

高效液相色谱法测定四种植物多糖中单糖方法的建立

杨瑞¹, 寇晨星², 惠和平¹, 韩晓江³, 谭思远^{1*}

¹商洛学院生物医药与食品工程学院, 陕西 商洛

²西安旅游职业中等专业学校, 陕西 西安

³商洛学院健康管理学院, 陕西 商洛

收稿日期: 2024年8月9日; 录用日期: 2024年9月6日; 发布日期: 2024年9月18日

摘要

采用高效液相色谱法测定四种植物多糖的单糖组成。用超声辅助提取大豆、香菇、木耳、枸杞多糖, 通过三氟乙酸水解后, 用1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(PMP)柱前衍生-液相色谱法检测, 并选用专属性, 精密度, 灵敏度, 线性范围和加标回收率对此方法进行验证, 最后对大豆、香菇、木耳、枸杞多糖中单糖的组成进行分析。结果表明, 待测定的各单糖组分在1.03~550 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 范围内呈良好的线性关系, 且各组分分离度大于1.5, 检出限大于2.01 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 定量限大于6.43 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 精密度与稳定性的相对标准偏差均小于4%, 加标回收率在98.0%~101.4%之间, 验证结果显示该方法简单快速、准确可靠。通过应用此方法测定大豆、香菇、木耳、枸杞多糖的单糖组成, 结果显示大豆多糖属于以半乳糖为主的杂多糖, 且半乳糖含量为53.40%; 香菇和枸杞多糖属于以葡萄糖为主的杂多糖, 所含的葡萄糖含量分别为45.74%和21.07%; 木耳多糖属于以D-甘露糖为主的杂多糖, 且D-甘露糖含量为18.64%。

关键词

植物多糖, 单糖组成, 柱前衍生化, 高效液相色谱法

Determination of Monosaccharides in Four Plant Polysaccharides by High Performance Liquid Chromatography

Rui Yang¹, Chenxing Kou², Heping Hui¹, Xiaojiang Han³, Siyuan Tan^{1*}

¹School of Biomedicine and Food Engineering, Shangluo University, Shangluo Shaanxi

²Xi'an Tourism Vocational School, Xi'an Shaanxi

³College of Health Management, Shangluo University, Shangluo Shaanxi

*通讯作者。

文章引用: 杨瑞, 寇晨星, 惠和平, 韩晓江, 谭思远. 高效液相色谱法测定四种植物多糖中单糖方法的建立[J]. 生物过程, 2024, 14(3): 146-155. DOI: 10.12677/bp.2024.143019

Abstract

The monosaccharide compositions of four plant polysaccharides were determined by high performance liquid chromatography (HPLC). Polysaccharides from soybeans, shiitake mushrooms, black fungi, and wolfberries were extracted by ultrasonic assistance. After hydrolysis with trifluoroacetic acid, the samples were detected by pre-column derivatization with 1-phenyl-3-methyl-5-pyrazolone (PMP) and HPLC. The method was validated using specificity, precision, sensitivity, linear range, and standard addition recovery rate. Finally, the monosaccharide compositions in polysaccharides from soybeans, shiitake mushrooms, black fungi, and wolfberries were analyzed. The results showed that the monosaccharide components to be determined showed a good linear relationship in the range of 1.03~550 $\mu\text{g/mL}$, and the resolution of each component was greater than 1.5, the detection limit was greater than 2.01 $\mu\text{g/mL}$, and the limit of quantification was greater than 6.43 $\mu\text{g/mL}$. The relative standard deviation of precision and stability was less than 4%, and the recovery of standard addition was between 98.0%~101.4%. The verification results show that the method is simple, rapid, accurate and reliable. The monosaccharide composition of soybean, shiitake mushroom, fungus and medlar polysaccharide was determined by applying this method. The results showed that soybean polysaccharide belongs to galactose-based heteropolysaccharide and the galactose content was 53.40%. The heteropolysaccharide contained 45.74% and 21.07%, respectively; the fungus polysaccharide belonged to D-mannose-based heteropolysaccharide, and the D-mannose content was 18.64%.

