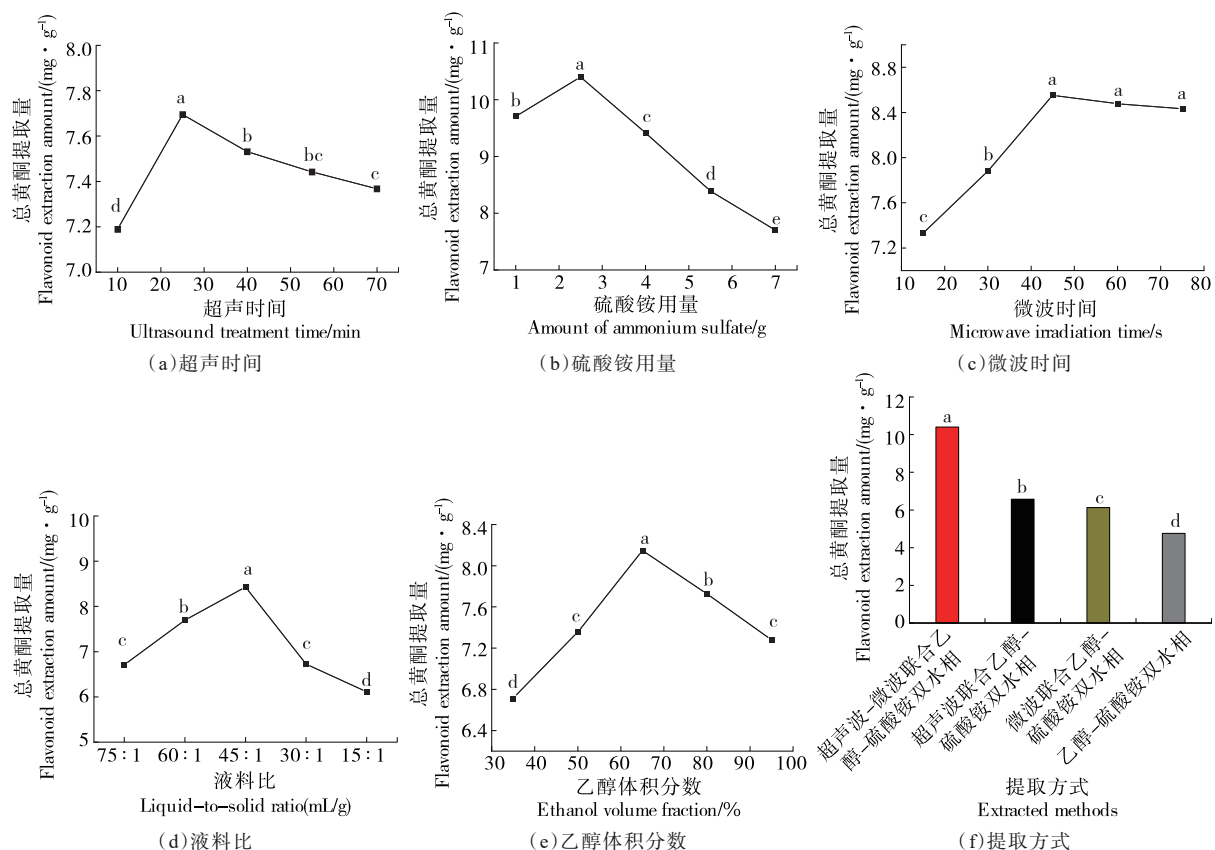
2.1.2 Plackett-Burman 试验 选择液料比、硫酸铵用量、乙醇体积分数、微波时间、超声时间 5 个因素,按照表 1 进行 Plackett-Burman 试验,Plackett-Burman 试验结果见表 2,方差分析见表 3。通过软件分析,得到黄酮提取量和各因素之间的关系式为:

$$Y=10.72+2.76A+0.037\ 4B+0.303\ 5C+0.439D+0.098\ 1E。$$

(4)

由表 3 可知,模型  $P<0.05$ ,表明模型显著可靠。其中液料比、微波时间和乙醇体积分数对酒糟黄酮提取量的影响极显著( $P<0.01$ )。因此,选择液料比、微波时间、乙醇体积分数 3 个因素进行后续试验,考虑到提高效率和节约成本,硫酸铵用量和超声时间分别固定为 2.5 g 和 25 min。

2.1.3 响应面试验 以液料比、乙醇体积分数、微波时间 3 个因素设计 Box-Behnken 试验,因素水平取值见表 4,试



字母不同表示不同组别间具有显著性差异( $P<0.05$ )

图 1 不同因素对酒糟黄酮提取量的影响

Figure 1 Effect of different single factors on the extraction yield of flavonoids from Zaopei

表1 Plackett-Burman试验设计

Table 1 Plackett-Burman experimental design

| 水平 | A 液料比<br>(mL/g) | B 硫酸铵<br>用量/g | C 乙醇体<br>积分数/% | D 微波<br>时间/s | E 超声时<br>间/min |
|----|-----------------|---------------|----------------|--------------|----------------|
| -1 | 30:1            | 1             | 50             | 30           | 10             |
| 1  | 60:1            | 4             | 80             | 60           | 40             |

