

远志多糖提取工艺优化及其抗氧化活性研究

Response surface methodology for optimization of extracting polysaccharide from *Polygala tenuifolia* willd. and antioxidant evaluation

景永帅¹ 吴兰芳² 王乾²

JING Yong-shuai¹ WU Lan-fang² WANG Qian²

郑玉光² 严玉平² 蒋爱民³

ZHENG Yu-guang² YAN Yu-ping² JIANG Ai-min³

(1. 河北科技大学化学与制药工程学院, 河北 石家庄 050018; 2. 河北中医学院药学院, 河北 石家庄 050200; 3. 华南农业大学食品学院, 广东 广州 510642)

(1. College of Chemistry and Pharmaceutical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. College of Pharmacology, Hebei University of Chinese Medicine, Shijiazhuang, Hebei 050200, China; 3. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

摘要:对超声波辅助提取远志多糖的工艺进行优化,结果表明,超声波辅助提取远志多糖的优化工艺条件为:超声提取时间 30 min,超声提取温度 67 °C,液固比 10:1(mL/g),在该条件下远志多糖的得率为 $(5.87 \pm 0.21)\%$ ($n=3$);红外光谱显示远志多糖具有典型的多糖特征吸收峰,推测为不含糖醛酸的中性多糖;远志多糖具有一定的清除 DPPH 自由基(DPPH·)和羟基自由基(·OH)的能力,其对 DPPH·清除能力 IC_{50} 值为 0.83 mg/mL,对 ·OH 清除能力 IC_{50} 值为 1.29 mg/mL。

关键词:远志;多糖;超声波;红外光谱;抗氧化活性

Abstract: The optimum condition of ultrasonic extraction of *Polygala tenuifolia* Willd. Polysaccharide (PTP) was investigated. The results showed, the optimum condition was ultrasonic extraction time 30 min, ultrasonic extraction, temperature 67 °C, ratio of water to raw material 10:1(mL/g), and extraction 2 times, the yield of polysaccharide was $(5.87 \pm 0.21)\%$ ($n=3$). IR spectra predicted PTP had typical characteristic absorption peaks which were neutral polysaccharide and free from urinic acid. In vitro antioxidant activities showed PTP had effects on DPPH radical and hydroxyl radical. The IC_{50} of it against DPPH radical and hydroxyl radical was 0.83 mg/mL, 1.29 mg/mL.

基金项目:河北省中医药管理局项目(编号:2015082);河北中医学院博士启动基金(编号:BSZ2015005)

作者简介:景永帅,男,河北科技大学讲师,博士。

通讯作者:吴兰芳(1985—),女,河北中医学院讲师,博士。

E-mail: wulanfang757@163.com

收稿日期:2016—02—08

Keywords: *Polygala tenuifolia* Willd.; polysaccharide; ultrasonic; IR spectra; antioxidant activity

远志为植物远志(*Polygala tenuifolia* Willd.)或卵叶远志(*Polygala sibirica* L.)的干燥根。主产于河北、山西、陕西等地,每年春、秋两季采挖,除去须根及泥沙,晒干。远志为常用的药食两用资源,具有安神益智、交通心肾、祛痰、消肿的功效^[1]。其功效始记载于《神农本草经》,列为上品,被视为养命要药。据文献^[2]调研,目前对于远志的研究主要集中在皂苷、挥发油、寡糖酯和生物碱等成分及其药理活性的研究,而对于其多糖的研究报道较少。

近年来,随着多糖研究的深入,中药多糖的多种生物活性逐渐被发现,其不仅具有多方面的药理作用,而且来源广泛,细胞毒性低,是一种理想的药品和保健食品开发来源^[3-4]。目前对于远志多糖的研究,其一为远志多糖活性的研究,如 Tao Xin 等^[5]从远志中分离得到两个酸性多糖,能够增强荷瘤小鼠的 SOD 和 CAT 活力,且具有较好地抑制 A549(肺腺癌细胞)的作用;其二为远志多糖的提取方法研究,如魏永俊等^[6]利用微波法和水煮法对小远志进行提取,微波法得到的粗多糖含量高于水煮法。与传统的热水提取方法相比,超声辅助提取因其独特的机械振动作用和空化作用可打破物质的细胞壁,使溶剂尽快渗透到细胞中,溶出其中有效成分,因此具有提取率高,速度快等优点。目前对于利用超声辅助提取远志多糖的工艺及其抗氧化活性评价尚未见报道。本研究拟采用超声波辅助提取远志多糖,并对其最优工艺下得到的远志多糖的红外光谱学性质及抗氧化活

