

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90201

微波辅助提取辣木叶总黄酮工艺优化及其 抑菌和抗氧化活性研究

Optimization of microwave-assisted extraction of total flavonoids from
leaves of *Moringa oleifera* Lam. by response surface
methodology and its antibacterial and antioxidant activities

杨丽华 董晓倩 董启露 李晓娇

YANG Li-hua DONG Xiao-qian DONG Qi-lu LI Xiao-jiao

(保山学院资源环境学院, 云南 保山 678000)

(School of Resources and Environment, Baoshan University, Baoshan, Yunnan 678000, China)

摘要:目的:提高辣木叶总黄酮的提取率,评价其抑菌和抗氧化能力。方法:以保山产辣木叶为材料,采用 Box-Behnken 响应面法优化提取工艺,并对其抑菌和抗氧化活性进行评价。结果:微波辅助提取辣木叶总黄酮最佳工艺条件为料液比 1:29 (g/mL)、微波功率 567 W、微波时间 3.6 min、乙醇体积分数 50%,此条件下辣木叶总黄酮提取率最高为 $(7.414 \pm 0.027)\%$ 。辣木叶总黄酮对 DPPH·、ABTS⁺· 和 ·OH 的 IC₅₀ 值分别为 0.024, 0.014, 0.051 mg/mL, 分别为抗坏血酸的 3.43, 14.00, 1.09 倍。结论:辣木叶总黄酮对枯草芽孢杆菌和大肠杆菌有不同程度的抑菌作用,对金黄色葡萄球菌几乎无抑制作用。

关键词:辣木叶;总黄酮;微波辅助;响应面;抑菌活性;抗氧化活性

Abstract: Objective: The purpose of this study is to improve the extraction rate of total flavonoids from the leaves of *Moringa oleifera* Lam. and evaluate their *in vitro* antibacterial and antioxidant capacity. **Methods:** The extraction of total flavonoids from the leaves of *M. oleifera* Lam. from Baoshan city was optimized by Box-Behnken response surface methodology, and its antibacterial and antioxidant activities were evaluated. **Results:** The optimal conditions for microwave-assisted extraction of total fla-

vonoids from leaves of *M. oleifera* Lam. were solid-liquid ratio 1:29 (g/mL), microwave power 567 W, microwave time 3.6 min and ethanol fraction 50%, and the highest extraction rate of total flavonoids was $(7.414 \pm 0.027)\%$. The total flavonoids from leaves of *M. oleifera* Lam. showed strong DPPH·, ABTS⁺· and hydroxyl radical scavenging activities, with IC₅₀ value of 0.024 mg/mL, 0.014 mg/mL and 0.051 mg/mL, which were 3.43, 14.00, 1.09 times of ascorbic acid, respectively. **Conclusion:** The total flavonoids from leaves of *M. oleifera* Lam. have different degrees of antibacterial effect on *B. subtilis* and *E. coli* and have no inhibition on *S. aureus*.

Keywords: leaves of *Morniga oleifera* Lam.; total flavonoids; microwave-assisted; response surface methodology; antibacterial activity; antioxidant activity

辣木(*Morniga oleifera* Lam.)为辣木科辣木属的一种乔木,因其根有辛辣味而得名,辣木的根、叶和嫩果可以食用,种子含油,可作为润滑油和定香剂^[1]。辣木原产印度,近年来在中国云南、广西、广东、海南等地区均有引种^[2]。辣木叶中富含多种营养成分和多种活性成分^[2-5],具有降血糖、抗氧化、抗癌、消炎抑菌、降血压和降胆固醇等作用^[5-9],于 2012 年被批准为新资源食品。目前,已从辣木黄酮类中分离鉴定出芦丁、多花蔷薇苷、牡荆素、槲皮素、槲皮苷、异槲皮苷、山奈酚-3-O-葡萄糖苷、山奈酚-3-O-丙二酰基己糖苷、异鼠李素、芹菜素、表儿茶素等多种黄酮类化合物,这些物质多以苷类形式存在^[8-11]。

目前,应用于辣木总黄酮提取的方法有溶剂浸提法^[12]、超声波辅助提取法^[12-17]、微波辅助提取法^[18]、酶解提取法^[19]、亚临界流体萃取法^[20]和常压内部沸腾

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(编号:201910686002);云南省高校本科教育教学改革研究项目(编号:JG2018225);保山学院首批校级应用型人才培养示范院校建设项目(编号:ZXZ201701)

