

# 山桐子果实及饼粕的多酚类物质提取及抗氧化能力评价

宋青<sup>1</sup>, 罗凯<sup>1</sup>, 豆磊<sup>1</sup>, 黄秀芳<sup>1</sup>, 阚建全<sup>2</sup>

(湖北民族大学生物与食品工程学院<sup>1</sup>, 恩施 445000)

(西南大学食品科学学院<sup>2</sup>, 重庆 400715)

**摘要:** 为了提高山桐子饼粕的利用率, 本文利用溶剂提取法针对山桐子干果及饼粕中多酚类物质提取, 以乙醇体积分数、超声时间、超声温度及料液比对山桐子干果多酚和山桐子饼粕多酚提取的影响进行单因素实验。结果表明, 山桐子干果多酚提取量略高于山桐子饼粕多酚提取量。山桐子干果多酚提取的最适提取条件为乙醇体积分数 50%、 $m(\text{料}):V(\text{液})=1:17$ 、超声时间 25 min、超声温度 61.7 °C; 山桐子饼粕多酚提取的最适提取条件为乙醇体积分数 45%、 $m(\text{料}):V(\text{液})=1:17$ 、超声时间 29 min、超声温度 52.9 °C。在最适条件下, 山桐子干果多酚提取量和山桐子饼粕多酚提取量分别为 53.09 mg/g 和 40.65 mg/g。体外抗氧化活性实验表明, 山桐子多酚对 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)二铵盐(ABTS<sup>+</sup>)自由基有良好的清除能力。

**关键词:** 山桐子干果; 山桐子饼粕; 多酚; 超声波; 抗氧化

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001255

中图分类号: TS229 文献标识码: A 文章编号: 1003-0174(2026)01-0100-09

网络首发时间: 2025-11-05 14:32:19

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251105.1148.004>

## Extraction of polyphenols from *Idesia polycarpa* Maxim fruits and cake meal and evaluation of antioxidant capacity

Song Qing<sup>1</sup>, Luo Kai<sup>1</sup>, Dou Lei<sup>1</sup>, Huang Xiufang<sup>1</sup>, Kan Jianquan<sup>2</sup>

(College of Biology and Food Engineering, Hubei Minzu University<sup>1</sup>, Enshi 445000)

(College of Food Science, Southwest University<sup>2</sup>, Chongqing 400715)

**Abstract:** In order to enhance the utilization rate of *Idesia polycarpa* Maxim cake meal, a solvent extraction method was employed in this study to investigate the extraction of polyphenols from different forms of *Idesia polycarpa* Maxim. Single-factor experiments were conducted to explore the effects of ethanol volume fraction, ultrasonic time, ultrasonic temperature, and solid-to-liquid ratio on the extraction of polyphenols from dried fruits and cake meal. The results showed that the extraction yield of polyphenols from dried fruits was slightly higher than that from cake meal. The optimal extraction conditions for polyphenols from dried fruits were determined as follows: solid-to-liquid ratio of 1:17, ethanol volume fraction of 50%, ultrasonic time of 25 minutes, and ultrasonic temperature of 61.7 °C. For polyphenols from cake meal, the optimal conditions were: solid-to-liquid ratio of 1:17, ethanol volume fraction of 45%, ultrasonic time of 29 minutes, and ultrasonic temperature of 52.9 °C. Under these optimal conditions, the extraction yields of polyphenols from dried fruits and cake meal reached 53.09 mg/g and 40.65 mg/g, respectively. *In vitro* antioxidant activity tests were performed, which demonstrated that the polyphenols from *Idesia polycarpa* Maxim exhibited good scavenging abilities against DPPH and ABTS<sup>+</sup> radicals.

**Key words:** *Idesia polycarpa* Maxim; dried fruits; *Idesia polycarpa* Maxim cake meal; polyphenols; ultrasonic; antioxidant

基金项目: 国家自然科学基金项目(32472256), 湖北省科技厅自然科学基金项目(2023AFD080), 硒食品营养与健康智能技术湖北省工程研究中心开放基金项目(PT082301)

收稿日期: 2025-03-24

第一作者: 宋青, 女, 2000年出生, 硕士, 功能食品营养与安全, [songqing0821@163.com](mailto:songqing0821@163.com)

通信作者: 黄秀芳, 女, 1979年出生, 硕士, 食品质量与安全, [2973925187@qq.com](mailto:2973925187@qq.com)

山桐子 (*Idesia polycarpa* Maxim.) 是一种广泛分布于亚洲的落叶乔木, 其果实富含不饱和脂肪酸、蛋白质和维生素等多种营养成分, 具有重要的食用和药用价值<sup>[1-3]</sup>。随着人们对天然产物健康效益的关注, 山桐子鲜果及其加工副产品山桐子饼粕的研究逐渐增多<sup>[4,5]</sup>。山桐子鲜果已被广泛用于食用油的生产, 而山桐子饼粕作为榨油后的副产品<sup>[6]</sup>, 通常被视为废弃物, 尚未得到充分的开发利用。然而, 研究表明, 山桐子饼粕中仍含有丰富的多酚类物质, 这些物质有益于抗氧化、抗炎和降脂等, 具有广泛的应用潜力和研究价值<sup>[7]</sup>。

植物中的多酚类物质作为重要的次生代谢产物, 这类天然化合物有益于抗氧化<sup>[8]</sup>、抗炎<sup>[9]</sup>、抗癌和降血脂<sup>[10]</sup>及抑菌<sup>[11]</sup>等。在食品工业中, 多酚类物质常被用作天然抗氧化剂<sup>[12]</sup>, 延长食品的保质期; 在化工领域, 多酚类物质可用于开发功能性化妆品和护肤品; 在医疗领域, 多酚类物质因其显著的生物活性, 被广泛应用于预防多种慢性疾病<sup>[13-15]</sup>。山桐子果实及饼粕中的多酚类物质以黄酮类和酚酸类为主, 这些化合物的羟基结构和共轭体系赋予其抗氧化活性<sup>[16,17]</sup>, 因其独特的化学结构和生物活性, 逐渐成为研究热点。

