

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241101001

引用格式: 白玉英, 李志宏, 彭泽琴, 等. 白花木瓜多酚提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 170–176.

BAI YY, LI ZH, PENG ZQ, *et al.* Optimization of extraction process and study on antioxidant activity of *Chaenomeles sinensis* polyphenols [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 170–176. (in Chinese with English abstract).

白花木瓜多酚提取工艺优化及其抗氧化活性研究

白玉英¹, 李志宏^{1,2}, 彭泽琴¹, 周启武^{1*}

(1. 滇西科技师范学院生物技术与工程学院, 临沧 677000; 2. 成都大学食品与生物工程学院, 成都 610106)

摘要: **目的** 优化白花木瓜多酚提取工艺并研究其抗氧化活性。**方法** 通过单因素和正交实验对白花木瓜多酚的提取工艺进行优化; 同时开展体外实验, 对白花木瓜多酚的总还原能力、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力和羟基自由基清除能力进行研究。**结果** 白花木瓜多酚提取的最佳工艺为: 乙醇体积分数 60%、料液比 1:25 (g/mL)、超声温度 55 °C、超声时间 90 min, 此条件下多酚提取量为 2.22 mg/g; 在样品质量浓度为 1.0 mg/mL 时, 测定白花木瓜多酚总还原能力、DPPH 自由基清除率和羟自由基清除率, 分别为 2.41±0.02、89.33%±0.24%、81.30%±1.27%, 均高于同等浓度下的维生素 C (2.29±0.08、86.05%±0.39%、80.94%±0.41%), 说明白花木瓜多酚具有较好的抗氧化活性, 有较好的应用前景。**结论** 本研究为白花木瓜多酚的进一步研究应用提供参考, 为白花木瓜资源多元高值化利用提供新思路, 为白花木瓜资源的深加工以及合理选择膳食提供了理论依据。

关键词: 白花木瓜; 多酚; 超声辅助提取; 工艺优化; 抗氧化活性

Optimization of extraction process and study on antioxidant activity of *Chaenomeles sinensis* polyphenols

BAI Yu-Ying¹, LI Zhi-Hong^{1,2}, PENG Ze-Qin¹, ZHOU Qi-Wu^{1*}

(1. College of Biotechnology and Engineering, Western Yunnan University, Lincang 677000, China;
2. College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the extraction process of *Chaenomeles sinensis* polyphenols and study their antioxidant activity. **Methods** The extraction process of *Chaenomeles sinensis* polyphenols was optimized through single factor and orthogonal experiments; the *in vitro* experiments were simultaneously conducted to investigate the total reducing ability, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging ability, and hydroxyl radical scavenging ability of *Chaenomeles sinensis* polyphenols. **Results** The optimal process for extracting polyphenols from *Chaenomeles sinensis* was: Ethanol volume fraction of 60%, solid-liquid ratio of 1:25 (g/mL), ultrasonic temperature of 55 °C and ultrasonic time of 90 min. Under these conditions, the polyphenol extraction amount was 2.22 mg/g; at a sample concentration of 1.0 mg/mL, the total reducing ability, DPPH radical scavenging rate and

收稿日期: 2024-11-01

基金项目: 临沧市科技创新人才项目(202304AC100001-RC03); 云南口岸经济中缅沿边产业及民族文化研究专项(DXZX202402)

第一作者: 白玉英(1997—), 女, 硕士, 主要研究方向为农产品质量安全与营养功能研究。E-mail: 3476171824@qq.com

*通信作者: 周启武(1987—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为农产品质量安全与营养功能研究。E-mail: zhqiwu1987@163.com

hydroxyl radical scavenging rate of *Chaenomeles sinensis* polyphenols were determined to be 2.41 ± 0.02 , $89.33\%\pm 0.24\%$, and $81.30\%\pm 1.27\%$, respectively, all higher than vitamin C at the same concentration (2.29 ± 0.08 , $86.05\%\pm 0.39\%$, $80.94\%\pm 0.41\%$), indicating that *Chaenomeles sinensis* polyphenols had good antioxidant activity and promising application prospects. **Conclusion** This study provides a reference for further research and application of polyphenols in *Chaenomeles sinensis*, offers new ideas for the diversified and high-value utilization of *Chaenomeles sinensis* resources, and provides theoretical basis for the deep processing of *Chaenomeles sinensis* resources and rational dietary selection.

