

基于响应面分析法优化超声辅助提取女贞子总黄酮工艺

尕让索安,杨越鹏,黄淑解,李新莹

(西南民族大学化学与环境学院,化学基础国家民委重点实验室,
青藏高原污染控制化学与环境功能材料实验室,四川成都 610041)

摘要:为研究采用超声波辅助法提取女贞子总黄酮提取工艺中乙醇浓度、超声时间、料液比、提取次数等因素对提取效率的影响。基于单因素实验结果,研究采用 Box-Behnken 中心组合设计原理,构建四因素三水平试验方案,通过响应面分析法对超声波辅助提取女贞子总黄酮的工艺参数进行了优化。响应面分析结果表明,提取的最优条件为乙醇浓度65%、料液比 1:40 (g/mL)、超声时间 45 min、提取次数 3 次。经模型验证,在此条件下总黄酮提取量的预测值为 36.15 mg/g,与实测值 36.12 mg/g 吻合度较高,表明优化的模型可靠性良好,可用于女贞子中总黄酮提取过程的预测与分析。

关键词:响应面法;女贞子;总黄酮;工艺优化;超声辅助提取

中图分类号:S284;TS201

文献标志码:A

文章编号:2095-4271(2025)04-0404-09

Optimization of ultrasound-assisted extraction of flavonoids from *Ligustri Lucidi Fructus* using response surface methodology

Garangsuo'an, YANG Yuepeng, HUANG Shujie, LI Xinying

(School of Chemistry and Environment, Key Laboratory of General Chemistry of the National Ethnic Affairs Commission,
Key Laboratory of Pollution Control Chemistry and Environmental Functional Materials for Qinghai-Tibet
Plateau of the National Ethnic Affairs Commission, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: This study systematically investigated the influence of critical process parameters including ethanol concentration, extraction time, ratio of solid-to-liquid, and extraction numbers on the extraction yield of total flavonoids from *Ligustri Lucidi Fructus* using ultrasound-assisted extraction technology. Guided by single-factor experimental results, a four-factor, three-level response surface methodology experimental design was established based on the Box-Behnken central composite design principle. The process parameters were comprehensively optimized through response surface analysis. The optimized model revealed that the optimal extraction conditions included the ethanol concentration of 65% (v/v), ratio of solid-to-liquid 1:40 (g/mL), extraction time of 45 min, and 3 extraction numbers. Model validation under these conditions demonstrated a predicted total flavonoid yield of 36.15 mg/g, which showed close agreement with the experimental value of 36.12 mg/g. These results confirmed the reliability of the optimized model for predicting and analyzing the extraction process of total flavonoids from *Ligustri Lucidi Fructus*.

Keywords: response surface methodology; *Ligustri Lucidi Fructus*; flavonoids; process optimization; ultrasound-assisted extraction

收稿日期:2025-04-12

通信作者:李新莹(1984-),女,副教授,博士,研究方向:天然产物化学.E-mail:lxy@swun.edu.cn

基金项目:四川省自然科学基金项目(2023NSFSC1096)

女贞子 (*Ligustri Lucidi Fructus*) 作为传统补益中药,在《本草纲目》中记载具有“补中安五脏,养精神”之效,其滋肝益肾、明目及调控毛发黑色素合成等功效显著.现代药理学研究表明,女贞子富含黄酮类、三萜类、苯乙醇苷类及环烯醚萜类等多种活性组分^[1,2].女贞子中代表性活性成分的化学结构式参见图1,其中的黄酮类化合物具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤、降血脂

及保护心血管等生物活性^[3-7].黄酮作为女贞子中重要的活性成分,其含量的多少会影响药材质量和下游应用效能,且黄酮类物质的提取效率易受原料预处理、提取工艺以及参数条件等多种因素的制约.因此,开发经济高效的提取技术并优化其工艺参数,对提升黄酮得率、降低生产成本及保障产品质量都具有重要意义.

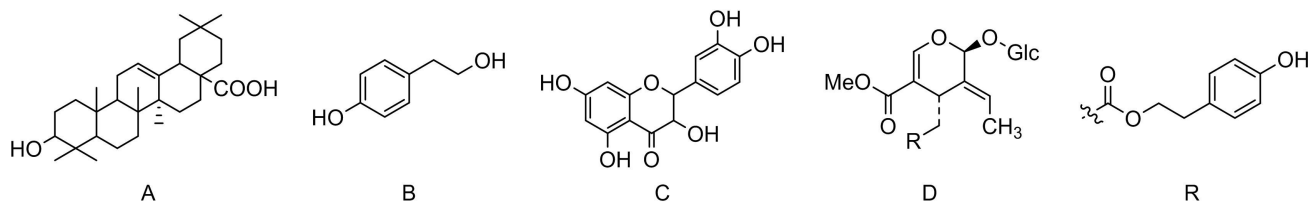


图1 女贞子中代表性活性成分,齐果墩酸(A)、酪醇(B)、槲皮素(C)、女贞苷(D)
Fig.1 Representative bioactive compounds in *Ligustri Lucidi Fructus*: Oleanolic acid (A), Tyrosol (B), Quercetin (C), and Ligustroside (D)

