

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80313

天然深共晶溶剂联合微波提取柚子皮总黄酮及其体外抗氧化活性分析

谢文¹ 张硕^{1,2} 王芳¹ 黄昕懿¹

(1. 成都师范学院化学与生命科学学院, 四川 成都 611130;

2. 特色园艺生物资源开发与利用四川省高等学校重点实验室, 四川 成都 611130)

摘要: [目的] 以通过天然深共晶溶剂联合微波技术优化柚子皮总黄酮提取工艺。[方法] 分析 3 种天然深共晶溶剂 (NADES) 和传统提取剂联合微波提取柚子皮黄酮的能力, 通过响应面法优化其提取工艺条件, 并评估柚子皮提取物的抗氧化活性。[结果] 由氯化胆碱、苹果酸、乙二醇组成的 NADES 在液料比 23:1 (mL/g), 加水量 29%, 提取温度 73 °C, 微波时间 40 s 下具有最佳的总黄酮得率, 为 2.20%。最优工艺条件下, 柚子皮总黄酮的 DPPH 自由基清除率为 93.32%、羟自由基清除率为 87.15%、还原力为 0.57、金属离子螯合率为 54.92%、脂质过氧化抑制率为 29.78%。[结论] 天然深共晶溶剂联合微波提取柚子皮的黄酮提取率较高, 且黄酮体外抗氧化活性较好。

关键词: 柚子皮; 总黄酮; 天然深共晶溶剂; 微波辅助; 抗氧化性

Extraction process optimization and antioxidant activity of total flavonoids from pomelo peel by natural deep eutectic solvents combined with microwaves

XIE Wen¹ ZHANG Shuo^{1,2} WANG Fang¹ HUANG Xinyi¹

(1. College of Chemistry and Life Sciences, Chengdu Normal University, Chengdu, Sichuan 611130, China;

2. Sichuan Provincial Key Laboratory for Development and Utilization of Characteristic Horticultural Biological Resources, Chengdu, Sichuan 611130, China)

Abstract: [Objective] To optimize the extraction process of total flavonoids from pomelo peel by natural deep eutectic solvents (NADES) combined with microwaves. [Methods] The extraction ability of flavonoids from pomelo peel is analyzed among three NADES and conventional extractants combined with microwaves. Additionally, the extraction process is optimized by response surface experiment, and the antioxidant activity of the extracts is evaluated. [Results] The optimal total flavonoid extraction rate is 2.20 percent at a liquid-solid ratio of 23:1 (mL/g), a water content of 29%, an extraction temperature of 73 °C, and a microwave time of 40 seconds. Under these conditions, the DPPH and hydroxyl radical scavenging rate are 93.32% and 87.15%, the reducing power is 0.57, the metal ion chelation rate is 54.92%, and the lipid peroxidation inhibition rate is 29.78%. [Conclusion] A high extraction rate of flavonoids from pomelo peel is achieved by NADES combined with microwaves, with the resulting flavonoids exhibiting strong *in vitro* antioxidant activity.

Keywords: pomelo peel; total flavonoids; natural deep eutectic solvent (NADES); microwave assisted; antioxidant activity

农副产品中富含酚类、蛋白质、生物碱和脂类, 是生 果, 其加工会产生大量的副产品, 仅柚子皮就占鲜果质量物活性成分的重要来源^[1]。柚子是一种重要的柑橘类水 果的近 50%^[2]。柚子皮中含有黄酮类化合物橙皮苷和柚

基金项目: 教育部大学生创新创业训练支持项目 (编号: S202414389072); 四川省自然科学基金 (面上) (编号: 2024NSFSC0370)

通信作者: 张硕 (1980—), 女, 成都师范学院副教授, 博士。E-mail: 15388114168@163.com

收稿日期: 2025-04-07 改回日期: 2025-10-31

引用格式: 谢文, 张硕, 王芳, 等. 天然深共晶溶剂联合微波提取柚子皮总黄酮及其体外抗氧化活性分析[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 198-205.

Citation: XIE Wen, ZHANG Shuo, WANG Fang, et al. Extraction process optimization and antioxidant activity of total flavonoids from pomelo peel by natural deep eutectic solvents combined with microwaves[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 198-205.

皮苷,在清除 DPPH 自由基与羟自由基等方面表现优异^[3]。从经济角度来看,全球黄酮市场约为 20 亿美元,柚子皮黄酮具有巨大的经济潜力^[4]。

目前,黄酮类化合物浸提常以甲醇、乙醇等有机溶剂为提取液,毒性大、萃取时间长、得率低^[5-6]。近年来,天然深共晶溶剂(natural deep eutectic solvents,NADES)取代有机溶剂成为一种新兴的绿色溶剂。NADES 的主要成分为氨基酸、糖类、醇类及生物碱等,是一种安全无毒、成本低廉且制备简单的新一代绿色溶剂^[7]。其可作为常用有毒有机溶剂的替代品,解决传统有机溶剂的毒性问题^[8]。微波技术主要利用微波辐射引起的细胞破裂,使有效成分自由流出,同时微波所产生的电磁场可加速溶质的扩散速率,从而缩短提取时间,提高提取效率^[9]。González-Rivera 等^[4]研究表明,NADES 具有良好的微波响应性,这使得 NADES 与微波联用成为可能。NADES 联合微波提取已被应用于樱桃、香蕉和鹰嘴豆等黄酮提取中^[10-12]。

