

细叶黄皮果核多酚提取工艺优化 及抗氧化抑菌活性研究

廖建红^{1,2} 苏秀芳¹ 郑广进¹ 利刚慧¹

(1. 广西民族师范学院农业与生物学院, 广西 崇左 532200; 2. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西 南宁 530000)

摘要: [目的] 优化细叶黄皮果核多酚提取工艺, 并对其抗氧化、抑菌活性进行研究。[方法] 以超声温度、超声功率、超声时间、料液比、乙醇体积分数为试验因子, 采用响应面法优化细叶黄皮果核多酚的提取工艺; 通过细叶黄皮果核多酚清除自由基的能力研究其体外抗氧化活性, 并借助打孔扩散法测定其抑菌活性。[结果] 提取细叶黄皮果核多酚的最优方案为: 超声功率 94 W、超声时间 17 min、料液比 1:38 (g/mL)、乙醇体积分数 70%。在此条件下, 细叶黄皮果核多酚得率为 (28.53 ± 0.13) mg/g。细叶黄皮果核多酚对 DPPH 自由基、ABTS⁺ 自由基的清除能力均强于维生素 C, 其对羟自由基、DPPH 自由基、ABTS⁺ 自由基的半抑制质量浓度 (IC₅₀) 分别为 0.37 mg/mL、29.75 μg/mL、6.02 μg/mL; 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的最小抑菌质量浓度为 5.63 mg/mL, 对变形杆菌和铜绿假单胞菌的最小抑菌质量浓度为 2.81 mg/mL。[结论] 优化后的提取工艺可获得较高产量的细叶黄皮果核多酚, 且该多酚具有较好的抗氧化和抑菌活性, 在天然抗氧化剂与抑菌剂开发领域具有良好的应用前景。

关键词: 细叶黄皮果核; 多酚; 超声辅助提取; 抗氧化活性; 抑菌活性

Extraction optimization for polyphenols from *Clausena anisum-olens* kernel, as well as their antioxidant and antibacterial activities

LIAO Jianhong^{1,2} SU Xiufang¹ ZHENG Guangjin¹ LI Ganghui¹

(1. College of Agriculture and Biology, Guangxi Minzu Normal University, Chongzuo, Guangxi 532200, China;

2. School of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530000, China)

Abstract: [Objective] To optimize the extraction process of polyphenols from *Clausena anisum-olens* kernel, and to analyse their *in vitro* antioxidant and antibacterial activities. [Methods] With ultrasonic temperature, power, time, as well as solid-liquid ratio and ethanol volume fraction as experimental factors, the response surface method is employed to optimize the ultrasonic extraction process of polyphenols from *C. anisum-olens* kernel. Furthermore, the *in vitro* antioxidant activity of the polyphenols is investigated via free radical scavenging assays, and the antibacterial activity is determined using the well diffusion method. [Results] The optimal extraction process is an ultrasonic power of 94 W, an ultrasonic time of 17 min, a solid-liquid ratio of 1:38 (g/mL), and an ethanol volume fraction of 70%. Under these conditions, the polyphenol yield from the *C. anisum-olens* kernel is (28.53 ± 0.13) mg/g. The DPPH and ABTS⁺ free radical scavenging abilities of polyphenols exceed those of vitamin C, with half maximal inhibitory concentration (IC₅₀) for hydroxyl, DPPH, and ABTS⁺ free radicals being 0.37 mg/mL, 29.75 μg/mL, and 6.02 μg/mL, respectively. The minimum inhibitory concentration (MIC) for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* is 5.63 mg/mL, while the MIC for *Bacillus proteus* and *Pseudomonas aeruginosa* is 2.81 mg/mL. [Conclusion] With the optimized extraction process, a higher yield of polyphenols from the *C. anisum-olens* kernel can be obtained. Additionally, with potent antioxidant and antibacterial activities, these polyphenols demonstrate a promising application prospect

基金项目: 广西民族师范学院科学研究项目 (编号: 2024SBNGCC03)

通信作者: 苏秀芳 (1971—), 女, 广西民族师范学院教授, 硕士。E-mail: 541252161@qq.com

收稿日期: 2025-06-18 改回日期: 2026-02-07

引用格式: 廖建红, 苏秀芳, 郑广进, 等. 细叶黄皮果核多酚提取工艺优化及抗氧化抑菌活性研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(6): 101-108.

Citation: LIAO Jianhong, SU Xiufang, ZHENG Guangjin, et al. Extraction optimization for polyphenols from *Clausena anisum-olens* kernel, as well as their antioxidant and antibacterial activities[J]. Food & Machinery, 2026, 42(6): 101-108.

in natural antioxidant and antibacterial agent development.

Keywords: *Clausena anisum-olens* kernel; polyphenol; ultrasonic-assisted extraction; antioxidant activity; antibacterial activity

细叶黄皮 [*Clausena anisum-olens* (Blanco) Merr.] 又称为山黄皮、鸡皮果, 芸香科 (Rutaceae) 柑橘亚科黄皮属 (*Clausena*) 多年生常绿灌木或小乔木。细叶黄皮是全果可食的浆果, 拥有独特的香气和酸甜解腻的口感, 且其果实富含糖、有机酸、果胶、维生素 C、铁和钙等各种营养物质^[1-3]。细叶黄皮自古以来就是一种药食两用的植物, 有健脾消食、去腥除异、化痰止咳、排脂解疲、化滞除湿、解渴防暑、增强人体抵抗疾病的能力等功效^[4]。研究发现, 细叶黄皮中含有黄酮类、多酚类、挥发油、香豆素、天然环肽和生物碱等多种生物活性成分, 这些活性成分具有抗痛风、抗白血病^[5]、抑制人类免疫缺陷病毒 1 型逆转录酶活性^[6]、抗氧化^[7]、降血糖^[8]、抑菌^[9-10]、抗虫^[11]、抑制单胺氧化酶 B^[12] 等多种生物活性作用。细叶黄皮果因其所含的左旋肉碱能够帮助身体燃烧脂肪, 同时减少对健康不利的毒副作用而得到了国际肥胖健康组织的高度评价^[13]。目前细叶黄皮果树的种植面积也随之日趋扩大和产业化, 而细叶黄皮的研究和加工利用则高度集中于果肉和果皮的利用, 对果核的研究几乎空白。

