

低共熔溶剂法提取枣渣中黄酮类物质

张媛媛, 宋萌萌, 张 彬, 韩芸娇, 王梓俊, 陈 硕, 赵 星*, 肖 霄*

(石家庄学院化工学院, 石家庄 050035)

摘要: **目的** 探究低共熔溶剂法提取枣渣黄酮的最佳提取工艺。**方法** 以冬枣枣渣中的黄酮提取率为评价指标, 在低共熔溶剂的种类、摩尔比、料液比、超声时间、超声温度、超声功率等单因素实验基础上, 采用中心组合(Box-Behnken, BBK)实验模型对提取工艺进行优化。**结果** 最佳提取条件为: 以氯化胆碱-丙三醇-乙醇(摩尔比 1:1:1)为提取剂, 在料液比 1:60 (g/mL)、超声功率 105 W、超声温度 70 °C、超声时间 32 min 条件下, 黄酮提取率为 5.88%。**结论** 采用低共熔溶剂作为提取剂提取枣渣黄酮, 提取率明显优于传统乙醇提取法。本研究结果为枣类资源的充分开发利用提供一定理论支撑。

关键词: 低共熔溶剂法; 黄酮; 枣渣

Extraction of flavonoids from jujube residue by deep eutectic solvent method

ZHANG Yuan-Yuan, SONG Meng-Meng, ZHANG Bin, HAN Yun-Jiao, WANG Zi-Jun, CHEN Shuo, ZHAO Xing*, XIAO Xiao*

(Shijiazhuang University Chemical Engineering Institute, Shijiazhuang 050035, China)

ABSTRACT: Objective To study the optimum extraction process of flavonoids from jujube residue by deep eutectic solvent method. **Methods** The extraction rate of flavonoids from jujube residue was taken as the evaluation index, and the Box-Behnken (BBK) experimental model was used to optimize the extraction process on the basis of single factor experiments of deep eutectic solvent type, mole ratio, solid-liquid ratio, ultrasonic time, ultrasonic temperature and ultrasonic power. **Results** The optimal extraction conditions were as follows: Choline chloride-glycerol-ethanol (molar ratio 1:1:1) as the extraction agent, solid-liquid ratio 1:60 (g/mL), ultrasonic power 105 W, ultrasonic temperature 70 °C, ultrasonic time 32 min, the extraction yield of flavonoids was 5.88%. **Conclusion** Deep eutectic solvent is used to extract flavonoids from jujube residue, and the extraction rate is significantly better than that of traditional ethanol extraction method. The results of this study provide theoretical support for the full development and utilization of jujube resources.

KEY WORDS: deep eutectic solvent method; flavonoids; jujube residue

基金项目: 河北省人才工程培养资助项目(A201901093)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2018320)

Fund: Supported by the Talent Engineering Training Funding Project of Hebei Province (A201901093), and the Hebei Scientific and Technological Research Projects of Institutions of Higher Learning (QN2018320)

*通信作者: 赵 星, 讲师, 主要研究方向为食品药品质量控制与物质基础研究。E-mail: zhaoxing1202@163.com

肖 霄, 教授, 主要研究方向为食品加工。E-mail: 379534321@qq.com

*Corresponding author: ZHAO Xing, Lecturer, Shijiazhuang University, No.288, Zhufeng Road, Shijiazhuang 050035, China. E-mail: zhaoxing1202@163.com

XIAO Xiao, Professor, Shijiazhuang University, No.288, Zhufeng Road, Shijiazhuang 050035, China. E-mail: 379534321@qq.com

0 引言

低共熔溶剂(deep eutectic solvent, DES)是基于氢键作用而合成的一种绿色环保、配备简单、价格低廉的液体试剂^[1-3]。为了响应“绿色化工”的号召,近年来的研究报道表明,DES作为一种新型的提取媒介被大量应用于黄酮类、酚类、多糖、生物碱等活性物质的提取,并有效地提高活性物质的提取率^[4-6]。

我国是枣类的原产国,现阶段我国对于枣类的加工主要集中于干果、枣汁、枣酒、蜜饯的制作,而加工后产生的大量残渣大都被用作肥料或者直接丢弃,不仅浪费,也造成环境污染^[7-8]。研究表明,枣类加工残渣中仍含有大量生物活性物质,比如具有强抗氧化性的黄酮类物质^[9],对其进行提取,可以有效地提高枣产业的附加值。目前枣渣中黄酮的提取主要采用传统乙醇提取法:杨金枝等^[10]利用乙醇对枣渣黄酮进行提取,通过定性,发现枣渣中含有两种黄酮类物质,提取率分为 0.743%和 0.55%;何新益等^[11]利用微波-超声波辅助乙醇法提取枣渣黄酮,黄酮提取率为 1.5%;王娜等^[12]对水浴、超声、微波 3 种提取方法进行研究,发现微波提取效果最佳,枣渣黄酮得率为 1.76%;隋月红^[13]采用超声法提取枣核黄酮,所得黄酮含量为 7.53 mg/g;刘杰等^[14]利用超声波辅助乙醇法提取枣渣黄酮,所得黄酮含量为 2.361 mg/g。目前利用 DES 作为媒介从枣渣中提取黄酮尚未有报道,为充分利用枣类资源,进一步开发 DES 在活性物质提取中的作用,有必要对利用 DES 在枣渣中提取黄酮进行研究。

