

[制剂工艺]

超声辅助低共熔溶剂提取淡豆豉总黄酮工艺优化及其抗氧化活性评价

袁小涌¹, 方国力¹, 于现花¹, 单婷玉¹, 王孟虎¹, 程鹤¹, 孟祥松¹, 栗进才^{1,2*}

(1. 亳州学院中药学院, 安徽 亳州 236800; 2. 现代中药制造亳州市重点实验室, 安徽 亳州 236800)

摘要: 目的 优化淡豆豉总黄酮超声辅助低共熔溶剂提取工艺, 并评价其抗氧化活性。方法 筛选低共熔溶剂种类。在单因素试验基础上, 以含水量、液料比、超声温度为影响因素, 总黄酮含量为评价指标, Box-Behnken 响应面法优化提取工艺。考察总黄酮对 DPPH、ABTS 自由基的清除能力。结果 最佳条件为低共熔溶剂氯化胆碱-尿素, 液料比 36 : 1, 含水量 32%, 提取温度 73 °C, 总黄酮含量为 6.13 mg/g。总黄酮质量浓度为 50 μg/mL 时, 对 DPPH、ABTS 自由基的清除率分别为 71.71%、86.47%, IC₅₀ 分别为 30.06、29.38 μg/mL。结论 该方法稳定可靠, 可用于超声辅助低共熔溶剂提取抗氧化活性较强的淡豆豉总黄酮。

关键词: 淡豆豉; 总黄酮; 低共熔溶剂; 超声辅助提取工艺; 抗氧化活性; Box-Behnken 响应面法

中图分类号: R284.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1528(2026)03-0740-06

doi:10.3969/j.issn.1001-1528.2026.03.005

Optimization of ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction process for total flavonoids from *Sojae Semen Praeparatum* and evaluation of their anti-oxidant activity

YUAN Xiao-yong¹, FANG Guo-li¹, YU Xian-hua¹, SHAN Ting-yu¹, WANG Meng-hu¹,
CHENG He¹, MENG Xiang-song¹, LI Jin-cai^{1,2*}

(1. School of Traditional Chinese Medicine, Bozhou University, Bozhou 236800, China; 2. Bozhou Municipal Key Laboratory for Modern Traditional Chinese Medicine Manufacturing, Bozhou 236800, China)

ABSTRACT: AIM To optimize the ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction process for total flavonoids from *Sojae Semen Praeparatum*, and to evaluate their anti-oxidant activity. **METHODS** The kinds of deep eutectic solvents were screened. With water content, liquid-solid ratio and ultrasonic temperature as influencing factors, total flavonoids content as an evaluation index, the extraction process was optimized by Box-Behnken response surface method. The scavenging capacities of total flavonoids on DPPH, ABTS free radicals were investigated. **RESULTS** The optimal conditions were determined to be choline chloride-urea as deep eutectic solvent, 36 : 1 for liquid-solid ratio, 32% for water content, and 73 °C for extraction temperature, the total flavonoids content was 6.13 mg/g. Total flavonoids demonstrated the scavenging rates of 71.71%, 86.47% on DPPH, ABTS free radicals at the concentration of 50 μg/mL, along with the IC₅₀ of 30.06, 29.38 μg/mL, respectively. **CONCLUSION** This stable and reliable method can be used for the ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction process for total flavonoids from *Sojae Semen Praeparatum* with strong anti-oxidant activity.