表2 Plackett-Burman试验设计及结果

Table 2 Plackett-Burman experimental design and results

| 试验号 | A  | B  | C  | D  | E  | 黄酮提取量/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ) |
|-----|----|----|----|----|----|---------------------------------|
| 1   | 1  | -1 | 1  | 1  | -1 | 14.191 0                        |
| 2   | 1  | -1 | -1 | -1 | 1  | 12.423 3                        |
| 3   | -1 | 1  | 1  | 1  | -1 | 8.268 7                         |
| 4   | 1  | 1  | 1  | -1 | -1 | 13.273 1                        |
| 5   | 1  | 1  | -1 | 1  | 1  | 13.613 1                        |
| 6   | -1 | 1  | -1 | 1  | 1  | 8.463 9                         |
| 7   | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 7.130 4                         |
| 8   | 1  | 1  | -1 | -1 | -1 | 12.914 0                        |
| 9   | -1 | -1 | -1 | 1  | -1 | 7.976 0                         |
| 10  | 1  | -1 | 1  | 1  | 1  | 14.463 0                        |
| 11  | -1 | -1 | 1  | -1 | 1  | 7.933 5                         |
| 12  | -1 | 1  | 1  | -1 | 1  | 8.033 5                         |

表3 Plackett-Burman试验结果方差分析<sup>†</sup>

Table 3 Analysis of variance for Plackett-Burman experimental results

| 来源 | 平方和   | 自由度 | 均方    | F值       | P值       | 显著性 |
|----|-------|-----|-------|----------|----------|-----|
| 模型 | 94.69 | 5   | 18.94 | 245.75   | <0.000 1 | **  |
| A  | 91.14 | 1   | 91.14 | 1 182.66 | <0.000 1 | **  |
| B  | 0.02  | 1   | 0.02  | 0.22     | 0.657 0  | 不显著 |
| C  | 1.11  | 1   | 1.11  | 14.35    | 0.009 1  | **  |
| D  | 2.31  | 1   | 2.31  | 30.01    | 0.001 5  | **  |
| E  | 0.12  | 1   | 0.12  | 1.50     | 0.266 8  | 不显著 |
| 残差 | 0.46  | 6   | 0.08  |          |          |     |
| 总和 | 95.16 | 11  |       |          |          |     |

<sup>†</sup> \*\*表示极显著( $P<0.01$ );\*表示显著( $P<0.05$ )。

验设计及结果见表5。采用 Design-Expert 13 软件对表5中的试验数据进行分析,可以得到酒糟黄酮提取量与液料比、乙醇体积分数、微波时间之间的回归方程为:

$$Y = -14.22 + 2.20A + 0.4267C + 0.2467D - 0.3393AC + 0.0361AD - 0.1595CD - 2.11A^2 - 1.09C^2 - 1.64D^2. \quad (5)$$

如表6所示,模型F值为110.87,  $P<0.0001$ ,极显著,失拟项  $P>0.05$ ,说明拟合效果好。校正系数( $R^2_{Adj}$ )为98.41%,表明该模型能够较好地预测酒糟黄酮双水相提

表4 Box-Behnken试验设计

Table 4 Box-Behnken experimental design

| 水平 | A 液料比(mL/g) | C 乙醇体积分数/% | D 微波时间/s |
|----|-------------|------------|----------|
| -1 | 30:1        | 50         | 30       |
| 0  | 45:1        | 65         | 45       |
| 1  | 60:1        | 80         | 60       |

表5 Box-Behnken试验设计及结果

Table 5 Box-Behnken experimental design and results

| 试验号 | A  | C  | D  | 黄酮提取量/<br>(mg·g <sup>-1</sup> ) |
|-----|----|----|----|---------------------------------|
| 1   | 1  | 1  | 0  | 13.030 3                        |
| 2   | 0  | -1 | -1 | 10.444 2                        |
| 3   | 0  | 0  | 0  | 14.452 0                        |
| 4   | -1 | -1 | 0  | 8.341 3                         |
| 5   | -1 | 0  | -1 | 7.998 5                         |
| 6   | -1 | 0  | 1  | 8.451 4                         |
| 7   | 0  | 0  | 0  | 14.170 6                        |
| 8   | 0  | -1 | 1  | 11.224 7                        |
| 9   | 0  | 0  | 0  | 14.058 0                        |
| 10  | 1  | 0  | -1 | 12.423 3                        |
| 11  | 0  | 1  | -1 | 12.087 8                        |
| 12  | -1 | 1  | 0  | 9.402 0                         |
| 13  | 0  | 0  | 0  | 14.125 6                        |
| 14  | 1  | 0  | 1  | 13.020 6                        |
| 15  | 0  | 1  | 1  | 12.230 4                        |
| 16  | 0  | 0  | 0  | 14.294 4                        |
| 17  | 1  | -1 | 0  | 13.326 6                        |

