

大叶千斤拔黄酮类成分提取及抗氧化活性研究

Study on total flavonoids extract and antioxidant capacity of *Flemingia macrophylla*

王 岩 于 璐 高建伟 林 巍 薄力影

WANG Yan YU Lu GAO Jian-wei LIN Wei BO Li-ying

(齐齐哈尔大学食品与生物工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

(School of Food and Biological Engineering, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

摘要:通过单因素试验及响应面试验优化大叶千斤拔总黄酮的乙醇回流提取工艺条件,并对提取物的抗氧化活性进行评价。结果表明:优化后的提取工艺条件为提取时间 52 min,料液比($m_{\text{大叶千斤拔}}:V_{\text{乙醇}}$)1:6 (g/mL),乙醇体积分数 70%,提取温度 60 °C,该条件下提取物的总黄酮含量为 75.47 $\mu\text{g}/\text{mg}$;提取物对 ABTS^+ 自由基、DPPH 自由基清除能力的 IC_{50} 分别为 0.044 9, 0.212 3 mg/mL,总抗氧化能力及对 Cu^{2+} 和 Fe^{3+} 还原能力的 IC_{50} 分别为 0.389 6, 0.221 9, 0.731 7 mg/mL。说明建立的最佳提取工艺可有效获取大叶千斤拔总黄酮成分;大叶千斤拔黄酮类物质具有较强的体外抗氧化活性。

关键词:大叶千斤拔;黄酮;醇提;抗氧化

Abstract: The extraction process conditions of total flavonoids from *Flemingia macrophylla* were optimized, and the extract's antioxidant properties were also studied. Firstly, the single factor test and response surface test were applied to optimize the alcohol reflux extraction process, and the antioxidant activity of the extract was finally evaluated. It was found that the best extraction time was 52 min, material-liquid ratio 1:6 (g/mL), ethanol volume fraction 70%, extraction temperature 60 °C. Rutin was used as the standard substance, the total flavonoid content of the extract is 75.47 $\mu\text{g}/\text{mg}$; the IC_{50} of the extract for ABTS^+ and DPPH $\cdot$ scavenging was 0.044 9, 0.212 3 mg/mL, respectively, and the IC_{50} for the total antioxidant capacity and the reducing a-

bility of Cu^{2+} and Fe^{3+} is 0.389 6, 0.221 9, 0.731 7 mg/mL. The best extraction process was established in this study, which could effectively obtain total flavonoids from *Flemingia macrophylla*; The total flavonoids extracted from *Flemingia macrophylla* showed intense *in vitro* antioxidant activity.

Keywords: *Flemingia macrophylla*; flavonoids; alcohol extraction; antioxidant

大叶千斤拔 [*Flemingia macrophylla* (Willd.) O. Kuntze] 又名千斤力、千金红等^[1],为 2015 年版中国药典收录的豆科 (*Leguminosae*) 千斤拔属 (*Flemingia*) 植物的一种^[2],广泛分布于中国热带和亚热带省区^[3]。千斤拔根具有诸多的药理作用,常被作为煲汤原料出现在两广地区百姓们日常的餐桌。研究表明,千斤拔属植物中含有黄酮、有机酸和生物碱等多种化学成分^[4-6],其中黄酮类成分是大叶千斤拔主要成分,尤其以异戊二烯基黄酮含量最多^[7]。黄酮类化合物具有广泛的生理活性,包括抗氧化、抗菌、保肝、抗炎和降血脂等^[8-9]。

对大叶千斤拔黄酮类化合物进行提取,是开发其黄酮类化合物的关键步骤。目前研究者^[10-11]主要利用有机溶剂如甲醇或乙醇的水溶液进行提取。提取方式主要包括回流提取^[12]、超声波辅助提取^[13-14]、微波辅助提取^[15]和静态提取^[16]等。超声波和微波提取利用不同频率的波,可加速黄酮化合物在溶剂中溶解的速率,但不易实现规模化生产;静态提取效率过低,耗时较长。相比较而言,回流提取工艺既可节省提取溶剂,同时又在加热过程中提高了分子热运动,减少提取时间。因此,试验拟采用乙醇回流提取大叶千斤拔中的总黄酮,以总黄酮含量为评价指标,通过响应面试验优化提取工艺条件,并对总黄酮提取物的抗氧化能力进行评价,以期为大叶千斤拔黄酮化合物的开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

