DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.07.012

响应面法优化艳山姜多糖提取工艺及抗氧化研究

魏晴[1,2],卢虹志[1],张俊[1],梁珊珊[1,2,3],薛娟[1,2*]
(1. 贵州中医药大学 药学院,贵州 贵阳 550025; 2. 贵州中医药大学 大果木姜子研究中心,贵州 贵阳 550025; 3. 贵州中医药大学 植物多糖研究中心,贵州 贵阳 550025)

摘　要:以艳山姜为试验原料,采用响应面法优化艳山姜多糖提取工艺,并研究艳山姜多糖的抗氧化活性。建立以葡萄糖为对照品,紫外分光光度法测定多糖含量的定量分析方法。在单因素试验基础上,以提取时间、超声功率和液料比为自变量,多糖得率为因变量,运用 Box-Behnken 设计-响应面优化艳山姜多糖的提取工艺。通过对 DPPH 自由基、超氧阴离子自由基、羟基自由基清除作用研究艳山姜多糖的抗氧化活性。结果表明,艳山姜多糖最佳提取工艺条件为:提取时间 35 min、超声功率 70 W、液料比 40:1 (mL/g),在此条件下多糖得率为 5.37%。艳山姜多糖对 DPPH 自由基、超氧阴离子自由基和羟基自由基有较强的清除能力,多糖浓度越高,抗氧化活性越强。

关键词:艳山姜;多糖;响应面;超声辅助提取;抗氧化

Optimization of Extraction Process and Antioxidant Activity of Polysaccharides from *Alpinia zerumbet* (Pers.) Burtt. et Smith by Response Surface Methodology

WEI Qing[1,2], LU Hong-zhi[1], ZHANG Jun[1], LIANG Shan-shan[1,2,3], XUE Juan[1,2*]
(1. College of Pharmacy, Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Research Center of *Cinnamomum migao* H. W. Li, Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. Plant Polysaccharide Research Center, Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: Taking *Alpinia zerumbet* (Pers.) Burtt. et Smith as the test material, the response surface methodology was used to optimize the extraction process of *Alpinia zerumbet* polysaccharides, and the antioxidant activity of *Alpinia zerumbet* polysaccharides was studied. Ultraviolet spectrophotometry with glucose was used to establish a quantitative analysis method for the determination of polysaccharide content as the reference substance. On the basis of single factor experiment, taking extraction time, ultrasonic power and liquid-material ratio as independent variables, and polysaccharide yield rate as dependent variable, Box-Behnken design-response surface was used to optimize the extraction process of *Alpinia zerumbet* polysaccharides. The anti-oxidant activity of polysaccharide was studied by scavenging DPPH, superoxide anion and hydroxyl free radical. The results showed that the optimal extraction process conditions of *Alpinia zerumbet* polysaccharides were: extraction time 35 min, ultrasonic power 70 W, liquid-material ratio 40:1 (mL/g), and the polysaccharide yield was 5.37%. Polysaccharide had strong scavenging ability to DPPH, superoxide anion and hydroxyl free radicals. The higher the polysaccharide concentration, the stronger the antioxidant activity.

Key words: *Alpinia zerumbet* (Pers.) Burtt. et Smith; polysaccharide; response surface methodology; ultrasonic-assisted extraction; antioxidant

基金项目:国家自然科学基金(81660649);贵州省中医药管理局项目(QZYY-2019-063);贵州中医药大学科研项目(贵中医科院内[2019]39 号)
作者简介:魏晴(1989—),女(汉),讲师,博士,研究方向:中药药效物质基础。
* 通信作者:薛娟(1985—),女(汉),讲师,博士,研究方向:中药药效物质基础及作用机制研究。

引文格式：
魏晴，卢虹志，张俊，等. 响应面法优化艳山姜多糖提取工艺及抗氧化研究[J].食品研究与开发，2021，42(7)：70-75.
WEI Qing，LU Hongzhi，ZHANG Jun，et al. Optimization of Extraction Process and Antioxidant Activity of Polysaccharides from *Alpinia zerumbet*（Pers.）Burtt. et Smith by Response Surface Methodology[J].Food Research and Development，2021，42(7)：70-75.