取工艺。由F值可知,影响酒糟黄酮提取量的因素重要性依次为液料比、乙醇体积分数、微波时间。如图2所示,AC交互作用的响应面比较陡峭,表明液料比和乙醇体积分数的交互作用对酒糟黄酮提取量的影响较为显著;AD和CD交互作用的响应面较为平缓,说明其交互作用对酒糟黄酮提取量的影响不显著,与表6中结果一致。

经软件预测,酒糟黄酮的最佳双水相提取工艺为:液料比48.63:1(mL/g)、乙醇体积分数65.81%、微波时间42.474 s,此条件下的酒糟黄酮提取量为14.76 mg/g。总提取时间为26 min,显著低于前人<sup>[5,21-22]</sup>研究报道的提取时间( $\geq 40$  min)。综合考虑数据参数的实际应用情况,修正工艺参数为液料比49:1(mL/g)、乙醇体积分数66%、微波时间42 s。经过实验验证,提取量为14.75 mg/g,预测值与实际值之间的相对偏差较小,证明该模型可以较好地预测酒糟黄酮的提取量。

## 2.2 酒糟黄酮的纯化及成分组成

基于以上工艺获得酒糟黄酮提取液,经HPD400大孔

表 6 Box-Behnken 试验结果方差分析<sup>†</sup>  
Table 6 Analysis of variance of Box-Behnken experimental design and results

| 来源             | 平方和   | 自由度 | 均方    | F 值    | P 值      | 显著性 |
|----------------|-------|-----|-------|--------|----------|-----|
| 模型             | 80.00 | 9   | 8.89  | 110.87 | <0.000 1 | **  |
| A              | 38.75 | 1   | 38.75 | 483.39 | <0.000 1 | **  |
| C              | 1.46  | 1   | 1.46  | 18.17  | 0.003 7  | **  |
| D              | 0.49  | 1   | 0.49  | 6.07   | 0.043 2  | *   |
| AC             | 0.46  | 1   | 0.46  | 5.74   | 0.047 7  | *   |
| AD             | 0.01  | 1   | 0.01  | 0.07   | 0.805 9  | 不显著 |
| CD             | 0.10  | 1   | 0.10  | 1.27   | 0.297 1  | 不显著 |
| A <sup>2</sup> | 18.73 | 1   | 18.73 | 233.65 | <0.000 1 | **  |
| C <sup>2</sup> | 4.96  | 1   | 4.96  | 61.93  | 0.000 1  | **  |
| D <sup>2</sup> | 11.29 | 1   | 11.29 | 140.82 | <0.000 1 | **  |
| 残差             | 0.56  | 7   | 0.08  |        |          |     |
| 失拟项            | 0.46  | 3   | 0.15  | 6.38   | 0.052 7  | 不显著 |
| 纯误差            | 0.10  | 4   | 0.02  |        |          |     |
| 总和             | 80.56 | 16  |       |        |          |     |

<sup>†</sup> \*\*表示极显著( $P<0.01$ );\*表示显著( $P<0.05$ ); $R^2=0.993\ 0$ ;  
 $R^2_{Adj}=0.984\ 1$ ;变异系数 2.37;信噪比 28.38。

吸附树脂纯化后纯度为 61.28%,为纯化前(21.81%)的 2.81 倍。采用 UPLC-QQQ-MS 方法对纯化后的黄酮进行鉴定,共鉴定出 30 种黄酮类成分(表 7)。这 30 种黄酮成

分具有抗氧化等功效,如含量位列前三的桔皮素、山奈酚和(+)-儿茶素,分别占酒糟黄酮总量的 19.36%,12.30%,11.78%,桔皮素具有抗炎、抗肿瘤、调节代谢和神经保护等功效<sup>[23]</sup>;山奈酚具有抗炎、抗癌,预防和治疗糖尿病、动脉粥样硬化和骨质疏松等疾病,还对神经、肝脏和心肌有保护作用,并能抑制蛋白激酶的活性<sup>[24]</sup>;(+)-儿茶素具有保护心血管、抗肿瘤、抗菌、抗病毒、抗炎、免疫调节以及神经保护等功效<sup>[25]</sup>。此外,山奈酚、(+)-儿茶素、原儿茶酸、花青素 B<sub>2</sub>、染料木素、根皮素、槲皮素、葛根素、芦丁 9 种黄酮占酒糟黄酮总量的 52.6%,其同时兼具降糖和降脂功效。现今很多慢性疾病都源自饮食,酒糟黄酮来源于高粱等粮食原料,如若开发酒糟黄酮作为饮食原料,对于改善人们“三高”等慢性疾病具有较高的应用潜力。为此,需进一步明确酒糟黄酮的抗氧化、降糖、降脂功效的强弱性。

2.3 酒糟黄酮的抗氧化活性

如图 3(a)所示,纯化后的酒糟黄酮在质量浓度为 0.20 g/L 时对 ABTS<sup>+</sup> 自由基的清除率最大(82.98%),该结果与前人<sup>[21]</sup>研究结果类似。如图 3(b)所示,随着质量浓度的增加,纯化后的酒糟黄酮对 DPPH 自由基清除率开始显著升高,后趋于稳定,在质量浓度为 0.20 g/L 时清除率达到最大(69.43%),该数据略高于蒋新龙等<sup>[26]</sup>针对高粱酒糟黄酮的研究结果。如图 3(c)所示,随着质量浓度的增加,纯化后的酒糟黄酮对羟自由基清除率刚开始显著

