

北沙参多糖的提取工艺、理化性质及生物活性研究

Study on the extraction technology, physicochemical properties and
bioactivity of the polysaccharide form *Radix Glehniae*

景永帅¹ 苏 蕾¹ 韩 钰¹ 张丹参¹

JING Yong-shuai¹ SU Lei¹ HAN Yu¹ ZHANG Dan-shen¹

张瑞娟¹ 吴兰芳² 郑玉光² 秦 璇³

ZHANG Rui-juan¹ WU Lan-fang² ZHENG Yu-guang² QIN Xuan³

(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. 石家庄市第二医院康复国际部, 河北 石家庄 050062)

(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. Department of International Rehabilitation, The Second
Hospital of Shijiazhuang, Shijiazhuang, Hebei 050062, China)

摘要:在单因素试验的基础上采用响应面法对北沙参多糖的提取工艺进行优化,得到超声波提取北沙参多糖的最佳工艺条件为:提取温度 65 ℃,超声时间 22 min,液料比 22:1 (mL/g),该条件下多糖提取率为 12.13%。制备的北沙参多糖具有多糖的典型特征,总糖含量为 90.4%,蛋白含量为 1.22%,热降解温度为 300.32 ℃。通过考察北沙参多糖对 DPPH 自由基 (IC_{50} 为 1.99 mg/mL)、OH 自由基 (IC_{50} 为 1.71 mg/mL) 和 α -葡萄糖苷酶 (IC_{50} 为 5.23 mg/mL) 的清除或抑制能力,表明北沙参多糖具有一定的清除自由基的能力和潜在的降血糖活性。

关键词:北沙参;多糖;提取工艺;理化性质;生物活性

Abstract: Response surface methodology based on single-factor experiment was applied to optimize the extraction conditions of polysaccharide. As a result, the optimum extraction conditions were extraction temperature 65 ℃, ultrasonic time 22 min, liquid to material ratio of 22:1 (mL/g). Under the control of such conditions, the ex-

traction rate of polysaccharide from *Radix Glehniae* was 12.13%. The polysaccharide from *Radix Glehniae* had typical characteristics of polysaccharides, containing 90.4% of the total sugar and 1.22% protein, and the thermal degradation temperature was 300.32 ℃. The scavenging abilities of DPPH free radicals (IC_{50} = 1.99 mg/mL), OH free radicals (IC_{50} = 1.71 mg/mL) and the inhibiting ability of α -glucosidase (IC_{50} = 5.23 mg/mL) were investigated. The results showed that polysaccharide from *Radix Glehniae* had certain free radicals scavenging and potential hypoglycemic activities.

Keywords: *Radix Glehniae*; polysaccharide; extraction technology; physicochemical properties; biological activity

北沙参为药用植物珊瑚菜 (*Glehnia littoralis* Fr. schmidt ex Miq.) 的根,被《本草纲目》列为五参之一,是卫生部公布的药食两用资源,具有清补肺阴、和中降逆、涵养肝阴等效果^[1-2]。主要有效成分为挥发油类、香豆素类、多糖类、苷类和聚炔类等,其中多糖类是含量最高的成分,具有抗氧化和调节机体免疫等功能^[2-3]。

目前,对于北沙参多糖的研究,主要集中于提取工艺优化和生物活性研究,如荣立新等^[4]通过制备阴虚小鼠模型,检测脾脏 NK 细胞杀伤活力、T 淋巴细胞转化功能和小鼠血清抗绵羊红细胞抗体 IgM 含量,发现北沙参多糖具有一定的免疫调节活性。相美荣等^[5]通过星点设计-响应面法,优化了北沙参多糖的热水浸提工艺,得到北沙参多糖的最大提取率为 10.78%。与传统的热水浸提工艺相比,超声波辅助提取法因具有效率高、操作时间短、设备简单等优势,在食品和

基金项目:河北省自然科学基金项目(编号:H2016208059, H2016208058, H2017423023);河北省高等学校科学技术研究项目(编号:ZD2016009);国家级大学生创新创业训练计划项目(编号:201710082022);河北省第四次全国中药资源普查项目(编号:Z135080000022);河北省二期现代农业产业技术体系创新团队项目(编号:HBCT2018060205)