植物多酚是一类具有广泛生物活性的天然产物, 不仅可以降低癌症风险、抑制炎症反应, 还能调节肠胃道功能, 并抵抗自由基对人体细胞的损伤, 目前主要的提取技术有物理、化学和生物等方法。其中物理法中的超声波辅助提取技术因其热效应、空化效应、机械效应三大效应能有助于植物快速释放酚类物质, 且具有操作简便、快速和绿色环保等特点而被广泛运用于植物多酚的提取^[14-15]。目前从细叶黄皮果核中提取多酚类物质的研究报道较少。研究拟以细叶黄皮的果核为材料, 以超声温度、超声功率、超声时间、料液比和乙醇体积分数为考察因素, 对细叶黄皮果核多酚的超声辅助提取工艺进行优化, 并对提取物进行体外抗氧化性和抑菌性能研究, 旨在探讨和挖掘细叶黄皮果核的潜在价值, 为其在多领域和多行业的推广和应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

细叶黄皮: 产地广西崇左;

2,2-联苯基-1-苦基基基 (DPPH): 纯度 96%, 上海麦克林生物科技有限公司;

2,2'-联氮-双(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐 (ABTS): 纯度 98%, 上海麦克林生物科技有限公司;

金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、铜绿假单胞菌、变形杆菌: 广西大学农学院;

无水碳酸钠、无水乙醇、硫酸亚铁、水杨酸等其他化学试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

食品烘干机: LT-87 型, 佛山市乐创网络科技有限公司;

超声波清洗器: SG3300T 型, 上海冠特超声仪器有限公司;

紫外可见分光光度计: UV754N 型, 上海佑科仪器仪表有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 细叶黄皮果核多酚提取 细叶黄皮去皮、去肉取果核, 清洗烘干, 粉碎过 60 目筛, 备用。准确称量 1.00 g 细叶黄皮果核粉末置于锥形瓶中, 加入不同体积分数的乙醇溶液, 在一定功率、温度和时间设定的超声波辅助下进行提取, 真空抽滤后, 将滤液定容至 100 mL 容量瓶。

1.3.2 没食子酸标准曲线绘制 参照王君等^[16]的方法, 得到回归方程 $A = 118.95C + 0.0003$, $R^2 = 0.9992$ 。

1.3.3 细叶黄皮果核多酚测定 取细叶黄皮果核多酚提取液 1 mL, 定容至 50 mL 容量瓶中作为待测样品, 按照 1.3.2 方法进行试验, 根据没食子酸标准曲线的回归方程计算出 C, 再根据式 (1) 计算出细叶黄皮果核多酚得率。

$$Y = \frac{CVN}{M}, \quad (1)$$

式中:

Y——细叶黄皮果核多酚得率, mg/g;

C——提取液中多酚质量浓度, mg/mL;

V——多酚提取液总体积, mL;

N——稀释倍数;

M——细叶黄皮果核粉末质量, g。

1.3.4 单因素试验设计

(1) 超声温度: 固定超声功率 100 W, 超声时间 30 min, 料液比 1:30 (g/mL), 乙醇体积分数 60%, 探究超声温度 (40, 45, 50, 55, 60 °C) 对细叶黄皮果核多酚得率的影响。

(2) 超声功率: 固定超声温度 50 °C, 超声时间 30 min, 料液比 1:30 (g/mL), 乙醇体积分数 60%, 探究超声功率 (40, 70, 100, 130, 160 W) 对细叶黄皮果核多酚得率的影响。

(3) 超声时间: 固定超声温度 50 °C, 超声功率 70 W, 料液比 1:30 (g/mL), 乙醇体积分数 60%, 探究超声时间 (15, 20, 25, 30, 35 min) 对细叶黄皮果核多酚得率的影响。

(4) 料液比: 固定超声温度 50 °C, 超声功率 70 W, 超声时间 20 min, 乙醇体积分数 60%, 探究料液比 (1:20, 1:25, 1:30, 1:35, 1:40 (g/mL)) 对细叶黄皮果核多酚得率的影响。

(5) 乙醇体积分数: 固定超声温度 50 °C, 超声功率 70 W, 超声时间 20 min, 料液比 1:35 (g/mL), 探究乙醇体

积分数(40%,50%,60%,70%,80%)对细叶黄皮果核多酚得率的影响。

1.3.5 响应面试验设计 在单因素试验方差分析的基础上,选取超声功率、超声时间、料液比和乙醇体积分数4个对细叶黄皮果核多酚得率影响较大的因素,以细叶黄皮果核多酚得率为响应 Y 值,选用Box-Behnken中心组合试验方法优化细叶黄皮果核多酚提取工艺。