目前, 针对山桐子的研究主要集中在油脂、多糖及蛋白质等成分的提取与应用方面。相比之下, 针对山桐子多酚的研究鲜见报道。本研究不仅关注山桐子干果的多酚提取, 还对山桐子饼粕这一榨油副产品进行了研究。旨在通过优化山桐子饼粕中多酚的提取工艺, 探索山桐子饼粕中含有的多酚类物质, 同时探究其抗氧化活性, 并评估其在食品、化工和医疗领域的潜在应用价值。通过对山桐子饼粕中多酚类物质的深入研究, 不仅可以提高山桐子资源的综合利用率, 减少资源浪费和环境污染, 还能为开发新型功能性食品和药物提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

“鄂选一号”山桐子<sup>[18]</sup>, 产自湖北利川。

没食子酸(标准品 $\geq 99.9\%$ ); 维生素C(色谱级,  $\geq 99.7\%$ ); 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DP-PH)、2,2'-联氯双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(ABTS)。

### 1.2 主要仪器与amp;设备

YB-150型高速万能粉碎机、Neofuge15型高速

冷冻离心机、DF-101S型集热式恒温加热磁力搅拌器、电子天平、L3-5T-B1型移动热泵烘干箱、全自动索氏抽提器、KQ-300DE型超声清洗仪、UV-8000H型紫外可见分光光度计、infinite M200PRO型酶标仪、真空冷冻干燥机。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 山桐子干果及饼粕多酚提取工艺

山桐子多酚提取工艺为: 山桐子鲜果经65℃烘干48h, 将干果冷榨提取山桐子干果/饼粕多酚, 预处理后, 用乙醇浸提, 离心, 取上清液, 经抽滤后, 得到滤过液(多酚粗提液), 进行冷冻干燥。

#### 1.3.2 山桐子多酚的提取

称取质量为1.0g的山桐子干果/饼粕粉末于50mL离心管中, 加入一定量的乙醇溶液, 在一定的超声功率和提取温度下提取一定时间后, 离心(7000r/min, 15min), 取上清液后再重复提取2次, 合并上清液, 随后备用。

#### 1.3.3 山桐子多酚提取的单因素实验

固定山桐子干果的因素水平为料液比  $m(\text{料}):V(\text{液})$ : 1:15、超声功率270W、超声温度50℃、超声时间30min, 分别考察在不同乙醇体积分数(30%、40%、50%、60%、70%)、 $m(\text{料}):V(\text{液})$ (1:10、1:15、1:20、1:25、1:30、1:35)、超声时间(15、20、25、30、35min)、超声温度(30、40、50、60、70℃)下对超声辅助提取山桐子干果多酚提取量的影响。

固定山桐子饼粕的因素水平为  $m(\text{料}):V(\text{液})$ : 1:20、超声功率270W、超声温度50℃、超声时间30min, 分别考察在不同乙醇体积分数(30%、40%、50%、60%、70%)、 $m(\text{料}):V(\text{液})$ (1:10、1:15、1:20、1:25、1:30、1:35)、超声时间(15、20、25、30、35min)、超声温度(30、40、50、60、70℃)下对超声辅助提取山桐子饼粕多酚提取量的影响。

#### 1.3.4 多酚提取量的测定

##### 1.3.4.1 没食子酸标准曲线的绘制

参考李坪<sup>[19]</sup>和周文月<sup>[20]</sup>的方法, 总多酚含量采用福林酚法进行测定: 准确称量没食子酸标准品, 制备质量浓度为0.05mg/mL的标准溶液。取1mL不同质量浓度梯度下(10、20、30、40、50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ )的没食子酸溶液, 将其分别放入25mL比色管中。随后, 向每个比色管中加入浓度为0.1mol/L的福林酚溶液1mL和质量浓度为75mg/mL的碳酸钠溶液4mL, 加入蒸馏水定容至比色管25mL刻度线, 充分混匀后, 将25mL比色管置于黑暗环境中显色2h。于波长765nm处测定吸光值, 绘制没食子酸标准曲线回归

方程  $y = 0.0046x - 0.0013$  ( $R^2 = 0.9992$ )。

#### 1.3.4.2 山桐子多酚含量的测定

取 1 mL 山桐子饼粕和干果的粗多酚提取物, 将其稀释 10 倍, 取 1 mL 稀释后的粗多酚提取物溶液放在 25 mL 比色管里。随后, 分别取 1 mL 浓度为 0.1 mol/L 的福林酚溶液和 4 mL 质量浓度为 75 mg/mL 的碳酸钠溶液加入比色管中, 加入蒸馏水定容至比色管 25 mL 刻度线。充分混匀后, 将比色管置于黑暗环境中显色 2 h, 于波长 765 nm 处测定吸光值。利用没食子酸标准曲线计算多酚含量, 按式 (1) 计算多酚含量 ( $Y$ ):

$$Y = \frac{cV \times N}{m \times 1000} \quad (1)$$

式中:  $Y$  为多酚含量/mg/g;  $c$  为没食子酸标准曲线计算出的山桐子粗多酚质量浓度/ $\mu\text{g/mL}$ ;  $N$  为山桐子粗多酚提取液的稀释倍数;  $V$  为定容后山桐子粗多酚提取液体积/mL;  $m$  为山桐子饼粕或干果粉末的质量/g。

#### 1.3.5 超声辅助提取山桐子总多酚的响应面实验

优化实验在单因素实验基础上, 采用中心组合 Box - Behnken 法设置三水平 (-1、0、+1) 四因素对山桐子干果和山桐子饼粕多酚提取工艺进行优化。以乙醇体积分数 ( $A$ )、 $m$ (料):  $V$ (液) ( $B$ )、超声时间 ( $C$ )、超声温度 ( $D$ ) 四个单因素为变量, 以山桐子干果多酚提取量/山桐子饼粕多酚提取量 ( $Y$ ) 为响应量进行优化。在 Design - expert 13.0 软件上分别对山桐子干果和饼粕多酚提取进行响应面实验, 各设计 29 组实验, 各因素及水平详见表 1、表 2。