作者简介:景永帅,男,河北科技大学副教授,博士。

通信作者:吴兰芳(1985—),女,河北中医学院副教授,博士。

E-mail: wulanfang757@163.com

收稿日期:2017-12-26

中药行业中有较好的应用^[6]。但是,对于超声波最优工艺提取的北沙参多糖的理化性质和生物活性未见相关研究报道。

本试验拟选用超声波辅助提取法提取北沙参多糖,采用单因素试验和响应面法对北沙参多糖的提取工艺进行优化,并测定北沙参多糖的理化性质和生物活性,为北沙参多糖成分的进一步开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 药品与试剂

北沙参:河北安国产,经河北中医学院药学院生药教研室郑玉光教授鉴定为伞形科珊瑚菜(*Glehnia littoralis* Fr. schmidt ex Miq.)的根;

α -葡萄糖苷酶:1.0×10⁵ U/g,上海源叶生物科技有限公司;

1,1-二苯基-2-苦味基肼(DPPH):色谱纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

对硝基苯- α -D-吡喃葡萄糖苷(PNPG):分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

其他试剂为国产分析纯。

1.2 试验仪器

恒温水浴锅:HH-2 型,江苏金坛宏华仪器厂;
旋转蒸发仪:EYELAN-1100 型,东京理化株式会社;
超声波清洗器:KS-300DE 型,昆山洁力美超声仪器有限公司;

多功能中药粉碎机:400Y 型,永康市铂欧玉金制品有限公司;

紫外-可见分光光度计:UV-2550 型,岛津仪器制造有限公司;

高速离心机:TGL-15B 型,上海安亭科学仪器厂;

电子分析天平:AL204 型,梅特勒-托利国际贸易有限公司;

差热—热重联用热分析仪:STD-2960 型,美国 TA 仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱仪:S-100 型,珀金埃尔默仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品前处理 取北沙参药材 200.0 g,粉碎,过 40 目筛,用 3 倍体积的 95%乙醇回流提取 2 次,除去脂溶性成分,药渣 50℃干燥后,备用。

1.3.2 单因素试验

(1) 超声提取时间对多糖提取率的影响:固定超声提取温度 60℃,液料比 20:1 (mL/g),分别考察超声提取时间(10,20,30,40 min)对多糖提取率的影响。

(2) 超声提取温度对北沙参多糖提取率的影响:在液料比 20:1 (mL/g)、超声提取时间 20 min 的条件下,分别考察超声提取温度(20,40,60,80,90℃)对多糖提取率的影响。

(3) 液料比对多糖提取率的影响:固定超声提取温度 60℃,超声提取时间 20 min,分别考察液料比为[10:1, 15:1,20:1,25:1,30:1 (mL/g)]对多糖提取率的影响。

1.3.3 响应面分析 在单因素考察的基础上,以北沙参多糖提取率作为响应值,采用三因素三水平的响应面分析法,得到回归方程,确定多糖的最佳工艺条件,并重复最优工艺进行验证实验。所有试验均重复 3 次,利用统计分析软件 Design Expert 8.0 及 Excel 对试验结果进行分析。

1.3.4 北沙参多糖的理化性质测定

(1) 紫外-可见光谱分析:配制 0.1 mg/mL 的北沙参多糖溶液,用紫外-可见分光光度计在 200~700 nm 扫描^[7]。

(2) 红外光谱分析:称取 1.0 mg 的北沙参多糖,与 KBr 粉末混匀后压片,红外光谱仪在 4 000~500 cm⁻¹ 波数内扫描^[8]。

(3) 总糖含量的测定:采用苯酚-硫酸法^[9]。

(4) 蛋白含量的测定:采用考马斯亮蓝法^[10]。

(5) 热重分析:称取 2.0 mg 的北沙参多糖,温度由室温升至 800℃,升温速率为 10℃/min,进行热重分析,包括:差示扫描量热分析(differential scanning calorimetry, DSC)和热解重量分析(thermal gravimetric analysis, TGA)^[11]。

1.3.5 北沙参多糖的生物活性

(1) DPPH 自由基清除能力:参照文献^[12]。

(2) OH 自由基清除能力:参照文献^[13]。

(3) 对 α -葡萄糖苷酶活性抑制:取 pH 6.81 缓冲溶液 3 mL 和 2 mmol/L PNPG 溶液 0.8 mL,37℃孵育 20 min,加入 40 U/mL α -葡萄糖苷酶溶液 1 mL,继续反应 20 min,加入 1.0 mol/L 碳酸钠 1 mL 终止反应,紫外-可见分光光度计在 400 nm 测吸光度值,为对照组 A₁。将体系中 1 mL α -葡萄糖苷酶换为 1 mL 蒸馏水,其余条件不变,测定吸光度值,为空白组 A₂。

