

## 超声波辅助提取刺梨籽黄酮工艺优化 及其体外抗氧化活性研究

李美东, 罗 凯, 黄秀芳\*

(湖北民族大学 生物科学与技术学院, 湖北 恩施 445000)

**摘要:** 以恩施市野生刺梨籽为原料, 借助超声波为辅助的提取方法, 对野生刺梨的刺梨籽黄酮的提取工艺进行优化研究, 在此基础上初步探索刺梨籽黄酮的抗氧化活性. 提取工艺响应面优化结果为: 提取剂乙醇体积分数(v/v) 81.36%, 超声功率 403.54 W, 超声时间 55.76 min, 液料比 21.94 : 1, 响应面模型预测刺梨籽黄酮提取最大得率为 82.27 mg/g. 以优化后的提取条件进行黄酮提取验证, 其得率为 80.16 mg/g, 与模型预测值的误差为 2.56%. 通过体外抗氧化活性试验, 表明刺梨籽黄酮提取物具有一定的抗氧化活性. 该试验结果为刺梨籽黄酮的提取以及黄酮的性质研究提供了一定的试验基础.

**关键词:** 刺梨籽; 超声辅助; 黄酮; 响应面; 抗氧化

中图分类号: TS255.4 文献标志码: A

## Ultrasonic-assisted Extraction of Flavone from *Rosa roxbunghii* Seeds and Its Antioxidant Activity in Vitro

LI Meidong, LUO Kai, HUANG Xiufang\*

(College of Biological Science and Technology, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China)

**Abstract:** Taking Enshi wild *Rosa roxbunghii* seeds as raw materials, we used ultrasonic-assisted extraction method to study the extraction, separation process and in vitro antioxidant activity of flavone. The optimized results were: Ethanol concentration (v/v) was 81.36%, ultrasonic power was 403.54 W, ultrasonic time was 55.76 min, and the material-liquid ratio was 21.94 : 1. Performing verification experiments under these conditions, we obtained a maximum yield of 82.27 mg/g. The yield of flavone was 80.16 mg/g with an error of 2.56%. The in vitro antioxidant activity experiment showed that the flavonoid extract of *Rosa roxbunghii* seeds has certain antioxidant activity. The experimental results provided a certain experimental basis for the extraction of flavones from *Rosa roxbunghii* seeds and the study of the properties of flavone.

**Keywords:** *Rosa roxbunghii* seeds; ultrasound-assisted; flavone; response surface; antioxidant

刺梨(*Rosa roxbunghii*) 属于蔷薇科的植物, 在中国具有十分广泛的分布, 一直以来作为一种野生水果而受人们的喜爱, 拥有维生素 C 之王的美誉, 近年来由于其有极好的药用价值和食用保健价值而被广泛研究和开发利用<sup>[1-11]</sup>. 文献报道刺梨中的超氧化物歧化酶(SOD) 具有一定的解毒功能、镇静功能<sup>[12-14]</sup>, 刺梨中的黄酮物质具有抗氧化作用, 并对动脉粥样硬化<sup>[15-16]</sup>、糖尿病的防治<sup>[17]</sup>具有一定的效果. 刺梨中的多糖具有一定的抗疲劳效果<sup>[18]</sup>. 将刺梨榨成刺梨汁后, 汁中的活性成分有更多的功效, 例如延缓衰老<sup>[19]</sup>、对急性胃黏膜的损伤<sup>[20]</sup>、降低体内重金属的含量<sup>[21-23]</sup>等.

目前对于刺梨的加工主要运用其果肉, 在刺梨加工过程中, 刺梨籽等下脚料作为废料而被遗弃, 在生产过程中, 如能将这些资源进行收集并对其加以有效利用, 能够有效的提高刺梨的综合利用并实现良好的经济价值. 本文以野生刺梨的种子(刺梨籽)为原料, 研究的重点为刺梨籽中黄酮的提取工艺, 同时对刺梨籽黄酮的抗氧化性进行相应的探究, 为恩施野生刺梨籽的开发与利用提供试验数据以及相应的理论依据.

收稿日期: 2020-01-07.

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(201610517018); 湖北民族大学科技学院大学生创新创业训练计划项目(KCX2016031).

第一作者简介: 李美东(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事食品生物技术的研发; \* 通信作者: 黄秀芳(1979-), 女, 硕士, 实验师, 主要从事功能食品营养与安全的研究.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

野生刺梨籽: 采摘于湖北省恩施市的野生刺梨. 刺梨采摘后去除果肉部分, 分离获得野生刺梨的种子, 置于 50℃ 恒温干燥箱中烘干、粉碎、过 100 目筛后保存、备用.

