红芪多糖 HPS4-1A 的化学结构特征研究及分子构象初步分析

党子龙，刘小花，赵安娜，梁建娣，梁 瑾，刘子亨，封士兰*
兰州大学药学院，甘肃 兰州 730000

摘 要：目的 研究红芪多糖 HPS4-1A 的化学结构特征，并初步分析其构象。**方法** 红芪经水提醇沉法提取、Sevage 法脱蛋白、H_2O_2 脱色素、Sephadex G-200 色谱柱分离纯化得到均一的红芪多糖 HPS4-1A。以 GC 法、高效液相凝胶色谱（HPGC）法、凝胶渗透色谱-多角度激光散射仪联用（GPC-MALLS）法、元素分析、苯酚硫酸法、Bradford 法研究其理化性质；以 GPC-MALLS 法对其构象进行初步分析。采用甲基化、部分酸水解、以及 NMR 研究其连接方式、主链和支链结构及分支点状况。**结果** HPS4-1A 的绝对分子质量为 7.386×10^4，相对分子质量 6.68×10^5 以上；由鼠李糖、阿拉伯糖、葡萄糖、半乳糖组成，其摩尔比为 1∶2∶1∶2，主链骨架由 1, 5、1, 3, 5 连接的 α-*L*-呋喃阿拉伯糖和 1, 6、1, 2, 6 连接的 α-*D*-吡喃半乳糖组成，侧链分支点位于阿拉伯糖的 3 位与半乳糖的 2 位。侧链分支由 1, 4、1, 4, 6-α-*D*-吡喃葡萄糖，1, 2、1, 2, 4-α-*L*-呋喃鼠李糖组成。主链末端连接主要是阿拉伯糖，并且连接在 1, 5 连接的阿拉伯糖的 5 位。侧链末端连接主要是葡萄糖，还有少量的阿拉伯糖。**结论** HPS4-1A 为一种新的中性红芪杂多糖，其构象为无规线团状，并且相对分子质量分布呈单分散性。

关键词：红芪；中性多糖；化学结构；构象；单糖组成
中图分类号：R284.18 **文献标志码：**A **文章编号：**0253 - 2670(2013)02 - 0141 - 06
DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2013.02.005

Chemical structural features and primary molecular conformation of polysaccharide HPS4-1A from *Hedysarum polybotrys*

DANG Zi-long, LIU Xiao-hua, ZHAO An-na, LIANG Jian-di, LIANG Jin, LIU Zi-heng, FENG Shi-lan
School of Pharmacy, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Objective To study the chemical structural features and conformation of polysaccharide HPS4-1A from *Hedysarum polybotrys*. **Methods** A fraction of water-soluble neutral polysaccharide was obtained from *H. polybotrys* by aqueous extraction followed by precipitation with ethanol. The homogeneous polysaccharide named HPS4-1A was obtained after treated with Savage method and H_2O_2, and purified with Sephadex G-200 gel filtration chromatography. Then GC, HPGC, GPC-MALLS, element alanalyser, phenol sulfuric acid method, and Bradford method were used to study the physicochemical property of HPS4-1A; The conformation was primarily analyzed with GPC-MALLS method. The connection, main chain and branched-chain structures, and the condition of branching point were studied by methylation, partial acid hydrolysis, and NMR method. **Results** The absolute and relative molecular weights of HPS4-1A were 7.386×10^4 and above 6.68×10^5; HPS4-1A was a heteropolysaccharide and consisted of *L*-rhamnose, *L*-arabinose, *D*-glucose, and *D*-galactose (1∶2∶1∶2). HPS4-1A proved to be a neutral sugar, with 1, 6- and 1, 2, 6-α-*D*-galactopyranosyl and 1, 5- and 1, 3, 5-α-*L*-arabinofuranosyl residues in backbone, and 1, 4- and 1, 4, 6-α-*D*-glucopyranosyl and 1, 2- and 1, 2, 4-α-*L*-rhamnofuranosyl residues in branches. Arabinose mainly connected the end of backbone, and glucose and a small quantity of arabinose mainly connected the end of branches. **Conclusion** HPS4-1A is a new neutral heteropolysaccharide from *H. polybotrys*. HPS4-1A has a random coil state conformation with monodisperse mass distribution.

