

芝麻叶中多酚的提取、成分分析及抗氧化活性

崔艳平, 郝征红, 莫丽媛, 聂鑫杰, 张淦淇, 孙庆泽

(山东农业工程学院 山东省教育厅重点实验室“特色农产品采后品控与综合利用”, 济南 250100)

摘要: 为了对芝麻叶的开发提供参考, 以芝麻叶超微粉为原料, 以芝麻叶多酚提取率为指标, 通过单因素实验和响应面实验优化超声微波协同辅助提取芝麻叶多酚的工艺条件。采用 HPLC 测定了芝麻叶多酚中绿原酸、咖啡酸、对香豆酸、阿魏酸、柚皮苷含量, 并测定了芝麻叶多酚的 DPPH·、ABTS⁺·清除能力和 Fe³⁺还原力。结果表明: 芝麻叶多酚最佳提取工艺条件为料液比 1:30、乙醇体积分数 70%、浸提温度 45℃、超声功率 160 W、超声时间 25 min、微波功率 400 W、微波时间 2 min, 在此条件下芝麻叶多酚提取率为 4.46%; 芝麻叶多酚中阿魏酸含量最高, 为 2.068 mg/g, 未检出对香豆酸; 芝麻叶多酚能够有效清除 DPPH·及 ABTS⁺·, 也具有一定的 Fe³⁺还原力。综上, 芝麻叶多酚具有一定的抗氧化活性, 可以通过超声微波辅助的方法从芝麻叶中高效提取。

关键词: 芝麻叶; 多酚化合物; 超声微波辅助提取; 抗氧化活性; 成分

中图分类号: TS229; TQ645.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)02-0123-06

Extraction, components and antioxidant activity of polyphenols from sesame leaves

CUI Yanping, HAO Zhenghong, MO Liyuan, NIE Xinjie, ZHANG Ganqi, SUN Qingze

("Post-harvest Quality Control and Comprehensive Utilization of Featured Agricultural Products")

Key Laboratory of Shandong Provincial Department of Education, Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan 250100, China)

Abstract: In order to provide a reference for the development of sesame leaves, the ultrafine powder of sesame leaves was used as raw material and the extraction rate of polyphenols was used as an indicator, and the technological parameters of ultrasonic-microwave synergistic extraction of polyphenols from sesame leaves were optimized by single factor experiment and response surface methodology. The contents of five phenolic substances (chlorogenic acid, caffeic acid, *p*-coumaric acid, ferulic acid, naringin) in polyphenols were determined by HPLC, and the scavenging ability of DPPH· and ABTS⁺·, and Fe³⁺ reducing power were also determined. The results showed that the optimal conditions of extracting polyphenols from sesame leaves were as follows: solid-liquid ratio 1:30, ethanol volume fraction 70%, extraction temperature 45℃, ultrasonic power 160 W, ultrasonic time 25 min, microwave power 400 W, microwave time 2 min. Under the optimal conditions, the extraction rate of polyphenols from sesame

leaves was 4.46%. The content of ferulic acid in the polyphenols from sesame leaves was the highest, which was 2.068 mg/g, and no *p*-coumaric acid was detected. The polyphenols could effectively remove DPPH· and ABTS⁺·, and had certain Fe³⁺ reducing ability. In conclusion, polyphenols from the sesame leaves have certain antioxidant activity and can be efficiently extracted from sesame leaves by

收稿日期: 2021-12-17; 修回日期: 2022-09-22

基金项目: 山东农业工程学院青年教师科研项目“食品中多酚类的提取、成分分析及抗氧化活性研究”(QNKZY201902); 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019ZZ024); 山东省现代农业产业技术体系蔬菜创新团队贮藏加工岗(SDAIT-05-14)

作者简介: 崔艳平(1986), 女, 讲师, 硕士, 主要从事食品分析的教学与研究工作(E-mail)417158459@qq.com。

通信作者: 郝征红, 教授(E-mail)2461726607@qq.com。

ultrasonic microwave – assisted extraction method.