乙醇、硫酸:分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司;

基金项目:黑龙江省留学归国人员科学基金资助项目(编号:LC2017014);黑龙江省教育厅基本业务专项(编号:135209271);黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目(编号:UNPYSCT-2017157);齐齐哈尔大学研究生创新项目(编号:YJSCX2020059);黑龙江省省属高等学校植物性食品加工特色学科专项(编号:YSTSXX201807);黑龙江省教育厅基本业务专项(粮头食尾)(编号:LTSW201709);黑龙江省政府博士后资助项目(编号:LBH-Z16023)

作者简介:王岩(1982—),男,齐齐哈尔大学副教授,博士。

E-mail: wangyan82@qqhru.edu.cn

收稿日期:2021-04-11

DPPH:分析纯,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;
ABTS、氯化铜:分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;
抗坏血酸:分析纯,天津市登峰化学试剂厂;
新亚铜试剂、TPTZ、氯化铁:上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

过硫酸钾:分析纯,上海萨恩化学技术有限公司;
乙酸铵:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;
钼酸铵:分析纯,西陇科学股份有限公司;
磷酸钠:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;
试验水:超纯水;
大叶千斤拔:云南楚雄中药材经销站。

1.2 仪器设备

超声波清洗器:DL-360E 型,上海之信仪器有限公司;
电子分析天平:BSA124S 型,赛多利斯有限公司;
紫外可见分光光度计:752 型,上海新茂仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 总黄酮提取工艺流程

大叶千斤拔根洗净→烘干(60℃)→粉碎→过筛(80目)→乙醇回流提取(70%乙醇,80℃)→旋转蒸发→烘箱干燥(50℃)→避光保存备用

1.3.2 总黄酮含量测定

(1) 标准曲线绘制:以芦丁为标准物质。分别称取 0.2 mg/mL 芦丁标准物质配置的溶液,取 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 mL 标准芦丁溶液,将其分别置于离心管(10 mL)中,再加入 0.3 mL 5% NaNO₂后摇匀并静置 6 min,再加入 AlCl₃(0.3 mL, 10%),静置 6 min,然后加入 4.0 mL 10% NaOH,使用 70% 的乙醇定容至刻线处,静置 15 min,然后在 510 nm 处测定反应液的吸光值,以吸光值为纵坐标,标准溶液中芦丁的质量浓度为横坐标作标准曲线(见图 1)。

(2) 样品总黄酮含量测定:取 0.5 mL 样品溶液于 10 mL 离心管中,加入 1 mL 5% NaNO₂摇匀,静置 6 min 后加入 1 mL 10% AlCl₃,摇匀,静置 6 min 后加入 10 mL 10% NaOH,再用 70%乙醇溶液定容到 25 mL,摇匀后静置 15 min,然后在 510 nm 处测定反应液的吸光值,空白

以乙醇代替提取液。根据芦丁标准曲线的线性方程计算样品溶液中的总黄酮质量浓度。总黄酮含量以芦丁当量表示(μg/mg)。

$$R_E = \frac{50 \times C \times V}{m}, \quad (1)$$

式中:

R_E ——芦丁当量,μg/mg;

50——样品溶液稀释倍数;

C ——样品吸光值代入芦丁标准曲线得到的芦丁质量浓度,mg/mL;

V ——提取液体积,mL;

m ——样品质量,g。

1.3.3 单因素试验

(1) 提取时间:固定料液比($m_{\text{大叶千斤拔}} : V_{\text{乙醇}}$)1 : 6 (g/mL)、乙醇体积分数 70%、提取温度 40℃,考察提取时间(20, 40, 60, 80 min)对总黄酮含量的影响。

(2) 料液比:固定提取时间 40 min、乙醇体积分数 70%、提取温度 40℃,考察料液比[$m_{\text{大叶千斤拔}} : V_{\text{乙醇}}$ 分别为 1 : 4, 1 : 6, 1 : 8, 1 : 10 (g/mL)]对总黄酮含量的影响。