KEY WORDS: *Chaenomeles sinensis*; polyphenols; ultrasonic-assisted extraction; process optimization; antioxidant activity

0 引言

在药用与食用价值兼具的植物资源中,蔷薇科(Rosaceae)下的木瓜属(*Chaenomeles*)植物在我国占有重要地位。白花木瓜(*Chaenomeles sinensis*)是云南省临沧市的特产,当地气候条件优越,尤为适合白花木瓜生长,所产白花木瓜产量颇高,果实硕大,果肉肥厚^[1]。白花木瓜富含铁、锰、磷、钾、镁、钙、锌等多种元素^[2],还包含维生素、果胶、胡萝卜素、氨基酸、黄酮类、有机酸等营养物质^[3]。正因白花木瓜营养丰富、肉厚清脆且味甘酸,其用于食品工业加工出的食品深受人们喜爱。此外,白花木瓜药用价值极高,成熟果实呈金黄色,味道酸,具有祛风除湿、平肝和胃等功效^[4]。其中的有机酸能抗氧化^[5]、消食健胃;黄酮类物质可有效预防冠心病,能调节心律不齐、降低血压^[6-9];白花木瓜中的齐墩果酸,功效多样,比如降血脂、护肝降酶、抗氧化等^[10-11],还对染色体损失有一定保护作用,是医药工业的重要原料^[12]。

白花木瓜(*Chaenomeles sinensis*)是一种具有丰富营养价值和药用价值的植物资源,其含有多种生物活性成分,其中多酚类物质是其重要的活性成分之一。多酚具有抗氧化、抗炎^[13]、抗菌^[14]、抗癌^[15-17]等多种生物活性,对人体健康具有重要的保护作用。因此,深入研究白花木瓜中的多酚类物质,对于开发利用白花木瓜资源具有重要的意义。

氧化应激是导致许多慢性疾病发生发展的重要因素之一^[18]。抗氧化剂可以通过清除自由基、抑制氧化反应^[19-23]等方式,减轻氧化应激对人体的损害^[24]。因此,寻找高效的抗氧化剂成为了当前研究的热点之一。多酚类物质具有很强的抗氧化活性,对预防和治疗氧化应激相关的疾病具有潜在的应用价值。

多酚提取工艺研究不断发展。传统方法有溶剂提取等,操作较简单但效率有限。如今超临界流体萃取、微波辅助提取等新技术涌现,提取率、纯度得以提升,且更环保,不过部分仍面临成本及规模化应用难题^[25-30]。

当前,李慧芸^[29]从木瓜果渣中提取多酚并研究其抗氧化活性,贺鹏等^[30]对木瓜籽粕中多酚的提取和抗氧化活性进行了研究,但目前国内外关于白花木瓜多酚提取工艺

优化及其抗氧化活性的研究鲜有报道。因此,优化白花木瓜多酚的提取工艺,提高多酚的提取率是实现白花木瓜资源高效利用的关键。

目前,国内外对于白花木瓜的研究主要集中在其化学成分、药理作用^[31-32]等方面,对于白花木瓜多酚的提取工艺优化及其抗氧化活性的研究还比较少。因此,本研究通过单因素和正交实验对白花木瓜多酚的提取工艺进行优化并研究其抗氧化活性,以为白花木瓜资源多元高值化利用提供新思路,并为白花木瓜资源的深加工利用以及合理选择膳食提供理论依据,促进白花木瓜相关抗氧化功效食品的研发,对白花木瓜行业的发展提供支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

2023年10—11月于云南省临沧市本地农贸市场采集白花木瓜新鲜果实,采集后置于洁净干燥的密封袋中保存并置于 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存备用。

无水乙醇(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);福林酚、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)(分析纯,北京酷来搏科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

UV-1200 紫外可见分光光度计、TD5D 离心机(上海美谱达仪器有限公司); Sartorius BSA224S1 电子天平[精度 0.1 mg , 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; DHG-9070A 电热鼓风干燥箱(上海浦东荣丰科学仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品预处理

新鲜白花木瓜用蒸馏水洗净,剔除果核,切片后置于烘箱干燥(温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,时间为 12 h),烘干后将其粉碎过筛(60目),放入密封袋内,避光保存。

1.3.2 标准曲线的绘制

采用福林酚法测定多酚含量,参照白玉英等^[33]的方法稍作修改,以没食子酸标准溶液的质量浓度作为横坐标(X , $\mu\text{g/mL}$),以在 760 nm 下没食子酸试样的吸光度作为纵坐标(Y),平行进行3次测定,计算其平均值,绘制没食子

酸标准曲线。

1.3.3 白花木瓜多酚提取工艺流程

白花木瓜鲜果→清洗→去核切片→干燥→粉碎→过筛→白花木瓜粉末→提取溶剂与白花木瓜粉末混合→不同条件下超声辅助提取→抽滤→白花木瓜多酚提取液→白花木瓜多酚提取液稀释→测定吸光值→计算多酚含量。

