

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250228007

引用格式: 尚琪, 宋玉, 刘宇, 等. 响应面法优化超声提取蒺藜原花青素工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 307-313.

SHANG Q, SONG Y, LIU Y, *et al.* Optimization of ultrasonic extraction process of proanthocyanidins from *Polygonum aviculare* by response surface method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 307-313. (in Chinese with English abstract).

响应面法优化超声提取蒺藜原花青素工艺

尚琪^{1*}, 宋玉², 刘宇¹, 王建平², 代明俊²

(1. 渭南市检验检测研究院, 渭南 714000, 2. 贵州万胜药业有限责任公司, 遵义 563000)

摘要: 目的 通过利用响应面法优化超声辅助提取食药植物蒺藜中原花青素的工艺, 获取最佳工艺条件。

方法 通过单因素试验考察影响提取量的主要因素, 在单因素试验结果的基础上, 用 Box-Behnken 设计及响应面分析法, 对蒺藜中原花青素提取量的影响单因素乙醇体积分数、超声时间、料液比进行优化, 获取最佳提取工艺条件。**结果** 蒺藜原花青素超声辅助提取最佳工艺条件优化结果分别为: 超声时间 34 min、乙醇体积分数 65%、料液比 1:46 (g:mL), 在此工艺条件下, 原花青素的最终提取量达到 2.18%, 与模型验证值 2.12% 相符合。**结论** 本研究表明响应面法优化得出的工艺条件参数是有效可行的, 成功地应用响应面法优化了超声辅助提取蒺藜中原花青素的提取参数, 为蒺藜原花青素的后期推广应用提供研究基础。

关键词: 响应面法; 超声提取; 蒺藜; 原花青素

Optimization of ultrasonic extraction process of proanthocyanidins from *Polygonum aviculare* by response surface method

SHANG Qi^{1*}, SONG Yu², LIU Yu¹, WANG Jian-Ping², DAI Ming-Jun²

(1. Weinan Inspection and Testing Research Institute, Weinan 714000, China,
2. Guizhou Wansheng Pharmaceutical Co., Ltd., Zunyi 563000, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the ultrasonic-assisted extraction process of proanthocyanidins from *Polygonum aviculare* by response surface method, to obtain the best extraction conditions. **Methods** The main factors affecting the extraction amount were investigated through single-factor experiments. Based on the results of the single-factor experiments, the Box-Behnken design and response surface methodology were used to optimize the single factors, including the volume fraction of ethanol, ultrasonic time, and solid-liquid ratio, which had an impact on the extraction amount of proanthocyanidins from *Polygonum aviculare*. The optimal extraction process conditions were obtained. **Results** The optimized results of the optimal process conditions for ultrasonic-assisted extraction of proanthocyanidins from *Polygonum aviculare* were as follows: The ultrasonic time was 34 min, the volume fraction of ethanol was 65%, and the solid-liquid ratio was 1:46 (g:mL). Under these process conditions, the final extraction amount of proanthocyanidins reached 2.18%, which was consistent with the model validation value of 2.12%.

收稿日期: 2025-02-28

第一作者/*通信作者: 尚琪(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品及相关产品的检验检测, 药食同源植物天然产物的提取与分离及产品研发。E-mail: 1320149521@qq.com

Conclusion This study shows that the process condition parameters optimized by the response surface methodology are effective and feasible. The response surface methodology is successfully applied to optimize the extraction parameters of ultrasonic-assisted extraction of proanthocyanidins from *Polygonum aviculare*, providing a research basis for the later promotion and application of proanthocyanidins from *Polygonum aviculare*.

KEY WORDS: response surface method; ultrasonic extraction; *Polygonum aviculare*; proanthocyanidins

0 引言

蒺藜(*Polygonum aviculare*)为蓼科(Polygonaceae)蓼属一年生或多年生草本植物,又名地蒺藜、蒺藜竹、道生草等,山坡、田野、路旁等均可生处,国内均有分布^[1]。蒺藜为药食两用植物,全草可以药用,具有利尿,杀虫、止痒功效,主治热淋涩痛、小便短赤、湿疹、阴痒等病^[2-5]。蒺藜含有多种化学成分,主要含有阿魏酸、没食子酸、儿茶素等黄酮类化合物,同时含有丰富的水溶性多糖和游离氨基酸^[6-8];现代药理研究也证实其利尿、降压、保肝、抗氧化、抗肥胖等的生理活性^[8-11]。

原花青素是聚多酚类物质,以不同数量的表儿茶素、没食子酸或儿茶素以 C4-C6(或 C4-C8)键缩合而成,广泛存在于各种植物的不同部位中^[12-13]。不少研究证明原花青素具有抗氧化、抗高血糖、保护心血管和抗辐射的功效^[14],主要应用于食品、特殊食品和化妆品领域^[15-17]。

目前对于蒺藜的研究,主要集中在化学成分分析及药理活性的研究^[11,18-20],也有报道研究了蒺藜中总黄酮提取工艺的研究^[21],而其中原花青素的提取工艺的研究报道较少。超声波辅助提取技术是一项提取天然产物应用较广且环保的技术,具有提率高、时间短、成本低、条件温和且保证产物质量高等优点^[22-24]。基于此,本研究采用超声提取技术,响应面分析法优化提取蒺藜中的原花青素工艺参数,以期蒺藜中原花青素的开发利用提供后续科研的依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料