芦丁标准品; 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH) (0.1 mol/L); 乙醇(v/v); 5%亚硝酸钠; 10%硝酸铝; 铁氰化钾( $K_3[Fe(CN)_6]$ ); 甲醇; 硫酸铁(500  $\mu\text{mol/L}$ ); 4%氢氧化钠; 0.1%  $FeCl_3$ ; 10%三氯乙酸(TCA); 双氧水( $H_2O_2$ , 500  $\mu\text{mol/L}$ ); 维生素 C(Vc); 石油醚(30~60℃沸程). 以上试剂均为分析纯.

### 1.2 仪器与设备

SY-360 型超声波提取机(昆山市超声仪器有限公司); FW-100 型高速粉碎机(上海楚定分析仪器有限公司); RE-2000 型旋转蒸发器(上海洪旋实验仪器有限公司)等.

### 1.3 试验方法

1.3.1 刺梨籽黄酮的提取工艺<sup>[24]</sup> 准确称取刺梨籽粉末 5.0 g 放入 100 mL 三角瓶中, 加入不同体积分数的乙醇溶液进行超声波辅助提取, 过滤得黄酮粗提液, 粗提液通过石油醚脱色处理并过滤, 所得滤液用 70% 乙醇溶液溶解并定容至 50 mL, 分光光度法 510 nm 处测定提取液的吸光值, 按照芦丁标准曲线计算刺梨籽黄酮含量.

1.3.2 芦丁标准曲线的绘制<sup>[25]</sup> 该方法采用硫酸铝显色法. 具体流程为: 取 20 mg 标准芦丁样品加入 70% (v/v) 乙醇溶液溶解定容至 100 mL, 得到 0.2 mg/mL 芦丁标准溶液, 取 6 支 25 mL 具塞试管(编号 1-6) 依次精确加入 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mL 的标准液, 同时加入 70% (v/v) 乙醇溶液定容至 10 mL, 再分别加入 1.5 mL 5% 的亚硝酸钠溶液后室温放置 6 min, 再次分别加入 2 mL 10% 的硝酸铝溶液并室温放置 15 min, 分光光度计 510 nm 处测吸光度值. 制得标准曲线方程:  $A = 2.0334C - 0.0007$  ( $R^2 = 0.997$ ).

1.3.3 单因素试验设计 试验设计 4 个单因素来考察其对刺梨籽黄酮提取得率的影响, 提取液乙醇体积分数选择 30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%; 料液比选择 1:10、1:20、1:30、1:40、1:50、1:60、1:70; 超声波处理时间选择 45、55、65、75、85、95、105 min; 超声波功率分别选择为: 152、199、247、304、351、399、446 W.

1.3.4 响应面试验设计 在单因素试验的基础上, 以刺梨籽黄酮的提取得率为响应值, 以上述 4 个因素为因变量, 设计 4 因素 3 水平的响应面优化试验, 响应面设计方案为: A: 料液比(水平分别为 1:10、1:20、1:30); B: 超声时间(水平分别为 45、55、65 min); C: 乙醇体积分数(水平分别为 60%、70%、80%); D: 超声功率(水平分别为 351、399、446 W).

1.3.5 刺梨籽黄酮的抗氧化试验 刺梨籽黄酮 DPPH 自由基的清除率、羟自由基的清除率以及还原力检测方法分别参考文献 [25-26] 进行.

### 1.4 数据处理

本试验中所有检测分别进行 3 次平行操作和检测, 所得数据取得平均值后采用 origin 8.0 软件以及 Excel 2007 进行处理.

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果分析

2.1.1 提取液( $CH_3CH_2OH$ )对刺梨籽黄酮得率的影响 不同体积分数的有机溶剂由于其极性的差异从而对有机物质的浸提产生较大的影响, 因此本试验设计运用 7 种不同体积分数的乙醇溶液来进行刺梨籽黄酮提取最佳溶液的优化试验. 试验结果如图 1 所示. 结果表明, 随着提取液乙醇体积分数的升高, 刺梨籽黄酮的得率也相应得到提高, 当乙醇体积分数达到 70% 时, 刺梨籽黄酮得率达到最大值, 之后继续增加乙醇的含量, 刺梨籽黄酮得率反而开始下降, 因此选定 70% 乙醇溶液作为刺梨籽黄酮提取的最佳溶剂.

2.1.2 液料比对刺梨籽黄酮得率的影响 通常在提取有机物的过程中原料与溶剂的比例也是十分关键的参数. 本试验探究了不同液料比对刺梨籽黄酮的得率影响规律, 所得结果如图 2 所示. 结果表明, 当提取溶剂用量达到 20:1 时, 刺梨籽黄酮得率达到最大值, 若持续增加溶剂的用量, 刺梨籽黄酮的得率反而呈缓慢减少的趋势. 分析这种现象的原因可能是因为, 当液料比达到 20:1 时, 刺梨籽中黄酮类物质已完全溶出, 再增

加溶剂的用量,使得黄酮的损失率提高,因此液料比宜选用 20 : 1.