1.3.4 白花木瓜多酚含量的测定

准确称量白木瓜干粉 1.0 g, 以一定的乙醇体积分数、料液比、超声温度、超声时间为指标, 对其进行超声辅助提取, 抽滤, 得到白花木瓜多酚提取液。精确吸取 0.50 mL 白花木瓜多酚提取液于 10 mL 的试管中, 加蒸馏水至 1 mL, 按照郭世纪等^[34]方法进行多酚含量测定, 实验取 3 次平均值。白花木瓜多酚的提取量按公式(1)计算:

$$\text{多酚提取量}/(\text{mg/g})=(C \times V \times N/M) \times 100 \quad (1)$$

式中: C 为提取液中多酚的含量, $\mu\text{g/mL}$; V 为提取液体积, mL ; N 为稀释倍数; M 为称取的白木瓜干粉质量, g 。

1.3.5 单因素实验

称取白花木瓜粉 1.0 g, 设置超声功率 150 W, 固定乙醇体积分数 60%、料液比 1:20 (g/mL)、超声温度 50 $^{\circ}\text{C}$, 超声时间 50 min, 以白花木瓜多酚提取量为评价指标, 设计白花木瓜多酚提取单因素实验, 见表 1。

表 1 白花木瓜多酚提取单因素实验设计

Table 1 Single factor experimental design for polyphenol extraction from *Chaenomeles sinensis*

因素	水平					
A 乙醇体积分数/%	15	30	45	60	75	90
B 料液比(g/mL)	1:10	1:15	1:20	1:25	1:30	1:35
C 超声温度/ $^{\circ}\text{C}$	30	40	50	60	70	80
D 超声时间/min	30	50	70	90	110	130

1.3.6 正交实验

为进一步优化白花木瓜多酚提取工艺, 以白花木瓜多酚的提取量作为评价指标, 基于单因素实验的结果, 进行正交实验设计, 正交实验因素与水平见表 2。

表 2 正交实验因素水平表

Table 2 Orthogonal experiment factor levels table

水平	因素			
	A 乙醇体积分数/%	B 料液比(g/mL)	C 超声温度/ $^{\circ}\text{C}$	D 超声时间/min
1	55	1:25	45	80
2	60	1:30	50	90
3	65	1:35	55	100

1.3.7 白花木瓜多酚抗氧化活性研究

参考胡霞等^[35]的测定方法并作适当修改, 对白花木瓜的总还原能力和 DPPH 自由基清除率进行测定, 检测以维生素 C 为阳性对照, 平行进行 3 次, 记录并计算实验结

果。采用水杨酸滴定法对羟基自由基清除率进行测定, 在 510 nm 处测定其吸光值, 以维生素 C 为阳性对照, 清除率按公式(2)计算:

$$\text{清除率}/\% = \frac{A_0 - (A_x - A_{x_0})}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_0 为空白对照液的吸光度; A_x 为加入样品溶液后的吸光度; A_{x_0} 为不加显色剂 H_2O_2 色素溶液本底的吸光度。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010、Statistix 8.1 和 SPSS 25.0 软件进行数据统计分析, 绘图均采用 Origin 2018 进行绘制分析。

2 结果与分析

2.1 没食子酸标准曲线

利用 Folin-Ciocalteus 法, 以纯水(0)管作为空白管, 于 760 nm 处测定吸光值, 以没食子酸标准品质量浓度(X , $\mu\text{g/mL}$)为横坐标, 吸光值(Y)为纵坐标, 得到的多酚标准曲线方程为 $Y=0.2214X+0.019$ ($r^2=0.9991$)。在 2~10 $\mu\text{g/mL}$ 浓度范围内, 线性关系良好。