表 1 山桐子干果 Box - Behnken 实验设计因素与水平

因素		水平		
		-1	0	1
乙醇体积分数	$A_1$	30	40	50
$m$ (料): $V$ (液)	$B_1$	1:10	1:15	1:20
超声时间	$C_1$	20	25	30
超声温度	$D_1$	50	60	70

表 2 山桐子饼粕 Box - Behnken 实验设计因素与水平

因素		水平		
		-1	0	1
乙醇体积分数	$A_2$	30	40	50
$m$ (料): $V$ (液)	$B_2$	1:15	1:20	1:25
超声时间	$C_2$	20	25	30
超声温度	$D_2$	50	60	70

#### 1.3.6 体外抗氧化活性测定

使用去离子水去除 AB-8 型大孔树脂杂质后,

山桐子总多酚粗品通过大孔树脂进行吸附处理。随后, 使用体积分数为 70% 的乙醇溶液对树脂进行洗脱, 收集所得洗脱液。洗脱液通过旋转蒸发除掉乙醇后, 再经过冷冻干燥处理, 最终得到山桐子多酚纯化物, 质量浓度为 9 mg/mL 的山桐子多酚粗提溶液, 经大孔树脂吸附后得到的纯化物质量为 2.8 g。该多酚纯化物用于进行 DPPH 和 ABTS<sup>+</sup> 自由基的体外抗氧化实验。

##### 1.3.6.1 DPPH 自由基清除能力的测定

取 3.0 mL 山桐子粗多酚溶液或山桐子纯化多酚溶液, 加入 3.0 mL 浓度为 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液, 混合均匀后置于 37 °C 的暗处反应 30 min, 随后在 517 nm 处测定吸光度, 记为  $H_1$ 。按照相同方法, 取 3.0 mL 山桐子粗多酚溶液或山桐子纯化多酚溶液, 加入 3.0 mL 无水乙醇, 测定吸光度, 记为  $H_2$ ; 取 3.0 mL DPPH 溶液, 加入 3.0 mL 无水乙醇, 测定吸光度, 记为  $H_3$ 。以维生素 C (VC) 作为阳性对照组进行相应测定。

$R_1$  根据式 (2) 计算 DPPH 自由基的清除率 ( $R_1$ ):

$$R_1 = \left(1 - \frac{H_1 - H_2}{H_3}\right) \times 100\% \quad (2)$$

##### 1.3.6.2 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力的测定

分别配制浓度为 7 mmol/L 的 ABTS 溶液和浓度为 2.45 mmol/L 的  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  溶液, 将 2 种溶液等比例混合后, 在 25 °C 的条件下避光反应 12 ~ 16 h。随后在 734 nm 波长下, 使用无水乙醇稀释混合溶液直至吸光度为  $0.70 \pm 0.01$ , 最终得到 ABTS 工作液。将 0.5 mL 山桐子粗多酚溶液或山桐子纯化多酚溶液加入 3.0 mL ABTS 工作液中, 在黑暗条件下反应 10 min, 在 734 nm 处测定吸光度, 记为  $T_1$ 。按照相同方法, 取 0.5 mL 山桐子粗多酚溶液或山桐子纯化多酚溶液加入 3.0 mL 无水乙醇, 测定吸光度, 记为  $T_2$ ; 取 3.0 mL ABTS 工作液加入 0.5 mL 无水乙醇, 测定吸光度, 记为  $T_3$ 。以维生素 C (VC) 作为阳性对照组进行相应测定。

根据式 (3) 计算 ABTS<sup>+</sup> 自由基的清除率 ( $R_2$ ):

$$R_2 = \left(1 - \frac{T_1 - T_2}{T_3}\right) \times 100\% \quad (3)$$

#### 1.4 数据处理

实验均进行了 3 次重复测定, 实验数据以平均值  $\pm$  标准误差 (Mean  $\pm$  SD) 的形式呈现。采用 SPSS Statistics 27 软件进行方差分析, 其中  $P$  值小于 0.01 表示差异极显著,  $P$  值小于 0.05 表示差

异显著。使用 Design Expert 13.0 软件进行数据的统计分析,数据图表使用 Origin 2024 软件绘制完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验

#### 2.1.1 乙醇体积分数对多酚提取的影响

以乙醇和去离子水为溶剂对山桐子多酚物质进行浸提的实验发现,山桐子中的多酚物质具有水溶性和醇溶性。乙醇和去离子水对山桐子干果多酚和山桐子饼粕多酚的提取量都较高<sup>[21]</sup>,所以将不同浓度乙醇溶液浸提出的山桐子干果多酚和山桐子饼粕多酚进行比较,结果如图1所示。随着乙醇体积分数的增加,山桐子多酚提取量均呈现先增加后减少的趋势。山桐子多酚质量分数在前期30%~40%时明显增加,乙醇体积分数在40%的时候达到最大值分别为52.64 mg/g和39.42 mg/g,此时随着乙醇体积分数的增加,山桐子多酚提取量逐渐降低。这可能是因为当乙醇体积分数较低时,水溶性杂质大量溶出,从而抑制了酚类物质的溶出;而在乙醇体积分数为40%时,多酚的溶出量接近饱和状态。随着乙醇体积分数的进一步增加,脂溶性杂质的溶出逐渐增多,这可能会干扰多酚的提取,进而导致多酚提取量的降低<sup>[22]</sup>。在后续的反应面实验中,选取乙醇体积分数范围为30%~50%。

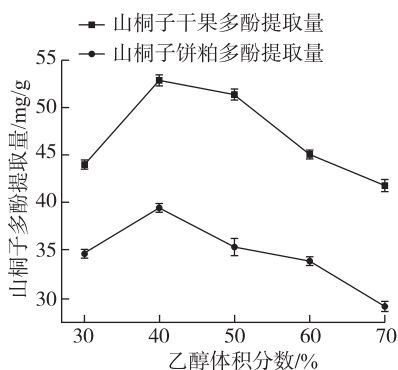


图1 乙醇体积分数对山桐子多酚提取的影响

#### 2.1.2 料液比对多酚提取的影响

山桐子多酚提取量受不同  $m(\text{料}):V(\text{液})$  的影响情况如图2所示。随着料液比的增大,山桐子多酚提取量均表现出先上升后下降的趋势。这是因为在一定的溶剂比例范围之内,料液比的升高会使样品与溶剂的接触表面积增大,溶剂的渗透率得到提升,而且能有效避免介质饱和,进而促使多酚溶出。然

