

# 超声-负压法提取藜麦皂苷及其活性研究

芦晓芳, 唐雨薇, 高春艳, 张永坡, 岳爱琴, 赵晋忠\*

山西农业大学, 太谷 030801

**摘要:**本文以藜麦皂苷为研究对象,基于单因素试验,以皂苷提取率为指标,通过响应面法优化,结合藜麦粉末SEM表征,以获得皂苷的超声-负压提取最佳工艺参数。藜麦皂苷粗提物经正丁醇萃取后,探讨其体外抗氧化活性及相关机理。实验结果表明:超声-负压法提取藜麦皂苷最佳工艺参数;超声时间20 min、超声温度59 °C、负压0.064 MPa,该条件下皂苷得率(预测值12.37 mg/g,实验值 $11.95 \pm 0.034$  mg/g)最高,三因素对皂苷得率的影响顺序:负压>超声温度>超声时间。藜麦皂苷在浓度范围(0~0.25 mg/mL)内有较强的还原力和清除DPPH自由基的能力,抗氧化活性与其浓度呈正相关。

**关键词:**藜麦皂苷;超声-负压辅助提取;响应面优化;抗氧化活性

中图分类号:Q69

文献标识码:A

文章编号:1001-6880(2022)3-0465-08

DOI:10.16333/j.1001-6880.2022.3.014

## Study on extraction of quinoa saponins by ultrasonic negative pressure method and its activity

LU Xiao-fang, TANG Yu-wei, GAO Chun-yan, ZHANG Yong-po, YUE Ai-qin, ZHAO Jin-zhong\*

Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

**Abstract:** In this paper, quinoa saponins as the research object, based on single factor experiment, with saponins extraction yield as index, through response surface method optimization, combined with quinoa powder SEM characterization, in order to obtain the optimal process parameters of ultrasonic-vacuum extraction of saponins. After the crude extract of quinoa saponins was extracted with n-butanol, its antioxidant activity and related mechanism were investigated. The experimental results showed that the optimal process parameters for the extraction of quinoa saponins by ultrasonic-negative pressure method were as follows: ultrasonic time 20 min, ultrasonic temperature 59 °C, negative pressure 0.064 MPa. Under this condition, extraction yield was the highest (the predicting value was 12.37 mg/g, and the experimental value was  $11.95 \pm 0.034$  mg/g). The influence order of the three factors on the yield of quinoa saponins was as follows: negative pressure > ultrasonic temperature > ultrasonic time. Quinoa saponins had strong reducing power and DPPH free radical scavenging ability in the concentration range (0-0.25 mg/mL), and its antioxidant activity was positively correlated with its concentration.

**Key words:** quinoa saponins; ultrasonic-negative pressure assisted extraction; response surface optimization; antioxidant activity

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.)苋科藜属双子叶植物,原产于南美洲安第斯山区,具有营养成分全面、保健功效显著、耐逆境胁迫能力强等特点<sup>[1]</sup>。其中皂苷是其主要的营养物质<sup>[2]</sup>,它具有抗氧化清除自由基、镇痛、抗炎、抗真菌等生物活性,可作为制药工业原料<sup>[3,4]</sup>。在藜麦皂苷生物活性的研究上,多为抗氧化活性、抑菌活性以及免疫增强等方

面<sup>[5]</sup>。基于传统提取法,Dong 等<sup>[6]</sup>通过响应面设计,获得藜麦麸皮总皂苷的最佳提取工艺组合:乙醇浓度75%、超声温度45 °C、料液比15 mL/g、超声时间1.5 h,此条件下皂苷得率可达(2.370+0.022)%。Du 等<sup>[7,8]</sup>利用高速逆流色谱法,分离得到藜麦种皮皂苷。为进一步提高藜麦皂苷的提取率,国内外学者引入超声、微波等辅助作用<sup>[9]</sup>达到改进藜麦皂苷的提取方法。

本文以白藜麦籽粒为原料,基于超声辅助提取法,引入外加负压,探寻超声时间、温度及负压等操

作条件对藜麦皂苷提取率的影响,通过响应面试验获得超声-负压辅助提取藜麦皂苷的最佳工艺条件,为藜麦皂苷的提取及相关产品开发高效、绿色提取提供数据支撑。采用饱和正丁醇萃取法分离纯化藜麦皂苷粗提物,得到藜麦总皂苷,对其进行体外活性实验,考察其体外抗氧化活性,这将为藜麦皂苷的生产制备及在医药和功能食品开发应用及其作用机制提供重要参考依据,也有利于其进一步开发利用,扩大藜麦的应用范围及商业价值,达到藜麦资源的充分、高效利用。

