DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260422005
引用格式: 肖微, 曾宏强, 梁宇恒, 等. 柚花总黄酮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, 2026, 17(18): 104–110.
Xiao Wei, Zeng Hongqiang, Liang Yuheng, et al. Study on optimization of extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from pomelo flowers [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 104–110. (in Chinese with English abstract).

柚花总黄酮提取工艺优化及其抗氧化活性研究

肖 微[1], 曾宏强[1], 梁宇恒[1], 纪洵敏[1], 廖慧桢[1], 谭丽容[1], 赖榕辉[2], 周梦珍[2], 梁旭霞[1*], 张 磊[1*]

(1. 广东省生物制品与药物研究所, 广州 510440; 2. 梅州市农林科学院茶叶研究所, 梅州 514071)

摘 要: 目的 优化柚花总黄酮的提取工艺并研究其抗氧化活性。**方法** 通过单因素试验和正交试验优化柚花提取物活性物质总黄酮的提取工艺, 并评价其抗氧化活性。**结果** 柚花总黄酮优化后提取工艺条件为料液比 1:30 (g:mL), 乙醇体积分数 70%, 超声时间 50 min, 在此条件下总黄酮提取率为 12.44%。当总黄酮含量为 49.86 mg/g 时, 对 2,2'-联氢-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐阳离子[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) disodium salt kation, $ABTS^{+}$]自由基和 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基的清除率分别达到93.91%和92.59%, 对羟基自由基的清除率则在总黄酮含量为 24.93 mg/g 时高达 99.51%。**结论** 柚花总黄酮具有良好的抗氧化能力, 在食品工业上具有优良的应用价值。

关键词: 柚花; 总黄酮; 提取优化; 抗氧化活性
中图分类号: TS201.2 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0104–07

Study on optimization of extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from pomelo flowers

XIAO Wei[1], ZENG Hong-Qiang[1], LIANG Yu-Heng[1], JI Xun-Min[1], LIAO Hui-Zhen[1], TAN Li-Rong[1], LAI Rong-Hui[2], ZHOU Meng-Zhen[2], LIANG Xu-Xia[1*], ZHANG Lei[1*]

(1. *Guangdong Province Institute of Biological Products and Materia Medica*, *Guangzhou* 510440, *China*; 2. *Institute of Tea Research*, *Meizhou Academy of Agricultural and Forestry Sciences*, *Meizhou* 514071, *China*)

ABSTRACT: Objective To optimize the extraction process for total flavonoids from pomelo flowers and investigate their antioxidant activity. **Methods** The extraction process of total flavonoids, the bioactive constituents from pomelo flower extracts, was optimized by single-factor experiments and orthogonal tests, while their antioxidant activities were evaluated. **Results** The optimal extraction process conditions of total flavonoids from pomelo flowers were as follows: solid-liquid ratio 1:30 (g:mL), ethanol volume fraction 70% and ultrasonic time 50 min. Under these conditions, the

收稿日期: 2026-04-22
基金项目: 广东省医学科研基金项目(A2024268); 梅州市科技计划项目(2023C0301001)
第一作者: 肖微(1989—), 女, 硕士, 主管技师, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: Littleweily@163.com
***通信作者:** 梁旭霞(1972—), 女, 博士, 主任技师, 主要研究方向为食品药品质量标准研究。E-mail: liangxuxia@126.com
张磊(1982—), 男, 博士, 主任技师, 主要研究方向为生化与分子。E-mail: swzl100@sina.com

extraction rate of total flavonoids was 12.44%. When the total flavonoid content was 49.86 mg/g, the scavenging rates of 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) disodium salt kation ($ABTS^+$) and 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radicals reached 93.91% and 92.59%, respectively. The scavenging rate of hydroxyl radicals was as high as 99.51%, when the total flavonoid content was 24.93 mg/g. **Conclusion** Total flavonoids extracted from pomelo flowers exhibit excellent antioxidant capacity and possess superior application value in the food industry.

KEY WORDS: pomelo flowers; total flavonoids; extraction optimization; antioxidant activity

0　引　言

柚花源自柚树[*Citrus maxima* (Burm.) Merr.], 是芸香科柑橘属柑橘亚属植物柚的花朵[1]。其花香气悠长, 具有行气、祛痰和镇痛的功效[2]。柚花中含多种活性成分[3], 如黄酮类物质、多酚类物质和挥发油等, 这些活性成分均被证实具有抗炎、抗菌和抗氧化功效[4], 其中含量较高的柚皮苷、橙皮苷、柚皮素、新橙皮苷和野漆树苷等[5]均为黄酮类化合物。

柚作为我国重要的经济水果, 其果实的加工利用已较为成熟, 但柚花资源长期未得到充分开发。据统计, 柚树开花期间仅有 2%的花朵保留在树上, 其余 98%自然脱落或人工剪弃[6], 造成资源严重浪费。柚花每年花期集中, 产量可观, 若能将其作为功能性食品原料加以利用, 不仅可延长柚产业链条, 提升资源综合利用率, 也为天然抗氧化剂的开发提供了新途径。在食品工业中, 天然来源的黄酮类化合物因其良好的抗氧化活性和安全性[7], 正逐步替代合成抗氧化剂, 在功能性食品、天然防腐保鲜等领域展现出广阔的应用前景。因此, 开展柚花中黄酮类物质的提取工艺及抗氧化活性研究, 对拓展柚花在食品领域的应用具有现实意义。