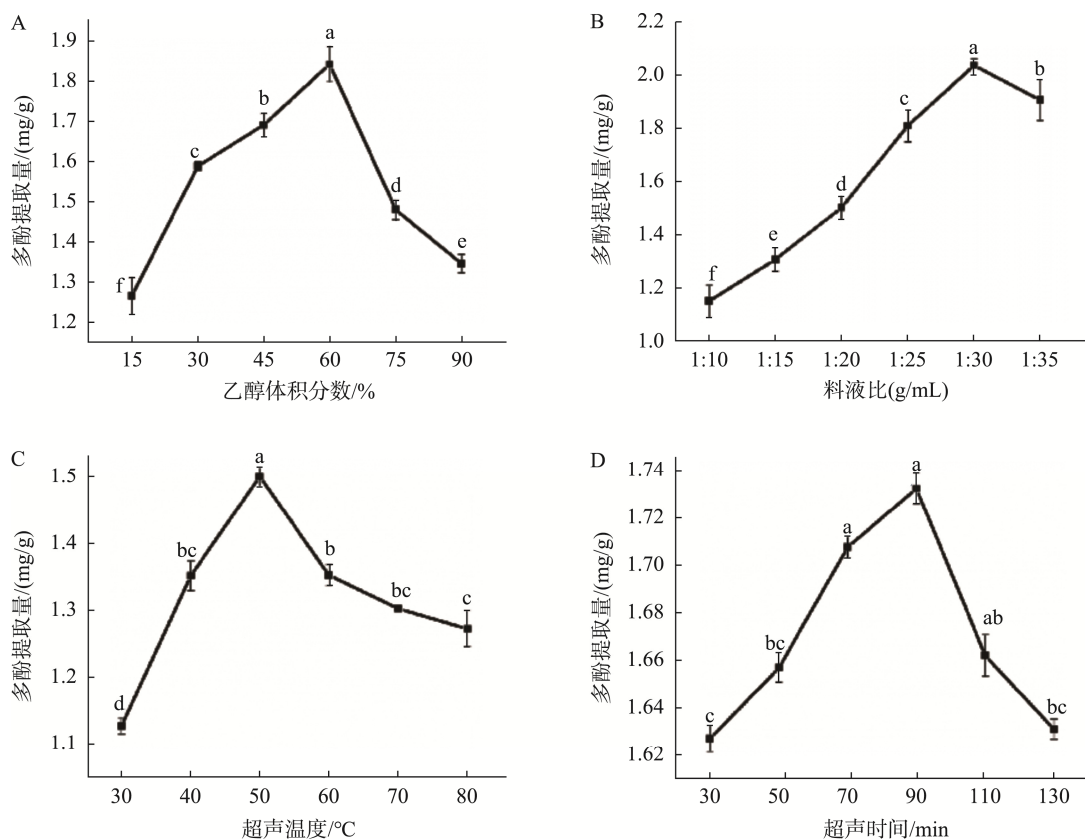
2.2 白花木瓜多酚提取单因素实验结果

2.2.1 乙醇体积分数对白花木瓜多酚提取效果的影响

如图 1A 所示, 乙醇体积分数对白花木瓜多酚提取量的影响呈现出先增加后显著降低的趋势。当乙醇体积分数大于 60% 时, 白花木瓜多酚提取量发生转变, 从显著增加转变为急速降低, 该转折点多酚提取量最高为 (1.84 ± 0.04) mg/g , 显著高于各实验组 ($P < 0.05$)。当乙醇体积分数为最低 15% 时, 白花木瓜多酚提取量也最低, 仅有 (1.27 ± 0.05) mg/g , 这可能是由于乙醇体积分数较小, 复合物之间的氢键和疏水键不容易被破坏。当乙醇体积分数为 60%~75% 时, 该段白花木瓜多酚提取量的曲线斜率最大, 下降速度最快, 这可能是由于当乙醇体积分数过高时, 会溶解浸出很多其他脂溶性物质, 多酚提取量因此出现大幅度降低。最终选择乙醇体积分数 55%、60%、65% 作为正交实验的筛选范围。

2.2.2 料液比对白花木瓜多酚提取效果的影响

研究结果如图 1B 所示, 在料液比为(1:10)~(1:30) (g/mL) 时, 料液比与白花木瓜多酚提取量呈正相关, 当料液比高于 1:30 (g/mL) 二者呈负相关。当料液比为 1:30 (g/mL) 时, 白花木瓜多酚提取量最高, 为 (2.04 ± 0.02) mg/g , 显著高于其他实验组 ($P < 0.05$)。产生这种现象的原因可能是, 当料液比达到 1:30 (g/mL) 时, 多酚的浸出已近乎饱和状态。而当溶剂含量持续增加, 会致使白花木瓜中的醇溶性杂质溶出, 过多的溶剂不仅会对已提取出的多酚进行稀释, 导致其在溶液中的浓度下降, 从而致使最终获取的多酚提取量减少^[1], 而且还会造成溶剂的浪费。因此, 正交实验的筛选范围选择料液比 1:25、1:30、1:35 (g/mL)。



注: 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 下同。

图1 不同提取条件对多酚得率的影响

Fig.1 Effects of varying extraction conditions on polyphenol yield

2.2.3 超声温度对白花木瓜多酚提取效果的影响

在乙醇体积分数 60%、料液比 1:20 (g/mL)、超声时间 50 min 条件下, 不同超声温度对白花木瓜多酚提取效果的影响如图 1C 所示。由图 1C 可知, 超声温度在 30~80 °C 区间内白花木瓜多酚的提取率呈现出先增加后降低的趋势。超声温度在 30~40 °C 时, 白花木瓜多酚提取量的增加速率最为显著, 在温度为 50 °C 时, 白花木瓜的多酚的提取量显著高于其他实验组 ($P < 0.05$), 提取量为 (1.50 ± 0.01) mg/g。超声温度过高会导致多酚的提取量出现下降的趋势, 这可能是由于温度过高时多酚物质的结构稳定性降低, 易被破坏或者发生不可逆的反应^[36]。综上, 选择超声温度 45、50、55 °C 作为正交实验的筛选范围。

2.2.4 超声时间对白花木瓜多酚提取效果的影响

超声时间对白花木瓜多酚提取效果的影响如图 1D 所示, 随超声时间的不断延长, 白花木瓜多酚提取量呈现出先增加后降低的趋势。当超声时间小于 90 min 时, 白花木瓜的多酚提取量不断增加; 当超声时间为 90 min 时, 白花木瓜的多酚提取量达到最高, 为 (1.73 ± 0.01) mg/g; 当超声时间大于 90 min 后, 白花木瓜多酚提取量反而不断下降。发生这种现象可能是由于当超声时间较短时多酚与蛋白质、多糖等物质形成的复合物较为稳定不易发生分离, 导致