Key words: *Hedysarum polybotrys* Hand. -Mazz; neutral heteropolysaccharide; chemical structure; conformation; monosaccharide composition

红芪为豆科植物多序岩黄芪 *Hedysarum polybotrys* Hand. -Mazz 的干燥根，具有补气升阳、固表止汗、利水消肿、生津养血、行滞通痹、托毒排脓、敛疮生肌的功效[1]。红芪中含有多种不同活

收稿日期：2012-11-07
基金项目：甘肃省中小企业创新基金计划资助（0911WCCA005）
作者简介：党子龙（1988—），男，在读硕士研究生。
*通信作者 封士兰 E-mail: fengshl@lzu.edu.cn

性组分的多糖，其药理作用也不相同。文献报道红芪多糖具有降血糖[2]、抗氧化[3]、抗肿瘤[4]、免疫调节[4]以及保肝[5]等药理作用。本课题组提取纯化得到的多糖 HPS4 经前期研究表明具有抗辐射、抗肿瘤以及抗氧化的药理作用，本实验分析了从 HPS4 中分离纯化得到的一种新的杂多糖组分红芪多糖-1A（HPS4-1A）的结构。

1 材料与仪器

BP211D 型与 BS224S 型电子天平（德国 Sartorius 公司）；UV—1700 紫外可见分光光度计（日本岛津公司）；DHG—9075A 型电热恒温鼓风干燥箱（上海一恒）；KQ—3200DE 超声波仪器（江苏昆山公司）；BS—100N 自动部分收集器，BT100N 数显恒流泵（上海青浦沪西仪器厂）。CR22GⅡ离心机（日本日立）；Freezone 6PWS 型真空冷冻干燥仪（美国 LABCONCO）；透析袋（截留相对分子质量 3 500，美国科技发展公司）；multi EA 4000 元素分析仪（德国 Elementar Analysensysteme 公司）；Dawn Heleos Ⅱ型十八角度激光散射仪（美国怀雅特技术公司）；Waters 600 高效液相色谱仪（美国 Waters 公司）；Ultrahydrogel^{TM} 1000、500 色谱柱（美国 Waters 公司）；GC 2014 型气相色谱仪（日本岛津公司）；QP2010 GC-MS 仪（日本岛津公司）；OV—101 毛细管色谱柱（兰州中科安泰分析科技有限责任公司）；600 MHz Inova 600 NB 核磁共振波谱仪（德国 Bruker 公司）。

标准单糖：鼠李糖（批号 111683-200401）、阿拉伯糖（Ala，批号 111506-200001）、木糖（Xyl，批号 111508-200404）、甘露糖（Man，批号 140651-200602）、葡萄糖（Glc，批号 110833-200904）、半乳糖（Gal，批号 100226-201105）、葡萄糖醛酸（批号 140648-200602）、半乳糖醛酸（批号 111646-200301）均购于中国食品药品检定研究院；右旋糖酐（dextran）对照品（668 000、410 000、273 000、148 000、48 600、23 800、11 600、5 200）批号为 SDKC-600-200903，购于美国 PSS 公司。

红芪样品购自甘肃武都，经兰州大学药学院马志刚教授鉴定为多序岩黄芪 *Hedysarum polybotrys* Hand. -Mazz. 的根。干燥、粉碎后备用。

2 方法

2.1 提取与分离

粉碎的红芪（4.0 kg）以 10 倍量的沸水提取 3 次，每次 3 h。水提取液减压浓缩至生药质量浓度 1 mg/mL，加入 95%乙醇至终体积分数为 70%。所得沉淀复溶于水中（质量分数 1%～3%），加入 95%乙醇至终体积分数为 40%，取上清液，浓缩后得到红芪粗多糖 4（HPS4）。HPS4 经 Sevage 法脱蛋白[6]，H_2O_2 除色素[7]后再醇沉分级，得到 40%多糖部位 HPS4-1 和 70%多糖部位 HPS4-2。HPS4-1 经 Sephadex G-200 柱色谱，以 0.05 mol/L pH5.2 的 NaAc-HAc 缓冲液洗脱得到 3 个均一组分：HPS4-1A、HPS4-1B、HPS4-1C。HPS4-2 经 DEAE-52 柱色谱，以 0.1～1.0 mol/L 的 NaCl 梯度洗脱得到 1 个均一组分 HPS4-2A。