目前, 柚花的研究主要集中在挥发性物质的化学成分分析及食用安全性评价方面, 而对柚花非挥发性物质中总黄酮的提取工艺研究仍较为欠缺, 缺乏系统的工艺优化研究, 限制了柚花黄酮类物质在食品工业中的进一步开发与应用。本研究在前期工作基础上, 以柚花为原料, 采用超声辅助提取法系统优化柚花提取物(pomelo flower extract, PFE)总黄酮的提取工艺, 通过单因素试验与正交试验确定最优提取条件, 并进一步评价柚花总黄酮的体外抗氧化活性。研究成果旨在完善柚花功效物质开发的基础理论, 为柚花资源的高效利用提供技术支撑, 同时为食品工业中天然抗氧化剂的开发与应用提供科学依据, 推动柚花从传统利用向高附加值功能性食品原料的转化。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

1.1.1　样　品

柚花粉: 梅州市农林科学院提供。

1.1.2　试　剂

橙皮苷标准品(纯度≥98%, 上海吉至生化科技有限公司); 无水乙醇(分析纯, 天津市大茂化学试剂厂); 2,2'-联氢-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐阳离子[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) disodium salt kation, $ABTS^+$]自由基、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基、羟基自由基清除能力检测试剂(北京盒子生工科技有限公司); *L*(+)抗坏血酸(分析纯, 广州化学试剂厂)。

1.1.3　仪器与设备

1860QTD 超声清洗仪(广东固特超声股份有限公司); N4 (754N)紫外可见分光光度计(上海仪电分析仪器有限公司); GM-033A 隔膜真空抽滤装置(天津津腾实验设备有限公司); TG16 台式离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司); PTX-JA510S 电子天平[精度 1 mg, 华志(福建)电子科技有限公司]。

1.2　试验方法

1.2.1　柚花提取液制备

取制备好的 10 g 柚花粉末放入 500 mL 锥形瓶中, 按照一定的料液比, 加入一定体积分数的乙醇溶液, 浸泡 24 h 后, 在超声功率 120 W、频率 42 kHz, 温度 55 ℃条件下超声一定时间提取, 然后通过减压抽滤、浓缩并定容至 25 mL, 称重, 即得 PFE。

1.2.2　标准曲线绘制及总黄酮提取率测定

参照 NY/T 2010—2011《柑橘类水果及制品中总黄酮含量的测定》, 以吸光度为纵坐标(*Y*), 标准溶液质量浓度为横坐标(*X*, mg/L), 绘制橙皮苷标准曲线, 得到回归方程 $Y=0.0051X+0.0083$ ($r^2=0.9982$), 在 0~100 mg/L 范围内有良好的线性关系。测定并计算 PFE 总黄酮含量及提取率。

1.2.3　单因素试验

参照丘苑新等[8]的方法并略作改动, 考察不同乙醇体积分数、料液比、超声时间对柚花总黄酮提取率的影响: 固定乙醇体积分数 70%、超声时间 40 min, 考察 1:10、1:20、1:30、1:40、1:50 (g:mL)系列料液比对柚花总黄酮提取率的影响; 固定超声时间 40 min, 料液比 1:20 (g:mL), 考察 30%、50%、70%、90%和 100%系列乙醇体积分数对柚花总黄酮提取率的影响; 固定乙醇体积分数 70%、料液比 1:20 (g:mL), 考察 30、40、50、60、70 min 系列时间对柚