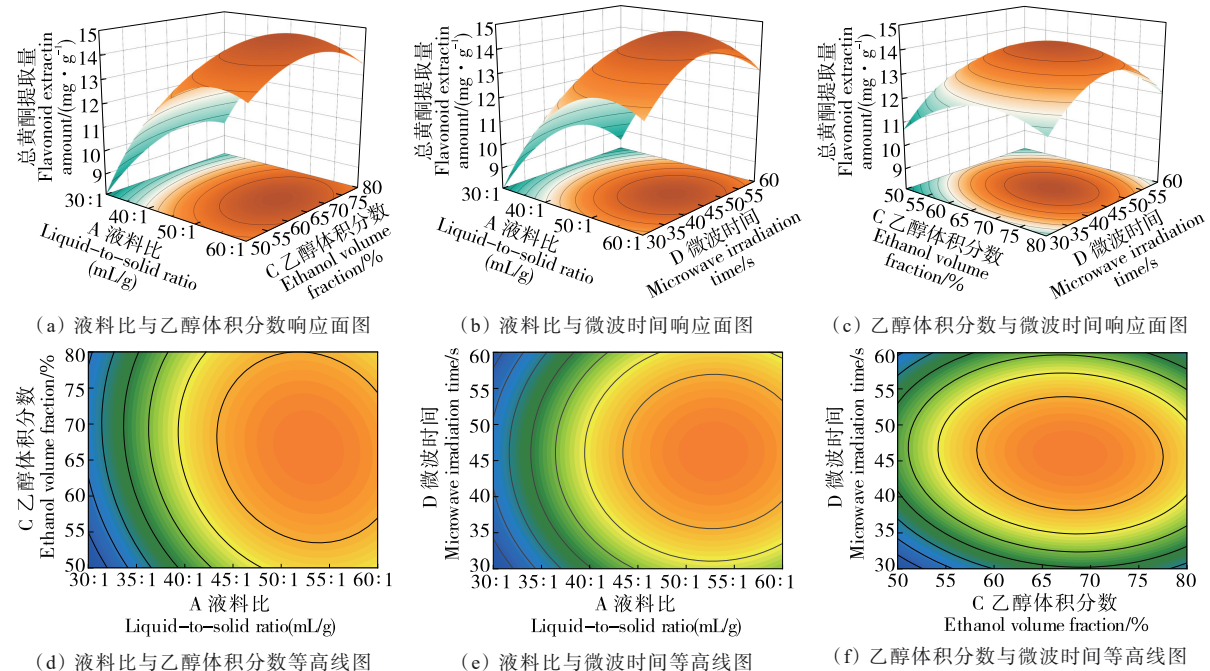


图 2 因素交互作用对酒糟黄酮提取量影响的响应面图和等高线图  
Figure 2 Response surface and contour maps on the effect of factor interactions on the extraction yield of flavonoids from Zaopei

表 7 纯化后酒糟黄酮的成分鉴定

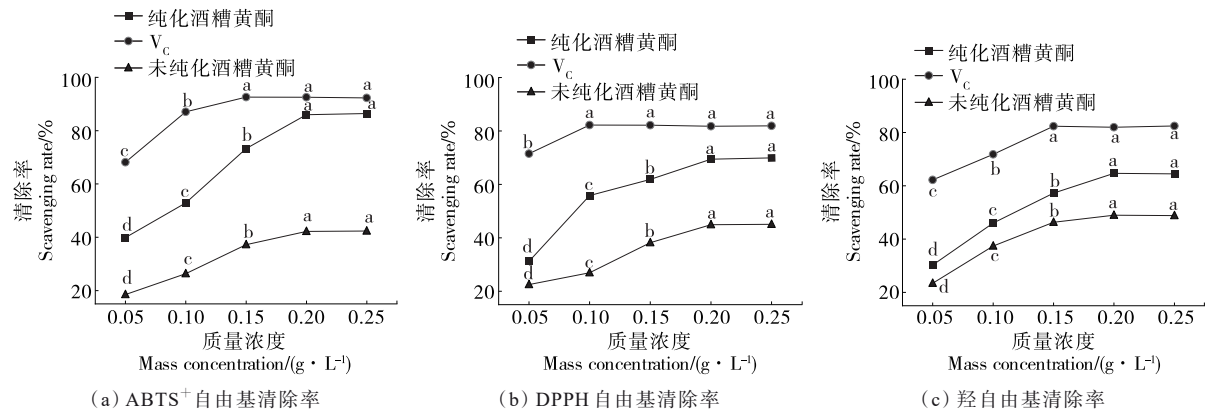
Table 7 Component identification of purified flavonoids from Zaopei