目前,女贞子黄酮类化合物的提取分离方法主要有溶剂浸提法、生物酶辅助法、微波场强化技术法和超声空化萃取法等^[8,9].溶剂浸提法操作简单,但提取时间通常需要12~48 h,耗时较长且溶剂消耗量大^[10].酶辅助提取法专一性较强,提取效率较溶剂浸提法高,但是需要严格控制温度和酸碱度,且极易受到外界条件的影响而失活^[11,12].微波辅助法可以利用分子极化和介电加热加速提取,但对物料的均匀性要求较高且存在局部过热的风险^[13,14].相比之下,超声辅助提取法通过空化效应产生的微射流和剪切力可快速破坏植物细胞壁,促进溶剂的渗透与目标成分的溶出,具有提取时间短、溶剂用量少及可低温提取等优势,适用于黄酮类物质的提取富集^[15,16].

尽管超声辅助提取技术具有一定的优势,但其对有效成分的提取效率仍受提取溶剂、提取次数、提取时间、溶剂浓度以及料液比等多因素交互作用影响.传统单因素优化法无法揭示变量间的协同效应,而响应面法(Response Surface Methodology, RSM)通过建立数学模型可以系统地分析多变量之间的耦合关系,精准预测最佳工艺参数条件.因此,本文拟采用超声波辅助法提取女贞子中的总黄酮,通过单因素实验确定关键参数边界条件,然后在此基础上运用 Box-Behnken 设计通过响应面法优化提取工艺参数,建立预测模型,得到最佳提取工艺条件,研究结果可为女贞

子总黄酮绿色提取工艺的研究与开发奠定理论基础.

1 实验部分

1.1 实验试剂与仪器

具体实验试剂与仪器见表1和表2.

表1 实验试剂

Table 1 Experimental reagents

试剂	纯度	生产厂家
女贞子	—	四川省内江市威远县
芦丁对照品	97%	阿拉丁试剂上海有限公司
乙醇	分析纯	成都金山化学试剂有限公司
氢氧化钠	分析纯	成都金山化学试剂有限公司
亚硝酸钠	分析纯	成都金山化学试剂有限公司
硝酸铝	分析纯	成都金山化学试剂有限公司

表2 实验仪器

Table 2 Experimental instruments

仪器	型号	生产厂家
旋转蒸发器	XD-52AA	上海贤德实验仪器有限公司
电子天平	HZK-JA510S	华志电子科技有限公司
循环水式真空泵	SHB-III	郑州长城科工贸有限公司
超声波清洗机	KS-180EI	宁波海曙科生超声设备有限公司
紫外-可见分光光度计	UV-6100PC-DS2	上海美普达仪器有限公司

1.2 实验方法

1.2.1 提取工艺路线

具体提取工艺路线见图 2.

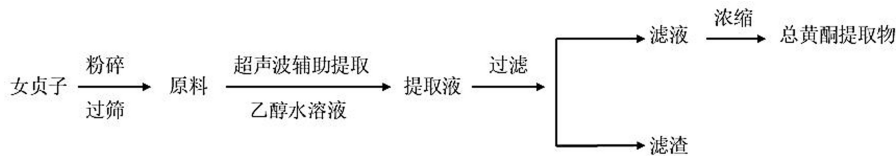


图 2 提取工艺路线

Fig.2 Schematic diagram of the extraction process

1.2.2 总黄酮标准曲线的绘制

以芦丁为代表性黄酮类化合物的提取,参照文献^[17]方法并适当修正.精密称定芦丁标准品(20.00±0.05 mg)于 50 mL 洁净的烧杯中,加入 30 mL 50%乙醇水溶液,经超声辅助溶解后,将溶液定量转移至 100 mL 容量瓶中,用同样浓度的溶剂洗涤烧杯三次,合并洗液后于室温条件下定容至刻度线,制得浓度为 0.2 mg/mL 的芦丁对照品储备液.

