

基于低共熔溶剂的翻白草中黄酮类成分的提取工艺研究^Δ

刘 斌^{1*}, 杨臣逸², 邵美玲¹, 黄良永^{1,2}, 高艳果¹, 王雪芹¹, 吕光辉¹, 胡 倩¹, 叶 方^{1,2#} (1. 十堰市太和医院/湖北医药学院附属医院药学部, 湖北 十堰 442000; 2. 湖北医药学院药学院, 湖北 十堰 442000)

中图分类号 R284.2 文献标志码 A 文章编号 1001-0408(2026)16-2119-05
DOI 10.6039/j.issn.1001-0408.2026.16.07



摘要 目的 优化翻白草中黄酮类成分的提取工艺。方法 以低共熔溶剂(DESs)为溶剂制备供试品溶液,采用超高效液相色谱测定芦丁、槲皮苷和山柰酚的含量;采用层次分析-客观权重赋权综合赋权法对上述3种黄酮类成分的含量进行综合赋权并计算综合评分,以综合评分为指标筛选最佳DESs;同时,以综合评分为响应值、液料比、超声时间、超声温度为指标,采用Box-Behnken响应面法优化翻白草中黄酮类成分的提取工艺并进行验证。结果 芦丁、槲皮苷、山柰酚含量的综合权重系数分别为0.646 7、0.207 5、0.145 8。最佳DESs为含水量40%的氯化胆碱-乳酸(摩尔比1:4),最优提取工艺为液料比25:1、超声时间40 min、超声温度50℃。经验证,3批样品的平均综合评分为99.28分,RSD为0.54%($n=3$)。结论 本研究基于DESs所得翻白草中黄酮类成分的最优提取工艺稳定、可行。

关键词 翻白草;黄酮类;低共熔溶剂;Box-Behnken响应面法;层次分析;客观权重赋权;综合赋权

Study on extraction technology of flavonoids from *Potentilla discolor* with deep eutectic solvents

LIU Bin¹, YANG Chenyi², SHAO Meiling¹, HUANG Liangyong^{1,2}, GAO Yanguo¹, WANG Xueqin¹, LYU Guanghui¹, HU Qian¹, YE Fang^{1,2} (1. Dept. of Pharmacy, Taihe Hospital/Affiliated Hospital of Hubei University of Medicine, Hubei Shiyan 442000, China; 2. School of Pharmacy, Hubei University of Medicine, Hubei Shiyan 442000, China)

ABSTRACT **OBJECTIVE** To optimize the extraction process of flavonoids from *Potentilla discolor*. **METHODS** Deep eutectic solvents (DESs) were used as the extraction solvent to prepare test sample solutions. The contents of rutin, quercitrin, and kaempferol were determined by ultra-performance liquid chromatography. The analytic hierarchy process combined with the criteria importance through intercriteria correlation weighting method was employed to assign comprehensive weights to the contents of the three flavonoids, and calculate the comprehensive score. The optimal DESs were screened based on the comprehensive score. Meanwhile, using the comprehensive score as the response variable and the liquid-to-solid ratio, ultrasonic time, and ultrasonic temperature as the influencing factors, the extraction technology of flavonoids from *P. discolor* was optimized by Box-Behnken response surface methodology and subsequently validated. **RESULTS** The comprehensive weight coefficients of rutin, quercitrin, and kaempferol were 0.646 7, 0.207 5, and 0.145 8, respectively. The optimal DESs were choline chloride-lactic acid (molar ratio 1:4) with a water content of 40%. The optimal extraction conditions were determined as follows: liquid-to-solid ratio of 25:1, ultrasonic time of 40 min, and ultrasonic temperature of 50℃. The validation results showed that the average comprehensive score of three batches of samples was 99.28, with an RSD of 0.54% ($n=3$). **CONCLUSIONS** The optimal extraction technology of flavonoids from *P. discolor* based on DESs obtained in this study was stable and feasible.