艳山姜为姜科山姜属植物艳山姜 *Alpinia zerumbet*（Pers.）Burtt. et Smith 的干燥成熟果实，始见于《植物名实图考》，广泛分布在我国西南地区[1-2]。艳山姜具有温中燥湿、行气止痛、截疟的功效，主治心腹冷痛、胸腹胀满、消化不良、呕吐腹泻等症状，已被收录于 2003 版《贵州省中药、民族药标准》[3]。艳山姜用于治疗胃溃疡，在水族的民间应用已经有数百年历史，且效果显著[3-4]。此外，在贵州，艳山姜茎、叶和果实也作为一种食品应用于日常生活中。因此艳山姜作为“药食同源”植物的开发研究具有极大的价值。

近年来研究主要集中在艳山姜抗心肌缺血、抗动脉粥样硬化、抗炎、镇痛和降压等药理作用上，而对艳山姜成分及提取工艺的研究几乎为空白[5-8]。艳山姜抗氧化活性的研究中，仅对叶的醇提物成分进行了研究，对其它药用部位以及成分研究未见报道[9-10]。因此本文采用响应面分析法优化艳山姜多糖的提取工艺，并比较了不同药用部位多糖的抗氧化活性，填补了艳山姜成分及提取工艺研究的空白，为艳山姜这一特色“药食同源”植物的开发提供了理论基础。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

UV721 型紫外可见分光光度计：上海平轩科学仪器有限公司；BSA124S 电子分析天平：赛多利斯仪器有限公司；KQ-500DE 超声波清洗仪：昆山市超声仪器有限公司。

葡萄糖标准品（批号：MB6951）：大连美仑生物技术有限公司；1，1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）：美国 Sigma 公司；其它化学试剂均为分析纯试剂。

1.2 材料

艳山姜：华夏药业有限责任公司，经贵州中医药大学药学院孙庆文教授鉴定为姜科山姜属植物艳山姜 *Alpinia zerumbet*（Pers.）Burtt et Smith 的干燥成熟根茎。

1.3 方法

1.3.1 样品的前处理

将新鲜的艳山姜置于阴凉处晾干，除去杂质，用粉碎机粉碎，过 40 目筛，即得艳山姜粉末。

1.3.2 超声辅助提取的单因素试验

分别称取艳山姜粉末 5 g，按照液料比 30:1(mL/g)，超声功率 70 W，考察提取时间分别为 30、35、40、45、50 min 时对多糖得率的影响；按照液料比 30:1(mL/g)，提取时间 40 min，考察超声功率分别为 50、60、70、80、90 W 时对多糖得率的影响；按照超声功率 70 W，提取时间 40 min，考察液料比分别为 20:1、30:1、40:1、50:1、60:1(mL/g)时对多糖得率的影响。

1.3.3 响应面优化试验

在单因素试验的基础上，对 3 个影响因素进行三因素三水平试验，以多糖得率作为评价指标，探究艳山姜多糖的最佳提取工艺条件。利用 Design Expert 10.0.7 软件进行分析，建立数学回归模型，以得到最佳的提取工艺，表 1 为响应面因子水平。

表 1 响应面设计试验因素水平及编码

Table 1 Response surface design test factor level and coding

水平	因素		
	A 提取时间/min	*B* 超声功率/W	*C* 液料比/(mL/g)
-1	30	60	30∶1
0	35	70	40∶1
1	40	80	50∶1

1.3.4 多糖含量的测定

1.3.4.1 葡萄糖标准曲线的绘制

标准曲线的绘制参考文献[11-12]。得到线性回归方程为：Y=8.043 1x+0.074 5，R^2=0.999 3。

1.3.4.2 样品多糖得率的测定

超声辅助提取后将提取液冷却至 25 ℃，以 4 000 r/min 离心 2 次，每次 15 min，分离上清液，在上清液中加入无水乙醇（最终乙醇浓度至 80%），4 ℃冰箱内过夜，以 4 000 r/min 离心 10 min，收集沉淀，50 ℃干燥至恒重，即得艳山姜多糖。分别称取 10 mg 艳山姜多糖，加入 10 mL 蒸馏水，配制成 1 mg/mL 的艳山姜多糖溶液。每份溶液各取 0.1 mL，分别加入蒸馏水 0.9 mL，将其稀释 100 倍后分别加入 1 mL 苯酚摇匀，迅速加入 5 mL 浓硫酸摇匀，冷却至室温（25 ℃），测定其吸光值，根据标准曲线计算供试液中葡萄糖的含量，再按下式计算样品中多糖得率：多糖得率/%=$C\times D/W\times 10$。式中：C 为样