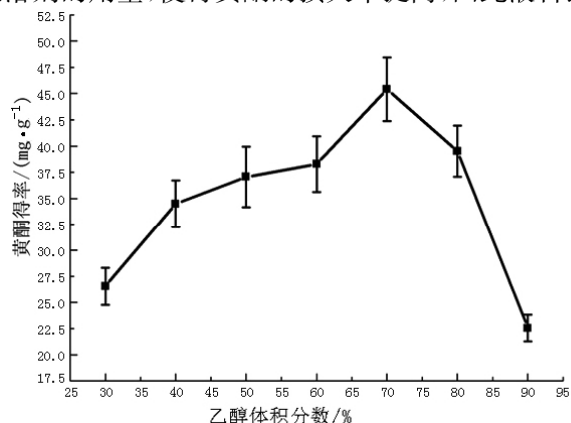


图 1 提取液 (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH) 对刺梨籽黄酮得率的影响

Fig.1 Effect of extraction (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH) concentration on the yield of flavonoids from *Rosa roxbunghii* seed

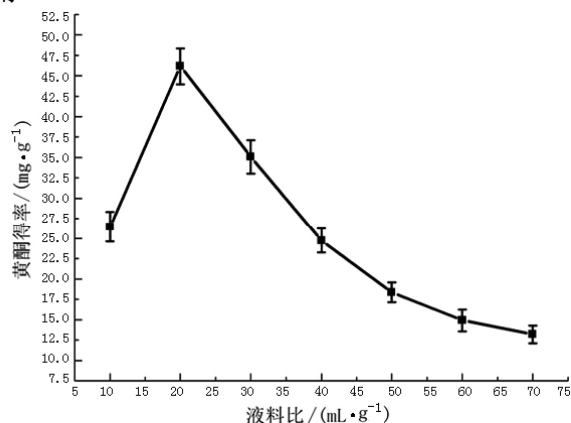


图 2 液料比对刺梨籽黄酮得率的影响

Fig.2 Effect of liquid-to-material ratio on the yield of flavonoids from *Rosa roxbunghii* seed

2.1.3 超声波功率对刺梨籽黄酮得率的影响 超声波对细胞膜的通透性有一定的影响,能导致细胞膜和细胞壁受到破坏从而有利于胞内物质的溶出,因此有利于植物细胞中有机物的提取.本试验探究了不同的超声功率对刺梨籽黄酮得率的影响规律,结果如图 3 所示.结果表明,在超声功率小于 399 W 时,刺梨籽黄酮的得率随着超声功率的逐渐上升而上升,在 399 W 处得到最大值,但在超声功率达到 399 W 后,刺梨籽黄酮得率随之下降.分析其原因可能是超声功率较高时,溶液温度升高导致黄酮类物质稳定性下降而部分被氧化,致使得率出现下降的结果.因此本试验中超声功率选 399 W 为宜.

2.1.4 超声波处理时间对刺梨籽黄酮得率的影响 试验在前述研究的基础上,探索了不同超声波处理时间对刺梨籽黄酮得率的影响研究,结果如图 4 所示.结果表明,当超声时间达到 55 min 时,刺梨籽黄酮的得率得到了最大值,进而继续增加超声波对刺梨籽黄酮的处理时间,黄酮的得率逐步开始呈下降趋势.分析其原因可能是因为当超声时间达到 55 min 时,黄酮类物质已基本溶出,进一步延长产生时间,可能导致黄酮受到破坏致使得率降低,因此本试验超声时间定为 55 min 为最佳.

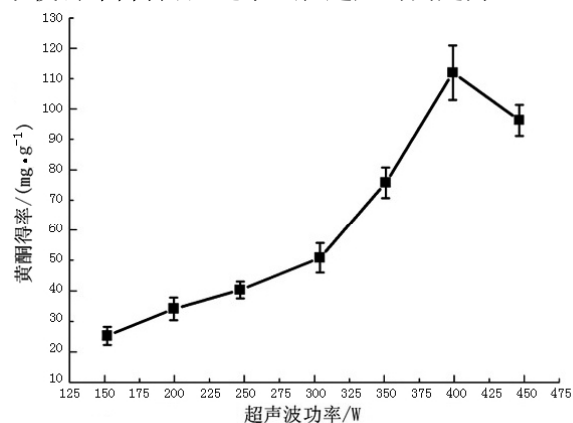


图 3 超声波功率对刺梨籽黄酮得率的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic power on the yield of flavonoids from *Rosa roxbunghii* seed