性进行评价,旨在为远志保健品的开发提供理论依据和科学的参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

远志:购于河北安国药材市场;

无水乙醇:分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;

2,2-联苯基-1-苦基肼基(DPPH·):分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

FeSO₄:分析纯,广州化学试剂厂;

水杨酸:分析纯,西陇化工有限公司;

其他试剂均为进口或国产分析纯。

1.2 试验设备

电子调温电热套:98-1-B型,天津市泰斯特仪器有限公司;

恒温水浴锅:HH-2型,江苏金坛市宏华仪器厂;

循环水式多用真空泵:SHB-III A型,郑州长城科工贸有限公司;

超声波清洗器:DL-180A型,上海之信仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:752型,上海欣茂仪器有限公司;

旋转蒸发器:RE-52A型,上海亚荣生化仪器厂;

电热鼓风干燥箱:101-2AB型,天津泰斯特仪器公司。

1.3 试验方法

1.3.1 远志药材预处理 远志筒粉碎过筛(100目),95%的乙醇回流提取2次,每次2h,以除去远志中的脂类物质,过滤后取滤渣风干,备用。

1.3.2 远志多糖的提取 称取10g经除脂处理的远志,以蒸馏水作为溶剂,选取不同的超声提取时间、提取温度、液料比和提取次数进行提取。提取液过滤、浓缩后,加入4倍体积的无水乙醇,静置过夜,取过滤沉淀干燥后,即得远志粗多糖。

1.3.3 单因素试验

(1) 超声提取温度对多糖提取率的影响:固定超声提取时间为30min,液固比为10:1(mL/g),超声提取次数为2次的条件下,分别考察超声提取温度(40,50,60,70,80℃)对多糖提取率的影响,多糖提取率按式(1)计算:

$$\text{多糖提取率} = \frac{\text{粗多糖的质量}}{\text{样品的质量}} \times 100\% \quad (1)$$

(2) 超声提取时间对多糖提取率的影响:固定超声提取温度为70℃,液固比为10:1(mL/g),超声提取次数为2次的条件下,分别考察超声提取时间(10,20,30,40min)对多糖提取率的影响。

(3) 液固比对多糖提取率的影响:固定超声提取时间为30min,超声提取温度为70℃,超声提取次数为2次的条件下,分别考察液固比(5:1,10:1,15:1,20:1,mL/g)对多糖提取率的影响。

(4) 超声提取次数对多糖提取率的影响:固定超声提取时间为30min,超声提取温度为70℃,液固比为10:1(mL/g)的条件下,分别考察超声提取次数(1,2,3,4次)对多糖提取

率的影响。

1.3.4 响应面法优化提取工艺 在单因素考察的基础上,选取超声提取时间、超声提取温度和液固比为响应面的因素,利用Design-Expert 8软件设计优化提取工艺(BBD)^[7],并对结果进行分析。

1.3.5 远志多糖红外光谱分析 将优化条件下提取得到的远志多糖约1.0mg,加入干燥的溴化钾(KBr)研磨,压片,压力≤14MPa,在4000~500cm⁻¹区间内进行红外光谱扫描^[8]。

1.3.6 抗氧化活性的测定 参考文献[9]的方法,测定远志多糖对DPPH·和·OH的清除能力。

1.4 数据处理

采用SPSS 16.0、Origin 8、Design-Expert 8等分析软件对试验数据进行处理分析。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验结果

2.1.1 超声提取温度对远志多糖得率的影响 由图1可知,超声提取温度对多糖提取率有一定的影响,随着提取温度的上升,远志多糖提取率呈先上升后趋于平缓的趋势。经过方差分析表明,60℃和70℃之间存在显著的差异性(P<0.05),70℃和80℃之间的差异不显著(P>0.05)。可能是在一定的温度条件下,由于超声波的作用,能激活某些生物酶,促使细胞的新陈代谢过程加速,使得提取率升高。可以看出,多糖提取率在60℃和70℃之间变化较大,因此,提取温度控制在60~70℃,选择65℃超声提取温度作为BBD试验设计的中心点。