## 1 实验方法

### 1.1 材料与仪器

齐墩果酸标品(110709-201607,中国食品药品检定研究院);DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼)(PRPDE-JO,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司);其他试剂均为分析纯。

HH-4 数显恒温水浴锅(常州普天仪器制造有限公司);UV1100 分光光度计(长沙科美分析仪器有限公司);DL-0506 低温冷却液循环泵(河南兄弟仪器设备有限公司);YRE2000E 旋转蒸发仪(巩义市予华仪器有限责任公司);SHZ-D(Ⅲ)型循环水真空泵(郑州予华仪器制造有限公司);YXSF-500 中药粉碎机(上海百航实业有限公司);KM-300DE 中文液晶台式超声波清洗器(昆山美美超声仪器有限公司);扫描电子显微镜 VEGA II RSU 型(TESCAN 公司)。

### 1.2 测试方法

#### 1.2.1 材料预处理

白藜麦种子(山西岚县)粉碎后过孔径 0.42 mm 筛,制得藜麦粉末。将藜麦粉末置于石油醚中浸泡过夜,反复 2~3 次,至石油醚溶液无色为止,抽滤后自然晾干,即为脱脂藜麦粉末样品,备用。

#### 1.2.2 齐墩果酸标准曲线的绘制

准确称取 4.000 0 mg 齐墩果酸标准品,无水甲醇溶解并定容,得到浓度 0.20 mg/mL 的标准溶液,分别准确吸取 0.015、0.030、0.045、0.060、0.075、0.090 mL 的齐墩果酸甲醇溶液,置于 20 mL 具塞试管中,70 ℃ 水浴挥干溶剂,冰水浴中冷却后,加入 0.20 mL 5% 的香草醛-冰醋酸显色剂和 0.80 mL 80% 浓硫酸,摇匀;70 ℃ 水浴加热 15 min,冰水浴冷却后加入 5.00 mL 冰醋酸稀释,摇匀,静置 15 min;齐墩果酸标准溶液于分光光度计 300~900 nm 处进行扫描,选定最大吸收波长,即为检测波长;以空白为对照,

在最大吸收波长处测定不同浓度标准溶液吸光度。以吸光度为纵坐标,浓度为横坐标绘制标准曲线,建立回归方程<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.3 样品溶液的制备

1.000 0 g 去脂藜麦粉末中加入 20.00 mL 浓度为 70% 的乙醇溶液,于一定的超声时间、超声温度和附加负压条件下提取藜麦皂苷,过滤,将滤液置于 70 ℃ 水浴锅上水浴蒸干,用甲醇溶解并定容至 25.00 mL,即得样品溶液。

#### 1.2.4 藜麦皂苷含量的测定

准确量取 0.25 mL 样品溶液置于 20.00 mL 具塞试管中,70 ℃ 水浴挥干溶剂,采用“1.2.2”的方法,最大吸收波长处测定其吸光度,根据标准曲线回归方程计算得到皂苷浓度。

#### 1.2.5 皂苷得率计算

藜麦皂苷得率计算如公式(1)所示。

$$\text{皂苷得率} = \frac{CV}{m} \quad (1)$$

式中,皂苷得率的单位为 mg/g;C 表示根据标准曲线求得的皂苷浓度(mg/mL);V 表示提取液总体积(mL);m 表示样品质量(g)。

#### 1.2.6 藜麦皂苷提取的单因素试验

精密称取脱脂藜麦粉末 1.000 0 g,按表 1 所示考察超声时间、超声温度和负压等单因素条件对藜麦皂苷提取得率的影响。乙醇浓度 70%,料液比 1:20,超声功率 270 W,超声温度 40 ℃ 时,考察超声时间对皂苷得率的影响;乙醇浓度 70%,料液比 1:20,超声功率 270 W,超声 20 min 时,考察超声温度对皂苷得率的影响;乙醇浓度 70%,料液比 1:20,超声功率 270 W,负压 10 min,超声 20 min,超声温度 60 ℃ 时,考察负压对皂苷得率的影响。采用“1.2.4”方法测定藜麦皂苷的浓度,采用“1.2.5”方法计算藜麦皂苷得率。

#### 1.2.7 响应面试验

在基于单因素实验,设计 Box-Behnken 中心组合实验,进行三因素三水平的试验设计,选取上述三个影响因素为自变量,进行响应面分析试验。

#### 1.2.8 藜麦总皂苷 SEM 表征

利用扫描电子显微镜分析和描述藜麦籽粒细胞壁结构在不同提取条件下提取皂苷后的变化。SEM 表征检测条件为:加速电压(HV)20.0 kV,工作距离(WD)7.08 mm,放大(MAG)200 kx。