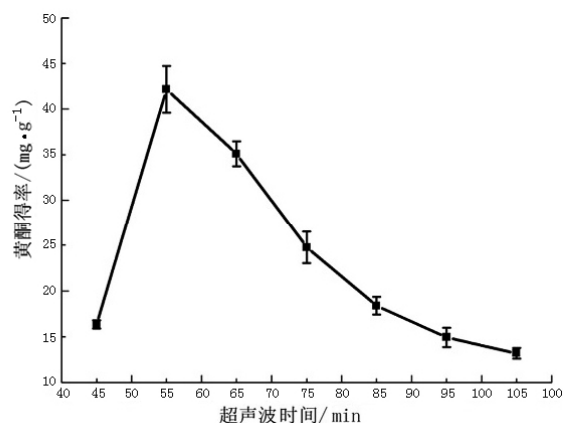


图 4 超声波处理时间对刺梨籽黄酮得率的影响

Fig.4 Effect of ultrasound processing time on the yield of flavonoids from *Rosa roxbunghii* seed

## 2.2 响应面试验结果与分析

2.2.1 响应面试验结果 结合刺梨籽黄酮提取单因素的试验结果,进行响应面优化试验,所得试验结果如表 1 所示.

2.2.2 响应面数学模型方差分析结果 对试验得出的数学模型讨论其方差,并对方程的有效性、因子之间的回归系数进行检验,所得结果的方差分析如表 2 所示.二次回归模型的  $P < 0.0001$ ,说明了模型具有极高的显著性;同时模型的失拟项  $P = 0.077 > 0.05$ ,说明所得出的失拟项差异并不显著,可用于超声波提取刺梨籽黄酮的预测和分析.由  $F$  检验对自变量、因变量的影响判断,得到各因素对刺梨籽黄酮的得率影响的主要次序是  $C > D > A > B$ ,即得出结论为:不同体积分数的乙醇溶液对提取刺梨籽黄酮得率影响最大,其次是超声波的

功率、液料比,最后是超声时间.同时,表 2 结果还显示,在此试验设计中,C、AB、BC 等项极显著 ( $P<0.01$ ); A、D 项显著 ( $0.01<P<0.05$ ),其他项不显著.另外,所选模型的  $R^2=0.995$ ,可用于超声波提取刺梨籽黄酮的预测和分析.响应面交互作用如图 5 所示.在两两交互项对刺梨籽黄酮得率的影响中,所得的数据结果与前述方差分析结果保持一致.在最佳条件下进行预测结果的验证试验,实际得到刺梨籽黄酮的得率为  $80.16\text{ mg/g}$ ,此时模型的预测值为  $82.27\text{ mg/g}$ ,误差为  $2.56\%$ .

回归方程为:  $Y=81.20+3.73A+1.77B+6.46C+4.09D+AB+10.52+0.96AC+1.59AD-9.29BC+3.13BD+2.58CD-12.37A^2-19.04B^2-22.57C^2-24.94D^2$ .

表 1 Box-Bwhneken 试验结果  
Tab.1 The results of Box-Behnken design

试验号	黄酮得率/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	试验号	黄酮得率/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )
1	84.72	16	37.51
2	42.79	17	42.20
3	67.47	18	52.55
4	29.22	19	34.10
5	50.50	20	25.55
6	40.15	21	37.24
7	39.60	22	54.06
8	49.76	23	55.76
9	40.71	24	83.27
10	79.37	26	52.45
11	51.15	26	45.01
12	20.43	27	81.91
13	23.12	28	33.56
14	32.07	29	76.72
15	42.55		

表 2 回归模型的方差分析  
Tab.2 Regression model variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著度
模型	8973.28	14	640.95	17.66	<0.0001	***
A-液料比	166.88	1	166.88	4.60	0.0500	**
B-超声时间	37.74	1	37.74	1.04	0.3252	
C-乙醇浓度	501.04	1	501.04	13.80	0.0023	***
D-超声功率	200.33	1	200.33	5.52	0.0340	**
AB	442.47	1	442.47	12.19	0.0036	***
AC	3.71	1	3.71	0.10	0.7540	
AD	10.14	1	10.14	0.28	0.6053	
BC	345.59	1	345.59	9.52	0.0081	***
BD	39.25	1	39.25	1.08	0.3160	
CD	26.57	1	26.57	0.73	0.4066	
A <sup>2</sup>	992.92	1	992.92	27.36	0.0001	***
B <sup>2</sup>	2352.38	1	2352.38	64.81	<0.0001	***
C <sup>2</sup>	3356.01	1	3356.01	92.47	<0.0001	***
D <sup>2</sup>	4034.56	1	4034.56	111.16	<0.0001	***
残差	508.12	14	36.29			
失拟项	467.52	10	46.75	4.61	0.0771	
纯误差	40.60	4	10.15			

结合所有数据分析得到对恩施野生刺梨籽黄酮的最佳的提取条件是:乙醇体积分数为  $81.36\%$ ,液料比为  $21.94\text{ mL/g}$ ,功率为  $403.54\text{ W}$ ,超声时间为  $55.76\text{ min}$ .在此条件下,刺梨籽黄酮的得率最高,说明模型可以较好地反映出刺梨籽黄酮提取的条件,优化条件也较为可靠.