蒺藜: 2024年8月采自定西市渭源县会川镇,为一年生或多年生的蓼科(Polygonaceae)蓼属(*Polygonum*)植物蒺藜(*Polygonum aviculare*)的地上部分。原料淋洗干净,自然阴干,粉碎,过60目筛,保存备用。

1.1.2 试剂

(+)-儿茶素(纯度 $\geq 98\%$,上海金穗生物科技有限公司); 甲醇、丙酮、无水乙醇、浓盐酸、香草醛(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

DL-820E 智能超声波清洗器(上海之信仪器有限公司);

SHZ-2000 型双配套循环水式多用真空泵(河南省巩义市英峪予华仪器厂); T9CS 双光束紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); HH-4 数显恒温水浴锅(国华电器有限公司); Sarstorius BT125D 电子天平(精度 0.1 mg, 德国赛多利斯科学仪器有限公司)。

1.3 方法

1.3.1 标准曲线的制作及原花青素含量测定

采用香草醛-盐酸法^[25]并加以修改。标准曲线的制备: 分别吸取质量浓度 0.2 mg/mL 的儿茶素 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mL, 无水乙醇补至 0.5 mL。加入 3 mL 浓度为 4% 香草醛和浓盐酸 1.5 mL, 加塞混匀, 室温下避光反应 15 min, 于 500 nm 处测其吸光值, 以儿茶素质量为横坐标(X, mg), 吸光度为纵坐标(Y), 制作标准曲线。

原花青素含量的测定: 准确吸取提取液 0.2 mL, 提取剂补至 0.5 mL。根据标准曲线的制作方法, 测定吸光度 A, 按公式(1)计算原花青素的提取量:

$$\text{原花青素的提取量}/\% = \frac{V \times C}{1000 \times W} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V 为试样定容体积, mL; C 为试样中原花青素质量浓度, mg/mL; W 为试样质量, g; 1000 为单位换算系数。

1.3.2 蒺藜中原花青素的提取溶剂的选择

采用体积分数乙醇(70%)、甲醇、丙酮溶剂法提取原花青素, 比对提取剂对蒺藜原花青素的提取效果。

1.3.3 单因素试验

(1) 超声时间对原花青素提取效果的影响

称取蒺藜粉末 1 g, 分别至 5 个锥形瓶中。按料液比 1:20 (g:mL) 加入体积分数为 70% 乙醇, 40 °C 下, 超声频率 560 W 的条件下, 超声 10、20、30、40、50 min, 冷却后减压过滤, 收集滤液定容至 50 mL, 根据 1.3.1 节方法测定提取液中的原花青素的提取量, 比对超声时间对提取效果的影响。

(2) 乙醇体积分数对原花青素提取效果的影响

称取蒺藜粉末 1 g, 分别至 5 个锥形瓶中, 40 °C 下, 超声频率 560 W 的条件下, 按料液比 1:40 (g:mL) 分别加入 40%、50%、60%、70%、80% 乙醇(体积分数), 超声 30 min, 冷却后减压过滤, 收集滤液定容至 50 mL, 根据 1.3.1 节方法测定提取液中的原花青素的提取量, 比较乙醇体积分数对提取效果的影响。

(3) 超声温度对原花青素提取效果的影响

称取蒺藜粉末 1 g, 分别至 5 个锥形瓶中。按料液比

1:20 (g:mL)加入 60%的乙醇, 在温度 30、40、50、60、70 °C 下 560 W 超声频率提取 30 min, 冷却后减压过滤, 收集滤液定容至 50 mL, 根据 1.3.1 节介绍的方法测定提取液中的原花青素的提取量, 比较超声温度对提取效果的影响。

(4)料液比对原花青素提取效果的影响

称取蒺藜粉末 1 g, 分别至 5 个锥形瓶中。按料液比 1:10、1:20、1:30、1:40、1:50 (g:mL)加入 60%的乙醇, 在 40 °C下、超声频率 380 W、超声提取 30 min, 冷却后减压过滤, 除 1:50 (g:mL)的滤液需要减压浓缩后定容, 其他滤液直接定容至 50 mL, 根据 1.3.1 节介绍的方法测定提取液中的原花青素的提取量, 比较料液比对提取效果的影响。

(5)超声功率对原花青素提取效果的影响

称取蒺藜粉末 1 g, 分别至 5 个锥形瓶中。按料液比为 1:40 (g:mL)加入 60%乙醇, 分别在超声功率 380、440、500、560、620 W, 温度 40 °C的条件下, 超声提取 30 min, 冷却后减压过滤, 收集滤液定容至 50 mL, 根据 1.3.1 节介绍的方法测定提取液中的原花青素的提取量, 比较超声功率对提取效果的影响。

1.3.4 响应面试验设计

根据单因素试验结果, 依据 Box-Behnken 试验设计原理, 选(超声时间、乙醇体积分数、料液比)3 个影响较大的因素进行响应面设计, 优化蒺藜原花青素提取工艺。设计方案见表 1。