分别量取 0 mL、5.0 mL、10.0 mL、15.0 mL、20.0 mL、25.0 mL 的芦丁对照品储备液,转移至 50 mL 容量瓶中,分别根据对应浓度标记为 0 mg/mL、0.02 mg/mL、0.04 mg/mL、0.06 mg/mL、0.08 mg/mL、0.10 mg/mL.然后向上述标记浓度的各容量瓶中,依次加入 25 mL、20 mL、15 mL、10 mL、5 mL、0 mL 的 50% 乙醇水溶液,充分混合均匀.之后,向各容量瓶内依次准确加入 1.5 mL 10% Al(NO₃)₃,经振荡混匀后,室温静置 6 min.最后向各反应体系中定量注入 10 mL 1.0 mol/L 氢氧化钠溶液,使用 50% 乙醇水溶液准确定容至 50 mL 标线.避光条件下静置显色 20 min 后,以空白溶液为参比,于特征波长 510 nm 处测定吸光值.通过建立芦丁浓度(X)与吸光度值(Y)的线性回归方程,绘制总黄酮标准曲线.

1.2.3 总黄酮提取量的计算

准确称取一定质量的女贞子原料,加入一定浓度的乙醇水溶液,在一定料液比下,超声波辅助提取一段时间后,减压过滤,浓缩干燥后用 50% 乙醇水溶液溶解,稀释一定倍数测量吸光度值,根据公式(1)计算总黄酮提取量.

$$W = \frac{c \times D \times V}{m} \times 100\% . \quad (1)$$

式中:W 表示总黄酮提取量(mg/g),由紫外分光

光度法测定;c 为根据标准曲线拟合方程计算得出的黄酮质量浓度(mg/mL);V 为定容体积(mL);D 为提取液在比色前的稀释倍数;m 为女贞子原料的质量(g).

1.2.4 乙醇浓度变化对总黄酮提取量的影响

在固定提取时间 40 min、提取次数 3 次、料液比 1:40(g/mL) 的实验条件下按照 1.2.1 部分实验方法从粉碎过筛的女贞子原料中提取总黄酮.精密称定 1 g 女贞子样品置于具塞锥形瓶中,分别以 40%、50%、60%、70%、80% 梯度浓度的乙醇水溶液为提取溶剂,于 25 °C 下超声提取.合并各组提取溶液,浓缩干燥后用 50% 乙醇水溶液溶解,于 510 nm 波长处测定提取液中总黄酮含量,并根据公式(1)计算总黄酮提取量,系统考察乙醇浓度变化对女贞子总黄酮提取量的影响.

1.2.5 料液比变化对总黄酮提取量的影响

在固定乙醇浓度为 70%、提取时间为 40 min、提取次数为 3 次的实验条件下按照 1.2.1 部分实验方法从粉碎过筛的女贞子原料中提取总黄酮.精确称定 1 g 女贞子样品置于具塞锥形瓶中,分别按照原料和提取溶剂为 1:10(g/mL)、1:20(g/mL)、1:30(g/mL)、1:40(g/mL)、1:50(g/mL) 的料液比于 25 °C 下超声提取.合并各组提取溶液,浓缩干燥后用 50% 乙醇水溶液溶解,于 510 nm 波长处测定提取液中总黄酮含量,并根据公式(1)计算总黄酮提取量,分析料液比变化对女贞子总黄酮提取量的影响.

1.2.6 提取时间对总黄酮提取量的影响

在固定乙醇浓度为 70%、料液比为 1:40(g/mL)、提取次数为 3 次的实验条件下,按照 1.2.1 部分实验方法从粉碎过筛的女贞子原料中提取总黄酮.首先精确称定 1 g 女贞子样品置于具塞锥形瓶中,分别按照 10 min、20 min、30 min、40 min、50 min 的时间梯度于

25 °C 下超声提取.合并各组提取溶液,浓缩干燥后用 50%乙醇水溶液溶解,于 510 nm 波长处测定提取液中总黄酮含量,并依据公式(1)计算总黄酮提取量,以此评估提取时间变化对女贞子总黄酮提取量的影响.

1.2.7 提取次数对总黄酮提取量的影响

在固定乙醇浓度为 70%、料液比为 1:40 (g/mL)、提取时间为 40 min 的实验条件下按照图 2 实验方法从粉碎过筛的女贞子原料中提取总黄酮.精确称定 1 g 女贞子样品置于具塞锥形瓶中,分别按照提取次数为 1 次、2 次、3 次、4 次、5 次于 25 °C 下超声提取.合并

各次提取溶液,浓缩干燥后用 50%乙醇水溶液溶解,于 510 nm 波长处测定提取液中总黄酮含量,根据公式(1)计算总黄酮提取量,以此考察提取次数的改变对女贞子总黄酮提取量的影响.

1.2.8 响应面分析法优化工艺条件

基于单因素试验结果,研究采用响应面分析法对工艺参数进一步优化.以乙醇浓度、料液比、提取时间及提取次数作为独立变量,总黄酮提取量为响应值,依据 Box-Behnken 实验设计 (BBD) 原理设计了四因素三水平实验,其实验因素水平设计如表 3 所示.