Keywords

Plant Polysaccharides, Monosaccharide Composition, Pre-Column Derivatization, High Performance Liquid Chromatography

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多糖(Polysaccharide)是由超过 10 个的单糖以糖苷键结合的糖链组成的高分子碳水化合物, 可用通式 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ 表示。多糖具有免疫调节、抗肿瘤及降血糖、降血脂、抗菌抗病毒、保护肝脏等药理作用, 在医药领域具有潜在的应用价值[1]-[4]。根据来源可分为植物多糖、细菌多糖、真菌多糖和动物多糖。植物多糖参与细胞的各种生理活动, 且具有多种药理作用及生物学功能, 随着分子生物学、细胞生物学等相关学科及仪器技术的发展, 国内外对植物多糖的复合物及化合物的研究也日渐深入[5]。植物多糖在医药领域可用于制备人工血液、药物缓释剂、人工皮肤或医用透析膜; 可开发出保健食品、饮料口服液、营养强化剂等; 另外也可作为果蔬的涂膜剂以及可食剂的包装材料, 工业上的润滑剂和水滞留剂[6]-[8]。

多糖的单糖组成分析是控制多糖质量和分析多糖结构的重要环节。因为多糖分析具有其自身的特点, 单纯的化学方法比如苯酚硫酸法、蒽酮法只能测总糖的含量, 而不能对多糖中的单糖进行定量和定性分析[9]。色谱法的优点是分离效率高, 可以在同一色谱柱上分离数十种甚至数百种性质类似的化合物, 能用于复杂样品分析, 并且分析速度快, 一般而言, 复杂的样品分析可在几分钟到几十分钟内完成[10]; 检测灵敏度高, 随着信号处理和检测器制作技术的进步, 可以直接检测纳米级微量物质而无需预浓缩; 样

品用量少,一次分析通常只需数微升的溶液样品;选择性良好,通过选择合适的分离模式和检测方法,可以只分离或检测感兴趣的部分目标物质[9]。近年来,糖组分分析方法主要以薄层色谱法(TLC)、气相色谱法(GC)、高效液相色谱法(HPLC)、高效毛细管电泳法(HPCE) [11]、凝胶色谱法(GPC)和离子交换色谱法(IEC) [12]为主。其中,TLC操作快捷且成本低,多用于多糖的初步研究。GC所用的样品量少,分辨率高,但GC分离测定的为热稳定的挥发性化合物,需要高柱温,测定时影响的因素较多,结果的重现性相对较差。GPC和IEC设备简便、操作快捷,不需要有机溶剂,对多糖具有高分离效果,通常用于大分子多糖的分析,广泛用于多糖的分离和纯化。HPCE法是20世纪80年代发展起来的一种新型的分离分析技术,它以其快速、高效和灵敏度高、所需样品要求低和抗污染能力强等优点被广泛用于各个领域,主要集中在单糖和低聚糖的分离检测上[11]。

HPLC分离效率高,选择性好,检测灵敏度高,操作自动化,适用范围广,可以对70%以上的有机化合物进行分离纯化、组分分析、定量分析等。糖类物质一般由于缺少紫外或荧光生色基团,用HPLC测定糖类物质时,一般都需要进行柱前衍生化[13][14]。适于液相色谱的衍生化方法较多,其中应用最为普遍的是1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(PMP)的衍生化方法,该方法在碱性条件下进行,对几乎所有类型的单糖都适用,并且PMP和单糖形成的衍生物带上紫外基团的同时,极性变小,便于分析[15]。HPLC分析糖类物质不存在挥发性限制的问题,同时HPLC的多种分离模式可满足大多数不同性质糖的分离分析,已成为目前糖类物质分析最重要的方法[16]。

本研究拟建立一种测定植物多糖中单糖组分的方法,以大豆、香菇、木耳和枸杞为原料,通过对其提取、水解以及衍生化处理,进行HPLC分析,并选用专属性、线性关系、灵敏度、精密度、稳定性以及加标回收率验证该方法的适用性。最后对处理好的大豆、香菇、木耳、枸杞多糖样品溶液进行测定并计算含量。

2. 材料与方法

2.1. 仪器、原料与试剂

2.1.1. 实验材料

豆渣、香菇、木耳、枸杞购于陕西商洛当地。

2.1.2. 实验试剂

1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮, D-核糖, D-甘露糖, D-木糖, D-无水葡萄糖, 鼠李糖, 半乳糖, 阿拉伯糖(上海源叶生物科技有限公司); 三氟乙酸, 盐酸, 氢氧化钠, 三氯甲烷, 95%乙醇, 磷酸二氢钾(均为分析纯, 天津科密欧试剂有限公司), 乙腈(天津赛孚瑞科技有限公司)。

2.1.3. 仪器与设备

高效液相色谱仪(LC-20A), 超声波清洗机(KH-500TDB), 旋转蒸发仪(RE-52), 鼓风干燥箱(DHG-9146A), 电子分析天平(SI-2002), 粉碎机(YB-7008)。