品中葡萄糖浓度，mg/mL；D 为样品溶液稀释倍数；W 为样品的质量，g。

1.3.5　艳山姜多糖抗氧化活性研究

1.3.5.1　样品的前处理

分别取艳山姜粉末 10 g 在提取时间 35 min、超声功率 70 W、液料比 40:1(mL/g)条件下提取多糖，得到母液浓度为 25 mg/mL，然后取 160 μL 母液置于 10 mL 容量瓶中，余下部分用蒸馏水补足，得到 400 μg/mL 溶液，再将溶液对半稀释，分别得到 50、100、200、400 μg/mL 的各待测样品溶液。

1.3.5.2　DPPH 自由基清除能力测定

参照文献的方法[13-14]，分别准确吸取不同浓度待测样品 2 mL，再吸取 2 mL DPPH 标准乙醇溶液加入到 10 mL 的试管中摇匀，室温(25 ℃)下避光静置 30 min 后测定其在 517 nm 处的吸光值。每个待测样品平行测定 3 次，取平均值。按照如下公式计算清除率。

DPPH 自由基清除率/%=[1−(A_i−A_j)/A_o]×100

式中：A_o 为 2 mL 样品溶剂与 2 mL DPPH 混合反应后的吸光值；A_i 为 2 mL 样品与 2 mLDPPH 混合反应后的吸光值；A_j 为 2 mL 样品与 2 mL 乙醇混合反应后的吸光值。

1.3.5.3　超氧阴离子自由基的清除能力测定

参照文献的方法并进行修改[15-16]，在 420 nm 处测定吸光值，每隔 30 s 测一次，记录样品在 300 s 内的吸光值，最后计算线性范围内的吸光值每分钟的增加值。将所得的各个吸光值带入如下公式，求出不同浓度样品对于超氧阴离子自由基的清除率。

超氧阴离子自由基清除率/%=[(ΔA_o−ΔA)/ΔA_o]×100

式中：ΔA_o 为邻苯三酚在 300 s 内每分钟吸光值的增加值；ΔA 为样品溶液在 300 s 内每分钟吸光值的增加值。

1.3.5.4　羟基自由基的清除能力测定

参照张淑杰等的方法[17]，在 37 ℃恒温水浴锅中温浴 60 min，在 536 nm 处测其吸光值，分别记录吸光值。将所得的各个吸光值带入如下公式求出不同浓度样品对于羟基自由基的清除率。

羟基自由基清除率/%=[$A_{样}$−$A_{损}$]/[$A_{未}$−$A_{损}$]×100

式中：$A_{样}$为用不同浓度待测样品 1 mL 代替 1 mL 双蒸水测得吸光值；$A_{损}$为加入 1 mL 0.01%的过氧化氢溶液后测定的吸光值；$A_{未}$为用 1 mL 蒸馏水代替 1 mL 0.01%过氧化氢测定的吸光值。

1.4　数据处理

将测得的数据用 SPSS 17.0 软件进行统计计算，运用 Design-Expert 10.0.7 软件进行响应面优化分析处理。

2　结果与分析

2.1　单因素试验结果

提取时间对艳山姜多糖得率的影响见图 1。

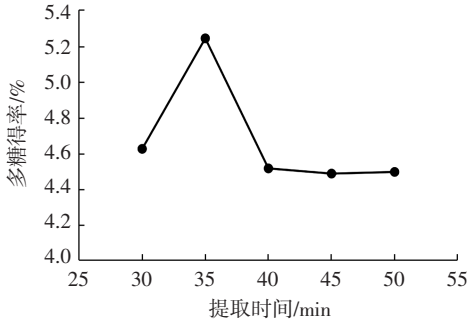

图 1　提取时间对艳山姜多糖得率的影响

Fig.1　The effect of extraction time on the yield of *Alpinia zerumbert* polysaccharides

由图 1 可知，提取时间为 30 min ~50 min 时，艳山姜多糖得率在 35 min 达到最高值 5.25%，提取时间为 40 min 时多糖得率显著下降，原因可能是随着提取时间延长，其它成分也被提取出来，使得多糖含量下降，而 40 min 后溶液达到饱和，无更多成分被提取出来，因此多糖得率无显著变化。