多酚提取量偏低; 而当超声时间过长则会破坏多酚的结构, 使多酚与氧气的接触时间较长, 多酚易被氧化或分解, 造成多酚提取量的降低。因此, 选择提取时间 80、90、100 min 作为正交实验的筛选范围。

2.3 白花木瓜多酚提取的正交实验设计结果分析

根据单因素实验结果, 选出最优条件及其相邻的条件进行正交实验, 进一步优化白花木瓜多酚提取工艺, 得到白花木瓜多酚提取量, 结果见表 3。

由表 3 中的极差 R 值分析可得, 影响白花木瓜多酚提取量的顺序为: 乙醇体积分数(A) > 超声时间(D) > 超声温度(C) > 料液比(B)。由 K 值可知, 白花木瓜中多酚提取的最佳工艺为 $A_2B_1C_3D_2$, 即乙醇体积分数 60%、料液比 1:25 (g/mL)、超声温度 55 °C、超声时间 90 min, 该条件下多酚提取量为 2.22 mg/g。

2.4 白花木瓜多酚抗氧化活性结果分析

2.4.1 白花木瓜多酚的总还原能力

在样品质量浓度为 0.2~1.0 mg/mL 时, 测定白花木瓜多酚的总还原能力, 结果如图 2A 所示, 随着样品浓度不断的增加, 两种样品的总还原能力不断增强, 当样品质量浓度达到 1.0 mg/mL 时, 白花木瓜多酚和维生素 C 的总还原

表 3 正交实验结果
Table 3 Results of orthogonal experiment

实验号	A/%	B (g/mL)	C/°C	D/min	多酚提取量/(mg/g)
1	1	1	1	1	1.87
2	2	2	2	1	1.88
3	3	3	3	1	1.80
4	3	2	1	2	1.95
5	1	3	2	2	1.95
6	2	1	3	2	2.22
7	2	3	1	3	1.99
8	3	1	2	3	1.70
9	1	2	3	3	1.92
K_1	5.74	5.79	5.81	5.55	
K_2	6.09	5.75	5.53	6.12	
K_3	5.45	5.74	5.94	5.61	
k_1	1.91	1.93	1.94	1.85	
k_2	2.03	1.92	1.84	2.04	
k_3	1.82	1.91	1.98	1.87	
R	0.64	0.05	0.41	0.57	
最优方案	A_2	B_1	C_3	D_2	

能力分别为 2.41 ± 0.02 和 2.29 ± 0.08 。这说明白花木瓜多酚的还原能力极强,在同等浓度下超过维生素 C 的还原能力,

当样品质量浓度为 0.6 mg/mL 时,白花木瓜多酚的还原能力较维生素 C 提高了 30%。

2.4.2 白花木瓜多酚的 DPPH 自由基清除能力

在样品质量浓度为 $0.2 \sim 1.0 \text{ mg/mL}$ 时,测定白花木瓜多酚 DPPH 自由基清除能力,结果如图 2B 所示。由图 2B 可知,当样品质量浓度为 0.2 mg/mL 时,白花木瓜多酚对 DPPH 自由基清除能力为 $71.06\% \pm 1.06\%$,而维生素 C 只有 $53.09\% \pm 2.99\%$ 。当样品质量浓度在 $0.2 \sim 1.0 \text{ mg/mL}$ 时,随着样品质量浓度的不断提高,两种样品对 DPPH 自由基清除率也呈现增加趋势,并且在不同质量浓度下白花木瓜多酚对 DPPH 自由基清除能力相对维生素 C 较好。当质量浓度达到 1.0 mg/mL 时,白花木瓜多酚与维生素 C 对 DPPH 自由基的清除能力接近,分别为 $89.33\% \pm 0.24\%$ 和 $86.05\% \pm 0.39\%$ 。综上所述,白花木瓜多酚具有较强的 DPPH 自由基的清除能力。

2.4.3 白花木瓜多酚的羟基自由基清除能力

在样品质量浓度为 $0.2 \sim 1.0 \text{ mg/mL}$ 时,测定白花木瓜多酚羟基自由基清除能力,结果见图 2C。由图 2C 可以看出,当样品质量浓度为 $0.2 \sim 0.8 \text{ mg/mL}$ 时,维生素 C 对羟基自由基的清除能力高于白花木瓜多酚。当样品质量浓度为 1.0 mg/mL 时,白花木瓜多酚和维生素 C 对羟基自由基的清除能力分别为 $81.30\% \pm 1.27\%$ 和 $80.94\% \pm 0.41\%$,无显著性差异($P > 0.05$),表明白花木瓜多酚具有一定的羟基自由基清除能力。