1.3.6 羟自由基清除率测定 参照邱梦瑜等^[7]的方法。

1.3.7 DPPH自由基清除率测定 参照宋佳敏等^[17]的方法修改如下:加入不同质量浓度的细叶黄皮果核多酚提取液0.5 mL和0.2 mmol/L DPPH乙醇溶液3.5 mL,测定其吸光度。

1.3.8 ABTS⁺自由基清除率测定 参照辛文燕等^[18]的方法修改如下:分别加入不同质量浓度的细叶黄皮果核多酚提取液0.5 mL和ABTS⁺自由基工作液3.5 mL充分振荡,反应6 min后,测定734 nm处溶液吸光度。

1.3.9 抑菌活性研究

(1) 菌悬液制备:分别吸取20 μ L受试菌液接种到培养基上,37 $^{\circ}$ C培养24 h。用接种环从培养好的一代培养基上挑取一环菌株划线转接二代,37 $^{\circ}$ C培养16~24 h,参照陈克克等^[19]的方法配制得到试验所用的受试菌菌悬液。

(2) 抑菌圈试验:参照李慧等^[20]的方法并稍作改动。采用二倍稀释法,用40%乙醇溶液将细叶黄皮果核多酚配制成45.00,22.50,11.25,5.63,2.81,1.41 mg/mL的多酚溶液。分别吸取100 μ L菌液加入LB培养基固体培养基上,打7 mm的孔,将40 μ L不同质量浓度的多酚溶液分别注入孔中,37 $^{\circ}$ C培养24 h,以40%乙醇为阴性对照,以1.41 mg/mL头孢拉定为阳性对照。

1.4 数据处理

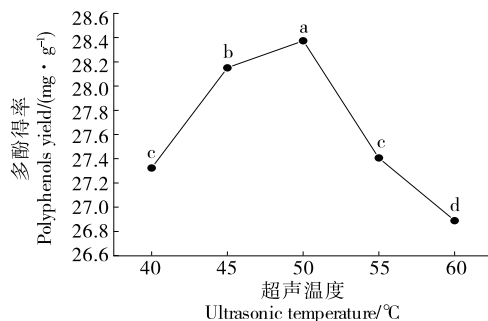
采用Excel 2021和SPSS 27.0软件进行统计学分析,Design Expert 13软件设计优化响应面试验,Origin 2021进行绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 超声温度对细叶黄皮果核多酚得率的影响 由图1可知,在一定的超声温度范围内,细叶黄皮果核多酚得率呈现出积极的增长态势,随着超声温度的升高,乙醇溶液和细叶黄皮果核多酚分子运动速率加快,在50 $^{\circ}$ C时多酚得率达到最大值。超声温度 >50 $^{\circ}$ C时,因多酚具有高温不稳定性,超声温度过高会使其结构被分解^[21],从而导致得率下滑。因此,超声温度选择50 $^{\circ}$ C。

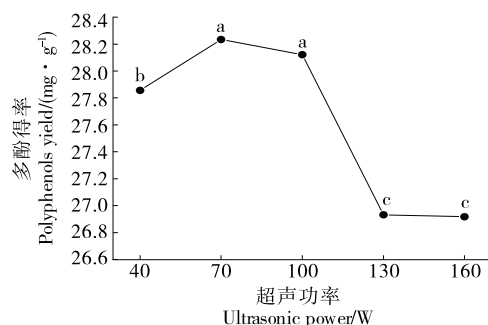
2.1.2 超声功率对细叶黄皮果核多酚得率的影响 由图2可知,在一定超声功率范围内,超声功率的适当提高可使细叶黄皮果核多酚得率增加,这是因为超声波在乙



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图1 超声温度对细叶黄皮果核多酚得率的影响

Figure 1 Effect of ultrasonic temperature on polyphenol yield



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

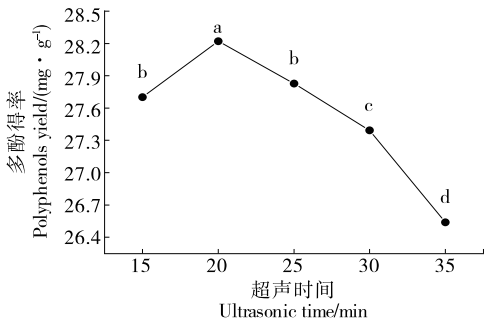
图2 超声功率对细叶黄皮果核多酚得率的影响

Figure 2 Effect of ultrasonic power on polyphenol yield

醇溶液中引发了空化效应,使细叶黄皮果核粉末被冲击破碎分解,从而加速了多酚的剥离和分散^[22],当超声功率为70 W时细叶黄皮果核多酚得率较高,为28.24 mg/g。超声功率 >70 W时,可能因空化泡生成和破裂率低,空化效应减弱,使超声波对细叶黄皮果核细胞的破坏力减弱,造成多酚得率随着超声功率的增加而明显下降的结果^[23]。因此,选择超声功率70 W左右。

2.1.3 超声时间对细叶黄皮果核多酚得率的影响 由图3可知,超声时间为20 min时细叶黄皮果核多酚得率明显较高,为28.22 mg/g。超声时间为20~35 min时,多酚得率随着超声时间的增加呈现明显降低的趋势。这是因为充足的超声时间保证了细叶黄皮果核粉末能够被乙醇充分溶解,从而增加多酚的析出,但是超声时间过长也会导致多酚被破坏分解,从而降低多酚得率^[24]。因此,选择超声时间20 min左右。

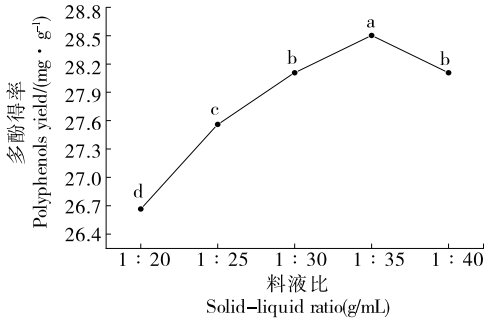
2.1.4 料液比对细叶黄皮果核多酚得率的影响 由图4可知,料液比为1:20~1:35 (g/mL)时,细叶黄皮果核多酚得率随着乙醇溶液的增加而明显增大,这是由于增加乙醇溶液能促使果核多酚和乙醇溶液之间的传质推动力增强,降低提取液的黏度并提高溶剂的渗透性,从而加快了多酚从果核提取物脱附下来的速率^[25]。但溶剂过多时,