Key words: sesame leaves; polyphenolic compound; ultrasonic microwave – assisted extraction; antioxidant activity; component

芝麻属于胡麻科胡麻属的一年生草本植物,主要种植在热带地区以及部分温带地区。芝麻是我国主要油料作物之一,主要利用其种子榨油,而对芝麻叶的利用率不高。芝麻叶富含矿物质^[1]、多酚、多糖^[2]、黄酮^[3]等。芝麻叶中多酚以酚酸类化合物为主,主要含有对香豆酸、柚皮苷、绿原酸等。研究发现,多酚类物质能够清除自由基、抗菌、抑制微生物、延缓衰老,具有较大的开发利用潜力^[4-5]。近年来,许多学者开始研究植物中多酚的提取和加工,但对芝麻叶中多酚的研究较少,且多酚提取率仍较低。超声微波辅助提取技术是近年来发展较快的一种提取技术,可以减少芝麻叶中多酚物质的损失。本文以芝麻叶为原料,利用单因素实验和响应面实验优化芝麻叶多酚的提取工艺,对其组成成分和抗氧化活性进行研究,以期对芝麻叶的进一步开发提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

芝麻叶(干叶)。没食子酸标准品(纯度 $\geq 98\%$);多酚标准品(绿原酸、咖啡酸、对香豆酸、阿魏酸、柚皮苷);福林-酚试剂;2,2'-联氨-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐(ABTS),分析纯;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH),分析纯;抗坏血酸(V_C)、石油醚、无水碳酸钠、三氯乙酸、无水乙醇、95%乙醇、过硫酸钾($K_2S_2O_8$)、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、铁氰化钾、氯化铁、三氟乙酸,均为分析纯;2%甲酸、无水甲醇,均为色谱纯;超纯水。

1.1.2 仪器与设备

XO-SM200 超声波微波组合系统;振动式超细粉碎机;V5000 型可见分光光度计;TGL-16M 台式高速冷冻离心机;高效液相色谱仪,珀金埃尔默公司;微波干燥机;真空冷冻干燥器;CW130 型粉碎机;LE104E102 电子天平。

1.2 实验方法

1.2.1 芝麻叶超微粉的制备

先将芝麻叶(干叶)过粉碎机初步粉碎,再过振动式超细粉碎机粉碎 150 s 后取出,过 0.048 mm (300 目)筛,得到芝麻叶超微粉。

1.2.2 芝麻叶多酚的提取

将芝麻叶超微粉经索氏提取得到脱脂芝麻叶超微粉。准确称取 2.000 0 g 脱脂芝麻叶超微粉,按一定料液比加入一定体积分数的乙醇溶液,放入超声波微波组合系统中,设置浸提温度为 45 °C,一定超声功率下超声处理一定时间,然后在一定的微波功率下微波处理一定时间,以 4 000 r/min 离心 20 min,取上清液(多酚提取液)于棕色试剂瓶中,旋转蒸发、冷冻干燥后得到芝麻叶多酚。

1.2.3 芝麻叶多酚提取率的计算

采用 Folin-Ciocalteu 比色法^[6]测定多酚含量。取 1 mL 芝麻叶多酚提取液于 50 mL 容量瓶中,用超纯水定容,从中取 1 mL 于比色管中,加入 0.5 mL 福林-酚试剂、1 mL 7.5% 碳酸钠溶液,避光静置反应 60 min 后,在 765 nm 处^[7]测定吸光度。以没食子酸标准品绘制标准曲线,得到回归方程 $y = 0.008 4x + 0.009 5$ ($R^2 = 0.999 2$)。根据标准曲线回归方程和测得的吸光度计算多酚提取液中多酚含量。按下式计算芝麻叶多酚提取率。

$$Y_1 = CV/m \times 100\% \quad (1)$$

式中: Y_1 为芝麻叶多酚提取率; C 为提取液中多酚的质量浓度, $\mu\text{g/mL}$; V 为提取液总体积, mL ; m 为脱脂芝麻叶超微粉质量, μg 。