取 pH 6.81 缓冲溶液 2 mL、2 mmol/L PNPG 0.8 mL,分别加入 1 mL 浓度分别为 8.0,4.0,2.0,1.0,0.5 mg/mL 的多糖溶液,同上法进行反应,并测吸光度值,为样品组 A₃。将体系中 1 mL α -葡萄糖苷酶换为 1 mL 蒸馏水,其余条件不变,测定吸光度值,为样品对照组 A₄^[14]。阿卡波糖作为阳性对照品。按式(1)计算抑制率。

$$R = (1 - \frac{A_3 - A_4}{A_1 - A_2}) \times 100\%, \tag{1}$$

式中:

R——抑制率,%;

A₁——对照组的吸光度;

A₂——空白组的吸光度;

A₃——样品组的吸光度;

A₄——样品对照组的吸光度。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 提取时间对多糖提取率的影响 由图 1 可知,随着超声提取时间的延长,多糖提取率先上升后又趋于平缓,当提取时间超过 20 min 时,多糖的提取率不再发生明显的变化。因在一定的时间内,超声波的空化作用可提高多糖的提取率,但时间过长会由于机械剪切作用和热量聚集,降解多糖,

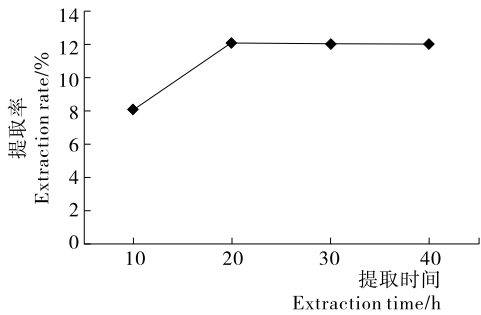


图 1 提取时间对北沙参多糖提取率的影响

Figure 1 Effect of extraction time on extraction rate of polysaccharide from *Radix Glehniae*

从而使得多糖提取率不再增加,甚至降低。因此,选取 20 min 的超声提取时间作为 Box-Behnken Design(BBD)试验设计的中心点。

2.1.2 提取温度对多糖提取率的影响 由图 2 可知,随超声提取温度的增加,多糖提取率先上升后趋于平缓,这是由于升高温度有助于传质过程的发生,可加剧分子扩散,从而加快溶剂的渗透以及多糖类物质的溶出。当提取温度超过 60 ℃ 时提取率上升已不明显,而且提取温度过高会难以控制试验条件,浪费资源,所以选取 60 ℃ 提取温度为后续 BBD 试验设计的中心点。

2.1.3 液料比对北沙参多糖提取率的影响 由图 3 可知,多糖提取率随提取液料比的增加而增加,当液料比大于 20 : 1 (mL/g)时,提取率趋于平缓。溶剂量的增加使得北沙参与提取溶液的接触面积增大,溶剂传质推动力增强,可使得多

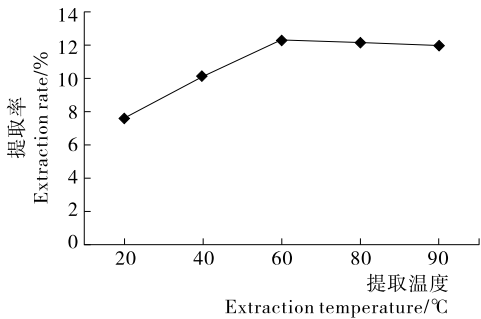


图 2 提取温度对北沙参多糖提取率的影响

Figure 2 Effect of extraction temperature on extraction rate of polysaccharide from *Radix Glehniae*

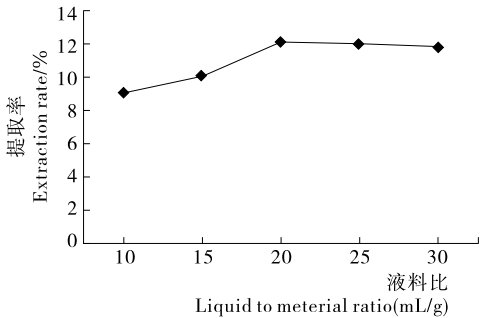


图 3 液料比对北沙参多糖提取率的影响

Figure 3 Effect of liquid ratio on polysaccharides extraction of *Radix Glehniae*