表 1 响应面分析因子和水平表

Table 1 Factor and level tables of response surface analysis

	因素		
	X ₁ (超声时间) /min	X ₂ (乙醇体积 分数)/%	X ₃ (料液比) (g:mL)
-1	20	50	1:30
0	30	60	1:40
1	40	70	1:50

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 软件对试验数据进行处理, 多重比较采用 SPSS 16 软件进行 Duncan 新复极差法分析。响应面试验数据利用 Desingn Expert 8.0 软件进行多元回归和方差分析, 确定模型和因素的显著性。

2 结果与分析

2.1 不同溶剂对蒺藜原花青素提取效果比较

依据标准曲线进行线性回归, 得线性回归方程 $Y=5.1643X+0.008$, $r^2=0.9995$, 按回归方程计算各提取剂对原花青素提取效果的影响, 结果如图 1 所示。从图 1 可以看出, 提取原花青素的效果为乙醇>甲醇>丙酮。多重比较显示, 体积分数 70%乙醇与甲醇、丙酮所提取的原花青素

相比较差异显著($P<0.05$); 因为原花青素属于多酚类化合物, 含有大量的羟基, 具有一定的极性^[25], 易溶于乙醇和甲醇中, 乙醇毒性小, 提取效率高。因此, 选乙醇作为提取溶剂。

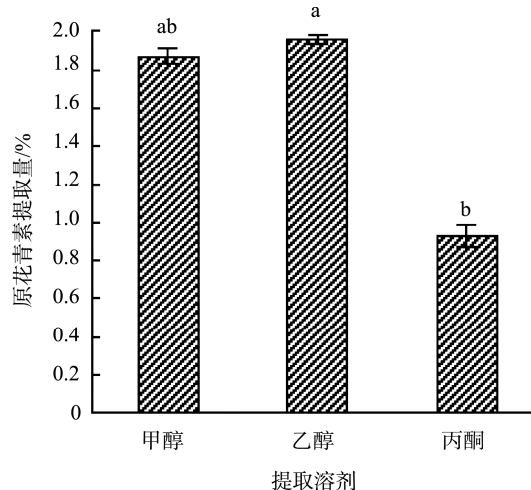


图 1 不同溶剂对原花青素提取效果的影响

Fig.1 Effects of different extraction agents on the extraction effects of proanthocyanidins

2.2 单因素试验结果

2.2.1 超声时间对原花青素提取效果的影响分析

由图 2a 可知, 原花青素提取量在 10~30 min 中呈逐渐上升趋势, 数据显示, 提取时间对原花青素提取量的影响相比较差异显著($P<0.05$); 当提取时间在 30 min 以上时, 随时间加长提取量反呈下降趋势。由于超声提取时间过长, 导致原花青素部分酚结构被破坏^[26]; 当提取时间过短时, 原花青素未能从蒺藜细胞中溶出。因此时间过长过短造成原花青素的提取量降低。最佳提取时间确定为 30 min。

2.2.2 乙醇体积分数对原花青素提取效果的影响分析

从图 2b 可知, 原花青素提取量在乙醇体积分数 40%~60%之间逐渐增加, 超过 60%时, 提取量呈缓慢下降趋势, 分析数据, 乙醇体积分数对原花青素提取量的影响相比较差异显著($P<0.05$)。可能是随着乙醇体积分数增大, 溶出物太杂多, 与成分较为复杂有关^[27], 乙醇浓度过大或过小会使提取量降低, 因此确定提取的适宜乙醇体积分数为 60%。

2.2.3 超声温度对原花青素提取效果的影响分析

从图 2c 可以看出, 随着超声温度的增加, 提取量也在逐渐升高, 但变化比较平缓, 温度 70 °C 时与 30 °C 和 40 °C 相比较分别增加了 0.25% 和 0.19%, 分析原因可能是, 70 °C 温度范围内, 温度高分子运动加快, 提取量增加。超声与加热联合处理, 可以引起细胞局部微裂缝的形成, 导致细胞原花青素释放, 使其提取量增加^[28], 但超声温度过高会使更多的杂质析出, 造成纯化工艺复杂。因此, 从节能考虑, 在响应面优化中固定温度为 40 °C。