表 3 BBD 实验设计因素水平表

Table 3 Factors and levels used in BBD design for flavonoids extraction

水平	因素			
	A 乙醇浓度/%	B 料液比 (g/mL)	C 提取时间/min	D 提取次数/次
-1	65	1:35	35	2
0	70	1:40	40	3
1	75	1:45	45	4

2 结果与分析

2.1 总黄酮标准曲线的绘制

采用紫外分光光度法绘制的总黄酮标准曲线如图 3 所示,经线性拟合获得回归方程 $Y = 6.2471X - 0.014$,其相关系数 $R^2 = 0.9998$.实验数据表明,在 0.02 ~ 0.10 mg/mL 浓度范围内,吸光度值与芦丁浓度呈现出良好的线性关系,同时回归方程的相关系数较高 ($R^2 > 0.999$),说明回归效果显著,可以用此方法分析女贞子中总黄酮的含量.



图 3 芦丁标准曲线

Fig.3 Standard curve of rutin

2.2 单因素实验

2.2.1 乙醇浓度变化对总黄酮提取量的影响

女贞子总黄酮提取量随乙醇浓度变化的规律如

图 4a 所示.实验数据显示,总黄酮提取量与乙醇溶液浓度呈现显著的非线性关系,说明提取溶液体系极性的变化对总黄酮的溶出效率有一定影响.当乙醇浓度从 40%增加至 50%时,总黄酮提取量明显提高,表明适度增加溶剂极性可有效破坏植物细胞壁结构,促进黄酮类物质的溶出.当乙醇溶液浓度为 70%时总黄酮提取量最大,而乙醇溶液浓度达 80%时,总黄酮提取量则相对最小.分析原因可能是:依据相似相溶原理,女贞子总黄酮在乙醇浓度为 70%时溶解度最大.当乙醇浓度大于 70%时,高浓度的乙醇会使植物细胞膜脂质迅速溶解,致使表面蛋白变性凝固,形成致密的疏水屏障,阻碍内部溶质的扩散.此外,高浓度乙醇会选择性溶出如蜡质、萜类等脂溶性杂质,增加了提取液的黏度,且可能黏附住总黄酮,降低其游离浓度^[18].基于上述结果,最终确定女贞子总黄酮的最佳提取溶剂为 70%乙醇水溶液.

2.2.2 料液比变化对总黄酮提取量的影响

料液比对女贞子总黄酮提取量的影响规律如图 4b 所示.实验结果表明,当料液比从 1:10 增至 1:40 时,总黄酮提取量与料液比呈显著正相关,总黄酮提取量显著提升.但超过临界值 1:40 后,提取量呈现下降趋势.这可能是由于在提取的初始阶段,料液比升高使溶剂用量增加,传质动力增强,女贞子中总黄酮的溶出量随之增多,提取率得以提升.然而,当料液比

过高,过多的溶剂可能会削弱超声空化效应,降低能量传递效率,进而影响总黄酮从女贞子基体向溶剂中转移,同时更多杂质溶出,干扰了总黄酮的扩散,致使提取率降低^[19].综合权衡实验成本与提取效果等多方面因素,选定 1:40(g/mL)作为总黄酮提取的最优料液比.

2.2.3 提取时间对总黄酮提取量的影响

提取时间对总黄酮提取量的影响结果如图 4c 所示.由图 4c 可见,提取时间在 10 ~ 40 min 范围内,总

黄酮提取量与提取时长呈显著正相关.当提取时间超过 40 min 临界值后,总黄酮提取量呈现降低趋势.这可能是由于刚开始提取时随着提取时间的延长,体系内分子热运动加剧,促使更多的总黄酮进入溶剂,提取率得以提升^[19].另一方面,女贞子总黄酮可能长时间在该提取环境条件下不稳定,或发生降解反应,或因杂质的过度溶出对总黄酮的扩散形成阻碍^[20].基于实验所获数据及结果分析,最终确定 40 min 为超声辅助提取总黄酮的最佳时间.