超声功率对艳山姜多糖得率的影响见图 2。

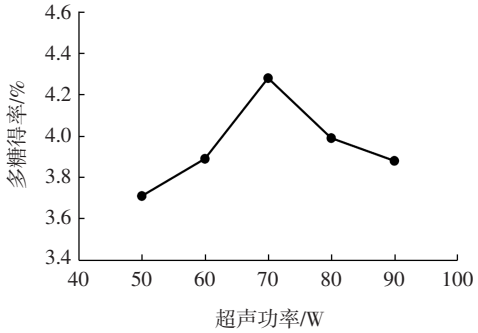

图 2　超声功率对艳山姜多糖得率的影响

Fig.2　The effect of ultrasonic power on the yield of *Alpinia zerumbet* polysaccharides

由图 2 可知，超声功率为 50 W~90 W 时，艳山姜多糖得率在 70 W 达到最高值 4.28%，当超声功率增大到 80 W 时多糖得率显著下降，可能原因是高强度的超声波剪切作用使得部分糖键断裂，使得多糖含量下降。

液料比对艳山姜多糖得率的影响见图 3。

由图 3 可知，液料比为 20:1(mL/g)~60:1(mL/g)时，艳山姜多糖得率在 40:1(mL/g)时达到最高值 4.19%，当液料比超过 40:1(mL/g)后多糖得率下降，过高液料比导致多糖得率下降可能是因为随着溶剂量的增大，可溶性物质溶出增大，杂质含量增高，某些未知成分可能导致部分多糖的分解。

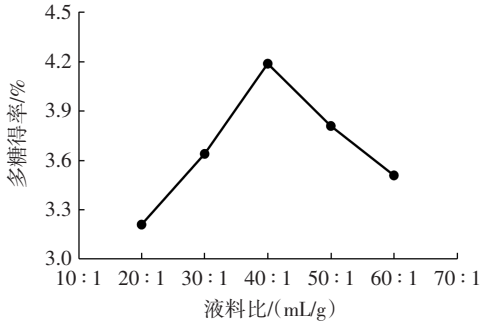

图 3 液料比对艳山姜多糖得率的影响

Fig.3 The effect of liquid-material ratio on the yield of *Alpinia zerumbet* polysaccharides

2.2 响应面方案与试验结果

利用响应面软件 Design Expert 10.0.7 设计三因素三水平的试验，设计方案见表 2，回归模型方差分析见表 3。

表 2 响应面设计及结果

Table 2 Response surface design and results

试验号	因素			多糖得率/%
	A	*B*	*C*	
1	0	0	0	5.341
2	0	1	1	4.054
3	−1	−1	0	2.551
4	0	0	0	5.430
5	1	0	1	2.794
6	0	1	−1	3.885
7	1	−1	0	3.353
8	1	0	−1	3.085
9	−1	0	−1	2.407
10	0	−1	1	4.089
11	1	1	0	3.404
12	0	0	0	5.561
13	−1	1	0	3.323
14	0	0	0	5.657
15	−1	0	1	3.039
16	0	0	0	5.746
17	0	−1	−1	3.873

对模型数据进行回归拟合，得到自变量提取时间（*A*）、超声功率（*B*）、液料比（*C*）与艳山姜多糖得率（*Y*）的二次多元回归方程：$Y=5.55+0.16A+0.10B+0.091C-0.18AB-0.23AC-0.012BC-1.77A^2-0.62B^2-0.95C^2$。

矫正系数 $R^2_{Adj}=0.975\,9$，预测复相关系数 $R^2=0.989\,5$，预测相关系数 $R^2(Pred)=0.950\,2$ 与预测复相关系数接近，说明偏差在合理范围内，实际值和预测值拟合度比较好。失拟项 $P=0.360\,6>0.05$ 不显著，说明选择的模型对该试验的拟合度较好。变异系数 C.V.%为 4.49%，说明该模型相关性好，可用该拟合回归方程对不同条件下艳山姜多糖得率的最佳工艺进行分析。

表 3 响应面二次模型多糖得率的方差和回归系数分析

Table 3 Analysis of variance and regression coefficient of polysaccharide yield in response surface quadratic model

