

黄花草总黄酮超声辅助提取工艺优化及抗氧化活性研究

Ultrasonic-assisted extraction technology optimization and antioxidant activity of total flavonoids from *Cleome viscosa*

许建本^{1,2} 苏秀芳^{1,2} 黄妹胶¹

XU Jian-ben^{1,2} SU Xiu-fang^{1,2} HUANG Mei-jiao¹

(1. 广西民族师范学院化学化工学院, 广西 崇左 532200; 2. 广西高校桂西南特色植物资源

化学重点实验室培育基地, 广西 崇左 532200)

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo, Guangxi 532200, China; 2. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory Breeding Base of Chemistry of Guangxi Southwest Plant Resources, Chongzuo, Guangxi 532200, China)

摘要:采用超声辅助法提取黄花草总黄酮,通过单因素试验和正交试验确定了总黄酮的最佳提取工艺条件,并研究了黄花草总黄酮对羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、DPPH 自由基(DPPH $\cdot$)和亚硝酸盐的清除效果。结果表明:黄花草总黄酮的最佳提取工艺条件为料液比 1:15 (g/mL),乙醇浓度 50%,提取功率 40 W,超声时间 50 min,提取温度 50℃,该条件下黄花草总黄酮得率为 $(2.711\pm 0.002)\%$ 。黄花草总黄酮对 $\cdot\text{OH}$ 和亚硝酸盐具有明显清除能力,对 DPPH $\cdot$ 具有较强清除能力,最大清除率分别为 $(52.48\pm 0.88)\%$, $(95.58\pm 0.28)\%$, $(57.27\pm 0.15)\%$,表明黄花草中的总黄酮具有较好的抗氧化能力。

关键词:黄花草;总黄酮;超声辅助;提取工艺;抗氧化活性

Abstract: Total flavonoids were extracted from *Cleome viscosa* by ultrasound-assisted extraction. The optimum extraction conditions were investigated based on single factor and orthogonal tests. Meanwhile, the antioxidant activities of total flavonoids were evaluated by studying hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) scavenging assay, 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl free radical (DPPH $\cdot$) scavenging assay and nitrite scavenging assay. The results showed that the extraction rate of total flavonoids of *Cleome viscosa* was

$(2.711\pm 0.002)\%$ under the following conditions: material-to-liquid ratio of 1:15 (g/mL), ethanol concentration of 50%, extraction power of 40 W, ultrasonic time of 50 min, extraction temperature of 50℃. Total flavonoids of *Cleome viscosa* exhibited obvious $\cdot\text{OH}$ and nitrite scavenging capacity, and showed a higher scavenging capacity to DPPH $\cdot$, and the corresponding maximum scavenging rates were $(52.48\pm 0.88)\%$, $(95.58\pm 0.28)\%$ and $(57.27\pm 0.15)\%$, respectively. The results revealed that total flavonoids of *Cleome viscosa* had excellent antioxidant activities.

Keywords: *Cleome viscosa*; flavonoids; ultrasound-assisted; extraction process; antioxidant activity

黄花草是山柑科药用植物,主要分布在热带及亚热带地区,在中国云南、广西和福建等地都有种植^[1],其种子可入药、榨油,鲜叶可用于治疗眼病^[2]。目前有关黄花草的研究主要集中于药用价值及重金属胁迫下种子萌发等方面,如 Parimaladevi 等^[3]研究了黄花草提取物对老鼠的止痛作用机制,周鑫磊^[4]研究了 Mn^{2+} 对黄花草种子萌发、幼苗生长等的影响及胁迫生理生化特征的变化,而关于黄花草有效成分及抗氧化方面的研究鲜见报道。黄酮类成分是普遍存在于植物体中的一种天然抗氧化剂,具有抗氧化^[5]、抑菌^[6]和抗病毒^[7]等药理作用。目前提取植物体中总黄酮的常见方法有溶剂浸提法、酶辅助提取法和超声辅助提取法等,其中超声辅助提取法因具有简单、安全、高效等优点而备受关注^[8]。

