

北沙参乙醇分级多糖的理化性质及 抗氧化活性研究

Ethanol fractional purification, physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharides from *Glehnia Radix*

景永帅¹ 金 珊¹ 张丹参¹ 张瑞娟¹

JING Yong-shuai¹ JIN Shan¹ ZHANG Dan-shen¹ ZHANG Rui-juan¹

王非凡¹ 郑玉光² 吴兰芳²

WANG Fei-fan¹ ZHENG Yu-guang¹ WU Lan-fang²

(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)

(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)

摘要:采用水提醇沉法分级纯化得到 4 种北沙参多糖 (GLP-30、GLP-50、GLP-70、GLP-剩余), 采用傅里叶变换红外光谱、高效液相色谱、凝胶渗透色谱、扫描电镜以及差示扫描量热—热重分析等进行分析, 并测定其抗氧化活性。结果表明: 4 种北沙参多糖均具有多糖的典型基团, 但差示扫描量热结果相差较大; 各多糖组分分子量随乙醇浓度的增加而降低; 不同组分间的多糖得率及单糖含量有一定差异, 其中 GLP-50 得率 (5.43%) 和半乳糖醛酸含量 (2.03%) 最高, 蛋白含量 (7.66%) 较高, 具有最高的保油性, 在清除 DPPH 自由基和羟基自由基中表现出最高的抗氧化能力。乙醇分级沉淀的方法可用于分级纯化北沙参多糖组分, 其中 50% 乙醇更适宜沉淀制备北沙参多糖, 且所得多糖抗氧化性较强。

关键词: 北沙参; 多糖; 分级纯化; 理化性质; 抗氧化活性

Abstract: To study the physicochemical properties and antioxidant activity of ethanol-graded polysaccharides of *Glehnia Radix*. Four kinds of polysaccharides of *Glehnia Radix* (GLP-30, GLP-50, GLP-70, GLP-residual) were fractionated and purified by water extraction and alcohol precipitation. Fourier trans-

form infrared spectroscopy, high performance liquid chromatography, and gel permeation chromatography, scanning electron microscopy, and differential scanning calorimetry-thermogravimetric analysis were used to evaluate the physicochemical properties and structure characteristics of polysaccharides. The antioxidant activities were also studied. The four polysaccharides of *Glehnia Radix* have the typical groups of polysaccharides, but the results of differential scanning calorimetry are quite different, which may be due to the differences in the sugar chain spatial structure. The molecular weight of each polysaccharide were decreased with increasing ethanol concentration. The yield and monosaccharide content were different among different polysaccharides. The yield (5.43%) and the content of galacturonic acid (2.03%) of GLP-50 were the highest. It also has the highest oil-retaining property, and the highest antioxidant activities in DPPH and hydroxyl free radical scavenging. The ethanol fractionation method can be used to fractionate and purify the polysaccharides of *Glehnia Radix*. The final concentration 50% ethanol was more suitable for the preparation of *Glehnia Radix* polysaccharides for its stronger antioxidant activity.

Keywords: *Glehnia Radix*; polysaccharide; fractional purification; physicochemical properties; antioxidant activity

基金项目: 中央财政公共卫生专项“中药资源普查项目”(编号: Z135080000022); 河北省中医药管理局中医药科研计划项目(编号: 2020269); 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: 2020-02-25

北沙参 (*Glehnia Radix*) 为伞形科植物珊瑚菜 (*Glehnia littoralis* Fr. Schmidt ex Miq.) 的干燥根, 是常用的补阴补气食材, 具有养阴润肺功能^[1]。它是卫生部公布的药食两用资源, 主要分布在河北、山东和内蒙古等

地。北沙参中含有挥发油类、香豆素类、多糖类和聚炔类等化学成分,其中多糖类含量最高,也是其主要活性成分之一,具有免疫调节、抗氧化和抗肿瘤等作用^[2-3]。

乙醇分级沉淀法是制备多糖常用的提取纯化方法,它是将原料热水浸提后逐步提高乙醇的体积浓度来纯化多糖,多糖的得率和组成随着乙醇在醇沉时浓度的不同而变化^[4]。此法优势在于成本低、耗时短,同时又能维持较高得率,且不同乙醇浓度沉淀得到的多糖具有不同的生物活性及应用价值^[5]。实验室^[2,6-7]前期优化了北沙参粗多糖的提取工艺,并发现北沙参多糖具有较好的清除自由基活性。

目前,关于北沙参乙醇分级纯化多糖的研究尚未见报道,为了寻找一种简单高效纯化北沙参多糖组分的方法,更好地探究成分与活性之间的关系。在前期研究^[2,7]的基础上,试验拟以北沙参为研究对象,提取北沙参中多糖成分,并用终浓度为 30%,50%,70%的乙醇对多糖进行分级纯化,制备得到 4 种不同组分的北沙参多糖,并测定 4 种组分多糖的可溶性总糖含量、蛋白含量、黏度、保水性、保油性、单糖组成、抗氧化活性等,以期为北沙参多糖的进一步开发和利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