2.2. 实验方法

2.2.1. 多糖的提取

称取15g烘干粉碎的豆渣、香菇、木耳、枸杞粉末于烧杯中,按料液比1:20加入0.3mol/L的盐酸,提取温度60℃,超声处理30min,调节pH至中性,抽滤弃去残渣,将滤液蒸发浓缩,加入四倍体积的95%乙醇,于4℃冰箱里过夜沉淀多糖,将沉淀冷冻干燥即得粗多糖。

2.2.2. 多糖的水解

称取各粗多糖100mg分别置于10mL具塞试管中,加入2mol/L的三氟乙酸4mL于97℃水浴水解

5 h, 水解液用 4 mol/L 的 NaOH 溶液中和至中性, 离心, 取上清液, 即得多糖水解溶液。

2.2.3. 多糖的衍生化

取多糖样品的水解液或单糖标准溶液 500 μL 于试管中, 加入 0.3 mol/L NaOH 溶液 500 μL , 混合后加入 0.5 mol/L PMP-甲醇溶液 500 μL , 混匀后 70 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 60 min, 冷却后加入 0.3 mol/L HCl 溶液 500 μL 中和 NaOH, 纯水至 4 mL。加 4 mL 的三氯甲烷萃取、振荡, 离心后吸弃三氯甲烷层, 继续重复萃取 2 次以除去多余的 PMP, 加水定容至 4 mL。

2.2.4. 色谱条件

色谱柱: Inertsil ODS-SP C18 (250 mm \times 4.6 mm, 5 μm); 流动相: 磷酸盐缓冲溶液(pH 6.8, 用磷酸二氢钾配制); 乙腈 = (83:17, V/V); 柱温: 35 $^{\circ}\text{C}$; 流速: 1.0 mL/min; 进样量: 10 μL ; 检测波长: 254 nm。

3. 结果与分析

3.1. 方法学验证结果

3.1.1. 专属性结果

设计空白试验, 以相同的条件处理并测定空白样品和单糖混合标准品, 单糖混合标准品的色谱图如图 1, 各单糖组分之间分离度计算结果如表 1。

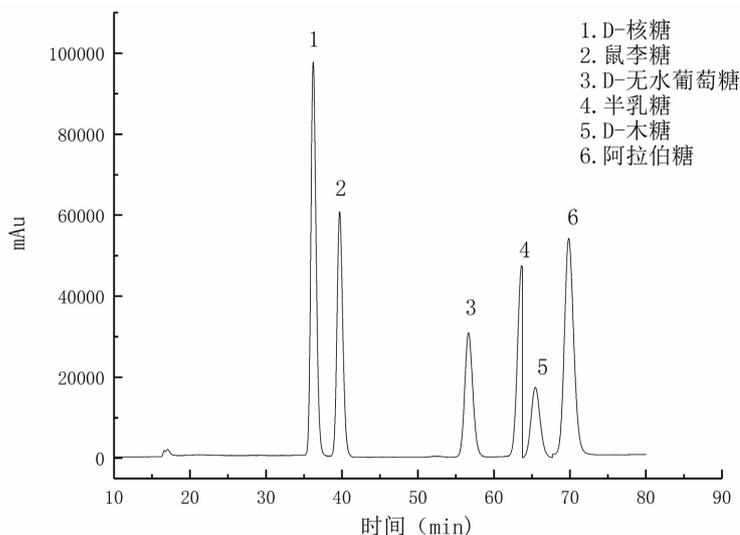


Figure 1. HPLC chromatograms of six monosaccharides

图 1. 六种单糖 HPLC 色谱图

Table 1. Separation results of six monosaccharides

表 1. 六种单糖分离度结果

单糖种类	保留时间	分离度 R
D-核糖	34.621	2.53
鼠李糖	38.056	9.22
D-无水葡萄糖	53.588	3.15
半乳糖	60.189	2.41
D-木糖	65.440	2.46
阿拉伯糖	66.177	—

由图 1 可见,在当前条件下 D-核糖、鼠李糖、D-无水葡萄糖、半乳糖、D-木糖、阿拉伯糖等峰形良好。由图 1 及表 1 分离度结果可见,各个组分之间分离度 R 均大于 1.5,表明所有的峰均完全分离,没有重叠,分离效果较好。

3.1.2. 线性关系及灵敏度结果

取经衍生化处理的浓度分别为 1 mg/mL、2 mg/mL、3 mg/mL、4 mg/mL、5 mg/mL、6 mg/mL 的单糖混合标准液,按照 2.2.4 中的条件进样测定。以浓度为横坐标,峰面积为纵坐标进行线性回归,6 种单糖的线性范围结果如表 2。

