

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.018

塔拉多糖超声提取及其自由基清除能力研究

徐宜彬, 刘运伟, 李阳, 董遨宇, 惠大勇, 李占君*

(黑龙江省林业科学院伊春分院, 黑龙江 伊春 153000)

摘要:为研究塔拉多糖的提取工艺及抗氧化活性,选用超声辅助提取法对塔拉多糖进行提取,围绕液料比、超声功率、提取温度和提取时间展开单因素试验,并通过响应面法对影响参数进行优化。经过统计分析和数学回归模型拟合得知,决定系数(R^2)为0.956,即精确系数为95.60%,表明该模型吻合度较好,适用于塔拉多糖超声提取工艺的优化,其最佳参数为10:1 mL/g, 20 min, 150 W, 40 °C, 实际平均得率为24.58%,接近理论期望得率25.07%。此外,又对塔拉多糖自由基的清除能力进行一阶动力学方面的研究,以维生素C为对照,根据试验数据得知,塔拉多糖的DPPH、ABTS⁺对应IC₅₀分别为524.07和3496.88 μg/mL,说明其在自由基清除能力方面表现较为优异,因此在抗氧化性方面具有较好的应用价值。研究成果最终可为植物多糖的提取、纯化与应用提供可靠的理论指导与数据支撑。

关键词:塔拉多糖;超声辅助提取;单因素试验;响应面法;自由基清除能力

中图分类号:TQ645.1

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0168-08

Study on Ultrasonic Extraction of Tara Polysaccharides and Scavenging Ability of Free Radicals

XU Yibin, LIU Yunwei, LI Yang, DONG Aoyu, HUI Dayong, LI Zhanjun*

(Yichun Branch of Heilongjiang Academy of Forestry, Yichun 153000, China)

Abstract:In order to study the extraction process and antioxidant activity of tara polysaccharides, ultrasonic-assisted extraction method was selected to extract tara polysaccharides. Single factor experiments were carried out with the ratio of liquid to material, ultrasonic power, extraction temperature and extraction time, and the influence parameters were optimized by response surface method. According to statistical analysis and mathematical regression model fitting, R^2 was 0.956, the accuracy coefficient was 95.60%, which indicated that the model had good coincidence and was suitable for the optimization of the ultrasonic extraction process of tara polysaccharides. The optimal parameters were 10:1 mL/g, 20 min, 150 W, 40 °C. The actual average yield was 24.58%, closed to the theoretical expected yield of 25.07%. In addition, the first-order kinetic of the free radical scavenging capacity of the tara polysaccharides was also studied and VC was used as a reference. It was known from the experimental data that the corresponding IC₅₀ of the DPPH and ABTS⁺ of tara polysaccharides were 524.07 and 3496.88 μg/mL respectively, which indicating that its free radical scavenging capacity was relatively excellent, so it had a good application value in the oxidation resistance. The research results can ultimately provide reliable theoretical guidance and data support for the extraction, purification and application of plant polysaccharides.

Keywords:Tara polysaccharides; ultrasound-assisted extraction; single factor experiments; response surface methodology; scavenging ability of free radicals

0 引言

塔拉(*Caesalpinia spinosa* Kuntze)是一种资源型

收稿日期:2023-12-19

基金项目:黑龙江省伊春市科技局青年基金项目(Q2022-2);
黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZKYF2023-F04)。

第一作者简介:徐宜彬,硕士,工程师。研究方向为浆果资源、林下经济作物等。E-mail: 18345871320@163.com

*通信作者:李占君,硕士,工程师。研究方向为植物化学、植物药、植物活性物质分离提取与纯化。E-mail: lizhanjun.1@163.com。

引文格式:徐宜彬,刘运伟,李阳,等.塔拉多糖超声提取及其自由基清除能力的研究[J].森林工程.2024,40(2):168-175.

XU Y B, LI Y W, LI Y, et al. Study on ultrasonic extraction of Tara polysaccharides and scavenging ability of free radicals[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):168-175.

植物,植株富含鞣质,塔拉籽油富含不饱和脂肪酸,对人类的生存和发展具有重要意义^[1-3]。近年来,因其富含的多种糖类成分而受到人们的广泛关注,并在医药、食品、卫生和化工等领域得到广泛应用。塔拉多糖含量较高,多属于半乳糖葡聚糖类物质,具有抗氧化、抗癌和抗突变等功效^[4-6]。因此,塔拉多糖作为一种新型高效活性物质,值得深入研究和开发。

植物基质天然产物的提取方式主要包括超临界(Supercritical Fluid Extraction, SFE)、超声辅助(Ultrasonic Assisted Extraction, UAE)、微波辅助(Microwave Assisted Extraction, MAE)、超声微波协同辅助(Ultrasonic-Microwave Cooperative Assisted Extraction, UMCAE)以及传统索氏(Soxhlet Extraction, SE)等^[7-9]。UAE因其在提取过程中会使细胞壁破裂、减小颗粒尺寸、增强溶剂和目标化合物之