试验拟评价不同 NADES 溶剂联合微波的黄酮提取能力,优化柚子皮黄酮提取工艺,并对提取物的抗氧化活性进行评价,以期为柚子皮中黄酮的环保型高效提取及柚子皮生物活性资源的利用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

柚子皮:江西上饶;

苹果酸、柠檬酸、氯化胆碱、1,4-丁二醇、1,2-丙二醇、乙二醇、亚硝酸钠、硝酸铝、无水乙醇、FeSO₄、水杨酸、三氯乙酸(TCA)、氯化铁、氯化亚铁等:分析纯,合肥博美生物科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

微波化学反应器:WBFY-205 型,巩义市予华仪器有限公司;

分析天平:JA303P 型,常州市幸运电子设备有限公司;

紫外可见分光光度计:752G 型,上海精其仪器有限公司;

大容量低速离心机:TDL-5A 型,江苏金怡仪器科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 NADES 的合成 以氯化胆碱(ChCl)作为氢键受体(HBA),有机酸和多元醇为氢键供体(HBD)组成三元 NADES,各组分按摩尔比 1:1:1 混匀,加水量为 30%,400 W 微波下暴露 40 s(加热 5 s,暂停 5 s)。将 NADES 涡旋并在空气中冷却,直到获得清晰均匀的液体^[13]。NADES 组合见表 1。

表 1 NADES 的 3 种组合

Table 1 Three combinations of NADES

组号	HBA	HBD ₁	HBD ₂
NADES-1	氯化胆碱	乙二醇	苹果酸
NADES-2	氯化胆碱	丁二醇	柠檬酸
NADES-3	氯化胆碱	丙二醇	柠檬酸

1.3.2 总黄酮提取工艺 称取 1 g 柚子皮粉末,加入 20 mL NADES 溶液,混匀,70 °C 水浴 10 min,400 W 微波处理 40 s(加热 5 s,暂停 5 s),5 000 r/min 离心 20 min,保留上清液。相同提取条件下,以传统溶剂(体积分数为 60% 的乙醇—水溶液和体积分数为 80% 的甲醇)为对照组。

1.3.3 总黄酮得率测定 参照向思颖等^[14]的方法。

1.3.4 单因素试验 固定液料比为 20:1 (mL/g),加水量为 30%,微波时间为 40 s,提取温度为 70 °C。分别考察液料比 [10:1, 15:1, 20:1, 25:1, 30:1 (mL/g)]、加水(10%, 20%, 30%, 40%, 50%)、提取温度(50, 60, 70, 80, 90 °C)和微波时间(20, 30, 40, 50, 60 s)对柚子皮总黄酮得率的影响。

1.3.5 响应面试验 根据单因素试验结果,以液料比、加水量、提取温度和微波时间为自变量,柚子皮总黄酮得率为响应值,进行四因素三水平的 Box-Behnken(BBD)响应面优化试验。

1.3.6 体外抗氧化性测定

(1) DPPH 自由基清除能力:根据 Khan 等^[15]的方法并修改。取 25 mg DPPH 溶于 1 000 mL 无水乙醇中制备 DPPH 自由基溶液。将 100 μL 质量浓度分别为 10, 20, 30, 40, 50 μg/mL 的样品溶液与 DPPH 自由基溶液(100 μL, 0.2 mmol)混匀,避光静置 15 min,测定 517 nm 处吸光度。对照组为等质量浓度的维生素 C 溶液。按式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$A = \left(1 - \frac{R_1 - R_2}{R_0} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

A——DPPH 自由基清除率, %;

R₀——不加入样品溶液时 DPPH 自由基溶液的吸光度;

R₁——样品和 DPPH 自由基混合溶液的吸光度;

R₂——样品溶液的吸光度。

(2) 羟自由基清除能力:根据 Khan 等^[15]的方法并修改。将 1.5 mL 质量浓度分别为 10, 20, 30, 40, 50 μg/mL 的样品溶液与 1 mL 硫酸亚铁溶液(9 mmol/L)和 1 mL 双氧水溶液(8.8 mmol/L)混匀,37 °C 反应 10 min,加入 1 mL 9 mmol/L 的水杨酸—乙醇溶液,离心,测定 550 nm 处上清

液吸光度。对照组为等质量浓度的维生素 C 溶液。按式(2)计算羟自由基清除率。

$$B = \left(1 - \frac{R_3 - R_4}{R_5} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

B ——羟自由基清除率, %;

R_3 —— FeSO_4 、样品和水杨酸—乙醇混合液的吸光度;

R_4 —— FeSO_4 、样品、蒸馏水和水杨酸—乙醇混合液的吸光度;