本研究以沧州冬枣加工残渣为原料,利用 DES 对其中的黄酮类物质进行提取,并采用中心组合(Box-Behnken, BBK)实验模型对提取工艺进行优化,为枣渣中活性物质的提取提供新的思路,为促进枣加工产业的绿色清洁生产与转型发展提供必要的理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

冬枣:河北沧州。

氯化胆碱[纯度 99%,阿拉丁试剂(上海)有限公司];芦丁(纯度 ≥ 98%,江西百草源生物科技有限公司);乙醇(分析纯,天津市百世化工有限公司);丙三醇(优级纯,天津市光复精细化工研究所);亚硝酸钠(分析纯,天津市鼎盛鑫化工有限公司);硝酸铝(分析纯,上海埃彼化学试剂有限公司);氢氧化钠(分析纯,山东绿英化工科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器(上海力辰邦西

仪器科技有限公司);TGL-16G 高速离心机(上海安亭科学仪器有限公司);KQ-3200DE 型、KQ-100DE 型数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司);FA2204B 电子天平(精度 0.1 mg,上海精密科学仪器有限公司);L6S 紫外可见分光光度计(上海仪电分析仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 DES 的配制

将氢供体与氢受体按表 1 所示摩尔比进行混合,于 70 °C 恒温水浴搅拌 1 h,至溶液均一透明,之后用去离子水稀释,得到含水量 20% 的 DES^[15],冷却至室温,备用。

表 1 DES 配制表
Table 1 Configuration table of DES

序号	DES	摩尔比
DES1	氯化胆碱-乙醇	1:25
DES2	氯化胆碱-丙三醇	1:25
DES3	氯化胆碱-蔗糖-水	1:1:100
DES4	氯化胆碱-丙三醇-乙醇	1:25:25
DES5	氯化胆碱-乳酸	1:25

1.3.2 枣渣黄酮的提取

准确称取一定质量的枣渣粉,置于离心管中,加入 DES,振荡均匀,放置 20 min 后,于功率 40 W、60 °C 下超声提取 30 min,提取液 1000 r/min 离心 15 min,取上清液,待测。

1.3.3 芦丁标准品溶液的配制

准确称取芦丁标准品 10.0 mg,用 95%乙醇溶液定容至 50 mL,得到质量浓度为 0.2 mg/mL 的标准品溶液。

1.3.4 标准曲线的绘制

准确吸取芦丁标准品溶液 1.0、2.0、4.0、6.0、8.0 mL,置于 5 支 25 mL 容量瓶中,加 95%乙醇溶液至 10.0 mL,混合均匀后,加入 5% NaNO₂ 溶液 1 mL,摇匀,静置 6 min,加入 10% Al(NO₃)₃ 溶液 1 mL,摇匀,静置 6 min,加入 4% NaOH 溶液 10 mL,用 95%乙醇溶液定容至刻度,摇匀,静置 15 min,于 500 nm 处测定吸光度^[16]。以芦丁标准品溶液浓度为横坐标(X, mg/mL),以吸光度值为纵坐标(Y),绘制标准曲线,得到回归方程为 $Y=12.64X-0.0093$ ($r^2=0.9992$),在 0.008~0.064 mg/mL 范围内线性关系良好。

1.3.5 黄酮含量测定与黄酮得率计算

准确吸取 1 mL 枣渣黄酮提取液至 25 mL 具塞比色管中,其余操作同 1.3.2。黄酮得率按公式(1)计算:

$$X/\% = \frac{m_1 \times n \times 0.001 \times V_1 \times V_2}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, m_1 为通过标准曲线计算出的黄酮质量浓度, mg/mL; n 为稀释倍数; V_1 为显色时使用待测枣渣提取液体积, mL; V_2 为待测枣渣提取液总体积; m 为枣渣粉重量, g; X

为枣渣中黄酮的提取率, %。

1.3.6 单因素实验

(1)DES 类型的选择

分别使用 DES1、DES2、DES3、DES4、DES5、95%乙醇对枣渣黄酮进行提取, 在料液比 1:20 (g/mL)、超声功率 100 W、超声时间 40 min、超声温度 45 °C 下, 考察不同 DES 类型对黄酮提取率的影响。