糖提取率和溶出速度增加。但溶剂体积过大可导致物料吸附溶剂的量也增大,多糖被物料吸附不易溶出。因此,选取 20 : 1 (mL/g)的液料比作为后续 BBD 试验设计的中心点。

2.2 北沙参多糖提取工艺优化

2.2.1 数学模型的建立与检验 基于上述单因素试验结果,采用响应面法对北沙参多糖提取工艺进行优化,以提取温度、提取时间、液料比为自变量,多糖提取率(Y)为响应值,根据 BBD 试验设计方法和原理,得出北沙参多糖提取率响应面分析试验设计因素与水平表(表 1)。

表 1 响应面分析试验设计因素与水平

Table 1 Response surface analysis of experimental design factors and level

水平	A 提取温度/℃	B 提取时间/min	C 液料比(mL/g)
−1	65	25	25
0	60	20	20
1	55	15	15

采用 BBD 试验设计方法设立 17 组试验,各因素和响应面值(多糖提取率)如表 2 所示,对数据进行二次回归拟合,分析各因素的效应,最后得到北沙参多糖提取最优工艺。

2.2.2 回归方程的建立与方差分析 利用软件对试验结果进行回归分析,拟合得到北沙参多糖提取率的二次多元回归方程为:

$$Y=11.76+0.62A+0.33B+0.25C+0.35AB+0.79AC-0.060BC-0.64A^2-0.75B^2-0.96C^2。(2)$$

由表 3 可知,失拟项不显著,表明模型的拟合程度良好,

表 2 多糖提取率响应面试验设计和结果

Table 2 Response surface experimental design and result of polysaccharide extraction rate of *Radix Glehniae*

试验号	A	B	C	提取率/%
1	0	−1	1	9.81
2	0	0	0	11.87
3	1	−1	0	10.54
4	1	1	0	11.68
5	1	0	−1	9.57
6	−1	1	0	9.51
7	−1	0	−1	10.08
8	0	0	0	12.11
9	1	0	−1	9.69
10	0	1	−1	10.26
11	0	0	0	10.53
12	0	0	0	11.87
13	−1	−1	0	9.78
14	0	−1	−1	9.41
15	0	0	0	12.44
16	−1	0	1	9.24
17	0	1	−1	10.35

未知因素对试验结果的干扰较小,模型的方差分析说明该模型已经达到显著水平($P<0.05$)。由 P 值可知各因素对北沙参多糖提取率的影响为:提取温度>提取时间>液料比。校正系数 R^2_{adj} 为 0.96、变异系数(C.V.)为 $3.62\%<10\%$ 、决定系数 R^2 为 0.97,说明多项式模型的利用性和精密度是可行的,通过此模型方程能预测出北沙参多糖在任何变量值下的提取率。

2.2.3 响应面分析 图 4~6 是因素(提取温度、提取时间、液料比)交互影响的响应面图和等高线图。由图 4 可知,随超声提取温度的升高,多糖提取率呈现先有所增加后缓慢降低的趋势。超声提取时间为 15~25 min 时,提取率呈现先增大后减小的趋势;等值线区域水平,表示两因素间具有显著的交互作用。由图 5 可知,随提取温度的升高,提取率呈现先增大后趋于平稳的趋势;随液料比的加大,提取率呈现先增大后减小的趋势。由图 6 可知,随液料比的加大及超声提取时间的延长,提取率呈现先增大后减小的趋势。

2.3 最佳工艺参数及验证

通过对二次多项式回归分析求最大值,得到超声波辅助提取多糖的最佳工艺为:液料比 22:1 (mL/g)、超声提取时间 22.07 min、超声提取温度 64.5℃,在此条件下,北沙参多糖提取率的理论预测值为 12.17%,结合最优工艺参数与实际生产可操作性,对各因素的取值进行修正,最终确定超声波辅助提取最优工艺为:液料比 22:1 (mL/g)、超声提取时间 22 min、提取温度 65℃,经 3 次重复实验验证,北沙参多糖平均提取率为12.13%,与预测值相近,说明优化工艺重复