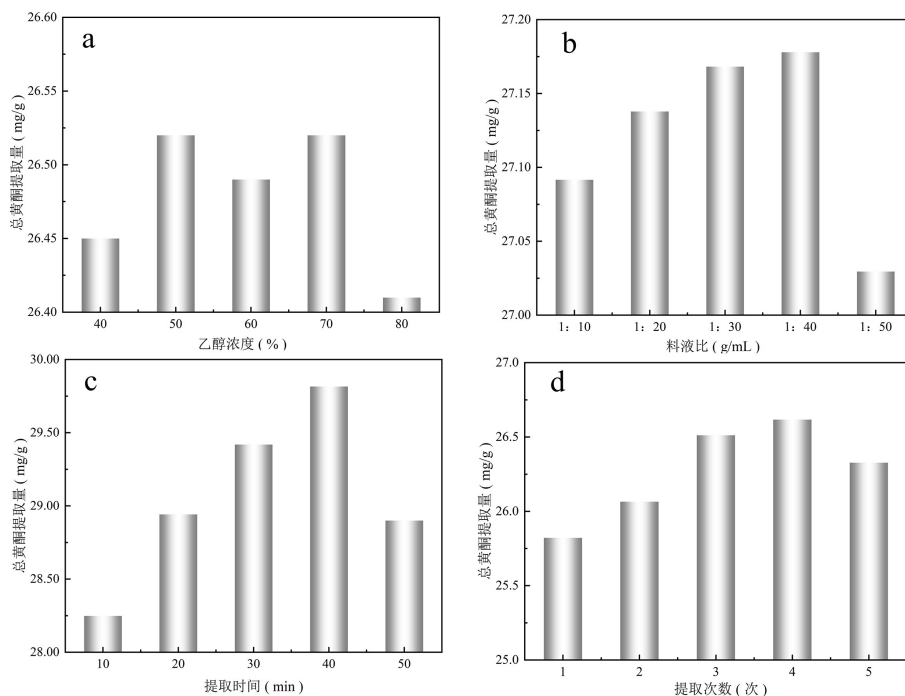


图 4 单因素变量对总黄酮提取量的影响

Fig.4 The effects of single-factor variables on the extraction yield of total flavonoids

2.2.4 提取次数对总黄酮提取量的影响

提取次数对总黄酮提取量的影响结果如图 4d 所示.由图 4d 可知,当提取次数为 1 ~ 4 次时,总黄酮提取量随提取次数的增多而升高.当提取次数进一步增加时,总黄酮提取量有所降低.这一现象可归因于:在提取的初始阶段,随着提取次数的增加,女贞子总黄酮更多地溶出并转移至乙醇溶液中.但随着提取次数的不断增多,溶剂重复使用,杂质在提取过程中不断累积,这些杂质可能对总黄酮从女贞子基体向乙醇溶液的溶出过程产生干扰^[21].由于提取 4 次所得总黄酮提取量比提取 3 次所得总黄酮提取量的增值不大,综合考量实验成本与提取效果,经权衡后以 3 次作为提取女贞子中总黄酮的最佳提取次数.

2.3 响应面分析法优化工艺条件

2.3.1 Box-Behnken 实验结果及方差分析

Box-Behnken 实验设计方案及结果如表 4 所示.通过多项式回归分析对试验数据进行回归拟合,得到超声波辅助提取女贞子中总黄酮提取量与各因素变量间的多项式方程,如公式(2)所示.采用方差分析对女贞子总黄酮提取工艺模型和参数进行系统评价,结果如表 5 所示.

$$Y = 36.10 + 0.0189C + 0.0133AB + 0.0267AD + 0.0206CD - 0.0443A - 0.0137B - 0.0064D - 0.0177AC - 0.0068BC - 0.0092BD - 0.0229 - 0.0330B^2 - 0.0016C^2 - 0.0195D^2.$$

(2)

表4 Box-Behnken 实验设计及结果

Table 4 Box-Behnken experimental design and response values for flavonoids extraction

实验编号	A 乙醇浓度/%	B 料液比(g/mL)	C 超声时间/min	D 提取次数/次	黄酮提取量
1	70	40	40	3	36.09
2	70	35	40	2	36.06
3	65	45	40	3	36.07
4	70	40	45	2	36.08
5	75	40	40	2	36.00
6	70	45	45	3	36.06
7	70	40	40	3	36.11
8	70	35	40	4	36.05
9	70	35	45	3	36.11
10	70	40	40	3	36.09
11	70	40	40	3	36.10
12	70	40	45	4	36.12
13	70	45	35	3	36.03
14	70	45	40	2	36.06
15	75	40	35	3	36.03
16	75	45	40	3	35.99
17	70	40	35	4	36.04
18	75	40	40	4	36.04
19	65	40	40	4	36.07
20	70	45	40	4	36.02
21	75	40	45	3	36.04
22	65	35	40	3	36.12
23	75	35	40	3	35.99
24	65	40	45	3	36.15
25	65	40	35	3	36.08
26	70	40	35	2	36.08
27	65	40	40	2	36.13
28	70	35	35	3	36.06
29	70	40	40	3	36.12

由表5可以看出,模型的P值小于0.0001,说明模型的拟合效果优异.回归方程中失拟项的P值为0.7249,失拟项不具备统计学显著性,这意味着该实验所产生的误差较小,由此可推断试验结果具备较高的可靠性.同时,模型的决定系数 $R^2=95.85\%$,表明该模型能够对91.71%的总黄酮提取量变动情况做出合理阐释.进一步观察表5数据可以看出,一次项A、B、

C与二次项 A^2 、 B^2 、 D^2 的P值均小于0.05,表明以上变量对于总黄酮提取量的影响呈现出显著性.而交互项BC($P=0.2476$)、BD($P=0.1239$),其P值皆大于0.05,说明这些交互项对总黄酮提取量的影响在统计学上不显著.此外,交互项AB、AC、AD、CD的P值小于0.05,表明上述项对总黄酮提取量的影响具有统计学显著性.