| 黄酮种类                | 保留时间/<br>min | [M-H] <sup>-</sup><br>(m/z) | 质量分数/<br>(ng·g <sup>-1</sup> ) | 黄酮种类 | 保留时间/<br>min | [M-H] <sup>-</sup><br>(m/z) | 质量分数/<br>(ng·g <sup>-1</sup> ) |
|---------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------------|------|--------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 桔皮素                 | 10.00        | 373.0                       | 8 745.58±30.21                 | 牡荆素  | 4.57         | 433.0                       | 907.52±10.57                   |
| 山奈酚                 | 6.40         | 287.1                       | 5 556.52±27.81                 | 橙皮素  | 7.54         | 303.0                       | 306.38±4.58                    |
| (+)-儿茶素             | 5.80         | 289.1                       | 5 322.62±24.54                 | 槲皮苷  | 6.73         | 447.0                       | 295.47±2.11                    |
| 原儿茶酸                | 3.89         | 152.8                       | 3 946.82±12.59                 | 染料木苷 | 5.20         | 433.0                       | 243.35±6.41                    |
| 原花青素 B <sub>2</sub> | 13.10        | 579.3                       | 3 857.48±36.64                 | 橙皮苷  | 5.83         | 611.0                       | 158.38±3.33                    |
| 染料木素                | 7.27         | 271.0                       | 2 023.97±29.03                 | 原儿茶醛 | 3.43         | 136.7                       | 148.64±3.24                    |
| 漆黄素                 | 2.71         | 285.0                       | 1 935.70±10.53                 | 葛根素  | 3.64         | 417.0                       | 90.70±1.02                     |
| 根皮素                 | 7.17         | 272.8                       | 1 874.51±8.72                  | 芦丁   | 5.24         | 611.0                       | 87.06±0.98                     |
| 金合欢素                | 1.07         | 285.0                       | 1 625.90±22.63                 | 桑色素  | 6.75         | 301.0                       | 62.28±1.01                     |
| 黄芩素                 | 7.29         | 271.0                       | 1 509.36±17.48                 | 木犀草素 | 5.10         | 253.0                       | 60.93±0.42                     |
| 二氢槲皮素               | 7.53         | 319.0                       | 1 451.34±2.38                  | 山奈素  | 7.47         | 299.0                       | 57.90±0.33                     |
| 异鼠李素                | 7.57         | 317.0                       | 1 365.48±11.93                 | 黄豆黄苷 | 4.25         | 447.0                       | 29.65±0.71                     |
| 落新妇苷                | 6.03         | 447.1                       | 1 344.68±21.42                 | 柚皮素  | 7.23         | 271.0                       | 29.21±0.29                     |
| 表儿茶素                | 5.78         | 289.1                       | 1 121.71±7.97                  | 芹菜素  | 7.27         | 269.0                       | 9.61±0.13                      |
| 槲皮素                 | 6.51         | 303.0                       | 1 004.56±8.88                  | 黄豆黄素 | 9.17         | 283.0                       | 2.47±0.09                      |

升高,后趋于稳定,在质量浓度 0.20 g/L 时达到最大 (64.66%),虽低于 V<sub>C</sub> 的最大清除率 (82.38%),但优于桑黄总黄酮<sup>[27]</sup> 的抗氧化性。相对于酒糟黄酮的 DPPH 自由基和羟自由基清除率,其 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率最高,可能是由于纯化后的酒糟黄酮中桔皮素、山奈酚、(+)-儿茶素、原花青素 B<sub>2</sub> 的含量较高(表 7),而这些黄酮中含有邻二酚羟基结构,有研究<sup>[28]</sup> 报道黄酮有较强的抗氧化活性是因为黄酮结构含有酚羟基,其中邻二酚羟基对于 ABTS<sup>+</sup> 自由基的清除能力最强,此结果表明酒糟黄酮的功效能力与其相关成分含量呈正相关。进一步表明酒糟黄酮的抗氧化活性较高,在食品等领域的应用潜力较大。