表 1 藜麦皂苷提取单因素实验条件( $n=3$ )Table 1 Single factor experimental conditions for extraction of quinoa saponin ( $n=3$ )

因素 Factor	变量 Variable quantity
超声时间 Ultrasonic time( min )	5 , 10 , 15 , 20 , 25
温度 Temperature( °C )	20 , 30 , 40 , 50 , 60
负压 Negative pressure( MPa )	0.03 , 0.04 , 0.05 , 0.06 , 0.07

### 1.2.9 藜麦皂苷的纯化

藜麦皂苷纯化过程中,针对大孔树脂吸附法分离纯化效率低和硅胶柱层析法易吸附难脱附的局限,采用正丁醇萃取法精制藜麦皂苷,具体步骤:甲醇溶解藜麦皂苷粗提物,水饱和的正丁醇溶液萃取,合并正丁醇萃取液,旋蒸冷却,藜麦皂苷析出。经正丁醇萃取得到的藜麦皂苷纯度及产量都显著高于大孔树脂吸附法和硅胶柱层析法。

### 1.2.10 藜麦总皂苷活性

将样品母液稀释不同倍数,以Vc为阳性对照分析藜麦皂苷的抗氧化活性。采用普鲁士蓝显色法<sup>[11]</sup>通过皂苷还原Fe<sup>3+</sup>能力评价皂苷总还原力;皂苷对清除DPPH自由基的能力按Bai等<sup>[12]</sup>的方法评价。

$$\text{清除率} = \left( \frac{A_c - A_i}{A_c} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $A_c$  表示未加样品溶液的DPPH溶液的吸光度;  $A_i$  表示藜麦皂苷样品或抗坏血酸与DPPH试剂混合液的吸光度。

### 1.3 数据处理

以Origin 2017绘制单因素试验等图表( $n=3$ )采用Design Expert 12软件进行Box-Behnken设计及分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 最大吸收波长的确定

按照“1.2.1”的方法将齐墩果酸标准溶液显色后,用紫外分光光度计在300~900 nm处进行扫描,齐墩果酸标准溶液和藜麦皂苷提取液显色后吸收曲线图如图1a和1b所示。由图1a可知,齐墩果酸标准品在551 nm附近有最大吸收,由图1b可知,藜麦皂苷提取液在551 nm附近有较大吸收,确定551 nm为其最大吸收波长。

### 2.2 齐墩果酸标准曲线

齐墩果酸标准曲线如图2所示,由图2可知,标准曲线回归方程为 $y = 66.74x - 0.03419$ ,  $R^2 = 0.9987$ ,在此范围内(0~0.03 mg/mL)有良好的线性关系。

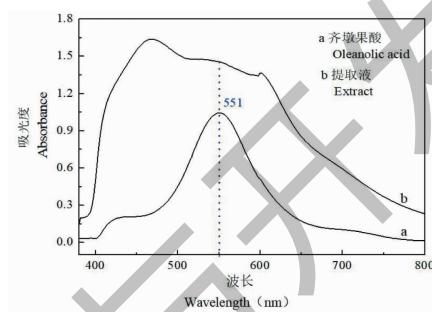


图1 齐墩果酸标准溶液(a)和藜麦皂苷提取液(b)显色后吸收曲线

Fig. 1 Absorption curve of oleanolic acid standard solution (a) and quinoa saponin extract (b) after coloration

该齐墩果酸的标准曲线可用于检测样品中藜麦皂苷含量范围为0~14.40 mg/g。

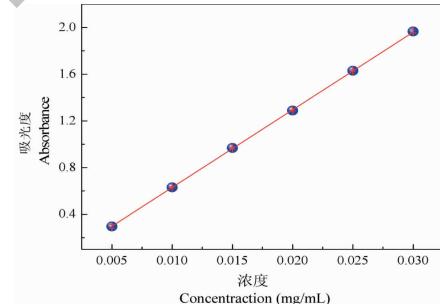


图2 齐墩果酸标准曲线

Fig. 2 Standard curve of oleanolic acid

### 2.3 单因素实验结果

#### 2.3.1 超声时间对藜麦总皂苷得率的影响

乙醇浓度70%、料液比1:20、超声功率270 W和超声温度40 °C条件下,超声时间对藜麦总皂苷提取得率的影响结果如图3所示。由图3可知,超声时间为5 min到20 min之间时,皂苷得率随超声时间的增加整体呈增加的趋势;当超声时间由20 min到25 min时,藜麦皂苷得率随时间的增加呈减少趋势。这可能是因为当超声时间较短时,藜麦中皂苷的提取率随着时间的增加而增多,而当时间过长时,提取量随时间的变化不显著,且超声波有可能会对