小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

图3 超声时间对细叶黄皮果核多酚得率的影响

Figure 3 Effect of ultrasonic time on polyphenol yield



小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

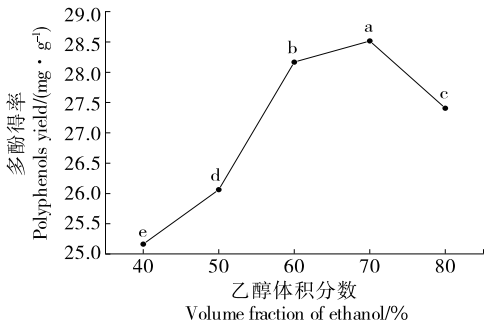
图4 料液比对细叶黄皮果核多酚得率的影响

Figure 4 Effect of solid-liquid ratio on polyphenol yield

乙醇溶液会吸收更多的超声波能量,引发溶剂局部过热,同时削弱超声空化效应,从而降低细叶黄皮果核多酚的溶出,还可能增加其他杂质析出的可能性,干扰多酚的提取^[26]。因此,料液比选择 1:35 (g/mL) 左右。

2.1.5 乙醇体积分数对细叶黄皮果核多酚得率的影响

由图 5 可知,乙醇体积分数为 40%~70% 时,在超声波的作用下,乙醇溶液对细叶黄皮果核细胞的渗透性增强,有助于破坏提取物和多酚的结合界面,提高多酚得率^[27]。但是植物多酚多通过氢键与其他物质连接,乙醇体积分数的增大会降低溶剂的极性,使多酚和乙醇溶液的极性



小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

图5 乙醇体积分数对细叶黄皮果核多酚得率的影响

Figure 5 Effect of ethanol volume fraction on polyphenol yield

差异增大,导致得率下降^[28]。因此,乙醇体积分数选择 70% 左右。

2.2 响应面试验

2.2.1 模型方程建立与显著性分析 Box-Behnken 中心组合试验因素水平见表 1,试验设计与结果见表 2。

利用 Design Expert 13 软件建立超声功率、超声时间、料液比、乙醇体积分数的四因子回归模型为:

表 1 因素水平表

Table 1 Factors and levels

水平	A 超声功率/W	B 超声时间/min	C 料液比 (g/mL)	D 乙醇体积分数/%
-1	40	15	1:30	60
0	70	20	1:35	70
1	100	25	1:40	80

表 2 响应面试验设计与结果

Table 2 Response surface experimental design and results

试验号	A	B	C	D	多酚得率/(mg · g ⁻¹)
1	1	-1	0	0	28.50
2	0	0	-1	1	27.10
3	0	0	-1	-1	26.72
4	-1	-1	0	0	27.77
5	0	0	1	-1	27.73
6	-1	0	1	0	28.39
7	1	0	0	-1	27.44
8	1	1	0	0	27.34
9	-1	0	0	-1	27.38
10	0	0	0	0	28.23
11	0	-1	-1	0	27.72
12	1	0	0	1	28.12
13	0	1	1	0	28.09
14	0	0	0	0	28.19
15	1	0	-1	0	27.87
16	0	-1	0	-1	27.20
17	0	0	0	0	28.30
18	1	0	1	0	28.40
19	0	0	0	0	28.42
20	0	1	0	-1	27.00
21	-1	0	0	1	28.36
22	-1	0	-1	0	27.10
23	0	0	1	1	28.15
24	0	0	0	0	28.30
25	-1	1	0	0	28.40
26	0	1	-1	0	27.73
27	0	1	0	1	28.09
28	0	-1	1	0	28.44
29	0	-1	0	1	27.63

$$Y=28.290\ 6-0.044\ 4A-0.050\ 2B+0.273\ 2C+0.407\ 5D-0.448\ 4AB+0.010\ 5AC-0.073\ 6AD-0.091\ 1BC+0.164\ 6BD-0.213\ 7CD-0.010\ 5A^2-0.254\ 0B^2-0.101\ 6C^2-0.516\ 7D^2。$$

(2)

由表 3 可知,模型 $P<0.000\ 1$,极显著,失拟项 $P=0.247\ 9>0.05$,不显著,矫正模型的相关系数 $R^2=0.971\ 0$,决定系数 $R^2_{\text{Adj}}=0.942\ 1$,说明模型具有较高的可信度,能较好反映出各因素与细叶黄皮果核多酚得率之间的关系。一次项中,C、D 对多酚得率的线性效应均极显著 ($P<0.001$),二次项中 AB、 B^2 、 D^2 的影响均极显著 ($P<0.001$),BD、CD、 C^2 的影响均显著 ($P<0.05$)。由 F 值可知,在试验范围内各因素对细叶黄皮果核多酚得率的影响大小依次是 $D>C>B>A$ 。

2.2.2 交互作用的影响 由图 6 可知,AB、BD、CD 交互作用的等高线紧密且呈斜椭圆形状,说明两因素间存在交互作用^[29],与方差分析结果一致。

2.2.3 验证实验 通过响应面软件求得得出的细叶黄皮果核多酚提取工艺的最佳试验方案为超声功率 93.13 W、超声时间 16.78 min、料液比 1:37.83 (g/mL)、乙醇体积分数 70.20%,此时多酚提取率的理论值为 28.56 mg/g。考虑到实际应用过程中的操作,将最佳工艺条件修正为提取功率 94 W、提取时间 17 min、料液比 1:37 (g/mL)、乙醇体积分数 70%,在此条件下细叶黄皮果核多酚提取率为 (28.53 ± 0.13) mg/g,与理论值基本相符合,说明模型对细