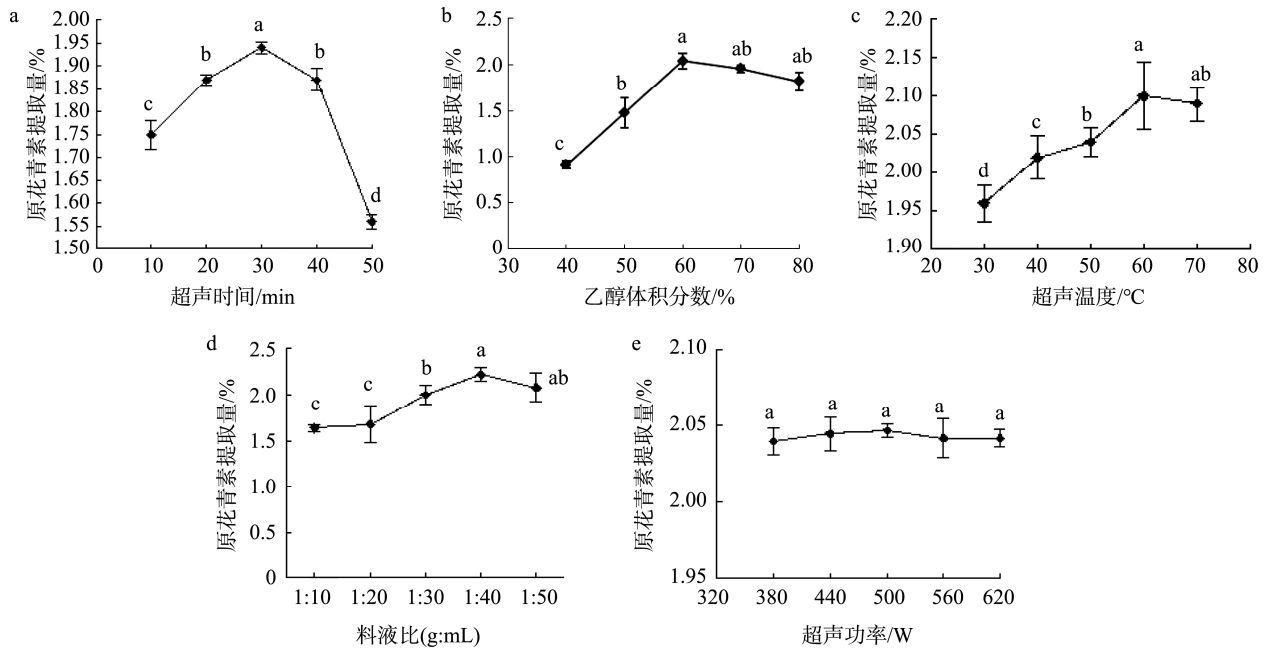


图2 不同因素对蒺藜原花青素提取效的影响

Fig.2 Effects of different factors on the extraction of proanthocyanidins from *Polygonum aviculare*

2.2.4 料液比对原花青素提取效果的影响分析

图2d在提取料液比1:10~1:40 (g:mL)之间原花青素提取量逐渐增加,当料液比超过1:40 (g:mL)时,随料液比增加提取量缓慢下降。当达到1:40 (g:mL)时有效成分已基本提取完毕,再增加料液比会使更多的杂质析出,导致原花青素提取量降低,分析数据,料液比对原花青素提取量的影响相比较差异显著($P<0.05$)。因此料液比过大或过小都会使提取量降低。故确定最佳提取料液比为1:40 (g:mL)。

2.2.5 超声功率对原花青素提取效果的影响分析

从图2e可以看出,随着超声功率的逐渐增加,提取量逐渐增大,在功率500 W增加较大,相对于380 W原花青素增加了0.034%。随后又逐渐下降,但变化幅度很小,分析数据,超声功率对原花青素提取量的影响相比较差异不显著($P>0.05$)。原因是超声波的破碎作用不仅取决于超声波的功率,还取决于被破碎体系的性质,超声波对蒺藜细胞的破碎程度在380 W时原花青素已基本溶出,继续加大功率不再对原花青素提取产生影响。节能考虑,超声功率以380 W为宜。由于随功率的变化原花青素变化幅度不明显,在响应面优化中固定功率为380 W。

2.3 响应曲面优化试验结果

响应变量为超声时间(X_1)、乙醇体积分数(X_2)和料液比(X_3),原花青素提取量(Y)为响应值,采用 Design-Expert 8.0软件的 Box-Behnken 设计,进行试验,试验结果为表2。进行多项式回归拟合表2数据,建立响应面法优化超声提取蒺藜原花青素的回归方程:

$$Y=2.32450+0.019564X_1-0.069392X_2-0.015895X_3-0.043164X_1X_2-0.026626X_1X_3+0.057675X_2X_3-0.269478X_1^2-0.172309X_2^2-0.187976X_3^2。$$

表2 响应面分析结果

Table 2 Results of response surface analysis

试验号	因素			Y(原花青素提取量)/%
	X_1 (超声时间)/min	X_2 (乙醇体积分数)/%	X_3 (料液比)(g:mL)	
1	30	60	40	2.34
2	30	50	30	2.06
3	30	50	50	2.02
4	30	60	40	2.35
5	30	60	40	2.34
6	40	60	30	2.02
7	40	50	40	1.97
8	30	70	50	1.99
9	20	60	50	1.77
10	30	60	40	2.36
11	20	70	40	1.88
12	30	60	40	2.23
13	40	60	50	1.83
14	40	70	40	1.75
15	30	70	30	1.80
16	20	60	30	1.85
17	20	50	40	1.93

对表2结果进行方差分析,结果见表3。二次响应面回归模型 F 为11.97,并且 $P<0.01$,说明该方程模型极显著,可预测不同超声条件下原花青素的提取量。方程式中,一次项 X_2 的 $P<0.05$,与响应值回归关系较为显著,说明乙醇体积分数对原花青素提取量影响显著。二次项 X_1^2 、 X_2^2 、