### 2.3 刺梨籽黄酮体外抗氧化试验结果与分析

2.3.1 刺梨籽黄酮 DPPH 自由基清除率试验 在优化刺梨籽黄酮提取工艺的实验基础上,对刺梨籽黄酮的生理活性进一步探索.本试验探究了刺梨籽黄酮提取物对 DPPH 自由基的效果能力,结果如图 6 所示.结果表明,在试验测定的质量浓度范围内,随着 Vc、BHT、刺梨籽黄酮提取液的含量增加,DPPH 自由基的清除率也增加.当刺梨籽黄酮提取液质量浓度比较低的时候,刺梨籽黄酮提取液的羟自由基清除效果也低于对照品 Vc 的清除效果,当刺梨黄酮提取液的质量浓度达到  $0.5\text{ mg/mL}$  时,黄酮提取液的自由基清除效果与 Vc 的自由基清除效果基本相同,这也说明在作为添加剂使用时,只要使用量调整合理,刺梨籽黄酮的作用与 Vc 可以达到相同的效果,同时因为黄酮与 Vc 的其它生理活性有较大的区别,因此在一些不适合使用 Vc 或者为了达到其它目的的产品中,添加刺梨籽黄酮是完全可行的.

2.3.2 刺梨籽黄酮还原力测定 还原力也是黄酮的主要生理活性的体现,本试验探究了刺梨籽黄酮的还原力并与 Vc 进行了比较,试验结果如图 7 所示.吸光度值的升降变化可以反映出样品自身还原力的能力高低,体系的吸光度数值越大,其还原力越强.在本试验所测定的质量浓度范围内,不断增加刺梨籽黄酮的质量浓度时,刺梨籽黄酮的还原力也不断增强.即使达到较高的质量浓度,刺梨籽黄酮提取液的还原力还是低于对照品 Vc 的还原力.

2.3.3 刺梨籽黄酮对羟自由基清除效果检测 黄酮类物质对羟自由基效果的清除效果也是其重要性质之一,本试验探究了刺梨籽黄酮提取物清除羟自由基效果并与 Vc 进行了比较实验,结果如图 8 所示.结果显示,在本试验所测定的质量浓度范围内,随着刺梨籽黄酮和 Vc 的质量浓度的增加,对羟自由基的清除效果也