间的接触以及高质高效的特征,被广泛应用于日化、药用成分的提取^[10]。

本研究对塔拉多糖超声提取的影响因素展开系统的分析研究。在单因素试验的基础上,采用响应面法优化超声功率、提取温度和提取时间对塔拉多糖的提取效果,通过试验进一步验证塔拉多糖超声提取工艺的可行性,同时将一阶动力学原理应用于塔拉多糖自由基清除能力方面的研究。最终成果可为植物多糖的超声辅助提取提供理论依据。

1 试验材料和仪器

材料及试剂。塔拉籽于2019年9月采收于云南省;无水乙醇、苯酚、过硫酸钾和浓硫酸等均为分析纯,购于天津科密欧化学试剂有限公司;葡萄糖标准品、VC、1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基(DPPH)、2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸自由基(ABTS⁺)购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;纯水(试验室自制)。

实验仪器。超声波清洗器(KQ-100DE,中国江苏昆山超声波仪器有限公司,300 mm×150 mm×100 mm),(KQ-250DE,40.0 kHz,中国江苏昆山超声波仪器有限公司,300 mm×240 mm×150 mm);旋转蒸发器(RE-52AA,上海亚荣科技股份有限公司);分析天平(JA2003N,上海托勒计量科技有限公司);紫外分光光度计(TU-1901,北京普析);冷冻离心机(5810R,德国艾本德)等。

2 试验方法

2.1 葡萄糖1标准曲线制作

采用苯酚-硫酸法^[11-12],用紫外分光光度计测定吸光度,通过所得葡萄糖标准曲线计算出多糖的质量浓度^[13-14]。以醇析法处理并得到多糖样品^[15]。

将10 mg葡萄糖标准品置于100 mL容量瓶中,用纯水溶解并定容,摇匀,以配置葡萄糖标准溶液。精确吸取葡萄糖标准溶液0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mL,分别加入1.0 mL 6%的苯酚溶液,快速加入浓硫酸5.0 mL,充分混合,煮沸20 min,冷水中冷却至室温。使用紫外分光光度计测量490 nm处的紫外吸光值,纯水作为空白对照。标准曲线公式为

$$Y = 14.986X - 0.2803, R^2 = 0.994. \quad (1)$$

采用苯酚-硫酸法,多糖得率公式为

$$Y = (C \times A_0 \times V / M) \times 100\%. \quad (2)$$

式中: C 为多糖质量浓度,mg/mL; A_0 为样品溶液的

稀释度, $A_0 = 125$; V 为样品溶液, $V = 8$ mL; M 为样品质量,g。

2.2 单因素影响试验

纯水为提取溶剂,将适量经过预处理的塔拉籽干燥粉末(20目),添加于50 mL棕色具盖封口瓶中,置于超声波清洗器中,用以研究不同参数条件对塔拉多糖提取的影响。液料比6:1、8:1、10:1、12:1、14:1 mL/g(150 W、40 °C、20 min);超声功率50、100、150、200、250 W(10:1 mL/g、40 °C、20 min);超声水浴温度30、35、40、45、50 °C(10:1 mL/g、150 W、20 min);超声时间10、15、20、25、30 min(10:1 mL/g、150 W、40 °C)。

2.3 试验因素的优化

在单因素试验数据的基础上,遵循响应面优化原则对影响塔拉多糖得率的因素进行响应面(Response Surface Method, RSM)优化,得出最佳试验参数。

2.4 自由基清除能力试验

根据“一阶动力学模型”更适合拟合试验数据和机理的关系^[16],对塔拉多糖的自由基(DPPH, ABTS⁺)清除能力进行一阶动力学方面的研究。

2.4.1 DPPH自由基清除率

配置质量浓度为125、250、500、750、1 000 μg/mL的样品溶液,按照1:1的比例分别加入0.064 g/L的DPPH-95%乙醇溶液,经30 min暗处理,以95%乙醇溶液为空白,VC为对照,测定其在517 nm处的吸光值,计算出DPPH自由基清除率。IC₅₀以IC₅₀计算器得出。DPPH自由基清除率计算公式如下。

$$R = (1 - A_1 / A_2) \times 100\%。 \quad (3)$$

式中: R 为自由基清除率,%; A_2 为空白; A_1 为样品的吸光值。

2.4.2 ABTS⁺自由基清除率

将配置好的7 mmol/L ABTS⁺和140 mmol/L K₂S₂O₈溶液(5 mL:88 μL),置于暗环境下反应12~18 h,加入适量PBS缓冲液使其吸光度在0.70±0.02。配置质量浓度为125、250、500、750、2 000、4 000 μg/mL的样品溶液,按照20:1的比例分别加入上述ABTS⁺过硫酸钾混合溶液,经6 min暗处理,以95%乙醇溶液为空白,VC为对照,测定734 nm吸光值,计算出ABTS⁺自由基清除率。计算方法如公式(3)所示,IC₅₀以IC₅₀计算器得出。

