

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.04.019

吴海燕, 施晓玲, 袁秋梅, 等. 响应面优化超声波辅助提取芥菜维生素 C 工艺[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(4): 143-149.

WU H Y, SHI X L, YUAN Q M, et al. Optimization of ultrasound - assisted extraction of vitamin C from capsella bursa-pastoris by response surface methodology[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(4): 143-149.

响应面优化超声波辅助提取 芥菜维生素 C 工艺

吴海燕^{1,2}, 施晓玲³, 袁秋梅¹, 陈建军¹, 袁春新²

(1. 南通科技职业学院, 江苏 南通 226007;

2. 南通市农村专业技术协会, 江苏 南通 226007;

3. 南通市食品药品监督检验中心, 江苏 南通 226006)

摘要: 采用超声波辅助提取芥菜中维生素 C, 使用混合分式析因设计 (Confounded Fractional Factorial) 实验选出芥菜维生素 C 提取的主要因素, 采用 Box-Behnken 响应面法优化提取工艺, 得到芥菜中维生素 C 的最佳提取工艺条件。结果表明, 影响芥菜中维生素 C 提取的显著因素为超声时间、超声温度、料液比; 最佳提取工艺条件: 1%草酸; 料液比 1 : 10 (g/mL); 超声时间 12 min; 超声温度 32 °C; 超声功率 100 W, 在此条件下提取芥菜中维生素 C 的量为 (54.88±0.22) mg/100 g。响应面法优化提取方程拟合度高, 可用于预测芥菜中维生素 C 的提取。

关键词: 芥菜; 维生素 C; 超声波辅助提取; Confounded Fractional Factorial 实验; 响应面法

中图分类号: TS201.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)04-0143-07

网络首发时间: 2022-07-01 08:46:57

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.ts.20220629.1524.008.html>

Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Vitamin C from *Capsella Bursa-pastoris* by Response Surface Methodology

WU Hai-yan^{1,2}, SHI Xiao-ling³, YUAN Qiu-mei¹, CHEN Jian-jun¹, YUAN Chun-xin²

(1. Nantong College of Science and Technology, Nantong, Jiangsu 226007, China;

2. Nantong Rural Professional Technique Association, Nantong, Jiangsu 226006, China;

3. Nantong Food and Drug Supervision and Inspection Center, Nantong, Jiangsu 226006, China)

Abstract: The optimum ultrasound-assisted extraction parameters of Vitamin C from *Capsella bursa-pastoris* was studied by Response Surface Methodology. The main factors of the extraction were selected by the Confounded Fractional Factorial test. The extraction process was optimized by Box-Behnken test. The results showed that the major influential factors of extraction were: ultrasonic time, ultrasonic temperature and material to solvent ratio. The optimum conditions were as follows: 1% oxalic acid, material to solvent ratio of 1 : 10 (g/mL), ultrasonic time of 12 min, ultrasonic temperature of 32 °C and ultrasonic power of 100 W. In this condition, the extraction amount of Vitamin C from *Capsella bursa-pastoris* was (54.88±0.22) mg/100 g.

收稿日期: 2022-03-16

基金项目: 南通市社会民生科技项目 (MS12020058)

Supported by: Nantong Science and Technology Project of Social Livelihood (No. MS12020058)

作者简介: 吴海燕, 女, 1978 年出生, 硕士, 副教授, 研究方向为农产品综合利用与食品安全。E-mail: why022@126.com.

Key words: *Capsella bursa-pastoris*; Vitamin C; ultrasonic-assisted extraction; Confounded Fractional Factorial designs; response surface analysis

荠菜 (*Capsella bursa-pastoris*.) 是十字花科荠属草本植物, 荠菜可全草入药, 茎叶可食用^[1-2]。野生荠菜在我国分布广泛, 作为一种药食同源植物, 近年来人工栽培发展迅速。荠菜含有黄酮、多糖、有机酸、生物碱、维生素、多酚等多种活性成分^[3-10], 具有消炎、抗氧化、降低胆固醇和调节糖代谢等多种生物活性^[4,8,11-15]。荠菜营养丰富, 风味独特, 质地柔嫩, 药食兼备, 深受消费者的喜爱。