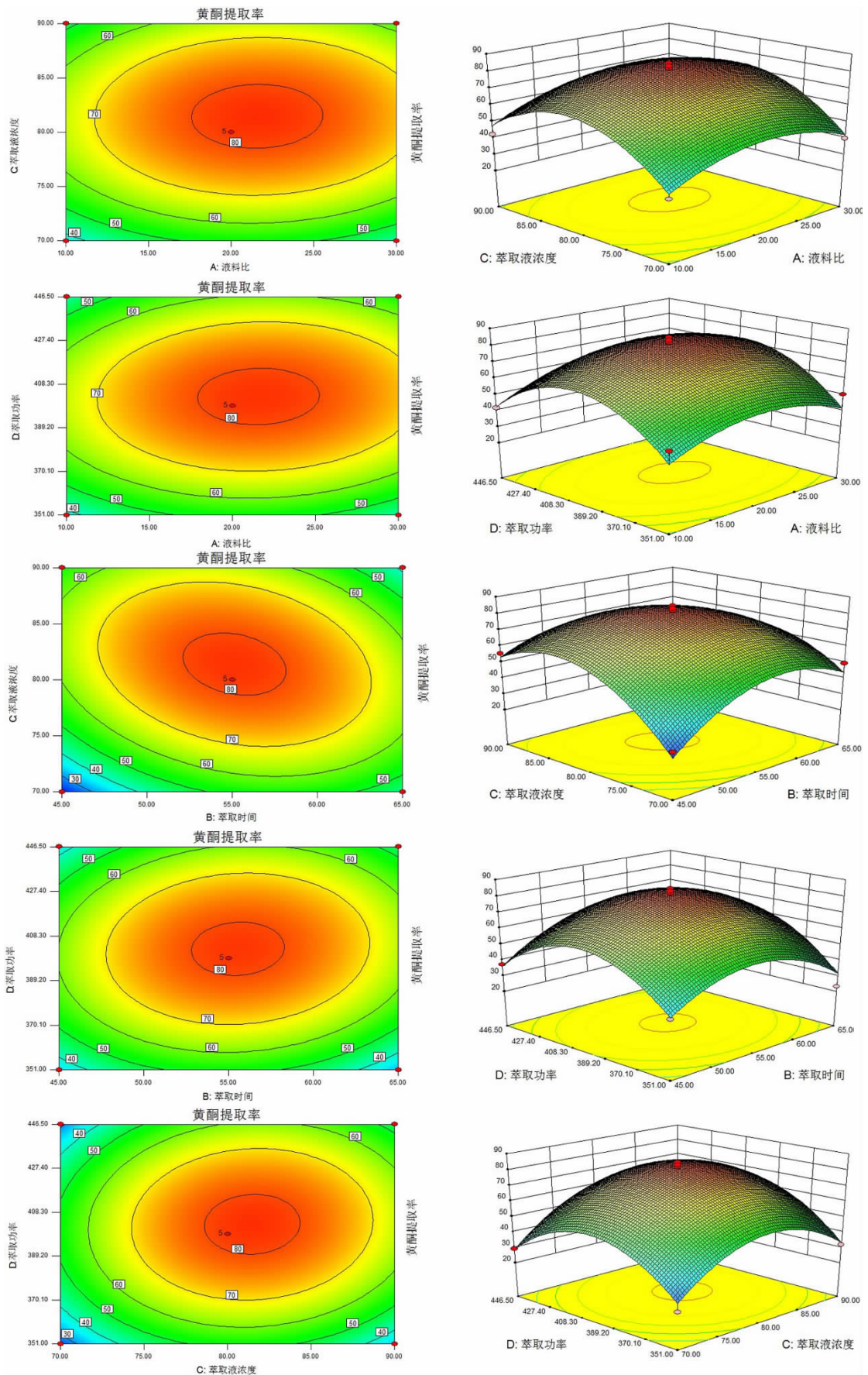


图 5 响应面与等高线图  
Fig.5 Response surface and contour map

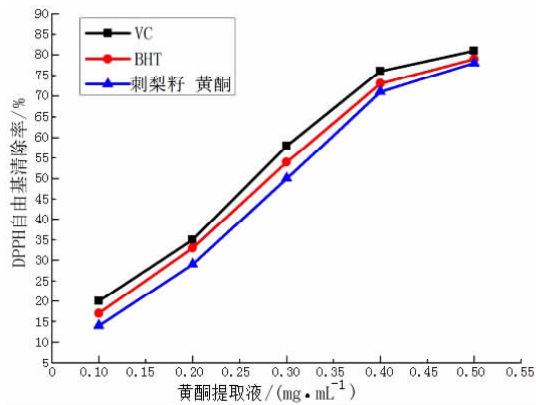


图6 DPPH 自由基的清除效果

Fig.6 Scavenging effect of DPPH free radicals

不断增强.而且当刺梨籽黄酮提取液质量浓度比较低的时候,刺梨籽黄酮提取液的羟自由基清除效果明显低于对照品Vc的清除效果,当刺梨籽黄酮提取液的质量浓度达到0.5 mg/mL时,其对羟自由基清除能力与Vc的羟自由基清除能力差异不显著.

### 3 结语

为了达到在刺梨发展产业中原料综合利用的目的,试验优化了刺梨籽中黄酮的提取工艺,并对提取的黄酮进行了活性研究.以刺梨籽为原料,通过有机溶剂乙醇在超声波辅助处理下提取其中的黄酮,在单因素优化的基础上进行了响应面优化试验,得出了刺梨籽黄酮的最佳提取条件,分别为乙醇体积分数为81.36%、液料比为21.94 mL/g、功率为403.54 W、超声时间为55.76 min.此工艺刺梨籽黄酮得率为80.16 mg/g.

通过对体外抗氧化活性的测定,证明了刺梨籽黄酮的提取物确实具有比较好的体外抗氧化活性.在较高的质量浓度下,刺梨籽黄酮对DPPH自由基、羟自由基清除率与传统抗氧化剂Vc差异很小,但其还原性不如Vc.试验结果说明刺梨籽黄酮可作为抗氧化剂的新型来源.这也为促进刺梨开发利用及其产业链的延伸提供了一定的理论和试验数据支撑.