2.2 HPS4-1A 质量分数、相对分子质量、绝对分子质量、分子构象及分子质量分布

采用高效凝胶色谱法（HPGPC）对 HPS4-1A 进行质量分数鉴定及相对分子质量的测定，流动相为蒸馏水。采用凝胶渗透色谱与光散射仪（GPC-MALLS）联用技术测定其绝对分子质量、分子构象及相对分子质量分布，流动相为 0.1 mol/L $NaNO_3$ 与质量分数为 0.02% NaN_3 的混合溶液。色谱柱为凝胶渗透色谱柱 Ultrahydrogel^{TM} 1 000、500 串联，体积流量 0.8 mL/min，柱温 30 ℃，示差折光检测器温度为 35 ℃。相对分子质量测定时将相对分子质量分别为 5 200、11 600、23 800、48 600、148 000、273 000、410 000、668 000 的右旋糖酐标准品用流动相配成质量浓度为 0.5 mg/mL 的水溶液，按相对分子质量由小到大顺序依次分别进样，测定保留时间（t）。以 t 对相对分子质量对数（lgMw）绘制标准曲线，计算 HPS4-1A 的相对分子质量。

2.3 多糖理化性质的测定

总糖质量分数的测定用苯酚-硫酸法[8]；蛋白质质量分数的测定用 Bradford 法[9]；糖醛酸的鉴定与质量分数测定用气相色谱法[8]和硫酸-咔唑法[8]；多糖中碳（C）、氢（H）、氮（N）、硫（S）元素分析采用元素分析仪进行分析。

2.4 单糖组成分析

取 10 mg HPS4-1A，加 2.0 mL 2.0 mol/L 三氟乙酸（TFA）置于特弗伦管中，封管后 120 ℃水解 3 h，冷却后于 60 ℃减压旋蒸除去 TFA，加入 1.5 mL 甲醇溶解，减压蒸干，重复 3 次，除尽 TFA。向已水解的样品中加入 10 mg 盐酸羟胺、7 mg 内标肌醇六乙酰酯、0.5 mL 吡啶，置烘箱中 90 ℃恒温 30 min。取出后冷至室温，加入 0.5 mL 醋酸酐，在 90 ℃下继续反应 30 min（乙酰化）。反应产物减压蒸干，溶于 1.0 mL 氯仿中，进行 GC 分析[10]。

气相色谱条件：色谱柱为 OV-101 柱；进样口温度为 210 ℃；检测器温度为 260 ℃；载气压力 0.5 mPa；程序升温：起始温度 175 ℃，以 15 ℃/min 的速度升至 225 ℃，保持 5 min，然后以 5 ℃/min 的速度升至 250 ℃，保持 1.5 min。

2.5 甲基化分析

HPS4-1A 5 mg 充分干燥，溶于 DMSO，用改良的 Hakomori 法[8]甲基化，经 IR 分析无羟基后，水解，还原，乙酰化后进行 GC-MS 分析。

气相色谱条件：柱温 175 ℃；载气为氦气；进样口温度 210 ℃；载气体积流量 1.00 mL/min；进样模式为分流；分流比 50.0；进样体积 1 μL。

质谱条件：离子源温度 200 ℃；接口温度 210 ℃；溶剂延迟 4 min；阈值 1 000；起始时间为 4.00 min；结束时间为 14.83 min；采集方式为 Scan；质谱检测范围（m/z）为 33.00～630.00。

2.6 部分酸水解分析[8]

取 HPS4-1A（50 mg）用 0.1 mol/L TFA 100 ℃水解 1 h，冷却至室温后于 60 ℃减压旋蒸除去 TFA，加入 1.5 mL 甲醇溶解，减压蒸干，重复 3 次，除尽 TFA。用蒸馏水溶解，透析（截留相对分子质量 3 500）。袋内部分经 Sephadex G-200 柱色谱纯化后得到次级多糖组分 HPS4-1A-H；袋外部分经 Sephadex-25 柱色谱纯化得一低聚糖 HPS4-1A-L 和混合的单糖组分。然后按“2.4”项方法进行单糖组成分析。

2.7 NMR 分析

精密称取充分干燥的 HPS4-1A 15 mg，溶于 0.5 mL 重水中，冷冻干燥，如此重复用重水交换 3 次，再溶于 0.5 mL 重水后，用微孔滤膜（0.45 μm）滤过后在 Bruker DRX—600 核磁共振光谱仪上进行 ^{1}H-HMR 和 ^{13}C-NMR 分析。