方差来源	平方和	自由度	均方	*F* 值	*P* 值	显著性
模型	20.97	9	2.33	73.11	<0.000 1	显著
A 提取时间	0.22	1	0.22	6.79	0.035 1	显著
B 超声功率	0.080	1	0.080	2.51	0.157 1	
C 液料比	0.066	1	0.066	2.07	0.193 6	
AB	0.13	1	0.13	4.08	0.083 2	
AC	0.21	1	0.21	6.68	0.036 2	显著
BC	0.000 552 2	1	0.000 552 2	0.017	0.899 0	
A^2	13.14	1	13.14	412.42	<0.000 1	极显著
B^2	1.63	1	1.63	51.23	0.000 2	极显著
C^2	3.79	1	3.79	119.04	<0.000 1	极显著
残差	0.22	7	0.032			
失拟项	0.12	3	0.038	1.42	0.360 7	
纯误差	0.11	4	0.027			
总和	21.19	16				

由表 3 可知，*A*、*AC*、A^2、B^2、C^2 的 $P<0.05$，以上因素对多糖得率的影响显著；*B*、*C*、*AB*、*BC* 的 $P>0.05$，以上因素对多糖得率的影响不显著。由 *F* 值可知，3 个因素对艳山姜多糖得率的影响程度的大小顺序为：提取时间>超声功率>液料比。

2.3 响应面分析

当液料比固定为 40:1（mL/g）时，超声功率与提取时间相互作用见图 4。

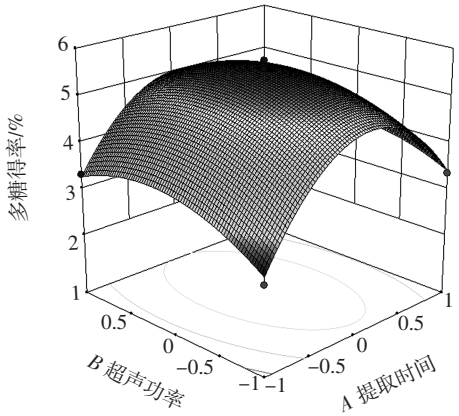

图 4 提取时间和超声功率对多糖得率响应面图

Fig.4 Response surface graph of extraction time and ultrasonic power versus polysaccharide yield

由图 4 可知，在超声功率一定时，多糖得率随提

取时间先增大然后降低;在提取时间一定时,多糖得率随超声功率先增大然后趋于平缓降低,响应面坡度较小,提取时间和超声功率的交互作用不显著。

当超声功率固定为 70 W 时，提取时间和液料比相互作用见图 5。

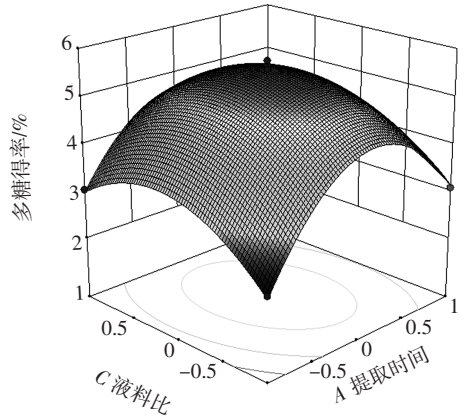

图 5　提取时间和液料比对多糖得率响应面图

Fig.5　Response surface graph of extraction time and liquid–material ratio versus polysaccharide yield

由图 5 可知,在液料比一定时,多糖得率随提取时间先增大后降低;在提取时间一定时,多糖得率随液料比先增大后降低,响应面坡度陡峭,等高线密集,接近椭圆形,说明提取时间和液料比交互作用显著。

当提取时间固定为 35 min 时，超声功率和液料比相互作用见图 6。

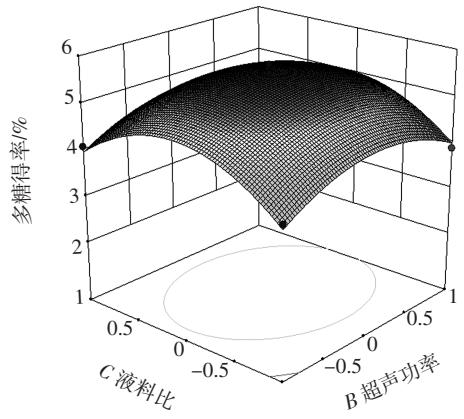

图 6　液料比和功率对多糖得率的响应面图

Fig.6　Response surface diagram of the ratio of liquid–material and ultrasonic power to the yield of polysaccharide

由图 6 可知,在超声功率一定时,多糖得率随液料比先增大然后趋于平缓;在液料比一定时,多糖得率随超声功率先增大然后趋于平缓,响应面坡度较小,等高线近圆形,说明液料比和超声功率的交互作用不显著,以上结果均这与回归方程方差分析的结果相符。