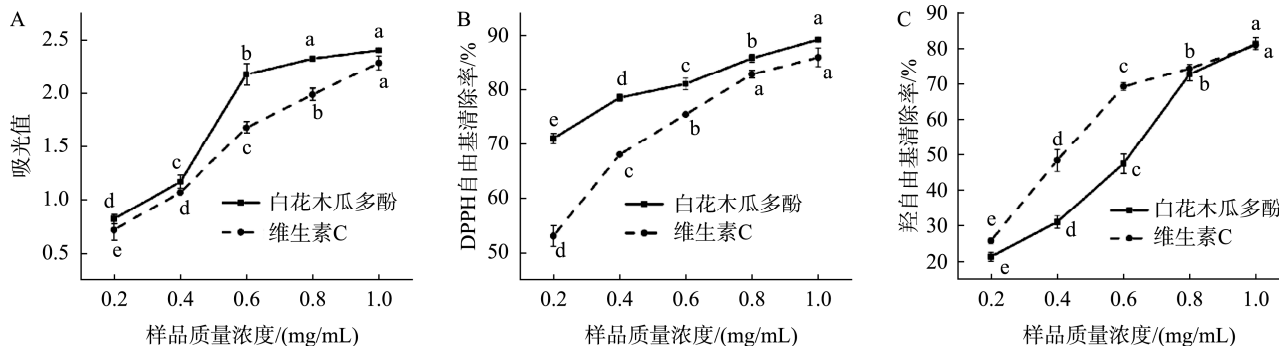


图 2 白花木瓜多酚的体外抗氧化活性
Fig.2 In vitro antioxidant activities of *Chaenomeles cathayensis* polyphenols

3 结论

本研究采用超声辅助提取法与福林酚法,通过单因素实验选定白花木瓜多酚提取工艺的最优范围,并通过正交实验进一步优化白花木瓜多酚提取工艺,结果显示:乙醇体积分数 60%、料液比 1:25 (g/mL)、超声温度 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 、超声时间 90 min 为白花木瓜中多酚的最佳提取工艺,在该条件下白花木瓜多酚提取量为 2.22 mg/g 。在此基础上,通

过对白花木瓜多酚的抗氧化能力进行测定,结果显示当样品质量浓度为 1.0 mg/mL 时,白花木瓜多酚还原能力为 2.41 ± 0.02 ,DPPH 自由基清除能力为 $89.33\% \pm 0.24\%$,羟基自由基清除能力为 $81.30\% \pm 1.27\%$,均高于维生素 C (2.29 ± 0.08 、 $86.05\% \pm 0.39\%$ 、 $80.94\% \pm 0.41\%$),说明白花木瓜多酚具有较好的抗氧化活性,是一种理想的抗氧化剂,有较好的应用前景。本研究为白花木瓜多酚类物质的开发和工业化生产提供了理论依据。