而,过高的溶剂比例导致溶液黏度上升,阻碍了细胞膜的渗透作用,对山桐子多酚的提取产生了负面影响<sup>[23,24]</sup>。当山桐子干果多酚提取所需  $m(\text{料}):V(\text{液})$  为1:15时,提取量最高为52.16 mg/g;当山桐子饼粕多酚提取所需  $m(\text{料}):V(\text{液})$  为1:20时,提取量达到最大为38.71 mg/g。根据结果,响应面优化实验山桐子干果多酚提取  $m(\text{料}):V(\text{液})$  选择1:10、1:15、1:20;山桐子饼粕多酚提取  $m(\text{料}):V(\text{液})$  选择1:15、1:20、1:25。

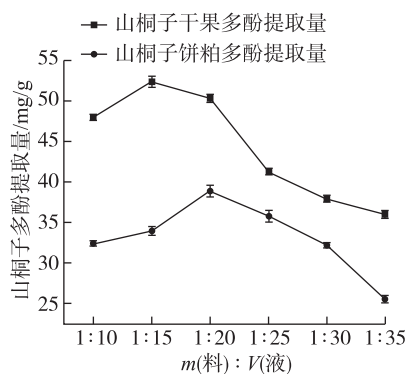


图2 料液比对山桐子多酚提取的影响

#### 2.1.3 超声时间对多酚提取的影响

由图3可知,山桐子干果的超声提取时间在15~25 min区间时,山桐子干果多酚提取量随超声提取时间的递增呈现先增后降的趋势,在超声提取时间为20 min时,山桐子干果多酚提取量到达峰值,达到最大值为53.19 mg/g。其原因是由于增加超声提取时间有助于破除细胞壁阻碍,促进山桐子干果多酚的提取,但超声时间过久会导致产物部分化学键断裂<sup>[25]</sup>,影响山桐子干果多酚提取结果。根据结果,响应面优化实验山桐子干果超声提取时间选择15、20、25 min。同时,山桐子饼粕的超声提取时间在20~30 min区间时,山桐子饼粕多酚提取量也随超声

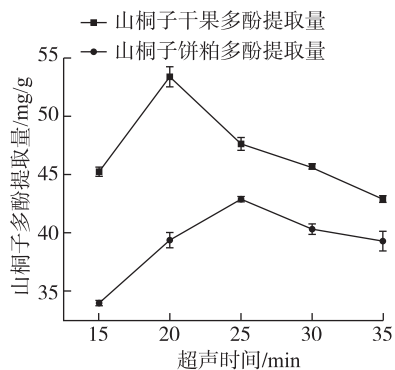


图3 超声时间对山桐子多酚提取的影响

提取时间的递增呈现先增后降的趋势,在超声提取时间为 20 min 时,山桐子饼粕多酚提取量到达峰值,达到最大值为 42.79 mg/g。推测原因是榨油时的机械挤压及高温处理过程中可能破坏了细胞结构,释放多酚氧化酶,加速了多酚氧化。在一定的超声时间范围内,细胞的破碎程度随着超声时间的延长而增加,促进山桐子饼粕多酚的提取,但超声时间过长会导致产物部分逐渐分解<sup>[26]</sup>,影响山桐子饼粕多酚提取结果。根据结果,响应面优化实验山桐子饼粕超声提取时间选择 20、25、30 min。

#### 2.1.4 超声温度对多酚提取的影响

由图 4 可知,在实验设定温度范围内,多酚提取量与提取温度呈现先升后降的变化趋势,30~60 ℃ 时,山桐子多酚提取量随着超声温度的增加而增加,60 ℃ 时到达峰值。这是因为随着超声温度的升高,分子运动加剧,多酚的溶出效率提高,提取量随之增加。然而,当温度超过一定阈值时,一方面会导致多酚发生氧化变性反应,另一方面会使乙醇溶剂加速挥发,降低提取体系的稳定性,这两方面因素共同作用最终导致多酚提取量显著下降<sup>[27]</sup>。因此,在后续响应面实验中,选取提取温度范围为 50~70 ℃。

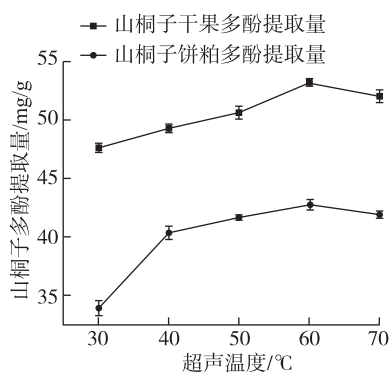


图 4 超声温度对山桐子多酚提取的影响

## 2.2 响应面法优化山桐子多酚提取工艺

### 2.2.1 Box - Behnken 实验设计及结果

基于单因素实验结果,采用 Box - Behnken (BBD) 实验对山桐子多酚提取量的工艺进行优化,试验以乙醇体积分数(因素 A)、m(料):V(液)(因素 B)、超声时间(因素 C)和超声温度(因素 D)为自变量,以山桐子干果和饼粕多酚提取量为响应值,采用 Design - Expert 13 软件设计四因素三水平进行响应面实验。结果如表 3、表 4 所示。