表 5 方差分析结果

Table 5 Analysis of variance for flavonoids extraction

来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	
模型	0.047 8	14	0.003 4	26.96	<0.000 1	significant
A-乙醇浓度	0.023 6	1	0.023 6	185.97	<0.000 1	* *
B-料液比	0.002 3	1	0.002 3	17.79	0.000 9	
C-提取时间	0.004 3	1	0.004 3	33.76	<0.000 1	* *
D-提取次数	0.000 5	1	0.000 5	3.83	0.070 6	
AB	0.000 7	1	0.000 7	5.61	0.032 8	*
AC	0.001 3	1	0.001 3	9.94	0.007 0	*
AD	0.002 8	1	0.002 8	22.48	0.000 3	*
BC	0.000 2	1	0.000 2	1.46	0.247 6	
BD	0.000 3	1	0.000 3	2.68	0.123 9	
CD	0.001 7	1	0.001 7	13.36	0.002 6	*
A ²	0.003 4	1	0.003 4	26.73	0.000 1	*
B ²	0.007 1	1	0.007 1	55.66	<0.000 1	* *
C ²	0	1	0	0.137 5	0.716 4	
D ²	0.002 5	1	0.002 5	19.42	0.000 6	*
残差	0.001 8	14	0.000 1			
失拟项	0.001 1	10	0.000 1	0.660 8	0.729 4	not significant
净误差	0.000 7	4	0.000 2			
总离差	0.049 6	28				

R² = 95.85%; Adj² = 91.71%注: * $P < 0.05$ 为差异显著; * * $P < 0.01$ 为差异极显著.

2.3.2 各因素之间交互作用分析

基于三维(3D)图形开展各因素间交互作用显著性分析时,可将坡面陡峭程度作为关键判别依据.从理论角度而言,坡面陡峭程度与因素间交互作用对响应值的影响程度呈显著正相关关系.即当坡面陡峭度较高时,表明因素间交互作用对响应值具有较强的影响效应,若坡面较为平缓,则反映出因素间交互作用对响应值的影响效应较弱.

乙醇浓度、料液比、提取时间和提取次数两两之间交互作用对总黄酮提取量的影响结果如图 5(a ~ f)所示.图 5a 呈现的曲面斜率较大,这一特征显示在女贞子总黄酮提取过程中,乙醇浓度与料液比这两个因素对总黄酮提取量有显著的影响,并且二者之间的交互作用也较为显著($P = 0.032 8$).通过对图 5b 的曲面形态进行观察,发现其斜率相对较为和缓,可推断

出乙醇浓度与提取时间这两个因素对总黄酮提取量的影响显著程度较低($P = 0.070 0$).进一步观察图 5c,该图中的曲面斜率较为陡峭,这一图形特征表明,乙醇浓度与提取次数两个因素之间的交互作用对总黄酮提取量的影响呈十分显著的水平($P = 0.000 3$).分析图 5d 的曲面,其呈现出较为平缓的趋势,该曲面的形态特征反映出料液比与提取时间这两个因素对总黄酮提取量的影响程度不大,二者之间的交互作用也不显著($P = 0.247 6$).图 5e 的曲面平缓程度与图 5d 相近,表明料液比和提取次数这两个因素对总黄酮提取量的影响不显著($P = 0.123 9$).图 5f 中的曲面呈现出较为陡峭的特征,表明在总黄酮的提取过程中,提取时间与提取次数这两个因素对总黄酮提取量的影响显著程度较高($P = 0.002 6$).