2.4　优化与验证试验

软件处理下最优条件为液料比 40.12:1(mL/g)、超声功率 72.86 W、提取时间 35.47 min,此条件预测艳山姜多糖得率为 5.45%。根据实际操作条件,将最佳提取工艺修正为:提取时间 35 min、超声功率为 70 W、液料比为 40:1(mL/g),得到实测多糖得率为 5.37%。实际值与预测值之间相差小于 0.1%,偏差较小,验证了该响应面模型的有效性。因此，响应面法对艳山姜多糖最佳优化工艺为提取时间 35 min、超声功率 70 W、液料比 40:1(mL/g)。

2.5　艳山姜多糖抗氧化活性结果

艳山姜多糖抗氧化作用见表 4。

表 4　艳山姜多糖抗氧化作用

Table 4　Antioxidant effect of *Alpinia zerumbet* (Pers.) Burtt. et Smith polysaccharide

浓度/(μg/mL)	DPPH 自由基清除率/%	超氧阴离子自由基清除率/%	羟基自由基清除率/%
50	40.26	37.65	36.96
100	62.98	60.19	59.33
200	76.89	73.13	72.56
300	90.26	89.98	89.16
400	93.17	92.07	90.17

2.5.1　艳山姜多糖对 DPPH 自由基清除作用

当浓度在 50 μg/mL ~300 μg/mL 时,艳山姜多糖各浓度对 DPPH 自由基的清除率随浓度升高而增大,表现出明显的量效依赖线性关系，当浓度大于 300 μg/mL 时，艳山姜多糖对 DPPH 自由基的清除率基本保持不变,当浓度为 400 μg/mL 时,艳山姜多糖对 DPPH 自由基的最大清除率为 93.17%,因此,艳山姜多糖对 DPPH 自由基有一定的清除作用。

2.5.2　艳山姜多糖对超氧阴离子自由基的清除作用

当浓度在 50 μg/mL~400 μg/mL 时,艳山姜多糖各浓度对超氧阴离子自由基的清除率随浓度升高而增大,表现出明显的量效依赖线性关系。当浓度为 400 μg/mL 时，艳山姜多糖对超氧阴离子自由基最大清除率为 92.07%。因此,艳山姜多糖对超氧阴离子自由基有一定的清除作用。

2.5.3　艳山姜多糖对羟基自由基的清除作用

当浓度在 50 μg/mL~400 μg/mL 时,艳山姜多糖对羟基自由基的清除率随浓度升高而增大,表现出明显的量效依赖线性关系。当浓度为 400 μg/mL 时,艳山姜多糖对羟基自由基的最大清除率为 90.17%。因此,艳山姜多糖对羟基自由基有一定的清除作用。

由以上结果可知,艳山姜多糖有一定的抗氧化活性,在一定范围内具有浓度依赖性。近年研究表明,多糖一方面可直接作用于抗氧化酶,通过提高如超氧化

物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（catalase，CAT）、谷胱甘肽过氧化物酶（glutathione peroxidase，GSH-Px）等抗氧化酶的活性，发挥抗氧化作用。此外，多糖还能够与产生活性氧（reactive oxygen species，ROS）所需的金属离子络合[18]。多糖含有多个羟基，这些羟基可以与 Fe^{2+}和 Cu^{2+}等产生自由基所需的金属离子络合，抑制了自由基的产生，影响了脂质的过氧化反应的起始，并最终抑制了 ROS 的产生[19]。另一方面，多糖可以直接作用于自由基，可以直接捕获在脂质过氧化链式反应中产生的 ROS，阻断或减慢脂质过氧化。对于羟基自由基，多糖链上的氢原子可与它们结合产生水，达到去除羟基自由基的目的。对于超氧阴离子自由基，多糖类可以引起氧化反应，从而达到清除的目的[20]。

3 结论

本试验利用超声辅助提取法获得艳山姜多糖，进一步通过响应面法优化了多糖的提取工艺。结果表明，影响艳山姜多糖得率的顺序为：提取时间（*A*）> 超声功率（*B*）>液料比（*C*）。艳山姜多糖最佳超声辅助提取工艺条件为：提取时间 35 min、超声功率 70 W、液料比 40:1（mL/g），在此工艺条件下，艳山姜多糖得率为 5.37%。本研究首次对艳山姜多糖提取工艺进行研究，并优化了多糖的提取工艺。此外，艳山姜多糖具有较强的抗氧化能力。

综上所述，超声辅助提取艳山姜多糖的优化工艺可行，且艳山姜多糖有较强的体外抗氧化能力，本研究为艳山姜产品的研究与开发提供理论依据。

参考文献：

[1] 刘绍欢, 何晶晶, 姚文丽, 等. 艳山姜药材的生药学鉴定[J]. 贵州医科大学学报, 2017, 42(7): 786-789.