2.5 统计与分析

上述试验过程均进行3次重复,数据的处理及分析、图表制作均由Origin Pro 2021完成,所有试验

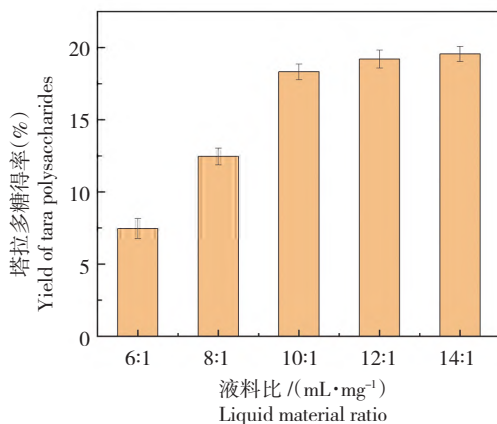
均遵循邓肯多区间检验原理。

3 结果与讨论

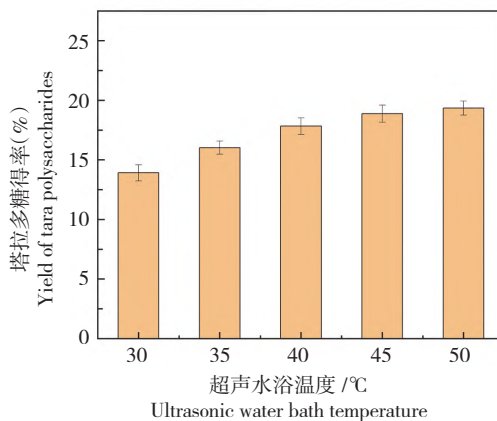
3.1 超声辅助提取试验参数对得率的影响

3.1.1 液料比对塔拉多糖得率的影响

液料比会影响塔拉多糖的得率,图1(a)显示不同液料比情况下塔拉多糖得率的变化情况。当液料比为6:1~10:1 mL/g时,塔拉多糖的得率增幅较为明显,可达到145.58%;10:1 mL/g为试验转折点,得率为18.32%;当液料比为10:1~14:1 mL/g时,塔拉多糖的得率增幅趋于平缓,增幅仅为6.77%。出现此种现象的原因为液料比较低时,提取混合溶液过早饱和,不利于多糖的提取。随着液料比的逐步提升,提取混合溶液能够进一步溶解多糖。而过高的液料比,将造成混合提取溶液体系内部超声能量的损失,阻碍其对溶质物质的辐射作用,进而得率变化不再明显^[17]。因此选取液料比10:1 mL/g进行下一步试验。



(a) 液料比对得率的影响
(a) Effect of liquid material ratio on yield



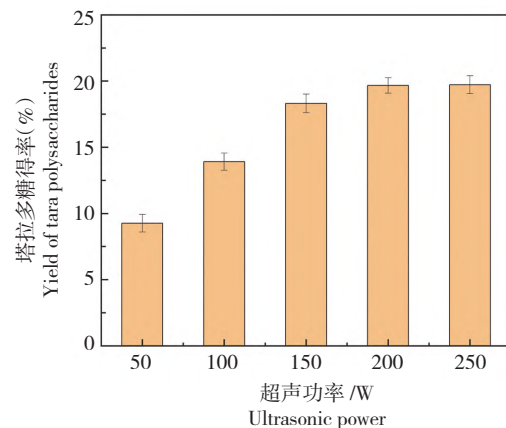
(c) 超声水浴温度对得率的影响
(c) Effect of ultrasonic water bath temperature on yield

3.1.2 超声功率对塔拉多糖得率的影响

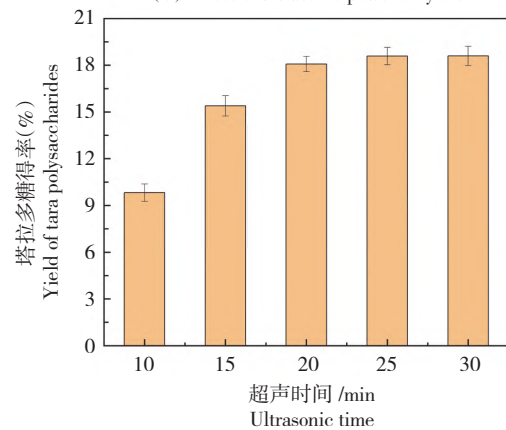
由图1(b)可知,超声功率对塔拉多糖得率的影响,当超声功率为50~150 W时,塔拉多糖的得率随着超声功率的增加而明显增加,其增长率为97.73%;150 W是一个临界点,其得率为18.31%;超声功率高于150 W时,多糖得率增幅趋缓,相比于150 W,超声功率为250 W时,增长率为7.70%。与较低的超声功率相比,在较高的超声功率下,得率的增加可归因于超声波使溶液中的气泡更快地破裂,促进溶剂渗透到细胞组织中,并加速细胞内容物释放到提取液中,实现较高得率。过高的超声功率会导致提取溶液的蒸发,不利于多糖的提取^[18-19]。因此,选择100~200 W超声功率区间进行进一步优化。