(2)DES 摩尔比的选择

分别选取 DES4 的摩尔比为 1:25:25、1:5:5、1:2:1、1:1:1, 其余条件同上, 考察不同摩尔比对黄酮提取率的影响。

(3)超声功率的选择

在超声时间 30 min、超声温度 60 °C、料液比 1:40 (g/mL) 的条件下, 分别选取超声功率为 60、80、100、120、150 W, 考察超声功率对黄酮提取率的影响。

(4)料液比的选择

在超声时间 30 min、超声温度 60 °C、超声功率 40 W 的条件下, 分别选取料液比 1:10、1:20、1:30、1:40、1:50、1:60、1:70 (g/mL), 考察不同料液比对黄酮提取率的影响。

(5)超声时间的选择

在超声温度 60 °C、超声功率 40 W、料液比 1:60 (g/mL) 的条件下, 分别选取超声时间 10、20、30、40、50、60 min, 考察超声时间对黄酮提取率的影响。

(6)超声温度的选择

在超声功率 40 W、超声时间 40 min、料液比 1:60 (g/mL) 条件下, 分别选取超声温度为 40、50、60、70、80 °C, 考察超声温度对黄酮提取率的影响。

1.3.7 响应面法优化提取工艺

根据单因素实验结果, 选取超声功率、超声温度、超声时间 3 个因素为变量, 以黄酮提取率为响应值, 设计响应面实验, 见表 2^[17-19]。

表 2 响应面因素水平编码表

Table 2 Factors and levers of response surface test

变量	编码水平		
	-1	0	1
A 超声功率/W	105	120	135
B 超声温度/°C	50	60	70
C 超声时间/min	30	40	50

1.3.8 数据处理

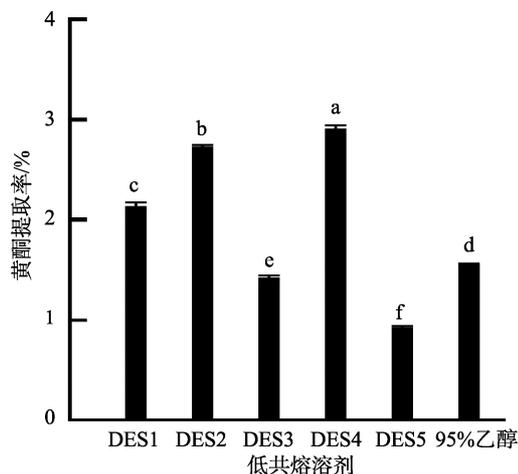
本研究采用 SPSS 25.0 软件进行数据分析, 采用 Graphpad 8.0.2 软件进行作图, 通过 Design-Expert.v8.0.6.1 软件进行响应面实验处理。

2 结果与分析

2.1 DES 类型的选择

DES 类型的选择直接影响到黄酮的提取效率, 对 4 种

不同的 DES 进行探索, 其结果如图 1 所示。从图 1 可知, DES3 和 DES5 对枣渣黄酮的提取效果较差, 提取率低于 95%乙醇, DES1、DES2、DES4 的提取率显著高于 95%乙醇 ($P < 0.05$)。可见, 与传统提取溶剂相比, 适宜的 DES 可以显著提高黄酮的提取率。其中, DES4 对应的黄酮提取率最高, 这可能与该体系中羟基数量较多有关^[15], 故选择 DES4 为提取枣渣黄酮的最佳溶剂。



注: 图中字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图 1 DES 类型的选择 ($n=3$)

Fig.1 Selection of DES type ($n=3$)

2.2 单因素实验

2.2.1 摩尔比对提取率的影响

考察 DES4 摩尔比对黄酮提取率的影响, 结果如图 2 所示。由图 2 可知, 增加氢受体占比不利于黄酮的提取, 这可能是由于氢受体(氯化胆碱)在体系中的含量减少, 会降低活性组分与 DES 之间的相互作用力^[20-21]。当氯化胆碱-丙三醇-乙醇摩尔比为 1:1:1 和 1:2:1 时枣渣黄酮的提取率差异不显著 ($P > 0.05$), 但前者获得提取率更高, 故选择氯化胆碱-丙三醇-乙醇的摩尔比为 1:1:1。

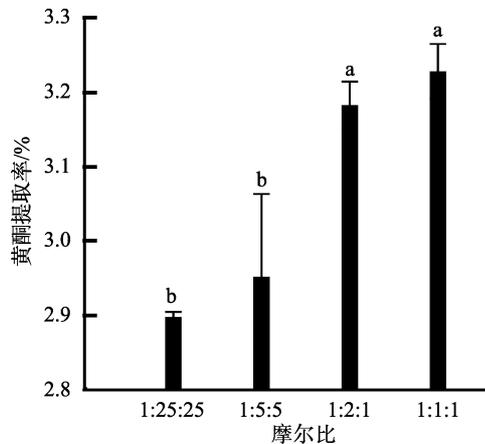


图 2 摩尔比对提取率的影响 ($n=3$)