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;

3,5-二硝基水杨酸:分析纯,天津市光复精细化工研究所;

考马斯亮蓝:分析纯,合肥博美生物科技有限责任公司;

金龙鱼油:益海嘉里食品营销有限公司;

DPPH:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

硫酸亚铁:分析纯,恒诚化工有限公司;

过氧化氢:分析纯,天津政成化学制品有限公司;

苯酚:分析纯,天津市永大化学试剂有限公司;

其他试剂均为分析纯。

1.1.2 主要仪器设备

紫外—可见分光光度计:UV-752 型,上海光谱仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱仪:S-100 型,珀金埃尔默仪器有限公司;

液相色谱仪:LC1220 型,安捷伦科技(中国)有限公司;

液相色谱仪:e2695 型,美国 Alliance 公司;

场发射扫描电镜:S-4800-1 型,株式会社日立制作所;

差热—热重联用热分析仪:STD-2960 型,美国 TA 仪器公司;

旋转黏度计:NDJ-1 型,上海昌吉地质仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 北沙参各分级醇沉多糖制备 取粉碎后的北沙参于 80 ℃ 水浴锅中,用 3 倍体积 80% 乙醇除脂 2 次,干燥备用。称取一定量除脂后的北沙参,用 30 倍体积蒸馏水回流加热提取 2 次,合并提取液,冷却抽滤,旋蒸至黏稠态,加无水乙醇使乙醇终浓度为 30%,冷藏过夜,离心,将沉淀干燥得 30% 组分多糖 GLP-30。离心后的液体旋蒸,回收乙醇至液体黏稠,再加入无水乙醇使乙醇终浓度为 50% 进行醇沉,冰箱过夜,离心后将沉淀干燥得 50% 组分多糖 GLP-50。同样的操作步骤得 GLP-70,对 70% 滤液进行旋蒸回收乙醇,装入透析袋(截留分子量为 3 000 Da),流水、蒸馏水依次透析 24 h,蒸干得剩余组分多糖命名为 GLP-剩余。

1.2.2 多糖可溶性总糖含量、蛋白质含量的测定

(1) 可溶性总糖含量:采用苯酚—硫酸法^[8]。

(2) 蛋白含量:采用考马斯亮蓝法^[9]。

1.2.3 黏度的测定 分别配制浓度为 0.5,1.0 mg/mL 的多糖粗品溶液各 300 mL,室温条件下,旋转黏度计的剪切速率为 60 s⁻¹ 条件下,测定其表观黏度^[10]。

1.2.4 保水性和保油性的测定 参照文献^[11]。

1.2.5 紫外—可见光谱分析 取 2.5 mg 各多糖组分加适量蒸馏水溶解定容于 25 mL 容量瓶,在 200~800 nm 范围内用紫外—可见分光光度计扫描。

1.2.6 红外光谱扫描 取多糖样品与干燥的 KBr 粉末研磨均匀,压成薄片,在 400~4 000 cm⁻¹ 范围内进行红外光谱扫描。

1.2.7 微观形态测定 分别取 4 种多糖通过导电带吸附至样品台上,经喷金处理后,场发射扫描电镜进行分析,加速电压 3.0 kV,分辨率 7.2 mm,分别放大几个倍数,拍摄并记录各多糖的固体形貌。

1.2.8 差示扫描量热分析和热解重量分析 分别称取各多糖组分 2.0 mg,升温速率 10 ℃/min,升温至 800 ℃,进行差示扫描量热分析(DSC)和热解重量分析(TGA)。以温度、失重率(某一温度下失重后样品的实测质量与样品总质量的比值)分别为 X、Y 轴,绘制热重变化曲线^[10]。

1.2.9 单糖组成分析 选取 8 种单糖(甘露糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖)作为标准品。根据文献^[12]略作修改,Eclipse XDB-C₁₈ 色谱柱(4.6 mm × 250 mm,5 μm);检测波长 245 nm;柱温 30 ℃;上样量 20 μL;流速 1 mL/min;流动相为磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L, pH 为 6.85)—乙腈(83:17,体积比);洗脱方式为等度洗脱。