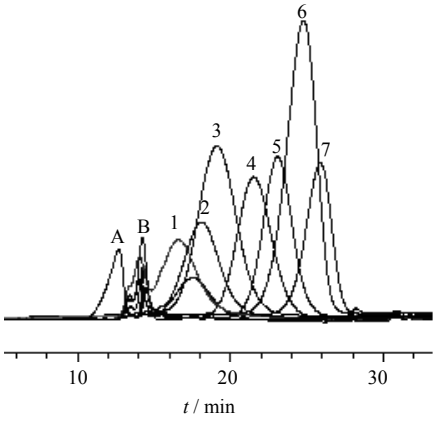
3 结果

3.1 HPS4-1 的分离纯化

HPS4-1 经 Sephadex G-200 排阻色谱分离，HPS4-2 经 DEAE-52 分离得白色絮状红芪多糖 HPS4-1A、HPS4-1B、HPS4-1C，以及 HPS4-2A；得率分别为 0.4%、0.6%、0.3%、10%。经过 HPGPC 检测，各多糖均呈单一对称峰（峰面积归一化法计算质量分数均在 98%以上，其中 HPS4-2A 质量分数达到 99.64%），说明以上 4 组分都是均一多糖。

3.2 HPS4-1A 相对分子质量、绝对分子质量、分子构象及分子质量分布

以右旋糖酐系列标准葡聚糖的保留时间（t）为横坐标和相对分子质量的对数（lgMw）为纵坐标计算得回归方程为 lgMw＝s－3.20e－001t^1＋2.39e－003t^2，r^2＝0.998 1。如图 1 所示，色谱峰 A 为 HPS4-1A 的色谱峰，HPS4-1A 的相对分子质量大于 6.68×10^5。



A-HPS4-1A B-对照品中的杂质 1～7-右旋糖酐对照品（相对分子质量从大到小）

A-HPS4-1A B-impurities in reference substance 1—7-dextran reference substance (relative molecular weight is in a decreasing order)

图 1 HPS4-1A 及右旋糖酐对照品 HPLC 图

Fig. 1 HPLC chromatogram of HPS4-1A and dextran reference substance

采用示差折光检测器和激光检测器分别记录供试品质量浓度和供试品在不同角度的光散射强度；dn/dc 值为 0.174，通过多角度激光散射仪自带 ASTRA V 软件计算得到 HPS4-1A 的绝对分子质量为 7.386×10^4、分布指数 $d=\overline{M}w/\overline{M}n=1.057$；以旋转均方根半径对摩尔质量作图（图 2）得到的斜率为 0.45，说

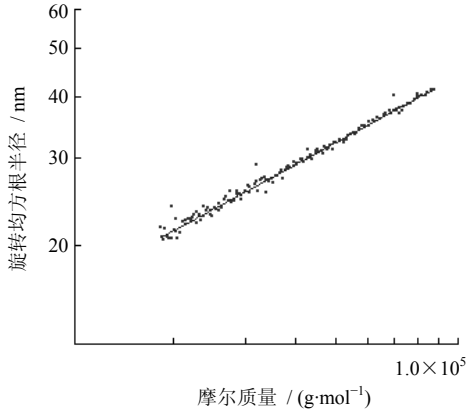


图 2 HPS4-1A 均方根旋转半径对摩尔质量图

Fig. 2 Root mean square turning radius to molar mass of HPS4-1A

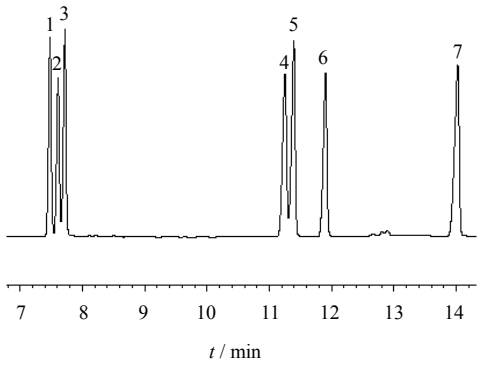
明 HPS4-1A 的构象为无规则线团；分布指数接近 1.00，说明 HPS4-1A 相对分子质量分布呈单分散性，即表明摩尔质量分布范围较集中，分子大小较均一。