花总黄酮提取率的影响。

1.2.4 正交试验

在单因素试验结果的基础上，选取超声时间、乙醇体积分数和料液比三因素三水平进行 $L_9(3^4)$正交试验，设计见表 1，以此确定柚花总黄酮的最佳提取工艺。

表 1 正交优化试验因素水平表

Table 1 Table of orthogonal optimization experiment factor levels

水平	A(料液比)(g:mL)	B(超声时间)/min	C(乙醇体积分数)/%
1	1:10	40	50
2	1:20	50	70
3	1:30	60	90

1.2.5 柚花提取物体外抗氧化能力测定

(1) $ABTS^+$自由基清除能力

参照文献[9]方法并略作改动，以 Trolox 作为阳性对照，测定 405 nm 波长下的吸光值，$ABTS^+$自由基清除率按公式(1)计算。

$$ABTS^+自由基清除能力/\%=\frac{(A_{空白}-A_{测定}+A_{对照})}{A_{空白}}\times 100\% \quad (1)$$

式中：$A_{空白}$为蒸馏水代替样品的吸光值；$A_{对照}$为待测样品与试剂溶液反应后的吸光值；$A_{测定}$为测定管吸光值。

(2) DPPH 自由基清除能力

参考文献[10]方法并略作改动，以 Trolox 作为阳性对照，测定 515 nm 波长下的吸光值，DPPH 自由基清除率按公式(2)计算。

$$DPPH自由基清除能力/\%=\frac{(B_{空白}-B_{测定}+B_{对照})}{B_{空白}}\times 100\% \quad (2)$$

式中：$B_{空白}$为提取液的吸光值；$B_{对照}$为试剂代替 DPPH 工作液的吸光值；$B_{测定}$为待测样品与 DPPH 工作液反应后的吸光值。

(3)羟基自由基清除能力

参考文献[11]方法并略作改动，以维生素 C (vitamin C, VC)作为阳性对照，测定 536 nm 波长下的吸光值，羟基自由基清除率按公式(3)计算。

$$羟基自由基清除能力/\%=\frac{C_{测定}-C_{对照}}{C_{空白}-C_{对照}}\times 100\% \quad (3)$$

式中：$C_{测定}$为测定管的吸光值；$C_{对照}$为蒸馏水代替待测样品测得的吸光度；$C_{空白}$为蒸馏水代替待测样品和试剂测得的吸光度。

1.3 数据处理

所有试验重复测定 3 次。运用 Microsoft Excel 2019 软件处理数据，GraphPad Prism 10.1.2 绘图，采用 SPSS 27.0 进行单因素方差分析处理数据，$P<0.05$ 表明具有统计学意义。

2 结果与分析

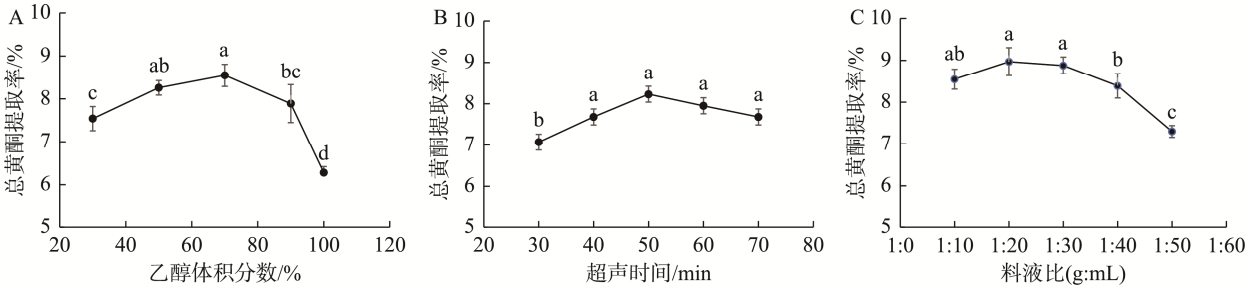
2.1 单因素试验结果与分析

通过单因素试验考察了乙醇体积分数、液料比和超声时间对柚花总黄酮提取率的影响，结果如图 1 所示。不同的乙醇体积分数对柚花总黄酮提取率的影响如图 1A 所示，随着乙醇体积分数的增加，柚花总黄酮提取率先升高后降低。乙醇体积分数增加至 70%时，提取率达到最高 8.55%，随后体积分数升高提取率反而逐步下降。这一变化规律与多数植物黄酮类化合物的提取特性一致。乙醇体积分数过低时，水相比例较高，溶剂极性较大，不利于黄酮类化合物的有效溶出；而体积分数过高时，溶剂极性降低，醇溶性杂质(如叶绿素、脂质等)大量溶出，同时黄酮类化合物因溶解度变化而析出，导致提取率下降。乙醇浓度通过影响溶剂与黄酮分子间的氢键相互作用，进而调控黄酮类化合物的溶出[12]。此外，有研究表明，70%左右的乙醇水溶液与黄酮类化合物的极性匹配度最佳，能够实现最高的提取效率[13]。基于以上结果，本研究选择 50%、70%、90%的乙醇体积分数进行后续的试验。

不同的超声时间对柚花总黄酮提取率的影响如图 1B 所示。在考察范围内超声时间对柚花总黄酮提取率的影响呈现先升高后下降的趋势。超声时间为 30~50 min 时，提取率随着超声时间的增多而逐渐增多；当超声时间为 50 min 时，柚花总黄酮提取率达到最高值 8.23%。超声波辅助提取主要依赖于超声空化效应、机械效应和热效应。在提取初期，超声空化泡破裂产生的冲击波和微射流能够有效破坏植物细胞壁结构，促进胞内黄酮类化合物的释放与溶出。扫描电子显微镜分析表明，超声处理可使植物组织表面形成弯曲、疏松的结构，显著增加溶剂与目标成分的接触面积[14]。然而，过长的超声时间会导致负面影响：持续的空化效应可能破坏黄酮类化合物的分子结构，降低其生物活性；超声引起的局部温升可能加速黄酮的氧化降解[15]。因此，本研究选择 40、50、60 min 超声时间进行后续试验。

不同的液料比对柚花总黄酮提取率的影响如图 1C 所示。在考察范围内料液比对柚花总黄酮提取率的影响呈现稍有升高而后降低的趋势。在料液比从 1:10 (g:mL)增加到 1:20 (g:mL)时，提取率由 8.55%升高至 8.97%，此时提取率已达到最高；此后继续增加液料比，柚花总黄酮提取率反而有所降低。液料比是提取效率的重要影响因素之一，适当的液料比可以增大细胞内外浓度梯度，促进黄酮类化合物从植物组织向溶剂扩散。当液料比较低时，溶剂体积有限，细胞壁内外的渗透压差较小，不利于黄酮成分的充分溶出[16]。随着液料比增大，提取溶剂充足，物质间转移动力增强，黄酮得率达到最大值。然而，当液料比过高时，黄酮含量降低且非目标成分(如多糖、蛋白质等)的溶出增加，