皂苷的结构造成了破坏,导致皂苷得率下降。因此,超声时间为 20 min 时是最优提取条件,此时藜麦皂苷提取率达到  $10.58 \pm 0.007 \text{ mg/g}$ 。

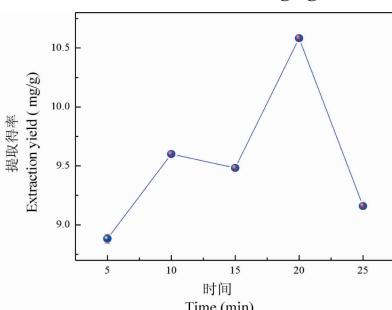


图 3 超声辅助提取法中超声时间对藜麦总皂苷得率的影响

Fig. 3 Effect of ultrasonic time on the yield of saponins in ultrasound-assisted extraction

### 2.3.2 超声温度对藜麦总皂苷得率的影响

乙醇浓度 70%、料液比 1:20、超声功率 270 W 和超声 20 min 条件下,超声温度对藜麦总皂苷得率的影响结果如图 4 所示。由图 4 可知,在超声温度在 20 ℃ 到 60 ℃ 的范围内,藜麦皂苷得率与超声温度呈正相关。因为皂苷在高温下更易溶解,但温度过高可能会使皂苷失活,所以把超声温度为 60 ℃ 作为最优提取条件,此时藜麦皂苷提取率达到  $11.82 \pm 0.027 \text{ mg/g}$ 。

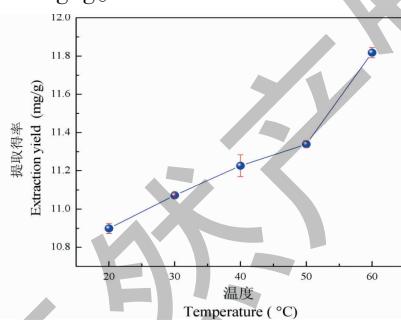


图 4 超声辅助提取法中超声温度对藜麦总皂苷得率的影响

Fig. 4 Effect of ultrasonic temperature on the yield of saponins in ultrasound-assisted extraction

### 2.3.3 负压对藜麦总皂苷得率的影响

乙醇浓度 70%、料液比 1:20、超声功率 270 W、超声 20 min、超声温度 60 ℃ 和负压 10 min 条件下,负压对藜麦皂苷得率的影响如图 5 所示。由图 5 可知,在负压 0.03 MPa 到 0.04 MPa 以及 0.06 MPa 到 0.07 MPa 间皂苷得率与负压呈正相关,在 0.04 MPa

到 0.06 MPa 间皂苷得率随负压增加呈下降趋势,且整体误差偏大,有可能是因为外加的负压不好控制操作所导致的。因为在负压为 0.04 MPa 时藜麦的皂苷得率最高,所以选择 0.04 MPa 作为最优提取条件,此时藜麦皂苷提取率达到  $11.83 \pm 0.025 \text{ mg/g}$ 。

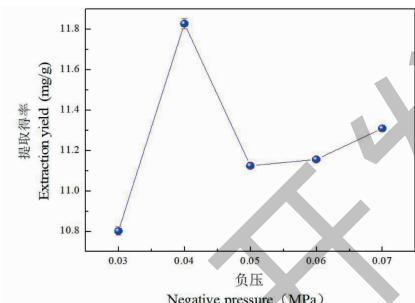


图 5 超声-负压辅助提取法中外加负压对藜麦总皂苷得率的影响

Fig. 5 Effect of negative pressure on the yield of saponins in ultrasonic-negative pressure assisted extraction

### 2.4 响应面实验设计及结果分析

根据超声-负压辅助提取法的单因素实验结果,选取超声时间、超声温度以及负压三个因素,以藜麦皂苷得率为影响值,利用 Design Expert 12 软件进行 Box-Behnken 试验设计,因素水平表见表 2。

表 2 Box-Behnken 试验因素水平表

Table 2 Box-Behnken test factor level

水平 Level	因素 Factor		
	A 时间 Time (min)	B 温度 Temperature (℃)	C 负压 Negative pressure (MPa)
-1	15	50	0.03
0	20	60	0.04
1	25	70	0.05

将各因素按表 2 所示的因素水平,通过响应面分析法进行三因素三水平的实验设计优化超声-负压辅助提取法的工艺条件,结果如表 3 所示。

通过 Design Expert 12 软件对数据进行回归拟合分析,得到藜麦皂苷得率与超声时间(A)、超声温度(B)、负压(C)之间的多元二次回归模型方程为:

$$Y = 12.12 + 0.0667 \times A - 0.1018 \times B + 0.2002 \times C + 0.0339 \times AB - 0.0045 \times AC - 0.0520 \times BC - 0.3606 \times A^2 - 0.8107 \times B^2 - 0.0439 \times C^2$$