表 3 方差分析[†]

差异来源	平方和	自由度	均值	F 值	P 值	显著性
模型	6.080 0	14	0.434 0	33.52	<0.000 1	**
A	0.023 6	1	0.023 6	1.82	0.198 2	
B	0.030 2	1	0.030 2	2.34	0.148 6	
C	0.895 8	1	0.895 8	69.19	<0.000 1	**
D	1.990 0	1	1.990 0	153.91	<0.000 1	**
AB	0.804 1	1	0.804 1	62.11	<0.000 1	**
AC	0.000 4	1	0.000 4	0.03	0.856 1	
AD	0.021 6	1	0.021 6	1.67	0.216 9	
BC	0.033 2	1	0.033 2	2.56	0.131 7	
BD	0.108 4	1	0.108 4	8.37	0.011 8	*
CD	0.182 6	1	0.182 6	14.11	0.002 1	*
A ²	0.000 7	1	0.000 7	0.06	0.817 4	
B ²	0.418 3	1	0.418 3	32.31	<0.000 1	**
C ²	0.066 9	1	0.066 9	5.17	0.039 3	*
D ²	1.730 0	1	1.730 0	133.75	<0.000 1	**
残差项	0.181 3	14	0.012 9			
失拟项	0.152 2	10	0.015 2	2.10	0.247 9	
纯误差	0.029 1	4	0.007 3			
总误差	6.260 0	28				

[†] * 表示差异显著 ($P<0.05$); ** 表示差异极显著 ($P<0.001$); $R^2=0.971\ 0$; $R^2_{\text{Adj}}=0.942\ 1$ 。

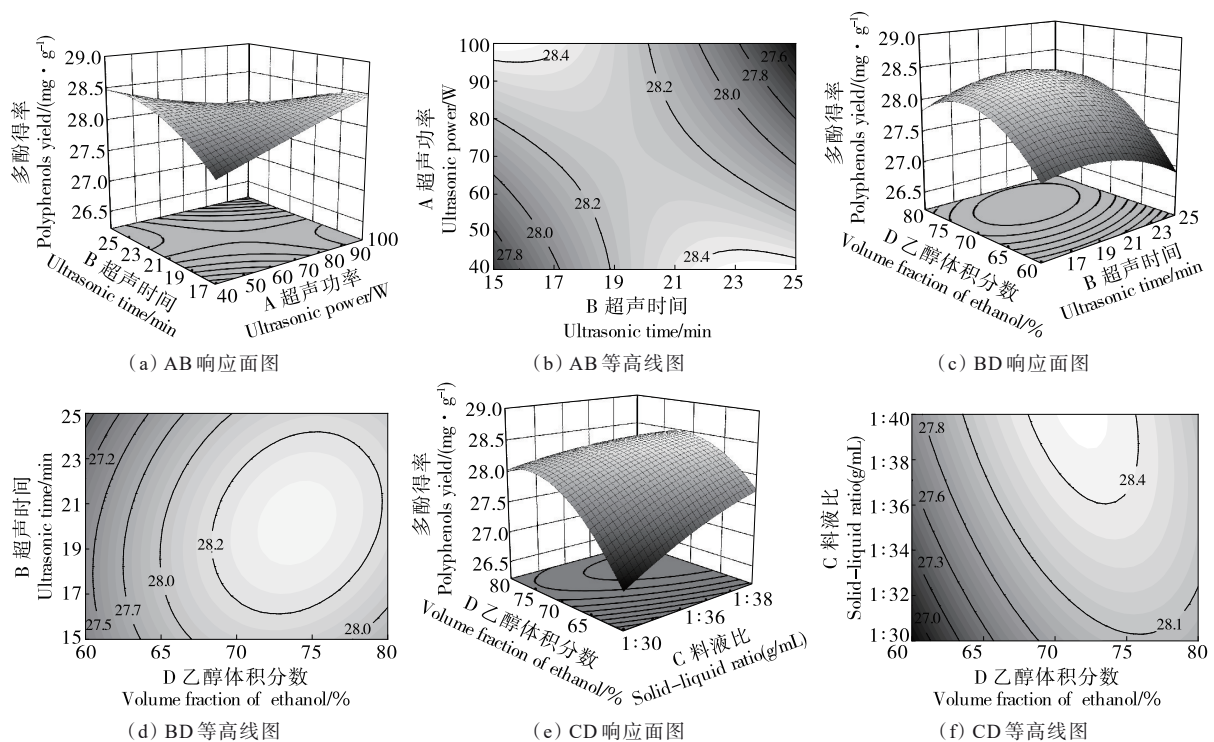


图 6 各因素交互作用对细叶黄皮果核多酚得率影响的响应面图及等高线图

Figure 6 Response surface and contour maps of the effect of the factor interaction on polyphenol yield

叶黄皮果核多酚提取工艺条件参数优化切实可靠,具有一定的应用价值。

2.3 细叶黄皮果核多酚的抗氧化活性

2.3.1 对羟自由基的清除效果 由图 7 可知,在 0.2~1.0 mg/mL 范围内,羟自由基清除率随着细叶黄皮果核多酚质量浓度的上升而增强,说明多酚质量浓度影响多酚对羟自由基的清除能力。邱梦瑜等^[7]研究了细叶黄皮果核多酚清除自由基的能力,结果表明多酚是影响细叶黄皮果核抗氧化活性的相关因素。细叶黄皮果核多酚对羟自由基的半抑制质量浓度(IC₅₀值)为 0.37 mg/mL。