[2] 吴林菁, 兴兰, 李婉蓉, 等. 基于 GC-MS 技术的艳山姜挥发油大鼠口服入血成分分析[J]. 贵州医科大学学报, 2019, 44(5): 1-6.

[3] 贵州省药品监督管理局.贵州省中药材、民族药材质量标准[M]. 贵阳:贵州科技出版社, 2003: 290.

[4] 张彦燕, 沈祥春. 艳山姜化学成分及药理作用研究进展[J]. 中药药理与临床, 2010, 26(5): 179-181.

[5] NGUYEN P H, NGUGEN Q B, ADHIKARI B S. Distribution of Alpinia (*Zingiberaceae*) and their use pattern in Vietnam[J]. J Biodivers Endanger Species, 2014, 2(2): 121.

[6] ELZAAWELY A A, XUAN T D, TAWATA S. Essential oils, kava pyrones and phenolic compounds from leaves and rhizomes of *Alpinia zerumbet* (Pers.) B.L. Burtt. & R.M. Sm. and their antioxidant activity[J]. Food Chem, 2007, 103: 486-494.

[7] ELZAAWELY A A, XUAN T D, KOYAMA H, et al. Antioxidant activity and contents of essential oil and phenolic compounds in flowers and seeds of *Alpinia zerumbet* (Pers.) B.L. Burtt. & R.M. Sm[J]. Food Chem, 2007, 104: 1648-1653.

[8] 张成川, 林崇良, 林观祥. 温州产艳山姜根茎、花、叶等部位挥发油化学成分研究[J]. 中国中医药科技, 2018, 25(1): 48-51.

[9] 吴林菁, 姜丰, 苏菊, 等. 艳山姜挥发油提取工艺优选及化学成分 GC-MS 分析[J]. 贵州医科大学学报, 2017, 42(6): 655-660.

[10] 田璧榕, 沈祥春, 潘迪, 等. 艳山姜叶的化学成分研究[J]. 中药材, 2018, 41(11): 2316-2319.

[11] YUAN Y, XU X, JING C L, et al. Microwave assisted hydrothermal extraction of polysaccharides from Ulva prolifera: Functional properties and bioactivities[J]. Carbohyd Polym, 2018, 181: 902-910.

[12] 李海燕, 范明辉, 时薛丽, 等. 响应面法优化当归多糖超声提取工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(12): 159-163.

[13] LIU H K, CHEN Y Y, HU T T, et al. The influence of light-emitting diodes on the phenolic compounds and antioxidant activities in pea sprouts[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 25: 459-465.

[14] GUO L, TAN D C, HU F Y, et al. Optimization of the cellulase ultrasonic synergistic extraction conditions of polysaccharides from *Lenzites betulin*[J]. Chem Biodivers, 2019, 16(11): e1900369.

[15] LI Q Y, Meng Z, Wang L, et al. Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of polysaccharide from glycyrrhiza using response surface methodology and its antioxidant activities[J]. Food Ind, 2017, 38: 1-5.

[16] YUAN M, JIA X, YANG Y, et al. Effect of light on structural properties and antioxidant activities of polysaccharides from soybean sprouts[J]. Process Biochemistry, 2015, 50(7): 1152-1157.

[17] 张淑杰, 姜宏伟, 康玉凡. 豌豆芽菜多糖超声辅助提取优化及抗氧化研究[J]. 食品科技, 2019, 44(10): 217-223.

[18] PHAM T B T, SHINKICHI T. Anti-Oxidant, anti-Aging, and anti-Melanogenic properties of the essential oils from two varieties of *Alpinia zerumbet*[J]. Molecules, 2015, 20：16723-16740.

[19] 刘玉婷, 李井雷. 多糖体外抗氧化活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 214-219.

[20] 郑思睿, 杨婷, 依木然·马瑞士, 等. 响应面法优化罗布麻多糖提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(16): 93-975.

加工编辑：冯娜
收稿日期：2020-07-27