表 3 北沙参多糖提取率回归模型方差分析
Table 3 Analysis of extraction rate regression model variance of *Radix Glehniae* polysaccharide

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	15.64	9	1.74	5.09	0.021 7	显著
A	1.92	1	1.92	5.61	0.049 7	
B	0.55	1	0.55	1.60	0.245 9	
C	0.21	1	0.21	0.60	0.462 8	
AB	0.50	1	0.50	1.46	0.266 9	
AC	1.21	1	1.21	3.54	0.101 9	
BC	6.97E-03	1	6.97E-03	0.02	0.890 5	
A ²	1.41	1	1.41	4.14	0.081 3	
B ²	1.95	1	1.95	5.71	0.048 2	
C ²	1.89	1	1.89	5.54	0.050 8	
残差	2.39	7	0.34			
失拟项	0.26	1	0.26	0.72	0.427 3	不显著
纯误差	2.13	6	0.36			
总回归	18.03	16				

性良好,最优工艺的结果可靠。

2.4 紫外-可见光谱分析蛋白类成分

由图 7 可知,北沙参多糖在 280 nm 处有一定的吸收峰,说明其可能含有蛋白类成分,蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定。

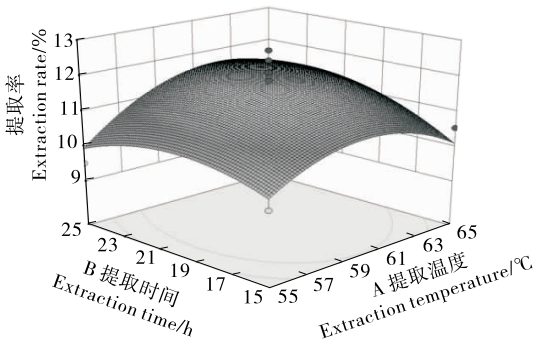


图 4 提取温度和提取时间对北沙参多糖提取率的交互影响

Figure 4 Effect of extraction temperature and extraction time on extraction rate of *Radix Glehniae* polysaccharide

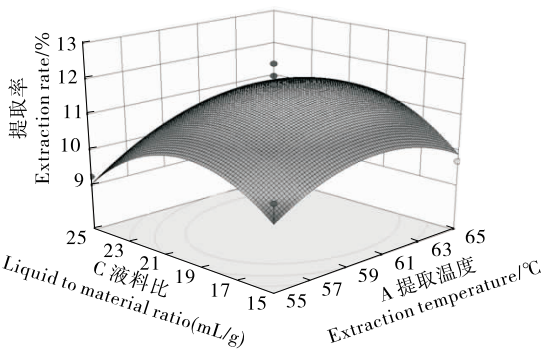
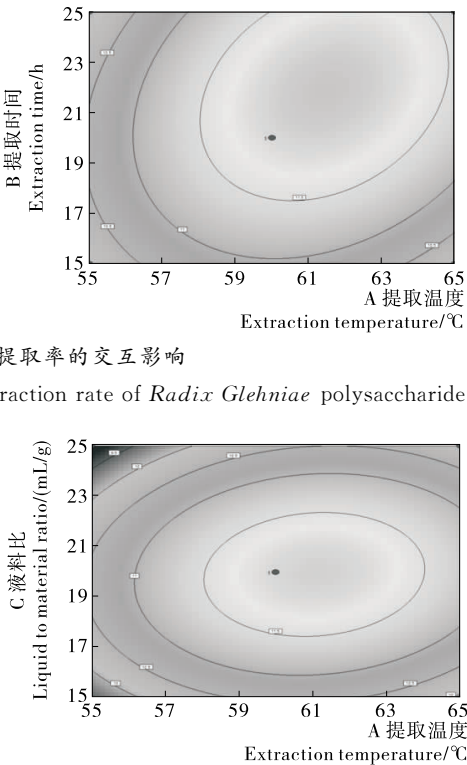


图 5 提取温度和液料比对北沙参多糖提取率的交互影响

Figure 5 Effect of extraction temperature and ratio of liquid to material on extraction rate of *Radix Glehniae* polysaccharide