可能导致目标黄酮的相对含量下降; 同时, 过高的液料比会造成溶剂浪费和后续浓缩能耗增加[17]。综合提取效率和经济性考虑, 本研究选择 1:10、1:20、1:30 (g: mL)的料液比进行后续的试验。



注: 不同字母表示数据具有显著性差异(P<0.05)。

图 1　不同提取条件对柚花总黄酮提取率的影响

Fig.1　Effects of different extraction conditions on the extraction rate of total flavonoids from pomelo flowers

2.2　正交试验结果与分析

基于单因素试验结果, 确定了各因素的 3 个水平, 在正交试验中更系统地考察各因素之间的交互作用以及对提取效果的综合影响。正交试验结果见表 2~3。

表 2　正交试验结果

Table 2　Results of orthogonal experiment

编号	A(料液比)(g:mL)	B(超声时间)/min	C(乙醇体积分数)/%	总黄酮提取率/%
1	1	1	1	6.26±0.06
2	1	2	2	8.28±0.11
3	1	3	3	7.30±0.18
4	2	3	1	7.09±0.10
5	2	1	2	7.59±0.15
6	2	2	3	7.96±0.21
7	3	1	3	8.42±0.34
8	3	2	1	8.57±0.49
9	3	3	2	8.79±0.32
K_1	21.84	22.27	21.92	
K_2	22.63	24.80	24.65	
K_3	25.78	23.18	23.68	
R	1.31	0.84	0.91	
因素主次			$A>C>B$	
最优方案			$A_3B_2C_2$	

表 3　正交试验方差分析

Table 3　Variance analysis of orthogonal experiment

因素	离均差平方和	自由度	均方	F	P	显著性
A	2.890	2	1.445	3.709	0.212	无差异
B	1.099	2	0.549	1.410	0.415	无差异
C	1.278	2	0.639	1.640	0.379	无差异
误差	0.779	2	0.390			

由表 2 正交试验结果可知, $A_3B_3C_2$ 柚花总黄酮提取率最高, 料液比 1:30 (g:mL)、超声时间 60 min、乙醇体积分数 70%。由极差 R 可知 3 因素对结果的影响为料液比(A)>乙醇体积分数(C)>超声时间(B)。由表 3 正交试验方差分析可知, 料液比、超声时间、乙醇体积分数对柚花总黄酮提取率无显著性差异(P>0.05)。根据 F 大小可知, 3 个单因素对柚花总黄酮提取率影响大小的主次关系与极差分析结果一致。

根据 K 可知, 最优方案组为 $A_3B_2C_2$, 与柚花总黄酮提取率最高组 $A_3B_3C_2$ 的超声时间不同。因此, 需要经过进一步的验证试验来获得提取柚花总黄酮提取物的最优提取条件。

考虑到试验的误差性, 为进一步验证, 对 $A_3B_2C_2$ 进行重复提取, 得总黄酮提取率为 12.44%, 优于 $A_3B_3C_2$ 的 8.79%。因此, 最优提取条件为料液比 1:30 (g:mL)、提取时间 50 min、乙醇体积分数 70%, 在此条件下提取的柚花总黄酮的含量为 49.86 mg/g。

2.3　柚花提取物体外抗氧化能力测定结果与分析

2.3.1　ABTS$^+$自由基清除能力分析

ABTS$^+$自由基遇到具有供电子或供氢能力的抗氧化剂时会被清除, 常被作为评估化合物清除自由基能力的关键指标。结合表 4 和图 2A 可知, PFE 对 ABTS$^+$自由基的清除能力呈现较强的含量相关性。在 3.12~49.86 mg/g 范围内, 清除率(Trolox 等效)最高时达 93.91%。这一结果表明, PFE 对 ABTS$^+$自由基具有较好的清除能力, 推测其中含有丰富的供氢或供电子基团, 能够有效中和 ABTS$^+$自由基。

2.3.2　DPPH 自由基清除能力分析

DPPH 自由基作为一种稳定的自由基, 也是评价抗氧化活性的常用指标之一。结合表 4 和图 2B 可知, 在 3.12~49.86 mg/g 范围内, DPPH 自由基的清除能力均随 PFE 中总黄酮含量的升高而增强, 清除率(Trolox 等效)最高时达 92.59%, 与 ABTS$^+$自由基清除能力相当, 表明柚花总黄酮对不同类型的自由基具有广谱清除作用。这种广谱抗氧

化特性可能归因于柚花总黄酮中多种黄酮类单体(如柚皮苷、橙皮苷等)的协同效应[18]。

2.3.3 羟基自由基清除能力分析

羟基自由基是生物体系内氧化损伤能力最强的活性氧, 其极短寿命与超高反应活性使其成为衡量物质的抗氧化应激能力的常用指标[19]。如图 2C 所示, 柚花总黄酮抗氧化能力显著高于 VC。在总黄酮质量浓度为 3.2~51.4 μg/mL(即 1.56~24.93 mg/g)范围内, 羟基自由基的清除能力均随 PFE 中总黄酮含量的升高而逐渐加强, 在总黄酮含量为 24.93 mg/g 时高达 99.51%。与其他两种自由基清除试验相比, PFE 对羟基自由基的清除效率更高, 这可能是由于黄酮类化合物结构中多个酚羟基能够有效螯合 Fenton 反应中的 Fe^{2+}, 从而从源头抑制羟基自由基的产生。