Fig.2 Influences of mole ratio on extraction rates ($n=3$)

2.2.2 超声功率对提取率的影响

不同超声功率对枣渣黄酮提取率的影响如图 3 所示。由图 3 可知, 超声功率对于枣渣黄酮提取率影响显著。在 60~120 W 范围内黄酮提取率随着超声功率增加而增大, 在 120 W 达到最大值, 之后提取率降低, 这可能是由于超声功率过大会破坏黄酮类物质的结构^[22]。故选择超声功率为 120 W。

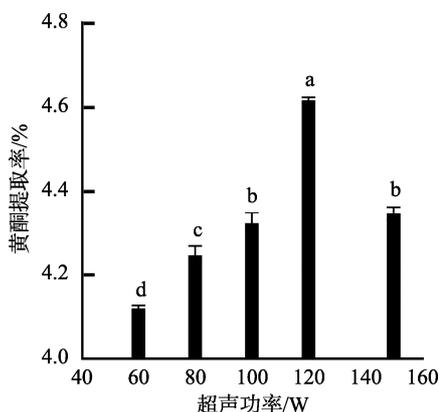


图 3 超声功率对提取率的影响($n=3$)

Fig.3 Influences of ultrasonic power on extraction rates ($n=3$)

2.2.3 料液比对提取率的影响

不同料液比对枣渣黄酮提取率的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 料液比对枣渣黄酮的提取有着显著影响, 随着料液比增加, 黄酮提取率逐渐增大, 这可能是由于 DES 的增加促进了黄酮的扩散作用^[23], 当料液比为 1:60 (g/mL) 时提取率达到最高, 之后, DES 的过量使用可能会增加枣渣中杂质的析出, 从而降低枣渣黄酮的提取率^[20]。故后续实验选择料液比为 1:60 (g/mL)。

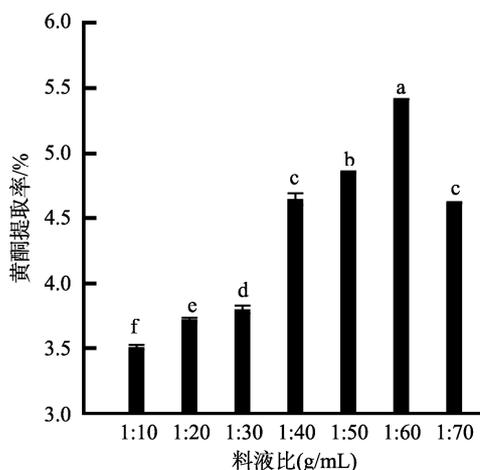


图 4 料液比对提取率的影响($n=3$)

Fig.4 Influences of solid-liquid ratio on extraction rates ($n=3$)

2.2.4 超声时间对提取率的影响

不同超声时间对枣渣黄酮提取率的影响如图 5 所示。

由图 5 可知, 超声时间对枣渣黄酮提取率的影响显著, 随着超声时间的增加, 提取率逐渐增大, 40 min 时, 提取率达到最高值, 之后逐渐下降。这可能是由于过长时间的提取使得枣渣中的杂质成分析出量增加, 从而影响了黄酮提取率^[24]。故最终选择超声时间为 40 min。

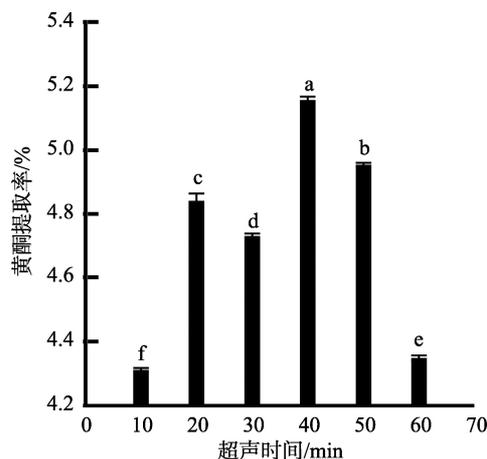


图 5 超声时间对提取率的影响($n=3$)

Fig.5 Influences of ultrasonic time on extraction rates ($n=3$)

2.2.5 超声温度对提取率的影响

不同超声温度对枣渣黄酮提取率的影响如图 6 所示。由图 6 可知, 超声温度对提取率具有显著影响, 黄酮提取率随着温度的升高先增大后降低, 于 60 °C 达到最大值。这可能是由于在 40~60 °C 范围内, 温度的提升不仅降低了 DES 的黏度, 同时提升了黄酮类物质的扩散系数^[25-26], 增大了黄酮的溶出率, 当温度超过 60 °C 时, 高温加速了黄酮组分的氧化, 进而降低了提取率^[27]。故选择超声温度为 60 °C。