表 3 山桐子干果的 Box - Behnken 实验设计及实验结果

编号	A <sub>1</sub> 乙醇体积分数/%	B <sub>1</sub> m(料):V(液)	C <sub>1</sub> 超声时间/min	D <sub>1</sub> 超声温度/℃	多酚提取量/mg/g
1	30	1:10	25	60	46.32
2	50	1:10	25	60	47.17
3	30	1:20	25	60	47.91
4	50	1:20	25	60	52.08
5	40	1:15	20	50	53.16
6	40	1:15	30	50	48.39
7	40	1:15	20	70	46.92
8	40	1:15	30	70	53.72
9	30	1:15	25	50	48.78
10	50	1:15	25	50	51.29
11	30	1:15	25	70	46.62
12	50	1:15	25	70	51.06
13	40	1:10	20	60	45.19
14	40	1:20	20	60	50.28
15	40	1:10	30	60	47.58
16	40	1:20	30	60	48.93
17	30	1:15	20	60	46.13
18	50	1:15	20	60	47.92
19	30	1:15	30	60	46.98
20	50	1:15	30	60	51.35
21	40	1:10	25	50	48.49
22	40	1:20	25	50	50.63
23	40	1:10	25	70	46.58
24	40	1:20	25	70	49.99
25	40	1:15	25	60	54.15
26	40	1:15	25	60	54.98
27	40	1:15	25	60	54.65
28	40	1:15	25	60	54.27
29	40	1:15	25	60	54.79

表 4 山桐子的饼粕 Box - Behnken 实验设计及实验结果

编号	A <sub>2</sub> 乙醇体积分数/%	B <sub>2</sub> m(料):V(液)	C <sub>2</sub> 超声时间/min	D <sub>2</sub> 超声温度/℃	多酚提取量/mg/g
1	30	1:15	25	60	42.60
2	50	1:15	25	60	41.94
3	30	1:25	25	60	30.43
4	50	1:25	25	60	33.68
5	40	1:20	20	50	39.47
6	40	1:20	30	50	36.92
7	40	1:20	20	70	40.39
8	40	1:20	30	70	42.71
9	30	1:20	25	50	37.49
10	50	1:20	25	50	38.10
11	30	1:20	25	70	39.85
12	50	1:20	25	70	44.63
13	40	1:15	20	60	39.92
14	40	1:25	20	60	31.69
15	40	1:15	30	60	42.08
16	40	1:25	30	60	31.15
17	30	1:20	20	60	35.56
18	50	1:20	20	60	43.30
19	30	1:20	30	60	43.10
20	50	1:20	30	60	41.48
21	40	1:15	25	50	42.74
22	40	1:25	25	50	29.13
23	40	1:15	25	70	39.47

续表4

编号	A <sub>2</sub> 乙醇体积分数/%	B <sub>2</sub> m(料):V(液)	C <sub>2</sub> 超声时间/min	D <sub>2</sub> 超声温度/℃	多酚提取量/mg/g
24	40	1:25	25	70	36.04
25	40	1:20	25	60	45.28
26	40	1:20	25	60	46.43
27	40	1:20	25	60	46.21
28	40	1:20	25	60	46.43
29	40	1:20	25	60	46.76

采用 SPSS Statistics 27 统计学软件进行方差显著性分析, Design - Expert 13 软件进行图形拟合, 结果见表4。对实验数据进行分析, 得到回归方程:

$$Y_1 = 54.57 + 1.51A_1 + 1.54B_1 + 0.6119C_1 - 0.4889D_1 + 0.8273A_1B_1 + 0.6439A_1C_1 + 0.4834A_1D_1 - 0.9368B_1C_1 + 0.3187B_1D_1 + 2.89C_1D_1 - 3.23A_1^2 - 3.53B_1^2 - 2.86C_1^2 - 1.72D_1^2$$

如表5所示, 此模型的显著性检验  $F$  值为 36.92, 具有极显著性 ( $P$  模型  $< 0.0001$ ), 失拟项不显著 ( $P = 0.0630 > 0.05$ ), 表明该模型具有统计学意义。方程的决定系数  $R^2 = 0.9736$ , 模型的  $R_{Adj}^2 = 0.9473$ ,  $R_{Pre}^2 = 0.8560$ , 表明该模型对本实验具有良好的拟合性, 可以用来分析和预测山桐子干果多酚提取的工艺参数, 实验误差较小。由  $F$  值可知, 各个因素对山桐子干果多酚提取量的影响程度由大至小为超声温度 ( $D_1$ )  $>$  超声时间 ( $C_1$ )  $>$  乙醇体积分数 ( $A_1$ )  $>$  料液比 ( $B_1$ ),  $C_1D_1$ 、 $A_1B_1$ 、 $A_1^2$ 、 $B_1^2$ 、 $C_1^2$ 、 $D_1^2$  的影响极显著 ( $P < 0.01$ ), 因素  $C_1$ 、 $D_1$ 、 $A_1B_1$ 、 $B_1C_1$  的影响显著 ( $P < 0.05$ ), 表明该模型的可靠性良好。

表5 山桐子干果响应面拟合二次回归方程方差分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	254.20	14	18.16	36.92	<0.0001	**
A <sub>1</sub> 乙醇体积分数	27.36	1	27.36	55.62	<0.0001	**
B <sub>1</sub> 料液比	28.50	1	28.50	57.95	<0.0001	**
C <sub>1</sub> 超声时间	4.49	1	4.49	9.14	0.0091	*
D <sub>1</sub> 超声温度	2.87	1	2.87	5.83	0.0300	*
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	2.74	1	2.74	5.57	0.0334	*
A <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	1.66	1	1.66	3.37	0.0876	
A <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	0.9347	1	0.9347	1.9000	0.1896	
B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	3.51	1	3.51	7.14	0.0182	*
B <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	0.4062	1	0.4062	0.83	0.3788	
C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	33.48	1	33.48	68.08	<0.0001	**
A <sub>1</sub> <sup>2</sup>	67.58	1	67.58	137.43	<0.0001	**
B <sub>1</sub> <sup>2</sup>	81.05	1	81.05	164.81	<0.0001	**
C <sub>1</sub> <sup>2</sup>	53.10	1	53.10	107.98	<0.0001	**
D <sub>1</sub> <sup>2</sup>	19.29	1	19.29	39.22	<0.0001	**
残差	6.88	14	0.49			
失拟项	6.39	10	0.64	5.20	0.0630	
纯误差	0.49	4	0.1229			
总和	261.08	28		$R^2 = 0.9736$	$R_{Adj}^2 = 0.9473$	