(3) 乙醇体积分数:固定料液比($m_{\text{大叶千斤拔}} : V_{\text{乙醇}}$)1 : 6 (g/mL)、提取时间 40 min、提取温度 40℃,考察乙醇体积分数(60%, 70%, 80%, 90%, 100%)对总黄酮含量的影响。

(4) 提取温度:固定料液比($m_{\text{大叶千斤拔}} : V_{\text{乙醇}}$)1 : 6 (g/mL)、乙醇体积分数 70%、提取时间 40 min,考察提取温度(20, 40, 60, 80℃)对总黄酮含量的影响。

1.3.4 响应面试验优化提取条件 根据单因素试验结果确定响应面试验的因素水平取值,采用 Box-Behnken 设计,以总黄酮含量为响应值优化大叶千斤拔总黄酮的乙醇回流提取工艺条件。

1.3.5 抗氧化性能测定 将使自由基溶液的初始浓度降低 50% 的样品质量浓度定义为 IC₅₀;而还原力测定和磷钼法测定中,使吸光值达到 0.500 的样品浓度定义为 IC₅₀^[17]。

(1) 总抗氧化能力:采用磷钼法^[17]。

(2) DPPH 自由基清除能力:根据 Kim 等^[18]的方法。

(3) ABTS⁺自由基清除能力:根据 Amirouche 等^[19]的方法。

(4) 铜离子还原能力:采用 CuPRAC 法^[20]。

(5) 铁离子还原能力:采用 FRAP 法^[21]。

1.3.6 数据分析与处理 所有试验数据均平行测定 3 次,采用 Design-Expert 8.0.6、Statistix 8、Graphpad Prism 7 软件分析所得数据。

2 结果与分析

2.1 大叶千斤拔总黄酮提取工艺优化

根据单因素试验结果确定的试验因素水平见表 1。

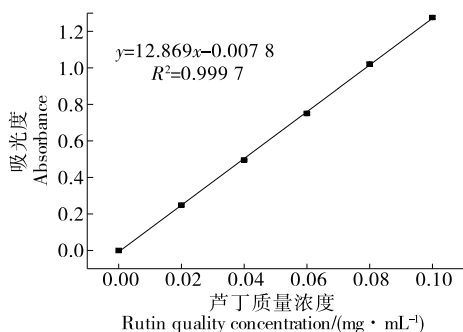


图 1 芦丁标准曲线

Figure 1 Standard curve of rutin

利用 Design-Expert 8.0.6 软件进行试验设计,试验设计与结果如表 2 所示。

对表 2 试验数据进行多元回归分析,得到响应值对自变量提取时间、料液比、乙醇体积分数、提取温度的二次多项回归模型方程:

表 1 自变量因素编码及水平

Table 1 Code and level of independent variables

编码	X ₁ 提取时间/ min	X ₂ 料液比 (g/mL)	X ₃ 乙醇体 积分数/%	X ₄ 提取 温度/℃
-1	30	1:4	60	50
0	50	1:6	70	60
1	70	1:8	80	70

表 2 乙醇提取大叶千斤拔总黄酮优化试验设计与结果

Table 2 Experimental design and results of optimization for total flavonoids extracted from *Flemingia macrophylla* by ethanol

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	黄酮含量/(μg·mg ⁻¹)
1	0	0	0	0	70.695
2	0	0	1	1	71.874
3	1	-1	0	0	65.079
4	0	0	0	0	75.573
5	0	0	-1	-1	58.275
6	0	1	0	-1	68.211
7	0	1	1	0	71.145
8	0	-1	-1	0	67.293
9	-1	0	0	1	66.735
10	1	0	0	1	69.552
11	0	-1	1	0	59.958
12	-1	0	-1	0	58.680
13	0	0	-1	1	65.027
14	-1	0	0	-1	51.219
15	1	1	0	0	63.324
16	0	-1	0	1	66.483
17	0	0	0	0	74.763
18	-1	1	0	0	61.236
19	-1	-1	0	0	65.268
20	0	-1	0	-1	63.531
21	1	0	1	0	61.677
22	-1	0	1	0	55.575
23	0	0	0	0	79.587
24	0	1	-1	0	65.367
25	1	0	-1	0	66.195
26	0	0	1	-1	52.299
27	0	1	0	1	64.368
28	0	0	0	0	75.033
29	1	0	0	-1	55.620

$$Y = 75.13 + 1.89X_1 + 0.503\ 2X_2 - 0.692\ 4X_3 + 4.57X_4 + 0.569\ 3X_1X_2 - 0.353\ 2X_1X_3 - 0.396\ 0X_1X_4 + 3.28X_2X_3 - 1.70X_2X_4 + 3.21X_3X_4 - 8.13X_1^2 - 2.99X_2^2 - 6.48X_3^2 - 6.50X_4^2. \quad (2)$$