荠菜中维生素 C 含量丰富^[4], 维生素 C 是维持人体正常生理功能必不可少的营养物质之一, 具有抗氧化等多种生理活性, 有助于降低心血管疾病、糖尿病、某些癌症等慢性疾病的患病风险^[16-17]。超声波辅助提取荠菜维生素 C 是利用声空化效应, 提高提取溶剂中荠菜的渗透速度, 并且能减少提取溶剂的使用量。与传统的提取法相比, 超声波辅助提取时间短, 提取溶剂使用量少, 可以多个实验同时提取, 效率高, 提取物的损失降低^[16,18]。目前超声波提取技术已逐渐应用于天然植物有效成分、生物活性成分的提取研究中^[19-25]。

本实验采用超声波辅助草酸溶液提取荠菜中维生素 C, 考查草酸浓度、超声时间、超声温度、超声功率、料液比对荠菜维生素 C 提取的影响, 通过响应面法优化提取工艺参数, 旨在为荠菜中天然抗氧化剂的开发利用提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

荠菜 (*Capsella bursa-pastoris*.): 江苏中宝食品有限公司; Vc 标准品 (纯度 $\geq 99.0\%$): Sigma 公司; 草酸 (分析纯): 国药集团化学试剂有限公司。

Waters 双通道紫外检测器高效液相色谱仪: Waters 公司; HR2084 食品制样器: 飞利浦公司; 隔膜真空泵: 天津市腾达过滤器件厂; 超声仪器 (KQ2200): 昆山市超声仪器有限公司; 电子天平 (精确度 0.1 mg): Sartorius 公司; 高速冷冻离心机 (SL8R): Thermo 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 维生素 C 含量的测定

高效液相色谱法测定维生素 C 含量^[26], 以 0.1% 的草酸溶液为流动相, 流速: 1 mL/min, 进样量: 25 μ L, 柱温: 25 $^{\circ}$ C, 样品经 C18 色谱柱 (250 mm \times 4.6 mm, 5.0 μ m) 分离, 采用紫外检测器进行检测。

维生素 C 标准品用 0.1% 的草酸定容, 制成浓度为 2~20 μ g/mL 的 VC 标准待测溶液, 以峰面积为纵坐标, 以维生素 C 的浓度为横坐标, 得到回归方程: $y=75\ 480.2x-930.2$ 。

1.2.2 维生素 C 的提取

准确称取 100 g 荠菜, 加入 100 mL 的 2% 草酸溶液匀浆。称取 5.00 g 左右的匀浆样品放入 100 mL 的离心管中, 加入一定量的草酸溶液, 置于超声波仪器中一定温度超声一定时间后, 在 4 $^{\circ}$ C 下 9 000 r/min 离心 2 min, 上清液转移至 100 mL 的棕色容量瓶中, 用 0.1% 草酸溶液定容, 溶液用 0.45 μ m 滤膜过滤后按 1.2.1 测定维生素 C 的峰面积, 代入回归方程求出荠菜的浓度, 按下式计算维生素 C 的提取量。

$$\text{维生素C的提取量(mg/100g)} = \frac{c \times V \times 100}{m \times 1000}$$

式中: c 为稀释后提取液维生素 C 的浓度, μ g/mL; V 为样品溶液的定容体积, mL; m 为称取的荠菜匀浆液中相当于荠菜的质量, g。

1.2.3 实验设计

根据文献讨论, 选择提取溶剂草酸的浓度、超声时间、超声温度、超声功率、料液比等五个影响提取量的因素, 对提取工艺过程进行优化^[7,9,19]。

1.2.3.1 单因素实验 将荠菜匀浆样品放入 100 mL 的离心管中, 考察提取液草酸浓度 (0.5%、1%、2% 和 3%), 超声时间 (5、10、15、20 和 25 min), 超声温度 (20、25、30、35 和 40 $^{\circ}$ C), 超声功率 (20、25、30、35 和 40 W), 料液比 (1:5、1:10、1:15 和 1:20) 对维生素 C 的提取量影响, 每次超声处理匀浆荠菜 5 g。

1.2.3.2 二水平实验 超声辅助提取实验影响因

子多,采用全因子实验设计会影响实验效率^[27],采用部分因子实验可以确定影响提取量的主效应因子。在单因素实验的基础上确定各因素两个合适水平值,以维生素 C 的提取量为考察指标,采用 SAS 软件中的 Confounded Fractional Factorial designs 来确定影响提取工艺过程的主要因素以及因素间交互作用的一级作用。