表 3 回归模型方差分析
Table 3 Variance analysis of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.710000	9	0.079000	11.97	0.0018**
X_1	0.003062	1	0.003062	0.46	0.5177
X_2	0.039000	1	0.039000	5.84	0.0464*
X_3	0.002021	1	0.002021	0.31	0.5972
X_1X_2	0.007453	1	0.007453	1.13	0.3232
X_1X_3	0.002836	1	0.002836	0.43	0.5331
X_2X_3	0.013000	1	0.013000	2.02	0.1986
X_1^2	0.310000	1	0.310000	46.33	0.0003**
X_2^2	0.130000	1	0.130000	18.94	0.0033**
X_3^2	0.150000	1	0.150000	22.54	0.0021**
残差	0.046000	7	0.006600		
失拟项	0.035000	3	0.012000	4.29	0.0967
纯误差	0.011000	4	0.002739		
总回归	0.760000	16			
R^2	$R^2=0.9389, R^2_{Adj}=0.8605$				

注: **代表差异极显著($P<0.01$); *代表差异显著($P<0.05$)。

X_3^2 的 $P<0.01$, 与响应值回归关系极显著, 说明对原花青素提取量影响极显著。其交互项 X_1X_2 、 X_2X_3 、 X_1X_3 均不显著。该模型失拟项 P 为 0.0967 大于 0.05, 模型失拟不显著, 说

明该模型有效, 预测决定系数 $R^2=0.9389$, 调整系数 $R^2_{Adj}=0.8605$, 试验结果有 86.05% 受试验因素的影响。因此, 试验结果真实可靠, 运用该模型可以较好对原花青素的提取量进行分析和预测。从响应面回归方程一次项 F 检验值大小可以得出, 影响蒺藜原花青素提取量大小的因素依次为乙醇体积分数(X_2)>超声时间(X_1)>料液比(X_3)。

2.4 响应曲面分析与优化

响应面可以直接反映出各因子对响应值的影响大小, 由等高线图可以直接看出最优条件下各因子的取值。从图 3a~d 可以看出, 在超声时间轴向上较乙醇体积分数、料液比轴向上等高线较密集, 说明对响应值的影响效果比较大, 影响效果依次为乙醇体积分数>超声时间>料液比^[29], 但是从等高线的形状可以看出, 超声时间与乙醇体积分数和料液比的等高线为圆形, 表示两因素交互作用不显著, 这和方差分析的结果相一致。由图 3e~f 乙醇体积分数和料液比的响应面及等高线图可以看出, 乙醇体积分数对原花青素提取量的影响最明显, 表现为曲线相对较陡, 等高线在乙醇体积分数轴向上密度较大, 且为椭圆形, 因此说明两交互作用较为明显。