1.2.4 芝麻叶多酚组成分析

1.2.4.1 样品处理

准确称取 5 mg 芝麻叶多酚,用色谱级甲醇溶解定容至 50 mL,配制成质量浓度为 0.1 mg/mL 的溶液,分装处理,经 0.45 μm 滤膜过滤后,待分析。

1.2.4.2 标准品工作溶液的制备

取绿原酸(质量浓度为 0.084 4 mg/mL)、咖啡酸(0.334 4 mg/mL)、对香豆酸(0.163 5 mg/mL)、阿魏酸(0.017 6 mg/mL)和柚皮苷(0.347 2 mg/mL)标准品适量,精密称定,置于 10 mL 容量瓶中,加色谱级甲醇溶解并定容,即得混合标准品溶液。精密吸取混合标准品溶液 0.25、0.50、1.00、1.50、2.00、2.50 mL,分别置于 10 mL 容量瓶中,加色谱级甲醇定容,摇匀,得到系列标准品工作溶液。

1.2.4.3 测定

将系列标准品工作溶液进 HPLC,以标准品的

质量浓度为横坐标,峰面积为纵坐标绘制标准曲线,建立回归方程。再将样品溶液进 HPLC,根据其峰面积和标准曲线方程计算不同多酚组分的含量。HPLC 条件:Zorbax S B2 C18 反相色谱柱(4.6 mm × 250 mm, 5 μm);流动相 A 为体积分数 2% 的甲酸,流动相 B 为甲醇,流速 1.0 mL/min;进样量 10 μL;检测波长 310 nm;梯度洗脱程序为 0 min (15% 甲醇)→10 min (20% 甲醇)→20 min (30% 甲醇)→30 min (40% 甲醇)→40 min (50% 甲醇)→50 min (100% 甲醇)。每个样品测试之后用 15% 的甲醇平衡 10 min 再进样。

1.2.5 芝麻叶多酚抗氧化活性测定

1.2.5.1 DPPH·清除率的测定

参照蒋金龙^[8]、胡新颖^[9]等方法,分别移取 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的芝麻叶多酚样液 2 mL 于比色管中,加入 0.2 mol/L DPPH 乙醇溶液 2 mL 混合均匀,室温下暗反应 30 min 后,在 517 nm 处测定吸光度(A)。用蒸馏水代替多酚样液作为对照组,测定吸光度(A₀)。以等体积的无水乙醇代替 DPPH 乙醇溶液作为空白,测定吸光度(A₁)。以 V_c 作为阳性对照。按下式计算 DPPH·清除率(Y₂)。

$$Y_2 = [A_0 - (A - A_1)] / A_0 \times 100\% \quad (2)$$

1.2.5.2 ABTS⁺·清除率的测定

参照徐洪宇^[10]、魏欢^[11]等方法,测定芝麻叶中多酚对 ABTS⁺·的清除能力。在室温和阴暗的条件下将 10 mL 7.4 mmol/L ABTS 溶液和 10 mL 2.6 mmol/L 过硫酸钾溶液混合静置 14~16 h,在使用前用 95% 乙醇稀释至 734 nm 处的吸光度为 0.68~0.72,即为 ABTS 工作液(现配现用)。分别移取 0.04、0.06、0.08、0.10、0.12 mg/mL 的芝麻叶多酚样液 1 mL 于比色管中,加入 4 mL ABTS 工作液,反应 6 min 后于 734 nm 处测定吸光度(A')。空白组以 95% 乙醇替代多酚样液,测其吸光度(A'₀)。以 V_c 为阳性对照。按下式计算 ABTS⁺·清除率(Y₃)。

$$Y_3 = (A'_0 - A') / A'_0 \times 100\% \quad (3)$$

1.2.5.3 Fe³⁺还原力的测定

参考赵秀玲^[12]、颜飞翔^[13]等方法,取 2 mL 不同质量浓度的芝麻叶多酚样液于具塞试管中,加入 2 mL pH 6.6 的磷酸盐缓冲液和 2 mL 1% 铁氰化钾溶液,在 50℃ 水浴中维持 20 min 后,取出迅速冷却至室温,加入 2 mL 10% 三氯乙酸溶液,离心取 2 mL 上清液,加入 4 mL 蒸馏水及 2 mL 0.1% 的三氯化铁溶液,静置 10 min,在 700 nm 处测定吸光度,进行 3 次平行实验。以吸光度大小表示 Fe³⁺还原