试验拟以黄花草为原料,采用超声辅助法提取黄花草中的总黄酮,优化其提取工艺条件,并研究黄花草总黄

基金项目:广西高校优秀人才资助计划项目(编号:桂教[2011]40号);广西民族师范学院学科专业带头人科研启动项目(编号:2014RCDT001)

作者简介:许建本,男,广西民族师范学院助教,硕士。

通信作者:苏秀芳(1971—),女,广西民族师范学院教授,硕士。

E-mail: suxiufang88@sina.com

收稿日期:2019-11-19

酮对 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{DPPH}\cdot$ 和亚硝酸盐的清除能力,以期为黄花草的研究及开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

黄花草:摘自广西崇左市江州区市政府公园,经广西民族师范学院黄秋蝉教授鉴定为山柑科植物黄花草(*Cleome viscosa* L.);

芦丁标准品:生化试剂,上海晶纯试剂有限公司;

无水对氨基苯磺酸:分析纯,天津市光复精细化工研究所;

盐酸萘乙二胺:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH): $\geq 97.0\%$,阿拉丁公司;

氢氧化钠:分析纯,广东光华科技股份有限公司;

95%乙醇、30%过氧化氢、亚硝酸钠、硝酸铝、水杨酸、七水合硫酸亚铁等:分析纯,成都市科龙化工试剂厂。

1.1.2 主要仪器设备

高速万能粉碎机:FW100型,天津市泰斯特仪器有限公司;

电子天平:JA1003N,上海精密科学仪器有限公司;

循环水式真空泵:SHZ-D(Ⅲ)型,巩义市予华仪器有限责任公司;

可见分光光度计:7200型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

超声波清洗器:SG2200HPT型,上海冠特超声仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 黄花草的预处理工艺流程

黄花草洗净 $\rightarrow$ 电热鼓风干燥箱烘干($60\text{ }^{\circ}\text{C}$) $\rightarrow$ 粉碎 $\rightarrow$ 过筛(60目) $\rightarrow$ 脱脂脱色(石油醚中浸泡、搅拌) $\rightarrow$ 抽滤 $\rightarrow$ 烘箱干燥($50\text{ }^{\circ}\text{C}$) $\rightarrow$ 避光保存备用

1.2.2 黄花草总黄酮的提取 取1.000 0 g黄花草粉末,加入一定量乙醇溶液,充分混匀,设定提取功率,在一定温度下超声提取至指定时间,过滤,将滤液定容至50 mL容量瓶中,摇匀备用。

1.2.3 芦丁标准曲线的绘制 根据文献[9],修改如下:先用70%(体积分数,下同)乙醇溶液配制0.2 mg/mL的芦丁标准溶液,再准确吸取0.0,0.6,1.2,1.8,2.4,3.0 mL 0.2 mg/mL芦丁标准溶液置于比色管中,用70%乙醇溶液定容,摇匀备用。吸取1.0 mL标准溶液于10 mL的比色管中,加入0.3 mL 5%的亚硝酸钠溶液摇匀,静置6 min;随后加入0.3 mL 10%的硝酸铝溶液,摇匀,静置6 min;再加入4.0 mL 4%氢氧化钠溶液,然后用70%乙

醇溶液定容至10 mL,摇匀后放置反应15 min,以70%乙醇溶液作为空白,于510 nm处测定溶液吸光度。以芦丁标准溶液浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,得到标准曲线方程为: $A=10.882x-0.000\ 2$, $R^2=0.999\ 7$,说明在此浓度范围内,吸光度与芦丁标准品的浓度具有较好线性关系。

1.2.4 单因素试验设计

(1) 乙醇浓度:取1.000 0 g黄花草粉末,按料液比1:20(g/mL)分别与30%,40%,50%,60%,70%的乙醇混合,提取功率30 W,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下超声提取20 min,分析乙醇浓度对总黄酮得率的影响。

(2) 料液比:取1.000 0 g黄花草粉末,分别按料液比1:10,1:15,1:20,1:25,1:30(g/mL)与50%乙醇混合,提取功率30 W,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下超声提取20 min,分析料液比对总黄酮得率的影响。