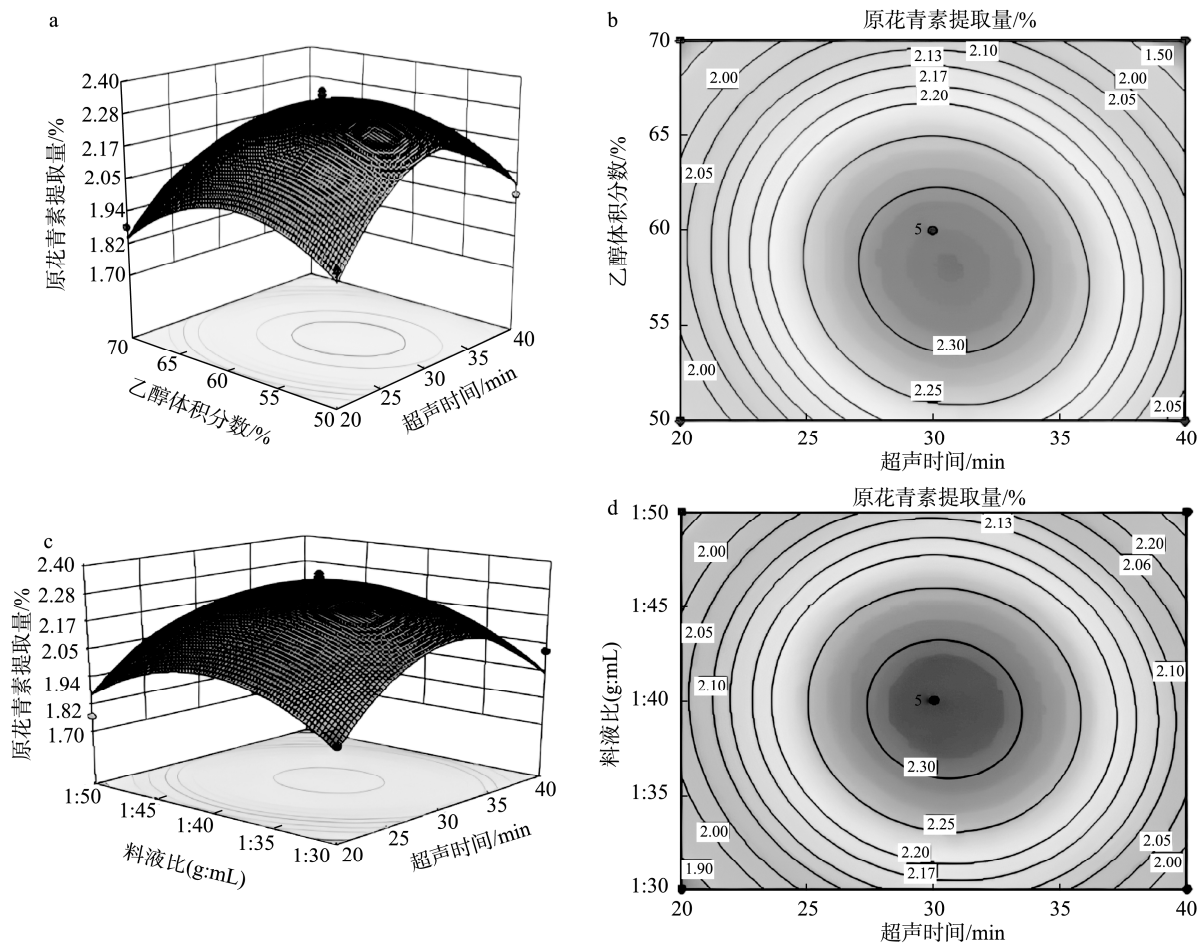


图 3 各因素交互作用对原花青素提取量的影响
Fig.3 Effects of extraction conditions on the yield of proanthocyanidins

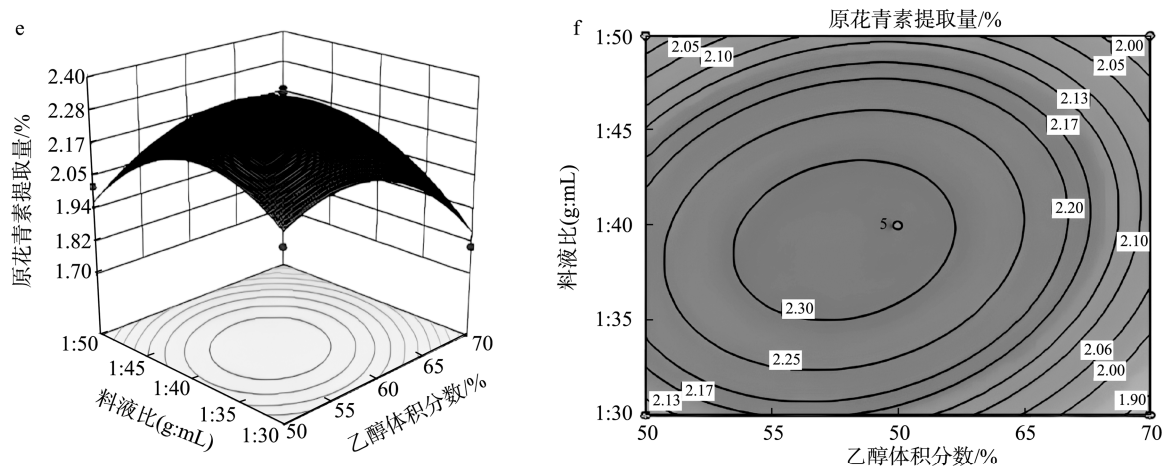


图 3(续) 各因素交互作用对原花青素提取量的影响
Fig.3 Effects of extraction conditions on the yield of proanthocyanidins

2.5 回归模型的验证试验

利用 Design-Expert 8.0 软件对工艺参数优化, 得出从蒺藜中提取物原花青素的工艺条件为: 乙醇体积分数 65.35%, 液料比 1:46.12 (g:mL), 超声时间 34.4 min, 理论值可达 2.12%。为检验该方法的可靠性, 考虑实际操作的便利, 将最佳工艺参数修正为: 乙醇体积分数 65%, 液料比 1:46 (g:mL), 超声时间 34 min, 经 5 次平行试验, 得实际平均提取量为 2.18%, 变异系数是 2.22%, 试验结果与模型预测值 2.12% 符合良好。结果表明, 该模型较好地反映出蒺藜中原花青素提取的条件, 证明了响应面法优化提取条件参数的可行性。

2.6 优化工艺与乙醇回流浸提法比对

采用传统乙醇回流提取法, 按液料比 1:40 (g:mL), 乙醇体积分数 65%, 温度 80 °C, 浸提 3 h 条件下, 提取量为 1.91%, 而超声波辅助提取优化工艺的提取量达 2.18%, 与传统乙醇浸提法比对, 提取量提高了 14%。提取时间缩短了 2.5 h, 提取温度降低了 40 °C。提取量显著提高, 有效缩短了提取时间, 提取过程高效节能。

3 结论

本研究以蒺藜为研究材料, 比较几种溶剂对原花青素提取的效果, 结果表明, 乙醇提取效果较好, 因为原花青素易溶于水, 醇类等有机溶剂, 乙醇提取毒性小, 可以避免多糖、蛋白质和果胶等成分对目标产物提取的影响^[30]。因此以乙醇为提取剂, 在单因素试验的基础上, 通过 Box-Behnken 试验设计及响应面分析, 对超声提取蒺藜原花青素的工艺进行了优化, 建立了二次多项式回归方程数学模型, 确定了目标函数与工艺条件之间的关系。各因素对提取工艺影响的主次顺序为乙醇体积分数、超声时间、