2.1.2 超声提取时间对远志多糖得率的影响 由图2可知,超声提取时间对多糖提取率有一定的影响,总体表现为随时间增加而增大,由3.75%增加至5.77%。但经方差分析表明,超声提取时间20min和30min之间存在显著差异性(P<0.05),10min和20min、30min和40min之间的差异不显著(P>0.05)。在一定的时间内,由于超声波的空化作用,使得多糖的提取率增加,但过长就会产生剧烈的机械剪切作用和引起过多的热量聚集,使多糖发生降解,使得多糖的提取率增加趋于平缓。因此,在后续试验中,选择超声提取30min作为BBD试验设计的中心点。

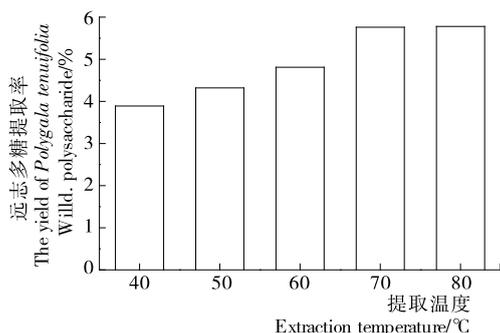


图1 超声提取温度对远志多糖提取率的影响

Figure 1 Effects of ultrasonic extracting temperature on the yield of *Polygala tenuifolia* Willd.

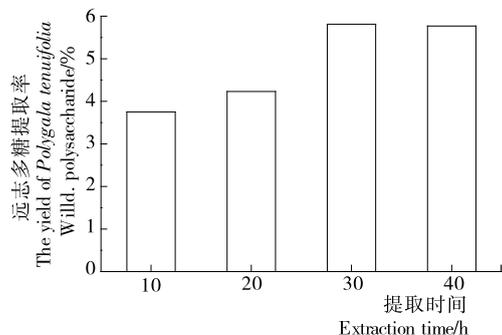


图 2 超声提取时间对远志多糖提取率的影响

Figure 2 Effects of ultrasonic extracting time on the yield of *Polygala tenuifolia* Willd.

2.1.3 液固比对远志多糖得率的影响 由图 3 可知,液固比对远志多糖提取率也有一定的影响,随着液固比增加,提取率由 4.18% 提高至 5.79%。方差分析表明,在液固比为 5:1(mL/g)和 10:1(mL/g)时存在显著差异性($P < 0.05$),液固比 10:1,15:1,20:1(mL/g)之间不存在显著差异($P > 0.05$)。在一定的液固比下,超声波在液体中形成最大比例的有效搅动和流动,达到最高的提取率。而随着溶液的增加,超声波对悬浮于液体中的微粒的凝聚作用相对减弱,使得提取率增加趋于平缓甚至降低。因此,在后续试验中,选择液固比 10:1(mL/g)作为 BBD 试验设计的中心点。

2.1.4 提取次数对远志多糖得率的影响 由图 4 可知,超声提取次数对多糖提取率的影响表现为随着超声提取次数增加

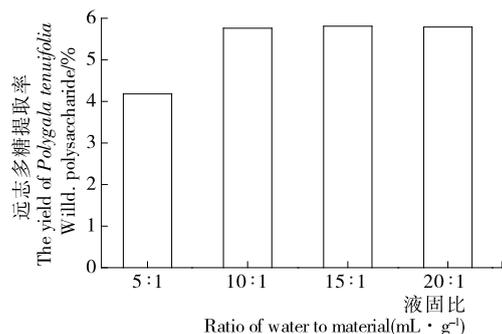


图 3 液固比对远志多糖提取率的影响

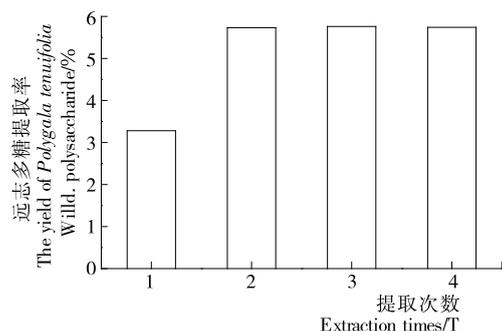
Figure 3 Effects of ultrasonic extracting ratio of water to material on the yield of *Polygala tenuifolia* Willd.