1.2.10 分子量的测定 采用凝胶渗透色谱(GPC)测定

北沙参各多糖的分子量。分别称取 5 mg 标准葡聚糖 $T_{5\,000}$ 、 $T_{50\,000}$ 、 $T_{150\,000}$ 、 $T_{270\,000}$ ，加 5.0 mL 蒸馏水溶解，分别上 G-100 凝胶色谱柱。待样品渗下后，加入 3 倍体积蒸馏水渗下，关闭色谱柱下方管口，加满蒸馏水，装好柱头。打开恒流泵开始洗脱。设置自动部分收集器使每管收集 10 mL。以有效分配系数 K_{av} 为纵坐标， $\lg M$ 为横坐标作标准曲线， K_{av} 根据式(1)计算：

$$K_{av} = \frac{V_e - V_0}{V_t - V_0}, \quad (1)$$

式中：

K_{av} ——有效分配系数；

V_e ——待测样品的洗脱体积，mL；

V_0 ——用蓝色葡聚糖确定凝胶柱的空体积，mL；

V_t ——葡萄糖确定凝胶柱的总柱体积，mL。

配制 5 mL 浓度为 1.0 mg/mL 的多糖溶液，按上述方法加样，装柱头之前收集的体积记作前体积。收集完毕后测量各管体积，苯酚—硫酸法测定各管吸光度，检测样品出峰液分布情况，求出相应峰体积，计算出 K_{av} 。根据标准曲线方程计算出各多糖分子量及分布^[13]。

1.2.11 DPPH 自由基和羟基自由基清除能力的测定

参考文献[14]。

2 结果与分析

2.1 北沙参分级多糖的提取率、可溶性总糖含量、蛋白质含量和黏度

经乙醇分级得到 4 个北沙参多糖 GLP-30、GLP-50、GLP-70 和 GLP-剩余，分别测定各组分多糖的得率、可溶

性总糖含量、蛋白含量、黏度、保水保油性等，结果如表 1 所示。

由表 1 可知：

(1) 随着乙醇体积分数的逐渐增加，北沙参多糖的可溶性总糖含量降低，乙醇分级后的水提取中多糖为主要成分，含有少量蛋白质。GLP-30 中可溶性总糖含量最高，蛋白质含量最少。

(2) 在多糖浓度相同时，分级多糖黏度大小为 GLP-70>GLP-剩余>GLP-50>GLP-30。分级多糖的黏度具有浓度依赖性，随多糖浓度的增大，4 种多糖的黏度均变大。多糖黏度受分子间的聚集、相对分子质量大小和成分组成相互作用影响^[15]。

(3) 保水量大小为：GLP-30>GLP-70>GLP-50>GLP-剩余。保油量反映水胶体的功能特性，代表吸油能力。保油量大小为：GLP-50>GLP-70>GLP-30>GLP-剩余。多糖或蛋白质分子结构中含有许多亲水基团，如羟基、羧基、羧酸根等，这些基团水化后会形成黏稠胶体溶液，从而提高保水性和保油性。同时蛋白质分子间具有三维网状结构，通过大分子链上大量的亲油基团的作用，油分子被包裹在网络结构中，从而达到吸油保油的目的^[16]。GLP-30 具有较好的保水性，说明其结构中含有较多的亲水基团；GLP-50 表现出较好的保油性，可能是由于其蛋白含量相对较高。

2.2 紫外—可见光谱分析

如图 1 所示，4 个组分的紫外扫描图谱相似，均在 280 nm 处有蛋白质的特征吸收峰^[5]，且吸收峰的强弱顺

表 1 北沙参各分级醇沉多糖的得率及理化性质

Table 1 Yields, physicochemical properties of various graded alcohol precipitation polysaccharides

组分	得率/%	可溶性总糖 含量/%	蛋白质 含量/%	黏度/(Pa·s)		保水性/ %	保油性/ %
				0.5 mg/mL	1.0 mg/mL		
GLP-30	5.25	96.36	1.58	2.50	2.60	31.47	12.96
GLP-50	5.43	73.78	7.66	2.19	3.44	12.46	24.71
GLP-70	0.50	57.75	7.44	5.63	6.88	22.14	15.11
GLP-剩余	0.35	62.04	7.68	4.30	4.80	6.70	9.35

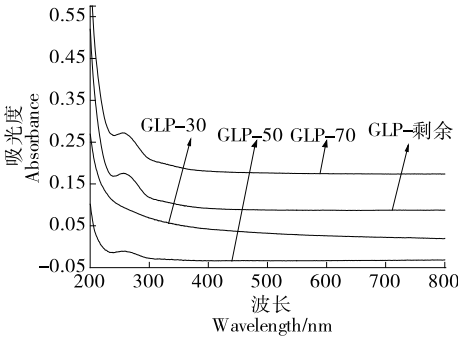


图 1 北沙参各分级醇沉多糖的紫外—可见光谱图

Figure 1 UV-Vis spectra of various graded alcohol precipitation polysaccharides

序为 GLP-剩余>GLP-50>GLP-70>GLP-30，表明这 4 种多糖均含有一定量的蛋白质，与考马斯亮蓝法测定蛋白含量结果基本一致。各样品在 510 nm 波长处均没有吸收，说明多糖中不存在黄酮类物质。

