

响应面法优选芜菁中蛋白质的提取工艺及蛋白质 抗氧化活性的评估

胡尔西丹·伊麻木^{1#}, 李亚童^{1#}, 乔丽洁¹, 莫罕美竟也², 海力茜·陶尔大洪^{1*}, 杨 飞^{3*}

(1. 新疆医科大学药学院, 乌鲁木齐 830011; 2. 南安普顿大学商学院, 南安普顿 SO17 1BJ;

3. 新疆维吾尔自治区分析测试研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘 要: **目的** 借助单因素实验和响应面法优选芜菁中蛋白质的提取工艺, 并评估芜菁蛋白质的抗氧化活性。**方法** 采用超声辅助提取芜菁中蛋白质。通过单因素实验, 选取实验因素与水平, 分别研究了料液比、超声功率、超声提取时间、提取温度对蛋白提取量的影响。根据 Box-Behnken 中心组合实验设计原理, 采用 3 因素 3 水平的响应面分析法, 对蛋白质的提取工艺进行优化, 同时通过比较芜菁蛋白质与维生素 C 对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基的清除能力, 评估芜菁蛋白质抗氧化活性。**结果** 优化后的芜菁蛋白提取工艺条件为: 料液比 1:18.88(m/V), 超声功率 120 W, 超声提取时间 6.12 min。当芜菁蛋白质溶液质量浓度为 25 mg/mL 时, 对 DPPH 自由基的清除率为 99.3%。在此条件下得出的芜菁的蛋白质含量为 21.71 mg/g, 与预测值相近。**结论** 在最优条件下, 芜菁中蛋白质的提取率得到了提高。其对 DPPH 的清除能力随其质量浓度的增大而增强; 其清除能力弱于抗坏血酸。

关键词: 芜菁; 蛋白质; 响应面优化; 单因素实验; 抗氧化活性

Optimization of the extraction process of *Brassica rapa* L. protein by response surface methodology and evaluation of its antioxidant activity

HUERXIDAN Yi-Ma-Mu^{1#}, LI Ya-Tong^{1#}, QIAO Li-Jie¹, MOHANMEIJINGYE²,
HAILIQIAN Tao-Er-Da-Hong^{1*}, YANG Fei^{3*}

(1. School of Pharmacy, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011, China;

2. School of Business, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom;

3. Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Analysis and Testing, Urumqi 830011, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the extraction process of protein from *Brassica rapa* L. by single factor experiment and response surface method, and evaluate the antioxidant activity of the protein. **Methods** The protein

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技厅项目(2017D01C202)、自治区“十三五”重点学科建设经费支持(1007)

Fund: Supported by Xinjiang Uygur Autonomous Region Science and Technology Department project (2017D01C202), and the key disciplines construction in the 13th five-year plan of the autonomous region (1007)

[#]胡尔西丹·伊麻木和李亚童为并列第一作者

[#]HUERXIDAN Yi-Ma-Mu and LI Ya-Tong are co-first author

***通讯作者:** 海力茜·陶尔大洪, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天然药物研究与开发。E-mail: hailiqian2471@sina.com

杨飞, 高级实验师, 主要研究方向为天然产物分析研究。E-mail: 279533257@qq.com

***Corresponding author:** HAILIQIAN Tao-Er-Da-Hong, Professor, College of Pharmacy, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011, China. E-mail: hailiqian2471@sina.com

YANG Fei, senior experimentalist, Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Analysis and Testing, Urumqi 830011, China. E-mail: 279533257@qq.com

from *Brassica rapa* L. was extracted through ultrasound-assisted method. Experiment factors and levels were selected by one-factor tests and the effects of solid-liquid ratio, ultrasonic power, ultrasonic extraction time, and extraction temperature on the extraction of protein were studied. According to the Box-Behnken center-union experimental design principles, the method of response surface analysis with 3 factors and 3 levels was adopted to optimize the extraction technology. Meanwhile, the antioxidant capacity of the protein from *Brassica rapa* L. was evaluated.

Results The optimum extraction conditions by response surface method were as follow: solid-liquid ratio 1:18.88(m/V), ultrasonic power 120 W, ultrasonic extraction time 6.12 min. When the protein mass concentration was 25 mg/mL, the scavenging rate on DPPH free radical was 99.3%. The total protein content of the *Brassica rapa* L. obtained under the conditions was 21.71 mg/g, similar to the predicted value. **Conclusions** Under the optimal conditions, the extraction rate of protein from *Brassica rapa* L. is improved. The scavenging capacity on DPPH free radical increases along with the increase of the protein concentration, which is inferior to that of ascorbic acid.