2.4 酒糟黄酮对 α-淀粉酶、α-葡萄糖苷酶和胰脂肪酶活性的影响

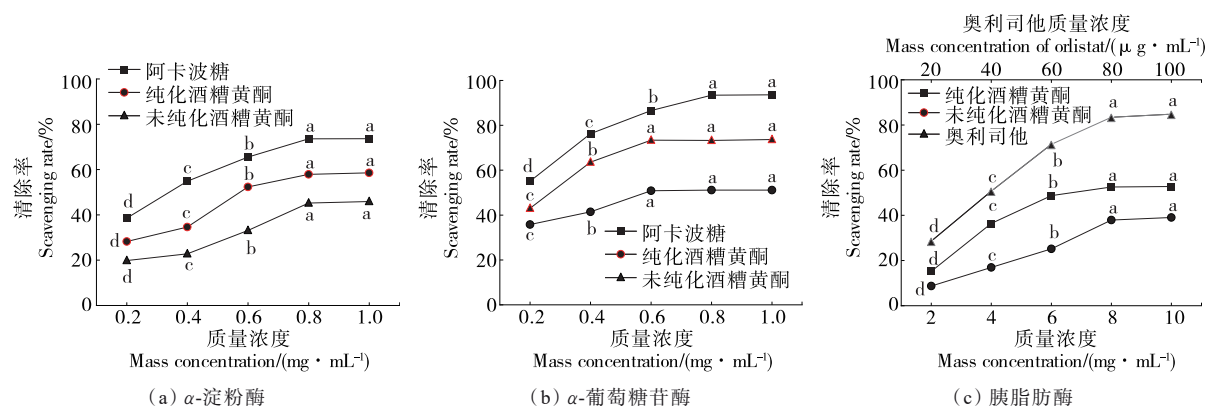
如图 4(a) 和图 4(b) 所示,随着质量浓度增加,样品对 α-淀粉酶抑制率和 α-葡萄糖苷酶抑制率均为阿卡波糖> 纯化的酒糟黄酮> 未纯化的酒糟黄酮,纯化的酒糟黄酮的抑制率高于未纯化酒糟黄酮,说明纯度高的酒糟黄酮对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制能力更强,即黄酮成分为主要的功效成分;纯化后的酒糟黄酮对 α-淀粉酶的抑制率在质量浓度为 0.8 mg/mL 时达到最大,为 57.91% (IC<sub>50</sub>=0.49 mg/mL),该抑制率低于王紫印等<sup>[29]</sup> 的绿豆皮多酚对 α-淀粉酶抑制性,可能是由于多酚的特殊结构对



字母不同表示不同组别间具有显著性差异(P<0.05)

图 3 不同酒糟黄酮样品的抗氧化活性

Figure 3 Antioxidant activities of different samples of flavonoids from Zaopei



字母不同表示不同组间具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )

图 4 不同酒糟黄酮样品的降糖降脂活性

Figure 4 Hypoglycemic and hypolipidemic activities of different samples of flavonoids from Zaopei

$\alpha$ -淀粉酶的抑制性更强;纯化后的酒糟黄酮在质量浓度为 0.6 mg/mL 时对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制率达到最大值,为 73.39% ( $IC_{50}=0.39$  mg/mL),显著高于苦荞黄酮<sup>[30]</sup>对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制率,黄酮的提取原料的不同可能是造成结果差异的主要原因。如图 4(c) 所示,随着质量浓度的增加,纯化的酒糟黄酮的胰脂肪酶抑制率处于奥利司他和未纯化的酒糟黄酮之间,纯化的酒糟黄酮的抑制率高于未纯化的酒糟黄酮,说明纯度影响酒糟黄酮对胰脂肪酶的抑制能力,黄酮是主要的功效成分;纯化后的酒糟黄酮对胰脂肪酶的抑制率在 8 mg/mL 时达到最大,为 52.55% ( $IC_{50}=3.7$  mg/mL),此结果略高于前人<sup>[31]</sup>的研究结果。有研究<sup>[32]</sup>报道,黄酮能够抑制酶的原因是通过氢键和疏水作用与酶活性位点或邻近区域结合,诱导酶构象变化从而阻碍底物结合。酒糟黄酮对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制率较高,可能是因为山奈酚、(+)-儿茶素和花青素 B<sub>2</sub> 等 9 种黄酮容易进入  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的活性中心,而且这些黄酮的多羟基结构与活性中心的基团相互作用引起酶的构象发生变化,进而表现出良好的  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制性。综合来看,酒糟黄酮不仅具有良好的抗氧化活性,同时表现出较好的体外降糖和降脂功效。

### 3 结论

针对浓香型白酒糟黄酮提取时间长、提取量低以及功效强弱不明确的问题,采用超声波—微波辅助双水相法提取酒糟黄酮,结果表明,该法缩短了黄酮的提取时间,并提升了黄酮的提取率;同时鉴定出 30 种不同种类的黄酮成分,结合文献报道与其化合物结构特征,推测其功效。通过  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\alpha$ -淀粉酶和胰脂肪酶的体外抑制性试验,初步证实酒糟黄酮具有较好的抗氧化、降血糖和降血脂潜力,表明其具有较高的研究价值。后续研究将针对兼具降糖降脂活性的黄酮成分开展分离纯化,并通

过动物试验进一步验证,以期促进白酒酒糟的合理化和高值化应用。

### 参考文献

- [1] Zheng X W, Han B Z. Baijiu (白酒), Chinese liquor: history, classification and manufacture process[J]. Journal of Ethnic Foods, 2016, 3(1): 19-25.
- [2] 邵莹, 吴启南, 周婧, 等. 淡竹叶黄酮对大鼠心肌缺血/再灌注损伤的保护作用[J]. 中国药理学通报, 2013, 29(2): 241-247. Shao Y, Wu Q N, Zhou J, et al. Protective effects of total flavones from *Lophatherum gracile* on myocardial ischemia-reperfusion injury in rats[J]. Chinese Pharmacological Bulletin, 2013, 29(2): 241-247.
- [3] 魏佳仪, 禄璐, 张涿洵, 等. 枸杞根黄酮提取工艺优化及其体外抗氧化、降血糖活性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 243-250. Wei J Y, Lu L, Zhang L T, et al. Extraction process optimization of flavonoids from *Lycium barbarum* root and its antioxidant and hypoglycemic activities *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 243-250.
- [4] 孙嘉莉, 赵文燕, 朱东亮, 等. 沙棘果皮渣总黄酮体内外降血脂活性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 353-363. Sun J L, Zhao W Y, Zhu D L, et al. Hypolipidemic activity of total flavonoids from sea buckthorn peel residue *in vivo* and *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 353-363.
- [5] 王佳妮. 白酒酒糟黄酮的制备及其对秀丽隐杆线虫衰老的影响[D]. 太原: 山西大学, 2024: 7-9. Wang J N. Preparation of flavonoids from Baijiu distiller's grains and their effects on aging of *C. elegans*[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2024: 7-9.
- [6] 杨杰. 酒糟中黄酮类化合物的提取分离及其生物活性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022: 3-7.