Table 2. Standard curve of monosaccharides

表 2. 单糖标准曲线方程

单糖	线性回归方程	R^2	线性范围($\mu\text{g/mL}$)
D-核糖	$y = 5,000,000x + 506,722$	0.9894	1.06~531
鼠李糖	$y = 3,000,000x + 332,917$	0.9872	1.03~514
D-木糖	$y = 7,000,000x + 923,598$	0.9537	1.03~523
D-无水葡萄糖	$y = 2,000,000x + 228,774$	0.9888	1.05~527
半乳糖	$y = 4,000,000x + 405,909$	0.9924	1.04~519
阿拉伯糖	$y = 4,000,000x + 465,156$	0.9942	1.03~514

由表 2 可以看出,6 种单糖在 1.03~514 $\mu\text{g/mL}$ 之间有较好的线性关系,相关性 R^2 都达到了 0.95 以上,并且半乳糖和阿拉伯糖达到了 0.99 以上,说明在此条件下测得的各种单糖的相关性较好,该方法较理想。

检出限和定量限通过分析一系列含有微量混合标品的溶液进行测定,记录各单糖的信噪比,确定各单糖的检出限和定量限,结果如表 3。

Table 3. LOD and LOQ results of six monosaccharides

表 3. 6 种单糖的检出限和定量限结果

单糖	LOD ($\mu\text{g/mL}$)	LOQ ($\mu\text{g/mL}$)
D-核糖	1.22	3.66
鼠李糖	0.85	2.72
D-木糖	0.59	2.42
D-无水葡萄糖	1.14	4.10
半乳糖	2.01	6.43
阿拉伯糖	0.96	3.65

由表 3 可知,六种单糖的检出限大于 2.01 $\mu\text{g/mL}$,定量限大于 6.43 $\mu\text{g/mL}$ 。

3.1.3. 精密度测定结果

取经衍生化处理的单糖混合标准液,取 10 μL 重复进样 6 次,记录各单糖的保留时间和峰面积并计算 6 次分析下的 RSD,精密度实验结果如表 4。

Table 4. Results of precision experiments**表 4.** 精密度试验结果

单糖种类	平均保留时间(n = 6)	保留时间 RSD (%)	平均峰面积(n = 6)	峰面积 RSD (%)
D-核糖	35.145	1.85	647,436	3.03
鼠李糖	38.574	1.63	431,781	3.83
D-无水葡萄糖	54.537	2.11	290,173	3.05
半乳糖	61.230	2.15	510,791	2.42
D-木糖	65.102	1.11	1,529,760	3.54
阿拉伯糖	67.430	2.36	591,773	2.39

由表 4 可知, 各单糖的保留时间的 RSD 分别为 0.97%、1.85%、1.63%、2.11%、2.15%、1.11%、2.36%, 峰面积的 RSD 分别为 3.03%、3.83%、3.05%、2.42%、3.54%、2.39%, 表明此方法具有良好的精密度。

3.1.4. 稳定性测定结果

取经衍生化处理的四种植物多糖溶液, 在 0 h、2 h、4 h、6 h、10 h、24 h 分别进样, 分别记录四种样品各单糖保留时间及峰面积并计算 RSD, 结果见表 5~8。

Table 5. Stability results of soybean polysaccharide**表 5.** 大豆多糖的稳定性结果

单糖种类	平均保留时间(n = 6)	保留时间 RSD (%)	平均峰面积(n = 6)	峰面积 RSD (%)
D-核糖	34.114	3.30	375,897	3.02
鼠李糖	37.638	0.74	465,268	2.34
D-无水葡萄糖	53.774	0.86	146,417	3.21
半乳糖	59.211	0.65	21,109,022	2.87
D-木糖	62.740	1.01	2,783,870	1.24
阿拉伯糖	65.576	1.40	10,006,389	2.63

由表 5 可知, 大豆多糖是由 D-核糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、D-无水葡萄糖、半乳糖、D-木糖、阿拉伯糖组成, 其保留时间的 RSD 分别为 3.30%、0.74%、0.86%、0.65%、1.01%、1.40%, 峰面积的 RSD 分别为 3.02%、2.34%、3.21%、2.87%、1.24%、2.63%, 表明用此方法检测大豆多糖单糖组成结果在 24 h 内较稳定。

Table 6. Stability results of shiitake mushroom polysaccharide**表 6.** 香菇多糖的稳定性结果