KEY WORDS: *Sojae Semen Praeparatum*; total flavonoids; deep eutectic solvent; ultrasound-assisted extraction process; anti-oxidant activity; Box-Behnken response surface method

收稿日期: 2025-08-12

基金项目: 安徽省高校协同创新项目 (GXXT-2023-073); 安徽省高校自然科学基金项目 (2024AH051307); 亳州市重点研发计划项目 (bzzc2023032); 亳州市科技计划项目 (bzzd2024007); 滁州市科技计划项目 (2024YF006); 亳州学院横向科研项目 (BYH2025013)

作者简介: 袁小涌 (1989—), 男, 硕士, 助教, 研究方向为中药药效物质基础及其作用机制。Tel: 17319432062, E-mail: yuanxiaoyong1989@163.com

*通信作者: 栗进才 (1981—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为中药活性成分开发与利用。Tel: 13705685682, E-mail: ahbanli@163.com

淡豆豉是传统药食两用中药，为豆科植物大豆 *Glycine max* (L.) Merr. 干燥成熟种子(黑豆)的发酵加工品，用于治疗虚烦不眠、烦躁胸闷、感冒等症^[1]，其所含的黄酮类(如大豆素、染料木素)是重要活性成分，具有抗氧化、抗炎、神经保护、调节血管张力等作用^[2]，并且可通过诱导肿瘤细胞凋亡来抑制其增殖，从而发挥抗肿瘤作用^[3]。目前，淡豆豉被广泛应用于食品、保健品领域，但其活性成分的高效提取仍存在问题，传统方法主要为水提与有机溶剂(甲醇、乙醇)回流提取，但前者杂质(如多糖、蛋白质)含量高，纯化需经醇沉、过滤等步骤，成本高昂且耗时；后者虽然提取率较高，但存在耗时、环境污染问题^[4]，故探索新方法来提高资源利用率、减少环境污染是亟待解决的关键问题。

低共熔溶剂作为一类新型绿色溶剂体系，是由2种或多种氢键供体与受体化合物按特定比例加热熔融形成的均相液态混合物，其特征为熔点显著低于单一组分(通常低20℃以上)，具有合成方便、易于储存、价格低廉、绿色环保、效率较高等优势，已在药品、食品、保健品等领域中展现出广阔的产业化前景^[5]。其中，氯化胆碱基低共熔溶剂体系因其独特的氢键网络结构，已成功应用于黄酮类(如槲皮素)、生物碱类(如小檗碱、黄柏碱)、醌类(如大黄素)的高效提取^[6]。

目前，针对低共熔溶剂与淡豆豉的研究较少，并且尚未涉及黄酮类含量测定及低共熔溶剂参数优化。因此，本实验优化超声辅助低共熔溶剂提取淡豆豉总黄酮工艺，并评价其抗氧化活性，以期为该成分的开发利用提供理论基础。

1 材料

1.1 药材 淡豆豉购于安徽和济堂中药饮片有限公司(批号20240924)，经亳州学院孟祥松主任中药师鉴定为正品。

1.2 试剂 芦丁对照品(批号F17IS207135)、L-抗坏血酸(上海源叶生物科技有限公司)。丙三醇、柠檬酸、乳酸、尿素、无水乙醇、石油醚、乙酸、乙二醇(分析纯，上海麦克林生化科技股份有限公司)；亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠(天津市大茂化学试剂厂)；1, 1-二苯基-2-苦基肼(DPPH, 北京赛因坦科技有限公司)；2, 2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS, 合肥博美生物科技有限责任公司)；AB-8大孔吸附树脂(东鸿化工有限公司)。

1.3 仪器 Spectramax iD3 多功能酶标仪[美谷分子仪器(上海)有限公司]；W-2019HR 医用离心机(安徽嘉文仪器装备有限公司)；电子分析天平(上海力辰仪器科技有限公司)；KQ-300DE 数控超声波清洗机(昆山市超声仪器有限公司)；HH-S 数显恒温水浴锅(金坛市杰瑞尔电器有限公司)。

2 方法

2.1 低共熔溶剂筛选 根据文献[7-10]报道，选择廉价易得的季铵盐类化合物氯化胆碱作为氢键受体，应用广泛、提取率较高的乙酸、丙三醇、柠檬酸、乳酸、尿素、乙二醇作为氢键供体，将两者按1:2比例混合后加入适量水，80℃水浴加热并进行磁力搅拌，直至形成稳定均匀的透明液体，冷却至室温，即得低共熔溶剂，以60%乙醇为对照，具体见表1。

表1 低共熔溶剂种类(n=3)