R_5 —— FeSO_4 、蒸馏水、 H_2O_2 和水杨酸—乙醇混合液的吸光度。

(3) 还原力: 根据 Al-Dabbas^[16]的方法并修改。将 1.5 mL 质量浓度分别为 10, 20, 30, 40, 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的样品溶液与 2.5 mL PBS 缓冲液(0.2 mol/L, pH 6.6)、1% 铁氰化钾溶液混匀, 50 $^\circ\text{C}$ 水浴 20 min。加入 2.5 mL 三氯乙酸(质量分数 1%), 混匀, 1 500 r/min 离心 20 min。取 2.5 mL 上清液, 与 2.5 mL 蒸馏水、0.5 mL FeCl_3 (质量分数 0.1%) 混匀, 避光静置 10 min, 测定 700 nm 处吸光度。对照组为等质量浓度的维生素 C 溶液。

(4) 金属离子螯合率: 参照向思颖等^[14]的方法。

(5) 脂质过氧化抑制率: 参照向思颖等^[14]的方法。

1.3.7 数据处理 所有试验重复 3 次, 采用 Prism 软件绘图。

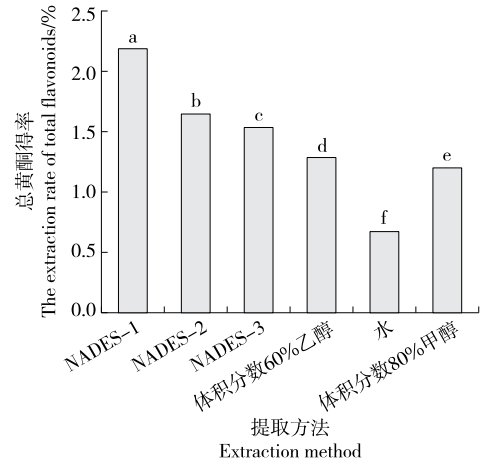
2 结果与讨论

2.1 NADES 体系筛选

由图 1 可知, 3 种 NADES 的总黄酮得率均显著优于常规提取法的($P < 0.05$)。在氯化胆碱、多元醇和有机酸组成的三元 NADES 提取体系中, 含有苹果酸、乙二醇和氯化胆碱的 NADES-1 的总黄酮得率为 2.19%, 显著高于含有柠檬酸的 NADES-2 和 NADES-3($P < 0.05$)。这可能是由于不同氢供体的 NADES 体系在 pH 值、黏度和极性方面存在不同, 影响了柚子皮的总黄酮得率^[17]。因此, 选择 NADES-1 为柚子皮总黄酮的提取溶剂。

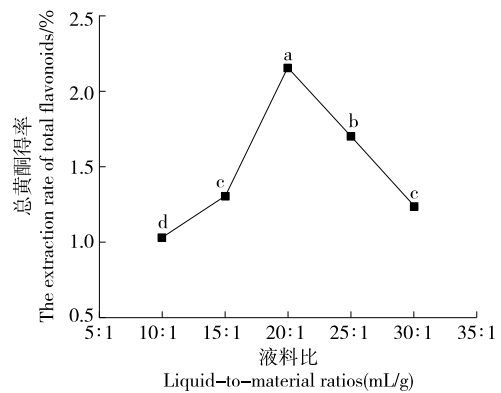
2.2 单因素试验

2.2.1 液料比 由图 2 可知, 柚子皮总黄酮得率随着液料比的增加先升高后降低, 并在 20:1 (mL/g) 时达到最大值(2.15%)。当液料比升高时, 与柚子皮粉中黄酮接触的 NADES 增加, 对得率有正向促进作用; 当液料比 $> 20:1$ (mL/g) 时, 其黏度也随之增高, 溶剂的流动性变差, 含有黄酮的物料与 NADES 的接触变得不充分, 降低了柚子皮总黄酮得率^[18]。因此, 选择液料比 15:1~25:1 (mL/g) 进行响应面试验。



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 1 相同条件下 NADES 和常规提取法的总黄酮得率
Figure 1 Extraction rate of total flavonoids by NADES and conventional methods under the same conditions

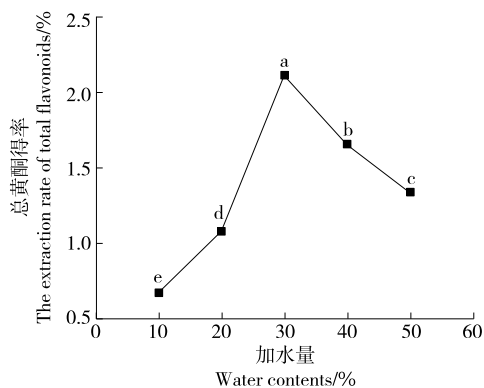


小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 2 液料比对柚子皮总黄酮得率的影响
Figure 2 Effect of liquid-to-solid ratios on the extraction rate of total flavonoids from pomelo peel

2.2.2 加水量 由图 3 可知, 柚子皮总黄酮得率在加水量 $< 30\%$ 时逐渐增高; 当加水量为 30% 时, 总黄酮得率达到最大值, 为 2.18%; 当加水量 $> 30\%$ 时, 总黄酮得率逐渐降低。这可能是由于提高加水量后, 提取体系中含有过多 H^+ 和 OH^- , 破坏了 HBD 与 HBA 之间的氢键络合作用, 降低了固液间的传质速率^[19]。因此, 选择加水量为 20%~40% 进行响应面试验。