- Yang J. Extraction and separation of total flavonoids from distiller's grains and their biological activities[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022: 3-7.
- [7] 徐美, 范小振, 王琪, 等. 超声波—微波辅助双水相提取桑葚总黄酮工艺优化[J]. 沧州师范学院学报, 2024, 40(1): 1-5.
- Xu M, Fan X Z, Wang Q, et al. Optimization of extraction process of total flavonoids from mulberry by ultrasonic-microwave assisted aqueous two-phase system[J]. Journal of Cangzhou Normal University, 2024, 40(1): 1-5.
- [8] 苑园园, 赵娟娟, 王岩, 等. 超声辅助双水相提取橘皮中黄酮类化合物及其抗氧化性的研究[J]. 现代农村科技, 2024(11): 83-86.
- Yuan Y Y, Zhao J J, Wang Y, et al. Study on extraction of flavonoids from citrus peel by ultrasound-assisted biphasic aqueous system and their antioxidant properties[J]. Modern Rural Science and Technology, 2024(11): 83-86.
- [9] 翁霞. 响应面法优化双水相萃取毛酸浆叶黄素工艺及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 279-286.
- Weng X. Optimization of aqueous two-phase extraction process of lutein from *Physalis peruviana* by response surface methodology and its antioxidant activities analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 279-286.
- [10] 马雪洁, 程路峰, 杨淑梅, 等. 异叶青兰总黄酮的含量测定及体外抗氧化活性研究[J]. 中南药学, 2021, 19(6): 130-133.
- Ma X J, Cheng L F, Yang S M, et al. Content determination of total flavonoids and its *in vitro* antioxidant activity of *Dracocephalum heterophyllum* Benth. [J]. Central South Pharmacy, 2021, 19(6): 130-133.
- [11] 叶佳丰, 马晶菁, 张雨瑞, 等. 油茶蒲总黄酮大孔吸附树脂纯化工艺优化及其体外抗氧化、抗炎活性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 178-186.
- Ye J F, Ma J J, Zhang Y R, et al. Purification process and antioxidant, anti-inflammatory activities of total flavonoids from *Camellia oleifera* with macroporous adsorption resin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 178-186.
- [12] Deseo M, Eilkns A, Rochfort S, et al. Antioxidant activity and polyphenol composition of sugarcane molasses extract[J]. Food Chemistry, 2020, 314: 126180.
- [13] 朱月, 钟尉, 赵雪梅, 等. 紫斑牡丹叶片多糖对羟自由基清除能力的比较[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 341-342.
- Zhu Y, Zhong W, Zhao X M, et al. Comparison of hydroxyl radical scavenging ability of polysaccharides from *Paeonia suffruticosa* leaves[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(11): 341-342.
- [14] 刘馥源. 香菇多酚提取工艺、生物活性及残渣利用研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021: 24-25.
- Liu F Y. Study on extraction technology, biological activity of *Lentinus edodes* polyphenols and residue utilization[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021: 24-25.
- [15] Chen Y Y, Tang S M, Chen Y S, et al. Structure-activity relationship of procyanidins on advanced glycation end products formation and corresponding mechanisms[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 679-687.
- [16] 晏幸, 戴宇琪, 欧丽明, 等. 琯溪蜜柚柚皮黄酮提取工艺优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 135-140.
- Yan X, Dai Y Q, Ou L M, et al. Optimization of flavonoids extraction from Guanxi honey pomelo peel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 135-140.
- [17] 刘娜, 陈灵智, 张彦, 等. 响应面优化超声提取汉麻大麻素及其抗氧化性研究[J]. 现代化工, 2019, 39(1): 144-149.
- Liu N, Chen L Z, Zhang Y, et al. Response surface optimization on ultrasound-assisted extraction of hemp cannabinoids and study on anti-oxidation property[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(1): 144-149.
- [18] 俞耀文, 戴国庆, 华浩立, 等. 乙醇—硫酸铵双水相体系提取桃花总黄酮及其抗氧化性能[J]. 食品工业科技, 2022, 43(4): 187-195.
- Yu Y W, Dai G Q, Hua H L, et al. Ethanol-ammonium sulfate aqueous two-phase extraction of total flavonoids from peach blossom and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(4): 187-195.
- [19] 简素平, 苏伟, 陈钢. 微波辅助提取毛竹叶黄酮及其抗氧化活性的研究[J]. 食品工业, 2024, 45(10): 66-72.
- Jian S P, Su W, Chen G. Study on microwave-assisted extraction of flavonoids and antioxidant activities from *Phyllostachys edulis* leaves[J]. The Food Industry, 2024, 45(10): 66-72.
- [20] 郭丽丽, 李小兰, 高欣缘, 等. 黄芩茎叶总黄酮的超声辅助双水相提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 94-101.
- Guo L L, Li X L, Gao X Y, et al. Optimization of ultrasonic-assisted aqueous two-phase extraction process of total flavonoids from *Astragalus membranaceus* stems and leaves and their antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 94-101.
- [21] 赵超, 张鑫, 高晓娟, 等. 响应面法优化白酒糟总黄酮提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2024, 43(12): 205-210.
- Zhao C, Zhang X, Gao X J, et al. Optimization of extraction process of total flavonoids from *Baijiu* distillers' grains by response surface methodology and its antioxidant activity[J]. China Brewing, 2024, 43(12): 205-210.
- [22] 胡志明. 苦荞酒糟多酚的制备及配制酒研制[D]. 成都: 成都大学, 2024: 17-26.
- Hu Z M. Preparation of polyphenols from tartary buckwheat distiller's grains and development of compound wine[D]. Chengdu: Chengdu University, 2024: 17-26.
- [23] 于春雪. 桔皮素靶向CBS增强顺铂抗食管鳞癌活性研究[D]. 开封: 河南大学, 2024: 1-2.
- Yu C X. A study of enhance cisplatin efficacy in esophageal