参考文献

- [1] 王雅楠, 黄姗, 尹玉云, 等. 山楂叶类保健食品中总黄酮的提取及抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(13): 89–98.
WANG YN, HUANG S, YIN YY, *et al.* Extraction and study on antioxidant activity analysis of total flavonoids from hawthorn leaf health food [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(13): 89–98.
- [2] ZHENG X, WANG H, ZHANG P, *et al.* Chemical composition, antioxidant activity and α -glucosidase inhibitory activity of *Chaenomeles speciosa* from four production areas in china [J]. *Molecules*, 2018, 23(10): 2518.
- [3] 马光宇, 李东亮, 王洪云, 等. 白花木瓜含片制备工艺研究[J]. 食品与药品, 2020, 22(3): 198–203.
MA GY, LI DL, WANG HY, *et al.* Study on the preparation process of white-flowered papaya tablets [J]. *Food and Drug*, 2020, 22(3): 198–203.
- [4] TAO W, ZHAO C, LIN G, *et al.* UPLC-ESI-QTOF-MS/MS Analysis of the phytochemical compositions from *Chaenomeles speciosa* (Sweet) nakai fruits [J]. *Journal of Chromatographic Science*, 2022, 61(1): 15–31.
- [5] 黄梦, 刘宏炳, 杨珍, 等. 响应面法优化肉桂子总有机酸提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 饲料工业, 2024, 45(16): 1–5.
HUANG M, LIU HB, YANG Z, *et al.* Optimisation of total organic acid extraction process from *Cinnamomum cinnamomi* and its antioxidant activity by response surface methodology [J]. *Feed Industry*, 2024, 45(16): 1–5.
- [6] 马爱平. 水果黄酮类化合物具调节餐后血糖功效[N]. 科技日报, 2024-11-05(006).
MA AIP. Fruit flavonoids have postprandial blood sugar regulating effects [N]. *Science and Technology Daily*, 2024-11-05(006).
- [7] 杨尚冰, 卢健棋, 董礼, 等. 菊花化学成分及其防治心血管疾病研究进展[J/OL]. 辽宁中医药大学学报, 1-9. [2025-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1543.R.20241029.1115.016.html>
YANG SB, LU JQ, DONG L, *et al.* Progress of research on chemical composition of Chrysanthemum and its prevention of cardiovascular diseases [J/OL]. *Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine*, 1-9. [2025-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1543.R.20241029.1115.016.html>
- [8] 高蕊蕊, 王飘, 侯蕾, 等. 不同溶剂对冻绿叶(茶)提取成分及体外降脂降脂功效的影响[J]. 山西中医药大学学报, 2024, 25(3): 261–266.
GAO RR, WANG P, HOU L, *et al.* Effects of different solvents on the extracted components and *in vitro* hypoglycaemic and hypolipidemic efficacy of frozen green leaf (tea) [J]. *Journal of Shanxi University of Traditional Chinese Medicine*, 2024, 25(3): 261–266.
- [9] 邹波, 钟思彦, 林锦波, 等. 黄皮中黄酮类化合物的结构及生物活性研究进展[J]. 中国果菜, 2024, 44(2): 47–53.
ZOU B, ZHONG SY, LIN JB, *et al.* Progress on the structure and biological activity of flavonoids in yellow peel [J]. *Chinese Fruit and Vegetable*, 2024, 44(2): 47–53.
- [10] 王尚. 齐墩果酸改善高脂饮食诱导的老年性骨质疏松的作用机制及其修复骨缺损的可注射水凝胶的研究[D]. 重庆: 重庆医科大学, 2024.
WANG S. Mechanism of action of oleanolic acid in improving high-fat diet-induced senile osteoporosis and its injectable hydrogel for repairing bone defects [D]. Chongqing: Chongqing Medical University, 2024.
- [11] 陈文文. 酸枣仁防治糖尿病心肌损伤的化学成分及初步机制研究[D]. 西安: 中国人民解放军空军军医大学, 2024.
CHEN WW. Study on the chemical composition and preliminary mechanism of sour jujube kernel in preventing diabetic myocardial injury [D]. Xi'an: People's Liberation Army Air Force University of Military Medicine, 2024.
- [12] 王妍, 郭长征, 黎观红, 等. 植物单宁的提取方法、生物学功能及其在动物营养中的应用[J]. 动物营养学报, 2024, 36(11): 6942–6957.
WANG Y, GUO CZ, LI GH, *et al.* Extraction methods, biological functions and applications of plant tannins in animal nutrition [J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(11): 6942–6957.
- [13] RAHMAN MM, SHAHAB NB, MIAH P, *et al.* Polyphenol-rich leaf of *Aphanamixis polystachya* averts liver inflammation, fibrogenesis and oxidative stress in ovariectomized long-evans rats [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2021, 138: 111530.
- [14] MACHADO-CARVALHO L, MARTINS T, AIRES A, *et al.* Optimization of phenolic compounds extraction and antioxidant activity from *Inonotus hispidus* using ultrasound-assisted extraction technology [J]. *Metabolites*, 2023, 13(4): 524.
- [15] JESUS RA, DA SILVA WR, WISNIEWSKI AJ, *et al.* Microwave and ultrasound extraction of antioxidant phenolic compounds from *Lantana camara* Linn. leaves: Optimization, comparative study, and FT-Orbitrap MS analysis [J]. *Phytochemical Analysis*, 2024, 35(4): 889–902.
- [16] FENG Y, LIN J, HE G, *et al.* Compositions and biological activities of pomegranate peel polyphenols extracted by different solvents [J]. *Molecules*, 2022, 27(15): 4796.
- [17] CAÑAS S, REBOLLO-HERNANZ M, BERMÚDEZ-GÓMEZ P, *et al.* Radical scavenging and cellular antioxidant activity of the cocoa shell phenolic compounds after simulated digestion [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2023, 12(5): 1007.
- [18] MLADENOV M, LUBOMIROV L, GRISK O, *et al.* Oxidative stress, reductive stress and antioxidants in vascular pathogenesis and aging [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2023, 12(5): 1126.
- [19] COPPO E, MARCHESE A. Antibacterial activity of polyphenols [J]. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 2014, 15(4): 380–390.
- [20] GUPTA N, SINGH S, CHAUHAN D, *et al.* Exploring the anticancer potentials of polyphenols: A comprehensive review of patents in the last five years [J]. *Recent Pat Anticancer Drug Discov*, 2023, 18(1): 3–10.
- [21] 肖梅, 伍雪梅, 祝莹, 等. 发酵大麦麸皮提取物对 Hep G2 细胞脂质沉积及氧化应激的缓解作用[J/OL]. 现代食品科技, 1-9. [2025-01-06]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.0196>
XIAO M, WU XM, ZHU Y, *et al.* Mitigating effects of fermented barley bran extract on lipid deposition and oxidative stress in Hep G2 cells [J/OL]. *Modern Food Science and Technology*, 1-9. [2025-01-06]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.0196>
- [22] 褚路路, 章敏, 连伊阳, 等. 桑黄子实体多酚降血糖活性及机理研究[J]. 2024.
CHU LL, ZHANG M, LIAN YY, *et al.* Hypoglycaemic activity and mechanism of polyphenols from the seed bodies of *Morus alba* [Z]. 2024.
- [23] 潘华荣, 高圣柠, 申晨卉, 等. 丹参多酚酸盐调控 Nrf2/HO-1 信号通路对膜性肾病大鼠氧化应激的影响[J]. 天津中医药, 2024, 41(7): 922–928.
PAN HR, GAO SN, SHEN CH, *et al.* Effects of Danshen polyphenolates modulating Nrf2/HO-1 signalling pathway on oxidative stress in rats with