KEY WORDS: *Brassica rapa* L.; protein; response surface optimization; single factor test; antioxidant activity

1 引言

芜菁(*Brassica rapa* L.)也叫蔓菁、莞根、恰麻古,是十字花科,芸苔属,且有较长历史的药食同源类植物,为新疆地道药材。各地均以十字花科芜菁入药,恰麻古药用历史悠久,最早可追溯到汉朝^[1-4]。新疆芜菁中含有黄酮、皂苷等有效成分,具有抗肿瘤、抗衰老、免疫调节等功能,芜菁块根汁和叶汁具有很强的防辐射、抗诱变作用,还具有健胃、消食、开胸顺气等药理作用^[5-7]。最近医药学研究发现,芜菁含糖类、生物碱类、酚类、蛋白质等化学成分^[8]。将各种植物蛋白与动物蛋白质合理搭配,不仅可提供人体必需的各种氨基酸,还可降低各种疾病的发病率,提高免疫力、抗氧化、抗肿瘤、抑制肝硬化^[9]。充分利用植物蛋白资源,提高其利用效率,使其更好地为人们所利用,这也是今后研究开发的热点。

植物蛋白质提取方法主要有水相酶解法^[10]、碱溶酸沉法^[11]及反胶束萃取法^[12]、超声波提取技术等^[13,14]。超声波具有的空化效应,可把声场能量集中起来,伴随微气泡崩溃可瞬间产生较强的机械剪切力,促使蛋白质释放出来,是常用的植物蛋白提取方法^[15,16]。响应面法在实验设计与工艺优化研究中被广泛应用,随着对响应面法研究的深入,优化算法和实验设计方法的进一步发展,对芜菁蛋白质提取工艺方法的优选有了更好的选择。本研究以芜菁为原料,用蒸馏水进行超声提取,以蛋白提取量为指标,采用响应面法优选芜菁中蛋白质的提取工艺,并对蛋白质抗氧化活性进行评估,以期对芜菁的综合利用提供参考依据。

2 材料与方法

2.1 实验材料

2.1.1 样品与试剂

芜菁样品采自新疆柯坪县。

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)(批号:20130826,南京都来生物技术有限公司);考马斯亮蓝 G-250 固体、牛血清蛋白固体、无水乙醇、磷酸、氯化钠(分析纯,天津富宇有限公司);维生素 C 标准品(分析纯,天津市北辰方正试剂厂)。

2.1.2 实验仪器

UV-2550 紫外分光光度计(日本岛津公司);AB135-S 分析天平($d=0.01/0.1$ mg,瑞士 Mettler-Teledo 公司);SK5200HP 超声清洗器(上海科导超声仪器有限公司);TDL-80-2C 高速离心机(上海安亭科学仪器厂)。

2.2 实验方法

2.2.1 药材前处理

取一定量的芜菁,于 60 °C 下干燥 2 h,冷却至室温后粉碎,粉末过 60 目筛,即为实验用芜菁粉末。将药材经洗净切丝后,避光通风处晾干,取适量芜菁干燥药材,研钵适当研磨成粉,并过 60 目筛,常温储存备用。

准确称取芜菁粉末 7.5 g,超声辅助提取 1 h。以转速 4000 r/min 离心 20 min,取上清液,抽滤,得样品提取液。

取样品提取液,用超声提取法沉淀蛋白质。加入氯化钠固体搅拌,得到沉淀后以 4000 r/min 离心 10 min。得到沉底的蛋白质,放入真空干燥箱中干燥,研磨均匀,得到蛋白质粉末。

2.2.2 溶液配制

(1)标准蛋白溶液配制

精密称取牛血清蛋白 0.010 g,用蒸馏水溶解,转移至 10 mL 容量瓶中,定容至刻度线,得到 1.0 mg/mL 标准蛋白对照品溶液,于 4 °C 冰箱保存。

(2)考马斯亮蓝 G-250 溶液配制

精密称取 0.175 g 考马斯亮蓝 G-250,溶于 50 mL 95%(体积分数)乙醇后,加入 85%(体积分数)的磷酸 100 mL,摇匀,为储备液。取储备液 30 mL,加 95%的乙醇 15 mL,85%的磷酸 30 mL,蒸馏水 425 mL,摇匀,待用。