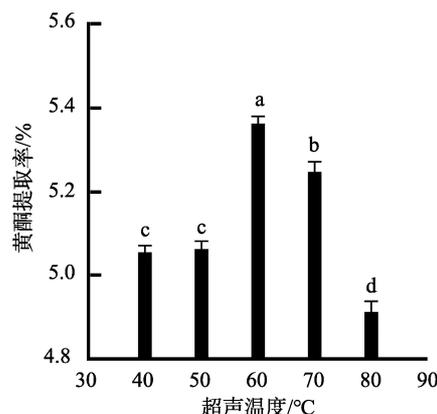


图 6 超声温度对提取率的影响($n=3$)

Fig.6 Influences of ultrasonic temperature on extraction rates ($n=3$)

2.3 响应面优化

2.3.1 响应面实验结果与分析

根据单因素实验结果, 发现超声功率、超声温度、超

声时间对黄酮提取率有显著影响,故设定为自变量 A、B、C,黄酮提取率为响应值(Y),采用 Design-Expert.v8.0.6.1 软件设计了 17 组实验,5 组为重复零点实验,结果见表 3,通过数据分析得到回归拟合方程为:

$$Y=5.26-0.042A+0.30B-0.16C-0.28AB+0.17AC-0.13BC+0.052A^2-0.16B^2-0.29C^2。$$

表 3 响应面实验结果
Table 3 Response surface experimental results

实验序号	A 超声功率/W	B 超声温度/°C	C 超声时间/min	Y 黄酮提取率/%
1	120	60	40	5.22
2	120	60	40	5.56
3	135	60	30	5.11
4	135	60	50	4.96
5	120	50	50	4.53
6	105	50	40	4.71
7	120	60	40	5.47
8	105	60	50	4.59
9	120	60	40	5.26
10	120	70	50	4.96
11	120	70	30	5.35
12	135	50	40	5.07
13	120	60	40	5.17
14	135	70	40	5.04
15	105	60	30	5.42
16	120	50	30	4.41
17	105	70	40	5.80

由表 4 可知,此实验模型 $P<0.01$,说明该模型差异性极显著。表 4 中 $R^2=0.9271$, $R_{Adj}^2=0.8210$, 变异系数(coefficient of variation, CV)为 $3.01\%<5\%$, 失拟项不显著,表明该模型在实验区间内拟合度优^[28],线性良好,并且能够解释 82.1%的响应值变化,具有较高的重复度和准确性。因此回归方程可以很好地描述各因素与响应值之间的关系。根据 3 个变量的方差显著性结果,可以看出超声温度对黄酮提取率的影响最为显著,3 个变量对响应值的影响效果依次为:超声温度>超声时间>超声功率。交互项中 AC 与 BC 的作用不显著,AB 对响应值的作用显著。二次项中 C^2 对响应值的作用显著。

表 4 响应面实验方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1.92	9	0.21	9.15	0.004**
A	0.014	1	0.014	0.62	0.4572
B	0.74	1	0.74	31.63	0.0008**
C	0.2	1	0.2	8.37	0.0232*
AB	0.31	1	0.31	13.44	0.008**
AC	0.12	1	0.12	4.95	0.0614
BC	0.065	1	0.065	2.79	0.139
A^2	0.011	1	0.011	0.49	0.5054
B^2	0.1	1	0.1	4.35	0.0755
C^2	0.35	1	0.35	15.2	0.0059**
残差	0.16	7	0.023		
失拟项	0.1	3	0.034	2.19	0.2322
纯误差	0.062	4	0.015		
总差	2.09	16			
R^2	0.9271	R_{Adj}^2	0.8210	CV/%	3.01

注: *表示差异显著($P<0.05$), **表示差异极显著($P<0.01$)。

根据上述模型得到的响应面分析图,见图 7~9,可以直观地观察到,在各因素变量的交互作用下黄酮提取率的变化均呈现正抛物线形状,表明各因素在波动水平内均存在峰值^[29-30]。曲面图像的坡度大小则代表了该因素对响应值影响的强弱,与方差数据分析相符合。