作者简介:杨丽华,女,保山学院讲师,硕士。

通信作者:李晓娇(1985—),女,保山学院副教授,硕士。

E-mail:lixiaojiao0622@163.com

收稿日期:2021-11-03

法^[21]等,其中以溶剂浸提和超声波辅助提取的报道较多。张善添等^[12]采用加热回流水提、加热回流水提醇沉、70%乙醇加热回流提取、超声加热水提、超声加热醇提、超声醇提等方法提取辣木叶中的总黄酮,得率分别为 1.57%, 1.82%, 3.25%, 1.91%, 3.21%, 2.64%;吉莉莉等^[18]用乙醇浸提和微波辅助法提取辣木叶总黄酮,得率分别为 2.60%, 3.45%;张展适等^[22]利用超声波辅助法的得率仅为 0.84%;上述提取率较低,且关于辣木叶总黄酮抑菌活性的报道较少。王远^[10]研究表明,辣木叶总黄酮的抑菌效果为大肠杆菌>枯草芽孢杆菌>金黄色葡萄球菌;马金魁等^[14]研究表明,辣木叶总黄酮的抑菌效果为白色假丝酵母>大肠杆菌>金黄色葡萄球菌>枯草芽孢杆菌;王丽虹等^[23]研究表明,辣木叶总黄酮对枯草芽孢杆菌的抑制作用强于金黄色葡萄球菌,对大肠杆菌则无抑制作用;以上试验结果差异较大。

微波产生的高频电磁波可以加速细胞破裂,促进细胞内黄酮类物质的流出,所以微波辅助提取能缩短提取时间、提高提取效率、减少溶剂消耗,并减少活性物质结构的破坏^[24-25]。研究拟利用响应面法优化微波辅助提取工艺,采用滤纸片法测定辣木叶总黄酮对 3 种供试菌种的抑菌能力,并考察其体外抗氧化活性,旨在为辣木叶总黄酮的高效提取及进一步研发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

辣木叶:2020 年 8 月采摘于保山市潞江坝,经保山学院汪建云教授鉴定为辣木科辣木属植物辣木(*Moringa oleifera* Lam.);

大肠杆菌(*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*):保山学院微生物实验室;

芦丁标准品:德国 Dr. Ehrenstofer GmbH 公司;

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS):合肥巴斯夫生物科技有限公司;

牛肉膏:广东环凯微生物有限公司;

蛋白胨:北京奥博星生物科技有限责任公司。

1.2 仪器和设备

高速万能粉碎机:DFY-800 型,杭州旭朗机械设备有限公司;

微波炉:MW20-M605 型,格兰仕微波炉电器有限公司;

紫外可见分光光度计:UV5000 型,安徽皖仪科技有限公司;

电热恒温水浴锅:HH-4 型,上海一恒科学仪器有限公司;

循环水式多用真空泵:双 A 型,郑州长城科工贸有限公司;

公司;

旋转蒸发仪:N-1001 型,上海泉杰仪器有限公司;

立式压力蒸汽灭菌锅:LDZX-758KB 型,上海申安医疗器械厂;

恒温振荡培养箱:SPX 型,波东南仪器有限公司;

冷冻干燥仪:ZX-LGJ-IA 型,上海知信实验仪器技术有限公司。

1.3 方法

1.3.1 标准曲线的建立 参照王远^[10]的方法,得到线性回归方程 $y=9.55x+0.0003$, $R^2=0.9994$ 。

1.3.2 辣木叶总黄酮提取 将辣木叶阴干后粉碎,过 60 目筛。称取适量辣木叶粉末置于索氏提取器中,加入石油醚,回流提取 2 h,抽滤烘干后即得辣木叶脱脂粉末。精确称取 1.00 g 辣木叶脱脂粉末进行微波辅助提取。

1.3.3 单因素试验 设定料液比为 1:25 (g/mL),微波功率为 406 W,微波时间为 4 min,乙醇体积分数为 50%,固定其他条件,分别考察料液比、微波功率、微波时间、乙醇体积分数对辣木叶总黄酮得率的影响。

1.3.4 响应面试验设计 在单因素试验基础上,采用 Box-Behnken 设计响应面试验。

1.3.5 辣木叶总黄酮含量测定 移取提取液 1.0 mL,测定 510 nm 处吸光度,重复 3 次,按式(1)计算总黄酮含量。

$$X = \frac{C \times V_1 \times V_2}{m \times V_0 \times 1000} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

X——辣木叶总黄酮提取率,%;

C——总黄酮质量浓度,mg/mL;

V_1 ——定容体积,mL;

V_2 ——显色反应时定容体积,mL;

m ——辣木粉质量,g;