2.2.3 鉴别实验

用芜菁粉末提取液做双缩脲反应, 蛋白质沉淀反应和茚三酮实验。检测提取液中是否含有蛋白质。

2.2.4 标准曲线的绘制

分别量取 0、0.02、0.04、0.05、0.06、0.08、0.10 mL 的牛血清蛋白溶液于 7 个 10 mL 具塞试管中, 各加水至 1.0 mL, 加考马斯亮蓝 G-250 溶液 4 mL, 摇匀, 室温放置 5 min 后, 于 595 nm 处测吸光度 A 值, 以 A 值为纵坐标(Y), 以浓度(mg/mL)为横坐标(X), 绘制标准曲线。

2.2.5 方法学验证

(1) 精密度实验

称取 2 g 芜菁粉末, 在响应面分析后的最优提取条件下制备提取液。吸取提取液 0.2 mL, 连续测定吸光度 A 值 6 次, 计算相对标准偏差(relative standard deviation, RSD), 评价该方法精密度是否良好。

(2) 重复性实验

称取 2 g 芜菁粉末, 共 6 份, 分别在最优提取条件下制备提取液溶液, 精密吸取提取液 0.2 mL, 测定吸光度 A 。计算 RSD 值, 评价该方法重复性是否良好。

(3) 稳定性实验

精密称取 2 g 粉末, 吸取提取液 0.2 mL, 在 0、15、30 min 时分别测吸光度 A , 计算 RSD 值, 评价样品提取液在 30 min 内稳定性是否良好。

2.2.6 提取液中蛋白质的含量测定

蛋白提取量($\mu\text{g}/\text{kg}$)= $C \times V \times N / (m \times 1000)$

式中: C 为标准曲线得出的蛋白质含量, $\mu\text{g}/\text{mL}$; V 为提取液体积, mL; N 为稀释倍数; m 为样品质量, g。

2.2.7 单因素实验

(1) 温度对芜菁蛋白提取量的影响

在料液比为 1:10 g/mL, 超声时间为 60 min, 功率为 150 W 的条件下, 考察不同提取温度(30、40、50、60、70 °C)对芜菁蛋白提取量的影响, 每组实验重复 3 次。

(2) 料液比对芜菁蛋白提取量的影响

在提取温度为 50 °C, 超声时间为 60 min, 功率为 150 W 的条件下, 考察不同料液比(1:10、1:15、1:20、1:25、1:30 g/mL)对芜菁蛋白提取量的影响, 每组实验重复 3 次。

(3) 功率对芜菁蛋白提取量的影响

在提取温度为 50 °C, 料液比为 1:10 g/mL, 超声时间为 60 min 的条件下, 考察不同功率(90、105、120、135、150 W)对芜菁蛋白提取量的影响, 每组实验重复 3 次。

(4) 超声时间对芜菁蛋白提取量的影响

在提取温度为 50 °C, 料液比为 1:10 g/mL, 功率为 150 W 的条件下, 考察不同超声时间(5、10、15、20、25 min)对芜菁蛋白提取量的影响, 每组实验重复 3 次。

2.2.8 响应面实验设计

依据单因素实验结果, 选取 3 个因素为响应面实验设计中的关键因素, 以蛋白提取量为响应值进行工艺条件优

化, 设计 3 因素 3 水平的 Box-Behnken 中心组合实验。

2.2.9 芜菁蛋白质抗氧化活性的测定

(1) DPPH 溶液的制备

取 0.0010 g DPPH 固体, 用无水乙醇溶解, 定容至 25 mL, 摇匀, 现配现用。

(2) 维生素 C 对照品溶液的制备

取维生素 C 固体 0.0020 g, 用无水乙醇溶解, 定容至 10 mL, 现配现用。

(3) 蛋白质抗氧化活性实验

分别配制 2.5、5.0、10.0、15.0、25.0 mg/mL 的芜菁蛋白质溶液, 取各蛋白质溶液 1 mL 于试管中, 再分别加入 DPPH 溶液 2 mL, 混合均匀后避光静置 30 min, 以无水乙醇与水 2:1(体积比)混合调零, 在波长 517 nm 处测得分光光度值 A_1 ; 以蒸馏水代替蛋白质溶液, 重复以上操作测得分光光度值 A_0 ; 以无水乙醇代替 DPPH 溶液, 测得各浓度蛋白质的分光光度值 A_2 。按公式计算各蛋白质质量浓度对 DPPH 自由基的清除率, 并以维生素 C 作对照。