力强弱,用 V_c 作为对照。

2 结果与分析

2.1 芝麻叶多酚提取单因素实验

2.1.1 超声时间的影响

在料液比 1:30、乙醇体积分数 70%、超声功率 160 W、微波功率 400 W、微波时间 2 min 条件下,考察超声时间对芝麻叶多酚提取率的影响,结果见图 1。

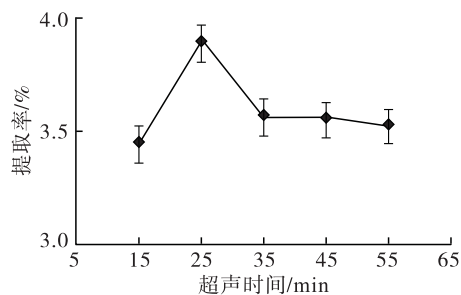


图1 超声时间对芝麻叶多酚提取率的影响

由图 1 可见,随着超声时间的延长,芝麻叶多酚提取率先增加后降低,在超声时间为 25 min 时提取率最高。延长超声时间可促进多酚的溶出,但过长时间的超声处理会产生热效应,使多酚氧化降解^[14],造成多酚提取率下降。

2.1.2 超声功率的影响

在料液比 1:30、乙醇体积分数 70%、超声时间 25 min、微波功率 400 W、微波时间 2 min 条件下,考察超声功率对芝麻叶多酚提取率的影响,结果见图 2。

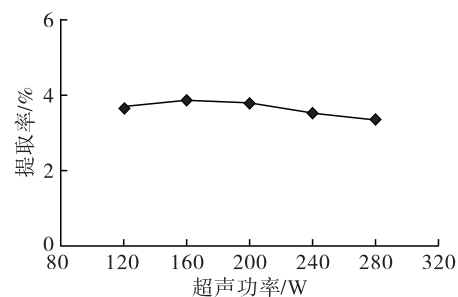


图2 超声功率对芝麻叶多酚提取率的影响

由图 2 可见,随着超声功率的增加,芝麻叶多酚提取率曲线近似抛物线,在超声功率为 160 W 时达到最高。增加超声功率有利于多酚的溶出,但超声功率过高时,超声波的空化作用可能造成多酚的破坏,从而使芝麻叶多酚提取率降低^[15]。

2.1.3 乙醇体积分数的影响

在料液比 1:30、超声功率 160 W、超声时间 25 min、微波功率 400 W、微波时间 2 min 条件下,考察乙醇体积分数对芝麻叶多酚提取率的影响,结果见图 3。

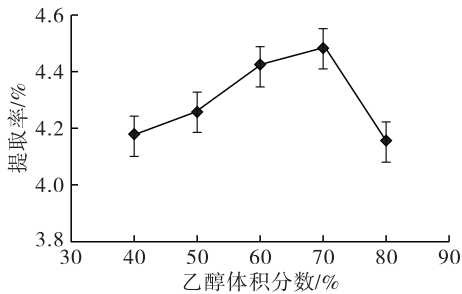


图3 乙醇体积分数对芝麻叶多酚提取率的影响

由图3可见,随着乙醇体积分数的提高,芝麻叶多酚提取率逐渐增大,在乙醇体积分数为70%时达到峰值,之后呈下降趋势。乙醇体积分数增大有利于多酚的溶出,但乙醇体积分数增大到一定程度后,有机溶剂与芝麻叶多酚的极性差异增大,导致多酚提取率降低^[16]。