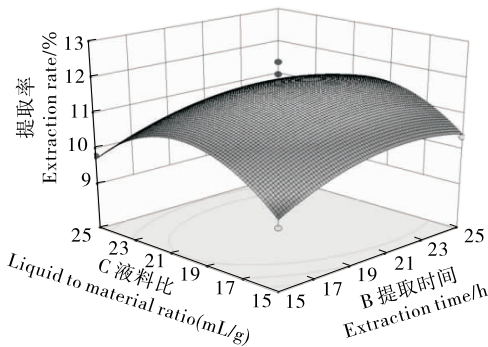


图 6 提取时间和料液比对北沙参多糖提取率的交互影响

Figure 6 Interaction between extraction time and solid-liquid ratio on polysaccharides extraction of *Radix Glehniae*

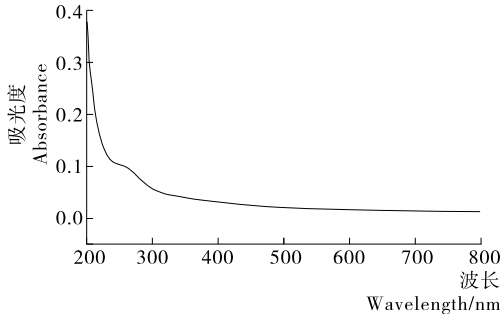
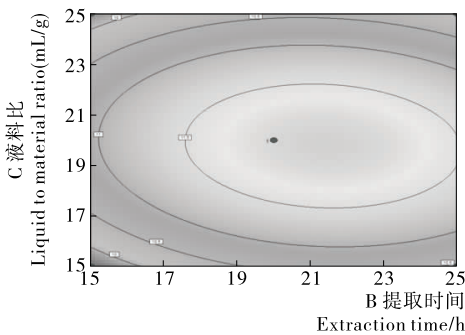


图 7 北沙参多糖紫外-可见光谱图

Figure 7 UV-visible profiles of *Radix Glehniae* polysaccharide

2.5 北沙参多糖中蛋白质含量

由标准曲线得到的回归方程为 $y = 0.690\ 71x + 1.103\ 5$ ($R^2 = 0.991$)。经计算样品中蛋白质的含量为 1.22%。

2.6 北沙参多糖中总糖含量

由标准曲线得到的回归方程为 $b = 9.1a + 0.082\ 4$ ($R^2 = 0.998$)。经计算样品中总糖含量为 90.40%。

2.7 红外光谱分析特征官能团

从图 8 可以看出,在 $1\ 021.28\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰是醇羟基的 C—O 伸缩振动, $1\ 155.97\ \text{cm}^{-1}$ 处为环上 C—O 的振动峰, $1\ 638.05\ \text{cm}^{-1}$ 附近为 —OH 的弯曲振动吸收峰, $1\ 414.14\ \text{cm}^{-1}$ 处为 C—H 键的弯曲振动吸收峰, $2\ 930.43\ \text{cm}^{-1}$ 附近为多糖的 C—H 伸缩振动吸收峰, $3\ 409.19\ \text{cm}^{-1}$ 附近为 O—H 的伸缩振动峰,结果表明,样品具有多糖类物质典型特征峰^[15-16]。

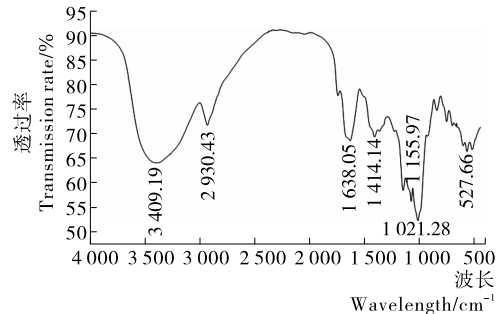


图 8 北沙参多糖红外图谱

Figure 8 The infrared spectra of *Radix Glehniae* polysaccharide

2.8 羟基自由基清除能力

由图 9 可知,随着样品浓度的升高,北沙参多糖对羟基自由基的清除作用也逐渐增强,呈现浓度依赖性,当浓度为 4.00 mg/mL 时,北沙参多糖对羟基自由基的清除率为 78.9%,北沙参多糖对羟基自由基的半数清除率浓度 IC_{50} 值为 1.71 mg/mL,但清除效果弱于对照品 V_C (IC_{50} 值为 0.072 mg/mL)。