试验结果方差分析如表 4 所示。由表 4 可知,模型的  $P$  值  $= 0.0032 < 0.01$ , 回归模型具有高度的

表 3 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 3 Box-Behnken experimental design and results

实验号 Test number	A (min)	B (°C)	C (MPa)	Y 皂苷得率 Extraction rate (mg/g)
1	-1	-1	0	11.07
2	1	1	0	10.90
3	0	0	0	11.92
4	1	0	1	11.83
5	0	1	-1	10.98
6	-1	0	-1	11.60
7	1	0	-1	11.68
8	1	-1	0	11.20
9	0	0	0	12.38
10	0	0	0	12.21
11	0	0	0	11.98
12	0	1	1	11.52
13	0	-1	1	11.66
14	0	0	0	12.12
15	0	-1	-1	10.92
16	-1	1	0	10.64
17	-1	0	1	11.77

显著性,失拟值  $P = 0.3074 > 0.05$ ,失拟不显著,说明二次响应曲面回归方程能够很好地拟合本试验所

得的结果。

回归模型决定系数  $R^2 = 0.9272$ ,表明得率的实际值和预测值之间有较好的拟合度,可以很好地描述回归方程各因素与响应值之间的关系。模型调整决定系数  $R_{\text{Adj}}^2 = 0.8335$ ,表明模型可以解释 83.35% 的响应值变化。

由表 4 可知,二次项  $A^2$ 、 $B^2$  的  $P$  值均小于 0.01,对皂苷得率的影响高度显著,一次项  $C$  的  $P$  值小于 0.05,对皂苷得率的影响显著,其余项对皂苷得率影响不显著。

从  $F$  值的大小可以看出,三个因素对藜麦皂苷得率的影响次序为:负压 > 超声温度 > 超声时间。

基于二次回归模型,各因素间交互影响的响应面和等高线如图 6 所示。由图 6a 可知,皂苷得率随着超声时间和超声温度两因素强度的增大而增大,到达极值后随着超声时间的增大而减小;由图 6b 可知,超声时间与超声温度的变化等高线呈椭圆形,说明超声时间和超声温度两因素对皂苷得率影响的交互作用显著,且超声温度较超声时间对皂苷得率影响稍大,与方差分析结果相符。由图 6c 可知,皂苷得率随着超声时间的增大而增大,到达极值后随着超声时间的增大而减小,在实验范围内(0.03~0.05 MPa)皂苷得率随着负压的增大而增大;由图 6d 可知,负压的变化曲面比超声时间的变化曲面陡峭,说

表 4 回归方程方差分析表  
Table 4 Regression equation analysis of variance table

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value	显著性 Significance
模型 Model	3.96	9	0.4398	9.9	0.0032	显著
<i>A</i>	0.0356	1	0.0356	0.8017	0.4003	
<i>B</i>	0.0828	1	0.0828	1.8700	0.2143	
<i>C</i>	0.3206	1	0.3206	7.22	0.0312	
<i>AB</i>	0.0046	1	0.0046	0.1035	0.7571	
<i>AC</i>	0.0001	1	0.0001	0.0018	0.9669	
<i>BC</i>	0.0108	1	0.0108	0.2438	0.6366	
$A^2$	0.5474	1	0.5474	12.32	0.0099	
$B^2$	2.77	1	2.77	62.3	<0.0001	
$C^2$	0.0081	1	0.0081	0.1825	0.6820	
残差 Residual	0.3109	7	0.0444			
失拟项 Lack of fit	0.1733	3	0.0578	1.68	0.3074	不显著
净误差 Pure error	0.1376	4	0.0344			
总离差 Cor total	4.27	16	$R^2 = 0.9272$	$R_{\text{Adj}}^2 = 0.8335$		