(3) 提取功率:取1.000 0 g黄花草粉末,按料液比1:15(g/mL)与50%乙醇混合,提取功率分别为30,40,50,60,70 W,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下超声提取20 min,分析提取功率对总黄酮得率的影响。

(4) 提取温度:取1.000 0 g黄花草粉末,按料液比1:15(g/mL)与50%乙醇混合,提取功率分别为40 W,分别在30,40,50,60,70 $^{\circ}\text{C}$ 下超声提取20 min,分析提取温度对总黄酮得率的影响。

(5) 超声时间:取1.000 0 g黄花草粉末,按料液比1:15(g/mL)与50%乙醇混合,提取功率分别为40 W,在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下分别超声提取20,30,40,50,60 min,分析超声时间对总黄酮得率的影响。

1.2.5 正交试验设计 在单因素试验基础上,以对总黄酮得率影响较大的4个因素设计 $L_9(3)^4$ 正交试验,以黄花草总黄酮得率为评价指标,优化黄花草总黄酮提取工艺。

1.2.6 黄花草总黄酮得率的测定 吸取1.0 mL样品液于10 mL比色管中,按“1.2.3”方法测定吸光度,再根据式(1)计算总黄酮得率。

$$C = \frac{m \times V \times N}{M} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

C ——总黄酮得率,%;

m ——黄花草提取液的质量浓度,mg/mL;

V ——样品定容体积,mL;

N ——稀释倍数;

M ——黄花草干粉质量,mg。

1.2.7 黄花草总黄酮抗氧化活性测定

(1) 对羟基自由基($\cdot\text{OH}$)清除能力的测定:根据文献[10],修改如下:分别在10 mL比色管中加入1 mL不同浓度(0.05,0.10,0.15,0.20,0.25 mg/mL)的黄花草总

黄酮提取液,再加入 2 mL 9 mmol/L FeSO_4 溶液,摇匀,然后加入 2 mL 9 mmol/L 水杨酸—乙醇溶液,充分摇匀,最后加入 2 mL 8.8 mmol/L H_2O_2 ,摇匀。静置 30 min 后,在 510 nm 处测定吸光度, V_c 作为阳性对照。对照组以蒸馏水代替 H_2O_2 。空白组以蒸馏水代替黄花草总黄酮提取液。按式(2)计算 $\cdot\text{OH}$ 清除率。

$$K_1 = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

K_1 —— $\cdot\text{OH}$ 清除率, %;

A_1 ——样品组吸光度;

A_2 ——对照组吸光度;

A_3 ——空白组吸光度。

(2) 对 DPPH 自由基(DPPH $\cdot$)清除能力的测定:参照文献[11]。

(3) 对亚硝酸盐清除能力的测定:根据文献[12],修改如下:分别在 10 mL 比色管中加入 2 mL 不同浓度(0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mg/mL)的黄花草总黄酮提取液,再加入 5 mL pH 3.0 的柠檬酸—磷酸氢二钠缓冲液,1 mL 100 $\mu\text{g/mL}$ 亚硝酸钠溶液,将混合物置于 37 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温水浴锅中 1 h,取出,立即加入 2 mL 4 mg/mL 对氨基苯磺酸,摇匀,静置 5 min,再加入 1 mL 2 mg/mL 盐酸萘乙二胺,用蒸馏水定容,摇匀,静置 15 min 后,在 540 nm 处测定吸光度, V_c 作为阳性对照。空白组以蒸馏水代替黄花草总黄酮提取液。按式(3)计算亚硝酸盐清除率。

$$K_2 = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

K_2 ——亚硝酸盐清除率, %;

A ——样品组吸光度;

A_0 ——空白组吸光度。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel (Office 2010)、Origin 8.5 软件进行数据处理及分析。所有试验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 乙醇浓度对黄花草总黄酮得率的影响 从图 1 可以看出,适当提高乙醇浓度,总黄酮得率增大。这是因为随着乙醇浓度增大,溶剂与黄酮类成分的极性越来越接近,黄花草细胞发生溶胀现象,有利于总黄酮溶出。当乙醇浓度为 50% 时,黄花草总黄酮得率达到最大。继续增加乙醇浓度,溶剂与黄酮类成分的极性差异增大,影响了黄酮类成分的溶解性^[13],而且黄花草中醇溶性杂质大量溶出,这些杂质与黄酮类成分竞争溶剂,导致总黄酮得率减小。因此,选择最佳乙醇浓度为 50%。