### 参考文献:

- [1] 南京中医药大学.中药大辞典[M].上海:上海科学技术出版社,2006.
- [2] 王振伟,申森,胡晓冰.刺梨中黄酮的超声提取及HPLC测定[J].湖北农业科学,2014,53(19):4684-4687.
- [3] 石玉城,梁光义,倪红梅.刺梨成分的免疫及抑瘤作用分析[J].中国免疫学杂志,1997,13:103-105.
- [4] 胡文尧,白焰,韩宪法,等.刺梨抗动脉粥样硬化作用的研究[J].中国药理学杂志,1994,29(9):529-531.
- [5] 李齐激,南莹,秦晶晶,等.药食两用植物刺梨的化学成分研究[J].中国中药杂志,2016,41(3):451-455.
- [6] 唐健波,肖雄,杨娟,等.响应面优化超声辅助提取刺梨多糖工艺研究[J].天然产物研究与开发,2015,27:314-320.
- [7] 王薇,夏炳南.刺梨的研究进展[J].中国药理学杂志,1996,31(11):643-645.
- [8] XU P,ZHANG W B,CAI X H,et al.Flavonoids of *Rosa Roxburghii* tratt act as radioprotectors[J].Asian Pac J Cancer P,2014,15(19):8171-8175.
- [9] 秦晶晶,李齐激,薛琰,等.刺梨总三萜提取方法及其 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性研究[J].食品工业科技,2014,35(10):186-189.
- [10] 王乐乐,安华明.HPLC测定刺梨果实中维生素C含量方法的优化[J].现代食品科技,2013,29(2):397-400.
- [11] 方修贵,李嗣彪,郑益清.刺梨的营养价值及其开发利用[J].食品工业科技,2004,25(1):137-138.
- [12] 罗素元,谭兵兵,王乾兴,等.刺梨对衰老小鼠单胺氧化酶活性的影响[J].四川中医,2003,21(4):5.
- [13] 汪俊军,刘小传,庄一义,等.冠心病患者口服刺梨汁抗低密度脂蛋白氧化作用的研究[J].江苏医药,1999,25(10):748-749.
- [14] 张晓玲,瞿伟菁,孙斌,等.刺梨黄酮的体外抗氧化作用[J].天然产物研究与开发,2005,17(4):396-400.

(下转第63页)

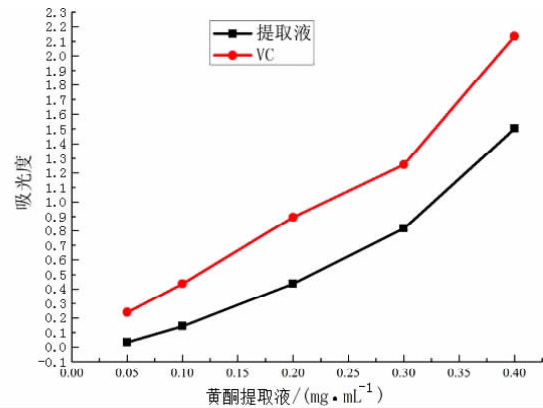


图7 刺梨籽黄酮提取液的还原力

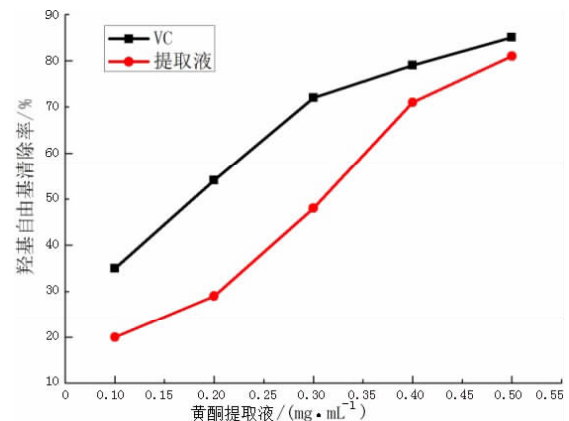
Fig.7 Reducing power of flavonoid extract from *Rosa roxburghii* seeds

图8 羟自由基的清除效果

Fig.8 Scavenging effect of hydroxyl radicals

此时是问题 (7) 取  $f(x) = \left( a + b \int_{\Omega} |Du(x)|^2 dx \right)^{-1} |u(x)|^{p-2}$  的情形. 任给  $a > 0 > b$ , 文献 [6] 利用变分法获得问题 (9) 非平凡非正解和非平凡非负解的存在性, 文献 [7] 利用达到函数在全空间中临界情形无穷多解的存在性. 而对任意  $a, b > 0$ , 文献 [8] 利用 Ljusternik - Schnirelman 极小极大方法获得问题 (9) 存在无穷多变号解, 文献 [9] 利用亏格和不变集下降流方法获得问题 (9) 无穷多弱解的存在性. 事实上根据文献 [8 - 9] 的方法, 当  $a > 0 > b$  时问题 (9) 仍然存在无穷多变号解  $u_n(x)$ . 当然, 如前所述, 这些解  $u_n(x)$  所对应的  $u_n^+(x)$  与  $u_n^-(x)$  也是问题 (9) 的弱解.