- squamous cell carcinoma by tangeretin-mediated CBS targeting [D]. Kaifeng: Henan University, 2024: 1-2.
- [24] 喻信林, 宋莹, 张宇晴, 等. 山奈酚对高糖诱导的人肾上皮细胞增殖与凋亡的影响[J]. 实用癌症杂志, 2024, 39(7): 1 100-1 104.
- Yu X L, Song Y, Zhang Y Q, et al. Effects of kaempferol on proliferation and apoptosis of human renal epithelial cells under high glucose[J]. The Practical Journal of Cancer, 2024, 39(7): 1 100-1 104.
- [25] 杭瑜瑜, 张阳, 谭都, 等. 儿茶素对罗非鱼肌球蛋白理化、结构及其凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 159-165.
- Hang Y Y, Zhang Y, Tan D, et al. Effect of catechins on the physicochemical, structural and gel properties of myosin in tilapia[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(21): 159-165.
- [26] 蒋新龙, 王浩, 蒋益花. 高粱酒糟高纯度黄酮的制备及其抗氧化活性[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(10): 155-160.
- Jiang X L, Wang H, Jiang Y H. Preparation and antioxidant activity of high purity flavonoids from sorghum distillers' grains[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(10): 155-160.
- [27] 付婷伟, 周紫微, 邵颖, 等. 桑黄总黄酮的提取、组分分析及其生物活性评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 191-200.
- Fu T W, Zhou Z W, Shao Y, et al. Extraction, component analysis and biological activity evaluation of total flavonoids from *Phellinus igniarius*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 191-200.
- [28] 肖星凝, 徐雯慧, 左丹, 等. 6 种黄酮协同抗氧化作用及构效关系研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 17-21.
- Xiao X N, Xu W H, Zuo D, et al. The synergistic antioxidant effect and structure-activity relationship of six flavonoids[J]. Food & Machinery, 2017, 33(2): 17-21.
- [29] 王紫印, 许璐靖, 马恺扬, 等. 大孔吸附树脂纯化绿豆皮多酚的工艺优化及体外降血糖活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 253-262.
- Wang Z Y, Xu L J, Ma K Y, et al. Purification optimization of mung bean skin polyphenols by macroporous adsorption resin and its *in vitro* hypoglycemic activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 253-262.
- [30] 雷李涛, 周永昌, 蒲秀璞. 苦荞黄酮类化合物的制备及抗氧化及降糖作用研究[J]. 中国食品工业, 2023(2): 102-104.
- Lei L T, Zhou Y C, Pu X Y. Preparation of flavonoids from tartary buckwheat and study on their antioxidant and hypoglycemic activities[J]. China Food Industry, 2023(2): 102-104.
- [31] 林海生, 饶梦微, 秦小明, 等. 红江橙果皮黄酮提取物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶的抑制作用[J]. 现代食品科技, 2023, 39(10): 89-96.
- Lin H S, Rao M W, Qin X M, et al. Inhibitory effects of total flavonoids extracted from the peel of *Citrus sinensis* osbeck 'Hongjiang' on  $\alpha$ -glucosidase and pancreatic lipase activities [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(10): 89-96.
- [32] 徐勇兵, 郭明全. 三黄汤降糖降脂活性成分的多靶标亲和超滤质谱研究[J]. 质谱学报, 2024, 45(6): 810-822.
- Guo Y B, Guo M Q. Study on hypoglycemic and hypolipidemic compounds in Sanhuang decoction by multi-target affinity ultrafiltration LC-MS[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2024, 45(6): 810-822.