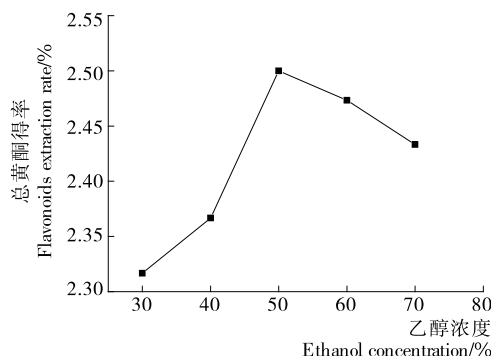


图 1 乙醇浓度对黄花草总黄酮得率的影响

Figure 1 Effect of ethanol concentration on extraction yield of total flavonoids from *Cleome viscosa*

2.1.2 料液比对黄花草总黄酮得率的影响 从图 2 可以看出,随着料液比增大,黄花草总黄酮得率先增大后减小。这是因为在一个合适的料液比范围内,增加溶剂,黄花草细胞内总黄酮和溶剂的浓度差增大,加大了传质效率,有利于总黄酮溶出^[14],因此,总黄酮得率增大。当料液比为 1:15 (g/mL) 时,总黄酮得率最大。继续增加料液比,溶剂量过大,超声辅助效果减小,还会加大非黄酮类成分的溶出,导致总黄酮得率减小^[15]。因此,选择最佳料液比为 1:15 (g/mL)。

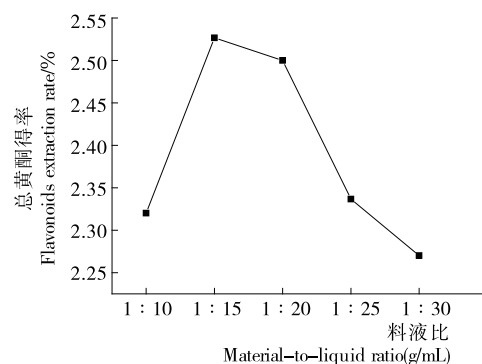


图 2 料液比对黄花草总黄酮得率的影响

Figure 2 Effect of material-to-liquid ratio on extraction yield of total flavonoids from *Cleome viscosa*

2.1.3 提取功率对黄花草总黄酮得率的影响 从图 3 可以看出,提取功率在 30~40 W 范围时,黄花草总黄酮得率随着功率增大而增大。这是因为超声波具有机械波动作用和空化效应^[16],适当增加超声波功率,可以提高对黄花草细胞壁的破坏效果,有利于总黄酮溶出。当超声波功率为 40 W 时,总黄酮得率最大。继续增加功率,黄酮类成分结构被过强的超声波破坏,总黄酮得率下降。因此,选择最佳提取功率为 40 W。

2.1.4 提取温度对黄花草总黄酮得率的影响 从图 4 可以看出,黄花草总黄酮得率随着温度升高呈先增大后减小的趋势,50 $^{\circ}\text{C}$ 时提取率达到最大。这是因为适当升高

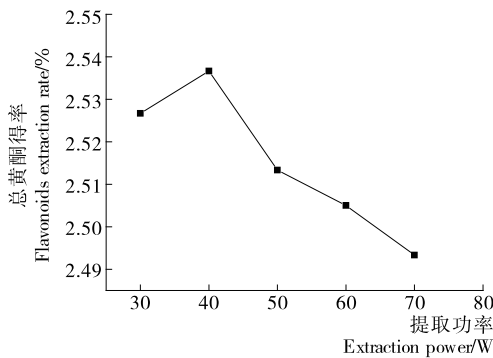


图3 提取功率对黄花草总黄酮得率的影响

Figure 3 Effect of extraction power on extraction yield of total flavonoids from *Cleome viscosa*