由表 3 可知,模型 $P < 0.01$,表明该回归模型极显著;失拟项 $P > 0.05$ 不显著。模型中一次项 X_1 ,二次项 X_1^2 、 X_3^2 、 X_4^2 对总黄酮含量有极显著影响,其余项的影响均不显著($P > 0.05$)。根据回归系数绝对值,得出对提取的总黄酮含量影响顺序为提取温度>提取时间>乙醇体积分数>料液比。根据回归分析结果,选取对黄酮含量影响最大的两个交互项 X_2X_3 与 X_3X_4 ,利用 Design-Expert 8.0.6 软件绘制曲面响应图,如图 2 和图 3 所示。

由图 2 可知,料液比不变,随乙醇体积分数增加,总黄酮含量呈先升后降趋势。根据相似相溶原理,当乙醇体积分数较低或过高时不利于黄酮类物质游离出来。当乙醇体积分数恒定,随溶剂量的增加总黄酮含量先逐渐增加后趋于稳定。这是由于原料中的黄酮类物质随萃取剂的增多基本被完全提取,因此总黄酮含量增加趋势逐渐变缓。

由图 3 可知,当乙醇体积分数恒定,随温度的升高总黄酮含量逐渐增加后下降。这可能是温度达到了乙醇水溶液的沸点,部分溶液挥发成气态降低了提取效果。

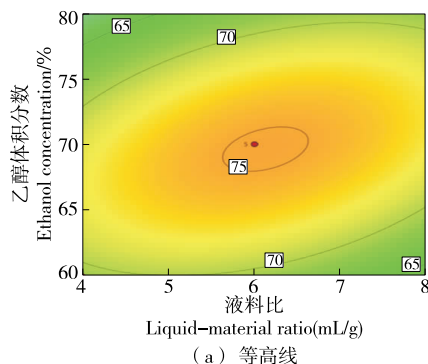
表 3 回归模型方差分析[†]

Table 3 Analysis of variance of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1 114.00	14	79.57	4.73	<0.01	* *
X ₁	43.07	1	43.07	2.56	0.13	
X ₂	3.04	1	3.04	0.18	0.68	
X ₃	5.75	1	5.75	0.34	0.57	
X ₄	251.02	1	251.02	14.92	<0.01	* *
X ₁ X ₂	1.30	1	1.30	0.08	0.79	
X ₁ X ₃	0.50	1	0.50	0.03	0.87	
X ₁ X ₄	0.63	1	0.63	0.04	0.85	
X ₂ X ₃	42.99	1	42.99	2.55	0.13	
X ₂ X ₄	11.54	1	11.54	0.69	0.42	
X ₃ X ₄	41.11	1	41.11	2.44	0.14	
X ₁ ²	428.53	1	428.53	25.46	<0.01	* *
X ₂ ²	58.00	1	58.00	3.45	0.09	
X ₃ ²	272.15	1	272.15	16.17	<0.01	* *
X ₄ ²	273.95	1	273.95	16.28	<0.01	* *
残差	235.60	14	16.83			
失拟	195.72	10	19.57		0.27	
纯误差	39.87	4	9.97			
总和	1 349.60	28				

[†] * 表示 $P < 0.05$,差异显著, * * 表示 $P < 0.01$,差异极显著; $R^2 = 0.825\ 4$ 。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件解模型方程(2)的逆矩阵,求得总黄酮含量的最大预测值为 $76.036 \mu\text{g}/\text{mg}$,其对应的提取工艺组合为提取时间 52.148 min,料液比 ($m_{\text{大叶千斤拔}} : V_{\text{乙醇}}$) 1 : 6.027 (g/mL),乙醇体积分数 70.4%,提取温度 63.56°C 。为方便验证,取各参数的近似值:提取时间 52 min,料液比 ($m_{\text{大叶千斤拔}} : V_{\text{乙醇}}$) 1 : 6 (g/mL),乙醇体积分数 70%,提取温度 60°C ,经 3 次实验验证,得到总黄酮含量平均值为 $75.47 \mu\text{g}/\text{mg}$,相对于预测值,相对误差为 0.74%,说明该回归模型优化的工艺组合是有效的。