Tab. 1 Kinds of deep eutectic solvents (n=3)

编号	氢键受体	氢键供体
DES-1	氯化胆碱	乙酸
DES-2	氯化胆碱	丙三醇
DES-3	氯化胆碱	柠檬酸
DES-4	氯化胆碱	乳酸
DES-5	氯化胆碱	尿素
DES-6	氯化胆碱	乙二醇
E7		60%乙醇

2.2 样品预处理 参照文献[11]报道，取药材粉末适量，加入石油醚密封搅拌3h，脱脂，滤除石油醚，取粉末，烘干。

2.3 单因素试验

2.3.1 含水量 固定液料比30:1，提取温度30℃，提取时间30min，分别考察含水量10%、20%、30%、40%、50%对总黄酮提取率的影响，重复3次。

2.3.2 液料比 固定含水量30%，提取温度30℃，提取时间30min，分别考察液料比10:1、20:1、30:1、40:1、50:1对总黄酮提取率的影响，重复3次。

2.3.3 提取温度 固定含水量30%，液料比40:1，提取时间30min，分别考察提取温度15、30、45、60、75℃对总黄酮提取率的影响，重复3次。

2.3.4 提取时间 固定含水量30%，液料比40:1，提取温度60℃，分别考察提取时间10、30、50、70、90min对总黄酮提取率的影响，重复3次。

2.4 Box-Behnken 响应面法 在单因素试验基础上,选择含水量(A)、液料比(B)、提取温度(C)作为影响因素,总黄酮得率(Y)作为评价指标,因素水平见表2。

表2 Box-Behnken 响应面法因素水平

Tab.2 Factors and levels for Box-Behnken response surface method

水平	因素		
	A 含水量/%	B 液料比	C 提取温度/℃
-1	10	30 : 1	45
0	30	40 : 1	60
1	50	50 : 1	75

2.5 供试品溶液制备 根据“2.4”项下结果,精密称取1.00 g药材粉末,与低共熔溶剂均匀混合,控制各影响因素进行超声辅助提取,冷却后转移至离心管中,10 000 r/min离心10 min,取上清液,即得。

2.6 线性关系考察 参照文献[12]报道,称取10.00 mg芦丁对照品,甲醇溶解并定容至10 mL量瓶中,摇匀,即得1.00 mg/mL溶液,分别吸取0.10、0.20、0.30、0.40、0.50、0.60、0.70 mL至10 mL量瓶中,加入0.3 mL 5% NaNO₂溶液,混匀,静置6 min,再加入0.3 mL 10% Al(NO₃)₃溶液,混匀,静置6 min,再加入4 mL NaOH溶液,甲醇定容,振荡均匀,静置15 min,在510 nm波长处测定吸光度。以对照品质量浓度为横坐标(X),吸光度为纵坐标(A)进行回归,得方程为A=8.705 7X-0.009 9(R²=0.999 3),在10~70 μg/mL范围内线性关系良好。

2.7 总黄酮含量测定 精密量取总黄酮提取液1 mL,置于10 mL量瓶中,按“2.4”项下方法测定吸光度,计算含量。

2.8 抗氧化活性研究 按最优工艺提取总黄酮,离心,取上清液,经AB-8型大孔吸附树脂柱进行富集纯化,过滤液浓缩,制成不同质量浓度溶液。

2.8.1 DPPH 自由基清除能力 精密称取DPPH自由基0.007 886 g,无水乙醇超声溶解,定容至100 mL。吸取0.5 mL总黄酮提取液至EP管中,加入1.0 mL DPPH乙醇溶液,室温避光反应30 min,以抗坏血酸为对照,在517 nm波长处测定吸光度,计算清除率,公式为清除率=1 - $\frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{空白}}}{A_{\text{对照}}}$ × 100%,其中A_{样品}为样品溶液、DPPH乙醇溶液吸光度,A_{空白}为样品溶液、乙醇吸光度,A_{对照}为DPPH乙醇溶液、蒸馏水吸光度。