V_0 ——吸取提取液体积,mL。

1.3.6 抑菌活性测定 参照杨丽华等^[26]的方法。

1.3.7 抗氧化活性测定

(1) DPPH·清除能力:参照杨丽华等^[26]的方法。

(2) ABTS⁺·清除能力:参照岳秀洁等^[17]的方法。

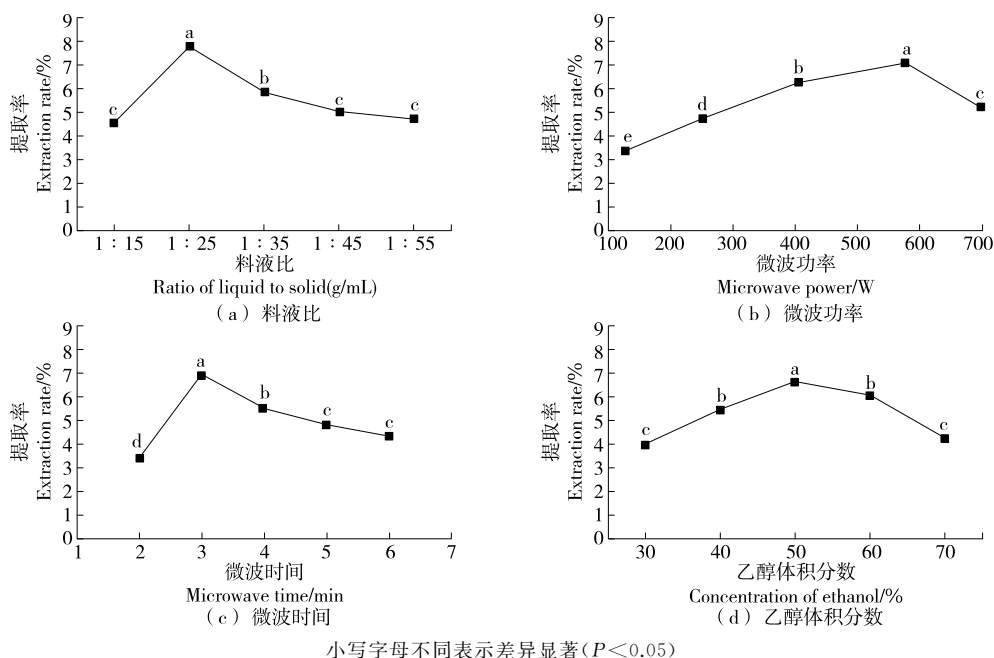
(3) ·OH 清除能力:参照王娟等^[27]的方法。

1.3.8 数据处理 各试验均重复 3 次,结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS Statistics 22 软件进行单因素方差分析和 IC₅₀ 值计算,采用 Design-Expert 8.0.6.1 软件分析响应面试验数据。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

由图 1 可知,随着料液比、微波功率、微波时间和乙醇体积分数的升高,辣木叶总黄酮提取率均呈先升高后降低的趋势。这是因为随着料液比的增加,辣木叶粉末



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图1 各因素对总黄酮提取率的影响

Figure 1 Effects of various factors on extraction rate of total flavonoids

与溶剂的接触更充分,总黄酮提取率逐渐提高,但料液比增大到一定程度后,总黄酮已基本溶出,再增加料液比会导致其他可溶性杂质与黄酮类化合物竞争溶剂,导致提取率下降^[17,28]。微波功率较低、微波时间过短时,总黄酮溶出不完全,反之则会破坏黄酮类化合物的结构^[28-29]。乙醇体积分数的增加会造成溶剂的极性下降,乙醇体积分数较低时会导致水溶性物质溶出,乙醇体积分数过高时会导致脂溶性成分溶出,从而降低辣木叶总黄酮提取率^[30]。

2.2 响应面试验

在单因素试验基础上,选择料液比、微波功率、微波时间和乙醇体积分数为因素,以辣木叶总黄酮提取率为响应值进行响应面试验优化,各因素水平见表1,试验设计及结果见表2。

采用 Design-Expert 8.0.6.1 进行分析,得到辣木叶总黄酮提取率与各因素的回归方程模型为:

$$Y = 7.32 - 0.23A - 0.046B - 0.073C - 0.045D + 0.071AB + 4.250E - 003AC - 0.09AD + 4.656E - 003BC - 3.938E - 004BD + 0.052CD - 0.20A^2 - 0.22B^2 - 0.099C^2 - 0.34D^2. \quad (2)$$

由表3可知,模型 $P < 0.0001$,极显著,失拟项 $P = 0.5344 > 0.05$,不显著,表明所得回归方程拟合较好,回归性显著。模型中 A、C、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对响应值的影响极显著 ($P < 0.01$), B、D、AD 对响应值的影响显著 ($P < 0.05$)。各因素对响应值的影响从大到小依次为料液比 > 微波时间 > 微波功率 > 乙醇体积分数。

根据响应面分析得到最佳工艺条件为料液比 1 : 28.84 (g/mL)、微波功率 521.88 W、微波时间 3.61 min、乙醇体积分数 49.86%,此条件下辣木叶总黄酮提取率预测值为 7.411%。为了便于操作,将最佳提取工艺调整为料液比 1 : 29 (g/mL)、微波功率 567 W、微波时间 3.6 min、乙醇体积分数 50%,此条件下辣木叶总黄酮实测提取率为 $(7.414 \pm 0.027)\%$,与理论值接近,说明模型拟合良好,工艺合理可行。