1.2.3.3 响应面分析 根据 Box-Bohnken 的中心组合设计原理,由二水平设计确定的主要因素各取 3 水平,设计了 3 因素 3 水平共 15 个实验点的响应面分析^[19]。

1.3 数据分析

数据处理使用软件 Excel 2010 和 SAS 9.0 进行数据分析,绘图采用 Origin-2022,所有实验都重复 3 次,结果用平均值表示。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

单因素实验,各因素对维生素 C 的提取量的影响结果见表 1~5。

表 1 草酸浓度对维生素 C 提取量的影响
Table 1 Effects of oxalic acid concentration on extraction of Vitamin C

草酸浓度/%	0.5	1	2	3
维生素 C 的量/(mg/100 g)	31.26	50.35	49.76	48.85

表 2 超声时间对维生素 C 提取量的影响
Table 2 Effects of ultrasonic time on extraction of Vitamin C

超声时间/min	5	10	15	20	25
维生素 C 的量/(mg/100 g)	38.73	51.22	50.35	47.18	32.26

表 3 超声温度对维生素 C 提取量的影响
Table 3 Effects of ultrasonic temperature on extraction of Vitamin C

超声温度/°C	20	25	30	35	40
维生素 C 的量/(mg/100g)	36.36	42.16	51.22	46.78	45.76

表 4 超声功率对维生素 C 提取量的影响
Table 4 Effects of ultrasonic power on extraction of Vitamin C

超声功率/W	20	40	60	80	100
维生素 C 的量/(mg/100g)	34.35	38.73	41.57	49.36	51.22

草酸浓度在 0.5%~1%之间,维生素 C 的提取量快速增加,随后随着酸浓度增大,维生素 C 的量有所下降。可能原因是一定浓度酸能够保护维

生素 C 不受外界环境影响而降解;酸浓度过大,反而使维生素 C 溶出有所减少。

表 5 料液比对维生素 C 提取量的影响
Table 5 Effects of material to solvent ratio on extraction of Vitamin C

料液比/(g/mL)	1 : 5	1 : 10	1 : 15	1 : 20
维生素 C 的量/(mg/100g)	48.78	51.22	46.27	46.36

随着超声时间延长,维生素 C 的提取量是先增大后减少,在超声 15 min 提取量最大;随着超声温度升高,维生素 C 的提取量是先增大后减少,在超声温度为 30 °C 提取量最大。可能原因是超声时间增加,温度升高都能增加了维生素 C 的溶出率;但是超声时间继续增加,温度继续升高,可能导致维生素 C 的降解,反而使维生素 C 的提取量减少。

随着超声功率增加,维生素 C 的提取量增加,在 100 W 时达到最高值。因为超声效应会随着功率增加而增大,从而促进提取量增加。

随着提取溶液量增加,维生素 C 的提取量是先增大后减少,在料液比 1 : 10 提取量最大。因为溶液增加,促进维生素 C 的溶出,但是溶液继续增加,减弱了超声效应,超声提取效率减低,从而使维生素 C 的提取量减少。

2.2 二水平实验

采用 SAS 软件中 5 因素、实验次数为 8 的 Confounded Fractional Factorial designs 来确定影响提取工艺过程的主要因素以及因素间交互作用的一级作用。根据单因素实验结果,同时考虑减少试剂使用量,每一个因素取一个相对高和一个相对低的水平,假定响应值在所选的水平区间内是近似线性的^[13],实验因素和水平见表 6。

表 6 二水平实验的水平安排
Table 6 Factors and levels for Fractional Factorial designs

因素	提取酸的浓度/%	超声时间/min	超声温度/°C	超声功率/W	料液比/(g/mL)
编码	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
-1	1	10	30	80	1 : 5
1	2	20	40	100	1 : 10