KEYWORDS *Potentilla discolor*; flavonoids; deep eutectic solvents; Box-Behnken response surface methodology; AHP; CRITIC; combined weighting

翻白草为蔷薇科植物翻白草 *Potentilla discolor* Bge. 的干燥全草,苦、寒,归肝、胃、大肠经,具有清热解毒、止血止痢等功效^[1]。翻白草中的黄酮类化合物是其主要药理活性成分之一,包括芦丁、槲皮苷、山柰酚和木犀草素等成分,具有降血糖、抗炎及抗氧化等活性^[2-3]。目前,翻白草中黄酮类成分的提取以甲醇、乙醇等传统有机溶剂为主,存在溶剂毒性大、提取效率低、提取能耗高以及

对热不稳定等问题。因此,建立绿色、高效、低耗的提取工艺对促进翻白草资源的开发和规模化应用具有重要意义。

低共熔溶剂(deep eutectic solvents, DESs)是由氢键受体(hydrogen bond acceptor, HBA)和氢键供体(hydrogen bond donor, HBD)按特定摩尔比混合后在一定温度下制成的透明、稳定、均一溶液,具有绿色、高效、低毒的特点,在中药有效成分提取方面具有巨大潜力^[4-5]。可见,以DESs为溶剂提取翻白草中的黄酮类成分,能有助于克服传统有机溶剂提取的不足,且目前该方面的研究尚属空白。层次分析(analytic hierarchy process, AHP)可根据文献与药理研究确定各指标的重要程度,但易受研究者主观经验的影响;客观权重赋权(criteria impor-

Δ 基金项目 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(No. B2023111);十堰市引导性科研项目(No.24Y035)

* 第一作者 主管药师,硕士。研究方向:中药质量控制与资源开发。E-mail:1065282413@qq.com

通信作者 主任药师。研究方向:中药资源开发与药品质量控制。E-mail:yxwen8801129@sina.com

tance through intercriteria correlation, CRITIC)可基于实测数据离散程度与指标相关性计算各指标权重,但不能反映各指标的相对重要程度;AHP-CRITIC综合赋权法将主观赋权和客观赋权相结合,综合确定权重系数,可使所得结果更加科学、合理^[6-7]。基于此,本研究采用超高效液相色谱(UPLC)法测定翻白草中芦丁、槲皮苷、山柰酚的含量;采用AHP-CRITIC综合赋权法对上述3种成分进行综合赋权;同时,在筛选最佳DESs的基础上,采用Box-Behnken响应面法优化翻白草中黄酮类成分的提取工艺,旨在为翻白草的绿色高效利用提供依据。

1 材料

1.1 主要仪器

本研究所用主要仪器包括 Vanquish Flex 型 UPLC 仪(美国 Thermo Fisher scientific 公司),KM-410C 型超声清洗机(广州科盟电子有限公司),DF-101S 型集热式磁力搅拌器、YT1002N 型电子分析天平(上海菁海仪器有限公司,感量:0.01 g),FA-2004 型电子分析天平(上海精密科学仪器有限公司,感量:0.1 mg),AUW-120D 型电子分析天平(日本 Shimadzu 公司,感量:0.01 mg)。

1.2 药品与试剂

芦丁对照品(批号 000507-2021112,纯度 98%)购自江西佰草源生物科技有限公司;槲皮苷对照品(批号 111538-202308,纯度 95.3%)购自中国食品药品检定研究院;山柰酚对照品(批号 B211126,纯度 98%)购自上海源叶生物科技有限公司;氯化胆碱、1,4-丁二醇、尿素、乳酸、乙二醇、1,2-丙二醇均购自上海麦克林生化科技股份有限公司;丙三醇购自天津市凯通化学试剂有限公司;草酸购自上海东海日用化工厂;甲醇、乙腈为色谱纯,水为自制超纯水。

翻白草药材(批号 2412011774)购自河北蔺氏盛泰药业有限公司,经湖北医药学院药学院叶方副教授鉴定为蔷薇科植物翻白草 *P. discolor* Bge. 的干燥全草。药材经粉碎、过筛[二号筛(筛孔内径 850 μm)]后备用。

2 方法与结果

2.1 3种黄酮类成分的含量测定

2.1.1 色谱条件

以 Waters SunFire™ C₁₈(250 mm×4.6 mm, 5 μm)为色谱柱;以乙腈(流动相 A)-0.2% 磷酸溶液(流动相 B)为流动相进行梯度洗脱(0~8 min, 13%A; 8~35 min, 13%A→23%A; 35~42 min, 23%A→42%A; 42~46 min, 42%A→25%A; 46~60 min, 25%A→13%A);检测波长为 360 nm;流速为 1.0 mL/min;进样量为 10 μL;柱温为 30 ℃。