**例 5** 对具有对称性的边值问题而言, 如文献 [10] 在 Neumann 边值条件下考虑问题 (4), 通过建立等价模来获得弱解存在的充要条件; 文献 [11] 考虑量子效应 Zakharov 方程  $iu_t + u_{xx} + u|u|^p = h^2(u_{xxxx} - u(u^2)_{xx})$  的初边值问题, 获得整体弱解  $u(x, t)$  的存在性, 如果满足命题 1 的假设, 则同样可以得出多个弱解的存在性.

**推论 4** 如果在问题 (4) 中  $f(x, u)$  关于  $u$  是奇函数, 那么当它有一个变号解时必然还有另外三个解.

## 4 结语

本文主要通过例子说明变分问题的弱解不一定具有一阶连续偏导数, 所有的推导严格按照定义进行, 不仅有助于怎样去理解和区分古典解与弱解之间的关系, 对于二阶椭圆型问题多重弱解的存在性判断方面也提供了一种可行的方法.

## 参考文献:

- [1] 欧阳光中, 金福临, 朱学炎, 等. 数学分析(上册) [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [2] EVANS L C. Partial differential equations [M]. Rhode Island: American Mathematical Society, 2010.
- [3] 陆文端. 微分方程中的变分方法(修订版) [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [4] STRAUSS W A. Partial differential equations: an introduction, 2 Edition [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- [5] 王跃, 杨训, 刘臣伟, 等. Kirchoff 型问题多个解的存在性及表示 [J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(2): 165-168
- [6] YIN G S, LIU J S. Existence and multiplicity of nontrivial solutions for a nonlocal problem [J]. Boundary Value Problems, 2015, 26: 1-7.
- [7] WANG Y, SUO H M, LEI C Y. Multiple positive solutions for a nonlocal problem involving critical exponent [J]. Electronic Journal of Differential Equations, 2017, 275: 1-11.
- [8] YAO X Z, MU C L. Infinitely many sign-changing solutions for Kirchoff-type equations with power nonlinearity [J]. Electronic Journal of Differential Equations, 2016, 59: 1-7.
- [9] SUN Z H, LEI Y F. Infinitely many sign-changing solutions to Kirchoff-type equations [J]. Analysis and Mathematical Physics, 2019, 9(1): 565-584.
- [10] 刘娟, 原保全. Sobolev 空间等价模定理在偏微分方程中的应用 [J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2013, 41(1): 56-58.
- [11] 周晓焕, 杨晗. 考虑量子效应 Zakharov 方程弱解的存在性 [J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2012, 38(6): 899-904.

责任编辑: 黄孝忠

## (上接第 12 页)

- [15] 农朝赞, 黄华艺. 黄酮类化合物抗肿瘤作用的研究应用 [J]. 中国药房, 2004, 15(9): 56-57.
- [16] 胡文尧, 白焰, 韩宪法, 等. 刺梨抗动脉粥样硬化作用的研究 [J]. 中国药学杂志, 1994, 29(9): 529-532.
- [17] 张晓玲, 瞿伟著, 孙斌, 等. 刺梨黄酮对实验性糖尿病的预防作用 [J]. 营养学报, 2004, 26(6): 474-476.
- [18] 路筱涛, 鲍淑娟. 刺梨多糖对小鼠抗应激功能和免疫功能的影响 [J]. 广州中医药大学学报, 2002, 19(2): 141-142.
- [19] 罗素元, 谭兵兵, 廖吉文, 等. 刺梨对衰老小鼠肾脏线粒体损伤保护作用的体视学研究 [J]. 四川中医, 2002, 20(1): 8-9.
- [20] 汪俊军, 张春妮, 庄一义. 低密度脂蛋白亚组分不同特性在动脉粥样硬化中的作用 [J]. 中国动脉硬化杂志, 2004, 12(2): 227-228.
- [21] 蔡威黔, 李淑芳, 缪建春, 等. 强化 SOD 刺梨汁对神中毒大鼠肝脏的保护作用 [J]. 中国地方病学杂志, 2003, 22(6): 504-506.
- [22] 陈可风, 宋玲, 冯成彬, 等. 刺梨果汁驱铅作用的进一步研究 [J]. 中华预防医学杂志, 2001, 35(2): 140.
- [23] 何瑞芳, 李新娟, 魏林郁, 等. 维生素 C 对醋酸铅所致小鼠血中金属元素变化的干预作用 [J]. 新乡医学院学报, 2006, 23(5): 458-459.
- [24] 刘畅, 王秋红, 方波, 等. 刺梨黄酮提取工艺研究 [J]. 食品工业, 2010(1): 57-59.
- [25] 张汇慧, 吴彩娥, 范龚健, 等. 刺梨黄酮的精制及其抗氧化活性比较 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 101-105.
- [26] 张晓玲. 刺梨黄酮及其生物学活性研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2005.

责任编辑: 高山