表 4 柚花总黄酮自由基清除能力

Table 4 Free radical scavenging capacity of total flavonoids from pomelo flowers

总黄酮质量分数/(mg/g)	Trolox 当量/(mmol/L)	
	$ABTS^+$自由基	DPPH 自由基
3.12	0.16	0.18
6.23	0.27	0.22
12.46	0.38	0.33
24.93	0.47	0.55
49.86	0.54	0.81

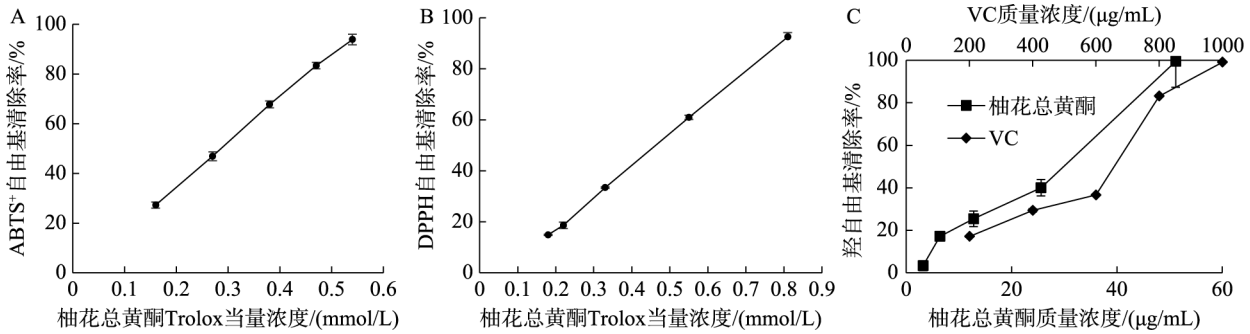


图 2 PFE 体外抗氧化能力

Fig.2 *In vitro* antioxidant capacity of PFE

3 讨 论

超声波辅助提取法因超声时间短、效率高、能耗低等优点, 常用于试验室提取。Yeddes 等[20]比较了索氏提取、超声辅助提取和微波辅助提取从柑橘皮中分离橙皮苷的方法, 发现超声辅助提取实现了最高产率。Kaur 等[21]观察到超声波辅助提取柚黄酮优于其他方法。本研究采用超声波辅助提取柚花总黄酮, 从研究结果看, 其含量受乙醇体积分数、超声时间和料液比的影响, 三者过高或过低均不利于提取。乙醇体积分数过高会导致醇溶性和脂溶性物质大量溶出, 过低又使得总黄酮溶出率较低[22]。超声时间过短会使得柚花总黄酮溶出不完全, 过长超声波机械作用与空化效应又会对总黄酮及类黄酮结构造成破坏, 降低生物活性[23], 从而导致提取率不高。料液比较低时, 细胞壁内外渗透压增大, 有利于细胞内黄酮成分的溶出, 料液比过高, 不仅导致非目标物质成分溶出增加, 还造成了乙醇溶剂的浪费, 从而影响整体提取效率[24]。

氧化应激已被证实是导致细胞损伤、机体衰老, 以及众多慢性疾病发展的关键病理机制之一[25]。在食品和材料领域, 氧化也是导致油脂酸败、营养素损失、色泽风味劣变、保质期缩短的主要原因[26]。因此, 评估物质的抗氧化能力, 就是评估其潜在的开发价值。诸多研究表明, 黄酮类物质具有强大的抗氧化能力, 对自由基有良好的清除作用[27–29]。Asih 等[30]通过体内和体外试验证明, 黄酮苷的抗氧化作用强。从研究结果看, 柚花总黄酮对 $ABTS^+$自由基的清除作用可能与黄酮苷中酚羟基为自由基提供氢原子和电子发挥其抗氧化作用有关[31], 本研究结果与文献[32]一致, 即在一定质量分数范围内总黄酮对 $ABTS^+$自由基的清除率均超过 90%, 具有较好的清除作用, 但总黄酮含量存在一定差别。柚花总黄酮对 DPPH 自由基的清除作用可能与黄酮类化合物的协同作用有关, 即随着含量的增加, 分子间的相互作用增强, 从而提高了整体的抗氧化能力[33]。总黄酮中的酚羟基苯环结构与 DPPH 自由基芳环有较高的匹配度, 有助于对 DPPH 自由基的清除。清除率结果与向思颖等[34]提取柚皮总黄酮抗氧化活性研究结果一致, 其清除能力的大小与总黄酮含量密切相关, 在一定范围内总黄酮含量越高, 对 DPPH 自由基的清除能力越强。柚花总黄酮对羟基自由基的清除作用说明 PFE 中的黄酮类化合物可能是其发挥自由基清除作用的主要活性成分, 因黄酮类化合物含有多个酚羟基, 它们能够与自由基发生反应, 形成稳定的半醌式中间体, 从而有效阻断自由基的链式反应进程[35], 本研究结果与研究文献[36]相吻合, 即对羟基自由基的清除率可高达 98%以上, 且清除能力高于 VC, 猜测 PFE 中含有较复杂成分, 使其清除能力优于单一成分的 VC, 进一步表明柚花总黄酮在分子层面干预氧化应激链式反应具有重要潜力。