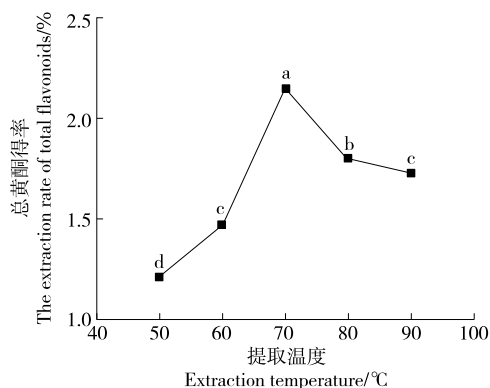
2.2.3 提取温度 由图 4 可知, 柚子皮总黄酮得率随着提取温度的升高而上升, 当提取温度为 70 $^\circ\text{C}$ 时, 总黄酮得率达到最大值, 为 2.15%, 随后总黄酮得率随提取温度的上升而下降。当提取温度为 50~70 $^\circ\text{C}$ 时, 分子热运动效应随着提取温度的升高而增加, 目标提取物与 NADES 间的接



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图3 加水量对柚子皮总黄酮得率的影响

Figure 3 Effect of water contents on the extraction rate of total flavonoids from pomelo peel



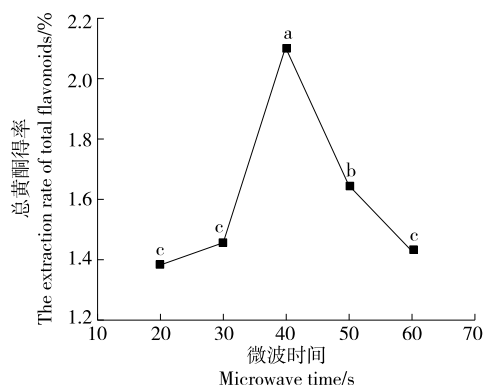
小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图4 提取温度对柚子皮总黄酮得率的影响

Figure 4 Effect of extraction temperatures on the extraction rate of total flavonoids from pomelo peel

触更多,提取效率更高。当提取温度 $> 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,黄酮结构可能被破坏或发生不可逆反应,从而降低得率^[20]。因此,选择提取温度 $60\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行响应面实验。

2.2.4 微波时间 由图5可知,当微波时间为 $20\text{--}40\text{ s}$ 时,随着微波时间的延长,柚子皮总黄酮得率逐步提升。这可能是由于微波照射导致细胞内温度快速升高,细胞内的压力过大引发细胞爆裂,释放出更多有效成分^[21]。此外,微波产生的高频电磁场也有助于加快溶质的扩散速率,使其更易从原材料中分离出来,并在提取液中溶解^[22]。当微波时间为 40 s 时,总黄酮得率达到最大值,为 2.12% 。随后总黄酮得率随着微波时间的延长呈下降趋势,可能是黄酮类物质稳定性差,长时间受热易发生氧化或水解^[23]。因此,选择微波时间 $30\text{--}40\text{ s}$ 进行响应面实验。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图5 微波时间对柚子皮总黄酮得率的影响

Figure 5 Effect of microwave time on the extraction rate of total flavonoids from pomelo peel

2.3 响应面实验

基于单因素试验结果,选取液料比、加水量、提取温度和微波时间为变量,以柚子皮总黄酮得率为响应值,设计四因素三水平响应面实验。试验因素水平见表2,试验设计及结果见表3。

表2 响应面因素水平表

Table 2 Variables and levels of the response surface experiment

水平	A 液料比 (mL/g)	B 加水量/%	C 提取温度/ $^{\circ}\text{C}$	D 微波时间/s
1	15:1	20	60	30
2	20:1	30	70	40
3	25:1	40	80	50

通过多元回归拟合试验数据,得到二次回归方程

$$Y = 0.178\ 8A + 0.185\ 883B + 0.755\ 5C + 0.391\ 4D + 0.003\ 3AB + 0.000\ 25AC + 0.002\ 1AD - 0.000\ 35BC + 0.000\ 3BD - 0.001\ 35CD - 0.007\ 953A^2 - 0.004\ 126B^2 - 0.004\ 938C^2 - 0.004\ 326D^2. \quad (3)$$

由表4可知,模型 $P < 0.01$ 极显著,失拟项 $P = 0.613\ 6 > 0.05$ 不显著,表明该模型具有统计学意义。 $R^2 = 0.992\ 3$, 说明回归方程的拟合度高; $R_{\text{Adj}}^2 = 0.984\ 7$, 说明 98.47% 总黄酮得率的变化可以用该模型解释。根据 F 值可知,液料比、加水量、提取温度和微波时间对柚子皮总黄酮得率的影响逐渐降低。综上,该模型拟合度高,适用于 NADES 联合微波提取柚子皮总黄酮得率的预测。

由图6可知,AB、AD、CD坡面陡峭,等高线为椭圆形,说明AB、AD、CD的交互作用对柚子皮总黄酮得率有极显著影响 ($P < 0.01$)。AC、BC、BD坡面较缓,等高线近圆形,说明AC、BC、BD的交互作用对柚子皮总黄酮得率