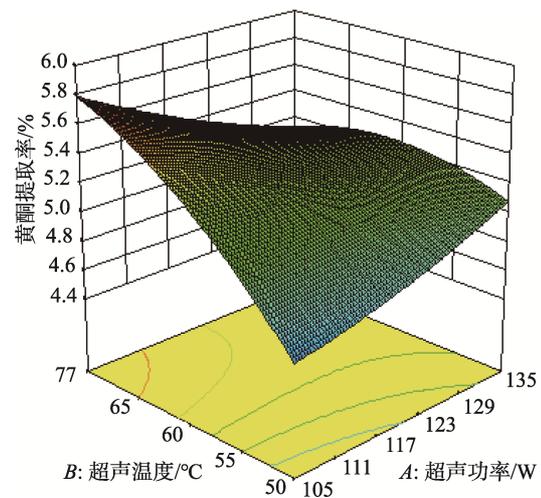
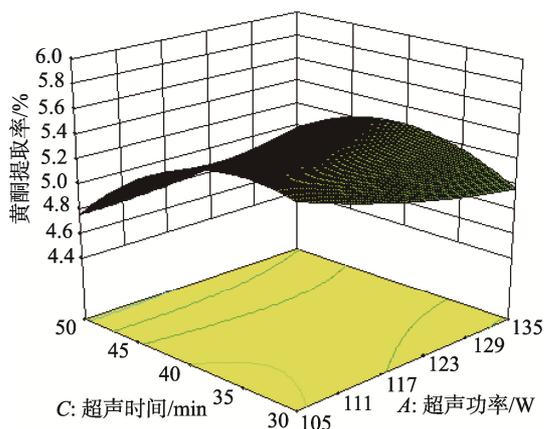
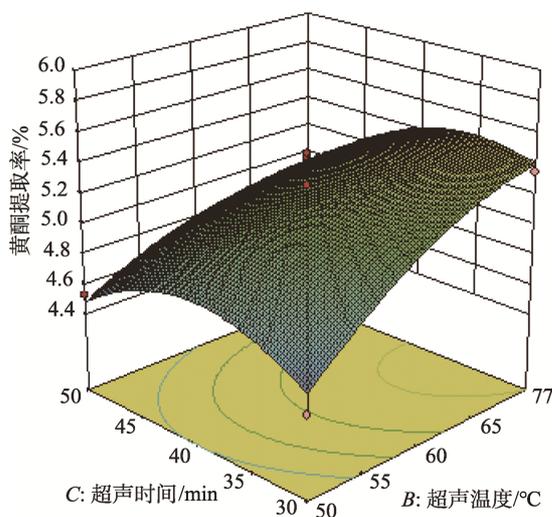


图 7 超声温度和超声功率交互作用的响应面图($n=3$)
Fig.7 Response surface map of ultrasonic temperature and ultrasonic power interactions ($n=3$)

图 8 超声时间和超声功率交互作用的响应面图($n=3$)Fig.8 Response surface map of ultrasonic time and ultrasonic power interactions ($n=3$)图 9 超声时间和超声温度交互作用的响应面图($n=3$)Fig.9 Response surface map of ultrasonic time and ultrasonic temperature interactions ($n=3$)

2.3.2 最优提取条件与验证

通过 Design-Expert.v8.0.6.1 软件对回归拟合方程进行分析, 得出最优提取条件为: 超声功率 105 W、超声温度 70 °C、超声时间 32 min, 在此条件下的理论预测值为 5.96%。在此条件下重复实验 3 次, 枣渣中黄酮的实际提取率为 5.88%, 表明实验模型准确可靠。

3 结论与讨论

本研究以冬枣枣渣为研究对象, 利用 DES 作为媒介, 对枣渣中黄酮类物质的提取进行了探索。实验发现, 采用 DES 作为提取剂, 提取率明显高于传统的乙醇提取法。在研究的 5 种 DES 中, 由氯化胆碱-丙三醇-乙醇(摩尔比 1:1:1) 3 组分构成的 DES 更适合于枣渣黄酮的提取。对枣渣黄酮提取工艺进行响应面实验优化, 得到最优提取工艺为: 料

液比 1:60 (g/mL)、超声功率 105 W、超声温度 70 °C、超声时间 32 min。在此条件下, 黄酮提取率为 5.88%。与其他同类文献报道对比^[7-11], 本方法简单易行、提取率高、绿色环保, 为枣类资源的充分开发利用提供了科学依据, 同时也为 DES 在天然产物提取中的应用提供理论依据。