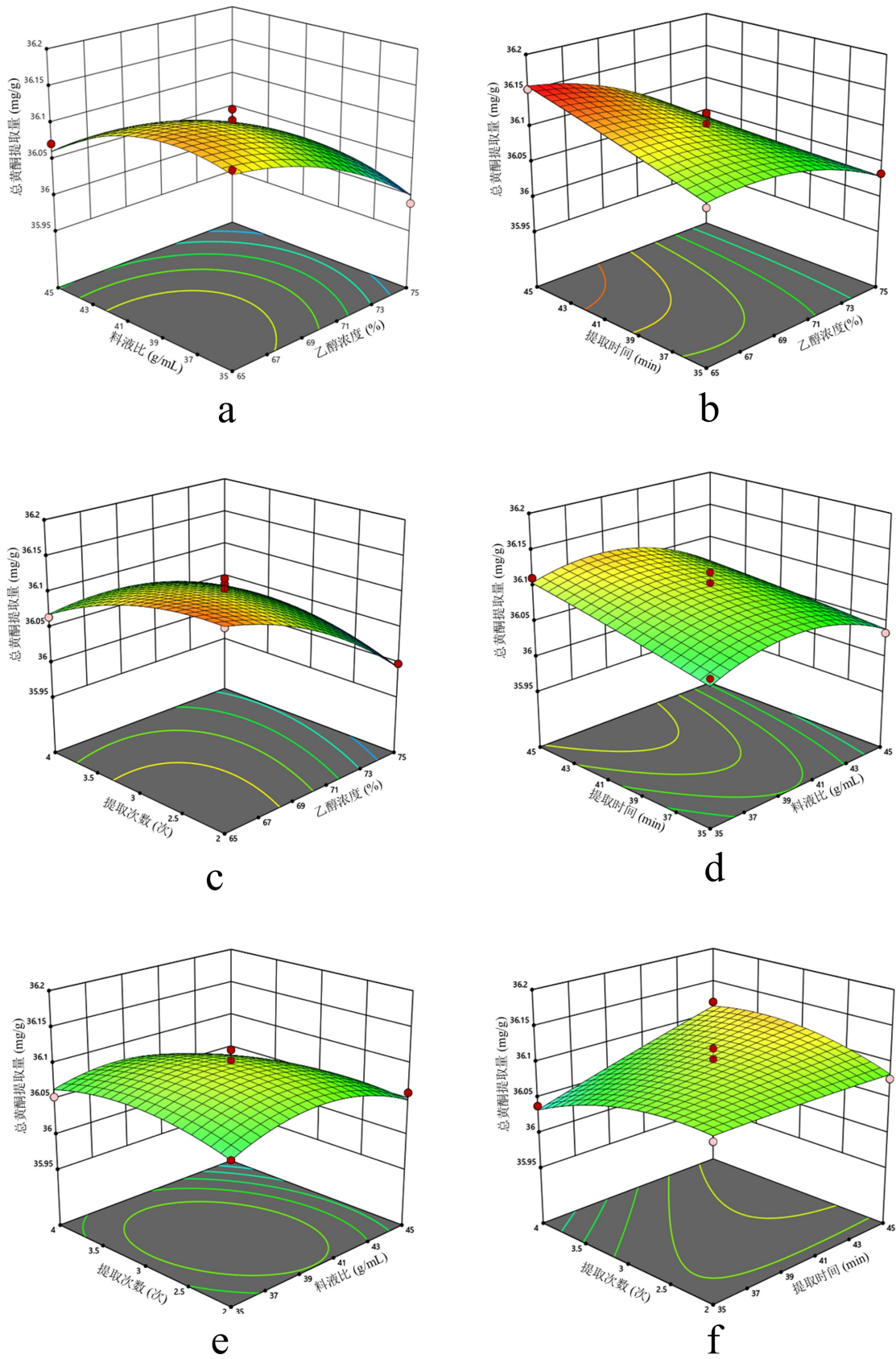


图 5 各因素间交互作用对黄酮提取量的影响

Fig.5 Response surface plot of interaction factors on flavonoid extraction

2.3.3 最优提取工艺的确定及验证实验

运用 Design Expert13 软件对实验模型开展回归分析,得到超声波辅助法从女贞子中提取总黄酮工艺的最佳参数条件为:乙醇浓度 65%、料液比 1:40 (g/mL)、提取时间 45 min、提取次数 3 次。在此条件下,总黄酮提取量的预测值为 36.15 mg/g。为验证该预测结果,在上述条件下进行 3 次平行实验,测得总黄酮的平均提取量为 36.12 mg/g。实测值与预测值十分接近,表明该模型可以应用于女贞子中总黄酮提取过程的预测与分析。

3 结论

本研究采用响应面分析法对超声波辅助提取女贞子总黄酮的工艺参数进行了优化。通过单因素实验确定关键参数阈值后,基于 Box-Behnken 设计原理设计四因素三水平试验并构建四元二次回归模型。实验结果表明,乙醇浓度和提取时间对总黄酮提取量影响最为显著,得到的最佳提取工艺条件为:乙醇浓度 65%、料液比 1:40 (g/mL)、提取时间 45 min、提取次数 3 次,在此条件下总黄酮提取量为 36.15 mg/g,与实测值相接近。研究结果可为女贞子总黄酮绿色提取工艺的研究与开发奠定理论基础。