表 3 响应面试验设计及结果

Table 3 Design and results of response surface experiment

试验号	A	B	C	D	总黄酮得率/%
1	-1	-1	0	0	1.38±0.001 0
2	1	-1	0	0	1.69±0.000 2
3	-1	1	0	0	0.78±0.000 1
4	1	1	0	0	1.75±0.000 5
5	0	0	-1	-1	0.91±0.000 0
6	0	0	1	-1	1.27±0.000 1
7	0	0	-1	1	1.17±0.000 0
8	0	0	1	1	0.99±0.000 1
9	-1	0	0	-1	1.16±0.000 1
10	1	0	0	-1	1.53±0.000 1
11	-1	0	0	1	1.00±0.000 1
12	1	0	0	1	1.79±0.000 0
13	0	-1	-1	0	1.07±0.000 2
14	0	1	-1	0	1.03±0.000 2
15	0	-1	1	0	1.23±0.000 2
16	0	1	1	0	1.05±0.000 2
17	-1	0	-1	0	0.97±0.000 0
18	1	0	-1	0	1.56±0.000 1
19	-1	0	1	0	1.04±0.000 2
20	1	0	1	0	1.68±0.000 2
21	0	-1	0	-1	1.21±0.000 1
22	0	1	0	-1	1.04±0.000 4
23	0	-1	0	1	1.22±0.000 6
24	0	1	0	1	1.17±0.001 2
25	0	0	0	0	2.07±0.000 4
26	0	0	0	0	1.95±0.000 6
27	0	0	0	0	1.96±0.000 1
28	0	0	0	0	2.04±0.000 2
29	0	0	0	0	2.01±0.000 4

无显著影响。

根据模型,预测柚子皮总黄酮提取的最佳工艺条件为液料比 23.18:1 (mL/g),加水量 28.98%,提取温度 72.62 °C,微波时间 39.69 s,此时柚子皮总黄酮得率为 2.09%。综合考虑各种因素,将最佳工艺条件修正为液料比 23:1 (mL/g),加水量 29%,提取温度 73 °C,微波时间 40 s,进行 3 次验证实验,测得柚子皮总黄酮得率为 2.20%,与预测值接近且可重复。表明 NADES 联合微波提取柚子皮总黄酮的工艺可靠。该条件下,柚子皮总黄酮得率高于超声辅助 NADES 的 (1.799%),提取时间 (40 s) 远低于超声辅助提取的 (15 min),能耗更低,说明 NADES 联合微波提取在提取时间和提取效率上均有

表 4 回归模型方差分析[†]

Table 4 Analysis of variance of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	4.310	14	0.308	129.43	<0.000 1	**
A	1.120	1	1.120	471.95	<0.000 1	**
B	0.080	1	0.080	33.65	<0.000 1	**
C	0.025	1	0.025	10.60	0.005 7	**
D	0.004	1	0.004	1.70	0.213 8	
AB	0.109	1	0.109	45.79	<0.000 1	**
AC	0.001	1	0.001	0.26	0.616 2	
AD	0.044	1	0.044	18.54	0.000 7	**
BC	0.005	1	0.005	2.06	0.173 1	
BD	0.004	1	0.004	1.51	0.238 8	
CD	0.073	1	0.073	30.65	<0.000 1	**
A ²	0.256	1	0.256	107.83	<0.000 1	**
B ²	1.100	1	1.100	464.28	<0.000 1	**
C ²	1.580	1	1.580	665.15	<0.000 1	**
D ²	1.210	1	1.210	510.39	<0.000 1	**
残差	0.033	14	0.002			
失拟项	0.023	10	0.002	0.87	0.613 6	
纯误差	0.011	4	0.002			
总和	4.340	28				

[†] ** 表示 $P<0.01$, * 表示 $P<0.05$; $R^2=0.992 3$, $R_{Adj}^2=0.984 7$;模型精密度的 33.185 6。

优势^[14]。

2.4 抗氧化活性分析

由图 7(a)可知,柚子皮总黄酮的 DPPH 自由基清除率随着质量浓度的增加而增加。当质量浓度为 50 μg/mL 时,DPPH 自由基清除率达到最大值(93.32%)。当质量浓度为 10 μg/mL 时,DPPH 自由基清除率为 81.03%,显著高于维生素 C 的 ($P<0.05$)。当质量浓度为 20~50 μg/mL 时,DPPH 自由基清除率为 88.54%~93.32%,显著低于维生素 C 的 ($P<0.05$),与向思颖等^[14]的研究结果接近,但该研究中超声辅助提取时间长达 15 min,试验中 NADES 联合微波技术极大缩短了提取时间(40 s)。

由图 7(b)可知,柚子皮总黄酮的羟自由基清除率随着质量浓度的增加略呈上升趋势,羟自由基清除率为 79.08%~87.15%。当质量浓度为 10~50 μg/mL 时,羟自由基清除率均显著高于维生素 C 的 ($P<0.05$)。李国峰等^[24]研究表明,超声辅助离子液体提取柚子皮总黄酮的羟自由基清除率约为 43.8%,低于微波辅助 NADES 法提取的。因此,NADES 联合微波提取的柚子皮总黄酮在羟自由基清除上具有优势。