注: \* 为显著,  $P < 0.05$ ; \*\* 为极显著,  $P < 0.01$ 。余同。

表6 山桐子饼粕响应面拟合二次回归方程方差分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	705.75	14	50.41	47.81	<0.0001	**
A <sub>2</sub> 乙醇体积分数	16.54	1	16.54	15.68	0.0014	**
B <sub>2</sub> 料液比	267.46	1	267.46	253.68	<0.0001	**
C <sub>2</sub> 超声时间	4.22	1	4.22	4.01	0.0651	
D <sub>2</sub> 超声温度	30.81	1	30.81	29.22	<0.0001	**
A <sub>2</sub> B <sub>2</sub>	3.83	1	3.83	3.63	0.0775	
A <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	21.90	1	21.90	20.77	0.0004	**
A <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	4.33	1	4.33	4.11	0.0621	
B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	1.83	1	1.83	1.74	0.2087	
B <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	25.93	1	25.93	24.60	0.0002	**
C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	5.95	1	5.95	5.65	0.0323	*
A <sub>2</sub> <sup>2</sup>	43.30	1	43.30	41.07	<0.0001	**
B <sub>2</sub> <sup>2</sup>	273.77	1	273.77	259.67	<0.0001	**
C <sub>2</sub> <sup>2</sup>	63.70	1	63.70	60.42	<0.0001	**
D <sub>2</sub> <sup>2</sup>	67.97	1	67.97	64.47	<0.0001	**
残差	14.76	14	1.05			
失拟项	13.50	10	1.35	4.27	0.0871	
纯误差	1.26	4	0.3158			
总和	720.51	28		$R^2 = 0.9795$	$R_{Adj}^2 = 0.9590$	

采用 SPSS Statistics 27 统计学软件进行方差显著性分析, Design - Expert 13 软件进行图形拟合, 结果见表6。对实验数据进行分析, 得到回归方程:

$$Y_2 = 46.22 + 1.17A_2 - 4.72B_2 + 0.5933C_2 + 1.6D_2 + 0.9783A_2B_2 - 2.34A_2C_2 + 1.04A_2D_2 - 0.6766B_2C_2 + 2.55B_2D_2 + 1.22C_2D_2 - 2.58A_2^2 - 6.5B_2^2 - 3.13C_2^2 - 3.24D_2^2$$

如表6所示, 此模型的显著性检验  $F$  值为 47.81, 具有极显著性 ( $P$  模型  $< 0.0001$ ), 失拟项不显著 ( $P = 0.0871 > 0.05$ ), 表明该模型具有统计学意义。方程的决定系数  $R^2 = 0.9795$ , 模型的  $Adj R^2 = 0.9590$ 、 $Pre R^2 = 0.8894$ , 表明该模型对本实验具有良好的拟合性, 可以用来分析和预测山桐子饼粕多酚提取的工艺参数, 实验误差较小。由  $F$  值可知, 各个因素对山桐子饼粕多酚提取量的影响程度由大至小为超声时间 ( $C_2$ )  $>$  乙醇体积分数 ( $A_2$ )  $>$  超声温度 ( $D_2$ )  $>$   $m$ (料):  $V$ (液) ( $B_2$ ),  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $D_2$ 、 $A_2C_2$ 、 $B_2D_2$ 、 $A_2^2$ 、 $B_2^2$ 、 $C_2^2$ 、 $D_2^2$  的影响极显著 ( $P < 0.01$ ),  $C_2D_2$  的影响显著 ( $P < 0.05$ ), 表明该模型的可靠性良好。

### 2.2.2 提取参数及验证实验

采用 Design - Expert 13 软件分析, 得到山桐子干果多酚提取的最佳提取条件为乙醇体积分数 50%、料液比  $m$ (料):  $V$ (液) 为 1:17、超声时间 25 min、超声温度 62 ℃; 山桐子饼粕多酚提取的最佳提取条件为乙醇体积分数 45%、 $m$ (料):  $V$ (液) 为 1:17 g/mL、超声时间 29 min、超声温度 53 ℃。在此条件

下,进行 3 组重复性验证实验得到的多酚平均提取量分别为 52.73 mg/g 和 40.33 mg/g,与预测值接近,偏差较小,证明响应面分析设计结果合理。

### 2.3 山桐子抗氧化活性分析

#### 2.3.1 DPPH 自由基的清除能力

DPPH 是一种化学性质相对稳定的自由基供体,其独特的结构使其能够与抗氧化剂发生反应并被还原。DPPH 溶液通常呈现深紫色,接触具有抗氧化能力的物质时,会清除自由基,使溶液颜色变浅<sup>[28]</sup>。由图 5 可见,山桐子粗多酚、山桐子纯化多酚的 DPPH 自由基清除率与阳性对照维生素 C(VC)在 0.03 ~ 0.20 mg/mL 随质量浓度增加而迅速上升,随后上升速率较缓慢。在多酚质量浓度达到 0.2 mg/mL 时,山桐子粗多酚的 DPPH 自由基清除率为 62.55%,纯化后多酚为 75.41%。然而,当质量浓度为 0.6 mg/mL 时,山桐子粗多酚的 DPPH 自由基清除率为 90.97%,纯化后多酚为 96.49%,但低于 VC 溶液的清除能力。结果表明山桐子粗多酚活性略低于纯化后多酚,而多酚抗氧化活性均明显上升,与 VC 清除能力结果接近。