2.3 红外光谱分析

由图 2 可知，各组分多糖红外光谱波峰趋势相似，在 $3\,400\text{ cm}^{-1}$ 附近具有较宽的吸收峰，为 O—H 的伸缩振动。 $2\,930\text{ cm}^{-1}$ 处较弱的吸收峰是由 C—H 的伸缩振动引起的， $1\,637\text{ cm}^{-1}$ 附近出现的可能是 O—H 的弯曲振动吸收峰、C—O 吸收峰或糖醛酸的 COO—非对称伸缩振动吸收峰， $1\,021\text{ cm}^{-1}$ 处为醚键的吸收峰， 849 cm^{-1} 处为 α -糖苷键的吸收峰^[17]，均具有多糖的特征吸收峰。

$1\,419\text{ cm}^{-1}$ 附近较小的吸收峰是 N—H 弯曲振动和 C—N 伸缩振动的酰胺 II 特征峰,表明分级多糖中有少量蛋白与糖结合^[18]。GLP-30 与其他 3 个组分在 $950\sim 1\,450\text{ cm}^{-1}$ 范围内的吸收峰有一定差别,提示 GLP-30 蛋白含量较低,与考马斯亮蓝法测定结果一致。

2.4 扫描电子显微镜分析

从图 3 可以观察到 4 个组分的固体形貌有一定差异性, GLP-30 孔洞较大, 表面高低不平有凸起堆叠。GLP-50 孔洞较少, 表面轻微凸起, 较为光滑。GLP-70 表面有大部分凸起, 呈碎屑状堆积, 颗粒较大, 有较多孔洞, 表面最为粗糙, 可能与其黏度较大有一定关系。GLP-剩余表面光滑, 质地紧致。

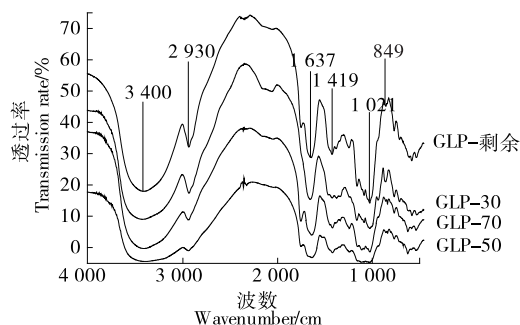


图 2 北沙参各分级醇沉多糖的红外光谱图

Figure 2 Infrared spectra of various graded alcohol precipitation polysaccharides

2.5 差示扫描量热—热重分析

根据差示扫描量热曲线(DSC)可以看出吸热峰和放热峰数量。根据热重曲线(TGA)可以了解北沙参多糖热裂解温度以及发生失重次数,在该区域温度,多糖发生了分解,化学键受到了破坏^[19]。GLP-30、GLP-50、GLP-70、GLP-剩余的差示扫描量热—热重图谱如图 4 所示。由图 4 可知,当加热温度从 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温至 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,4 个组分均首先出现一个吸热峰随后出现一个放热峰^[20]。分析吸热

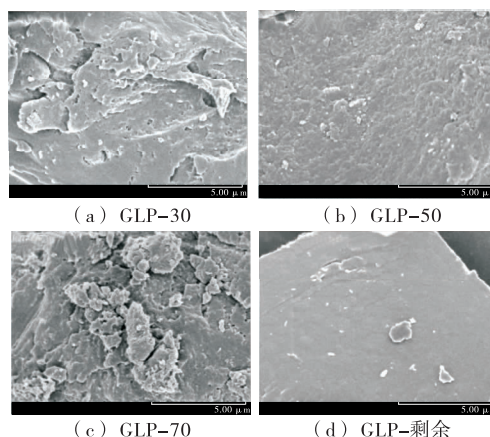


图 3 北沙参各分级醇沉多糖的扫描电镜图

Figure 3 Scanning electron micrographs of various graded alcohol precipitation polysaccharides