由图 7(c)可知,柚子皮总黄酮的还原力随着质量浓

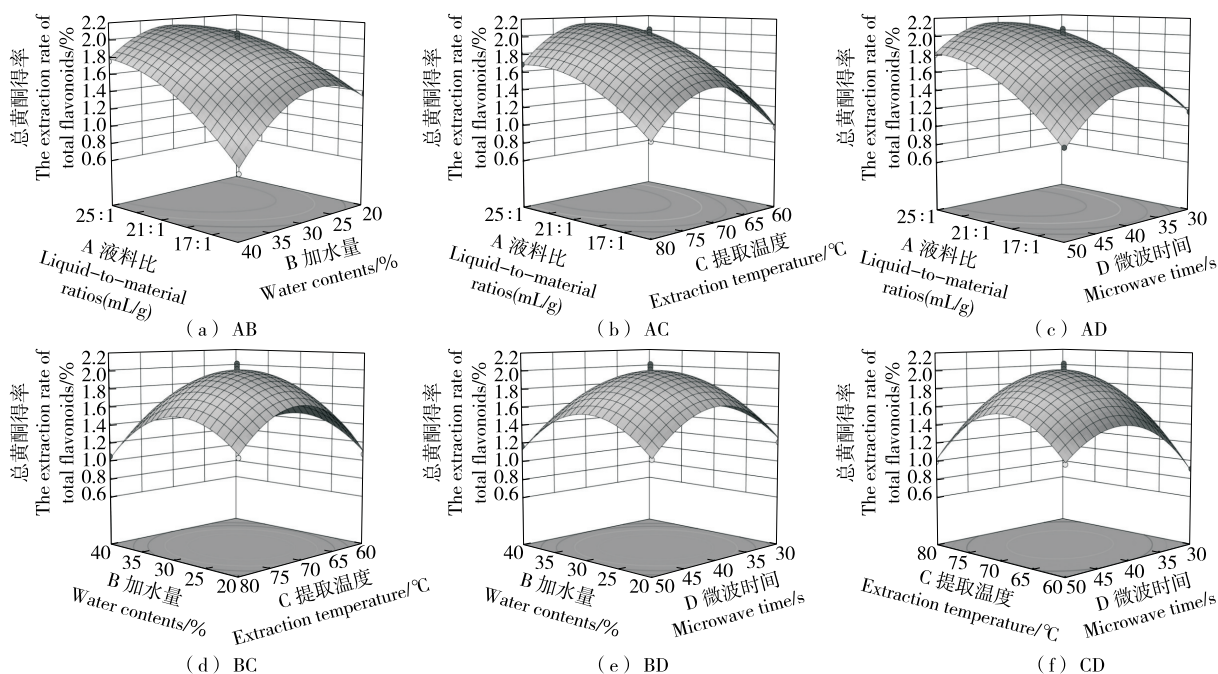
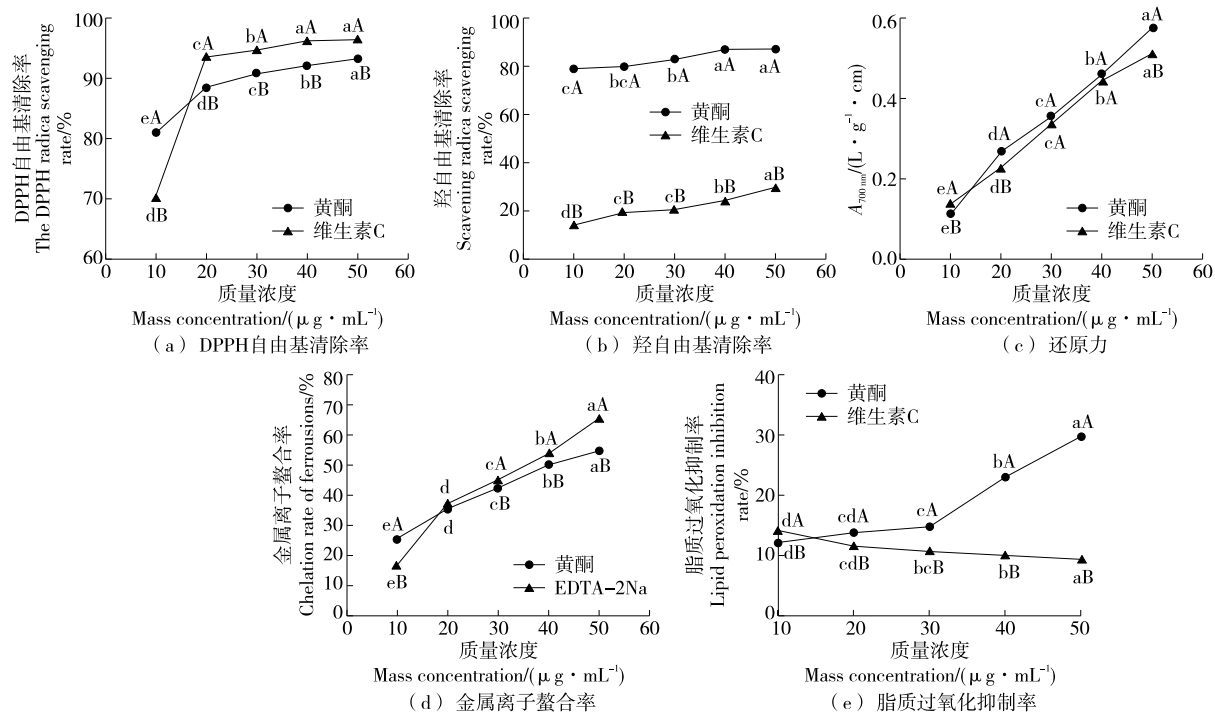