2.1.2 溶液的制备

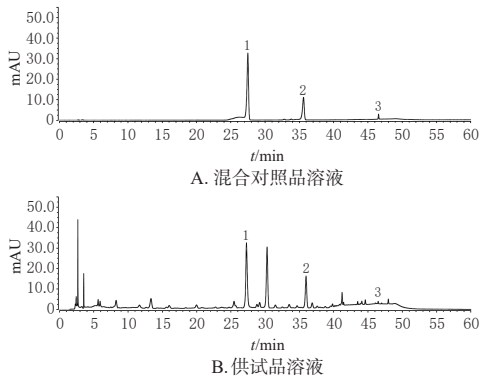
(1)对照品溶液:分别精密称取芦丁、槲皮苷对照品适量,置于 10 mL 容量瓶中,用甲醇溶解并稀释至刻度,摇匀,得芦丁、槲皮苷质量浓度分别为 3.428 0、0.829 1 mg/mL 的对照品储备液。另取山柰酚对照品适量,置于 100 mL 容量瓶中,用甲醇溶解并稀释至刻度,摇匀,得山柰酚质量浓度为 0.070 4 mg/mL 的对照品储备液。分别

精密量取上述各对照品储备液适量,置于 25 mL 容量瓶中,加甲醇定容,摇匀,经 0.22 μm 微孔滤膜滤过,得芦丁、槲皮苷、山柰酚质量浓度分别为 274.240、66.328、2.816 μg/mL 的混合对照品溶液。

(2)供试品溶液:精密称取翻白草药材粉末 1.0 g,置于具塞锥形瓶中,按液料比 25:1 (mL/g, 下同)精密加入含水量为 40% 的氯化胆碱-乳酸(摩尔比 1:4),密塞,称重,于 50 ℃ 下超声(功率 240 W, 频率 40 kHz)提取 40 min,提取结束后冷却至室温,再次称重,用含水量为 40% 的氯化胆碱-乳酸(摩尔比 1:4)补足失重,摇匀,加入 25 mL 甲醇,摇匀,经 0.22 μm 微孔滤膜滤过,得供试品溶液。

2.1.3 系统适用性试验

取上述混合对照品溶液、供试品溶液、空白溶液(DESs-甲醇,体积比 1:1)适量,按“2.1.1”项下色谱条件进样测定,记录色谱图。结果(图 1)显示,理论板数按芦丁计不低于 68 000,按槲皮苷计不低于 93 000,按山柰酚计不低于 174 000,空白溶液无干扰(空白溶液图略)。



1: 芦丁; 2: 槲皮苷; 3: 山柰酚。

图 1 混合对照品溶液、供试品溶液的 UPLC 图

2.1.4 线性关系考察

分别精密吸取“2.1.2(1)”项下混合对照品溶液适量,加甲醇稀释,得芦丁质量浓度分别为 164.544、98.726、59.236、35.542、21.325 μg/mL,槲皮苷质量浓度分别为 39.797、23.878、14.327、8.596、5.158 μg/mL,山柰酚质量浓度分别为 1.690、1.014、0.608、0.365、0.219 μg/mL 的系列对照品溶液。取上述系列对照品溶液及“2.1.2”项下混合对照品溶液,按“2.1.1”项下色谱条件进样测定,记录峰面积。以各待测成分质量浓度为横坐标(X)、峰面积为纵坐标(Y)进行线性回归。结果见表 1。

表 1 各待测成分的回归方程与线性范围

待测成分	回归方程	R ²	线性范围/(μg/mL)
芦丁	Y=0.144 5X+0.047 1	0.999 9	21.325~274.240
槲皮苷	Y=0.229 8X+0.011 1	0.999 8	5.158~66.328
山柰酚	Y=0.444 0X-0.024 2	0.999 6	0.219~2.816

2.1.5 精密度试验

取“2.1.4”项下芦丁、槲皮苷、山柰酚质量浓度分别为 98.726、23.878、1.014 μg/mL 的对照品溶液,按“2.1.1”项下色谱条件连续进样 6 次,记录峰面积。结果显示,芦丁、槲皮苷、山柰酚峰面积的 RSD 分别为 0.84%、0.87%、