2.8.2 ABTS 自由基清除能力 将7.0 mmol/L ABTS溶液、2.45 mmol/L过硫酸钾溶液按1:1比例混匀,避光放置13 h,乙醇稀释,使其在734 nm波长处的吸光度为0.70±0.07。吸取0.1 mL总黄酮提取液至3 mL EP管中,加入1.6 mL ABTS工作液,混匀,室温避光放置5 min,以抗坏血酸为对照,在734 nm波长处测定吸光度,计算清除率,公式为清除率=1 - $\frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{空白}}}{A_{\text{对照}}}$ × 100%,其中A_{样品}为样品溶液、ABTS工作液吸光度,A_{空白}为样品溶液、蒸馏水吸光度,A_{对照}为ABTS工作液、蒸馏水吸光度。

3 结果

3.1 低共熔溶剂 如图1所示,氯化胆碱-尿素提取时总黄酮含量最高,达4.85 mg/g,优于传统提取方法(60%乙醇,4.32 mg/g),这可能是因为该类成分能与该低共熔溶剂形成较强的分子间氢键、静电相互作用^[13],增加前者溶解度,故本实验选择其作为提取溶剂。

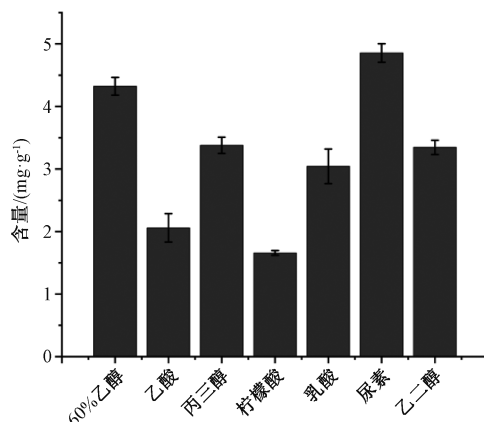


图1 不同低共熔溶剂对总黄酮含量的影响
Fig.1 Effects of different deep eutectic solvents on total flavonoids content

3.2 单因素试验

3.2.1 含水量 由于大多数低共熔溶剂含水量低、黏度大,阻碍了分子扩散运动,会降低其提取效率,并且含水率过低时难以透过植物细胞,过高时提取溶剂极性增加,水分子破坏分子间作用力,不利于其与黄酮类成分结合,导致目标成分含量较低^[14-16],故通过加入适量水来调整其黏度。如图2所示,随着含水量增加总黄酮含量升高,为30%时达到最大值,但为30%~50%时反而降低,故确定为30%。

3.2.2 液料比 如图3所示,随着液料比增加总

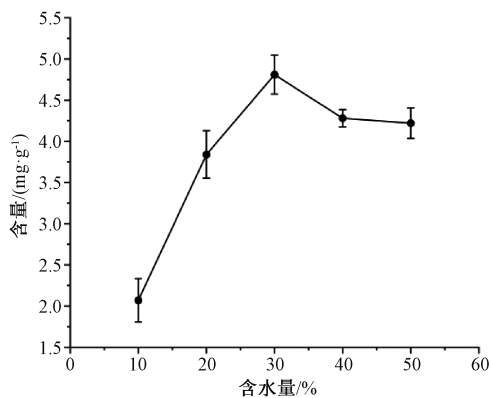


图2 含水量对总黄酮含量的影响

Fig. 2 Effect of moisture content on total flavonoids content

黄酮含量升高,这可能是因为提取溶剂进入药材细胞组织,有利于该类成分扩散和溶出^[17]。但液料比为40:1~50:1时反而降低,这可能是因为溶剂用量过多时其他成分也被提取出来^[18],故确定为40:1。