料液比。利用模型得最优工艺参数: 乙醇体积分数 65%、超声时间 34 min、液料比 1:46 (g:mL)。在此条件下, 蒺藜原花青素的提取量可达 2.18%, 与理论预测值相符, 说明本研究的提取是有效、可行的, 后续将对其纯化、鉴定, 并跟踪检测其活性, 为蒺藜活性成分的开发利用奠定基础。

参考文献

- [1] 中华人民共和国卫生部药典委员会. 中国药典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
Pharmacopoeia Commission of the Ministry of Health of the People's Republic of China. Pharmacopoeia of the people's republic of China [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the people's republic of China [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2015.
- [3] 南京中医药大学编著. 中药大辞典[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2014.
Nanjing University of Chinese Medicine. Dictionary of Chinese materia [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2014.
- [4] 张邦升. 利尿通淋、止痒杀虫的蒺藜[J]. 家庭医学, 2024(7): 54.
ZHANG BS. *Polygonum aviculare* for inducing diuresis to relieve stranguria, stopping itching and killing parasites [J]. Family Medicine, 2024(7): 54.
- [5] 梁蒙蒙, 刘子尧, 任瑞民. 基于网络药理学联合分子对接探讨蒺藜治疗尿路感染的机制[J]. 山西中医药大学学报, 2023, 24(6): 676-682.
LIANG MM, LIU ZY, REN RM. Exploration of the mechanism of *Polygonum aviculare* in the treatment of urinary tract infection based on network pharmacology combined with molecular docking [J]. Journal of Shanxi University of Chinese Medicine, 2023, 24(6): 676-682.
- [6] 王永超, 韦琨, 林军. 蓼属植物化学成分及药用活性研究新进展[J]. 广东化工, 2012, 9: 16-17, 19.
WANG YC, WEI K, LIN J. Recent advances of chemical constituents and pharmacological activities of genus *Polygonum* [J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 9: 16-17, 19.
- [7] SUNG YY, YOON T, YANG WK, et al. The antiobesity effect of