图 4 提取次数对远志多糖提取率的影响

Figure 4 Effects of ultrasonic extracting times on the yield of *Polygala tenuifolia* Willd.

而升高,由 3.28% 升高至 5.74%。方差分析表明,超声提取 1 次和 2 次之间存在显著差异性($P < 0.05$),提取 2,3,4 次之间不存在显著差异($P > 0.05$)。考虑到提取 2~4 次对多糖提取率影响不显著,从节约能源和时间考虑,提取次数不作为响应面试验设计的因素,因此,在后续试验中远志多糖的提取次数为 2 次。

2.2 Box-Behnken 试验结果

根据上述的单因素试验结果,确定多糖超声提取时间、超声提取温度、液固比的各项参数水平(见表 1)。采用 Box-Behnken 设计对远志多糖提取工艺进行优化,结果见表 2。

表 1 Box-Behnken 试验设计因素水平表

Table 1 Independent variables and levels of BBD

水平	X ₁ 提取时间/min	X ₂ 提取温度/°C	X ₃ 液固比 (mL · g ⁻¹)
-1	25	60	8:1
0	30	65	10:1
+1	35	70	12:1

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken experimental design with the independent variables

组数	X ₁	X ₂	X ₃	多糖提取率/%
1	+1	0	+1	4.53
2	-1	0	-1	3.23
3	0	0	0	5.96
4	-1	0	+1	3.63
5	+1	+1	0	5.30
6	0	+1	-1	3.31
7	0	0	0	5.81
8	0	0	0	5.79
9	+1	0	-1	4.11
10	0	-1	+1	3.08
11	-1	+1	0	3.36
12	0	-1	-1	3.64
13	-1	-1	0	3.54
14	0	0	0	5.87
15	+1	-1	0	4.24
16	0	0	0	5.78
17	0	+1	+1	4.41

通过对试验数据进行多元回归分析,得到多糖提取率 Y 的二次多元回归方程:

$$Y = 5.84 + 0.55X_1 + 0.24X_2 + 0.17X_3 + 0.31X_1X_2 + 0.005X_1X_3 + 0.42X_2X_3 - 0.73X_1^2 - X_2^2 - 1.23X_3^2 \quad (2)$$

由表 3 可知,二次回归模型的方差分析表明该模型达到极显著水平($P < 0.0001$),失拟项不显著,说明模型的拟合程度良好,未知因素对试验结果干扰很小。3 个因素的 P 值均小于 0.01,表明超声提取温度、提取时间和液固比均是影响远志多糖得率的重要因素。决定系数 R^2 为 0.99、校正系数 R_{adj}^2 为 0.98、变异系数 C.V. 为 3.02%,表明多项式模型的精密度和利用性是可行的,利用此模型方程能预测远志多糖在任何变量值下的提取率。

2.3 响应面图分析

三维响应面图和二维等值线图可直观地反映响应值与试验各因素水平之间的交互作用,从而确定最优的工艺参数范围。响应面图的曲面形状若与球面越接近则各变量之间关系越显著;等值线图的形状为椭圆形则表示两因素交互作用显著。由图5可知,随着温度的升高,提取率先有所增加

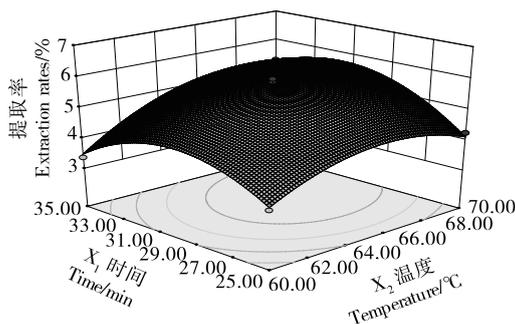
后缓慢降低。超声提取时间为25~35 min时,提取率先增大后减小;等值线区域水平,表示两因素间具有显著的交互作用。由图6可知,随着超声提取温度的升高,提取率先呈直线增大后趋于平稳,随着液固比的加大,多糖的提取率先增大后减小。由图7可知,随着超声提取时间的延长和液固比的加大,提取率先增大后减小。

表3 BBD 试验结果分析[†]