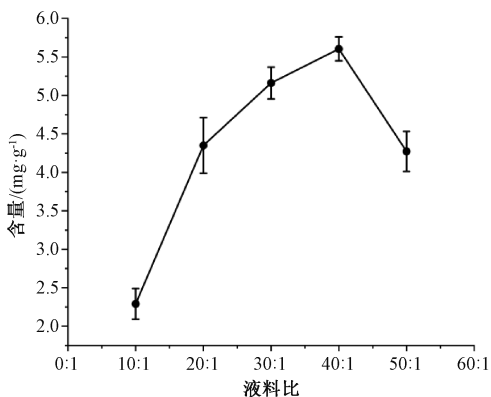


图3 液料比对总黄酮含量的影响

Fig. 3 Effect of liquid-solid ratio on total flavonoids content

3.2.3 提取温度 温度会影响低共熔溶剂黏度和分子扩散速度,同时会改变氢键受体、供体之间的相互作用,从而对提取造成影响^[19]。如图4所示,随着提取温度升高,低共熔溶剂黏度和表面张力变小,总黄酮含量升高,但为60~75℃时反而降低,这可能是因为该类成分受热不稳定,高温促进其发生分解等结构变化^[20],也可能是因为温度升高导致氢键受体、供体之间的稳定性降低^[21],故确定为60℃。

3.2.4 提取时间 如图5所示,随着超声时间延长总黄酮含量升高,为70min时达到最大值,但为90min时略微降低,这可能是因为提取70min后药材细胞组织中大部分该类成分被充分提取,剩余部分提取不完全,甚至会引起提取溶剂蒸发流失或杂

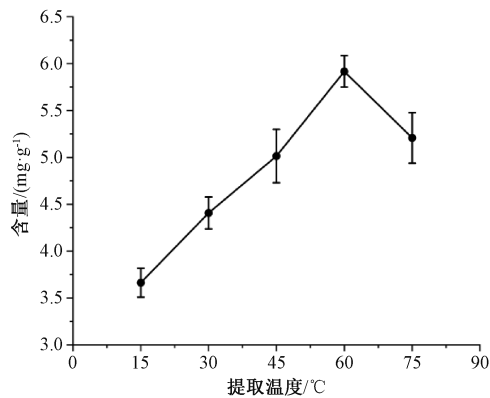


图4 提取温度对总黄酮含量的影响

Fig. 4 Effect of extraction temperature on total flavonoids content

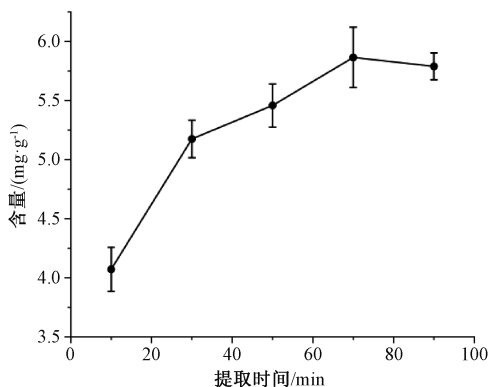


图5 提取时间对总黄酮含量的影响

Fig. 5 Effect of extraction time on total flavonoids content

质溶出,从而影响得率^[22-23],故确定为70min。

3.3 Box-Behnken 响应面法 结果见表3,通过Design Expert 13.0软件进行多项式回归分析,得方程为 $Y=6.01+0.51A-0.17B+0.23C-0.0025AB-0.0250AC+0.0200BC-1.15A^2-0.35B^2-0.17C^2$ 。

方差分析见表4,可知模型 $P<0.01$,具有高度显著性; $R^2=0.9939$, $R^2_{adj}=0.9860$,表明模型可靠性和准确性良好,可用于后续分析;各因素影响程度依次为 $A>C>B$ 。

响应面分析见图6,可知因素 AB 、 AC 三维曲面较弯曲,表明其交互作用影响显著,而 BC 三维曲面较平坦,表明其交互作用影响不显著^[24];因素 AB 、 AC 等高线呈扁椭圆形,并且较密集,而 BC 等高线离心率略小,与三维曲面图一致^[25-26]。最终确定,最优工艺为低共熔溶剂氯化胆碱-尿素,液料比36:1,含水量32%,提取温度73℃,总黄酮含量为6.13mg/g。