3.3　多糖理化性质

HPS4-1A 的总糖质量分数为 99.32%，蛋白质质量分数为 0.00%，糖醛酸测定呈阴性，即不含有糖醛酸。元素分析 C、H、O、S、N 的质量分数分别为 38.81%、6.92%、54.27%、0.00%、0.00%，经计算得 C、H、O 的摩尔比约为 1∶2∶1，符合多糖的元素及组成比例，此结果也证明 HPS4-1A 不含硫酸基和蛋白质。由于 HPS4-1A 不含氮元素，说明不含氨基；并且不含糖醛酸，说明 HPS4-1A 为中性多糖。

3.4　单糖组成分析

HPS4-1A 经气相色谱分析后，用面积归一化法得 HPS4-1A 的单糖组成及其比例为 Rha-Ara-Glc-Gal（1∶2∶1∶2）。色谱图见图 3 和图 4。



1-鼠李糖　2-阿拉伯糖　3-木糖　4-甘露糖　5-葡萄糖　6-半乳糖　7-内标，下图同

1-Rha　2-Ara　3-Xyl　4-Man　5-Glc　6-Gal　7-internal standard, same as below

图 3　混合单糖对照品的气相色谱图

Fig. 3　GC chromatogram of mixed monose reference substances

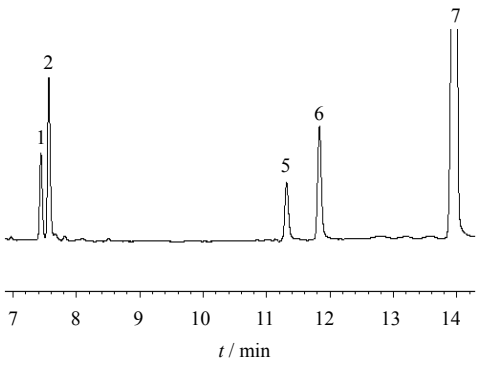


图 4　HPS4-1A 的气相色谱图

Fig. 4　GC chromatogram of HPS4-1A

3.5　甲基化分析

经改良的 Hakomori 甲基化后结果见表 1。

表 1　HPS4-1A 甲基化结果

Table 1　Methylating results of HPS4-1A

部分甲基化的糖基	摩尔比	糖基连接方式
2, 3, 5-tri-*O*-Me-Araf	1.47	Araf (1→
2, 3-di-*O*-Me-Araf	24.09	→5) Araf (1→
2-*O*-Me-Araf	7.63	→3, 5) Araf (1→
3, 4-di-*O*-Me-Rha	5.22	→2) Rhap (1→
3-*O*-Me-Rha	2.78	→2, 4) Rhap (1→
2, 3, 4, 6-tetra-*O*-Me-Glc	4.67	Glcp (1→
2, 3, 6-tri-*O*-Me-Glc	24.84	→4) Glcp (1→
2, 3-di-*O*-Me-Glc	2.67	→4, 6) Glcp (1→
2, 3, 4-tri-*O*-Me-Gal	16.02	→6) Galp (1→
3, 4-di-*O*-Me-Gal	9.35	→2, 6) Galp (1→

3.6　部分酸水解结果分析

HPS4-1A 部分酸水解后经气相色谱对其单糖组成分析知，HPS4-1A-L 的单糖组成及其比例为 Rha-Glc-Ara（1.0∶1.1∶0.2）；HPS4-1A-H 的单糖组成及其比例为 Ara-Gal（2.6∶2.7≈1∶1）。从部分酸水解结果可知主链骨架由阿拉伯糖和半乳糖组成，支链主要由葡萄糖和鼠李糖组成，也有少量的阿拉伯糖存在于支链中。

3.7　NMR 分析

HPS4-1A 的 NMR 分析后数据见表 2。参考文献报道的 α-*L*-Araf 异头碳的化学位移位于 δ 113.4～107.6；α-*L*-Rhap 异头碳的化学位移位于 δ 101.0～100.0；α-*D*-Glcp 异头碳的化学位移位于 δ 102.0～100.0；α-*D*-Galp 异头碳的化学位移位于 δ 102.0～100.0。因此可以确定 HPS4-1A 中的阿拉伯糖为 α-*L*-Araf；鼠李糖为 α-*L*-Rhap；葡萄糖为 α-*D*-Glcp；半乳糖为 α-*D*-Galp；由碳谱和氢谱的数据推知多糖 HPS4-1A 的主要连接方式与甲基化的结果一致。表 1 中鼠李糖、葡萄糖连接方式的摩尔比总和与阿拉伯糖、半乳糖连接方式的摩尔比总和接近 2∶3，虽然与气相色谱的结论（1∶1）有偏差，偏差的原因可能是由于在甲基化过程中超声使支链断裂造成，但足以说明 HPS4-1A 为多分支的多糖。