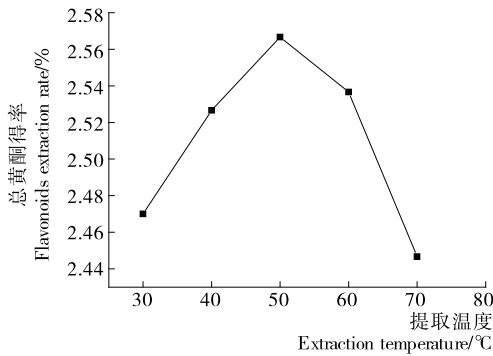


图4 提取温度对黄花草总黄酮得率的影响

Figure 4 Effect of extraction temperature on extraction yield of total flavonoids from *Cleome viscosa*

温度可以增加分子动能,加快分子运动,增强总黄酮的渗透扩散能力,使得总黄酮得率增大。当提取温度高于 50 ℃ 时,部分不稳定黄酮类成分的结构被破坏,且在高温下乙醇易挥发,导致溶剂浓度降低,不利于总黄酮溶出^[17],使得总黄酮得率下降。综合考虑,选择最佳提取温度为 50 ℃。

2.1.5 超声时间对黄花草总黄酮得率的影响 从图 5 可以看出,随着超声时间的延长,黄花草总黄酮得率先增大

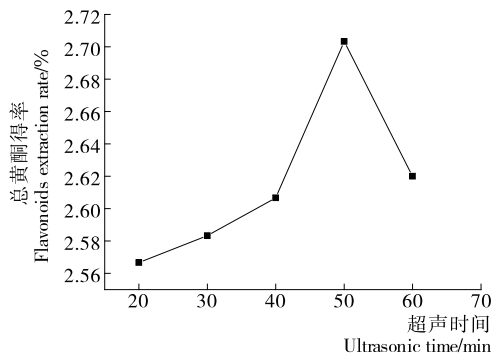


图5 超声时间对黄花草总黄酮得率的影响

Figure 5 Effect of ultrasonic time on extraction yield of total flavonoids from *Cleome viscosa*

后减小。这是因为在 20~50 min 内,黄花草细胞壁逐渐被破坏,总黄酮从开始溶出至全部溶出,所以总黄酮得率逐渐增大。再继续延长长时间,长时间地加热和超声会使溶出的总黄酮被氧化或分解,导致总黄酮得率下降。因此,选择最佳提取时间为 50 min。

2.2 正交试验

在单因素试验基础上,以料液比、乙醇浓度、提取功率和超声时间 4 个条件为考察因素,设计正交试验。提取温度取 50 ℃,试验因素水平取值见表 1,试验结果见表 2。

表 1 因素水平表

Table 1 Factor level of experiment

水平	A 料液比 (g/mL)	B 乙醇浓 度/%	C 提取功 率/W	D 超声时 间/min
1	1 : 10	40	30	40
2	1 : 15	50	40	50
3	1 : 20	60	50	60

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of the orthogonal test

试验号	A	B	C	D	总黄酮得率/%
1	1	1	1	1	2.560
2	1	2	2	2	2.685
3	1	3	3	3	2.538
4	2	1	2	3	2.701
5	2	2	3	1	2.575
6	2	3	1	2	2.621
7	3	1	3	2	2.648
8	3	2	1	3	2.694
9	3	3	2	1	2.497
k_1	2.594	2.636	2.625	2.544	
k_2	2.632	2.651	2.628	2.651	
k_3	2.613	2.552	2.587	2.644	
R	0.038	0.099	0.041	0.107	

从表 2 可以看出,各因素对黄花草总黄酮得率的影响顺序为 D>B>C>A,即:超声时间>乙醇浓度>提取功率>料液比。最佳提取工艺组合为 A₂B₂C₂D₂,即料液比为 1 : 15 (g/mL),乙醇浓度为 50%,提取功率为 40 W,超声时间为 50 min。经 3 次平行实验验证,得到黄花草总黄酮得率为(2.711±0.002)%,说明通过正交试验得到的最佳工艺条件稳定性和重现性较好。