图6 柚子皮总黄酮响应面曲线图

Figure 6 Response surface curve diagrams of total flavonoids from pomelo peel



小写字母不同表示样品在各质量浓度下差异显著($P < 0.05$);大写字母不同表示在相同质量浓度下柚子皮总黄酮和维生素C差异显著($P < 0.05$)

图7 柚子皮总黄酮的抗氧化活性

Figure 7 Antioxidant activity of total flavonoids from pomelo peel

度的增加而增加。当质量浓度为10~50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,还原力为0.11~0.57,且在20,50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 质量浓度下,还原力显著

高于维生素C的($P < 0.05$)。柚子皮总黄酮中富含羟基,可提供电子将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,使其具有良好的还

原力^[25]。

由图 7(d)可知,柚子皮总黄酮的金属离子螯合率随着质量浓度的增加而增大。当质量浓度为 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,金属离子螯合率达到最大值 54.92%,高于向思颖等^[14]的(42.93%),说明 NADES 联合微波提取的总黄酮在金属离子螯合上较超声辅助提取更有优势。

由图 7(e)可知,当质量浓度为 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,柚子皮总黄酮的脂质过氧化抑制率为 12.26%,略低于维生素 C 的($P < 0.05$)。当质量浓度为 20~50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,脂质过氧化抑制率为 13.79%~29.78%,显著高于维生素 C 的($P < 0.05$),说明柚子皮黄酮具有良好的脂质过氧化抑制率,其机制可能是黄酮类物质作为氢供体,将氢供给脂类化合物自由基,形成稳定的酚基自由基,降低了自动氧化链式反应的传递速度^[26]。

3 结论

天然深共晶溶剂联合微波提取柚子皮总黄酮的最佳工艺条件为:由氯化胆碱、苹果酸和乙二醇组成天然深共晶溶剂,液料比为 23:1 (mL/g),加水量为 29%,提取温度为 73 $^{\circ}\text{C}$,微波时间为 40 s,此时柚子皮总黄酮得率为 2.20%,高于常规提取方法的。最佳工艺条件下提取的柚子皮总黄酮的 DPPH 自由基清除率为 93.32%,羟自由基清除率为 87.15%,还原力为 0.57,金属离子螯合率为 54.92%,脂质过氧化抑制率为 29.78%。综上,天然深共晶溶剂联合微波技术具有将食品加工中的废弃生物质提取成增值化合物的巨大潜力。

参考文献

- [1] HU L, LUO Y Q, YANG J X, et al. Botanical flavonoids: efficacy, absorption, metabolism and advanced pharmaceutical technology for improving bioavailability[J]. *Molecules*, 2025, 30(5): 1184.
- [2] KOLLATI R V, KESHAV A, MAZUMDAR B. Optimizing microwave-assisted extraction of pomelo peel phytochemicals for sustainable coating of pear fruit and preservation[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2025, 15(14): 294.
- [3] 林洁. 柚子皮总黄酮对食用油脂的抗氧化作用[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(4): 1054-1059.
LIN J. Antioxidant activity of total flavonoids extracted from shaddock skins on edible oils and fats[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(4): 1054-1059.
- [4] GONZÁLEZ-RIVERA J, MERO A, HUSANU E, et al. Combining acid-based deep eutectic solvents and microwave irradiation for improved chestnut shell waste valorization[J]. *Green Chemistry*, 2021, 23(24): 10101-10115.
- [5] 王婷婷, 胡萍, 常迎双. 杜仲不同部位营养成分及体外抗氧化活性分析[J]. *食品与机械*, 2025, 41(9): 161-168.

WANG T T, HU P, CHANG Y H. Analysis of nutritional components and *in vitro* antioxidant activities in different parts of *Eucommia ulmoides*[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(9): 161-168.