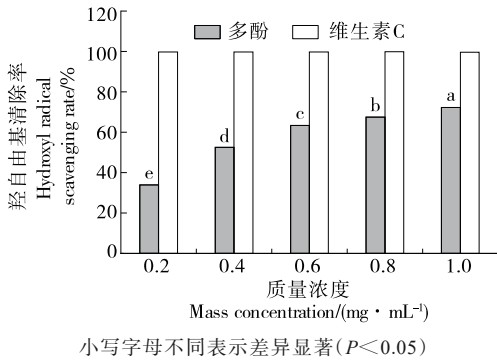


图 7 细叶黄皮果核多酚对羟自由基的清除效果
Figure 7 Hydroxyl free radical scavenging effects of polyphenols

2.3.2 对 DPPH 自由基的清除效果 由图 8 可知,在 20~100 μg/mL 范围内,随着质量浓度的增加细叶黄皮果核多酚表现出良好的自由基清除能力,与 Liu 等^[30]的研究结果一致,且对 DPPH 自由基的清除率都强于维生素 C。经线性拟合,细叶黄皮果核多酚对 DPPH 自由基的 IC₅₀ 值为 29.75 μg/mL。

2.3.3 对 ABTS⁺ 自由基的清除效果 由图 9 可知,当细叶黄皮果核多酚质量浓度从 0.5 μg/mL 提高到 10.0 μg/mL 时,多酚对 ABTS⁺ 自由基的清除率由 14.38% 上升至 82.74%,同时维生素 C 对 ABTS⁺ 自由基的清除能力由 13.74% 上升至 41.68%,显然多酚对 ABTS⁺ 自由基的清除能力强于维生素 C。细叶黄皮果核多酚对 ABTS⁺ 自由基的 IC₅₀ 值为 6.02 μg/mL。

2.4 细叶黄皮果核多酚的抑菌活性

由表 4 可知,细叶黄皮果核多酚提取物对 4 种常见的食源性致病菌具有明显的抑制作用。而且细叶黄皮果核多酚对变形杆菌的抑制作用明显强于其他 3 种食源性致病菌,其抑菌圈直径为 14.77 mm,而对大肠杆菌的抑制作用相对较低,抑菌圈直径为 12.39 mm,但细叶黄皮果核多酚的抑菌活性弱于头孢拉定。随着细叶黄皮果核多酚提取物质量浓度的增加,抑菌圈直径也逐渐变大,说明多酚的质量浓度与多酚的抑菌活性具有一定的剂量关系,与

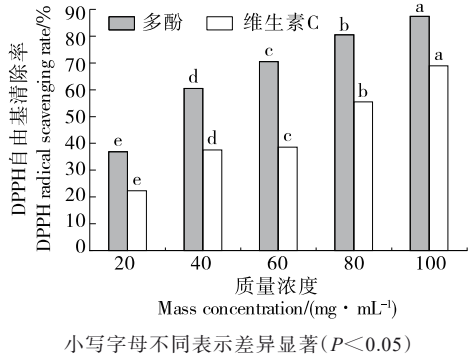


图 8 细叶黄皮果核多酚对 DPPH 自由基的清除效果
Figure 8 DPPH free radical scavenging effects of polyphenols

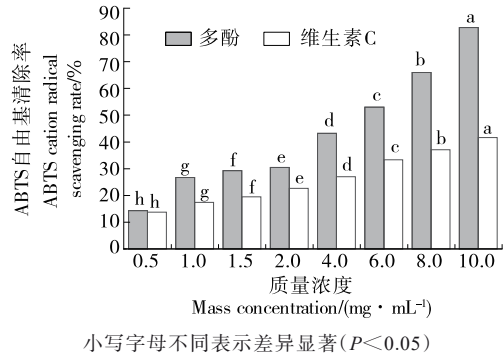


图 9 细叶黄皮果核多酚对 ABTS⁺ 自由基的清除效果
Figure 9 ABTS⁺ free radical scavenging effects of polyphenols

聂龙英等^[31]、张春艳等^[32]的研究结果一致。细叶黄皮果核多酚提取物对大肠杆菌、变形杆菌、金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的最小抑菌质量浓度分别为 5.63, 2.81, 5.63, 2.81 mg/mL。

表 4 抑菌圈直径[†]

质量浓度/ (mg · mL ⁻¹)	抑菌圈直径/mm			
	大肠杆菌	变形杆菌	金黄色葡萄球菌	铜绿假单胞菌
空白对照	—	—	—	—
1.41	—	—	—	—
2.81	—	7.31 ± 0.28 ^f	—	7.75 ± 0.31 ^f
5.63	8.04 ± 0.33 ^e	9.96 ± 0.18 ^e	9.23 ± 0.46 ^e	9.87 ± 0.15 ^e
11.25	9.48 ± 0.38 ^d	11.83 ± 0.21 ^d	11.73 ± 0.42 ^d	11.23 ± 0.45 ^d
22.50	11.53 ± 0.23 ^c	12.93 ± 0.25 ^c	12.97 ± 0.28 ^c	12.18 ± 0.33 ^c
45.00	12.39 ± 0.36 ^b	14.77 ± 0.29 ^b	13.20 ± 0.33 ^b	14.33 ± 0.44 ^b
阳性对照	21.77 ± 0.11 ^a	19.11 ± 0.18 ^a	23.67 ± 0.22 ^a	26.52 ± 0.21 ^a