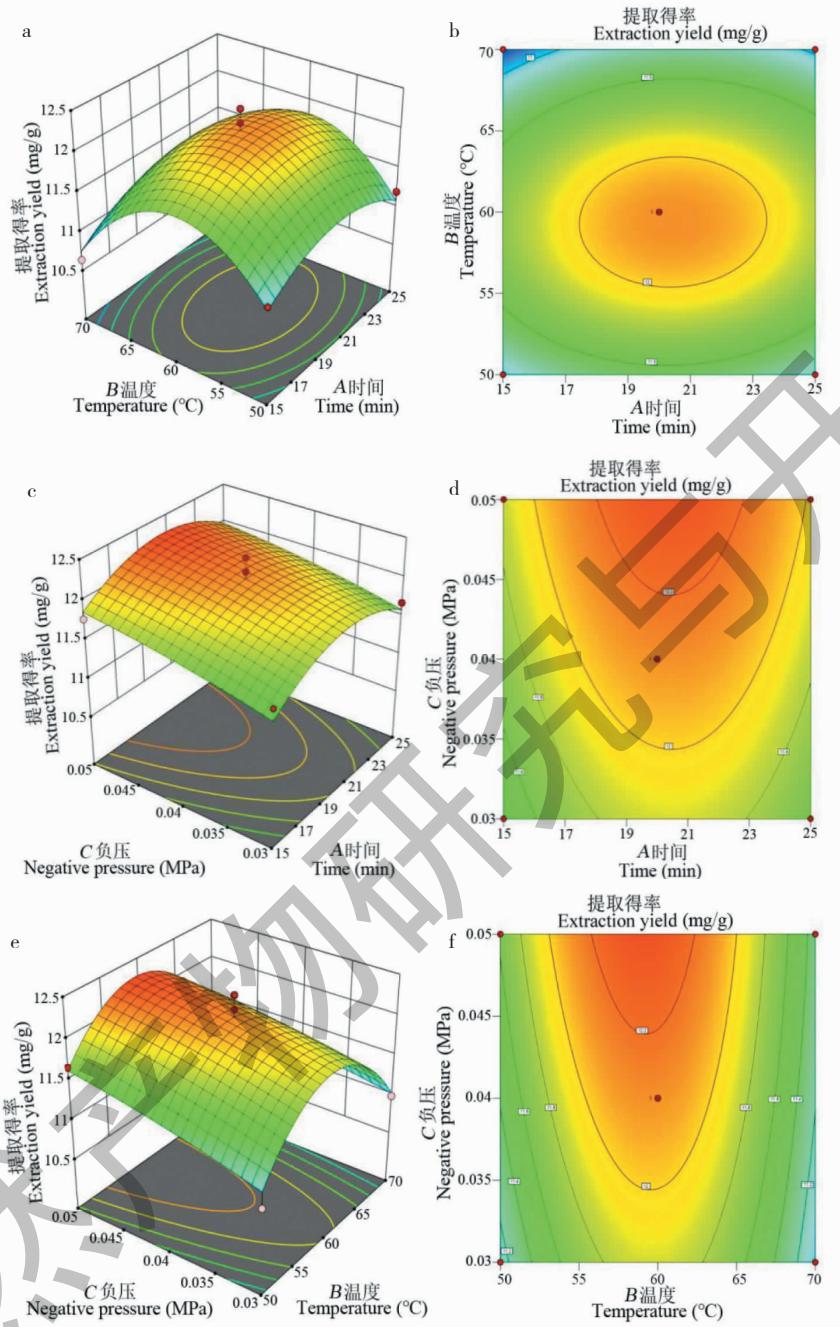


图 6 因素交互作用对藜麦皂苷提取得率的影响

Fig. 6 Factors interaction effects on total saponins extraction yield from quinoa

明负压较超声时间对皂苷得率影响更显著,与方差分析结果相符。由图 6e 可知,皂苷得率随着超声温度的增加而增大,到达极值后随着超声温度的增大而减小,在实验范围内(0.03~0.05 MPa)皂苷得率随着负压的增大而增大;由图 6f 可知,负压的变化曲面比超声温度的变化曲面陡峭,说明负压较超声温度对皂苷得率影响更显著,与方差分析结果相符。

综上实验结果,依据响应面分析得到超声-负压辅助提取法提取藜麦皂苷的最佳工艺条件为:超声时间 20 min、超声温度 59 °C、负压 0.065 MPa,该工艺参数下藜麦皂苷得率预测值为 12.37 mg/g。该条件下重复 3 次平行实验,皂苷提取量为  $11.95 \pm 0.034$  mg/g,与皂苷得率预测值相近,说明响应面优化获得的最佳提取工艺参数可靠。

## 2.5 不同方法提取藜麦皂苷样品粉末 SEM 表征

超声时间 20 min 时,超声温度及负压对藜麦细胞壁破损程度的影响结果如图 7 所示。由图 7 可知,反光越强,细胞壁越完整,由此可知,不同提取条件下藜麦籽细胞的破损程度依次为:(IV)超声温度 59 ℃、负压 0.065 MPa > (III)超声温度 60 ℃、负压 0.04 MPa > (II)超声温度 60 ℃ > (I)超声温度 40 ℃。