研究^[31-33]表明,辣木叶中的营养成分含量与品种、产地、采收时期和样品干燥方式等密切相关,试验中辣木叶总黄酮的提取率高于前人^[10,12-13,15-20,22],可能与辣木叶的产地、干燥方式、采收时期和提取条件等有关。

2.3 抑菌活性

抑菌圈直径大小可以反映供试菌种对总黄酮的敏感程度,参照霍归国等^[34]的方法可划分为高度敏感(直径 > 20 mm)、敏感(直径 14~20 mm)、中度敏感(直径 8~14 mm)和不敏感(直径 < 8 mm^[30])。由表4可知,辣木叶总黄酮对3种供试菌种的抑菌活性有显著差异 ($P <$

表1 Box-Behnken 试验设计因素水平表

Table 1 Levels and factors of Box-Behnken experiment

水平	A 料液比 (g/mL)	B 微波 功率/W	C 微波时 间/min	D 乙醇体 积分数/%
-1	1 : 25	406	3	40
0	1 : 35	567	4	50
1	1 : 45	700	5	60

0.05), 枯草芽孢杆菌和大肠杆菌对辣木叶总黄酮中度敏感, 金黄色葡萄球菌对辣木叶总黄酮不敏感。辣木叶总黄酮提取液对枯草芽孢杆菌的抑制效果最佳, 抑菌圈直径为 (10.64 ± 0.04) mm, 显著高于大肠杆菌, 对金黄色葡萄球菌基本无抑制效果。

研究^[35]表明, 黄酮类化合物具有较强的抑菌活性, 如槲皮素-3-*O*-葡萄糖苷及各种槲皮素苷、山奈酚及其衍生物、芹菜素、儿茶素等具有抑菌作用, 这些化合物已在辣木叶总黄酮中被鉴定出^[9-11]。王丽虹等^[23]研究表明, 辣木叶醇提物及其乙酸乙酯萃取相、正丁醇萃取相对金黄色葡萄

表 2 Box-Behnken 试验结果
Table 2 The results of Box-Behnken experiment

组合	A	B	C	D	提取率/%	组合	A	B	C	D	提取率/%
1	1	0	-1	0	6.846±0.047	16	0	1	0	-1	6.710±0.008
2	1	-1	0	0	6.619±0.020	17	0	1	-1	0	7.016±0.026
3	0	1	1	0	6.937±0.026	18	-1	0	0	1	7.090±0.020
4	0	0	0	0	7.426±0.027	19	0	0	0	0	7.269±0.020
5	0	0	1	1	6.758±0.008	20	0	-1	1	0	6.994±0.015
6	-1	0	-1	0	7.365±0.020	21	0	0	0	0	7.247±0.033
7	0	0	0	0	7.295±0.020	22	-1	1	0	0	7.011±0.020
8	-1	0	1	0	7.151±0.033	23	0	-1	0	-1	6.902±0.030
9	1	0	1	0	6.649±0.035	24	0	-1	-1	0	7.107±0.023
10	0	0	1	-1	6.828±0.033	25	-1	0	0	-1	6.907±0.020
11	1	0	0	-1	6.636±0.013	26	0	1	0	1	6.610±0.023
12	0	0	0	0	7.299±0.027	27	0	0	-1	1	6.784±0.015
13	0	0	-1	-1	7.064±0.046	28	1	1	0	0	6.763±0.020
14	0	-1	0	1	6.806±0.026	29	1	0	0	1	6.457±0.020
15	-1	-1	0	0	7.173±0.039						

表 3 Box-Behnken 试验结果方差分析[†]
Table 3 Variance analyses of Box-Behnken experiment result

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性
模型	1.782	14	0.127	25.651	<0.000 1	* *
A	0.640	1	0.640	129.050	<0.000 1	* *
B	0.026	1	0.026	5.155	0.039 5	*
C	0.061	1	0.061	12.341	0.003 4	* *
D	0.024	1	0.024	4.772	0.046 4	*
AB	0.021	1	0.021	4.148	0.061 0	
AC	7.225E-005	1	7.225E-005	0.015	0.905 7	
AD	0.033	1	0.033	6.603	0.022 3	*
BC	8.812E-005	1	8.812E-005	0.018	0.895 9	
BD	6.304E-007	1	6.304E-007	1.271E-004	0.991 2	
CD	0.011	1	0.011	2.222	0.158 2	
A ²	0.267	1	0.267	53.796	<0.000 1	* *
B ²	0.289	1	0.289	58.237	<0.000 1	* *
C ²	0.063	1	0.063	12.774	0.003 1	* *
D ²	0.760	1	0.760	153.117	<0.000 1	* *
残差	0.066	14	4.961E-003			
失拟项	0.050	10	5.005E-003	1.031	0.534 4	
纯误差	0.019	4	4.853E-003			
总离差	1.851	28				