参考文献

- [1] 赵泽馨, 纪颖鹤, 刘晓妹, 等. 基于低共熔溶剂的萃取分离技术及其应用研究进展[J]. 色谱, 2021, 39(2): 152-161.
ZHAO ZX, JI YH, LIU XM, *et al.* Progress in the application of deep eutectic solvents to extraction and separation technology [J]. *Chin J Chromatogr*, 2021, 39(2): 152-161.
- [2] HUANG Y, FENG F, JIANG J, *et al.* Green and efficient extraction of rutin from tartary buckwheat hull by using natural deep eutectic solvents [J]. *Food Chem*, 2017, 221: 1400-1405.
- [3] ZHAO BY, XU P, YANG FX, *et al.* Biocompatible deep eutectic solvents based on choline chloride: Characterization and application to the extraction of rutin from *Sophora japonica* [J]. *ACS Sustain Chem Eng*, 2015, 3: 2746-2755.
- [4] POPESCU AM, CONSTANTIN V, COJOCARU A, *et al.* Electrochemical behaviour of copper (III) chloride in choline chloride-urea deep eutectic solvent [J]. *Rev Chem Eng*, 2011, 62: 206-211.
- [5] CAO J, YANG M, CAO F, *et al.* Well-designed hydrophobic deep eutectic solvents as green and efficient media for the extraction of artemisinin from *Artemisia annua* leaves [J]. *ACS Sustain Chem Eng*, 2017, 5(4): 3270-3278.
- [6] 崔梦情, 石侃, 邓声林, 等. 赤霞珠葡萄籽多酚低共熔溶剂提取及其抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2021, 40(8): 110-116.
CUI MQ, SHI K, DENG SL, *et al.* Extraction of polyphenols from *Cabernet sauvignon* grape seeds with deep-eutectic solvents and its antioxidant activity [J]. *China Brew*, 2021, 40(8): 110-116.
- [7] 李黎, 邢达杰, 王宇辉. 响应面法优化酶辅助提取枣渣中水不溶性膳食纤维工艺[J]. 现代食品, 2020, (22): 136-139.
LI L, XING DJ, WANG YH. Optimization of enzymatic extraction of insoluble dietary fiber from jujube residues by response surface methodology [J]. *Mod Food*, 2020, (22): 136-139.
- [8] 张菊, 徐相亭, 肖发沂. 红枣作为饲料在动物生产中应用的研究现状[J]. 饲料研究, 2020, 43(5): 146-149.
ZHANG J, XU XT, XIAO FY. Research status of jujube as feed in animal production [J]. *Feed Res*, 2020, 43(5): 146-149.
- [9] 沈柯辰, 吴现华, 刘静, 等. 枣渣中功效成分提取及综合利用研究进展[J/OL]. 保鲜与加工: 1-8. [2022-01-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1330.S.20220104.1750.002.html>
- [10] SHEN KC, WU XH, LIU J, *et al.* Functional components extraction and comprehensive utilization of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) residue: A review [J/OL]. *Storage Process*: 1-8. [2022-01-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1330.S.20220104.1750.002.html>
- [11] 杨金枝, 陈锦屏, 崔琳琳, 等. 和田玉枣中三种功能成分的分离鉴定及分析探讨[J]. 陕西农业科学, 2008, (2): 41-45.
YANG JZ, CHEN JP, CUI LL, *et al.* Identification and analysis of three functional components from Hetian Jujube [J]. *Shaanxi J Agric Sci*, 2008, (2): 41-45.