0.07%($n=6$),表明仪器精密度良好。

2.1.6 重复性试验

精密称取翻白草药材粉末,共6份,每份约1 g,按“2.1.2(2)”项下方法制备供试品溶液,按“2.1.1”项下色谱条件进样测定,记录峰面积并按外标法计算各成分含量。结果显示,芦丁、槲皮苷、山柰酚含量的RSD分别为0.63%、1.86%、0.83%($n=6$),表明方法重复性良好。

2.1.7 稳定性试验

取“2.1.2(2)”项下供试品溶液,分别于室温下放置0、2、4、8、12、24 h时按“2.1.1”项下色谱条件进样测定,记录峰面积。结果显示,芦丁、槲皮苷、山柰酚峰面积的RSD分别为1.48%、0.94%、1.91%($n=6$),表明供试品溶液在室温下放置24 h内稳定性良好。

2.1.8 加样回收率试验

精密称取翻白草药材粉末,共6份,每份约0.5 g,分别加入“2.1.2(1)”项下芦丁对照品储备液1 mL,槲皮苷、山柰酚对照品储备液各0.5 mL,按“2.1.2(2)”项下方法制备供试品溶液,按“2.1.1”项下色谱条件进样测定,记录峰面积并计算加样回收率。结果显示,芦丁、槲皮苷、山柰酚的平均加样回收率分别为100.45%、98.96%、99.20%,RSD分别为0.47%、0.90%、1.41%($n=6$)。

2.1.9 含量测定

取翻白草药材粉末,按“2.1.2(2)”项下方法制备供试品溶液,按“2.1.1”项下色谱条件进样测定,记录峰面积并按外标法计算各成分含量。

2.2 AHP-CRITIC综合赋权各指标的权重系数

2.2.1 AHP法确定各指标权重

根据相关文献^[8-10]及本研究前期结果,确定翻白草中芦丁、槲皮苷、山柰酚药理贡献重要性的比值约为4:2:1,且芦丁为翻白草发挥降血糖、抗炎作用的核心活性成分,故其贡献度最高,其次为槲皮苷、山柰酚;采用AHP法构建判断矩阵并计算各指标的权重系数(W_{AHP})^[6]。结果显示,芦丁、槲皮苷、山柰酚含量的 W_{AHP} 分别为0.571 4、0.285 7、0.142 9,各指标判断矩阵的一致性指标为0,一致性比率为0(<0.10),表明所得权重系数一致性良好^[6]。

2.2.2 CRITIC法确定各指标权重

因翻白草中黄酮类成分的含量差异较大,为提高数据可比性和科学性,本研究对各指标数据进行归一化处理,并根据CRITIC法计算各指标的权重系数(W_{CRITIC})^[11]。结果显示,芦丁、槲皮苷、山柰酚含量的 W_{CRITIC} 分别为0.393 2、0.252 3、0.354 5。

2.2.3 AHP-CRITIC综合赋权及综合评分的计算

结合“2.2.1”“2.2.2”项下所得各指标的权重系数,根据公式[综合权重系数($W_{AHP-CRITIC}$)= $W_{AHP} \times W_{CRITIC} / \sum (W_{AHP} \times W_{CRITIC})$]^[12]计算,得芦丁、槲皮苷、山柰酚含量的 $W_{AHP-CRITIC}$ 分别为0.646 7、0.207 5、0.145 8。进一步按公式计算综合评分:综合评分=(芦丁含量/芦丁含量最大值 $\times 0.646 7$ +槲皮苷含量/槲皮苷含量最大值 $\times 0.207 5$ +山柰酚含量/山柰酚含量最大值 $\times 0.145 8$) $\times 100$ 。

2.3 DESs的制备与筛选

2.3.1 DESs的制备

采用加热搅拌法制备DESs:将不同HBA与HBD按比例混合后,置于具塞锥形瓶中,于80 ℃下以磁力搅拌器搅拌,制得透明、稳定、均一的液体;随后,加入适量水继续搅拌,所得均一、稳定、透明溶液即为DESs。考虑到不同DESs的极性、黏度、酸碱性等理化性质存在显著差异,可能会影响活性成分的提取效率^[13],故本研究参考相关文献^[14],结合黄酮类成分的化学性质,按上述方法制备7种DESs,以综合评分为评价指标,筛选最优DESs。结果(表2)显示,DES5(氯化胆碱-乳酸,摩尔比1:2,含水量35%)的综合评分最高,因此选用DES5进行后续研究。