- membranous nephropathy [J]. *Tianjin Traditional Chinese Medicine*, 2024, 41(7): 922–928.
- [24] 龙欣然. 茶多酚对氨氮胁迫下黄颡鱼氧化应激、炎症、铁死亡的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
- LONG XR. Effects of tea polyphenols on oxidative stress, inflammation and iron death in *Pelteobagrus fulvidraco* under ammonia and nitrogen stress [D]. Guiyang: Guizhou University, 2024.
- [25] EL OM. Harnessing the power of polyphenols: A new frontier in disease prevention and therapy [J]. *Pharmaceuticals (Basel)*, 2024, 17(6): 692.
- [26] 黄红琴, 张腊梅, 田程, 等. 黑莓多酚提取工艺及功能研究进展[J]. *中国食品工业*, 2024(18): 122–124.
- HUANG HQ, ZHANG LM, TIAN C, *et al.* Progress of blackberry polyphenol extraction process and functional research [J]. *China Food Industry*, 2024(18): 122–124.
- [27] 周婉, 魏婉倩, 李猛, 等. 植物多酚绿色提取技术研究进展[J]. *农产品加工*, 2023(7): 74–77.
- ZHOU W, WEI WQ, LI M, *et al.* Progress of green extraction technology of plant polyphenols [J]. *Agricultural Products Processing*, 2023(7): 74–77.
- [28] 江华明. 微波辅助提取植物多酚技术的研究进展[J]. *现代食品*, 2022, 28(8): 33–36.
- JIANG HM. Research progress of microwave-assisted extraction technology of plant polyphenols [J]. *Modern Food*, 2022, 28(8): 33–36.
- [29] 李慧芸. 光皮木瓜渣多酚的提取及其抗氧化活性的研究[J]. *农产品加工(学刊)*, 2012(9): 45–48.
- LI HY. Extraction of polyphenols from papaya pomace and their antioxidant activity [J]. *Agricultural Product Processing (Journal)*, 2012(9): 45–48.
- [30] 贺鹏, 雷进斌, 罗旭璐, 等. 白花木瓜籽粕多酚的提取及其抗氧化活性[J]. *西部林业科学*, 2014(4): 106–111.
- HE P, LEI JB, LUO XL, *et al.* Extraction of polyphenols from papaya seed meal and their antioxidant activities [J]. *Western Forestry Science*, 2014(4): 106–111.
- [31] 黄纪晟, 汪琼, 徐增莱, 等. 光皮木瓜的化学成分及药理活性研究进展[J/OL]. *天然产物研究与开发*, 1–26. [2025-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1335.Q.20241108.1855.008.html>
- HUANG JS, WANG Q, XU ZL, *et al.* Progress in the study of chemical composition and pharmacological activity of papaya (*Papaver somniferum*) [J/OL]. *Natural Products Research and Development*, 1–26. [2025-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1335.Q.20241108.1855.008.html>
- [32] 张琪, 李智, 杜俊辉, 等. 木瓜化学成分、生物活性及其应用研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(19): 180–188.
- ZHANG Q, LI Z, DU JH, *et al.* Progress of research on chemical composition, biological activity and application of papaya [J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(19): 180–188.
- [33] 白玉英, 解静, 张丽, 等. 超声辅助酶法优化提取核桃分心木多酚及其抗氧化活性研究[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2024, 39(3): 107–115.
- BAI YY, XIE J, ZHANG L, *et al.* Optimisation of the extraction of polyphenols and their antioxidant activity from walnut schizothorpe by ultrasound-assisted enzymatic method [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2024, 39(3): 107–115.
- [34] 郭世纪, 刘政, 王会. 苹果多酚的提取工艺优化[J]. *食品工业*, 2024, 45(7): 37–43.
- GUO SJ, LIU Z, WANG H. Optimisation of extraction process of apple polyphenols [J]. *Food Industry*, 2024, 45(7): 37–43.
- [35] 胡霞, 王顺风, 白玉英, 等. 超声辅助纤维素酶法提取辣木籽多酚的工艺优化及其体外活性[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(7): 207–214.
- HU X, WANG SF, BAI YY, *et al.* Process optimisation of polyphenol extraction from *Moringa oleifera* seeds by ultrasound-assisted cellulase method and its *in vitro* activity [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2023, 44(7): 207–214.
- [36] ZHENG L, GARRIDO PS, LYNG GJ, *et al.* A comparative study of pulsed electric field, ultrasound, milling and soaking as pre-treatments for assistance in the extraction of polyphenols from willow bark (*Salix alba*) [J]. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2024, 43: 100591.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)