[†] * 表示差异显著 ($P < 0.05$), * * 表示差异极显著 ($P < 0.01$); $R^2 = 0.962\ 5$ 。

萄球菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌均有不同程度的抑制作用。郭妍等^[11]研究表明,5~500 μg/mL的辣木叶黄酮对金黄色葡萄球菌具有抑菌活性,对大肠杆菌无抑制效果。马金魁等^[14]研究表明,辣木叶总黄酮对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌均有较好的抑制效果,抑菌圈直径分别为(17.30±0.01),(16.20±0.10),(12.50±0.10)mm。王远^[10]研究表明辣木叶总黄酮的抑菌效果受到纯化与否及辣木叶总黄酮质量浓度的影响。以上结果与试验结果有差异,可能与辣木叶总黄酮溶液的质量浓度以及黄酮类单体成分的组成不同有关。

2.4 抗氧化活性

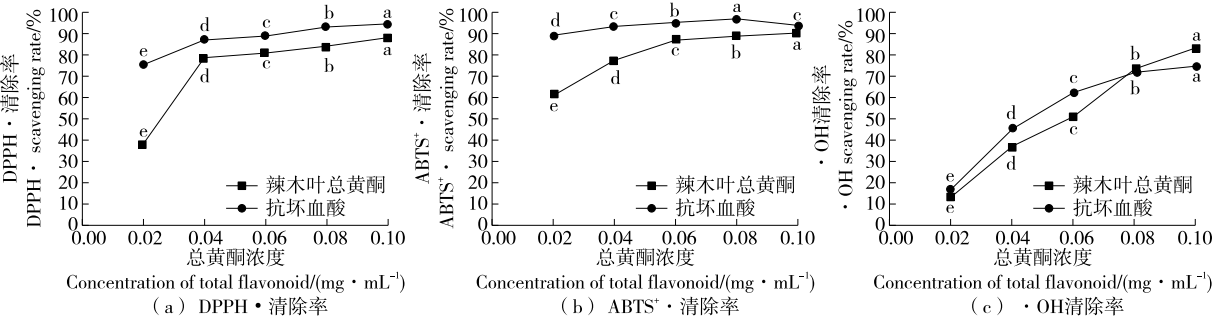
由图2可知,随着提取物质量浓度的增大,DPPH·和ABTS⁺·的清除率逐渐上升,但均低于相同质量浓度的抗坏血酸。当样品质量浓度为0.02~0.10 mg/mL时,随着辣木叶总黄酮质量浓度的增加,其对·OH的清除率几乎呈线性上升。当辣木叶总黄酮质量浓度为0.02~

0.06 mg/mL时,其对·OH的清除率低于同质量浓度的抗坏血酸,当辣木叶总黄酮质量浓度>0.08 mg/mL时,其对·OH的清除率高于抗坏血酸,说明高浓度的提取物对·OH的清除效果较好。抗坏血酸对DPPH·、ABTS⁺·和·OH的IC₅₀值分别为0.007,0.001,0.047 mg/mL,而辣木叶总黄酮对应的IC₅₀值分别为0.024,0.014,0.051 mg/mL,分别为抗坏血酸的3.43,14.00,1.09倍。

表4 辣木叶总黄酮的抑菌圈直径[†]
Table 4 The diameter of inhibition zone of total flavonoids from leaves of *M. oleifera* Lam.

供试菌种	抑菌圈直径/mm		判定结果
	辣木总黄酮	对照	
枯草芽孢杆菌	10.64±0.04 ^a	6.00	中度敏感
大肠杆菌	8.25±0.36 ^b	6.00	中度敏感
金黄色葡萄球菌	6.13±0.02 ^c	6.00	不敏感

† 小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。



小写字母不同表示差异显著(P<0.05)

图2 辣木叶总黄酮提取物的抗氧化活性

Figure 2 Antioxidant activity of total flavonoid extracted from leaves of *M. oleifera* Lam.