表2 不同体系DESs及其综合评分

种类	HBA	HBD	摩尔比	含水量/%	综合评分/分
DES1	氯化胆碱	1,4-丁二醇	1:2	25	69.43
DES2	氯化胆碱	乙二醇	1:4	20	92.14
DES3	氯化胆碱	丙三醇	1:3	50	54.92
DES4	氯化胆碱	1,2-丙二醇	1:4	30	84.39
DES5	氯化胆碱	乳酸	1:2	35	97.20
DES6	氯化胆碱	草酸	1:1	30	83.70
DES7	氯化胆碱	尿素	1:2	35	80.53

2.3.2 DESs的摩尔比和含水量筛选

DESs的黏度、极性和表面张力会随HBA与HBD摩尔比发生显著变化^[12]。取翻白草药材粉末,按“2.1.2(2)”项下方法制备供试品溶液,以氯化胆碱-乳酸为溶剂,含水量为35%,考察氯化胆碱-乳酸不同摩尔比(1:1、1:2、1:3、1:4、1:5)对综合评分的影响。结果(图2A)显示,随着氯化胆碱-乳酸摩尔比的减小,综合评分呈先增加后降低的趋势,当二者摩尔比为1:4时达到最高,故选择氯化胆碱-乳酸摩尔比为1:4。

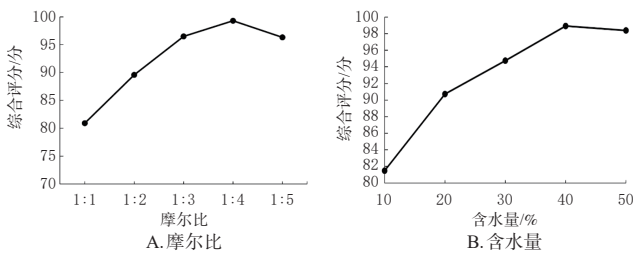


图2 DESs不同摩尔比和含水量对综合评分的影响

与常规溶剂相比,DESs的黏度较高,但过高的黏度会导致传质效率降低,因此需加入适当比例的水以降低溶剂黏度、提高提取效率^[15-16]。取翻白草药材粉末,按“2.1.2(2)”项下方法制备供试品溶液,以氯化胆碱-乳酸(摩尔比为1:4)为溶剂,考察不同含水量(10%、20%、30%、40%、50%)对综合评分的影响。结果(图2B)显示,随着含水量增加,综合评分呈先增加后降低的趋势,当含水量为40%时达到最高,因此选择含水量为40%。

2.4 翻白草中黄酮类成分的提取工艺优化

2.4.1 单因素实验

取翻白草药材粉末,按“2.1.2(2)”项下方法制备供试品溶液,以含水量40%、氯化胆碱-乳酸(摩尔比1:4)

为提取溶剂,分别考察不同液料比(10:1、15:1、20:1、25:1、30:1)、超声时间(10、20、30、40、50 min)、超声温度(20、30、40、50、60 ℃)对综合评分的影响。结果(图3)显示,三者的综合评分均呈先增加后降低的趋势,当液料比为25:1、超声时间为40 min、超声温度为50 ℃时分别达到最高。

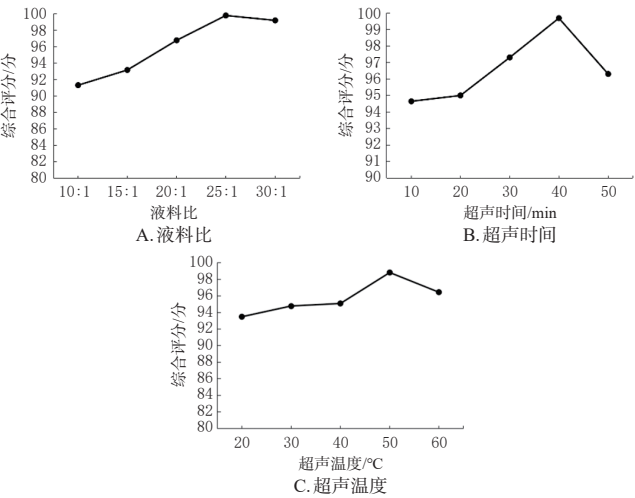


图3 不同液料比、超声时间、超声温度对综合评分的影响

2.4.2 Box-Behnken响应面法的实验设计与结果

以AHP-CRITIC综合赋权计算所得综合评分为响应值,液料比(A)、超声时间(B)、超声温度(C)为指标,采用Box-Behnken响应面法优化提取工艺。因素与水平见表3,实验方案与结果见表4,方差分析结果见表5。