SAS 软件的 Confounded Fractional Factorial designs 实验结果见表 7。

表 7 部分因子实验结果

Table 7 Experimental design and results of Fractional Factorial designs

序号	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	维生素 C 含量/(mg/100 g)
1	-1	-1	-1	1	1	51.58
2	1	-1	-1	-1	-1	41.13
3	-1	1	-1	-1	1	45.65
4	1	1	-1	1	-1	45.26
5	-1	-1	1	1	-1	41.56
6	1	-1	1	-1	1	47.18
7	-1	1	1	-1	-1	36.54
8	1	1	1	1	1	39.12

SAS 软件提供各因素的主效应 (其他因素不变时,某单个因素的变化对响应值的影响)见图 1。

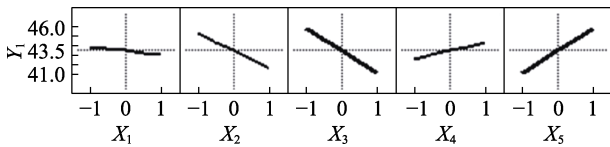


图 1 各因素的主效应图

Fig.1 Main effect of all the factors

由图 1 可以看出, 在选定的实验范围内, 提

取酸的浓度对提取量影响较小; 超声时间、超声温度提取维生素 C 的影响是负相关的, 而超声功率、料液比对提取维生素 C 的影响是正相关的。对各因素的方差分析, 如表 8。

表 8 各因素的方差分析

Table 8 Analysis of variance for all the factors

方差来源	自由度	偏差平方和	平均偏差平方和	F 值	大于 F 值的概率
X ₁	1	0.871 2	0.871 2	0.046 6	0.849 0
X ₂	1	27.676 8	27.676 8	1.481 8	0.347 6
X ₃	1	46.176 1	46.176 1	2.472 2	0.256 5
X ₄	1	6.160 1	6.160 1	0.329 8	0.623 8
X ₅	1	45.315 2	45.315 2	2.426 1	0.259 6
模型	5	126.199 3	25.239 9	1.351 3	0.477 0
误差	2	37.356 1	18.678 0		
所有项	7	163.555 3			

由表 3 可知: 在所有因素中, X₂ (超声时间)、X₃ (超声温度)、X₅ (料液比) 对维生素 C 的影响显著, 因此取上述三个因素作为主要因素做下一步优化实验。利用 SAS 软件考察主要因素之间的交互作用如图 2 所示。

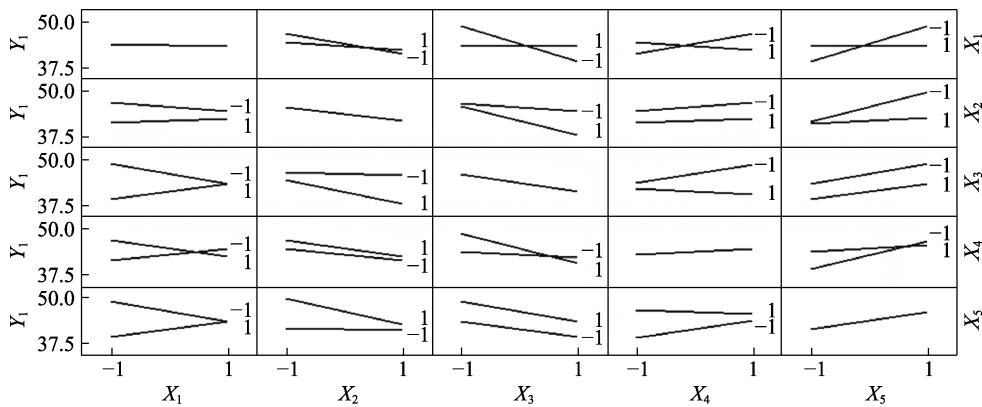


图 2 主因素间的交互作用图

Fig.2 3-way interaction of main factors

由图 2 可以看出两个因素的值变化对提取量的影响, 交互作用图中两直线交叉表示两者有交互作用, 平行表示二者没有交互作用。在影响维生素 C 提取的主要因素中, 超声时间与超声温度之间; 超声时间与料液比之间有交互作用。超声温度与料液比之间不存在交互作用。可能存在的原因是: 料液比会影响超声空化效果; 超声时间越长, 可能产生放热, 影响维生素 C 的提取量。

2.3 响应面优化实验

利用响应面分析法对 Confounded Fractional

Factorial designs 中所确定的主要影响因素: 超声时间、超声温度、料液比作进一步的优化。草酸的浓度为 1%, 超声功率为 100 W, 其他三个重要因素根据单因素实验结果进行编码, 各因素编码见表 9。