3.1.3 超声水浴温度对塔拉多糖得率的影响

塔拉多糖的得率会受到超声水浴温度的影响。由图1(c)可知,当超声水浴温度低于40 °C时,随着提取温度的升高,多糖得率的增长幅度较为明显,相



(b) 超声功率对得率的影响
(b) Effect of ultrasonic power on yield



(b) 超声时间对得率的影响
(b) Effect of ultrasonic time on yield

图1 单因素影响试验

Fig. 1 Effects of single-factor experiment

比于 20 ℃ 的水浴温度,40 ℃ 时塔拉多糖得率为 17.83%,其增长率为 28.18%;而水浴温度从 40 ℃ 提升至 50 ℃ 时,塔拉多糖得率增幅 8.53%,可见水浴温度高于 40 ℃ 时,得率的增长率开始趋于平衡。造成这一现象的主要原因在于,较高的温度使得混合溶液中分子运动加快,这将促进溶剂渗透到细胞组织中,并加速细胞内容物释放到提取溶液中。而过高的温度加快提取混合溶液的蒸发,破坏物质本身的结构,多糖得率的增长开始趋于平缓^[18-19]。因此,选择 35~45 ℃ 这一温度区间进行进一步优化。

3.1.4 超声提取时间对塔拉多糖得率的影响

超声提取时间对塔拉多糖的得率有影响,如图 1(d) 所示。当超声时间为 10~20 min 时,此时塔拉多糖得率增幅为 84.11%;20 min 为试验转折点,其得率为 18.08%;当提取时间高于 20 min 时,多糖得率及其增长率会因超声时间的延长而趋于平和,20~30 min 时,多糖得率增幅为 2.88%。造成这一现象的主要原因在于,随着超声提取时间的增加,细胞壁被破坏,多糖类物质能更好地溶出,使得提取溶液逐渐趋于饱和;过长时间的机械振动以及空

化作用会一定程度地破坏多糖结构,并使得其他非多糖类物质溶出,从而使得多糖得率不会随着提取时间延长进一步增长^[18-19]。因此,选择 15~25 min 进行进一步的优化试验。

3.2 塔拉多糖提取工艺的优化

3.2.1 统计分析与模型拟合

与传统的单参数优化相比,响应面优化具有拟合度和可望预期值较高的特点。为进一步研究塔拉多糖提取过程中影响因素之间的关系,根据单因素试验结果结合响应面试验设计原则,应用响应面分析法对超声时间(min)、超声功率(W)和温度(℃)参数进行深度优化。

3.2.2 响应面优化试验结果

根据响应面优化试验原理,进行 3 因素和 3 水平的试验,见表 1。试验数据采用 Design Expert 软件进行多元回归拟合。对试验数据的多元回归分析得出以下二阶多项式逐步方程。

$$Y_{\text{ield}} = +24.86 - 0.050A + 1.20B - 6.250 \times 10^{-3}C - 0.030AB - 0.37AC - 0.25BC - 0.98A^2 - 1.75B^2 - 0.74C^2。$$

式中:A 为时间,min;B 为功率,W;C 为温度,℃; Y_{ield} 为多糖得率。

表 1 试验设计与数据分析

Tab. 1 Design scheme and data result

编号 Number	时间(A)/min Time	功率(B)/W Power	温度(C)/℃ Temperature	$Y_{\text{预期}}(\%)$ Predicted yield	$Y_{\text{实际}}(\%)$ Actual yield
1	20	200	35	23.83	23.78±0.24
2	25	150	35	23.47	23.51±0.35
3	15	200	40	23.41	23.51±0.42
4	20	200	45	23.31	23.25±0.17
5	20	150	40	24.52	25.90±0.22
6	20	150	40	24.86	24.70±0.28
7	15	150	35	22.84	22.78±0.36
8	25	200	40	23.25	23.25±0.21
9	25	100	40	20.91	20.81±0.28
10	15	100	40	20.95	20.95±0.30
11	20	150	40	24.46	24.56±0.19
12	15	150	45	23.55	23.51±0.39
13	25	150	45	22.72	22.78±0.27
14	20	100	45	21.42	21.47±0.26
15	20	150	40	24.86	24.32±0.33
16	20	150	40	24.48	24.82±0.18
17	20	100	35	20.93	20.99±0.20

3.2.3 响应面分析

为了检验方程和试验数据的有效性,对塔拉多糖的提取进行方差分析,见表 2。

由表 2 分析可知,模型 F 为 16.91,对应模型 $P_{\text{Model}} < 0.01$,表明该优化试验模型差异性极显著,“失拟项” $P(0.9883) > 0.01$ 表明模型“失拟项”差