2.3 加标回收试验

取 1.0 mL 最佳提取条件下得到的黄花草提取液 3 份,分别加入到 3 个 10 mL 比色管中,再在各比色管中

分别加入 1.0 mL 0.200 0 mg/mL 的芦丁标准溶液, 摇匀, 静置 15 min 后按“1.2.3”方法测定吸光度, 得到回收率的均值为 99.58%, $RSD=0.78\%$, 说明该方法准确可靠, 可用于黄花草总黄酮得率的测定。

2.4 黄花草总黄酮的抗氧化性

2.4.1 黄花草总黄酮对 $\cdot\text{OH}$ 的清除能力 由图 6 可知, 随着浓度增加, 黄花草总黄酮和 V_c 对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率均增大。当黄花草总黄酮的浓度为 0.25 mg/mL 时, 对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率达到 $(52.48 \pm 0.88)\%$, 说明黄花草总黄酮对 $\cdot\text{OH}$ 具有一定清除能力, 但作用效果弱于 V_c 。

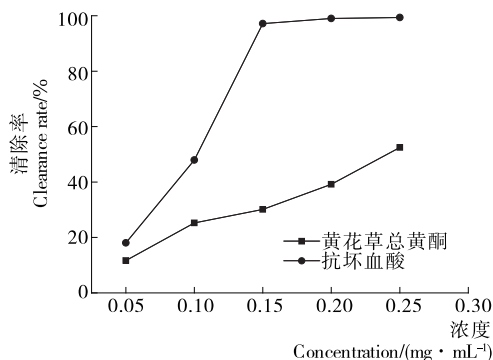


图 6 不同质量浓度样品对 $\cdot\text{OH}$ 的清除效果

Figure 6 Effect of different samples on the scavenging rate of $\cdot\text{OH}$

2.4.2 黄花草总黄酮对 DPPH $\cdot$ 的清除能力 从图 7 可以看出, 在浓度为 0.05~0.25 mg/mL 时, 黄花草总黄酮和 V_c 对 DPPH $\cdot$ 均具有较强的清除能力。当浓度为 0.05 mg/mL 时, V_c 对 DPPH $\cdot$ 的清除率为 $(95.25 \pm 0.43)\%$, 继续增加浓度, 清除率无明显变化。黄花草总黄酮对 DPPH $\cdot$ 的清除率随着浓度的增大而增大, 当其浓度为 0.25 mg/mL 时, 对 DPPH $\cdot$ 的清除率达到 $(95.58 \pm 0.28)\%$, 清除能力接近 V_c , 说明黄花草总黄酮对 DPPH $\cdot$ 具有很好的清除效果。

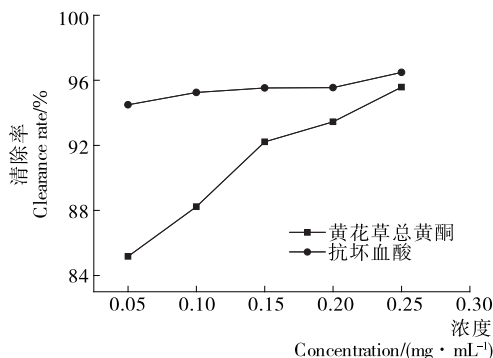


图 7 不同质量浓度样品对 DPPH $\cdot$ 的清除效果

Figure 7 Effect of different samples on the scavenging rate of DPPH $\cdot$

2.4.3 黄花草总黄酮对亚硝酸盐的清除能力 从图 8 可以看出, 当浓度为 0.05, 0.10 mg/mL 时, 黄花草总黄酮对亚硝酸盐的清除能力强于 V_c , 继续增大浓度, 黄花草总黄酮对亚硝酸盐的清除能力弱于 V_c 。当浓度为 0.25 mg/mL 时, 黄花草总黄酮和 V_c 对亚硝酸盐的清除率分别为 $(57.27 \pm 0.15)\%$, $(85.59 \pm 0.21)\%$, 说明黄花草总黄酮对亚硝酸盐具有一定的清除能力, 但弱于 V_c 。