根据 Box-Behnken 的中心组合设计原理, 设计 3 因素 3 水平共 15 个实验点的响应面分析实验, 在中心值重复 3 次实验, 用以估计实验误差^[19], 结果见表 10。

SAS 对数据进行回归分析, 结果如表 11。

表 9 Box-Behnken 实验设计的因素水平及结果
Table 9 Experimental design of Box-Behnken designs

因素		编码值		
		-1	0	1
X ₁	超声温度/°C	25	30	35
X ₂	超声时间/min	5	10	15
X ₃	料液比/(g/mL)	1 : 5	1 : 10	1 : 15

表 10 Box-Behnken 实验设计与结果
Table 10 Experimental design and results of Box-Behnken designs

序号	X ₁	X ₂	X ₃	维生素 C 含量/(mg/100 g)
1	-1	-1	0	47.34
2	-1	1	0	48.12
3	1	-1	0	47.52
4	1	1	0	53.25
5	0	-1	-1	49.52
6	0	-1	1	48.76
7	0	1	-1	50.22
8	0	1	1	50.34
9	-1	0	-1	49.36
10	1	0	-1	51.24
11	-1	0	1	47.72
12	1	0	1	49.46
13	0	0	0	54.34
14	0	0	0	55.18
15	0	0	0	54.49

表 11 Box-Behnken 实验设计的回归分析
Table 11 Regression analysis of Box-Behnken designs

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr > F	显著性
X ₁	1	9.968 1	9.968 1	12.582 6	0.016 4	**
X ₂	1	9.658 0	9.658 0	12.191 1	0.017 4	**
X ₃	1	2.060 4	2.060 4	2.600 9	0.167 7	
X ₁ X ₁	1	31.887 7	31.887 7	40.251 3	0.001 4	**
X ₁ X ₂	1	6.125 6	6.125 6	7.732 3	0.038 9	*
X ₁ X ₃	1	0.004 9	0.004 9	0.006 2	0.940 4	
X ₂ X ₂	1	26.396 1	26.396 1	33.319 3	0.002 2	**
X ₂ X ₃	1	0.193 6	0.193 6	0.244 4	0.642 0	
X ₃ X ₃	1	19.299 5	19.299 5	24.361 4	0.004 3	**
回归	9	95.421 8	95.421 8			
参差	5	3.961 1	0.792 2			
总离差	14	99.382 9				

由表 11 可见,三因素对维生素 C 提取的过程的影响并非简单的一次线性关系,而是呈二次抛物面关系。一次超声温度 (X₁)、超声时间 (X₂) 对提取效果的影响显著;而在交叉乘积项上超声温度的平方 (X₁X₁)、超声温度的平方 (X₂X₂)、

料液比的平方 (X₃X₃) 对提取效果的影响显著;交互项上 X₁X₂ 对提取效果有影响。各因素经回归拟合后,得回归方程:

$$Y=54.67+1.116 25X_1+1.098 75X_2-0.507 5X_3-2.938 75 X_1X_1+1.237 5X_1X_2-0.035 X_1X_3-2.673 75X_2X_2-0.222X_2X_3-2.286 25X_3X_3$$

对回归方程进行可信度分析,模型可信度分析的统计检验结果见表 12。

表 12 模型可信度分析表
Table 12 Fit statistics for Model

模型可信度分析项目	结果
均值	50.457 3
拟合系数	96.01%
模型误差的平方根	0.890 1
变异系数	1.764 0

由表 7 可知,模型拟合系数的为 96.01%,说明由这三个因素及其二次项构成的回归方程能解释提取量 Y 变化的 96.01%,模型误差的平方根 0.890 1,模型拟合度很好。