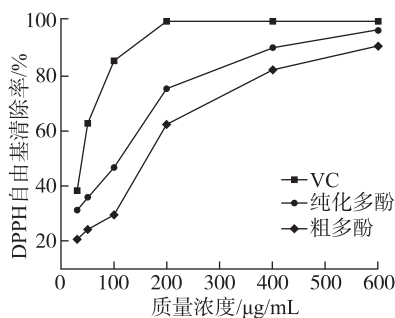


图 5 VC 和多酚提取物对 DPPH 自由基清除率

#### 2.3.2 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除能力

ABTS 在活性氧的作用下被氧化成为稳定的蓝绿色 ABTS<sup>+</sup> 自由基,在抗氧化物存在时 ABTS<sup>+</sup> 自由基的产生会被抑制,其颜色的深浅与自由基的浓度成正比。当向这种蓝绿色的 ABTS<sup>+</sup> 工作液中加入自由基清除剂时,清除剂会与 ABTS<sup>+</sup> 自由基发生反应,消耗自由基并致使反应体系褪色,通过在最大吸光波长 734 nm 处检测 ABTS<sup>+</sup> 自由基的吸光度变化,可以评估自由基清除剂的抗氧化活性<sup>[29]</sup>。由图 6 可以看出,山桐子粗多酚、山桐子纯化多酚的 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率与阳性对照 VC 在 0.03 ~ 0.10 mg/mL 随质量浓度增加而迅速上升,随后上升速率逐渐缓慢。随着样品浓度的增加,其对 ABTS<sup>+</sup> 自由基的清除效果不断增强,这说明在所考察的浓度范围内,样品对

ABTS<sup>+</sup> 自由基具有一定的清除能力。样品浓度越高,清除自由基的能力越强。山桐子粗多酚的 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率为 90.36%,纯化后多酚可达到 99.7%。这一结果表明,山桐子粗多酚的活性明显低于纯化后的多酚,二者的多酚抗氧化活性均显著提高,且与 VC 的清除能力结果相近。

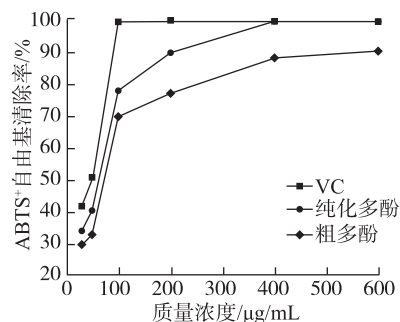


图 6 VC 和多酚提取物对 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率

## 3 结论

山桐子的多酚类物质可以采用乙醇溶液进行提取。乙醇体积分数、 $m(\text{料}):V(\text{液})$ 、超声温度、超声时间各个因素对山桐子的干果及饼粕的提取效果均有不同程度影响,山桐子干果多酚提取量略高于山桐子饼粕多酚提取量。山桐子干果多酚提取的最适提取条件为乙醇体积分数 50%、 $m(\text{料}):V(\text{液})$  为 1:17、超声时间 25 min、超声温度 61.7 °C;山桐子饼粕多酚提取的最适提取条件为乙醇体积分数 45%、 $m(\text{料}):V(\text{液})$  为 1:17、超声时间 29 min、超声温度 52.9 °C。在最适条件下,山桐子干果多酚提取量和山桐子饼粕多酚提取量分别为 53.09 mg/g 和 40.65 mg/g。因此,2 种状态山桐子的多酚物质提取量高低依次为:山桐子干果多酚提取量 > 山桐子饼粕多酚提取量。该研究为山桐子中多酚的提取与应用提供了参考,有利于山桐子饼粕的开发与利用,进一步提高山桐子的利用率。

#### 参考文献

- [1] 吴玲利, 邓雯方, 卢晓宇, 等. 山桐子开发利用研究进展 [J]. 经济林研究, 2023, 41(2):242-252  
Wu L, Deng W, Lu X, et al. Research progress in the development and utilization of *Idesia polycarpa* [J]. Non-wood Forest Research, 2023, 41(2):242-252
- [2] Nie X, Chen M, Jin C, et al. A comprehensive study of defatted *Idesia polycarpa* fruit: phenolic profile and its relation with anti-inflammatory activity in seed, pulp, and whole