在功能食品与保健品领域, PFE 可作为高效天然抗氧化剂, 用于防止油脂酸败、延长货架期, 或开发氧化应激相关疾病的膳食补充剂。徐帝等[37]证明将黄酮苷用于龙眼的保鲜, 可一定程度上延长其货架期。此外, 还可利用黄酮类物质的抗炎、抗菌作用, 将 PFE 用于食品保鲜或缓解炎症相关症状。李振羽等[38]通过加工柚核、柚皮等推出泡腾片功能性食品; 权春梅等[39]发现黄酮类物质是影响解酒功效的重要因素, 用于开发解酒功能性饮料; 黄酮物质可抑制霉菌用于水果的保鲜[40]。目前柚花中黄酮类物质的提取与利用规模及效率较低, 开发适用于工业化生产及纯化的高效提取技术是未来研究的重点。此外, 围绕柚花开发的产品类型仍较为单一, 尚未充分发挥其黄酮类成分多样的生物活性。未来可进一步拓展柚花在功能性保健食品及其他领域的应用, 丰富产品体系, 从而推动柚花相关产业的多元化发展。

4　结　论

黄酮类物质作为柚花非挥发性主要活性物质, 其药理功能及保健功能备受瞩目。黄酮类物质提取是开发的基础, 本研究以柚花干粉为原料, 采用乙醇超声辅助提取法, 通过单因素试验结合正交试验优化了柚花总黄酮的提取工艺, 获得优化后的提取条件为料液比 1: 30 (g: mL)、超声时间 50 min、乙醇体积分数 70%, 在此工艺下柚花总黄酮含量可达 49.86 mg/g。同时通过体外抗氧化试验证实了 PFE 对 $ABTS^{+}$自由基、DPPH 自由基及羟基自由基均具有较强的清除能力, 且清除效果呈现良好的剂量依赖性, PFE 具有显著的体外抗氧化活性。本研究结果可为柚花资源的高效开发与资源化利用提供科学理论依据与技术支撑。

参考文献

[1] 李蕊瑞, 谢静华, 尹欢欢, 等. 柚花的食用安全性评价[J]. 现代预防医学, 2022, 49(6): 1027–1031.
Li Ruirui, Xie Jinghua, Yin Huanhuan, et al. Food safety assessment of pomelo flower [J]. Modern Preventive Medicine, 2022, 49(6): 1027–1031.

[2] 罗铝铿, 郭佳茵, 刘家丽, 等. 柚花不同溶剂提取物抗氧化作用研究[J]. 食品工业, 2016, 37(4): 23–26.
Luo Lvkeng, Guo Jiayin, Liu Jiali, et al. Antioxidant effects of different extracts from pomelo flower [J]. The Food Industry, 2016, 37(4): 23–26.

[3] 叶彩婷, 李亦文, 李春霞, 等. 梅州沙田柚柚花的活性成分和营养物质测定[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 290–299.
Ye Caiting, Li Yiwen, Li Chunxia, et al. Determination of active components and nutrients in Meizhou Shatian pomelo flowers [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 290–299.

[4] 刘孟华, 李泮霖, 罗铝铿. 柚花化学成分及药理活性研究进展[J]. 嘉应学院学报, 2015, 33(2): 67–73.
Liu Menghua, Li Panlin, Luo Lvkeng. Advances in studies of chemical constitutes and pharmacological activity of pomelo flower [J]. Journal of Jiaying University, 2015, 33(2): 67–73.

[5] 刘影, 杨鑫, 苏洁如, 等. 化州柚花浸提液中黄酮成分及其抗氧化活性分析[J]. 农产品加工, 2025(2): 61–65.
Liu Ying, Yang Xin, Su Jieru, et al. Analysis of flavonoids and antioxidant activities in the extracts of *Citrus grandis* flower [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2025(2): 61–65.

[6] 肖腾香, 胡汉亮, 李杨, 等. 柚花的开发利用研究进展[J]. 农技服务, 2025, 42(5): 52–56.
Xiao Tengxiang, Hu Hanliang, Li Yang, et al. Research progress on development and utilization of pomelo flowers [J]. Agricultural Technology Service, 2025, 42(5): 52–56.

[7] 张声源, 陈炜铃, 王楠, 等. 六种柚果不同部位矿物质元素、总酚、柚皮苷含量测定及抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 105–112.
Zhang Shengyuan, Chen Weiling, Wang Nan, et al. Study on mineral elements, total polyphenol, naringin content, and antioxidant activity in different parts of six pomelo cultivars [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(18): 105–112.

[8] 丘苑新, 张泽雄, 何娣, 等. 超声波辅助提取柚树叶黄酮及其抗氧化、抑菌能力研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 174–178.
Qiu Yuanxin, Zhang Zexiong, He Di, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction technology of flavonoids from pomelo leaves and its antioxidant and antibacterial capabilities [J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 174–178.

[9] 龙声琪, 潘瑶, 李红艳. 马家柚皮中柚皮苷提取工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 南昌大学学报(工科版), 2025, 47(3): 237–250.
Long Shengqi, Pan Yao, Li Hongyan. Optimization of extraction process and analysis of antioxidant activity of naringin from Majia pomelo peel [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2025, 47(3): 237–250.