$$\text{DPPH 清除率}(\%) = (A_0 - A_1 + A_2) / A_0 \times 100\%$$

3 结果与分析

3.1 蛋白质鉴别实验

蛋白质与双缩脲反应呈紫红色; 蛋白质与茚三酮反应现象为蓝色, 盐析后发生沉淀。说明芜菁药粉提取液中含有蛋白质。

3.2 方法学验证

3.2.1 标准曲线

在 2.00~16.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的浓度范围内, 标准曲线方程为 $Y = 0.0122X + 0.018$, $r^2 = 0.9990$ 。方法线性良好。

3.2.2 精密度实验

按标准曲线制备项下操作, 重复测定吸光度 6 次, 计算得到的 RSD 值为 0.19%(<2%), 说明方法精密度好。

3.2.3 重复性实验

重复试验 6 次, 计算得到的 RSD 值为 1.5%(<2%), 说明该方法的重复性良好。

3.2.4 稳定性实验

分别在 0、15、30 min 测定吸光度, 重复测定吸光度 6 次, 计算得到的 RSD 值为 11.0%(>2%), 说明样品提取液在 30 min 内稳定性很差。

3.3 单因素实验

3.3.1 温度对芜菁蛋白提取量的影响

温度与芜菁蛋白提取量的关系如图 1, 可知在 30~70 °C 提取温度区间内, 随着温度升高的蛋白提取量无明显提高($P > 0.05$), 温度对蛋白质提取量影响不显著, 不适合选取作为响应面分析水平因素。考虑到蛋白质的温度过高会变性, 将提取温度设为 50 °C。

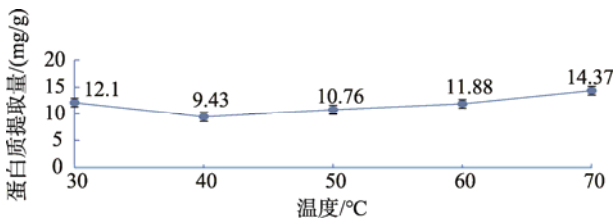


图 1 温度与芜菁蛋白提取量的关系($n=3$)
Fig.1 Relationship between temperature and protein extraction from turnips ($n=3$)

3.3.2 料液比对芜菁蛋白提取量的影响

料液比对芜菁蛋白提取量的影响见图 2。可知随料液比的增加, 蛋白提取量明显下降($P<0.05$)。当料液比到达 1:10 g/mL 时, 蛋白的提取量最高。但由于实际情况限制, 提取液难以提出。故选择将料液比定为 1:15 g/mL。

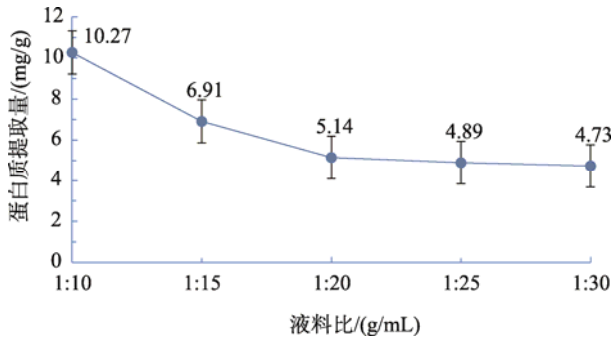


图 2 料液比与芜菁蛋白提取量的关系($n=3$)
Fig.2 Relationship between the ratio of material to liquid and the amount of protein extracted from turnips ($n=3$)

3.3.3 功率对芜菁蛋白提取量的影响

功率对芜菁蛋白提取量的影响见图 3。可知, 蛋白提取量在功率为 105 W 最高, 因此本研究将功率确定为 105 W。

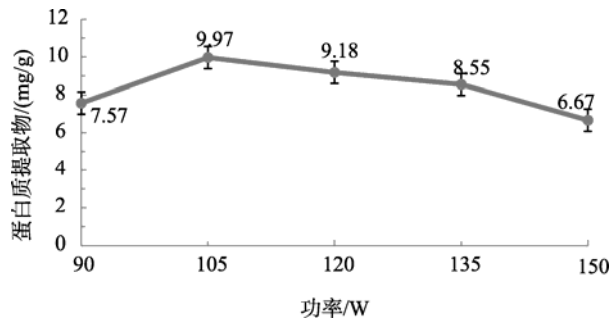


图 3 功率与芜菁蛋白提取量的关系($n=3$)
Fig.3 Relationship between power and protein extraction from turnips($n=3$)