压  $0.04 \text{ MPa} > (\text{II})\text{超声温度 } 60^\circ\text{C} > (\text{I})\text{超声温度 } 40^\circ\text{C}$ ;其对应的藜麦皂苷得率分别为  $11.95 \pm 0.034 \text{ mg/g} > 11.83 \pm 0.025 \text{ mg/g} > 11.82 \pm 0.027 \text{ mg/g} > 10.58 \pm 0.007 \text{ mg/g}$ 。细胞破损程度越大,藜麦皂苷得率越高。

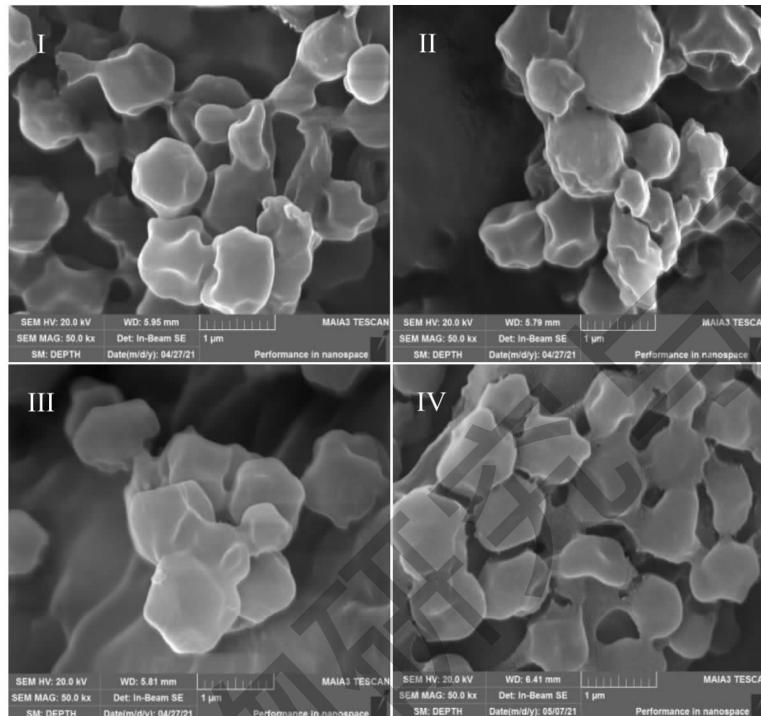


图 7 藜麦粉不同提取条件作用后的 SEM 图

Fig. 7 SEM image of quinoa powder after different extraction conditions

注:(I)超声温度 40 ℃;(II)超声温度 60 ℃;(III)超声温度 60 ℃,负压 0.04 MPa;(IV)超声温度 59 ℃,负压 0.065 MPa。

Note:(I) Ultrasonic temperature is 40 °C;(II) Ultrasonic temperature is 60 °C;(III) Ultrasonic temperature is 60 °C, negative pressure is 0.04 MPa;(IV) Ultrasonic temperature is 59 °C, negative pressure is 0.065 MPa.

## 2.6 藜麦皂苷的活性测定

### 2.6.1 还原力的测定

藜麦皂苷总还原力结果如图 8 所示。藜麦皂苷

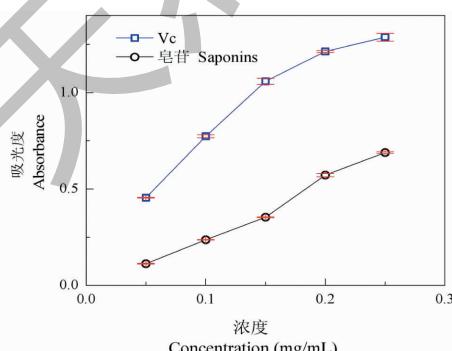


图 8 藜麦皂苷的总还原力

Fig. 8 Total reducing power of quinoa saponins

的总还原力与其浓度呈正相关,虽然藜麦皂苷较抗坏血酸的还原力差,但也具有一定的还原能力。藜麦皂苷在浓度为 0.25 mg/mL 时的还原能力分别是浓度为 0.05 mg/mL 时的 6.1 倍、浓度为 0.10 mg/mL 时的 2.9 倍,在实验的浓度范围(0 ~ 0.25 mg/mL)内,总还原力随着浓度的增加而增大。

### 2.6.2 清除 DPPH 自由基能力的测定

藜麦皂苷清除 DPPH 自由基能力结果由图 9 所示。在实验浓度范围内(0 ~ 0.25 mg/mL),藜麦皂苷对 DPPH 自由基有清除能力与皂苷浓度呈正相关,当浓度达到 0.25 mg/mL 时,清除率达到了  $(78.93 \pm 2.052)\%$ ,是浓度为 0.05 mg/mL 时的 7.6 倍、浓度为 0.10 mg/mL 时的 4.7 倍,与抗坏血酸相比略低,但也有良好的清除能力。