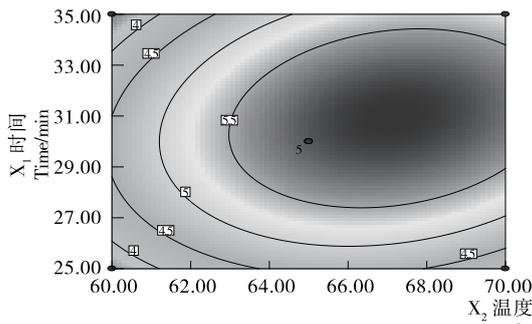
Table 3 Analysis the results of variance of the BBD

项目	平方和	自由度	均方	F 值	Prob>F	显著性
模型	18.48	9	2.05	113.80	<0.000 1	**
X ₁	2.44	1	2.44	135.32	<0.000 1	**
X ₂	0.44	1	0.44	24.48	0.001 7	**
X ₃	0.23	1	0.23	12.81	0.009 0	**
X ₁ X ₂	0.38	1	0.38	21.30	0.002 4	**
X ₁ X ₃	1.00×10 ⁻⁴	1	1.00×10 ⁻⁴	5.54×10 ⁻³	0.942 7	
X ₂ X ₃	0.69	1	0.69	38.17	0.000 5	**
X ₁ ²	2.27	1	2.27	125.52	<0.000 1	**
X ₂ ²	4.20	1	4.20	232.61	<0.000 1	**
X ₃ ²	6.41	1	6.41	354.98	<0.000 1	**
残差	0.13	7	0.018			
失拟项	0.10	3	0.035	6.23	0.054 8	
净误差	0.022	4	5.57×10 ⁻³			
总离差	18.61	16				

[†] **代表极显著水平 P<0.01; *代表显著水平 P<0.05; R²为 0.99, R²_{adj}为 0.98. C.V.为 3.02%。



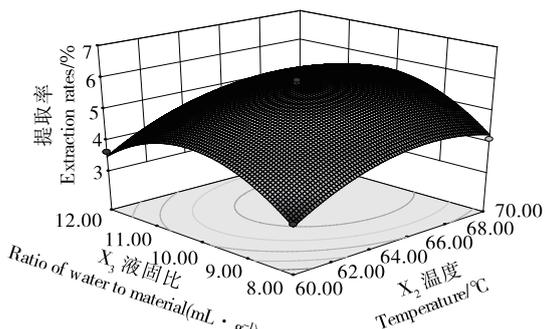
(a) 响应面图



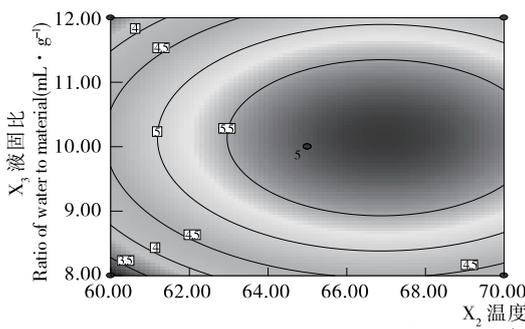
(b) 等高线图

图5 超声提取温度和提取时间对提取率的响应面图和等高线图

Figure 5 Response surface and contour plots showing the interactive effect of ultrasonic extracting time and extracting temperature



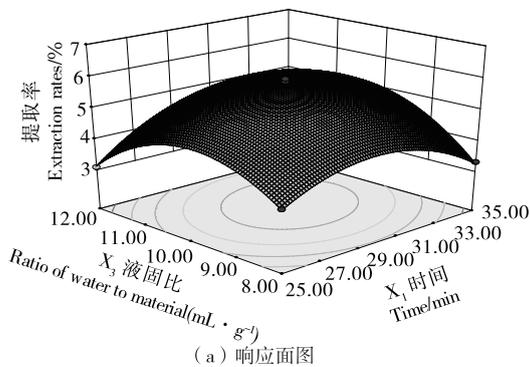
(a) 响应面图



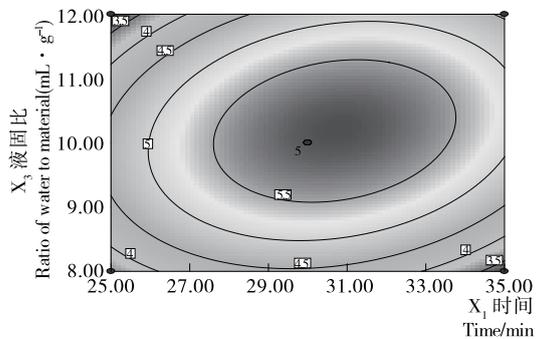
(b) 等高线图

图6 超声提取温度和液固比对提取率的响应面图和等高线图

Figure 6 Response surface and contour plots showing the interactive effect of ultrasonic extracting temperature and ratio of water to material