3.3.4 超声时间对芜菁蛋白提取量的影响

超声时间对芜菁蛋白提取量的影响见图 4。可知, 当超声时间为 10 min 时, 蛋白的提取量最高, 之后随着超声时间的加长, 蛋白提取量明显下降($P>0.05$)。所以本研究超声时间确定为 10 min。

综合 4 个因素对芜菁蛋白质提取量的影响结果, 发现温度相对于其他 3 个因素对结果的影响并不明显。因此选择功率、超声时间、料液比 3 个因素进行响应面优化。

3.4 响应面法实验分析

3.4.1 芜菁蛋白质提取量响应面优化提取条件

选取功率(A), 超声时间(B), 料液比(C)等 3 个因素, 如表 1。以蛋白提取量为响应值(Y)进行工艺条件优化, 设计为 Box-benhknen 中心组合实验。

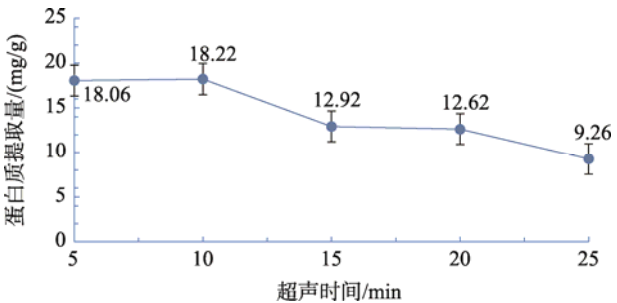


图 4 超声时间与芜菁蛋白提取量的关系($n=3$)
Fig.4 Relationship between ultrasonic time and protein extraction from turnips($n=3$)

表 1 因素水平表
Table 1 Factor level table

实验号	A	B	C	Y/(mg/g)
1	0	0	0	10.05
2	0	0	0	10.05
3	-1	0	+1	9.82
4	0	-1	-1	11.67
5	0	-1	+1	12.82
6	0	+1	+1	11.16
7	-1	-1	0	10.34
8	0	0	0	10.05
9	0	0	0	10.05
10	+1	+1	0	18.88
11	0	+1	-1	10.78
12	-1	+1	0	8.615
13	-1	0	-1	9.71
14	0	0	0	10.05
15	+1	-1	0	19.03
16	+1	0	-1	13.54
17	+1	0	+1	19.74

回归方程方差分析结果见表 3, 模型误差失拟项中 $P > 0.05$, 说明该方程对实验拟合度较好, 可以利用上述模型预测提取条件对蛋白质提取量的影响。由 F 值可得各因素对茺菁蛋白提取率的影响顺序为: 超声功率 $>$ 料液比 $>$ 超声时间。A、 A^2 对蛋白质提取量影响极显著, C、AC、 B^2 对蛋白质提取量影响较为显著, 其他因素影响不显著。

表 3 回归方程系数显著性检验结果
Table 3 Test results of coefficient significance of regression equation

项系数	自由度 Df	平方和 SS	均方 MS	F 值	P 值
常数项	9	198.61	22.07	24.52	0.0002
A	1	133.7	133.7	148.57	<0.0001
B	1	2.45	2.45	2.72	0.1431
C	1	7.68	7.68	8.54	0.0223
AB	1	0.62	0.62	0.69	0.4339
AC	1	9.27	9.27	10.30	0.0149
BC	1	0.15	0.15	0.16	0.2697
A^2	1	34.94	34.94	38.82	0.0004
B^2	1	6.96	6.96	7.73	0.0273
C^2	1	0.31	0.31	0.35	0.5750

3.4.3 各因素对茺菁蛋白提取率的响应面分析

功率和超声时间对茺菁多酚得率的交互作用如图 5 所示。可知, 料液比为 1:15 g/mL 时, 功率一定时, 蛋白质提取量随着超声时间的升高呈先下降后上升趋势。当超声时间一

定时, 功率达到 105 W, 可以获得较高的蛋白质含量。

料液比和功率对茺菁多酚得率的交互作用见图 6。可以看出, 当超声时间为 10 min, 料液比一定时, 蛋白质提取率随着功率的升高呈增加趋势。当料液比一定, 功率达到 120 W 时, 蛋白质提取率较高。