4　讨论

由于相对分子质量和绝对分子质量测定时溶剂系统不同，所以多糖伸展和皱缩的程度不同[22]。多糖在水中呈伸展状态，在盐溶液中呈皱缩状态[23]，

表 2 HPS4-1A 的 ^{1}H-NMR 和 ^{13}C-NMR 化学位移

Table 2 ^{1}H-NMR and ^{13}C-NMR chemical shifts of HPS4-1A

	多糖残基	C-1/H-1	C-2/H-2	C-3/H-3	C-4/H-4	C-5/H-5	C-6/H-6	参考文献
A	α-*L*-Araf(1→	113.4/—	84.2/4.20	76.8/3.95	86.5/4.00	64.9/3.82, 3.86		11-12
B	→5)α-*L*-Araf(1→	107.6/5.06	81.3/4.20	75.6/4.05	86.5/4.27	69.6/3.79, 3.91		13-14
C	→3, 5)α-*L*-Araf(1→	108.5/5.04	80.7/4.27	84.2/4.04	81.2/4.45	72.8/3.82, 3.96		13-14
D	→2)α-*L*-Rhap(1→	101.0/—	78.6/4.10	72.7/3.87	76.0/3.41	70.2/3.74	20.73/1.11	13,15
E	→2, 4)α-*L*-Rhap(1→	101.0/—	79.2/4.20	72.8/3.92	84.2/3.82	72.8/3.47	21.0/1.12	13,16-17
F	α-*D*-Glcp (1→	102.0/4.87	74.3/3.61	76.0/3.96	73.6/3.87	75.6/3.74	72.7/3.44	17-18
G	→4) α-*D*-Glcp (1→	102.6/5.06	74.3/3.60	76.0/3.84	79.3/3.50	73.7/3.63	65.0/3.63, 3.68	19-20
H	→4, 6) α-*D*-Glcp (1→	101.8/4.97	74.3/3.61	75.6/3.70	78.6/3.41	72.8/3.68	76.0/4.00	19-20
I	→6) α-*D*-Galp (1→	101.8/5.04	72.0/3.91	72.8/4.10	71.0/3.87	72.7/4.27	69.6/3.79, 4.00	19-21
K	→2, 6) α-*D*-Galp (1→	102.0/5.06	80.7/3.87	73.7/3.10	72.8/3.92	72.0/4.30	70.2/3.82, 4.05	21-23

“－”表示图谱中未解析出此位置的归属

“—” indicates that the data was not assigned

与前者相比后者的分子半径变小，在通过凝胶色谱柱时后出峰，而前者先出峰，从而导致相对分子质量测定结果不一致。另外，相对分子质量测定时使用的是葡聚糖的对照品，而 HPS4-1A 是由 4 种单糖组成的杂多糖，两者结构差异较大，推测 HPS4-1A 的分支较多，分子半径较大，此结论在甲基化和部分酸水解的结果中也得到了印证。

综上分析可知 HPS4-1A 主链骨架由 1, 5、1, 3, 5-α-*L*-Araf 和 1, 6、1, 2, 6-α-*D*-Galp 组成，侧链分支点位于阿拉伯糖的 3 位与半乳糖的 2 位。侧链分支由 1, 4、1, 4, 6-α-*D*-Glcp，1, 2、1, 2, 4-α-*L*-Rhap 组成。主链非还原末端连接主要是阿拉伯糖，并且是连接在 1, 5 连接的阿拉伯糖的 5 位[13-14]。侧链非还原末端连接主要是葡萄糖，可能还有少量的阿拉伯糖。HPS4-1A 为中性杂多糖，其构象为无规线团状，并且具有单分散性，即表明摩尔质量分布范围较集中，分子大小较均一。

体外实验表明，该多糖大剂量具有抗辐射、抗肿瘤以及及抗氧化作用，其作用机制还在进一步研究中。

参考文献

[1] 中国药典 [S]. 一部. 2010.

[2] 赵良功, 李晓东, 赵建辉, 等. 4 种红芪多糖对实验性糖尿病小鼠血糖的影响 [J]. 中药材, 2009, 32(10): 1590-1592.

[3] 惠和平, 封士兰, 胡芳弟, 等. 红芪多糖的体外抗氧化活性研究 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(8): 4056-4057.