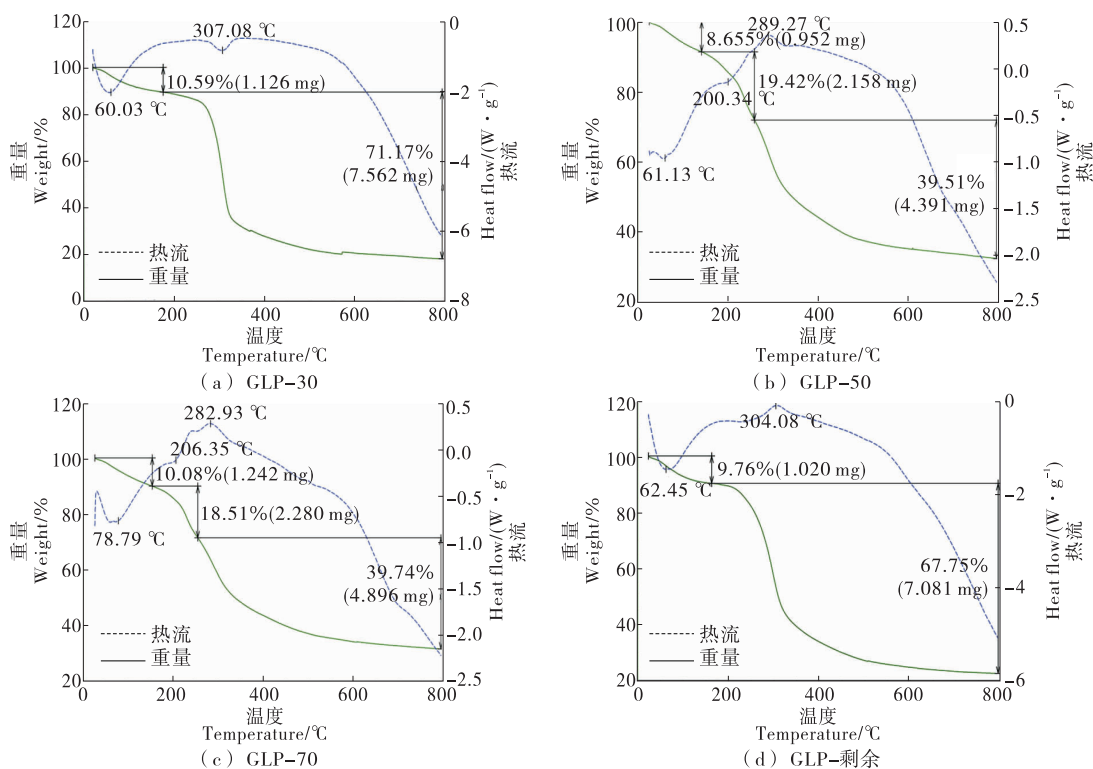


图 4 北沙参各分级醇沉多糖的差示扫描量热—热重图

Figure 4 Differential scanning calorimetry-thermogravimetric map of the various graded alcohol precipitation polysaccharides

峰的出现可能是由于多糖的吸水、熔化或者分解。随着温度的升高,多糖先发生失水过程,GLP-30、GLP-50、GLP-70、GLP-剩余 分别于 307.06, 289.27, 282.93, 304.06 ℃ 发生分解,最后剩余的重量是灰分。4 种组分的差示扫描量热结果相差较大,说明各组分多糖的糖链空间结构差别较大。

2.6 单糖组成

由图 5 和表 2 可知,4 种组分多糖中 GLP-30、GLP-50 主要含有半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖。GLP-70、GLP-剩余 主要含有甘露糖、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖。试验结果与杜宝香等^[21]和任浩娜^[22]所得的结果类似,但未检测到葡萄糖醛酸和鼠李糖,可能是由北沙参的产地差异性和其含量较低导致。

2.7 分子量

测得标准葡聚糖在试验浓度范围内,有效分配系数(K_{av})与 lgM 呈良好的线性关系,回归方程为: $y = 0.409\ 4x + 2.321\ 2, R^2 = 0.998\ 77$ 。

以峰值数据管数的总体积 V 为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制特征图谱,如图 6 所示。根据标准曲线方程,求得多糖样品分子量大小,如表 3 所示。分子量大小为:GLP-30>GLP-50>GLP-70>GLP-剩余,不同浓度的乙醇分级得到的北沙参多糖的分子量不同,随着乙醇浓度的增大分子量逐渐降低。李红法等^[23]研究发现黄芪多糖分子量的变化,与试验结果一致,可能是由于乙醇体积分

数的变化会影响沉淀中多糖的结构。

2.8 抗氧化活性

2.8.1 清除 DPPH 自由基 由图 7 可知,随着糖浓度的增加,GLP-30、GLP-50、GLP-70 和 GLP-剩余 对 DPPH 自由基的清除能力逐渐增强,呈浓度依赖性。半数清除率(IC_{50})值最小,说明其清除自由基能力最强。4 种多糖及 V_c 清除 DPPH 自由基能力的大小为: $V_c(0.005\ mg/mL) > GLP-50(0.123\ mg/mL) > GLP-剩余(0.299\ mg/mL) > GLP-70(0.364\ mg/mL) > GLP-30(1.822\ mg/mL)$,上述结果表明北沙参多糖具有较好的清除 DPPH 自由基的能力。