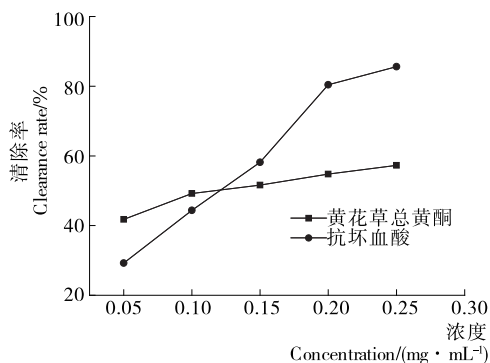


图 8 不同质量浓度样品对亚硝酸盐的清除效果

Figure 8 Effect of different samples on the scavenging rate of nitrite

3 结论

试验表明, 黄花草总黄酮的最佳提取工艺为料液比 1:15 (g/mL), 乙醇浓度 50%, 提取功率 40 W, 超声时间 50 min, 提取温度 50 $^{\circ}\text{C}$, 此条件下得到黄花草总黄酮得率为 $(2.711 \pm 0.002)\%$ 。在考察的浓度范围内, 黄花草的抗氧化能力随总黄酮浓度增加而增强, 当总黄酮浓度为 0.25 mg/mL 时, 对 $\cdot\text{OH}$ 、DPPH $\cdot$ 和亚硝酸盐的清除率分别为 $(52.48 \pm 0.88)\%$, $(95.58 \pm 0.28)\%$, $(57.27 \pm 0.15)\%$ 。黄花草中的总黄酮是一种活性较好的抗氧化剂。试验仅研究了黄花草总黄酮的超声辅助提取工艺及抗氧化活性, 采用其他提取技术总黄酮得率如何, 黄花草中总黄酮的开发利用还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 肖泽华, 李欣航, 潘高, 等. 锰胁迫对黄花草种子萌发及幼苗生理生化特征的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(12): 75-84.
- [2] 陈文红, 司马永康, 王慷林, 等. 滇东南的山柑科野生植物种类及其利用价值[J]. 云南林业科技, 2000(3): 23-27.
- [3] PARIMALADEVI B, BOOMINATHAN R, MANDAL S C. Studies on analgesic activity of *Cleome viscosa* in mice[J]. Fitoterapia, 2003, 74(3): 262-266.
- [4] 周鑫磊. 锰胁迫下青葙与黄花草种子萌发与幼苗生长的比较研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016: 19-25.
- [5] YI Lun-zhao, MA Sha-sha, REN Da-bing. Phytochemistry