- Polygonum aviculare* L. ethanol extract in high-fat diet-Induced obese mice [J]. Evidence-based Complementary and Alternative Medicine, 2013, 2013(1): 626397–626407.
- [8] AGUNG N, EON JK, JAE SC, *et al.* Simultaneous quantification and peroxynitrite-scavenging activities of flavonoids in *Polygonum aviculare* L. herb [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2014, 89: 93–98.
- [9] 徐燕, 李曼曼, 刘增辉, 等. 蒺藜的化学成分研究及药理作用研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(5): 812–815.
- XU Y, LI MM, LIU ZH, *et al.* Research progress in chemical constituents and pharmacological activities of *Polygonum aviculare* L. [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2012, 39(5): 812–815.
- [10] 李影, 吴其妹, 李志荣, 等. 蒺藜 HPLC-ECD 指纹图谱建立与抗氧化活性评价[J]. 中成药, 2023, 45(11): 3644–3651.
- LI Y, WU QM, LI ZR, *et al.* Establishment of HPLC-ECD fingerprints and antioxidant activity evaluation for *Polygonum aviculare* [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2023, 45(11): 3644–3651.
- [11] 李潭, 李雅文, 赵昕蕊, 等. 原花青素对镉致小鼠肝肾损伤的保护作用[J]. 畜牧与兽医, 2025, 57(2): 46–53.
- LI T, LI YW, ZHAO XR, *et al.* Proanthocyanidins alleviates cadmium-induced damage to liver and kidney in mice [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 57(2): 46–53.
- [12] 韦琴, 乐薇, 吕凯波, 等. 板栗壳原花青素的提取及体外抑菌作用研究[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(4): 214–219.
- WEI Q, LE W, LV KB, *et al.* Study on extracting technology by orthogonal design and antibacterial activity of Procyanidins from chestnut shells [J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(4): 214–219.
- [13] 茹巧美, 任国平, 王艳. 酸化甘油-超声辅助提取杨梅花青素工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(13): 124–132.
- RU QM, REN GP, WANG Y. Optimization of acid glycerol-ultrasonic assisted extraction process for anthocyanins from *Myrica rubra* Sieb. & Zucc. and study on its antioxidant activity [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(13): 124–132.
- [14] 张小军, 夏春镗, 吴建铭, 等. 原花青素的资源研究[J]. 中药材, 2009, 32(7): 1154–1160.
- ZHANG XI, XIA CT, WU JM, *et al.* Resource research of Proanthocyanidins [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2009, 32(7): 1154–1160.
- [15] 王菲, 沈卉芳, 王瑶, 等. 葡萄籽原花青素泡腾片的制备工艺优化及品质分析[J]. 食品工业, 2024, 45(12): 48–53.
- WANG F, SHEN HF, WANG Y, *et al.* Optimization of preparation process and quality analysis of grape seed Proanthocyanidins effervescent tablets [J]. The Food Industry, 2024, 45(12): 48–53.
- [16] 郜飞燕. 葡萄籽原花青素的生物学功能及其在畜禽养殖中的应用研究进展[J]. 福建畜牧兽医, 2024, 46(5): 66–68.
- GAO FY. Research progress on biological function and application of grape seed Proanthocyanidins in livestock and poultry breeding [J]. Fujian Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2024, 46(5): 66–68.
- [17] 许丹虹, 薛玉清, 李文强, 等. 桑葚酸奶中花青素的稳定性研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(7): 221–227.
- XU DH, XUE YQ, LI WQ, *et al.* Analysis of the stability of anthocyanins in mulberry yogurt [J]. China Food Additives, 2023, 34(7): 221–227.
- [18] 冯海燕, 李向军, 胡瑞, 等. 超声法提取蒺藜总黄酮的正交试验研究[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(6): 611–614.
- FENG HY, LI XJ, HU R, *et al.* Orthogonal test in extraction of total Flavonoids from *Polygonum aviculare* by ultrasonic method [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(6): 611–614.
- [19] 陈瑞鑫, 梁淞婷, 戴忠华, 等. 蒺藜化学成分及药理活性研究进展[J]. 中成药, 2023, 45(6): 1929–1936.
- CHEN RX, LIANG ST, DAI ZH, *et al.* Research progress on chemical components and pharmacological activities of *Polygonum aviculare* [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2023, 45(6): 1929–1936.
- [20] CONG HJ, ZHANG SW, ZHANG CH, *et al.* A novel dimeric procyanidin glucoside from *Polygonum aviculare* [J]. Chinese Chemical Letters, 2012, 23(7): 820–822.
- [21] 许福泉, 冯媛媛, 顾丽蕴. 基于高效液相色谱法定量优化蒺藜黄酮提取工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(14): 36–40.
- XU FQ, FENG YY, GU LY. Optimization of extraction process for Flavonoids from *Polygonum aviculare* L. based on HPLC quantitation [J]. Food Science, 2012, 33(14): 36–40.
- [22] 邵知扬. 花生壳黄酮超声辅助提取工艺优化研究[J]. 食品安全导刊, 2025(6): 92–96.
- SHAO ZY. Optimization of ultrasonic assisted extraction process for flavonoids from peanut shells [J]. China Food Safety Magazine, 2025(6): 92–96.
- [23] PAN GY, YU GY, ZHU CZ, *et al.* Optimization of ultrasound-assisted extraction (UAE) of flavonoids compounds (PC) from hawthorn seed (HS) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19(3): 486–490.
- [24] ALI MS, MARYAM S. Ultrasound applications for the preservation, extraction, processing and quality control of food [J]. BioTechnology: An Indian Journal, 2016, 12(4): 162–174.
- [25] 赵永明, 李赫宇, 王磊. 功能性食品中功能性成分的生理作用机制与临床研究[J]. 中国食品工业, 2024(12): 171–173.
- ZHAO YM, LI HY, WANG L. Physiological action mechanism and clinical research of functional components in functional foods [J]. China Food Industry, 2024(12): 171–173.
- [26] 梅瀚, 曹金凤, 刘世巍, 等. 超声辅助提取葡萄籽中原花青素工艺及抗氧化活性研究[J]. 广东化工, 2023, 50(5): 38–41.
- MEI H, CAO JF, LIU SW, *et al.* Study on ultrasound-assisted extraction of Procyanidins from grape seed husks and antioxidant activity [J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(5): 38–41.
- [27] 陈月英, 王彦平, 孙瑞琳, 等. 葡萄皮渣原花青素微波辅助提取工艺的优化及其抗氧化活性研究[J]. 北方园艺, 2016(11): 123–126.
- CHEN YY, WANG YP, SUN RL, *et al.* Study on optimization of microwave-assisted extraction of Proanthocyanidins from grape residues and its antioxidant activity [J]. Northern Horticulture, 2016(11): 123–126.
- [28] ZHU ZZ, GUAN QY, GUO Y, *et al.* Green ultrasound-assisted extraction of Anthocyanin and Phenolic compounds from purple sweet potato using response surface methodology [J]. International agrophysics, 2016, 30(1): 113–122.
- [29] 崔长伟, 马彤彤, 束廷廷, 等. 葡萄籽中原花青素提取工艺优化[J]. 食品工业, 2023, 44(1): 100–105.
- CUI CW, MA TT, SHU TT, *et al.* Optimization of the extraction process of Proanthocyanidins from grape seeds [J]. The Food Industry, 2023, 44(1): 100–105.
- [30] 乔振杰, 李晓艳. 野生药用植物蒺藜总黄酮的提取工艺研究[J]. 德州学院学报, 2013, 29(6): 86–87, 94.
- QIAO ZJ, LI XY. The research on the exacting of total Flavonoid in wild medicinal plants of *Polygonum aviculare* [J]. Journal of Dezhou University, 2013, 29(6): 86–87, 94.

(责任编辑: 安香玉 于梦娇)