表3 Box-Behnken 响应面设计与结果

Tab. 3 Design and results for Box-Behnken response surface method

试验号	A 含水量/%	B 液料比	C 提取温度/°C	Y 总黄酮含量/ (mg·g ⁻¹)
1	30	30 : 1	75	5.77
2	10	50 : 1	60	3.73
3	50	30 : 1	60	5.28
4	30	50 : 1	75	5.59
5	10	40 : 1	75	4.51
6	30	40 : 1	60	5.95
7	30	50 : 1	45	5.16
8	30	30 : 1	45	5.42
9	50	50 : 1	60	4.83
10	30	40 : 1	60	6.02
11	30	40 : 1	60	6.07
12	10	30 : 1	60	4.17
13	30	40 : 1	60	6.04
14	30	40 : 1	60	5.98
15	50	40 : 1	75	5.41
16	50	40 : 1	45	4.92

表4 方差分析结果

Tab. 4 Results for analysis of variance

来源	离均差平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	9.37	9	1.04	126.39	<0.000 1
A	2.11	1	2.11	256.36	<0.000 1
B	0.221 1	1	0.221 1	26.85	0.001 3
C	0.432 4	1	0.432 4	52.5	0.000 2
AB	0	1	0	0.003	0.957 6
AC	0.002 5	1	0.002 5	0.303 5	0.598 8
BC	0.001 6	1	0.001 6	0.194 3	0.672 7
A ²	5.59	1	5.59	678.72	<0.000 1
B ²	0.537 4	1	0.537 4	65.24	<0.000 1
C ²	0.121 3	1	0.121 3	14.73	0.006 4
残差	0.057 7	7	0.008 2	—	—
失拟项	0.048 6	3	0.016 2	7.13	0.044
纯误差	0.009 1	4	0.002 3	—	—
总和	9.43	16	—	—	—