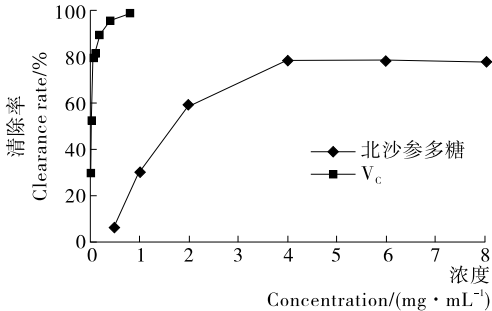


图 9 北沙参多糖和 V_C 对羟基自由基的清除作用

Figure 9 The scavenging rates on hydroxyl radical of *Radix Glehniae* polysaccharide and V_C

2.9 DPPH 自由基清除能力

由图 10 可知,随着样品浓度的升高,北沙参多糖对 DPPH 自由基的清除作用也逐渐增强,呈现浓度依赖性,当浓度为 4.00 mg/mL 时,北沙参多糖对 DPPH 自由基的清除率为 70.2%,北沙参多糖对 DPPH 自由基的半数清除率浓度 IC_{50} 值为 1.99 mg/mL,但清除效果弱于对照品 V_C (IC_{50} 值为 0.005 mg/mL)。

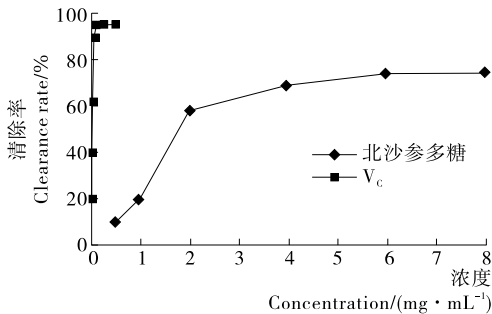


图 10 北沙参多糖和 V_C 对 DPPH 自由基的清除作用

Figure 10 The scavenging rates on DPPH radical of *Radix Glehniae* polysaccharide and V_C

2.10 对 α -葡萄糖苷酶的活性抑制

由图 11 可知,北沙参多糖对 α -葡萄糖苷酶具有一定的抑制作用,随着浓度的升高,抑制作用也增强,整体呈线性关系。北沙参多糖对 α -葡萄糖苷酶的半数抑制率浓度 IC_{50} 值为 5.23 mg/mL。阿卡波糖的 IC_{50} 值为0.501 mg/mL,对比可得,北沙参多糖低于阳性对照阿卡波糖对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用。试验结果表明北沙参多糖具有潜在的降血糖活性。

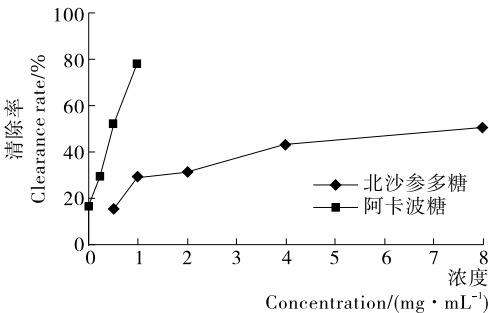


图 11 北沙参多糖与阿卡波糖对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用
Figure 11 The inhibition of α -glucosidase of *Radix Glehniae* polysaccharide and acarbose

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波辅助提取北沙参多糖工艺进行了优化,并对北沙参多糖的抗氧化活性及降血糖活性进行了测定。结果表明:北沙参多糖的最优提取工艺为提取温度 65 ℃,提取时间 22 min,液料比 22 : 1 (mL/g),在此条件下多糖提取率为 12.13%。最优工艺条件下制备的北沙参多糖具有多糖的典型特征吸收峰,总糖含量为 90.4%,蛋白质含量为 1.22%,热降解温度为 300.32 ℃。北沙参多糖具有一定的清除羟基自由基和 DPPH 自由基的能力和潜在的降血糖活性(对 α -葡萄糖苷酶抑制率的 IC_{50} 值为 5.23 mg/mL)。

本试验仅在体外对北沙参多糖的活性进行了测定,并未进行体内试验,后续将对北沙参多糖的体内抗氧化及降血糖活性进行研究。

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[S]. 北京:中国医

药科技出版社,2015:100.

[2] 周红英,吕莎.微波辅助提取北沙参多糖工艺及抗氧化活性研究[J].食品研究与开发,2016,37(12):62-65.