2.2 大叶千斤拔粗提取物的抗氧化能力

以大叶千斤拔粗提物质量浓度的对数值为横坐标,自由基剩余率为纵坐标,利用 Graphpad Prism 7 软件绘制自由基清除能力的半数抑制浓度曲线图,如图 4 所示。以大叶千斤拔粗提物质量浓度为横坐标,吸光值为纵坐标,绘制金属离子还原能力的拟合线性图,如图 5 所示。

由图 4 可知,随着提取物质量浓度的增加,DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基清除率逐渐上升。由表 4 可知,大叶千斤拔黄酮提取物对 DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基的半数抑制浓度 (IC_{50}) 分别为 0.212 3, 0.044 9 mg/mL 。大叶

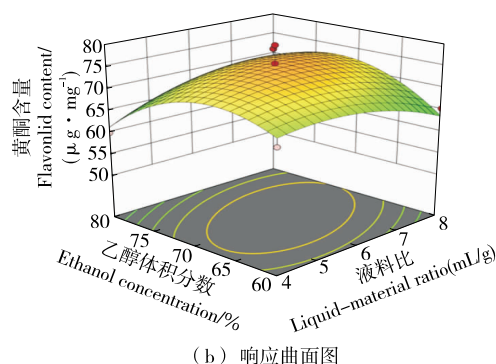


图 2 乙醇体积分数和料液比对总黄酮含量影响的等高线和响应曲面图

Figure 2 Influence of ethanol concentration and solid-liquid ratio on the flavonoids content of isometric surface and response surface

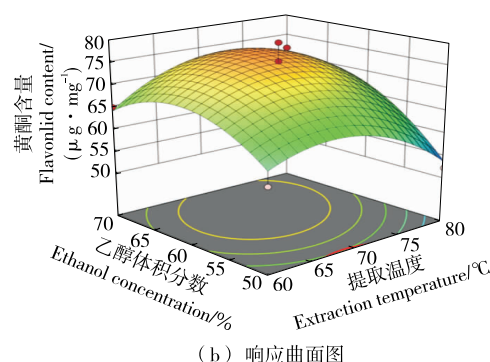
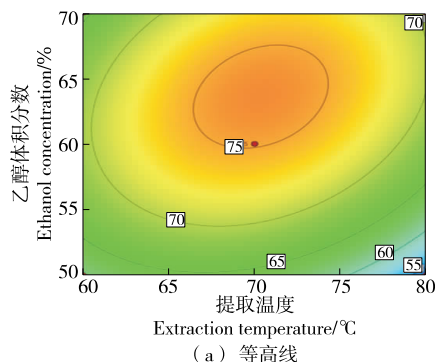


图 3 乙醇体积分数和提取温度对总黄酮含量影响的等高线和响应曲面图

Figure 3 Influence of ethanol concentration and temperature on the flavonoids content of isometric surface and response surface

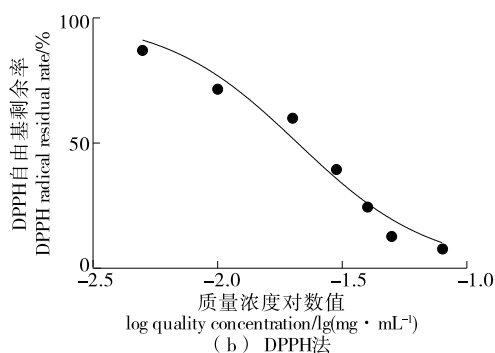
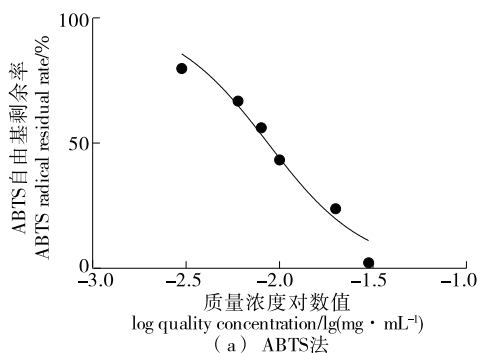