[10] Pirce F, Vieira T M F S, Augusto-Obara T R, et al. Effects of convective drying assisted by ultrasound and osmotic solution on polyphenol, antioxidant and microstructure of murtilla (*Ugni molinae* Turcz) fruit [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(1): 138–146.

[11] 乐晶, 林怡, 邓燕慧, 等. 沙田柚种子黄酮类物质半仿生提取及体外抗氧化能力研究[J]. 广东化工, 2023, 50(14): 44–46, 103.
Le Jing, Lin Yi, Deng Yanhui, et al. Determination of flavonoids antioxidant activities of semi-bionic extract from seeds of *Citrus maxima* [J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(14): 44–46, 103.

[12] Qian Wenzhang, Zhang Xinyue, Cheng Yu, et al. Ultrasonic-assisted extraction of flavonoids from *Abelmoschus manihot* flowers: RSM-ANN optimization, characteristics analysis, antioxidant activities, and molecular simulation [J]. Alexandria Engineering Journal, 2025, 120: 487–504.

[13] Liao Jianqing, Guo Zhouren, Tan Jiaqi, et al. Extraction flavonoids from peanut shell by dual-frequency ultrasound: optimization of PLS-UD, impact of frequency combination and its mechanism [J]. LWT, 2025, 232: 118449.

[14] Wang Qin, Luo Jieying, Liu Huifan, et al. Protective effects of the flavonoid fraction obtained from pomelo fruitlets through ultrasonic-associated microwave extraction against AAPH-induced erythrocyte hemolysis [J]. RSC Advances, 2019, 9(28): 16007–16017.

[15] Cui Qi, Shi Jiayi, Wen Lele, et al. Synergistic coupling of ultrasonic cavitation with tailored deep eutectic solvent systems for intensified extraction of *Scutellaria Radix* flavonoids: modelling and optimization by genetic algorithm [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 119: 107386.

[16] Wang Zhen, Yang Shilong, Gao Yajun, et al. Extraction and purification of antioxidative flavonoids from *Chionanthus retusa* leaf [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 1085562.

[17] 杨琳, 赵姗彦, 杨帆, 等. 五指毛桃黄酮固体饮料制备工艺优化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 212–219.
Yang Lin, Zhao Shanyan, Yang Fan, et al. Optimization of the preparation

process of flavonoid solid beverage from *Ficus hirta* vahl [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 212–219.

[18] 贾富霞, 王秀娟, 罗容. 酸橙枳实黄酮类抗氧化活性的药效组分研究[J]. 世界中医药, 2021, 16(15): 2261–2265.
Jia Fuxia, Wang Xiujuan, Luo Rong. Study on antioxidative active components alignment of flavonoids from aurantii fructus immaturus [J]. World Chinese Medicine, 2021, 16(15): 2261–2265.

[19] 李会端. 响应面优化玛咖总黄酮提取对 • OH 抑制作用探究[J]. 食品科技, 2015, 40(4): 302–308.
Li Huiduan. Response surface optimization of flavonoids extraction from Maca and hydroxyl radicals scavenging effect [J]. Food Science and Technology, 2015, 40(4): 302–308.

[20] Yeddes W, Bettaieb Rebey I, Yazidi R, et al. Eco-friendly extraction of hesperidin from *Citrus* peels: a comparative study of Soxhlet, ultrasound-assisted, and microwave-assisted methods for improved yield and antioxidant properties [J]. International Journal of Environmental Health Research, 2025, 35(11): 3359–3370.

[21] Kaur S, Singh V, Chopra H K, et al. Extraction and characterization of phenolic compounds from Mandarin peels using conventional and green techniques: a comparative study [J]. Discover Food, 2024, 4(1): 60.

[22] Yu Miao, Wang Bing, Qi Zheng, et al. Response surface method was used to optimize the ultrasonic assisted extraction of flavonoids from *Crinum asiaticum* [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2019, 26(8): 2079–2084.

[23] 史凌珊, 翁睿, 林梅华, 等. 超声波辅助提取锥栗壳总黄酮工艺[J]. 武夷学院学报, 2025, 44(12): 11–21.
Shi Lingshan, Weng Rui, Lin Meihua, et al. Ultrasonic assisted extraction of total flavonoids from *Castanea henryi* shells [J]. Journal of Wuyi University, 2025, 44(12): 11–21.

[24] 于佳, 吴晓丽, 孙红艳. 超声辅助提取西柚果皮黄酮及抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(8): 105–108, 114.
Yu Jia, Wu Xiaoli, Sun Hongyan. Study on ultrasonic-assisted extraction of flavonoids from *Citrus paradisi* Macfad. peel and its antioxidant activity [J]. Cereals & Oils, 2023, 36(8): 105–108, 114.

[25] Patel J, Baptiste B A, Kim E, et al. DNA damage and mitochondria in cancer and aging [J]. Carcinogenesis, 2020, 41(12): 1625–1634.

[26] 肖文清, 曾荣杰, 陈展辉, 等. 植物提取物在水果保鲜中的应用研究进展[J]. 生物质化学工程, 2025, 59(5): 104–116.
Xiao Wenqing, Zeng Rongjie, Chen Zhanhui, et al. Research advances on the application of plant extracts in fruit preservation [J]. Biomass Chemical Engineering, 2025, 59(5): 104–116.