3 结论

通过 Box-Behnken 中心组合设计四因素三水平的响应面试验,得到微波辅助提取辣木叶总黄酮的最佳工艺条件为料液比1:29(g/mL)、微波功率567 W、微波时间3.6 min、乙醇体积分数50%,此条件下辣木叶总黄酮提取率为(7.414±0.027)%。与传统的溶剂浸提相比,试验方法具有提取时间短、提取率高的特点。抑菌活性试验结果表明,辣木叶总黄酮对枯草芽孢杆菌和大肠杆菌具有不同程度的抑菌作用,属于中度敏感,对金黄色葡萄球菌几乎无抑制作用。抗氧化试验结果表明,辣木叶总黄酮对体外DPPH·、·OH、ABTS⁺·清除的半抑制浓度分别为0.024,0.051,0.014 mg/mL,说明其具有较强的抗氧化活性。试验所选取的供试菌种和抗氧化方法较少,对辣木叶总黄酮的抑菌和抗氧化活性评价还不够全面,后续应选用更多的菌种和不同原理的抗氧化方法进行试验,并对抑菌和抗氧化活性的机理进行探索。此外,不同的黄酮类化合物单体的抑菌和抗氧化能力不同,多种黄酮类化合物单体联用会形成协同或拮抗作用。试验中的

辣木叶总黄酮为粗提物,具体的黄酮类单体成分及含量尚不明确,还需进一步研究。

参考文献

[1] STOHS S J, HARTMAN M J. Review of the safety and efficacy of *Moringa oleifera*[J]. *Phytotherapy Research*, 2015, 29(6): 796-804.
[2] 周伟,黄志莲,彭芍丹,等.辣木的营养价值及其加工展望[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(10): 2 090-2 098.
ZHOU Wei, HUANG Zhi-lian, PENG Shao-dan, et al. Nutritional value and processing prospect of *Moringa oleifera*[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(10): 2 090-2 098.
[3] TEIXEIRA E M B, CARVALHO M R B, NEVES V A, et al. Chemical characteristics and fractionation of proteins from *Moringa oleifera* Lam. leaves[J]. *Food Chemistry*, 2014, 147: 51-54.
[4] HORWATH M, BENIN V. Theoretical investigation of a reported antibiotic from the "Miracle Tree" *Moringa oleifera*[J]. *Computational and Theoretical Chemistry*, 2011, 965(1): 196-201.
[5] ERICK S C, MONICA V S, CLAUDIA A D, et al. Effects of *Moringa oleifera* leaf extract on diabetes-induced alterations in paraoxonase 1 and catalase in rats analyzed through progress kinetic and