表3 提取工艺的因素与水平

水平	A	B/min	C/℃
-1	20:1	30	40
0	25:1	40	50
1	30:1	50	60

表4 Box-Behnken响应面法实验方案与结果

实验号	A	B/min	C/℃	芦丁/(mg/g)	槲皮苷/(mg/g)	山奈酚/(mg/g)	综合评分/分
1	20:1	30	50	5.752 8	0.702 7	0.039 6	90.57
2	30:1	30	50	5.858 4	0.780 5	0.042 7	94.59
3	20:1	50	50	5.764 8	0.705 9	0.040 6	91.09
4	30:1	50	50	5.830 4	0.818 1	0.042 7	95.22
5	20:1	40	40	5.812 0	0.735 9	0.039 4	91.95
6	30:1	40	40	5.768 9	0.770 5	0.045 5	94.29
7	20:1	40	60	5.747 8	0.724 4	0.039 1	90.89
8	30:1	40	60	5.963 3	0.769 2	0.041 4	95.00
9	25:1	30	40	5.907 2	0.803 0	0.043 3	95.85
10	25:1	50	40	5.948 3	0.789 6	0.042 2	95.60
11	25:1	30	60	5.957 3	0.767 7	0.042 0	95.09
12	25:1	50	60	5.958 8	0.790 5	0.042 5	95.83
13	25:1	40	50	6.016 8	0.842 4	0.045 9	98.80
14	25:1	40	50	6.044 0	0.840 7	0.045 2	98.82
15	25:1	40	50	6.090 5	0.832 5	0.044 7	98.95
16	25:1	40	50	6.064 4	0.832 6	0.044 9	98.74
17	25:1	40	50	6.130 7	0.822 2	0.045 1	99.25

使用Design-Expert 13.0软件对上述实验结果进行拟合,得到多元二次回归方程:综合评分=98.910 0+1.820 0A+0.205 0B-0.112 5C+0.030 0AB+0.445 0AC+

表5 Box-Behnken响应面法实验方差分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	138.000	9	15.330	188.310	<0.000 1
A	26.570	1	26.570	326.330	<0.000 1
B	0.336	1	0.336	4.130	0.081 7
C	0.101	1	0.101	1.240	0.301 6
AB	0.004	1	0.004	0.044	0.839 4
AC	0.792	1	0.792	9.730	0.016 9
BC	0.250	1	0.250	3.070	0.123 2
A ²	78.090	1	78.090	959.010	<0.000 1
B ²	12.840	1	12.840	157.730	<0.000 1
C ²	10.400	1	10.400	127.700	<0.000 1
残差	0.570	7	0.081		
失拟项	0.400	3	0.133	3.130	0.149 6
自然误差	0.170	4	0.042		
总离差	138.570	16			

0.250 0BC-4.310 0A²-1.750 0B²-1.570 0C²。由表5可知,该模型方差显著(P<0.000 1),失拟项不显著(P=0.149 6>0.05),表明模型拟合可靠、实验误差可控。模型的决定系数R²为0.995 9,校正决定系数R为0.990 6,变异系数为0.30%,表明模型实测值与预测值拟合度极高,可用于预测综合评分。因素A、交互项AC对综合评分影响显著(P<0.05)。各因素交互作用的响应面和等高线图见图4。