(a) 响应面图



(b) 等高线图

图 7 液固比和超声提取时间对提取率的响应面图和等高线图

Figure 7 Response surface and contour plots showing the interactive effect of ultrasonic extracting time and ratio of water to material

2.4 优化工艺的验证

通过 Design-Expert 8 分析得到远志多糖提取的最佳工艺条件为: $X_1 = 31.02$ min, $X_2 = 67.10$ °C, $X_3 = 10.21 : 1$ (mL/g), 在此条件下得到的理论预测值为 5.99%。根据实际可操作性等因素,对最优条件进行了修正,分别为超声提取时间 30 min、超声提取温度 67 °C、液固比 10 : 1 (mL/g), 在此条件下验证模型的精确性,得到远志多糖提取率平均值为 $(5.87 \pm 0.21)\%$ ($n=3$),与理论预测值接近,表明该优化工艺重复性良好,最优工艺的结果可靠。

2.5 远志多糖红外光谱分析

图 8 为优化提取条件下所得远志多糖的红外吸收光谱。由图 8 可知, 3363 cm^{-1} 处的强吸收峰为多糖分子中的 O—H 键的伸缩振动吸收峰; $2900 \sim 3000$ cm^{-1} 的吸收峰为多糖分子中 C—H 的伸缩振动吸收峰; 1630 cm^{-1} 处的吸收峰为—OH 的弯曲振动吸收峰; 1403 cm^{-1} 处吸收峰为 C—H 键的弯曲振动; 1290 cm^{-1} 处吸收峰为环上 C—C 键的骨架振动; 1199 cm^{-1} 处吸收峰为环上 C—O 的振动吸收峰; 1070 cm^{-1} 处吸收峰则是醇羟基的 C—O 伸缩振动^[10]; 在 1740 cm^{-1} 波数处无吸收则显示在多糖样品中没有糖醛酸的结构存在,因此可推测远志多糖为中性多糖^[11]。

2.6 远志多糖抗氧化活性测定结果分析

考察在最优工艺条件下得到的远志多糖的体外抗氧化活性,选取清除 DPPH· 及 ·OH 能力进行评价。由图 9 可

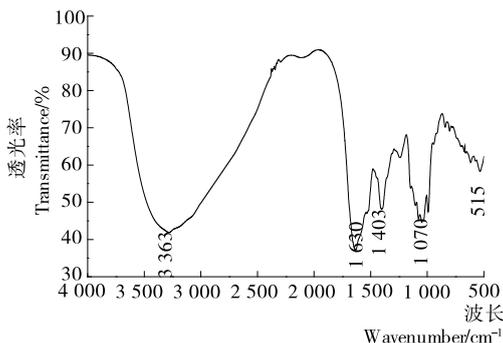


图 8 远志多糖红外吸收光谱

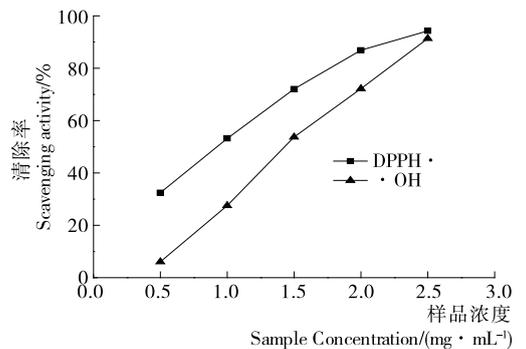
Figure 8 IR spectrum of polysaccharide of *Polygala tenuifolia* Willd.

图 9 远志多糖清除 DPPH· 和 ·OH 的作用

Figure 9 The DPPH radical and hydroxyl radical scavenging activity on polysaccharide of *Polygala tenuifolia* Willd.