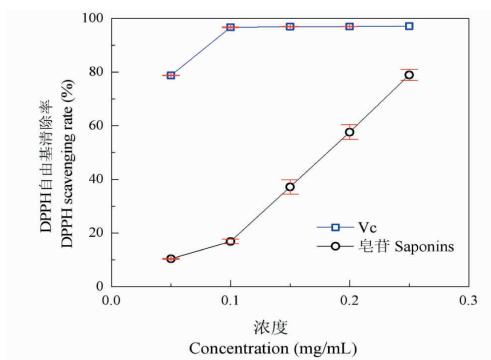


图 9 黎麦皂苷清除 DPPH 自由基的能力

Fig. 9 The ability of quinoa saponins to scavenge DPPH free radicals

### 3 结论

采用超声-负压辅助提取藜麦种子中的皂苷,基于单因素(超声时间、超声温度和负压)试验,以藜麦皂苷得率为考察指标,考察超声时间、超声温度和负压等条件对藜麦皂苷得率的影响,通过响应面法优化藜麦皂苷提取工艺条件,获得藜麦皂苷最佳提取工艺条件:超声时间 20 min、超声温度 59 °C、负压 0.064 MPa,该条件下藜麦皂苷提取得率( $11.95 \pm 0.034$  mg/g)最高,接近藜麦皂苷提取得率的预测值(12.37 mg/g)。提取三因素对藜麦皂苷得率的影响顺序为:负压 > 超声温度 > 超声时间。经正丁醇萃取纯化后的藜麦皂苷抗氧化活性研究结果表明,在实验选取的浓度范围内(0 ~ 0.25 mg/mL),藜麦皂苷有较强的还原力和清除 DPPH 自由基的能力,且与其浓度呈正相关,当浓度达到 0.25 mg/mL 时,DPPH 自由基清除率达到了( $78.93 \pm 2.052$ )%。

### 参考文献

- Xiao ZC, Zhang GL. Development and utilization of *Chenopodium quinoa* Willd [J]. Chin Wild Plant Res(中国野生植物资源), 2014, 33(2):62-66.
- Graf BL, Rojas-Silva P, Rojo LE, et al. Innovations in health value and functional food development of quinoa(*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. Compr Rev Food Sci F, 2015, 14: 431-445.
- Luo XX, Qin PY, Yang XS, et al. Changs of functional component content and antioxidant activity during the growth of quinoa sprouts [J]. Crops(作物杂志), 2018, 183(2):123-128.
- Lin M, Han P, Li Y, et al. Quinoa secondary metabolites and their biological activities or functions [J]. Molecules, 2019, 24(13):1-47.
- Fang Y. Extraction and purification of saponins from quinoa seeds its antimicrobial, anticancer activities, *in vitro* [D]. Changchun: Jilin Agricultural University(吉林农业大学), 2019.
- Dong Q, Tan L, Hu N, et al. Study on the optimization of the extraction technology by response surface methodology and inhibitory activity of  $\alpha$ -glucoside of total saponins from *Chenopodium quinoa* Willd [J]. Nat Prod Res Dev(天然产物研究与开发), 2021, 33:935-942.
- Du JT, Chen C, Fan SH. Optimization of extraction conditions for saponins from *Chenopodium quinoa* bran by response surface method and its antioxidant activities [J]. J Shanxi Agr Sci(山西农业科学), 2016, 44:932-937.
- Du JT. Extraction, purification, antioxidant and antimicrobial of saponin in *Chenopodium quinoa* Willd. seed coat and component identification of aglycone [D]. Taiyuan: Shanxi University(山西大学), 2017.
- Zhao EL, Yang J. Research progress on extraction and purification technology of sapin in *Chenopodium quinoa* and its bioactivity [J]. Mol Plant Breed(分子植物育种), 2019, 17:5816-5821.
- Gianna V, Montes J M, Calandri E L, et al. Impact of several variables on the microwave extraction of *Chenopodium quinoa* Willd saponins [J]. Int J Food Sci Tech, 2012, 47: 1593-1597.
- İşl Berker K, Güclü K, Tor i, et al. Total antioxidant capacity assay using optimized ferricyanide/prussian blue method [J]. Food Anal Methods, 2010, 3(3):154-168.
- Bai HJ, Jiang HB, Luo F. Study on extraction and scavenging activity against DPPH free radical of pigment from *Lycium ruthenicum* [J]. Acta Agr Bor-occid Sin(西北农业学报), 2007, 16(2):190-192.