超声时间和料液比对茺菁多酚得率的交互作用见图 7。可以看出, 当超声功率为 105 W, 料液比一定时, 蛋白质提取量随着时间升高呈先减小后缓慢增加的趋势。当超声时间一定, 料液比达到 1:20 g/mL 时, 蛋白质提取率较高。

综上所述, 功率(A)与料液比(C)的交互作用较为明显, 功率(A)与超声时间(B), 料液比(C)与时间(B)的相互影响不明显, 与上述的模型方差分析结果一致。

3.5 验证实验

在选取的各因素范围内, 根据回归模型通过 Design-Expert 软件分析得出, 茺菁蛋白质最佳提取条件为功率 120 W、超声时间 6.12 min、料液比 1:18.88 g/mL, 蛋白质提取量的预测值为 20.03 mg/g。考虑到实际操作的便利, 确定蛋白质的超声辅助提取工艺条件为功率 120 W、超声时间 6 min、料液比 1:20 g/mL。为了证实预测结果, 在最佳提取工艺条件下重复实验 3 次, 重复实验结果见表 4。可知, 蛋白质含量实测值与预测值相差不大, 说明该方程与实际情况拟合较好, 充分验证了所建模型的正确性, 说明响应曲面法适用于对茺菁蛋白质的超声辅助提取工艺进行回归分析和参数优化。

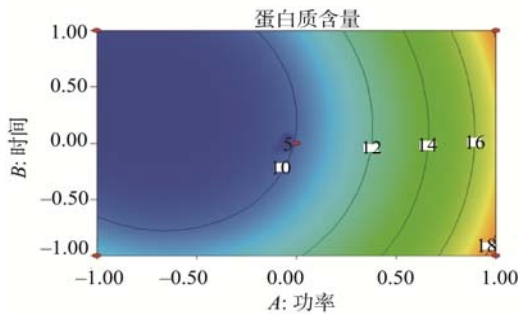


图 5 功率和超声时间对茺菁多酚得率的交互作用

Fig.5 Interaction of power and ultrasonic time on the yield of turnip polyphenols

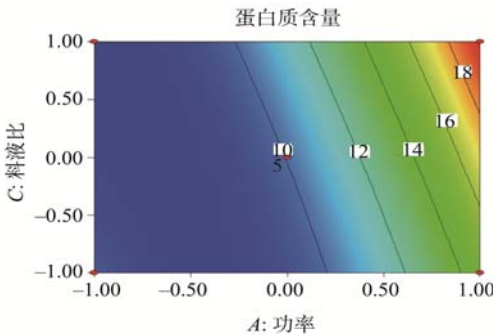
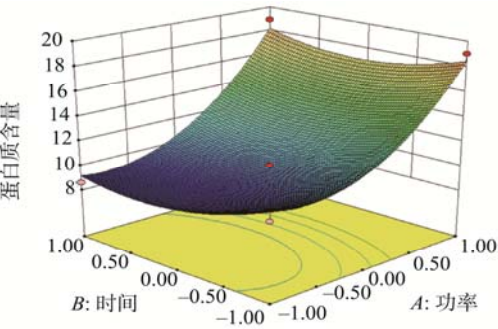
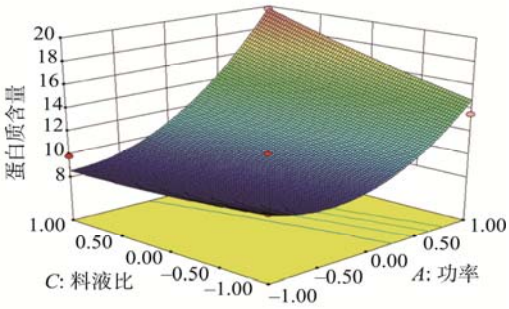