利用 SAS 软件对各因素的主效应分析,结果如图 3 所示。

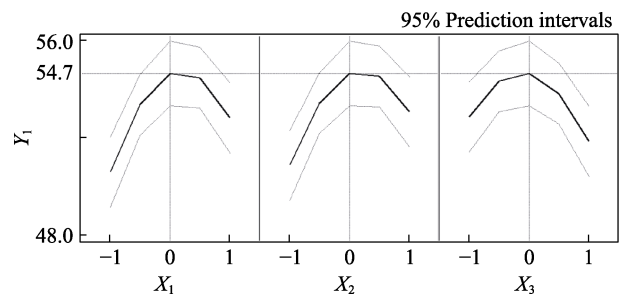


图 3 主要因素的主效应图
Fig.3 Main effect of major factors

由图 3 可知, X₁、X₂、X₃ 在低含量时,随着其值的增大响应值 Y 增大,在高含量时,随着其值的增大响应值 Y 反而降低,并且在选定的实验水平内存在顶点,由此可知,在选定的区域,响应值 Y 存在最大值。

提取量对响应因子的立体图见图 4。

由图 4 可知,提取量对各因素的立体图均是开口向下的曲面图,说明在选定的实验区域,维生素 C 的提取量存在最大值。利用 SAS 分析可知,回归模型存在稳定点 (X₁, X₂, X₃) 为 (0.5, 0.5, 0), 提取维生素 C 的目标值为 54.68 mg/100 g。

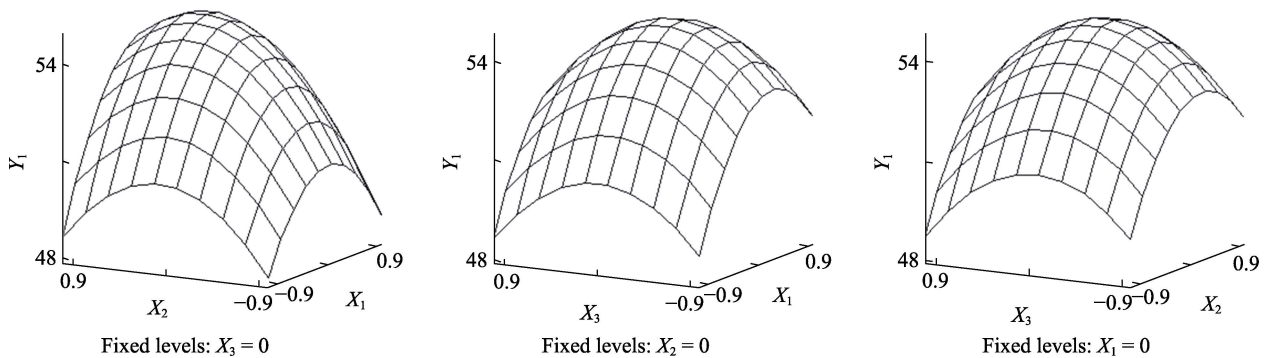


图 4 各因素的响应因子的立体图
 Fig.4 Surface plots of all the factors

为了验证模型预测的准确性, 根据各因素的实际实验编码水平, 将超声温度取 32 °C, 超声时间 12 min, 料液比 1 : 10 条件下进行提取维生素 C, 重复三次实验, 得到维生素 C 为 (54.88±0.22) mg/100 g, 与预测值相比, 相对误差为 0.366%, 说明该方程与实际情况拟合较好, 证实了响应面优化的模型可靠性, 响应面法适用于对超声波辅助提取工艺进行回归分析和参数优化。

3 结论

1) 实验证明, 二水平实验和响应面分析法对提取工艺的优化是有效。二水平实验用较少的实验对影响提取工艺的多个因素进行考察, 找出了影响超声波提取维生素 C 的影响主要因素, 分别为超声温度、超声时间、料液比。

通过响应面实验对二水平实验选出的 3 个主要因素进一步优化, 找出超声温度、超声时间、料液比与提取维生素 C 之间关系的数学模型:

$$Y=54.67+1.116\ 25X_1+1.098\ 75X_2-0.507\ 5X_3-2.938\ 75X_1X_1+1.237\ 5X_1X_2-0.035X_1X_3-2.673\ 75X_2X_2+0.222X_2X_3-2.286\ 25X_3X_3$$

该模型的回归效果显著, 模型拟合程度很好, 能很好地预测三个主要因素对超声波辅助提取工艺的影响。

2) SAS 软件分析主要因素与提取维生素 C 之间的数学模型在稳定的条件下, 提取维生素 C 存在最大值。优化的最佳反应条件为: 超声温度取 32 °C, 超声时间 12 min, 料液比 1 : 10, 提取液草酸浓度为 1%, 超声波功率 100 W, 在此条件下进行提取芥菜中维生素 C 的提取量为 (54.88±0.22) mg/100 g, 与预测值相比, 相对误差为 0.366%, 说明该响应面法优化的方程与实际情况