[4] 王希玉, 路 莉, 胡 燕, 等. 不同红芪多糖抗肿瘤和免疫调节作用研究 [J]. 中药药理与临床, 2009, 25(5): 72-74.

[5] 任 远, 马 骏. 红芪多糖对实验性肝损伤的保护作用 [J]. 甘肃中医学院学报, 2000, 17(4): 10-11.

[6] 惠和平, 封士兰, 赵良功, 等. 红芪多糖的纯化及初步结构鉴定 [J]. 时珍国医国药, 2010, 21(9): 2302-2303.

[7] 方积年, 丁 侃. 天然药物——多糖的主要生物活性及分离纯化方法 [J]. 中国天然药物, 2007, 5(5): 341.

[8] 张惟杰. 糖复合物生化研究技术 [M]. 第 2 版. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.

[9] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Anal Biochem*, 1976, 72(7): 248-254.

[10] 黄 凯, 李志孝, 邓永康, 等. 药用真菌马勃多糖的分离纯化及结构分析 [J]. 华西药学杂志, 2008, 23(5): 516-518.

[11] Sun Y L, Cui S W, Tang J, *et al*. Structural features of pectic polysaccharide from *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels [J]. *Carbohydr Polym*, 2010, 80: 544-550.

[12] Khramova D S, Golovchenko V V, Shashkov A S. Chemical composition and immunomodulatory activity of a pectic polysaccharide from the ground thistle *Cirsium esculentum* Siev [J]. *Food Chem*, 2011, 126: 870-877.

[13] Cordeiro L M C, Reinhardt V F, Baggio C H, *et al*. Arabinan and arabinan-rich pectic polysaccharides from quinoa (*Chenopodium bquinoa*) seeds: Structure and gastroprotective activity [J]. *Food Chem*, 2012, 130: 937-944.

[14] Kang J, Cui S W, Phillips G O, *et al*. New studies on gum ghatti (*Anogeissus latifolia*) Part III: Structure

characterization of a globular polysaccharide fraction by 1D, 2D NMR spectroscopy and ethylation analysis [J]. *Food Hydrocolloid*, 2011, 25: 1999-2007.

[15] Cui W W, Michael N A E, Costas G B, *et al*. Characterization of a 4-*O*-methyl-3-*D*-glucuronic acid-containing rhamnogalacturonan from yellow mustard (*Sinapis alba* L.) mucilage [J]. *Carbohydr Res*, 1996, 292: 173-183.

[16] Shi Y K, Zhao L G, Liu X H, *et al*. Structural characterization of a sulfated glucan isolated from the aqueous extract of *Hedysarum polybotrys* Hand. -Mazz [J]. *Carbohydr Polym*, 2012, 87: 160-169.

[17] Raisa G O, Victoria V G, Sergey V P, *et al*. Chemical composition and anti-inflammatory activity of pectic polysaccharide isolated from celery stalks [J]. *Food Chem*, 2009, 114: 610-615.

[18] Niu Y G, Wang H Y, Xie Z H, *et al*. Structural analysis and bioactivity of a polysaccharide from the roots of *Astragalus membranaceus* (Fisch) Bge. var. *mongolicus* (Bge.) Hsiao [J]. *Food Chem*, 2011, 128: 620-626.

[19] Ye L B, Zhang J S, Yang Y, *et al*. Structural characterisation of a heteropolysaccharide by NMR spectra [J]. *Food Chem*, 2009, 112: 962-966.

[20] Zhang A Q, Sun P L, Zhang J S, *et al*. Structural investigation of a novel fucoglucogalactan isolated from the fruiting bodies of the fungus *Hericium erinaceus* [J]. *Food Chem*, 2007, 104: 451-456.

[21] Kambiz J H, Ahmad R G, Sohrab M, *et al*. Isolation, structural characterization and antioxidant activity of a new water-soluble polysaccharide from *Acanthophyllum bracteatum* roots [J]. *Int J Biol Macromol*, 2011, 49: 567-572.

[22] 魏远安, 方积年. 高效凝胶渗透色谱法测定多糖纯度及分子量 [J]. 药学学报, 1989, 24(7): 532-536.

[23] 易剑平, 叶 晓, 闫 红, 等. 姬松茸多糖硫酸酯分子量测定方法的研究 [J]. 食用菌, 2006(1): 36-38.