图 6 料液比和功率对茺菁多酚得率的交互作用

Fig.6 Interaction of liquid ratio and power on the yield of turnip polyphenols



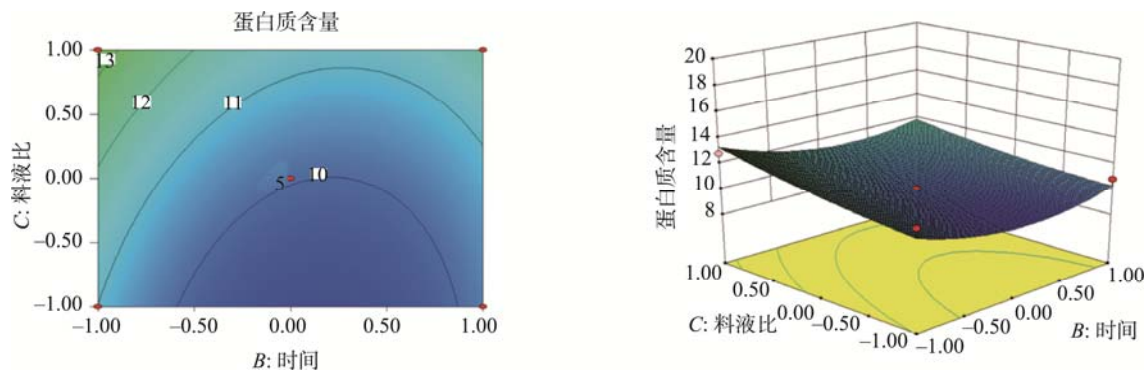


图 7 超声时间和料液比对茺菁多酚得率的交互作用
Fig.7 Interaction of ultrasonic time and liquid ratio on the yield of turnip polyphenols

表 4 重复实验结果			
Table 4 Results of repeated experiments			
吸光度值	蛋白质含量/(mg/g)	平均含量/(mg/g)	预测值/(mg/g)
0.587	22.15		
0.569	21.45	21.71	20.03
0.571	21.53		

3.6 茺菁蛋白质抗氧化活性的测定

维生素 C 与茺菁蛋白质对 DPPH 自由基的清除能力对比图如图 8 所示。茺菁蛋白质在 2.5~25 mg/mL 浓度范围内, 随着蛋白质浓度的升高, 对 DPPH 自由基的清除率增加, 当茺菁蛋白质浓度为 25 mg/mL 时清除率达最大值。相同浓度的维生素 C 对 DPPH 自由基总体表现出很强的清除能力。茺菁蛋白质具有一定的抗氧化能力, 但它对 DPPH 的清除效果总体要弱于维生素 C 的作用效果。

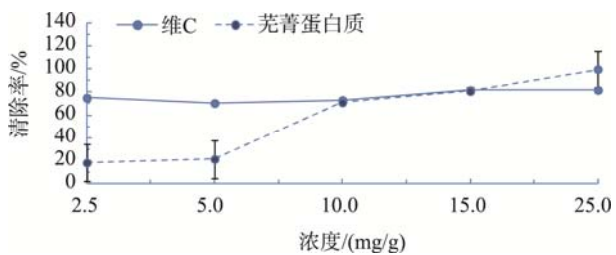


图 8 维生素 C 与茺菁蛋白质对 DPPH 自由基的清除能力图(n=3)
Fig.8 DPPH free radical scavenging capacity of vitamin C and turnip protein (n=3)

4 结论与讨论

本研究采用采取超声辅助法提取茺菁中蛋白质, 响应面法对茺菁中蛋白质的提取进行优化, 确定最佳提取工艺条件为料液比 1:18.88 g/mL, 超声功率 105 W, 超声提取时间 6.12 min。此外, 本研究采用体外清除 DPPH 自由基能力的方法评价不同浓度的茺菁蛋白质体外抗氧化活性,