异性不显著,模型吻合度较好。各因素单独及组合互扰分别对塔拉多糖得率形成不同程度的影响,单因素影响程度依次为 $C < A < B$,组合互扰因素影响

程度依次为 $AB < BC < AC, C^2 < A^2 < B^2$ 。因素间互扰影响程度最强烈的为 AC ,因素内互扰影响程度最强烈的为 B^2 。

表2 方差分析

Tab. 2 Variance analysis

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	33.350	9	3.710	16.910	0.000 6 **
<i>A</i>	0.020	1	0.020	0.091	0.771 3
<i>B</i>	11.450	1	11.450	52.250	0.000 2 **
<i>C</i>	3.125×10^{-4}	1	3.125×10^{-4}	1.426×10^{-3}	0.970 9
<i>AB</i>	3.600×10^{-3}	1	3.600×10^{-3}	0.016	0.901 6
<i>AC</i>	0.530	1	0.530	2.430	0.162 8
<i>BC</i>	0.260	1	0.260	1.160	0.316 4
A^2	4.030	1	4.030	18.410	0.003 6 **
B^2	12.910	1	12.910	58.930	0.000 1 **
C^2	2.280	1	2.280	10.420	0.014 5 *
残差 Residual	1.530	7	0.220		
失拟项 Lack of fit	0.043	3	0.014	0.039	0.988 3
错误 Error	1.490	4	0.370		
总离差 Pure error	34.890	16			

注: $P < 0.01$ 为差异极显著,标记为 ** ; $0.01 < P < 0.05$ 表示差异显著,标记为 * ; $P > 0.05$ 表示差异性不显著。

Note: $P < 0.01$ indicates extremely significant difference, sign ** ; $0.01 < P < 0.05$ indicates significant difference, sign * ; $P > 0.05$ indicate difference is not significant.

单因素影响差异性方面,除 B 因素为极显著外,因素 A 、 C 均不显著。互扰因素组合中,各组合因素间 P 均大于 0.01,表明各组合因素间对塔拉多糖得率的影响不显著,而与之对应,组合因素内影响均呈现显著(C^2)或极显著差异(A^2 、 B^2)。

表3为拟合优化模型的置信分析,其中综合决定系数 $R^2 = 0.956 0$,校正决定系数 $R^2_{Adj} = 0.889 5$ 。模型吻合度较高,结合回归方程可以用来预测试验结果,能够较好地优化塔拉多糖的提取工艺。

表3 回归方程置信度分析

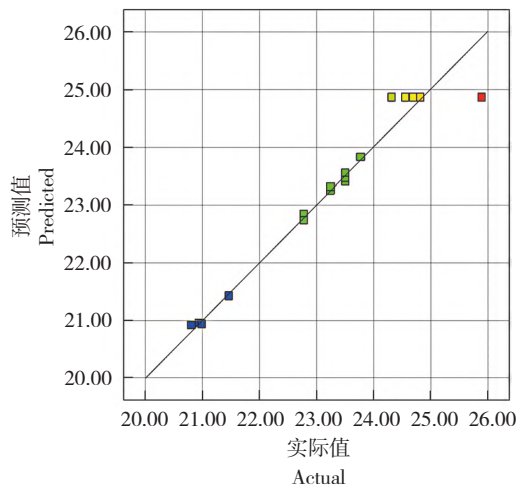
Tab. 3 The reliability analysis of regression equation

项目 Project	指标 Indicators
标准偏差 Std. Dev.	0.470 0
R^2	0.956 0
调整 R^2 Adj R^2	0.889 5
预测 R^2 Pred R^2	0.913 3

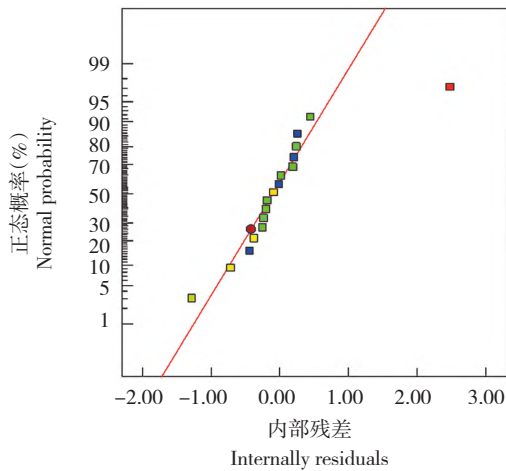
对拟合模型的充分性进行测试,试验数据的预测值和实际值数据点的分布较为合理,图2(a)表明拟合模型的预测值与实际值比较一致。图2(b)为试验各数据点的残差分布情况,可以看出各数据点能较好地分布于概率直线的两侧,离散程度合理,符合正态分布,表明模型稳定且质量良好。

图2(c)显示内部残差随着运行次数的变化情况,所有试验数据点均控制在+3和-3限制线内,总体离散程度较为理想。结果表明,优化后的模型能够合理地拟合研究结果,具有较高的精度。

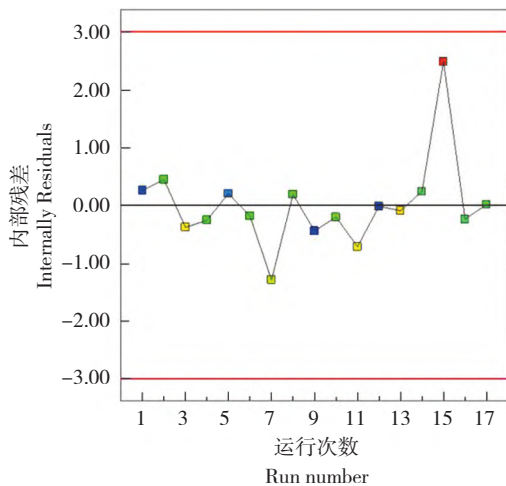
图3(a)—图3(c)分别为响应面法提取过程中超声提取时间和功率、超声提取时间和温度、超声提取功率和温度对多糖得率优化试验的伞状图。通过分析对比伞状图的凸起程度和其下方对应的等高线,可以判别影响提取得率的各因素之间交互影响的显著性。试验及分析结果表明,响应面法优化塔拉多糖的超声辅助提取工艺是可行的。通过对图形趋势、表格数据和验证性试验的统计分析,