- blind docking[J]. Enzymatic and Non-Enzymatic Molecules with Antioxidant Function, 2020, 9(9): 840.
- [6] 陈小丰, 任慧, 许凤, 等. 辣木叶黄酮对采后金桔青霉病的防治及机理研究[J]. 核农学报, 2020, 34(5): 1 028-1 037.
- CHEN Xiao-feng, REN Hui, XU Feng, et al. Prevention effects of flavonoids from leaves of *Moringa oleifera* Lam. on kumquats postharvest blue mold and its possible mechanism[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(5): 1 028-1 037.
- [7] 熊凡, 刘阳. 辣木叶中活性物质及其药理功能研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(9): 212-218.
- XIONG Fan, LIU Yang. Research progress on the pharmacological functions of active components in *Moringa oleifera* leaves[J]. Food Research and Development, 2021, 42(9): 212-218.
- [8] 袁静, 梁文仪, 袁永兵, 等. 辣木叶化学成分和药理活性的研究进展[J]. 中草药, 2021, 52(14): 4 422-4 432.
- YUAN Jing, LIANG Wen-yi, YUAN Yong-bing, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of *Moringa oleifera* leaves[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(14): 4 422-4 432.
- [9] 高秋玉, 邓小宽, 刘丽琼. 辣木叶抗氧化活性研究及活性成分含量测定[J]. 食品工业科技, 2016, 23: 324-327.
- GAO Qiu-yu, DENG Xiao-kuan, LIU Li-qiong. Research of antioxidative activity and determination of active ingredients in *Moringa oleifera* Lam. leaves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 23: 324-327.
- [10] 王远. 辣木叶黄酮的提取、分离纯化、结构鉴定及生物活性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017: 16-72.
- WANG Yuan. Extraction, purification, and identification of flavonoids from *Moringa oleifera* Lam. [D]. Hanzhou: Zhejiang Gongshan University, 2017: 16-72.
- [11] 郭妍. 辣木叶植物化学物质分析及体外生物活性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018: 29-38.
- GUO Yan. Study on analysis of phytochemicals from *Moringa oleifera* leaves and their biological activities in vitro[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018: 29-38.
- [12] 张善添, 关冠恒, 姚小丽, 等. 辣木叶总黄酮提取工艺的研究[J]. 广东化工, 2017, 44(5): 47-48.
- ZHANG Shan-tian, GUAN Guan-heng, YAO Xiao-li, et al. Study on extraction process of total flavonoids from leaves of *Moringa oleifera*[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(5): 47-48.
- [13] 陈庆玥, 谢永华, 林水森, 等. 辣木叶总黄酮的提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(9): 73-78.
- CHEN Qing-yao, XIE Yong-hua, LIN Shui-sen, et al. Optimization of extraction technology of total flavonoids from *Moringa oleifera* Lam. and its antioxidant activity[J]. China Food Additives, 2020, 31(9): 73-78.
- [14] 马金魁, 黄晓辰, 张佳仪, 等. 响应面法优化辣木叶总黄酮提取工艺及其抑菌活性研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 57-65.
- MA Jin-kui, HUANG Xiao-chen, ZHANG Jia-yi, et al. Extraction optimization and antibacterial activity of total flavonoids in *Moringa oleifera* leaves by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2019, 40(15): 57-65.
- [15] 吴迪, 赵贝贝, 耿曼璐, 等. 正交试验优化超声提取辣木叶总黄酮及其抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(8): 96-99.
- WU Di, ZHAO Bei-bei, GENG Man-lu, et al. Optimization of ultrasonic extraction of total flavonoids from *Moringa oleifera* leaves and their antioxidant activities by orthogonal test[J]. Cereals and Oils, 2017, 30(8): 96-99.
- [16] 孙朦, 王鸿飞, 李艳霞, 等. 辣木叶总黄酮提取工艺优化及抗氧化能力研究[J]. 核农学报, 2018, 32(9): 1 772-1 780.
- SUN Meng, WANG Hong-fei, LI Yan-xia, et al. Optimization of extraction and antioxidant activities of total flavonoids from leaves of *Moringa oleifera* Lam.[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(9): 1 772-1 780.
- [17] 岳秀洁, 李超, 扶雄. 超声提取辣木叶黄酮优化及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2016, 37(1): 226-231.
- YUE Xiu-jie, LI Chao, FU Xiong. Optimization of ultrasonic extraction of flavonoids from *Moringa stenopetala* leaves and their antioxidant activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(1): 226-231.
- [18] 吉莉莉, 汪开毓, 罗晓波, 等. 辣木叶总黄酮响应面法微波萃取工艺优化及其体外降糖效果观察[J]. 天然产物研究与开发, 2015, 27: 979-985.
- JI Li-li, WANG Kai-yu, LUO Xiao-bo, et al. Optimization of extraction of total flavones from *Moringa oleifera* leaves by response surface methodology and its in vitro hypoglycemic activity [J]. Natural Product Research and Development, 2015, 27: 979-985.
- [19] 谢勇武, 谭属琼, 陈玉莹. 响应面法优化辣木叶总黄酮提取工艺及其分离纯化[J]. 分子植物育种, 2019, 17(15): 5 120-5 130.
- XIE Yong-wu, TAN Shu-qiong, CHEN Yu-ying. Extraction technology and separation and purification of total flavonoids from *Moringa oleifera* leaves by face-to-face method [J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(15): 5 120-5 130.
- [20] 刘骋. 亚临界萃取辣木生物活性成分初探[D]. 天津: 天津大学, 2015: 49-54.
- LIU Cheng. Extraction of biological active components from *Moringa tree* by sub-critical fluid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 49-54.
- [21] 周滢, 梁敏丽, 解雅倩, 等. 辣木籽总黄酮提取工艺优化[J]. 广东化工, 2020, 47(20): 18-20.
- ZHOU Ying, LIANG Min-li, XIE Ya-qian, et al. To optimize the extraction technology of total flavonoids from *Moringa oleifera* seed[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(20): 18-20.
- [22] 张展适. 辣木叶中总黄酮超声提取工艺优化[J]. 广州化工, 2021, 49(15): 93-95.
- ZHANG Zhan-shi. Optimization of ultrasonic extraction technology of total flavonoids from leaves of *Moringa oleifera*[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(15): 93-95.
- [23] 王丽虹, 刘阳, 姜圆圆, 等. 辣木叶醇提物不同极性部位抑菌活性研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(10): 34-38.
- WANG Li-hong, LIU Yang, JIANG Yuan-yuan, et al.