参考文献

- [1] ZHAO X Y, LIU J W. Chemical constituents from the fruits of *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton and their role on the medicinal treatment [J]. *Natural Product Communications*, 2020, 15(4): 1934578X20922338.
- [2] CAO M, WU J, PENG Y, et al. *Ligustrum lucidum* fructus, a traditional Chinese medicine: Comprehensive review of botany, traditional uses, chemical composition, pharmacology, and toxicity [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2023, 301: 115789.
- [3] LIU J L, KONG Y C, MIAO J Y, et al. Spectroscopy and molecular docking analysis reveal structural specificity of flavonoids in the inhibition of α -glucosidase activity [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 152: 981-989.
- [4] TUMILAAAR S G, HARDIANTO A, DOHI H, et al. A comprehensive review of free radicals, oxidative stress, and antioxidants: Overview, clinical applications, global perspectives, future directions, and mechanisms of antioxidant activity of flavonoid compounds [J]. *Journal of Chemistry*, 2024, 2024: 5594386.
- [5] WANG Z C, WANG L, HUANG H T, et al. In vitro antioxidant analysis of flavonoids extracted from *Artemisia argyi* stem and their anti-inflammatory activity in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 macrophages [J]. *Food Chemistry*, 2023, 407: 135198.
- [6] ZHANG Y, HU X Z, ZOU L Q. Flavonoids as therapeutic agents for epilepsy: Unveiling anti-inflammatory and antioxidant pathways for novel treatments [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2024, 15: 1457284.
- [7] LI Z, XIE H, TANG C P, et al. Flavonoids from the roots and rhizomes of *Sophora tonkinensis* and their in vitro anti-SARS-CoV-2 activity [J]. *Chinese Journal of Natural Medicines*, 2023, 21(1): 65-80.
- [8] 徐源, 杨立军, 李冰洁, 等. 超声辅助双水相提取紫苏叶总黄酮工艺优化及其抗氧化活性分析 [J]. *粮食与油脂*, 2025, 38(02): 158-162.
- [9] 尹翔宇, 王宝山, 罗宝军, 等. 甘青铁线莲总黄酮提取、纯化及抗氧化活性研究 [J]. *中兽医医药杂志*, 2025, 44(1): 18-25.
- [10] 袁园. 苦荞麸皮中黄酮的超声水提法研究 [J]. *食品安全导刊*, 2022(21): 151-153.
- [11] 居秀荣, 李加友, 于建兴, 等. 酶辅助提取植物天然活性物质的研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(9): 202-211.
- [12] 马永强, 牛绩超, 尤婷婷, 等. 超声辅助复合酶法提取叶黄素及其抗氧化活性研究 [J]. *中国调味品*, 2024, 49(11): 187-194+220.
- [13] 张欣莉, 李思仪, 孙嘉吟, 等. 响应面优化百香果果皮总黄酮提取工艺及其抗氧化性 [J]. *饲料研究*, 2022, 45(16): 83-88.
- [14] 李少华, 高愿军, 李翠翠, 等. 微波辅助酶法提取葛根黄酮的工艺优化及抗氧化活性研究 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(01): 217-222.
- [15] 冯拓, 李超, 单培, 等. 超声波辅助碱提香菇柄中水溶性蛋白的工艺 [J]. *食品工业*, 2019, 40(7): 16-20.
- [16] 程涛, 李仕鲁, 陈德勇, 等. 超声辅助提取竹叶黄酮及提取机理研究 [J]. *中国调味品*, 2024, 49(07): 184-191.
- [17] 何君强, 熊雯宇, 黄莹, 等. 灰树花醇提物化学成分及其生物活性研究 [J]. *食品与生物技术学报*, 2024, 43(05): 54-63.
- [18] 姜登钊, 刘可越, 曾明, 等. 响应面法 (RSM) 及响应面-人工神经网络 (RSM-ANN) 混合模型优化地耳草总黄酮提取工艺 [J]. *中国野生植物资源*, 2024, 43(12): 19-26.
- [19] 浦乾琨, 江海都, 杨一山, 等. 3 种金花茶叶总黄酮提取工艺及其体外抗氧化活性研究 [J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(11): 117-122+134.
- [20] 唐婷范, 徐紫薇, 李霞清, 等. 超声波辅助提取广陈皮黄酮的工艺优化及其抗氧化活性的研究 [J]. *中国调味品*, 2024, 49(3): 15-19.
- [21] 朱嘉杰, 林捷, 刘军, 等. 慈竹总黄酮提取工艺优化及抗氧化活性分析 [J]. *食品科技*, 2024, 49(10): 247-256.

(责任编辑:肖丽,殷锋,付强,张阳,和力新;英文编辑:周序林,郑玉才)