(a) 预测值与实际值
(a) Predicted and actual



(b) 内部残差的正常概率
(b) Normal probability of internally residuals



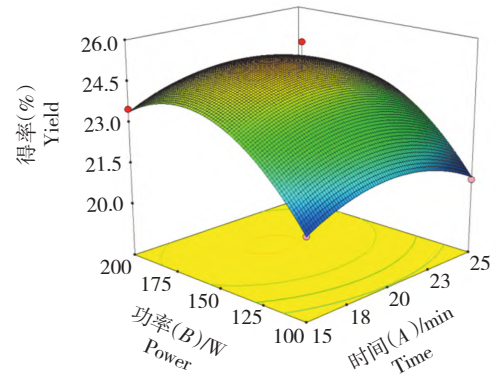
(c) 内部残差与运行次数
(c) Internally residuals and run numbers

散点为具体优化试验。

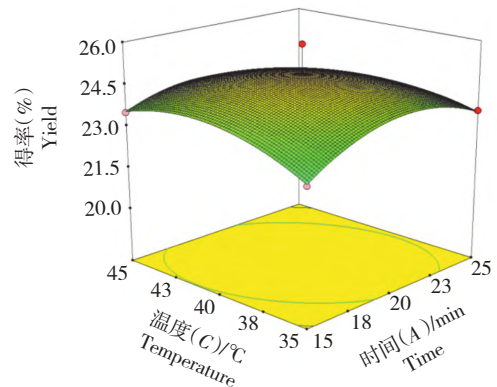
Scatter points are specific optimization tests.

图 2 拟合模型的充分性诊断对比

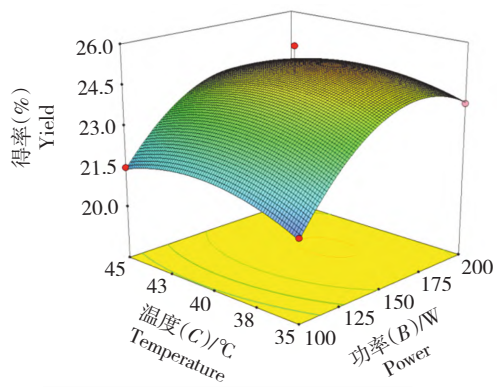
Fig. 2 Comparison of adequacy diagnosis of fitted model



(a) 超声时间和功率
(a) Ultrasonic time and power



(b) 超声时间和温度
(b) Ultrasonic time and temperature



(c) 超声功率和温度
(c) Ultrasonic power and temperature

图 3 优化因素对得率影响的伞状图

Fig. 3 Umbrella graph of the impact of optimization factors on yield

得出影响得率的因素差异为 $B > A > C$, 通过响应面模型优化拟合得到最佳试验期望值和最佳试验方案为液料比 10 : 1 mL/g, 超声时间 19.90 min, 超声功率 167.29 W, 水浴温度 39.71 °C, 最佳工艺预期值 25.07%。

3. 2. 4 验证试验

经模型优化拟合得出最佳工艺条件为液料比

10 : 1 mL/g, 超声时间 19.90 min, 超声功率 167.29 W, 水浴温度 39.71 °C。为验证试验方法的可靠性, 结合试验仪器参数条件, 调整后的提取条件为液料比 10 : 1 mL/g, 超声时间 20 min, 超声功率 150 W, 水浴温度 40 °C。实际试验中得到的平均得率为 24.58%, 与最佳工艺预期值 25.07% 吻合度较高。分析结果表明, 该模型在综合考虑多个自变量之间的相互作用, 能够充分反映预期的优化效果, 模型准确可靠。

4 自由基清除能力

为研究塔拉多糖的抗氧化活性, 以维生素 C (VC) 为对照, 分别研究不同质量浓度的塔拉多糖对 DPPH (125~1 000 $\mu\text{g/mL}$) 和 ABTS⁺ (125~4 000 $\mu\text{g/mL}$)

2 种自由基的清除能力。随着塔拉多糖溶液质量浓度的逐渐提升, 最终 DPPH 与 ABTS⁺ 自由基清除率分别可达到 72.49% 和 53.66%, 因此在一定范围内塔拉多糖的自由基清除活性与其质量浓度呈正相关性, 如图 4 所示。此外, 塔拉多糖对 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除能力一阶动力学平衡速率常数 K_1 分别为 0.001 40 和 0.001 14, 说明塔拉多糖的 DPPH 自由基清除能力动力学曲线趋势最先进入平衡期; 其 IC₅₀ 值分别为 524.07、3 496.88 $\mu\text{g/mL}$, 表明塔拉多糖具有较好的自由基清除能力。塔拉多糖较好的自由基清除能力可归因于超声波增强细胞壁破裂程度, 促进细胞内成分的释放, 使其含氧成分较低^[20-21]。