2.8.2 清除羟基自由基 如图 8 所示,4 种多糖对羟基自由基清除能力均随浓度的增加而增大,并有良好线性关

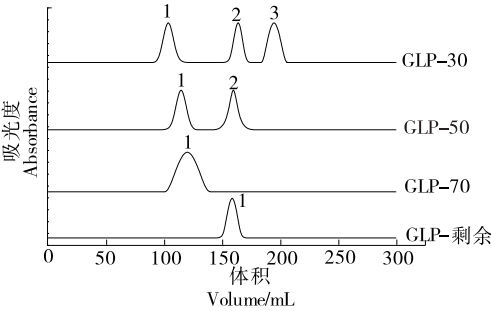
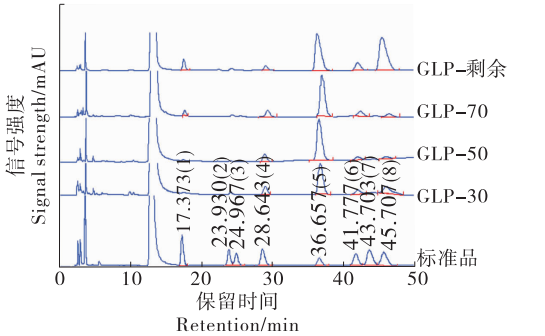


图 6 北沙参各分级醇沉多糖组分的凝胶渗透色谱图
Figure 6 Gel permeation chromatograms of various fractionated alcohol-precipitated polysaccharide components

表 3 北沙参各分级醇沉多糖分子量分布及其大小
Table 3 Molecular weight distribution and size of alcohol-precipitated polysaccharides

多糖样品	分子量/Da		
	峰 1	峰 2	峰 3
GLP-30	6.75×10^5	1.22×10^5	5.08×10^4
GLP-50	4.95×10^5	1.37×10^5	—
GLP-70	4.26×10^5	—	—
GLP-剩余	1.41×10^5	—	—



1. Man 甘露糖 2. Rha 鼠李糖 3. GlcUA 葡萄糖醛酸
4. GalUA 半乳糖醛酸 5. Glc 葡萄糖 6. Gal 半乳糖 7. Xyl 木糖 8. Ara 阿拉伯糖

图 5 北沙参各分级醇沉多糖的高效液相色谱图
Figure 5 High-performance liquid chromatograms of graded alcohol precipitation polysaccharides

表 2 北沙参各分级醇沉多糖的单糖组成和含量比
Table 2 Monosaccharide composition and content ratio of various graded alcohol precipitation polysaccharides

多糖样品	甘露糖	半乳糖醛酸	葡萄糖	半乳糖	阿拉伯糖
GLP-30	—	1.65	6.47	1.00	2.67
GLP-50	—	2.03	14.35	1.00	0.86
GLP-70	0.36	0.95	7.21	1.00	0.63
GLP-剩余	0.62	0.43	5.23	1.00	5.87

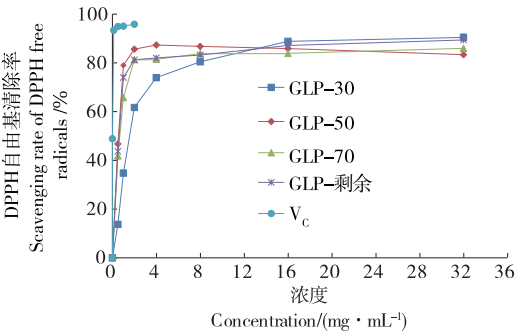


图 7 北沙参各分级醇沉多糖对 DPPH 自由基清除作用
Figure 7 Scavenging effects of alcohol-precipitated polysaccharides from *Glehnia Radix* on DPPH free radicals

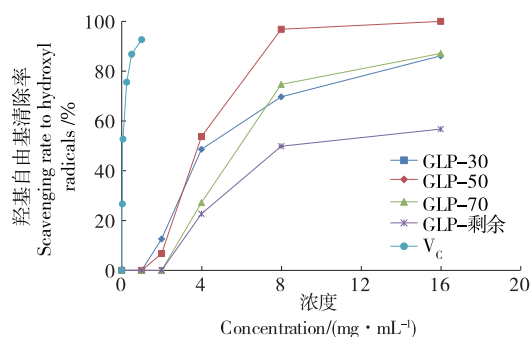


图 8 北沙参各分级醇沉多糖对羟基自由基清除作用
Figure 8 Scavenging effects of alcohol-precipitated polysaccharides from various grades of *Glehnia Radix* on hydroxyl radical

系。清除羟基自由基能力大小为 V_c (0.072 mg/mL) > GLP-50 (3.809 mg/mL) > GLP-30 (5.105 mg/mL) > GLP-70 (6.151 mg/mL) > GLP-剩余 (10.529 mg/mL)。4 种多糖均低于阳性对照 V_c 的 IC_{50} 值。上述结果表明, 北沙参多糖具有一定的羟基自由基清除能力, 与周红英等^[1]的研究一致。