2.1.4 微波功率的影响

在料液比1:30、乙醇体积分数70%、超声功率160 W、超声时间25 min、微波时间2 min条件下,考察微波功率对芝麻叶多酚提取率的影响,结果见图4。

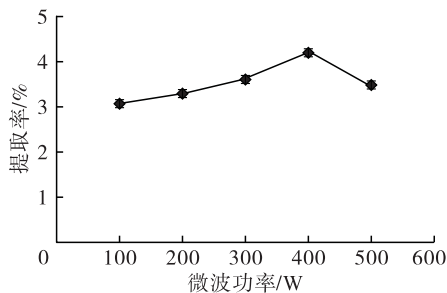


图4 微波功率对芝麻叶多酚提取率的影响

由图4可见,随着微波功率的增大,芝麻叶多酚提取率先增大后减小,在微波功率为400 W时达到最大值。微波功率增大,有利于多酚的溶出,但微波功率过大,导致温度上升太快,使得多酚分解及乙醇挥发的速率加快,造成芝麻叶多酚提取率降低^[17]。

2.1.5 料液比的影响

在乙醇体积分数70%、超声功率160 W、超声时间25 min、微波功率400 W、微波时间2 min条件下,考察料液比对芝麻叶多酚提取率的影响,结果见图5。

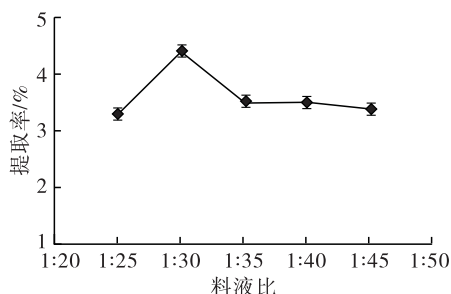


图5 料液比对芝麻叶多酚提取率的影响

由图5可见,随着料液比的增加,芝麻叶多酚提取率先增大后减小,在料液比为1:30时达到峰值。

2.1.6 微波时间的影响

在乙醇体积分数70%、料液比1:30、超声功率160 W、超声时间25 min、微波功率400 W条件下,考察微波时间对芝麻叶多酚提取率的影响,结果见图6。

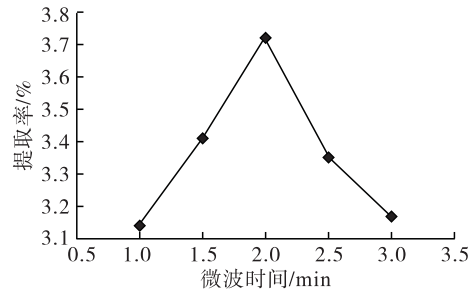


图6 微波时间对芝麻叶多酚提取率的影响

由图6可见,随着微波时间的延长,芝麻叶多酚提取率先增大后减小,在微波时间为2 min时达到最大值。这可能是因为随着微波时间的延长,有利于多酚物质的溶出,但微波时间过长多酚可能会氧化分解,从而使其提取率下降。

2.2 芝麻叶多酚提取响应面实验

2.2.1 响应面模型的建立与分析

基于单因素实验结果,根据Box-Behnken实验中心组合设计原理,在料液比1:30、超声功率160 W、微波功率400 W条件下,以芝麻叶多酚提取率(Y)为响应值,以乙醇体积分数(A)、超声时间(B)、微波时间(C)为自变量,应用响应面分析法对提取工艺进行三因素三水平的实验设计,优化超声微波辅助提取芝麻叶多酚的工艺条件。响应面实验因素和水平见表1,响应面实验设计和结果见表2。