[3] 景永帅,张丹参,张瑞娟,等.提取方法对北沙参多糖性质及生物活性的影响[J].食品与机械,2017,33(10):149-153.

[4] 荣立新,鲁爽,刘咏梅.不同加工方法对北沙参多糖免疫调节功能的实验研究[J].中国中医基础医学杂志,2013,19(9):1 090-1 091,1 105.

[5] 相美容,王朋展,蒋海强,等.星点设计-响应面法优化热水浸提北沙参多糖的工艺研究[J].山东中医杂志,2017,36(1):66-70,77.

[6] 王莉,赵桦,马英丽,等.响应面法优化小丛红景天多糖超声提取工艺研究[J].食品工业科技,2014,35(14):315-320.

[7] 景永帅,吴兰芳,王乾,等.远志多糖提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J].食品与机械,2016,32(5):152-156,193.

[8] 李志平,张弛,周维清,等.巢湖蓝藻酸性多糖的理化性质及其体外抗氧化作用[J].食品科学,2015,36(5):7-12.

[9] 景永帅,张丹参,吴兰芳,等.荔枝低分子量多糖的分离纯化及抗氧化吸湿保湿性能分析[J].农业工程学报,2016,32(9):277-283.

[10] 张乔会,王建中,逢锦慧,等.杜香多糖的抗氧化活性及物理性质研究[J].食品与机械,2015,31(5):206-209.

[11] 上官新晨,陈木森,蒋艳,等.青钱柳多糖降血糖活性的研究[J].食品科技,2010,35(3):82-84.

[12] 商龙臣,吴少魏,张弛,等.南瓜晒多糖的制备表征及活性分析[J].食品科学,2016,37(19):48-53.

[13] 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): 3 464-3 471.

[14] 赵琪,赵利,杨玉雯,等.河蚬多糖分离纯化及抗氧化、抗肿瘤活性研究[J].食品与机械,2017,33(4):127-132.

[15] 朱方明,马新,张安强,等.响应面法优化超声波提取北沙参多糖的工艺研究[J].食品科技,2011,36(7):153-160.

[16] HU Xu-qiao, WANG Jin-lin, JING Yong-shuai, et al. Structural elucidation and in vitro antioxidant activities of a new heteropolysaccharide from Litchi chinensis[J]. Drug Discoveries & Therapeutics, 2015, 9(2):116-122.

[17] 应飞,陈邦兴.笛卡尔乘积下的FCM聚类研究[J].计算机工程与应用,2010,46(34):152-154.

[18] 尹海丽,王颖洁,白凤波.软硬结合的快速模糊C-均值聚类算法的研究[J].计算机工程与应用,2008,44(22):172-174.

[19] 刘开第,赵奇,周少玲,等.机械产品方案设计模糊综合评价中隶属度转换的新方法[J].机械工程学报,2009,45(12):162-166.

[20] 赵侠,汪雄良,王正明.基于最优对比度准则的SAR图像相位梯度自聚焦算法[J].遥感技术与应用,2005,20(6):606-610.

[21] 夏宁,任青文,朱正华.基于模糊聚类的构件耐久性评估[J].工业建筑,2005,35(5):72-74.

[22] 王水鱼,王小娟.在虚拟仪器中实现LabVIEW与MATLAB的无缝链接[J].计算机系统应用,2012,21(11):123-126.

(上接第 114 页)

[11] 谢锋云,周建民,江炜文,等.基于隐马尔科夫模型的苹果分级方法研究[J].食品与机械,2016,32(7):29-31.

[12] 周金辉,马钦,朱德海,等.基于机器视觉的玉米果穗产量组性状测量方法[J].农业工程学报,2015,31(3):221-227.

[13] 吴正敏,曹成茂,谢承健,等.基于图像处理技术和神经网络实现机采茶分级[J].茶叶科学,2017,37(2):182-190.

[14] 周敬东,李敏慧,周明刚,等.油茶果的模糊聚类色选算法[J].中国农机化学报,2015,36(4):94-99.

[15] 司永胜,刘刚,高瑞.基于K-均值聚类的绿色苹果识别技术[J].农业机械学报,2009,40(s1):100-104.

[16] 胡洁.高维数据特征降维研究综述[J].计算机应用研究,2008,25(9):2 601-2 606.