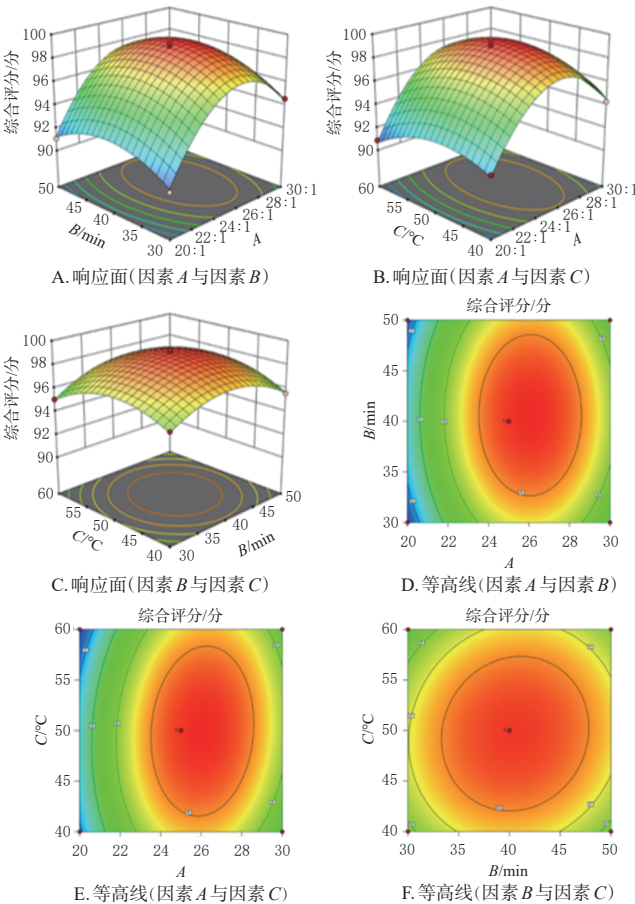


图4 各因素交互作用的响应面和等高线图

2.4.3 提取工艺的确定及验证

通过Design-Expert 13.0软件预测,得翻白草中黄酮类成分的最优提取工艺为液料比26.060:1、超声时间

40.601 min、超声温度 49.985 °C,预测综合评分为 99.029 分。结合实验室实际操作与仪器精度,得最优提取工艺为液料比 25:1、超声时间 40 min、超声温度 50 °C。为验证该工艺的稳定性与可靠性,本研究按照优化后的工艺参数及最佳 DESs 平行制备 3 批供试品溶液,按“2.1.9”项下方法测定 3 种黄酮类成分的含量,按“2.2.3”项下方法计算综合评分实测值。结果显示,3 批样品的综合评分分别为 98.67、99.68、99.48 分,平均为 99.28 分,RSD 为 0.54%($n=3$),表明所得提取工艺稳定、可行。

3 讨论

目前,已有研究将 DESs 用于动植物中生物活性化合物的提取^[17-18]。黄酮类成分是翻白草的主要药理活性成分之一,故本研究以 DESs 为溶剂,优化翻白草中 3 种黄酮类成分的提取工艺,其优势如下:DESs 具有独特的氢键网络,而槲皮苷、山柰酚含有多个酚羟基,芦丁糖基上含有邻二醇结构,这些基团均能与 HBD(如乳酸)和 HBA(如氯化胆碱)形成强烈的分子间氢键作用,从而提高目标成分在溶剂中的溶解度^[17]。不同体系、摩尔比以及含水量均会影响 DESs 对黄酮类成分的提取效率^[18]。DESs 筛选结果显示,DES5 提取黄酮类成分的综合评分最高;当氯化胆碱-乳酸的摩尔比由 1:1 降至 1:4 时,综合评分持续上升,但降至 1:5 后综合评分下降,这可能是由于按不同摩尔比制备的 DESs 所形成的氢键数目存在差异,影响了溶剂与目标成分之间的相互作用^[19]。值得注意的是,当 HBA 与 HBD 的摩尔比为 1:2 和 1:3 时,无法获得透明、稳定、均一的 DESs;当含水量超过 40% 时,综合评分下降,这可能是由于过多的水会破坏 DESs 中原有的氢键网络,从而降低对黄酮类成分的提取能力^[20]。

单因素实验结果显示,当液料比超过 25:1 时,综合评分降低,可能是因为溶剂体积过大增加了超声波在体系中的能量消耗,使得超声空化效应减弱、传质效率降低^[18]。当超声时间从 40 min 延长至 50 min 时,综合评分下降,可能是因为提取时间过长导致翻白草中黄酮类成分发生分解^[17]。当超声温度从 50 °C 升至 60 °C 后,综合评分下降,可能是因为温度过高破坏了 DESs 与黄酮类成分之间的氢键作用,降低了溶剂的提取能力^[18]。本研究通过单因素实验结合 Box-Behnken 响应面法优化得到翻白草中黄酮类成分的最优提取工艺为液料比 25:1、超声时间 40 min、超声温度 50 °C。验证结果显示,该优化工艺所得 3 批样品的平均综合评分为 99.28 分,RSD 为 0.54%($n=3$),与理论预测值相近,表明该提取工艺稳定、可行。