图 4 大叶千斤拔提取物清除自由基能力

Figure 4 Free radical scavenging ability of *Flemingia macrophylla* extract

千斤拔乙醇提取物对 DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基具有较强的清除能力,但与维生素 C 的清除能力还有一定差距。

由图 5 可知,随着提取物质量浓度的增加,还原铜离子和铁离子的能力逐渐增强。由表 4 可知,大叶千斤拔

黄酮提取物对铜离子和铁离子的半数抑制浓度(IC₅₀)分别为 0.221 9,0.731 7 mg/mL,对总抗氧化能力的半数抑制浓度(IC₅₀)为 0.389 6 mg/mL。大叶千斤拔乙醇提取物对金属离子的还原能力与维生素 C 的相当。

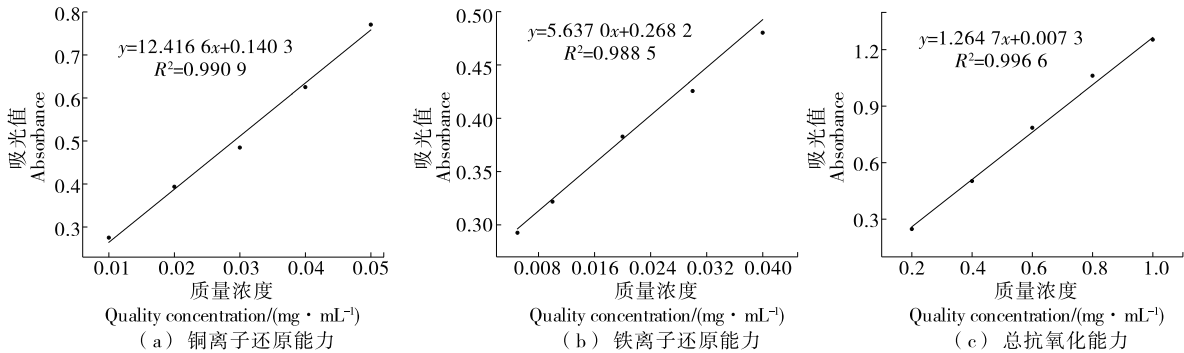


图 5 大叶千斤拔提取物金属离子还原能力与总抗氧化能力

Figure 5 Metal ion reduction ability and total antioxidant capacity of *Flemingia macrophylla* extract

表 4 维生素 C 和大叶千斤拔提取物的抗氧化能力

Table 4 Antioxidant activities of standards and the solvent extracts from *Flemingia macrophylla* mg/mL

样品	磷钼法	DPPH	ABTS	CUPRAC	FRAP
乙醇提取物	0.389 6±0.001 9	0.212 3±0.025 0	0.044 9±0.011 6	0.221 9±0.003 8	0.731 7±0.012 3
维生素 C	0.143 2±0.002 1	0.017 9±0.010 6	0.012 5±0.009 4	0.060 0±0.000 1	0.041 4±0.000 4

3 结论

试验采用乙醇为提取溶剂,在单因素试验基础上,通过响应面试验设计方法对大叶千斤拔的总黄酮提取工艺进行优化,得到最佳的提取工艺为提取时间 52 min,料液比($m_{\text{大叶千斤拔}}:V_{\text{乙醇}}$)1:6 (g/mL),乙醇体积分数 70%,提取温度 60 ℃,该条件下提取物的总黄酮含量为 75.47 μg/mg。对黄酮提取物进行抗氧化活性评价,结果表明大叶千斤拔乙醇提取物对 DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基具有较强的清除能力,但与维生素 C 的清除能力还有一定差距,而对金属离子的还原能力与维生素 C 的相当。试验结果揭示了大叶千斤拔黄酮类提取物具有较强的体外抗氧化作用,后续将进一步探究其抗炎、抗菌、抗肿瘤等生物活性。