知,远志多糖具有清除 DPPH· 及 ·OH 的能力。在浓度为 $0.5 \sim 2.5$ mg/mL 时,对 DPPH· 及 ·OH 清除率随浓度的增加而有所增加,呈现明显的量效关系。通过对其 IC_{50} 值进行计算表明,远志多糖对 DPPH· 清除能力的 IC_{50} 值为 0.83 mg/mL;对 ·OH 清除能力的 IC_{50} 值为 1.29 mg/mL。由此可看出,远志多糖具有一定的抗氧化活性。

3 结论

本研究在单因素试验的基础上,利用响应面法对超声辅助提取远志多糖的工艺进行优化,并对远志多糖的红外光谱性质及抗氧化活性进行初步评价,结果表明:

- ① 超声波辅助提取远志多糖的最优工艺为:超声提取时间 30 min、提取温度 67 °C、液固比 10 : 1 (mL/g)、提取 2 次,在此条件下远志多糖提取率为 $(5.87 \pm 0.21)\%$;
- ② 红外光谱检测表明,远志多糖具有典型的多糖吸收峰,推测为不含糖醛酸的中性多糖;
- ③ 远志多糖具有一定清除 DPPH· 和 ·OH 的能力,其 IC_{50} 值分别为 $0.83, 1.29$ mg/mL。

本研究仅对超声辅助提取远志多糖的工艺进行了优化,而采用该手段辅助提取是否会影响其生物活性尚未可知,因此在后续的试验中可对不同提取方式与活性之间的关系进行深入研究。

(下转第 193 页)

十八烷等具有辛辣味,而相比于对照组,处理组的烟气颗粒物成分中此两种物质分别下降了39.47%和100%,说明经酶解—美拉德强化修饰处理后,薄片的刺激感减弱、杂气降低,与感官评吸结果相一致。

3 结论

酶解—美拉德强化修饰联用技术可以在提高烟末提取率的同时,使薄片香气成分中有利成分有所增加,如大马士酮与巨豆三烯酮1分别提高192.0%,356.0%;烟气颗粒物中部分不利成分有所下降,处理组中未检测到4-乙烯基愈创木酚与N,N-二甲基苯胺,具有辛辣味的十七烷、二十八烷分别下降39.47%和100%。处理后的薄片香气更加丰富、协调,焙烤香浓郁,杂气、刺激性减小,抽吸品质明显改善。

参考文献

- [1] 蒋宇凡,徐保明,姚政.造纸法生产烟草薄片研究进展[J].轻工科技,2015(12):137-139.
- [2] 缪应菊,刘维涓,刘刚,等.烟草薄片制备工艺的现状[J].中国造纸,2009(7):55-60.
- [3] 彭琛,陈越立.烟草薄片技术应用与研究[J].科技信息,2011(19):37.

(上接第100页)

参考文献

- [1] 陈楠,贺小华,邵虎跃,等.换热器管板有限元分析模型研究[J].食品与机械,2012,28(2):90-93.
- [2] 冯磊,徐涵庆,顾瑾.一种新型换热器——板壳式换热器[J].食品与机械,1997(4):35-36.
- [3] 李健民,李长友,徐凤英,等.批式循环粮食干燥机换热器的三维流场模拟——基于Solidworks[J].农机化研究,2013(1):18-21.
- [4] 马云霞.列管式换热器的设计与计算[J].粮食流通技术,2005(2):18-19.
- [5] 赵晓文,苏俊林.板式换热器的研究现状及进展[J].冶金能源,2011(1):52-55.
- [6] 刘红,杨哲人,蒋兰芳,等.基于CFD的U型管换热器温度降模型[J].食品与机械,2015,31(2):152-156.