综上所述,本研究基于 DESs 所得翻白草中黄酮类成分的最优提取工艺稳定、可行。

利益冲突 本文所有作者声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 2025 年版. 北京:中国医药科技出版社,2025:412.
- [2] 李英红,张建博,滕曼,等. 翻白草有效成分及其药理作用研究进展[J]. 实用中医药杂志,2024,40(2):387-390.
- [3] Yang Y, Deng W, Wu Y, et al. Effects of *Potentilla discolor*

- Bunge extracts on oxidative stress and glycolipid metabolism in animal models of diabetes: a systematic review and meta-analysis [J]. *Front Pharmacol*, 2023, 14: 1218757.
- [4] 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.
- [5] 叶方,彭雯婧,叶旭雯,等. 响应面法优化低共熔溶剂提取毛连菜中有机酸的提取工艺[J]. 医药导报,2025,44(6):934-941.
- [6] 贺方良,程显隆,李明华,等. 权重赋值法在多指标综合评价中的研究进展及其在中药质量评价中的应用展望[J]. 中国现代中药,2024,26(1):224-232.
- [7] 代欣玥,訾明杰,孙明月,等. 符合中医药特色的综合疗效评价体系构建思路及方法[J]. 中国新药杂志,2024,33(2):105-109.
- [8] Xu M L, Ran L, Chen N, et al. Polarity-dependent extraction of flavonoids from *Citrus peel* waste using a tailor-made deep eutectic solvent[J]. *Food Chem*, 2019, 297: 124970.
- [9] 周志红,胡勤,肖明明. 田基黄总黄酮提取工艺优化、降血糖活性评价及成分分析[J]. 中国药房,2024,35(16): 1972-1978.
- [10] 雷永伟,刘欣,安艳霞,等. 低共熔溶剂提取荞麦壳黄酮的工艺优化[J]. 食品研究与开发,2023,44(13):160-166.
- [11] Alam M A, Muhammad G, Khan M N, et al. Choline chloride-based deep eutectic solvents as green extractants for the isolation of phenolic compounds from biomass[J]. *J Clean Prod*, 2021, 309: 127445.
- [12] 赵若含,单国顺,赵启苗,等. 基于 AHP-CRITIC 复合加权法结合 Box-Behnken 设计-响应面法优选麸炒白术的炮制工艺[J]. 中草药,2025,56(23):8511-8523.
- [13] 李灵玉. 东北茶藨子叶中主要黄酮类成分的提取、富集及其生物活性研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2018:23-25.
- [14] Zainal-Abidin M H, Hayyan M, Hayyan A, et al. New horizons in the extraction of bioactive compounds using deep eutectic solvents: a review [J]. *Anal Chim Acta*, 2017, 979:1-23.
- [15] 黄钰芳,陈亚明,曹瑞,等. 层次分析-指标相关性赋权系数法赋权的响应面法优化黄芩提取工艺及其抗炎活性研究[J]. 中国新药杂志,2023,32(13):1377-1384.
- [16] 高艳果,朱海涛,黄良永,等. “红黄白”凝胶提取工艺优选与含量测定方法的建立[J]. 医药导报,2025,44(8): 1322-1329.
- [17] 沈豪玲,郭晨思,高翔宇,等. 低共熔溶剂提取槲树叶中黄酮类物质的研究[J]. 现代化工,2021,41(12):160-164.
- [18] 王雪芹,陈娜娜,陈书彦,等. 低共熔溶剂提取绞股蓝黄酮类成分的工艺优选[J]. 医药导报,2026,45(5): 862-869.
- [19] 王坤,陈慧芳,杨莹,等. HPLC 与紫外-可见分光光度法对翻白草中黄酮类成分含量测定[J]. 滨州医学院学报,2024,47(5):380-384.
- [20] 孔晓妮,许一平,沈伟,等. 翻白草药材的 HPLC 指纹图谱及真伪鉴别研究[J]. 中国药房,2018,29(2):172-175.

(收稿日期:2026-03-18 修回日期:2026-08-12)

(本文责编:陈宏)