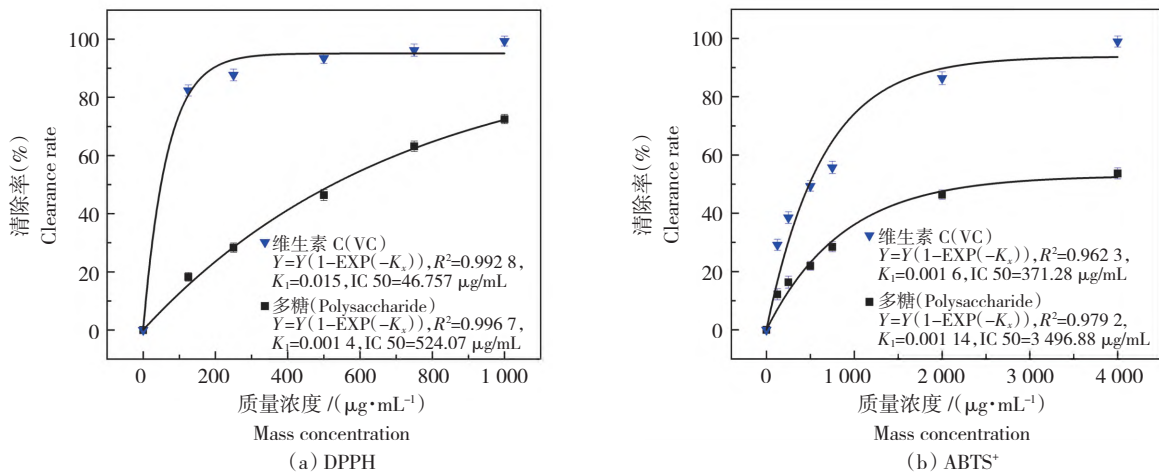


图4 维生素 C 和塔拉多糖自由基的清除能力

Fig. 4 Scavenging ability of free radicals of VC and tara polysaccharides

5 结论

采用超声辅助提取法对塔拉多糖进行提取研究, 基于 RSM 3 因素 3 水平响应面优化设计, 对影响塔拉多糖的因素进行工艺优化。经方差分析得知, 模型综合决定系数 $R^2 = 0.956 0$, 表明该拟合模型差异性显著, 吻合度较高; 最佳优化参数为液料比 10 : 1 mL/g, 超声时间 20 min, 超声功率 150 W, 水浴温度 40 °C。实际试验中得到的平均得率为 24.58%, 与最佳工艺预期值 25.07% 吻合度较高。通过对比 VC 和塔拉多糖对 DPPH 和 ABTS⁺ 2 种自由基的清除能力, 由试验数据可知在一定范围内塔拉多糖的自由基清除活性与其质量浓度呈现正相关性, DPPH 自由基清除能力动力学曲线趋势最先进入平衡期, 其 IC₅₀ (DPPH) 和 (ABTS⁺) 分别为: 524.07、3 496.88 $\mu\text{g/mL}$; 说明塔拉多糖的自由基清除能力较强。综上所述, 超声辅助处理有利于塔拉

多糖的提取, 研究成果可为植物多糖的提取及理化性质的研究提供参考依据。

【参 考 文 献】

- [1] 李占君, 张琳, 祖元刚, 等. 二氧化碳超临界提取塔拉籽油及其品质分析[J]. 植物研究, 2015, 35(3): 467-470. LI Z J, ZHANG L, ZU Y G, et al. Tara oil extraction by supercritical carbon dioxide and its quality[J]. Bulletin of Botanical Research, 2015, 35(3): 467-470.
- [2] 普凤仙, 张建云, 包松莲, 等. 塔拉胶理化性质分析[J]. 西部林业科学, 2018, 47(1): 11-17. PU F X, ZHANG J Y, BAO S L, et al. The physico-chemical properties of Tara gum[J]. Journal of West China Forestry Science, 2018, 47(1): 11-17.
- [3] 富臻, 李波, 王源, 等. 塔拉豆荚中鞣质化合物及其抗氧化活性[J]. 中国实验方剂学杂志, 2016, 22(10): 55-59. FU Z, LI B, WANG Y, et al. Tannins in pods of Tara and their antioxidant activities[J]. Chinese Journal of Ex-