参考文献

[1] 张忠廉,张丽霞,宋美芳,等. 千斤拔属植物亲缘关系分析及其初步质量评价[J]. 中草药, 2011, 42(9): 1 817-1 821.
[2] 黄艳菲,丁玲,李艳丹,等. 三种千斤拔的化学成分预分析和薄层鉴定[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2011, 37(4): 603-606.
[3] 管志斌,张忠廉,张丽霞,等. 3 种千斤拔生物学特性研究[J]. 中药材, 2012, 35(10): 1 550-1 553.
[4] 梁莹,韦坤华,乔柱,等. 大叶千斤拔的研究概况[J]. 广西中医药, 2017, 40(2): 5-8.
[5] 张瀚,袁经权,周小雷,等. 大叶千斤拔现代研究进展[J]. 现代中

药研究与实践, 2013, 27(3): 81-84.
[6] 李宝强,宋启示. 大叶千斤拔根的化学成分[J]. 中草药, 2009, 40(2): 179-182.
[7] 黄建猷,卢文杰,谭晓,等. 壮药大叶千斤拔化学成分的研究[J]. 中医药导报, 2015, 21(5): 48-49, 52.
[8] 张凤,马雅鸽,张希,等. 云南分心木总黄酮提取及抗氧化和对脂肪变性 L02 肝细胞的作用[J]. 食品与机械, 2020, 36(12): 141-146, 182.
[9] 杨宇华,黄艳,郑伟鹏. 艾草黄酮抗氧化及对鸡胸肉保鲜效果的研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 122-127, 142.
[10] 任朝琴,袁玮,刘圆. 5 种千斤拔不同药用部位及 3 种不同产地中浸出物的含量测定[J]. 中国实验方剂学杂志, 2009, 15(3): 6-8.
[11] 陈帅,王慧竹,薛健飞. 正交试验法优化千斤拔总黄酮微波提取工艺[J]. 吉林化工学院学报, 2013, 30(11): 34-37.
[12] 严东,夏伯候,李春,等. 千斤拔属药用植物的研究进展[J]. 中草药, 2016, 47(24): 4 456-4 471.
[13] 戴得蓉,刘松奇,熊坤艳,等. 雪莲果叶总黄酮超声波辅助酶法提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 179-185.
[14] 杜丽娟,苏秀芳,黄成银. 余甘子叶总黄酮的超声波法提取工艺优化及其抗氧化能力研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 185-189, 193.
[15] 熊建文,李俊琦,梁莹,等. 大叶千斤拔叶黄酮的超声—微波协同提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 南方农业学报, 2021, 52(1): 198-205.

(下转第 190 页)

- ization and immunomodulating activity of a pectic polysaccharide isolated from Korean mulberry fruit Oddi (*Morus alba* L.)[J]. *International Immunopharmacology*, 2013, 17(3): 858-866.
- [24] DU Hong-tao, CHEN Jun-cheng, TIAN Shan, et al. Extraction optimization, preliminary characterization and immunological activities in vitro of polysaccharides from *Elaeagnus angustifolia* L. pulp[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 151(1): 348-357.
- [25] ZHU Jiang-xiong, CHEN Zi-yan, CHEN Liang, et al. Comparison and structural characterization of polysaccharides from natural and artificial Se-enriched green tea[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 130: 388-398.
- [26] WANG Li-jun, YU Xiao-na, YANG Xiu-shi, et al. Structural and anti-inflammatory characterization of a novel neutral polysaccharide from North American ginseng (*Panax quinquefolius*) [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 74: 12-17.
- [27] 赵琪, 赵利, 杨玉雯, 等. 河蚬多糖分离纯化及抗氧化、抗肿瘤活性研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(4): 127-132.
- [28] 易军鹏, 王赛, 李欣, 等. 蒸汽爆破提取牛膝多糖工艺优化及抗氧化性研究[J]. *食品与机械*, 2018, 34(6): 145-151.
- [29] 叶润, 蔡静, 赵丽平, 等. 大孔树脂纯化油菜叶多糖的工艺及其抗氧化活性研究[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(9): 102-106.
- [30] 岳峥嵘, 赵博, 张国财, 等. 血红铆钉菇多糖超声微波联合提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(22): 165-171.
- [31] 陈浩. 普洱茶多糖降血糖及抗氧化作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 46.
- [32] 张阳, 王文君, 谭妙英, 等. 不同提取方法对南酸枣果胶多糖理化性质及抗氧化作用的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(23): 21-26.
- [33] 石玉涛. 茶多糖抗氧化和降血糖作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010: 31-32.
- [34] 熊磊, 陈慧, 胡文兵, 等. 黄金茶多糖超声提取工艺及体外抗氧化研究[J]. *江西农业大学学报*, 2017, 39(4): 801-809.
- [35] 郭守东. 微生物胞外多糖的结构及其抗氧化活性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 201.
- [36] 宋丽丽, 闻格, 霍姍浩, 等. 小黄姜多糖的分离纯化及其结构特征及抗氧化活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 73-79.
- [37] WANG Jun-qiao, HU Shu-zhen, NIE Shao-ping, et al. Reviews on mechanisms of in vitro antioxidant activity of polysaccharides[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016, 2016: 1-13.
- [38] 何钊. 白蜡虫多糖分离纯化与抗氧化、免疫活性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014: 78-80.