结果显示茺菁蛋白质质量浓度越高, 对 DPPH 自由基的清除率越高, 但清除能力总体弱于 VC, 说明茺菁蛋白质有一定的抗氧化活性, 但弱于 VC。研究结果对于茺菁蛋白质的利用及相关药品或保健产品的研制具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 李雅双, 连路宁, 阿西娜, 等. 茺菁化学成分及生物活性的研究进展[J]. 时珍国医国药, 2013, 24(9): 2247–2249.
Li YS, Lian LM, A XN, et al. Advances in the study of chemical constituents and biological activities of turnip [J]. Lishizhen Med Mater Med Res, 2013, 24(9): 2247–2249.
[2] 陶弘景. 名医别录[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2013.
Tao HJ. Records of famous doctors [M]. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 2013.
[3] 苏敬. 新修本草[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005.
Su J. New pruning herb [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005.
[4] 李时珍. 本草纲目[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2011.
Li SZ, Compendium of materia medica [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2011.
[5] Mittal R, Kodiyan J, Gerring R, et al. Role of innate immunity in the pathogenesis of otitis media [J]. Int J Infect Dis, 2014, 29(10): 259–267.
[6] 安熙强, 马媛, 张涛, 等. 维药恰玛古粉和蜜膏对辐射损伤防护的对比[J]. 科技导报, 2010, 28(10): 28–31.
An XQ, Ma Y, Zhang T, et al. Comparison of radiation damage protection between uygur medicine chamagu powder and honey paste [J]. Sci Technol Rev, 2010, 28(10): 28–31.
[7] 廖作庄. 肉桂多酚的药理作用及其机制研究进展[J]. 右江医学, 2018, 46(3): 359–362.
Liao ZZ. Advances in pharmacological action and mechanisms of cinnamon polyphenols [J]. Chin Youjiang Med J, 2018, 46(3): 359–362.
[8] 吴蕊, 雷敏, 常明泉, 等. 中药中植物蛋白研究进展[J]. 医药前沿, 2018, 8(15): 9–11.
Wu R, Lei M, Chang MQ, et al. Research progress of plant protein in traditional Chinese medicine [J]. Front Med, 2008, 8(15): 9–11.
[9] 尤新. 有益人类健康的植物多酚类功能性食品添加剂和配料[J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 18–22.

- You X. Plant polyphenols functional food additives and ingredients for human health [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, 33(12): 18–22.
- [10] 孙红. 水相法提取亚麻籽油与蛋白质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- Sun H. Study on the extraction of linseed oil and protein by aqueous phase method [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [11] 赵玉红, 林洋, 张智, 等. 碱溶酸沉法提取黑木耳蛋白质研究[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(16): 32–36.
- Zhao YH, Lin Y, Zhang Z, *et al*. Optimization of alkali extraction of protein from *Auricularia auricula* [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(16): 32–36.
- [12] 郭珍, 陈复生, 李彦磊, 等. 反胶束萃取技术及其在植物蛋白质提取中的应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2013, 29(1): 245–247.
- Guo Z, Chen FS, Li YL, *et al*. Reverse micelles technology and its application and research progress on plant protein extraction [J]. *Food Mach*, 2013, 29(1): 245–247.
- [13] 黄晓辉, 王颖, 林辉. 超声波提取茶渣中蛋白质的工艺研究[J]. *化学工程与装备*, 2019, (10): 4–8.
- Huang XH, Wang Y, Lin H. Study on extraction of protein from tea residue by ultrasonic power [J]. *Chem Eng Equip*, 2019, (10): 4–8.
- [14] 胡爱军, 田方园, 卢秀丽, 等. 超声辅助提取亚麻籽粕分离蛋白工艺研究[J]. *粮食与油脂*, 2013, 26(8): 32–34.
- Hu AJ, Tian FY, Lu XL, *et al*. Ultrasonic assisted extraction of flaxseed meal protein isolate [J]. *Cere Oil*, 2013, 26(8): 32–34.
- [15] 张美枝, 李正英. 苦杏仁蛋白溶解特性的研究[J]. *食品工业科技*, 2005, 26(6): 79–83.
- Zhang MZ, Li ZY. Study on the soluble properties of bitter amygdalin [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2005, 26(6): 79–83.
- [16] 王怡婷, 杨恒, 张新笑, 等. 超声波辅助提取鹅肝蛋白质及其物化性质和结构[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(18): 240–246.
- Wang YT, Yang H, Zhang XX, *et al*. Ultrasound-assisted extraction of goose liver protein and its physicochemical properties and structure [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2019, 47(18): 240–246.
- [17] 韩典峰, 邹荣婕, 宫向红, 等. 响应面法优化铜藻中岩藻黄素的提取工艺[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(8): 149–155.
- Han DF, Zou RJ, Gong XH, *et al*. Optimization of extraction process for fucoxanthin from *Sargassum horneri* by response surface methodology [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(8): 149–155.

(责任编辑: 李磅礴)

作者简介



胡尔西丹·伊麻木, 博士, 副教授, 主要研究方向为天然药物化学。
E-mail: 13699985912@163.com



李亚童, 硕士, 主要研究方向为天然药物研究与开发。
E-mail: 945299780@qq.com



海力茜·陶尔大洪, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天然药物研究与开发。
E-mail: hailiqian2471@sina.com



杨 飞, 高级实验师, 主要研究方向为天然产物分析研究。
E-mail: 279533257@qq.com