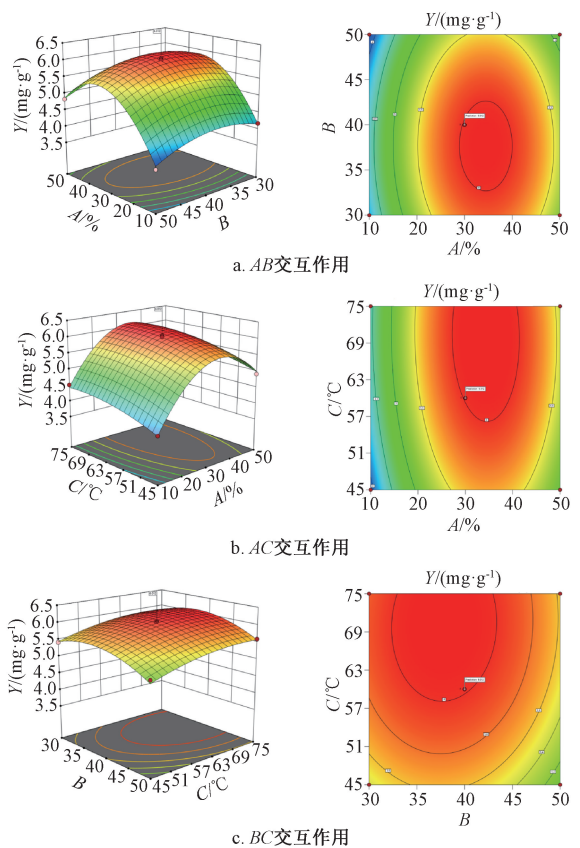
3.4 抗氧化活性

3.4.1 DPPH 自由基 如图7所示,随着总黄酮质量浓度增加,DPPH 自由基清除率升高,为50 μg/mL 时达71.71%,但低于抗坏血酸,并通过 GraphPad Prism 9 软件测得其 IC₅₀ 为30.06 μg/mL。

3.4.2 ABTS 自由基 如图8所示,随着总黄酮质量浓度增加,ABTS 自由基清除率升高,为50 μg/mL 时达86.47%,但低于抗坏血酸,并通过 GraphPad Prism 9 软件测得其 IC₅₀ 为29.38 μg/mL。

4 结论

本实验在单因素试验基础上,采用 Box-Behnken 响应面法筛选出影响因素为含水量、液料比、提取温度,并对其进行抗氧化活性研究。结果,低共熔



注:左图为三维曲面图,右图为等高线图。A、B、C、Y 分别为含水量、液料比、提取温度、总黄酮含量。

图6 各因素响应面图

Fig. 6 Response surface plots for various factors

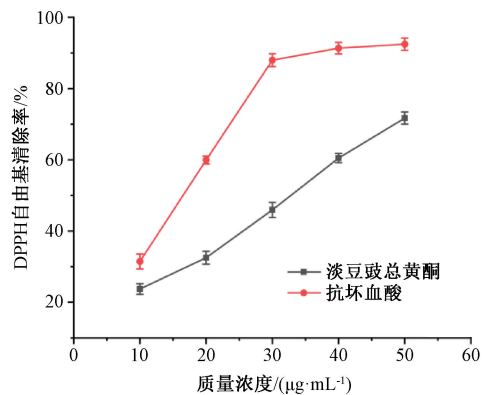


图7 总黄酮对 DPPH 自由基的清除能力

Fig. 7 Scavenging capacity of total flavonoids on DPPH free radical

溶剂(氯化胆碱-尿素1:2)提取总黄酮的得率高于传统方法;液料比为36:1、含水量为32%、提取温度为73℃时总黄酮得率最高,达6.13 mg/g;总黄酮质量浓度为50 μg/mL 时对 DPPH、ABTS 自由基的清除率分别为71.71%、86.47%,IC₅₀ 值分别为30.06、29.38 μg/mL,具有较强的抗氧化活

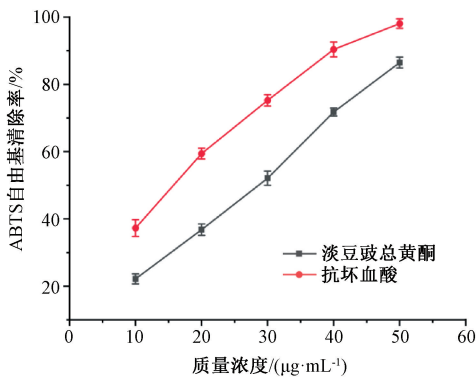


图8 总黄酮对ABTS自由基的清除能力

Fig. 8 Scavenging capacity of total flavonoids on ABTS free radical

性。综上所述,本实验开发了一种绿色环保的淡豆豉总黄酮提取工艺,可为该药材在食品、药品领域中的应用提供理论参考。

参考文献:

[1] 关水清,周改莲,周媛,等.淡豆豉的本草考证及现代研究概况[J].中药材,2020,43(9):2295-2302.

[2] 林王敏,翁倩倩,邓爱平,等.基于文献的淡豆豉发酵过程成分转化分析[J].中国中药杂志,2021,46(9):2119-2132.

[3] 董淑翔.淡豆豉的药理作用及临床运用研究进展概述[J].中医临床研究,2021,13(30):139-141.

[4] 宋林晓,邵娟娟.黄酮类化合物提取方法研究进展[J].粮食与油脂,2020,33(1):21-22.

[5] 蔡娜娜,高莉宁,张洪刚,等.低共熔溶剂的形成机理及应用研究进展[J].化学世界,2022,63(4):248-256.

[6] 卫鹏阁,刁美琳,张宇,等.天然低共熔溶剂在中药活性成分提取中的研究进展[J].辽宁中医杂志,2025,52(1):215-220.

[7] Liu Y J, Lou L, Huang Q, et al. Ultrasonic extraction and purification of scutellarin from *Erigerontis Herba* using deep eutectic solvent[J]. *Ultrason Sonochem*, 2023, 99: 106560.