[27] 申羽佳, 程诗越, 吴晓杰, 等. 三种天然植物黄酮的提取及其抗氧化性能研究[J]. 食品工程, 2026(1): 43–46, 70.
Shen Yujia, Cheng Shiyue, Wu Xiaojie, et al. Study on extraction and antioxidant properties of three natural plant flavonoids [J]. Food Engineering, 2026(1): 43–46, 70.

[28] 陈亮互, 刘珈梦, 陈惊鸿, 等. 银杏叶总黄酮提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 广州化工, 2026, 54(4): 74–78.
Chen Lianghu, Liu Jiameng, Chen Jinghong, et al. Optimization of flavonoid extraction process and antioxidant activity of *Ginkgo biloba* leaf [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2026, 54(4): 74–78.

[29] 李洪兰希, 韦英才, 吴涛, 等. 柚皮总黄酮提取与纯化工艺及其生物活性的研究进展[J]. 黑龙江科学, 2026, 17(6): 28–33, 38.
Li Honglanxi, Wei Yingcai, Wu Tao, et al. Research progress on extraction, purification technology and biological activity of total flavonoids from pomelo peel [J]. Heilongjiang Science, 2026, 17(6): 28–33, 38.

[30] Asih I A R A, Rita W S, Suirta W, et al. Antioxidant activity of flavonoid glycoside extract of *Solanum betaceum* on the kidney of wistar rats [J]. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 2022, 17(2): 319–323.

[31] 高泽昕, 柏云喜, 谢淑婷, 等. 响应面法优化提取柑橘果皮类黄酮及其抗氧化活性研究[J]. 中国麻业科学, 2025, 47(6): 310–321.
Gao Zexin, Bai Yunxi, Xie Shuting, et al. Optimization of the extraction of *Citrus* peel flavonoids and their antioxidant activity by response surface methodology [J]. Plant Fiber Sciences in China, 2025, 47(6): 310–321.

[32] 郭靖, 刘娜. 柚皮不同溶剂提取物抗氧化活性研究[J]. 化学工程与装备, 2022(10): 32–33, 15.
Guo Jing, Liu Na. Study on antioxidant activity of different solvent extracts from pomelo peel [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2022(10): 32–33, 15.

[33] Al-Khalifa I I, Aziz R A, Abbas M K, et al. Comparative study for *Citrus* fruits phytochemical screening and *in-vitro* antioxidant activity [J]. Iraqi Journal of Pharmaceutical Sciences, 2023, 32(2): 134–138.

[34] 向思颖, 鲁治宇, 张硕, 等. 超声辅助天然低共熔溶剂提取柚皮总黄酮及其抗氧化活性评价[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(8): 78–84.
Xiang Siying, Lu Zhiyu, Zhang Shuo, et al. Ultrasonic-assisted extraction of total flavonoids from pomelo peel by natural deep eutectic solvents and its antioxidant activity evaluation [J]. Cereals & Oils, 2024, 37(8): 78–84.

[35] 李西, 姜凯, 黄爱妮, 等. 柚皮精油提取工艺及抗氧化抑菌活性研究[J]. 中国果菜, 2023, 43(10): 12–18.
Li Xi, Jiang Kai, Huang Aini, et al. Study on extraction process and antioxidant, antibacterial activity of essential oil from pomelo peel [J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(10): 12–18.

[36] 尉洁净, 李媛, 曾颖, 等. 酶辅助法提取柚皮精油及其抗氧化活性测定[J]. 上海化工, 2024, 49(4): 10–13.
Yu Jiejing, Li Yuan, Zeng Ying, et al. Extraction of pomelo peel essential oil by enzyme-assisted method and determination of its antioxidant activity [J]. Shanghai Chemical Industry, 2024, 49(4): 10–13.

[37] 徐帝, 刘霞, 熊莹姿, 等. 柚皮苷-多糖-蛋白复合保鲜膜制备工艺优化及应用[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 105–113.
Xu Di, Liu Xia, Xiong Yingzi, et al. Preparation process optimization and application of naringinpolysaccharide-protein composite preservative film [J]. Food and Machinery, 2025, 41(5): 105–113.

[38] 李振羽, 钟昆志, 龚棣文, 等. 柚子副产物制备泡腾片的工艺研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(12): 241–248, 165.
Li Zhenyu, Zhong Kunzhi, Gong Diwen, et al. The preparation of effervescent tablets with pomelo by-products [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(12): 241–248, 165.

[39] 权春梅, 李媛媚, 王昭耀, 等. 葛菊功能饮料的抗氧化活性及解酒功效研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2026, 44(1): 24–30.
Quan Chunmei, Li Yuanmei, Wang Zhaoyao, et al. Study on antioxidation and alcohol-detoxification function of Ge-Ju functional beverage [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2026, 44(1): 24–30.

[40] 郭湘蕾, 王芙蓉, 谢中国, 等. 黄酮类化合物在食品保鲜中的应用研究进展[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2025, 37(2): 77–82.
Guo Xianglei, Wang Furong, Xie Zhongguo, et al. Research progress in the application of flavonoids in food preservation [J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology), 2025, 37(2): 77–82.

(责任编辑: 安香玉 曹岱琳)