拟合较好, 证实了响应面优化模型的可靠性。

参考文献:

- [1] 国家中医药管理局《中华本草》编委会. 中华本草 (第三册) [M]. 上海: 科学技术出版社, 1999: 697.
Editorial board of Chinese materia medica of the State Administration of traditional Chinese medicine Chinese materia medica (Volume III)[M] Shanghai: Science and Technology Press, 1999: 697.
- [2] 程爱芳. 芥菜的营养价值及药用价值[J]. 蔬菜, 2004(6): 36-36.
CHENG A F. Nutritional and medicinal value of shepherd's purse[J]. Vegetables, 2004 (6): 36-36.
- [3] GROSSO C, VINHOLES J, SILVA L R, et al. Chemical composition and biological screening of Capsella bursa-pastoris [J]. Revista Brasileira de Farmacognosia, 2011, 21(4): 635-643.
- [4] AL-SNAFI A. The chemical constituents and pharmacological effects of Capsella bursa-pastoris-A review[J]. International Journal of Pharmacology & Toxicology, 2015, 5(2): 76-81.
- [5] 赵鹤, 夏娴, 陈希鹏, 等. 高寒地区野菜资源营养成分分析 [J]. 食品安全导刊, 2021(22): 115-116.
ZHAO H, XIA X, CHEN X P, et al. Analysis of nutritional components of wild vegetable resources in alpine areas[J]. Food safety guide, 2021 (22): 115-116.
- [6] 许瑞波, 刘炜玮, 王明艳, 等. 芥菜黄酮的超声提取工艺研究 [J]. 食品科技, 2007, 32(8): 149-151.
XU R, LIU W W, WANG M Y, et al. Study on ultrasonic extraction of Flavonoids from shepherd's purse[J]. Food science and technology, 2007, 32 (8): 149-151.
- [7] 荆云, 卢慧娟, 薛金涛, 等. 超微粉碎联合超声辅助法提取芥菜多糖工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2018(14): 30-34.
JING Y, LU H J, XUE J T, et al. Study on extraction technology of shepherd's purse polysaccharide by ultra-fine comminution combined with ultrasonic assisted method[J]. Food research and development, 2018 (14): 30-34.
- [8] YILDIRIM B A, AYDIN T, KORDALI S, et al. Antihemorrhoidal activity of organic acids of Capsella bursa-pastoris on croton oil-induced hemorrhoid in rats[J]. Journal of