(上接第156页)

参考文献

- [1] 国家药典委员会.中国药典:一部[S].北京:中国医药科技出版社,2015:156-157.
- [2] 刘大伟,康利平,马百平.远志化学及药理作用研究进展[J].国际药学研究杂志,2012,39(1):32-36,44.
- [3] Liu Jun, Stefan Willför, Xu Chun-lin. A review of bioactive plant polysaccharides: Biological activities, functionalization, and biomedical applications[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2015, 5(1): 31-36.
- [4] 时宵雨,姚春霞,林晓,等.多糖药物应用与研究进展[J].中国新药杂志,2014,23(9):1057-1062.
- [5] Xin Tao, Zhang Fu-bin, Jiang Qiu-ying, et al. Purification and antitumor activity of two acidic polysaccharides from the roots of *Polygala tenuifolia* [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(4): 1671-1676.
- [6] 魏永俊,周秋菊,黄树颖,等.小远志多糖的提取及纯化[J].江

- [4] 许日鹏,苏文强,段继生.烟草薄片的开发与应用[J].上海造纸,2008(6):46-49.
- [5] 唐兴平,陈学榕,戴达松,等.烟草废弃物造纸法制烟草薄片[J].福建农林大学学报:自然科学版,2007(2):205-207.
- [6] 李丹,刘熙.生物技术应用用于造纸法再造烟叶生产的研究进展[J].现代食品科技,2013(6):1463-1466.
- [7] 吴亦集,沈光林,陶红,等.造纸法再造烟叶原料的加酶萃取[J].烟草科技,2011(7):33-36.
- [8] Onishi A Nishi. Process for reacting amino acid and an activecarbonyl sugar in a polyhydric alcohol: US, 3478015[P].1969-11-11.
- [9] 黎新钦,张静,田兆福,等.液相美拉德反应优化烟梗烟末提取液的应用研究[J].食品与机械,2015,31(5):21-27.
- [10] 郑小嘎,赵昌政,韦绪伦,等.酶法改善造纸法烟草薄片品质初探[J].山东食品发酵,2010(1):11-13.
- [11] 骆莉,卓浩廉,周榕,等.生物技术及美拉德反应改良烟梗提取液的性质[J].食品工业科技,2012(6):189-192.
- [12] 张欢欢.卷烟制丝过程中烟丝化学成分和感官质量的动态变化研究[D].郑州:河南农业大学,2014:19-20.
- [13] 何建龙.国内低焦油卷烟市场现状及发展前景[J].流通经济,2011(11):137-140.
- [14] 姚二民,宋豪,李晓,等.茶叶再造烟叶对卷烟烟气成分的影响[J].茶叶科学,2012,32(4):319-324.

(上接第100页)

- [7] 杨说文,徐小健. MATLAB 优化工具箱在结构优化设计中的应用[J].科学技术与工程,2008,8(5):1347-1349.
- [8] Woon S F, Rehbock V, Loxton R. Global optimization method for continuous-times sensor scheduling[J]. Nonlinear Dynamics and Systems Theory, 2010, 10(2): 175-188.
- [9] Chai Q Q, Loxton R, Teo K L, et al. A class of optimal state-delay control problems[J]. Nonlinear Analysis: Real World Application, 2013, 14: 1536-1550.
- [10] 褚洪生,杜增吉,阎金华,等. MATLAB7.2 优化设计实例指导教程[M].北京:机械工业出版社,2007:198-204.
- [11] 段明序.混合动力客车机械式自动变速器参数优化设计方法研究[D].长春:吉林大学,2013:11-15.
- [12] 吴银亮,陈林,郭礼波.基于非线性 Fmincon 法的抗滑桩优化设计[J].铁道建筑,2011(5):81-84.

- [7] 苏师范大学学报:自然科学版,2014,32(1):60-63.
- [7] 方元,许铭强,汪欣蓓,等.超声波辅助提取哈密大枣多糖的工艺优化[J].食品与机械,2014,30(2):175-180.
- [8] Jing Yong-shuai, Zhu Jian-hua, Liu Ting, et al. Structural characterization and biological activities of a novel polysaccharide from cultured *Cordyceps militaris* and its sulfated derivative[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(13): 3464-3471.
- [9] 吴兰芳,蒋爱民,郭善广,等.凝固型紫薯酸乳发酵工艺及抗氧化活性研究[J].食品与机械,2013,29(5):198-203.
- [10] Solomon Rajesh Thambiraj, Michael Phillips, Sundar Rao Koyyal-amudi. Antioxidant activities and characterisation of polysaccharides isolated from the seeds of *Lupinus angustifolius* [J]. Industrial Crops and Products, 2015, 74(11): 950-956.
- [11] Jing Yong-shuai, Huang Li-jiao, Lv Wen-jie, et al. Structure characterization of a novel polysaccharide from pulp tissues of *Litchi chinensis* and its immunomodulatory activity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(4): 902-911.