- Antimicrobial activity of different polar extracts of alcohol extract from *Moringa oleifera* leaves[J]. Food Research and Development, 2020, 41(10): 34-38.
- [24] 徐赫, 李荣华, 夏岩石, 等. 黄酮类化合物提取、分离纯化方法研究现状及展望[J]. 应用化工, 2021, 50(6): 1 677-1 682.
- XU He, LI Rong-hua, XIA Yan-shi, et al. Research status and prospect of extraction and purification methods of flavonoids [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(6): 1 677-1 682.
- [25] 曹利慧, 范业刚. 植物中黄酮类化合物提取方法研究进展[J]. 安徽化工, 2020, 46(6): 6-9.
- CAO Li-hui, FAN Ye-gang. Study progress on extraction methods of flavonoids compounds in plants[J]. Anhui Industry Chemical, 2020, 46(6): 6-9.
- [26] 杨丽华, 汤志花, 杨晓娜, 等. 山鸡椒根精油成分分析及其抑菌活性和抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(10): 140-146.
- YANG Li-hua, TANG Zhi-hua, YANG Xiao-na, et al. Analysis of essential oil from the root of *Litsea cubeba* and its antibacterial and antioxidant activities[J]. China Food Additives, 2021, 32(10): 140-146.
- [27] 王娟, 袁绍莉, 王丹. Box-Behnken 响应面法优化枇杷叶多糖提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(6): 47-54.
- WANG Juan, YUAN Shao-li, WANG Dan. Optimization of extraction process and antioxidant activity of polysaccharides from *Eriobotrya japonica* leaves by Box-Behnken response surface methodology[J]. China Food Additives, 2020, 31(6): 47-54.
- [28] 谢挺, 赵晖. 响应面法优化微波辅助提取菜豆总黄酮工艺及对运动大鼠心肌线粒体的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(12): 90-95.
- XIE Ting, ZHAO Hui. Optimization of microwave-assisted extraction of total flavonoids from kidney bean by response surface methodology and its effect on myocardial mitochondria of exercise rats[J]. Food Research and Development, 2020, 41(12): 90-95.
- [29] 唐森, 李路彬, 覃逸明, 等. 刀豆壳总黄酮提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(6): 76-84.
- TANG Sen, LI Lu-bin, QIN Yi-ming, et al. Optimization of extraction technology and its antioxidant activity of total flavonoids from *Concanavalis shell* [J]. Food Research and Development, 2021, 42(6): 76-84.
- [30] 丘苑新, 张泽雄, 何娣, 等. 超声波辅助提取桉树叶黄酮及其抗氧化、抑菌能力研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 174-178.
- QIU Yuan-xin, ZHANG Ze-xiong, HE Di, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction technology of flavonoids from pomelo leaves and its antioxidant and antibacterial capabilities[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 174-178.
- [31] 刘昌芬, 伍英, 龙继明. 不同品种和产地辣木叶片营养成分含量[J]. 热带农业科技, 2003, 26(4): 1-3.
- LIU Chang-fen, WU Ying, LONG Ji-ming. Nutrients of drumstick tree leaf of different varieties and producing area[J]. Tropical Agricultural Science and Technology, 2003, 26(4): 1-3.
- [32] 初雅洁, 符史关, 龚加顺. 云南不同产地辣木叶成分的分析比较[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 160-164.
- CHU Ya-jie, FU Shi-guan, GONG Jia-shun. A comparative study of components of *Moringa oleifera* leaves from different regions in Yunnan[J]. Food Science, 2016, 37(2): 160-164.
- [33] 林羨, 徐玉娟, 肖更生, 等. 干燥方式对辣木叶营养活性成分、抗氧化活性及色泽的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(12): 2 465-2 472.
- LIN Xian, XU Yu-juan, XIAO Geng-sheng, et al. Effects of drying methods on bioactive components, antioxidant capacity and color of the leaves of *Moringa oleifera* Lam. [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(12): 2 465-2 472.
- [34] 霍归国, 梁婷玉, 黄志芸, 等. 茛蒿精油成分分析及抑菌活性机理探究[J]. 西北植物学报, 2021, 41(6): 273-280.
- HUO Gui-guo, LIANG Ting-yu, HUANG Zhi-yun, et al. Composition analysis and antibacterial activity mechanism exploration of *Artemisia anethoides* Mattf. essential oil[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(6): 273-280.
- [35] 玄红专, 胡福良. 黄酮类化合物抑制微生物活性及其作用机制[J]. 天然产物研究与开发, 2010, 22(1): 171-175.
- XUAN Hong-zhuan, HU Fu-liang. Antimicrobial activity and mechanism of flavonoids[J]. Natural Product Research and Development, 2010, 22(1): 171-175.

(上接第 92 页)

- [10] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012: 12-56.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Evaluation and expression of measurement uncertainty: JJF 1059. 1—2012 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2012: 12-56.
- [11] 袁海, 肖晓义, 刘佳, 等. 高效液相色谱法测定食用槟榔中苯甲酸、山梨酸和糖精钠的不确定度评定[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 77-81.
- YUAN He, XIAO Xiao-yi, LIU Jia, et al. Evaluation of uncertainty in determination of benzoic acid, sorbic acid and saccharin sodium in edible betel nut by HPLC[J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 77-81.
- [12] 王霞, 张维谊, 韩奕奕, 等. 高效液相色谱法测定水果和蔬菜中维生素 C 含量的不确定度评定[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 73-77.
- WANG Xia, ZHANG Wei-yi, HAN Yi-yi, et al. Uncertainty evaluation of the determination of vitamin C in fruits and vegetables by high performance liquid chromatography[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 73-77.
- [13] 中国国家质量监督检验检疫总局. 电子天平计量检定规程: JJG 1036—2008[S]. 北京: 中国计量出版社, 2008: 7.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Verification regulation of electronic balance measurement: JJG 1036—2008[S]. Beijing: China Metrology Press, 2008: 7.