[8] 尹月,李升焯,韩婧,等.低共熔溶剂研究进展[J].山东化工,2025,54(8):95-97.

[9] 刘洋旋,吕庆云,党允卓,等.响应面法优化超声辅助低共熔溶剂提取葛根中黄酮及其抗氧化分析[J].食品科技,2021,46(11):195-202.

[10] 禹晓梅,周忠云.超声辅助低共熔溶剂提取韩信草总黄酮的工艺优化[J].天然产物研究与开发,2024,36(11):1910-1919.

[11] 张景,冯亭亭,张明柱.淡豆豉 UPLC 指纹图谱[J].中成药,2017,39(7):1531-1533.

[12] 黄文睿,唐超凡,陶雨峰,等.绿色低共熔溶剂提取野菊花中黄酮类化合物[J].精细化工,2022,39(3):569-576.

[13] Dai Y T, Witkamp G, Verpoorte R, et al. Tailoring properties of natural deep eutectic solvents with water to facilitate their applications[J]. *Food Chem*, 2015, 187: 14-19.

[14] Liang J, Zeng Y J, Wang H F, et al. Extraction, purification and antioxidant activity of novel polysaccharides from *Dendrobium officinale* by deep eutectic solvents[J]. *Nat Prod Res*, 2019, 33(22): 3248-3253.

[15] MacLean A M G, Silva Y P A, Jiao G L, et al. Ultrasound-assisted extraction of anthocyanins from Haskap (*Lonicera caerulea* L.) berries using a deep eutectic solvent (DES) extraction of anthocyanins from Haskap berries[J]. *Food Technol Biotechnol*, 2021, 59(1): 56-62.

[16] 王帅,宋海英,张楠,等.低共熔溶剂性质及其应用研究进展[J].应用化工,2019,48(12):3017-3021.

[17] 付佳乐,耿直,郭亚敏,等.银杏叶总黄酮绿色提取工艺及抗氧化活性研究[J].化学与生物工程,2024,41(1):40-45.

[18] 韩颖,吕晓玲.竹柳叶中黄酮类化合物的提取工艺和成分分析研究[J].食品研究与开发,2017,38(14):53-59.

[19] 冯海燕,孙耀冉,陈硕,等.三白草总黄酮低共熔溶剂超声提取工艺优化[J].中成药,2025,47(6):1811-1816.

[20] 侯敏娜,侯少平,张尉婷,等.超声辅助低共熔溶剂法提取太白贝母总黄酮及其抗氧化活性研究[J].化学与生物工程,2024,41(6):37-43.

[21] Ozkan G. Valorization of artichoke outer petals by using ultrasound-assisted extraction and natural deep eutectic solvents (NADES) for the recovery of phenolic compounds[J]. *J Sci Food Agric*, 2024, 104(5): 2744-2749.

[22] Meng Z R, Zhao J, Duan H X, et al. Green and efficient extraction of four bioactive flavonoids from pollen typhae by ultrasound-assisted deep eutectic solvents extraction[J]. *Pharm Biomed Anal*, 2018, 161: 246-253.

[23] Xu Y Y, Qiu Y, Ren H, et al. Optimization of ultrasound-assisted aqueous two-phase system extraction of polyphenolic compounds from *Aronia melanocarpa* pomace by response surface methodology[J]. *Prep Biochem Biotechnol*, 2017, 47(3): 312-321.

[24] Song J F, Li D J, Pang H L, et al. Effect of ultrasonic waves on the stability of all-trans lutein and its degradation kinetics[J]. *Ultrason Sonochem*, 2015, 27: 602-608.

[25] 刘佳怡,黄磊磊,王天怡,等.超声协同低共熔溶剂提取紫丁香花多酚工艺优化及抗氧化活性分析[J].食品工业科技,2024,45(4):171-179.

[26] 徐璐瑶,赵洋,王艳,等.超声辅助低共熔溶剂提取玫瑰茄黄酮工艺优化及其抗氧化活性分析[J].食品工业科技,2025,46(16):260-271.