(上接第 119 页)

- [8] 廖丹, 高宏力, 邱德军, 等. 球形机器人非线性 PID 控制器研究与设计[J]. *机械设计与制造*, 2020(3): 250-253.
- [9] 卢惠林. 基于模糊控制算法的移动机器人路径纠偏研究[J]. *无锡商业职业技术学院学报*, 2020, 20(6): 102-107.
- [10] 汪鹏, 李国丽, 刘方, 等. 基于模糊控制算法的四轮独立转向机器人循迹控制研究[J]. *制造业自动化*, 2020, 42(9): 70-74.
- [11] 张俊杰, 周惠兴, 王衍学, 等. 3D 打印的两轮自平衡机器人的模糊自适应控制策略[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(21): 637-642.
- [12] 尹奇辉, 李捷, 梁志鹏, 等. 基于模糊神经网络 PID 的机器人路径跟踪控制[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(5): 182-187.
- [13] 陈军章. 改进人工鱼群算法的机器人路径规划及跟踪[J]. *机械设计与制造*, 2019(4): 251-255.
- [14] 周仁芳, 刘晓峰, 蔡国平. 非时间参考下的移动机器人路径跟踪控制[J]. *控制工程*, 2020, 27(9): 1531-1537.
- [15] 朱欣华, 王健, 郭民环, 等. 基于位置约束的两轮驱动机器人路径跟踪控制方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2018, 26(5): 680-685.
- [16] 白国星, 刘丽, 孟宇, 等. 基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(9): 47-52, 60.
- [17] XUE Jian-kai, SHEN Bo. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering an Open Access Journal*, 2020, 8(1): 22-34.

(上接第 183 页)

- [16] 牛迎凤, 李晓花, 李海涛, 等. 大叶千斤拔活性成分分布及积累动态[J]. *中国医药导报*, 2016, 13(28): 17-20.
- [17] CENGIZ S A, JACQUELINE C A B, MEHMETS O C, et al. LC-MS/MS profiles and interrelationships between the enzyme inhibition activity, total phenolic content and antioxidant potential of *Micromeria nervosa* extracts[J]. *Food Chemistry*, 2020, 328: 126930.
- [18] KIM D H, YANG W T, CHOK M, et al. Comparative analysis of isoflavone aglycones using microwave-assisted acid hydrolysis from soybean organs at different growth times and screening for their digestive enzyme inhibition and antioxidant properties[J]. *Food Chemistry*, 2019, 305: 125462.
- [19] AMIROUCHE D A, NADJAT R B, ROSALES C C, et al. Bioactive polyphenols from *Ranunculus macrophyllus* Desf. Roots: Quantification, identification and antioxidant activity[J]. *South African Journal of Botany*, 2020, 132: 1-11.
- [20] SYFUL I A B, MD B A C, ARIF A A, et al. Identification of secondary metabolites in *Averrhoa carambola* L. bark by high-resolution mass spectrometry and evaluation for α -glucosidase, tyrosinase, elastase, and antioxidant potential[J]. *Food Chemistry*, 2020, 332: 127377.
- [21] SHRUTI S, ALKA J, BINDVI A, et al. Significance of FRAP, DPPH, and CUPRAC assays for antioxidant activity determination in apple fruit extracts[J]. *European Food Research and Technology*, 2020, 246(3): 591-598.