多糖抗氧化的构效关系会受到分子量、蛋白含量、糖醛酸含量、活性羟基数量、分子构象等方面的影响。王佳等^[5]报道虎杖、麻黄和甘草多糖的抗氧化活性与糖醛酸含量呈正相关。许海棠等^[24]报道山豆根多糖的抗氧化活性与其纯度, 以及多酚和蛋白含量等有关。试验中 GLP-50 也表现出类似结果, 因此分析半乳糖醛酸的含量较高是其抗氧化活性高的主要原因, 同时也受蛋白含量影响。另外, GLP-50 清除 DPPH 自由基的 IC_{50} 值为 0.123 mg/mL , 对比实验室前期制备的北沙参粗多糖的清除 DPPH 自由基的 IC_{50} 值 (1.99 mg/mL)^[7], 经乙醇分级沉淀后的多糖清除 DPPH 自由基效果明显提高。说明乙醇分级沉淀后的北沙参多糖在清除 DPPH 自由基功效方面具有良好利用价值。

3 结论

试验采用一种简单、高效的方法——乙醇分级沉淀法纯化北沙参多糖, 得到 GLP-30、GLP-50、GLP-70 和 GLP-剩余 4 个组分, 经研究显示, 不同浓度乙醇沉淀会影响北沙参多糖的得率、单糖组成、蛋白含量、分子量、黏度等理化性质, 从而改变多糖的生物活性, 各多糖组分分子量随乙醇浓度的增加而逐渐降低; GLP-50 表现出最高得率和最好的抗氧化活性, 其半乳糖醛酸含量最高并且含有较多的蛋白质。因此, 推测半乳糖醛酸的含量较高是北沙参抗氧化活性高的主要原因, 同时也受蛋白含量影响。综上, 50% 乙醇更适宜沉淀制备北沙参多糖, 且所得多糖的抗氧化性比北沙参粗多糖的活性较强。后续研究可进一步深入解析北沙参多糖结构并探索其体内抗氧化活性功能, 为北沙参多糖的构效关系研究和产品开发提供参考依据。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘伟, 李中燕, 田艳, 等. 北沙参的化学成分及药理作用研究进展[J]. 国际药学研究杂志, 2013, 40(3): 291-294.
- [4] 闫巧娟, 韩鲁佳, 江正强, 等. 黄芪多糖的分子量分布[J]. 食品科学, 2004, 25(8): 27-30.
- [5] 王佳, 李进霞, 张慧芝, 等. 虎杖多糖乙醇分级纯化及其抗氧化性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 98-101.
- [6] 景永帅, 张丹参, 张瑞娟, 等. 北沙参多糖复合酶提取工艺及理化性质研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 191-197.
- [7] 景永帅, 苏蕾, 韩钰, 等. 北沙参多糖的提取工艺、理化性质及生物活性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 152-157.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 赵谋明, 邹林武, 游丽君. 提取方法对香菇多糖性质的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(10): 26-33.
- [11] WANG Lei, ZHANG Bin, XIAO Jie, et al. Physicochemical, functional, and biological properties of water-soluble polysaccharides from *Rosa roxburghii* Tratt fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 249: 127-135.
- [12] 周彦强, 吴光斌, 陈发河. PMP 柱前衍生化 HPLC 法测定黄秋葵多糖的单糖组成[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 266-271.
- [13] 景永帅, 张丹参, 吴兰芳, 等. 远志多糖的分离纯化、结构特征及生物活性[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 126-131.
- [14] 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.
- [15] WANG Zhao-mei, CHEUNG Yi-ching, LEUNG Po-hong, et al. Ultrasonic treatment for improved solution properties of a high-molecular weight exopolysaccharide produced by a medicinal fungus[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(4): 517-522.
- [16] 朱秀清, 梁雪华, 李杨, 等. 食品添加剂对低温脱脂豆粉保水保油性的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(9): 346-350.
- [17] 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.
- [18] 王超, 杨晰茗, 赵起越, 等. 高粱乌米多糖精制及抗氧化作用研究[J]. 食品科技, 2019, 44(7): 235-239.

(下转第 226 页)

2020, 102: 105615.

- [41] AHMED A B A, TAHA R M, MOHAJER S, et al. Preparation, properties and biological applications of water soluble chitin oligosaccharides from marine organisms[J]. Russian Journal of Marine Biology, 2012, 38(4): 351-358.
- [42] RAMIREZ-COUTIRIO L, DEL CARMEN MARIN-CERVANTES M, HUERTA S, et al. Enzymatic hydrolysis of chitin in the production of oligosaccharides using *Lecanicillium fungicola* chitinases[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(5): 1106-1110.
- [43] HUSSON E, HADAD C, HUET G, et al. The effect of room temperature ionic liquids on the selective biocatalytic hydrolysis of chitin via sequential or simultaneous strategies[J]. Green Chemistry, 2017, 19(17): 4122-4131.