- [11] 何新益, 黄宗海, 张爱琳. 枣渣中黄酮和多糖连续提取工艺研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(5): 228-230.
HE XY, HUANG ZH, ZHANG AIL. Study on extraction of flavonoids and polysaccharides in jujube (*Zizyphus jujube* Mill) residue [J]. Sci Technol Food Ind, 2011, 32(5): 228-230.
- [12] 王娜, 王栋梁, 范会平. 不同提取方法对枣渣黄酮抗氧化活性和得率的影响[J]. 河南农业大学学报, 2015, 49(6): 843-849.
WANG N, WANG DL, FAN HP. Effects of different extraction method on the antioxidant activity and yield of jujube residue flavonoid [J]. J Henan Agric Univ, 2015, 49(6): 843-849.
- [13] 隋月红. 新疆金昌枣化学成分及其生物活性的初步研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2016.
SUI YH. Investigation into the biological activities and chemical constituents of Jinchang jujube in South Xinjiang [D]. Aral: Tarim University, 2016.
- [14] 刘杰, 陈默然, 赵志雅. 枣渣中黄酮提取工艺的优化及抗氧化性研究[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(16): 22-24.
LIU J, CHEN MR, ZHAO ZY. Study on extraction and antioxidant activity of flavonoids in jujube slag [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2018, 24(16): 22-24.
- [15] 陈旭刚, 徐敏, 麻秀萍. 低共熔溶剂法提取山楂叶总黄酮的研究[J]. 轻工科技, 2021, 37(12): 27-30.
CHEN XG, XU M, MA XP. Study on extraction of total flavonoids from hawthorn leaves by eutectic solvent method [J]. Light Ind Sci Technol, 2021, 37(12): 27-30.
- [16] 聂静苑, 刘应蛟, 雷德卿, 等. 不同来源黄芪总黄酮含量测定及其抗氧化活性研究[J]. 赣南医学院学报, 2018, 38(6): 534-537, 585.
NIE JY, LIU YJ, LEI DQ, *et al.* Study on the contents of total flavonoids in *Radix astragali* from different sources and its *in vitro* antioxidant activity [J]. J Gannan Med Univ, 2018, 38(6): 534-537, 585.
- [17] FEKI F, FLISUROVA D, MASMOUDI MA, *et al.* Optimization of microwave assisted extraction of simmondsins and polyphenols from *Jojoba (Simmondsia chinensis)* seed cake using Box-Behnken statistical design [J]. Food Chem, 2021, 356: 129670.
- [18] SKS A, SP B, SS B, *et al.* Removal of crystal violet by Cu-chitosan nano-biocomposite particles using Box-Behnken design [J]. J Environ Chem Eng, 2021, 9(5): 105847.
- [19] 韩芸娇, 张媛媛, 夏雪芬, 等. 面包酵母冻干粉保护剂筛选及其生物活性分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 119-128.
HAN YJ, ZHANG YY, XIA XF, *et al.* Screening of protective agent and bioactivity analysis of bread yeast freeze dried powder [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(7): 119-128.
- [20] 陈冉, 李德慧, 阮桂发, 等. 基于绿色低共熔溶剂法高效提取鸡骨草中的黄酮和皂苷[J]. 天然产物研究与开发, 2019, 31: 1632-1640.
CHEN R, LI DH, RUAN GF, *et al.* Green and efficient extraction of flavonoids and saponins from *Abrus cantoniensis* hance by deep eutectic solvents [J]. Nat Prod Res Dev, 2019, 31: 1632-1640.
- [21] DAI Y, WITKAMP G, VERPOORTE R, *et al.* Tailoring properties of natural deep eutectic solvents with water to facilitate their applications [J]. Food Chem, 2015, 187(15): 14-19.
- [22] 张思覃. 超声辅助提取玉米耳黄酮工艺优化研究[J]. 现代农业, 2021, (4): 36-41.
ZHANG SQ. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of flavonoids from *Auricularia auriculata* [J]. Mod Agric, 2021, (4): 36-41.
- [23] 李杰, 李婧楠, 王艺文, 等. 超声辅助低共熔溶剂法提取黄芩中 3 种黄酮类成分的工艺研究[J]. 中华中医药学刊, 2021, 39(2): 143-146.
LI J, LI RN, WANG YW, *et al.* Extraction of three flavonoids from huangqin by ultrasonic assistant deep eutectic solvent method [J]. Chin Arch Tradit Chin Med, 2021, 39(2): 143-146.
- [24] NIE JG, CHEN DT, LU YB. Deep eutectic solvents based ultrasonic extraction of polysaccharides from edible brown seaweed *Sargassum homeri* [J]. J Mar Sci Eng, 2020, 8(6): 456-475.
- [25] MENG ZR, ZHAO J, DUAN HX, *et al.* Green and efficient extraction of four bioactive flavonoids from pollen typhae by ultrasound-assisted deep eutectic solvents extraction [J]. J Pharm Biomed Anal, 2018, 161: 246-253.
- [26] ZENG J, DOU YQ, YAN N, *et al.* Optimizing ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction of bioactive compounds from Chinese wild rice [J]. Molecules, 2019, 24(15): 2718.
- [27] 李刚, 蒋永梅, 雷杰, 等. 天然低共熔溶剂提取翠云草中穗花杉双黄酮工艺的优化[J/OL]. 食品工业科技: 1-18. [2021-12-31]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070197
LI G, JIANG YM, LEI J, *et al.* Natural deep eutectic solvent extraction of amentoflavone from *Selaginella uncinata* [J/OL]. Sci Technol Food Ind: 1-18. [2021-12-31]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070197
- [28] PINHEIRO DR, NEVES RDF, PAZ SPA. A sequential Box-Behnken design (BBD) and response surface methodology (RSM) to optimize SAPO-34 synthesis from kaolin waste [J]. Micropor Mesopor Mater, 2021, 323(331): 111250.
- [29] PALMA A, DÍAZ MJ, RUIZ-MONTOYA M, *et al.* Ultrasound extraction optimization for bioactive molecules from *Eucalyptus globulus* leaves through antioxidant activity [J]. Ultrason Sonochem, 2021, 76: 105654-105654.
- [30] ARDESTANI NS, AMANI M. Production of anthraquinone violet 3RN nanoparticles via the GAS process: Optimization of the process parameters using Box-Behnken design [J]. Dyes Pigments, 2021, 193: 109471.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



张媛媛, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品加工、功能性食品。
E-mail: zhyy701@163.com



赵星, 讲师, 主要研究方向为食品药品质量控制与物质基础研究。
E-mail: zhaoxing1202@163.com



肖霄, 教授, 主要研究方向为食品加工。
E-mail: 379534321@qq.com