表1 响应面实验因素和水平

水平	乙醇体积分数/%	超声时间/min	微波时间/min
-1	60	15	1.5
0	70	25	2.0
1	80	35	2.5

表2 响应面实验设计和结果

实验号	A	B	C	Y /%
1	0	1	-1	3.57
2	1	0	1	3.45
3	0	-1	-1	3.74
4	1	0	-1	3.65
5	0	-1	1	4.13
6	1	1	0	2.95
7	0	0	0	4.46
8	0	0	0	4.30
9	-1	1	0	3.25
10	-1	-1	0	4.17

续表 2

实验号	A	B	C	Y/%
11	-1	0	-1	3.87
12	0	0	0	4.41
13	0	1	1	3.70
14	-1	0	1	4.05
15	0	0	0	4.45
16	1	-1	0	3.51
17	0	0	0	4.28

利用 Design - Expert 8.0.6.1 软件中 Box - Behnken 设计方法对表 2 实验数据进行回归模型拟合,得到回归模型: $Y = 4.38 - 0.22A - 0.26B + 0.063C + 0.09AB - 0.09AC - 0.06BC - 0.47A^2 - 0.44B^2 - 0.15C^2$ 。对回归模型进行方差分析,结果见表 3。

表 3 方差分析

来源	自由度	平方和	均方	F	p
模型	9	3.07	0.34	14.55	0.001 0 **
A	1	0.40	0.40	16.87	0.004 5 **
B	1	0.54	0.54	23.04	0.002 0 **
C	1	0.03	0.03	1.33	0.286 4
AB	1	0.03	0.03	1.38	0.278 4
AC	1	0.04	0.04	1.54	0.254 9
BC	1	0.02	0.02	0.72	0.424 2
A ²	1	0.93	0.93	39.63	0.000 4 **
B ²	1	0.82	0.82	34.73	0.000 6 **
C ²	1	0.10	0.10	4.31	0.076 5
残差	7	0.16	0.02		
失拟项	3	0.14	0.05	6.33	0.053 4
纯误差	4	0.03	0.01		
总和	16	3.24			

注: ** 表示影响极显著($p < 0.01$), * 表示影响显著($p < 0.05$)

由表 3 可见:模型的 p 值小于 0.01,表示该模型极显著;失拟项 p 值大于 0.05,说明不存在失拟因子。另外,模型的决定系数(R^2)为 0.949 3,大于 0.8^[18],表明该模型拟合良好。因此,可用该回归方程来模拟实际的测试点和结果。

由表 3 还可看出:超声时间和乙醇体积分数对芝麻叶多酚提取率具有极显著影响,3 个因素对芝麻叶多酚提取率的影响大小排序为超声时间 > 乙醇体积分数 > 微波时间;3 个因素的交互项以及微波时间的二次项对芝麻叶多酚提取率的影响均不显著,而超声时间的二次项和乙醇体积分数的二次项影响均极显著。

2.2.2 最佳条件确定及验证

根据响应面实验结果,通过方程求解,确定芝麻叶多酚的最佳提取工艺条件为乙醇体积分数 70%、

超声时间 25 min、微波时间 2 min,该条件下芝麻叶多酚提取率理论值为 4.47%。在最佳条件下进行验证实验,得到芝麻叶多酚提取率为 4.46%,与理论值接近,说明所建模型与实际情况拟合良好,具有使用价值。

2.3 芝麻叶多酚的组成(见表 4)

表 4 芝麻叶多酚组成及含量

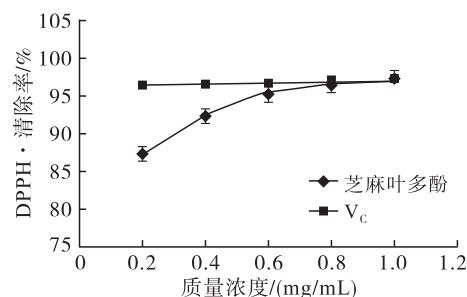
组分	含量 mg/g
绿原酸	0.449
咖啡酸	0.080
对香豆酸	ND
阿魏酸	2.068
柚皮苷	1.450