- fruit[J]. Food Bioscience, 2025, 66:106228
- [3] 吴全珍. 我国毛叶山桐子开发利用回顾和展望[J]. 中国油脂, 2011, 36(6):54-57
- Wu Q. Review and expectation on development and use of *Idesia polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels in China[J]. China Oils and Fats, 2011, 36(6):54-57
- [4] Dou L, Zhang Z, Yang W, et al. Separation and purification of antioxidant peptides from *Idesia polycarpa* Maxim. cake meal and study of conformational relationship between them[J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(9):6206-6225
- [5] Liu F, Xie Y, Geng X, et al. The development and application of compound formulation of natural antioxidants in *Idesia polycarpa* Maxim. oil[J]. Heliyon, 2025, 11(1):e1648
- [6] 宋明发, 杨芸, 白冉冉, 等. 不同方法提取山桐子油的品质及体外抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(3):28-32
- Song M, Yang Y, Bai R, et al. Quality and antioxidant activity *in vitro* of *Idesia polycarpa* maxim. oils extracted by different methods[J]. China Condiment, 2022, 47(3):28-32
- [7] 王闪闪, 黄秀芳, 何华汉, 等. 山桐子饼粕多糖的提取优化及抗氧化活性研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(3):150-157
- Wang S, Huang X, He H, et al. Optimization of extraction and antioxidant activity of polysaccharide from *Idesia polycarpa* maxim cake meal[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(3):150-157
- [8] 谢水香, 雷彩燕. 油茶叶多酚的提取及其对常见植物病原真菌抑制作用研究[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(9):1562-1568
- Xie S, Lei C. Study on the extraction of polyphenols from *Camellia oleifera* leaves and its inhibitory effect on common plant pathogenic fungi[J]. Natural Product Research and Development, 2023, 35(9):1562-1568
- [9] Shen Y, Lin H, Yang M, et al. Hierarchical superstructure of plant polyphenol and arginine surfactant for long-lasting and target-selective antimicrobial application[J]. Advanced Materials, 2023, 35(19):2210936
- [10] Al-Azzawie H F, Alhamdani M S. Hypoglycemic and antioxidant effect of oleuropein in alloxan-diabetic rabbits[J]. Life Sciences, 2006, 78(12):1371-1377
- [11] 田琦. 丁香酚和茶多酚对空肠弯曲菌抑菌机理研究[D]. 天津:天津科技大学, 2014:2-3
- Tian Q. Study on antimicrobial mechanism of eugenol and tea polyphenols against *Campylobacter* Jejuni[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2014:2-3
- [12] 黄小丹, 陈梦雨, 黄文洁, 等. 基于代谢组学的植物多酚及其肠道健康效应研究进展[J]. 生物技术通报, 2021, 37(1):123-136
- Huang X, Chen M, Huang W, et al. Progress based on metabolomics: plant polyphenols and their gut health benefit[J]. Biotechnology Bulletin, 2021, 37(1):123-136
- [13] 朱良玉. 红豆越橘多酚类物质分离鉴定及对 HepG2 细胞增殖的抑制机制[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2022:62-72
- Zhu L. Isolation and identification of lingonberry polyphenols and their inhibitory mechanism on the proliferation of HepG2 cells[D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2022:62-72
- [14] 张溪桐. 石榴皮多酚改善代谢综合征大鼠胰岛素抵抗的作用机制研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2022:11-13
- [15] 付熙哲. 基于天然低共熔溶剂的山核桃蒲多酚提取、鉴定及溶解行为研究[D]. 杭州:浙江大学, 2022:47-48
- Fu X. Extraction, identification, and dissolution process of phenolic compounds from *Carya cathayensis* Sarg. Peels with natural deep eutectic solvent[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022:47-48
- [16] 咎鹏, 张琳, 祖元刚, 等. 山桐子 (*Idesia polycarpa* maxim) 果实多酚的抗炎、抗菌活性研究[J]. 植物研究, 2016, 36(6):955-960
- Zan P, Zhang L, Zu Y, et al. Anti-inflammation and antibacterial activity of polyphenols in *Idesia polycarpa* maxim. fruit[J]. Bulletin of Botanical Research, 2016, 36(6):955-960
- [17] Huang L, Zeng Y, Li F, et al. Polyphenolic compounds from *Idesia polycarpa* Maxim. fruits ameliorate non-alcoholic fatty liver disease by modulating lipid metabolism in oleic acid-induced HepG2 cells and high-fat diet-induced mice[J]. Journal of Functional Foods, 2023, 108:105715
- [18] 陈耀兵, 罗凯, 李美东, 等. “鄂选1号”山桐子组培繁育体系构建[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(12):23-31
- Chen Y, Luo K, Li M, et al. Construction of tissue culture breeding system of *Idesia polycarpa* “Exuan 1”[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(12):23-31
- [19] 李坪. 玫瑰花多酚提取、分离纯化及其生物活性研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2022:11-12
- Li P. Extraction, Extraction, separation, purification and biological activity of rose polyphenols[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022:11-12
- [20] 周文月. 淡竹叶多酚的提取纯化工艺及其降血糖作用研究[D]. 成都:成都大学, 2024:11-12
- Zhou Y. Extraction and purification process of polyphenols from *Lophatherum gracile* Brongn. and its hypoglycemic effects[D]. Chengdu: Chengdu University, 2024:11-12
- [21] 尚丹, 许学勤, 吴伟杰. 不同状态香蕉皮的多酚物质提取

- 效果实验研究[J]. 食品科技, 2010, 35(7): 204-208
- Shang D, Xu X, Wu W. Study of extraction of polyphenols from different states banana peels [J]. Food Science and Technology, 2010, 35(7): 204-208
- [22] 李国巍, 石雨, 张正海, 等. 胡萝卜脯多酚提取工艺优化、化合物分离鉴定及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 287-298
- Li G, Shi Y, Zhang Z, et al. Optimizing the extraction, identification, and antioxidant activity analysis of polyphenols from carrot (*Daucus carota* L.) preserve[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 287-298
- [23] 柴林山, 李剑梅, 张疏雨, 等. 红托竹荪菌托多酚提取工艺响应面法优化及其抗氧化活性分析[J]. 微生物学杂志, 2024, 44(6): 53-61
- Chai L, Li J, Zhang S, et al. Optimization of polyphenols extraction technology from red *Volva* of *Dictyophora rubroalvata* by response surface methodology and its antioxidant activity[J]. Journal of Microbiology, 2024, 44(6): 53-61
- [24] 薛惠丹, 张未希, 邓诏隆, 等. 徐香猕猴桃果皮多酚提取工艺的优化及其单体抗氧化活性研究[J]. 陕西科技大学学报, 2024, 42(6): 31-39
- Xue H, Zhang W, Deng Z, et al. Study on extraction of polyphenols from kiwifruit - xuxiang peel and its antioxidant activity of monomers[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2024, 42(6): 31-39
- [25] 任平国, 任逸飞, 徐启红, 等. 刺梨多酚提取工艺优化及其抑制亚硝化功能分析[J]. 饲料工业, 2025, 46(10): 114-121
- Ren P, Ren Y, Xu Q, et al. Optimization of extraction process of polyphenols from *Rosa roxburghii* and its inhibition of nitrosation function analysis [J]. Feed Industry, 2025, 46(10): 114-121
- [26] 祝媛媛, 任晓聪, 刘元松, 等. 响应面法优化马齿苋总多酚提取工艺及其抗氧化活性分析[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(4): 119-123
- Zhu Y, Ren X, Liu Y, et al. Optimization of total polyphenols extraction process from *Portulaca oleracea* L. by response surface method and analysis of its antioxidant activity [J]. Cereals & Oils, 2024, 37(4): 119-123
- [27] 袁博, 曹健, 秦朗, 等. 四种酚类化合物体外抗氧化活性的比较研究[J]. 食品工业, 2018, 39(9): 200-204
- Yuan B, Cao J, Qin L, et al. Study on the comparison of antioxidant activity *in vitro* of four phenolic compounds[J]. The Food Industry, 2018, 39(9): 200-204
- [28] 李雯, 李新生, 赵冠杰, 等. 黑米花青苷复方软胶囊有效成分抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2018, 43(10): 109-115
- Li W, Li X, Zhao G, et al. Study on the antioxidant activities of active ingredients in black rice anthocyanin compound soft capsule[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(10): 109-115
- [29] 杨月杭, 邱爱东, 夏陈, 等. 不同酸性溶剂提取黑青稞麸皮多酚及其体外抗氧化和降血糖活性[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(3): 34-40
- Yang Y, Qiu A, Xia C, et al. Extraction of polyphenols from black highland barley bran with different acidic solvents and their *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activities[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(3): 34-40.