- and bioactivity of Citrus flavonoids: A focus on antioxidant, anti-inflammatory, anticancer and cardiovascular protection activities [J]. *Phytochemistry Reviews*, 2017, 16 (3): 479-511.
- [6] 邵金华, 何福林, 陈霞, 等. 梓树根皮总黄酮分离纯化及其抑菌活性研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(2): 140-144.
- [7] 张硕, 倪亚红, 黄静, 等. 酶—超声辅助提取杨树皮总黄酮及其表征[J]. *林业工程学报*, 2019, 4(2): 73-79.
- [8] 杨昱, 白靖文, 俞志刚. 超声辅助提取技术在天然产物提取中的应用[J]. *食品与机械*, 2011, 27(1): 170-174.
- [9] 苏秀芳, 甘海妹, 黄智想. 微波辅助法提取细叶黄皮果仁总黄酮及其清除羟自由基活性的测定[J]. *精细化工*, 2010, 27(12): 1 184-1 186.
- [10] 许建本, 苏秀芳, 莫耀芳. 超声波辅助法提取假苹婆树叶总黄酮及其清除羟自由基能力[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(23): 205-208, 215.
- [11] 王全泽, 袁堂丰, 刘磊磊, 等. 响应面法优化闪式提取罗汉松总黄酮及其抗氧化活性[J]. *精细化工*, 2018, 35(1): 65-71.
- [12] 陈建福. 响应面优化超声辅助提取黄槿叶总黄酮工艺及其亚硝酸盐清除能力[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(6): 199-203, 210.
- [13] 李欣燃, 朱森, 韩世明, 等. 刺梨叶总黄酮超声辅助提取工艺优化[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(12): 189-193.
- [14] 周旋, 许明祥, 蔡文卓, 等. 女贞子总黄酮超声辅助提取工艺及体外抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(3): 188-194.
- [15] GU Xue-dong, SUN Ya-jing, MA Chang-zhong, et al. The optimization of ultrasonic extraction process of total flavonoids from *Rhodiola Crenulata* by response surface method [J]. *Medicinal Plant*, 2017, 8(6): 33-39.
- [16] 王振吉, 杨申明, 张光勇. 首乌藤总黄酮提取工艺优化及抗氧化性研究[J]. *中国酿造*, 2019, 38(3): 177-180.
- [17] 郭文娟, 王娜, 王娜娜, 等. 山楂核总黄酮的超声提取及抗氧化活性[J]. *精细化工*, 2016, 33(2): 152-156.
-
- (上接第 139 页)
- [9] BOSS E A, FILHO R M, TOLEDO E C V D. Freeze drying process: Real time model and optimization[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2004, 36(43): 1 475-1 485.
- [10] 李俊奇, 李保国. 药品真空冷冻干燥过程监控技术研究进展[J]. *化工进展*, 2015, 34(8): 3 128-3 132.
- [11] 邹晓霜, 李佳妮, 姜楠, 等. 响应面法优化豆腐真空冷冻干燥工艺[J]. *食品科学*, 2017, 38(18): 202-206.
- [12] 丁成翠, 徐志孙, 章程辉, 等. 青胡椒冷冻干燥工艺的优化[J]. *中国调味品*, 2012, 37(2): 46-50.
- [13] 罗洁莹, 汤梅, 柳建良, 等. 蓝莓真空冷冻干燥工艺优化[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(3): 91-95.
- [14] 陈林和, 章志成. 基于 MATLAB/SIMULINK 和组态王的监视平台在污泥热风干燥中的应用[J]. *数字通信世界*, 2017(9): 139-140.
- [15] 黄忠闯. 芒果、米葱真空冷冻干燥工艺的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
- [16] 厄特延, 黑斯利. 冷冻干燥[M]. 徐成海, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [17] 焦凌霞, 李保国, 高愿军, 等. 水果加工中热烫处理对 V_C 保存率的影响[J]. *河南职业技术学院学报*, 2004, 32(1): 42-44.
- [18] 刘军波, 刁礼根, 赵芸. 蓝莓花青素加工环境稳定性研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2017, 37(10): 1 073-1 079.
- [19] 徐成海. 真空干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [20] XIANG Jun, HEY J M, LIEDTKE V, et al. Investigation of freeze-drying sublimation rates using a freeze-drying microbalance technique[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2004, 279(1/2): 95-105.
-
- (上接第 145 页)
- [9] JOHANNES A, PICON A, ALVAREZ-GILA A, et al. Automatic plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 138(12): 200-209.
- [10] FERENTINOS K P. Deep learn models for plant disease detection and diagnosis[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 145(20): 311-318.
- [11] RANGARAJAN A K, PURVSHOTHAMAN R, RAMESH A. Tomato crop disease classification using pre-trained deep learning algorithm[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 133: 1 040-1 047.
- [12] LI Fei, LI Zhi-tang. An improved interconnection network based on NIN[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2004(3): 303-308.
- [13] 钟克洪, 丁明跃, 周成平, 等. 基于均匀空间的颜色分级方法[J]. *中国图象图形学报*, 2004(11): 7-13, 127.
- [14] 李江波, 饶秀勤, 应义斌. 水果表面亮度不均校正及单阈值缺陷提取研究[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(8): 159-163.
- [15] 庞江伟, 应义斌. 机器视觉在水果缺陷检测中的研究现状[J]. *农机化研究*, 2006(9): 47-49.
- [16] 邵帅. 一种基于三支决策 SVM 分类的图像识别方法[J]. *现代计算机*, 2019(18): 64-69.
- [17] 王春普, 文怀兴, 王俊杰. 基于机器视觉的大枣表面缺陷检测[J]. *食品与机械*, 2019, 35(7): 168-171.