[†] 同列小写字母不同表示差异显著 (P < 0.05); “—”表示无抑菌效果。

3 结论

以乙醇作为溶剂,确定细叶黄皮果核多酚的最佳提取工艺参数为超声功率 94 W、超声时间 17 min、料液比 1:38 (g/mL)、乙醇体积分数 70%,在此参数下细叶黄皮果核多酚得率达到 (28.53 ± 0.13) mg/g。该多酚对 DPPH 自由基、ABTS⁺自由基的清除能力均强于维生素 C,抑菌活性也较强,可作为天然植物多酚的来源材料。后续可围绕细叶黄皮果核多酚的分离纯化、结构鉴定、生物活性机制等展开深入研究。

参考文献

- [1] 蒙爱芳,黄侃. 鸡皮果及其栽培技术[J]. 福建果树, 1997(2): 59-60.
- [2] MENG A F, HUANG K. *Clausena anisum-olens* and its cultivation techniques[J]. Southeast Horticulture, 1997(2): 59-60.
- [3] 黄峰,何铎扬,雷艳梅. 极具发展前景的山黄皮果[J]. 中国热带农业, 2005(4): 30-31.
- [4] HUANG F, HE X Y, LEI Y M. Fruit of *Clausena anisum-olens* with great development prospects[J]. China Tropical Agriculture, 2005(4): 30-31.
- [5] 覃振师. 广西崇左市山黄皮资源调查、遗传多样性和挥发油成份分析[D]. 南宁: 广西大学, 2017: 1-5.
- [6] QIN Z S. The resource investigation, analysis of the volatile oil and the genetic diversity of *Clausena indica* (Datz.) Oliv. in Chongzuo City, Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2017: 1-5.
- [7] 鲁焯. 山黄皮的营养保健及在烹调中的运用研究[J]. 广西农学报, 2019, 34(5): 54-57.
- [8] LU X. Study on nutrition and health care of *Randia cochinchinensis* and its application in cooking[J]. Journal of Guangxi Agriculture, 2019, 34(5): 54-57.
- [9] QUAN N V, ANH L H, LAM V Q, et al. Anti-diabetes, anti-gout, and anti-leukemia properties of essential oils from natural spices *Clausena indica*, *Zanthoxylum rhetsa*, and *Michelia tonkinensis*[J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2022, 27(3): 774.
- [10] LIU Y P, GUO J M, XIE Z, et al. Clausanisinumine, a prenylated bicarbazole alkaloid from the fruits of *Clausena anisum-olens* and its potential anti-HIV activity[J]. The Journal of Organic Chemistry, 2021, 86(24): 17 722-17 726.
- [11] 邱梦瑜,何子靖,张衍馨,等. 黄皮与山黄皮不同部位黄酮、多酚含量及抗氧化活性比较[J]. 南方农业学报, 2022, 53(9): 2 603-2 611.
- [12] QIU M Y, HE Z J, ZHANG Y X, et al. Comparison of flavonoids content, polyphenols content and antioxidant activity of different parts of *Clausena lansium* (Lour.) skeels and *C. anisum-olens* (Blanco) Merr. [J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(9): 2 603-2 611.
- [13] WANG R M, HE R P, LI Z H, et al. LC-Q-orbitrap-MS/MS characterization, antioxidant activity, and α -glucosidase-inhibiting activity with in silico analysis of extract from *Clausena indica* (Datz.) Oliv fruit pericarps[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 727087.
- [14] 廖丽娟,黄已桃,戴园园,等. 山黄皮不同部位水提取物抗菌和降糖作用分析[J]. 右江民族医学院学报, 2020, 42(6): 705-709.
- [15] LIAO L J, HUANG J T, DAI Y Y, et al. Analysis of antibacterial and hypoglycemic effects of water extracts from different parts of *Clausena indica* (Datz.) Oliv[J]. Journal of Youjiang Medical University for Nationalities, 2020, 42(6): 705-709.
- [16] 苏秀芳,黄丽娟,冯佩珍. 细叶黄皮果仁挥发油成分及抑菌作用[J]. 食品科学, 2011, 32(3): 30-32.
- [17] SU X F, HUANG L J, FENG P Z. Chemical composition analysis and antimicrobial activity of volatile oil from the nutlets of *Causena anisum-olens*[J]. Food Science, 2011, 32(3): 30-32.
- [18] YOU C X, JIANG H Y, ZHANG W J, et al. Contact toxicity and repellency of the main components from the essential oil of *Clausena anisum-olens* against two stored product insects [J]. Journal of Insect Science, 2015, 15(1): 87.
- [19] WANG Y S, LI B T, LIU S X, et al. Anisucoumaramide, a bioactive coumarin from *Clausena anisum-olens*[J]. Journal of Natural Products (Washington, D. C.), 2017, 80(4): 798-804.
- [20] 陆小鸿. “消脂健胃”山黄皮果[J]. 广西林业, 2018(8): 42-43.
- [21] LU X H. "Fat elimination and healthy stomach" *Clausena anisum-olens*[J]. Forestry of Guangxi, 2018(8): 42-43.
- [22] 吕京京,李璐,张娜. 植物性食物中结合多酚的释放及功能活性的研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 404-413.
- [23] LÜ J J, LI L, ZHANG N. Research on the release and functional activity of bound polyphenols in plant foods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 404-413.
- [24] ERŞAN S, GÜÇLÜ ÜSTÜNDAĞ Ö, CARLE R, et al. Determination of pistachio (*Pistacia vera* L.) hull (exo- and mesocarp) phenolics by HPLC-DAD-ESI/MSN and UHPLC-DAD-ELSD after ultrasound-assisted extraction[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 62: 103-114.
- [25] 王君,高文彬,陈新,等. 响应面法优化金丝皇菊多酚提取工艺及其抗氧化活性评价[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(1): 79-84.
- [26] WANG J, GAO W B, CHEN X, et al. Optimization of the extraction process of polyphenols from *Dendranthema morifolium* by response surface methodology and its antioxidant activity evaluation[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(1): 79-84.
- [27] 宋佳敏,王鸿飞,孙朦,等. 响应面法优化金蝉花多糖提取工艺及抗氧化活性分析[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 275-281.
- [28] SONG J M, WANG H F, SUN M, et al. Optimization of extraction and antioxidant activity of polysaccharides from *Cordyceps cicadae* by response surface methodology[J]. Food Science, 2018, 39(4): 275-281.
- [29] 辛文燕,何劲,汪艳群. 山桐子粕多酚提取工艺优化及抗氧化活性的研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(11): 147-154.
- [30] XIN W Y, HE J, WANG Y Q. Optimization of extraction