- perimental Traditional Medical Formulae, 2016, 22(10): 55-59.
- [4] 袁德成,赵寒梅,杨逢建.塔拉种子多糖脱蛋白的正交优化及其抗氧化性研究[J].植物研究,2018,38(1):155-160.
YUAN D C, ZHAO H M, YANG F J. Study on orthogonal optimization and antioxidation of polysaccharide from *Tara* seeds[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(1): 155-160.
- [5] LI Z J, YANG F J, YANG L, et al. Comparison of the antioxidant effects of carnosic acid and synthetic antioxidants on *Tara* seed oil[J]. Chemistry Central Journal, 2018, 12(1): 37.
- [6] REDDY L H, COUVREUR P. Squalene: a natural triterpene for use in disease management and therapy[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2009, 61(15): 1412-1426.
- [7] 宋思圆,苏平,王丽娟,等.响应面法优化超声提取黄秋葵花果胶多糖工艺及其体外抗氧化活性[J].食品科学,2017,38(2):283-289.
SONG S Y, SU P, WANG L J, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction by response surface methodology and antioxidant activities of pectic polysaccharide from okra flowers[J]. Food Science, 2017, 38(2): 283-289.
- [8] 李占君,张厚良,徐宜彬,等.模型优化塔拉籽油的超临界制备工艺[J].森林工程,2021,37(4):79-86.
LI Z J, ZHANG H L, XU Y B, et al. Model optimization of supercritical preparation process of *Tara* seed oil[J]. Forest Engineering, 2021, 37(4): 79-86.
- [9] 张庆芬,李占君,李晓雪,等.匀浆结合超声-微波协同提取桔梗中桔梗皂苷 D 和党参炔苷工艺研究[J].森林工程,2022,38(5):110-120.
ZHANG Q F, LI Z J, LI X X, et al. Homogenate pretreatment followed by ultrasonic-microwave synergistic extraction of platycodin D and lobetyolin from the *Platycodon Radix*[J]. Forest Engineering, 2022, 38(5): 110-120.
- [10] 吴存兵,张钰涓,邵伯进,等.响应面优化泡沫法提取紫苏饼粕蛋白的工艺[J].安徽农业大学学报,2017,44(4):574-579.
WU C B, ZHANG Y J, SHAO B J, et al. Optimization of foam separation of protein from perilla seed meal using the response surface method[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(4): 574-579.
- [11] WU Y B, DING W, JIA L R, et al. The rheological properties of *Tara* gum (*Caesalpinia spinosa*) [J]. Food Chemistry, 2015, 168: 366-371.
- [12] YANG L, WANG H, ZU Y G, et al. Ultrasound-assisted extraction of the three terpenoid indole alkaloids vindoline, catharanthine and vinblastine from *Catharanthus roseus* using ionic liquid aqueous solutions[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(2/3): 705-712.
- [13] WU Y B, DING W, HE Q. The gelation properties of *Tara* gum blended with κ -carrageenan or xanthan [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 764-771.
- [14] MA Q Y, HU D Y, WANG L J. Preparation and physical properties of *Tara* gum film reinforced with cellulose nanocrystals[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 86: 606-612.
- [15] 魏文杰,李浩浩.Box-Behnken-响应面法优化桑叶总多糖提取工艺[J].农业科学研究,2018,39(4):5-11, 17.
WEI W J, LI H H. Optimization of extraction technique for polysaccharide from mulberry leaf by using Box-Behnken design and response surface methodology[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2018, 39(4): 5-11, 17.
- [16] 宋琪,王贝贝,夏浩海,等.超临界二氧化碳溶胀天然橡胶动力学分析[J].弹性体,2021,31(3):1-7,16.
SONG Q, WANG B B, XIA H H, et al. Swelling kinetics analysis for nature rubber in supercritical carbon dioxide[J]. China Elastomerics, 2021, 31(3): 1-7, 16.
- [17] 刘运伟,李占君.响应面优化塔拉籽油超声提取工艺研究[J].森林工程,2020,36(4):64-69,75.
LIU Y W, LI Z J. Optimization of ultrasonic extraction of *Tara* seed oil by response surface methodology[J]. Forest Engineering, 2020, 36(4): 64-69, 75.
- [18] 贾凯慧,李占君,姚远,等.超声辅助提取紫苏粕迷迭香酸工艺优化及其抗氧化能力[J].森林工程,2022,38(4):89-97.
JIA K H, LI Z J, YAO Y, et al. Optimization of ultrasonic assisted extraction of rosmarinic acid from *Perilla frutescens* meal and its antioxidant capacity[J]. Forest Engineering, 2022, 38(4): 89-97.
- [19] 张海容,刘娟,魏增云,等.响应面法优化超声提取中药茜草中多糖工艺[J].中成药,2015,37(10):2321-2325.
ZHANG H R, LIU J, WEI Z Y, et al. Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from *Radix rubiae* by response surface methodology[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2015, 37(10): 2321-2325.
- [20] 王顺民,汪建飞.超声波处理对苦荞麦萌发、芽苗还原糖和总黄酮含量及抗氧化活性的影响[J].食品与机械,2017,33(1):163-168.
WANG S M, WANG J F. Ultrasonic enhancement of Tartary buckwheat germination and the production of nutrients in sprouts[J]. Food & Machinery, 2017, 33(1): 163-168.
- [21] 羌宇,张耀宗,余勃,等.ABTS法和DPPH法测定类胡萝卜素清除自由基能力的适用性[J].南昌大学学报(理科版),2019,43(6):543-549.
QIANG Y, ZHANG Y Z, YU B, et al. Applicability of ABTS and DPPH methods for determination of free radical scavenging ability of carotenoids[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2019, 43(6): 543-549.