- [44] VILLA-LERMA G, GONZÁLEZ-MÁRQUEZ H, GIMENO M, et al. Ultrasonication and steam-explosion as chitin pretreatments for chitin oligosaccharide production by chitinases of *Lecanicillium lecanii* [J]. Bioresource Technology, 2013, 146: 794-798.
- [45] ZHANG A-lei, WEI Guo-guang, MO Xiao-fang, et al. Enzymatic hydrolysis of chitin pretreated by bacterial fermentation to obtain pure *N*-acetyl-*D*-glucosamine [J]. Green Chemistry, 2018, 20(10): 2320-2327.
- [46] MARGOUTIDIS G, PARSONS V H, BOTTARO C S, et al. Mechanochemical amorphization of α -chitin and conversion into oligomers of *N*-acetyl-*D*-glucosamine [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(2): 1662-1669.

(上接第 139 页)

裂纹在背光透射照明下不易检出的缺陷。结果表明, 试验算法对鸡蛋网状裂纹、线形裂纹图像均能检测出裂纹, 并且裂纹边缘清晰, 明显的线形裂纹、网状裂纹正确检测率分别为 96.4%, 94.7%, 非明显的线形裂纹、网状裂纹正确检测率分别为 89.2%, 87.5%, 高于其他算法。试验只针对常见的鸡蛋裂纹进行识别, 后续将对复杂、多变、无规则的鸡蛋裂纹图像进行识别。

参考文献

- [1] 秦炎炎, 王树才, 李赛飞. 基于声波信号递归图的鸡蛋裂纹检测[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(2): 108-114.
- [2] 邢志中, 张海东, 王孟, 等. 基于计算机视觉和神经网络的鸡蛋新鲜度检测[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(11): 160-163.

- [3] 魏萱, 何金成, 郑书河, 等. 基于图像纹理特征的土鸡蛋微裂纹无损检测[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(6): 716-720.
- [4] 张超, 卢伟, 丁天华, 等. 基于多尺度小波变换的鸡蛋散黄检测方法研究[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(7): 709-713.
- [5] 房盟盟, 丁佳兴, 崔腾飞, 等. 基于高光谱成像技术的鸡蛋哈氏单位快速无损检测[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 245-249.
- [6] 宋超, 秦永彬, 许道云. 基于 K-means 与 SVM 的鸡蛋特征检测[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(2): 382-386.
- [7] 郁志宏, 王春光, 张晓芳, 等. 改进的粒子群神经网络检测种蛋成活性[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(2): 185-187.
- [8] 徐一鸣, 彭勇, 郑楚红, 等. 基于改进粒子群算法的 WSNs 节点能量均衡覆盖策略[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(2): 29-32.
- [9] 郭红山, 张慧宁. 基于萤火虫算法的农业遥感图像增强研究[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(6): 1076-1081.

(上接第 143 页)

- [10] 刘硕, 王礼群, 张欣怡, 等. 抗坏血酸钙和 ϵ -聚赖氨酸对鲜切甘薯保鲜护色效果的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(7): 132-136, 142.
- [11] 刘开华, 邢淑娟. 涂膜保鲜剂中添加茶多酚对黄花梨贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 213-215.
- [12] 祝美云, 李梅, 朱世明. 壳聚糖复合保鲜剂对鲜切李子品质的影响及其配方筛选[J]. 浙江农业学报, 2009, 21(4): 375-378.
- [13] 张鹏, 李天元, 李江阔, 等. 微环境气体调控对精准相温贮藏期间柿果保鲜效果的影响[J]. 中国食品学报, 2018, 18(3): 180-187.

- [14] 王艳颖, 胡文忠, 田密霞, 等. 贮前氯化钙处理对李果实冷害及生理生化的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(9): 310-313, 387.
- [15] 郝义, 韩英群, 郭丹, 等. 聪明鲜 TM 处理对美丽李采后生理和贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2011(1): 139-141.
- [16] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013: 21-40.

(上接第 180 页)

- [19] LEE Hee-hwan, LEE Jong-seok, CHO Jae-yeol, et al. Structural characteristics of immunostimulating polysaccharides from *Lentinus edodes* [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2009, 19(5): 455-461.
- [20] 李诗雅, 韩青, 苏亚文, 等. 菲律宾蛤仔蒸煮液分级醇沉多糖的理化性质和抗氧化活性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(5): 110-117.
- [21] 杜宝香, 相美容, 付业佩, 等. 北沙参多糖的分离、纯化及其体外免疫活性考察[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(11): 27-31.

- [22] 任浩娜. 中药北沙参多糖与单糖组成和含量测定方法研究[D]. 沈阳: 沈阳药科大学, 2008: 28-29.
- [23] 李红法, 郭松波, 满淑丽, 等. 乙醇分级沉淀提取黄芪多糖及其理化性质和抗氧化活性研究[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(11): 66-70.
- [24] 许海棠, 廖华珍, 赵彦芝, 等. 响应面法优化山豆根多糖提取工艺及其分级醇沉组分的抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 157-162.