注:ND 表示未检出

由表 4 可见,芝麻叶多酚中阿魏酸的含量最高,为 2.068 mg/g,其次是柚皮苷、绿原酸、咖啡酸,而对香豆酸未检出。

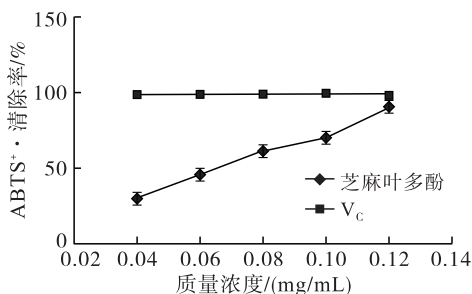
2.4 芝麻叶多酚体外抗氧化活性

2.4.1 DPPH·清除能力(见图 7)

图 7 芝麻叶多酚、V_c对 DPPH·的清除能力

由图 7 可知,芝麻叶多酚对 DPPH·的清除能力随着其质量浓度的增加而提高,当其质量浓度达到 1.0 mg/mL 时,DPPH·清除率达 97.45%。芝麻叶多酚质量浓度在 0.2 ~ 0.8 mg/mL 时,其对 DPPH·的清除能力弱于 V_c,但在质量浓度达到 1.0 mg/mL 时,其对 DPPH·的清除能力强于 V_c,说明芝麻叶多酚对 DPPH·具有较强的清除能力。

2.4.2 ABTS⁺·清除能力(见图 8)

图 8 芝麻叶多酚、V_c对 ABTS⁺·的清除能力

由图 8 可知,芝麻叶多酚对 ABTS⁺·的清除能力随着其质量浓度的增加而增强,当其质量浓度达

到 0.12 mg/mL 时, $ABTS^+$ 清除率达 83.55%, 随着芝麻叶多酚质量浓度的增加, 其对 $ABTS^+$ 的清除能力逐渐接近 V_c 。

2.4.3 Fe^{3+} 还原力(见图 9)

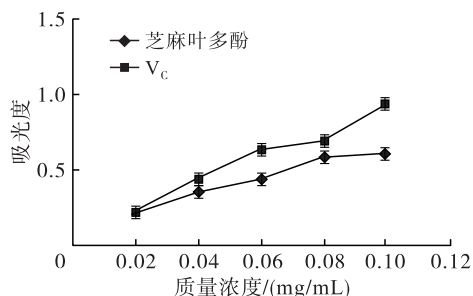


图 9 芝麻叶多酚、 V_c 对 Fe^{3+} 的还原力

由图 9 可知, 随着芝麻叶多酚质量浓度的提高, 其对 Fe^{3+} 的还原力逐渐增强。

3 结论

采用单因素实验和响应面实验对芝麻叶多酚的超声微波辅助提取工艺条件进行优化, 得到芝麻叶多酚的最佳提取工艺条件为乙醇体积分数 70%、料液比 1:30、浸提温度 45 °C、超声功率 160 W、超声时间 25 min、微波功率 400 W、微波时间 2 min, 在此条件下芝麻叶多酚提取率达 4.46%。芝麻叶多酚中阿魏酸含量最高, 为 2.068 mg/g。芝麻叶多酚具有一定的抗氧化活性, 可以通过超声微波辅助的方法从芝麻叶中高效提取。

参考文献:

[1] 刘利娥, 刘洁, 于斐, 等. 原子吸收光谱法测定芝麻叶中矿物元素含量[J]. 现代预防医学, 2009, 36(18): 3517 - 3519, 3523.

[2] NEP E I, CARNACHAN S M, NGWULUKA N C, et al. Structural characterisation and rheological properties of a polysaccharide from sesame leaves (*Sesamum radiatum* Schumach. & Thonn.) [J]. Carbohydr Polym, 2016, 152: 541 - 547.

[3] 黄泽元, 王海滨, 刘志伟. 芝麻叶中总黄酮的最佳提取工艺研究[J]. 农业工程学报, 2004(6): 201 - 204.