- Food Biochemistry, 2020, 44(9): 1-10.
- [9] 曹小燕, 杨海涛. 响应面法优化超声辅助提取芥菜多酚工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2019(2): 223-232.
 CAO X Y, YANG H T. Optimization of ultrasonic assisted extraction of polyphenols from shepherd's purse by response surface methodology and its antioxidant activity[J]. Food industry science and technology, 2019 (2): 223-232.
- [10] 许瑞波, 王芳, 刘玮炜, 等. 芥菜总生物碱的酸碱提取工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(8): 135-138.
 XU R B, WANG F, LIU W W, et al. Study on acid-base extraction technology of total alkaloids from shepherd's purse[J]. Food and fermentation industry, 2006, 32 (8): 135-138.
- [11] PENG J, HU T, LI J, et al. Shepherd's purse polyphenols exert its anti-inflammatory and antioxidative effects associated with suppressing mapk and nf- κ b pathways and heme oxygenase-1 activation[J]. Oxidative medicine and cellular longevity, 2019, 2019(3): 1-14.
- [12] JIN-TAEK H, EUNJI C, HYO-KYOUNG C, et al. The cholesterol-lowering effect of capsella bursa-pastoris is mediated via srebp2 and hnf-1 α -regulated pcsk9 inhibition in obese mice and hepg2 cells[J]. Foods, 2021, 10(2): 1-14.
- [13] LAN X, QING-HU W, BAI-YIN-MU-QI-ER B, et al. Chemical composition and anti-inflammatory effects of the EtOAc extract from Capsella bursa-pastoris (L.) Medic.[J]. African Journal of Pharmacy & Pharmacology, 2017, 11(15): 186-190.
- [14] XIE L, XU X, WU X, et al. Capsella bursa-pastoris (L.) Medic. extract alleviate cataract development by regulating the mitochondrial apoptotic pathway of the lens epithelial cells[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2022, 284(10): 114783.
- [15] LU Y, WU Y, CHEN X, et al. Water extract of shepherd's purse prevents high-fructose induced-liver injury by regulating glucolipid metabolism and gut microbiota[J]. Food chemistry, 2021, 342: 1-11.
- [16] DA ROCHA T S, DE LIMA A, SILVA J N, et al. Vitamin C and phenolic antioxidants of jua (ziziphus joazeiro m.) pulp: a rich underexplored brazilian source of ellagic acid recovered by aqueous ultrasound-assisted extraction[J]. Molecules, 2022, 27(3): 1-10.
- [17] HADZI-PETRUSHEV N, MITROV D, KOSTOVSKI V, et al. The impact of vitamin C on the relationship among inflammation, lipid peroxidation and platelet activation during analgesic nephropathy in rats[J]. Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology, 2017, 28(5): 473-481.
- [18] ZOU Y, KANG D, LIU R, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2018, 46: 36-45.
- [19] 贺银菊, 杨再波, 彭莘媚, 等. 响应面优化紫果西番莲维生素C的超声辅助提取工艺[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 119-124.
 HE Y J, YANG Z B, PENG X M, et al. Optimization of ultrasonic assisted extraction of vitamin C from purple passion fruit by response surface methodology[J]. Food industry science and technology, 2020, 41(1): 119-124.
- [20] 刘星宇, 廖艺超, 王壹, 等. 超声波联用技术在植物活性成分提取中的应用研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-11. [2022-02-06]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029505.
 LIU X Y, LIAO Y C, WANG Y, et al. Application and research progress of ultrasonic combined technology in the extraction of plant active components[J/OL]. Food and fermentation industry, 1-11[2022-02-06]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029505.
- [21] 李新原, 李斌, 颜廷才, 等. 超高压与超声波对蓝靛果多酚提取及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(2): 271-277.
 LI X Y, LI B, YAN T C, et al. Effects of ultra high pressure and ultrasonic on Polyphenol Extraction and antioxidant activity of indigo fruit[J]. Food science, 2017, 38 (2): 271-277.
- [22] 谢佳函, 刘回民, 刘美宏, 等. 红豆皮多酚提取工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 147-157.
 XIE J H, LIU H M, LIU M H, et al. Optimization of extraction process and antioxidant activity analysis of polyphenols from red bean peel[J]. Chinese Journal of food, 2020, 20 (1): 147-157.
- [23] 周艳华. 超声波法提取荞麦多酚及其稳定性分析[J]. 食品科技, 2021, 46(4): 188-194.
 ZHOU Y H. Ultrasonic extraction of polyphenols from buckwheat and its stability analysis[J]. Food science and technology, 2021, 46 (4): 188-194.
- [24] 卫春会, 张兰兰, 邓杰, 等. 桑葚花青素超声波辅助提取工艺优化[J]. 食品工业, 2020, 41(12): 96-100.
 WEI C H, ZHANG L L, DENG J, et al. Optimization of ultrasonic assisted extraction process of mulberry anthocyanins [J]. Food industry, 2020, 41 (12): 96-100.
- [25] CHEMAT F, ROMBAUT N, SICAIRE A G, et al. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review [J]. Ultrasonics sonochemistry, 2017, 34: 540-560.
- [26] 吴海燕, 张新宇, 陈建军, 等. 反相高效液相色谱法测定芥菜中的维生素C[J]. 中国果菜, 2020, 40(2): 44-47+53.
 WU H Y, ZHANG X Y, CHEN J J, et al. Determination of vitamin C in shepherd's purse by RP HPLC[J]. Chinese fruit and vegetable, 2020, 40 (2): 44-47+53.
- [27] WENG L C, ELSAWAH A M, FANG K T. Cross-entropy loss for recommending efficient fold-over technique[J]. Journal of Systems Science & Complexity, 2021, 34(1): 402-439. 