- process of polyphenols from *Idesia polycarpa* meal and in vitro antioxidant activity[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(11): 147-154.
- [19] 陈克克, 强毅. 响应面法优化超声波辅助黄精多酚的提取及其抗菌活性[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 91-96.
- CHEN K K, QIANG Y. Optimization of ultrasonic assisted extraction of polyphenols from *Polygonatum sibiricum* Red. using response surface methodology and its antibacterial activity[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(1): 91-96.
- [20] 李慧, 田家瑶, 庞姗姗, 等. 聚乙烯醇/纳米纤维素/石榴皮多酚复合抗菌薄膜性能研究[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 103-109, 177.
- LI H, TIAN J Y, PANG S S, et al. Study on properties of polyvinyl alcohol/nanocellulose/pomegranate peel polyphenol composite antibacterial films[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 103-109, 177.
- [21] 陈铁杨, 胡文忠, 侯梦阳, 等. 超声辅助提取金花茶叶多酚的工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(6): 25-31.
- CHEN T Y, HU W J, HOU M Y, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of polyphenols from *Camellia petelotii* leaves and evaluation of their antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2022, 43(6): 25-31.
- [22] 罗维巍, 吕琳琳, 孙丽阳, 等. 黑涩石楠总多酚超声辅助提取工艺优化、抗氧化活性评价及单体酚分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(5): 199-205.
- LUO W W, LV L L, SUN L Y, et al. Optimization of ultrasound assisted extraction process, antioxidant activity evaluation of total polyphenols and free phenols analysis from *Aronia melanocarpa*[J]. China Brewing, 2024, 43(5): 199-205.
- [23] 孙燕, 李成忠, 张焕新, 等. 黑果腺肋花楸中花青素的提取及其抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(1): 223-230.
- SUN Y, LI C Z, ZHANG H X, et al. Optimization of extraction process and antioxidant activity of anthocyanins from *Aronia melanocarpa*[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(1): 223-230.
- [24] OROIAN M, URSACHI F, DRANCA F. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from crude pollen[J]. Antioxidants, 2020, 9(4): 322.
- [25] 巫永华, 王解语, 黄莉莉, 等. 牛蒡多酚超声波辅助低共熔溶剂提取工艺优化、生物活性评价及组分分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 171-179.
- WU Y H, WANG J Y, HUANG L L, et al. Optimization of ultrasonic-assisted deep eutectic solvent extraction process, biological activities and components of burdock polyphenols [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 171-179.
- [26] 赵彦巧, 张鑫, 王月, 等. 超声提取紫苏叶多酚及其抗氧化性研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(9): 127-132.
- ZHAO Y Q, ZHANG X, WANG Y, et al. Study on ultrasonic extraction of perilla leaf polyphenols and its antioxidant activity[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(9): 127-132.
- [27] 王俊龙, 闫慧杰, 蒿永刚, 等. 新疆藜本总多酚提取工艺优化、成分分析及其生物活性评价[J]. 中成药, 2025, 47(5): 1 449-1 455.
- WANG J L, YAN H J, LIN Y G, et al. Extraction process optimization, component analysis and biological activity evaluation for total polyphenols from *Conioselinum vaginatu* [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2025, 47(5): 1 449-1 455.
- [28] 陈燕萌, 魏金兰, 陈凤, 等. 假蒟叶多酚提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(2): 76-84.
- CHEN Y M, WEI J L, CHEN F, et al. Extraction optimization of polyphenols from *Piper sarmentosum* Roxb. leaves and its antioxidant activity[J]. China Food Additives, 2023, 34(2): 76-84.
- [29] 张娜, 刘丽, 李璐, 等. 青胶蒲公英根多酚超声辅助提取工艺优化及其体外抗氧化、降糖活性[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 200-208.
- ZHANG N, LIU L, LI L, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of polyphenols from *Taraxacum kok-saghyz* Rodin roots and its antioxidant, hypoglycemic activity in vitro [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 200-208.
- [30] LIU S W, LI X Y, GUO Z Y, et al. Polyphenol content, physicochemical properties, enzymatic activity, anthocyanin profiles, and antioxidant capacity of *Cerasus humilis* (Bge.) Sok. genotypes[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2 018: 1-13.
- [31] 聂龙英, 苏满春, 焦利军, 等. 响应面法优化油橄榄果渣多酚提取工艺及其抑菌活性研究[J]. 中国饲料, 2025(13): 49-56.
- NIE L Y, SU M C, JIAO L J, et al. Optimization of extraction technology of polyphenols from olive pomace by response surface methodology and its antibacterial activity[J]. China Feed, 2025(13): 49-56.
- [32] 张春艳, 王益蕊, 周霏娅, 等. 黑树莓酚类物质提取工艺优化及抗氧化、抑菌活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2025, 37(3): 491-501.
- ZHANG C Y, WANG Y R, ZHOU F Y, et al. Optimization of extraction process of phenols from *Rubus occidentalis* L. and its antioxidant and antibacterial activities[J]. Natural Product Research and Development, 2025, 37(3): 491-501.