[4] 李婷婷, 苗红梅, 汪学德, 等. 不同生长期芝麻叶的主要营养成分变化和多糖提取物的体外抗氧化研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 42 - 49.

[5] 文莎莎, 郭蕊, 于修焯. 芝麻叶功能成分提取及其开发应用研究进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(10): 100 - 105.

[6] 詹莉莉, 章程辉, 常刚, 等. 福林酚比色法测定露兜筋果实中的总多酚[J]. 广东农业科学, 2013, 40(4): 77 - 80.

[7] 邓刚, 母健菲, 刘玉琪, 等. 福林酚比色法和紫外分光光度法测定虫茶中总多酚含量的比较研究[J]. 重庆第二师范学院学报, 2015, 28(5): 167 - 169, 173.

[8] 蒋金龙, 王姝砚, 缪晓青. 蜂胶挥发油提取及其 DPPH 自由基清除率的研究[J]. 海峡科学, 2010(10): 235 - 237.

[9] 胡新颖, 陶玉欣, 李兴国, 等. 大麦多酚抗氧化及抑菌活性的研究[J]. 农产品加工, 2020(18): 12 - 14, 19.

[10] 徐洪宇, 蒯宜蕴, 詹壮壮, 等. 果皮中酚类物质含量、抗氧化活性及在体外消化过程中成分的变化[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 23 - 30.

[11] 魏欢, 颜小捷, 杨建文, 等. 核桃叶多酚含量的测定和抗氧化能力的研究[J]. 广西植物, 2018, 38(5): 596 - 601.

[12] 赵秀玲, 李慕原, 党亚丽. 杭白菊中多酚物质的提取及其抗氧化活性[J]. 精细化工, 2018, 35(6): 974 - 981, 986.

[13] 颜飞翔, 朱丹, 苗欣月, 等. 糜子麸皮中多酚提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(12): 15 - 22.

[14] 郑晓宁, 牟建楼, 陈永浩, 等. 超声辅助分离提取核桃仁种皮多酚研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(10): 64 - 68.

[15] 王娟, 白雪梅, 孟晓, 等. 川产夏秋绿茶茶多酚超声波辅助法提取工艺研究[J]. 轻工科技, 2021, 37(3): 1 - 4.

[16] YANG L, JIANG J G, LI W F, et al. Optimum extraction process of polyphenols from the bark of *Phyllanthus emblica* L. based on the response surface methodology[J]. J Sep Sci, 2009, 32(9): 1437 - 1444.

[17] 许瑞如, 张秀玲, 李晨, 等. 微波提取桔梗根多酚工艺优化及抗氧化特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(4): 187 - 196.

[18] 陈峰, 尹鹏, 郭桂义, 等. 响应面法优化提取绿茶茶多酚工艺研究[J]. 茶叶通讯, 2020, 47(4): 659 - 664.

(上接第 84 页)

[38] HE Y, QIU C, GUO Z, et al. Production of new human milk fat substitutes by enzymatic acidolysis of microalgae oils from *Nannochloropsis oculata* and *Isochrysis galbana* [J]. Bioresour Technol, 2017, 238: 129 - 138.

[39] QIU C, HE Y, HUANG Z, et al. Biosafety evaluation of *Nannochloropsis oculata* and *Schizochytrium* sp. oils as novel human milk fat substitutes [J]. Food Funct, 2021, 12(7): 2972 - 2984.

[40] CALLEJÓN M J, MEDINA A R, MORENO P A G, et al.

Simultaneous extraction and fractionation of lipids from the microalga *Nannochloropsis* sp. for the production of EPA - rich polar lipid concentrates [J]. J Appl Phycol, 2020, 32: 1117 - 1128.

[41] DEVOS M, POISSON L, ERGAN F, et al. Enzymatic hydrolysis of phospholipids from *Isochrysis galbana* for docosahexaenoic acid enrichment [J]. Enzyme Microb Technol, 2006, 39: 548 - 554.

[42] 李韶峰. 脂肪酶催化制备功能性微藻磷脂的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.