- [6] 孙伟, 谷清义, 翟冰倩, 等. 花椒叶总黄酮超声辅助低共熔溶剂提取工艺优化及抗氧化性分析[J]. *食品与机械*, 2025, 41(7): 199-206.
SUN W, GU Q Y, ZHAI B Q, et al. Ultrasound-assisted extraction of total flavonoids from *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. leaves with deep eutectic solvents and their antioxidant activity evaluation[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(7): 199-206.
- [7] ZHENG B L, YUAN Y, XIANG J L, et al. Green extraction of phenolic compounds from foxtail millet bran by ultrasonic-assisted deep eutectic solvent extraction: optimization, comparison and bioactivities[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112740.
- [8] DŁUGOSZ O, OCHNIK M, SOCHOCKA M, et al. Antimicrobial and antiviral activity of selenium sulphide nanoparticles synthesised in extracts from spices in natural deep eutectic solvents (NDES) [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2022, 32: e00433.
- [9] 肖付才, 李颖奎, 黄斐, 等. 山茱萸多糖提取工艺优化及结构表征[J]. *食品与机械*, 2024, 40(2): 161-167.
XIAO F C, LI Y K, HUANG F, et al. Optimization of extraction process and structural characterization of polysaccharides from *Cornus officinalis*[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(2): 161-167.
- [10] POPOVIC B M, MICIC N, POTKONJAK A, et al. Novel extraction of polyphenols from sour cherry pomace using natural deep eutectic solvents-Ultrafast microwave-assisted NADES preparation and extraction[J]. *Food Chemistry*, 2022, 366: 130562.
- [11] CEGLEDI E, DOBROSLAVIĆ E, PEDISIĆ S, et al. Green approaches for the extraction of banana peel phenolics using deep eutectic solvents[J]. *Molecules*, 2024, 29(15): 29153672.
- [12] 孙悦, 刘晓冰, 苏卓文, 等. 微波辅助低共熔溶剂提取鹰嘴豆中黄酮及其抗氧化活性的研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(14): 120-128.
SUN Y, LIU X B, SU Z W, et al. Extraction of flavonoids from chickpeas by microwave-assisted eutectic solvent and its antioxidant activity[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(14): 120-128.
- [13] YAP P G, WANG Y, GAN C Y. Microwave-assisted preparation of an acidic deep eutectic solvent: green analysis, characterization and application[J]. *Chemistry Select*, 2024, 9(18): 202400836.
- [14] 向思颖, 鲁治宇, 张硕, 等. 超声辅助天然低共熔溶剂提取柚子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 S Y, LU Z Y, ZHANG S, 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.
- [15] KHAN J, ASAF S, LUBNA, et al. Green extraction of antioxidant-rich flavonoids from *Fagonia cretica* using deep eutectic solvents[J]. *Molecules*, 2025, 30(4): 813.
- [16] AL-DABBAS M M, ABU SAMAAN E G, IQBAL S, et al. Antioxidant, physiochemical, and sensory properties of functional marshmallow produced from honey, strawberry concentrates, and hibiscus extract[J]. *Foods*, 2025, 14(2): 265.
- [17] KOHANI M, RAISSI H, ZABOLI A, et al. Exploring the potential of deep eutectic solvents for extracting bioactive compounds from tea: insights from molecular dynamics simulations[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 393: 123589.
- [18] 张国燕, 陈海娟, 马永贵, 等. 荨麻总黄酮提取工艺的优化及体外抗氧化活性研究[J]. *中国野生植物资源*, 2024, 43(12): 43-51.
- ZHANG G Y, CHEN H J, MA Y G, et al. Optimization of extraction process for total flavonoids from *Urtica fissa* and study on its antioxidant activity *in vitro*[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2024, 43(12): 43-51.
- [19] 高子文, 贾智彤, 王利晖, 等. 低共熔溶剂提取绿茶中茶多酚工艺优化及茶多酚提取液的抗氧化活性分析[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(7): 1 330-1 342.
- GAO Z Y, JIA Z T, WANG L H, et al. Process optimization of tea polyphenols extraction from green tea by deep eutectic solvents and analysis of antioxidant activity[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 40(7): 1 330-1 342.
- [20] 邹平, 张迎阳, 邹林玲. 牡丹籽壳中黄酮类化合物提取及组分分析[J]. *食品与机械*, 2023, 39(4): 44-50.
- ZOU P, ZHANG Y Y, ZOU L L. Extraction and composition analysis of flavonoids in peony seed shells[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(4): 44-50.
- [21] 周范琳, 陈焱, 张团结, 等. 油茶籽油提取和包埋技术研究进展[J]. *食品科学*, 2025, 46(6): 354-370.
- ZHOU F L, CHEN G, ZHANG T J, et al. Advances in extraction and encapsulation technologies for camellia seed oil [J]. *Food Science*, 2025, 46(6): 354-370.
- [22] WANG N, LIU K, HOU Z K, et al. Microwave-assisted deep eutectic solvents pretreatment for lignocellulose: kinetics, intensified mechanism and process optimization[J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 302: 120881.
- [23] WANG J R, LI Y L, ZHANG H T, et al. Ultrasound-assisted extraction of flavonoids from *Rudbeckia hirta* L. flowers using deep eutectic solvents: optimization, HPLC analysis and anti-inflammatory activity[J]. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2025, 45: 100618.
- [24] 李国峰, 陈海芳, 杜文迪, 等. 超声辅助离子液体提取柚子皮总黄酮及其抗氧化研究[J]. *江西中医药大学学报*, 2021, 33(1): 84-88.
- LI G F, CHEN H F, DU W D, et al. Ultrasonic assisted ionic liquid extraction of total flavonoids from pomelo peel and their antioxidant activities[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2021, 33(1): 84-88.
- [25] KURPIOS-PIEC D, MAJEWSKA-WIERZBICKA M, CZECZOT H, et al. Flavonoids as hydroxyl radical scavengers, iron reductants and chelators: in vitro antioxidant action[J]. *Acta Poloniae Pharmaceutica*, 2021, 78(5): 635-648.
- [26] SHAFRAS M, SABARAGAMUWA R, SUWAIIR M. Role of dietary antioxidants in diabetes: an overview[J]. *Food Chemistry Advances*, 2024, 4: 100666.