单糖种类	平均保留时间(n = 6)	保留时间 RSD (%)	平均峰面积(n = 6)	峰面积 RSD (%)
D-甘露糖	27.703	1.70	755,153	3.16
鼠李糖	38.360	1.76	806,755	0.86
D-无水葡萄糖	55.281	2.21	83,554,157	1.62

由表 6 可知, 香菇多糖是由 D-甘露糖、鼠李糖、D-无水葡萄糖组成, 其保留时间的 RSD 分别为 1.70%、1.76%、2.21%, 峰面积的 RSD 分别为 3.16%、0.86%、1.62%, 表明用此方法检测香菇多糖单糖组成结果在 24 h 内较稳定。

Table 7. Stability results of fungus polysaccharide**表 7.** 木耳多糖的稳定性结果

单糖种类	平均保留时间(n = 6)	保留时间 RSD (%)	平均峰面积(n = 6)	峰面积 RSD (%)
D-甘露糖	27.744	2.27	6,346,667	2.45
D-无水葡萄糖	55.605	2.16	2,053,105	3.26
半乳糖	62.562	1.63	307,742	1.42
阿拉伯糖	65.818	2.06	1,555,476	2.61

由表 7 可知, 木耳多糖是由 D-甘露糖、D-无水葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖组成, 其保留时间的 RSD 分别为 2.27%、2.16%、1.63%、2.06%, 峰面积的 RSD 分别为 2.45%、3.26%、1.42%、2.61%, 表明用此方法检测木耳多糖单糖组成结果在 24 h 内较稳定。

Table 8. Stability results of medlar polysaccharide**表 8.** 枸杞多糖的稳定性结果

单糖种类	平均保留时间(n = 6)	保留时间 RSD (%)	平均峰面积(n = 6)	峰面积 RSD (%)
D-甘露糖	27.595	3.33	314,503	2.51
D-无水葡萄糖	55.263	2.81	441,066	1.49
半乳糖	60.059	1.31	70,491	0.92
D-木糖	66.013	0.96	77,501	3.31

由表 8 可知, 枸杞多糖是由 D-甘露糖、D-无水葡萄糖、半乳糖、D-木糖组成, 它们的保留时间的 RSD 分别为 3.33%、2.81%、1.31%、0.96%, 它们的峰面积的 RSD 分别为 2.51%、1.49%、0.92%、3.31%, 表明用此方法检测枸杞多糖单糖组成结果在 24 h 内较稳定。

3.1.5. 加标回收率测定结果

准确移取 10 mL 的大豆多糖样品 4 份, 其中三份分别加入 1 mg/mL 的阿拉伯糖 1 mL、3 mL、5 mL; 分别准确移取 10 mL 的香菇和枸杞多糖各 4 份, 其中三份分别加入 1 mg/mL 的葡萄糖 1 mL、3 mL、5 mL; 准确移取 10 mL 的木耳多糖 4 份, 其他三份分别加入 1 mg/mL 的 D-甘露糖 1 mL、3 mL、5 mL; 按照样品处理方法制备样品溶液衍生化后, 在相同的色谱条件下测定, 记录各样品的峰面积, 分别计算这四种植物多糖在三种不同的加标量下的平均回收率, 结果见表 9。

Table 9. Results of recovery rate**表 9.** 加标回收率结果

多糖样品	加标量 p/(mg)	回收率(%)	平均回收率(%)
大豆多糖	1.0	108.4	101.4
	3.0	100.2	
	5.0	95.6	
香菇多糖	1.0	104.7	99.7
	3.0	99.9	
	5.0	94.6	
木耳多糖	1.0	102.3	98.5
	3.0	98.1	
	5.0	95.2	
枸杞多糖	1.0	101.8	98.0
	3.0	98.4	
	5.0	93.8	

由表 9 可知, 大豆多糖中阿拉伯糖在三种不同的加标量下的平均回收率为 101.4%, 香菇多糖中 D-无水葡萄糖在三种不同的加标量下的平均回收率为 99.7%, 木耳多糖中 D-甘露糖在三种不同的加标量下的平均回收率为 98.5%, 枸杞多糖中 D-无水葡萄糖在三种不同的加标量下的平均回收率为 98.0%, 证明此检测方法有较好的准确度, 可满足分析试验的要求。

3.1.6. 四种植物多糖样品的测定

对四种样品经水解以及衍生化处理按照 2.2.4 中的方法进行检测。四种样品的 HPLC 色谱图见图 2, 并对其单糖组成进行定性定量分析, 结果如表 10。

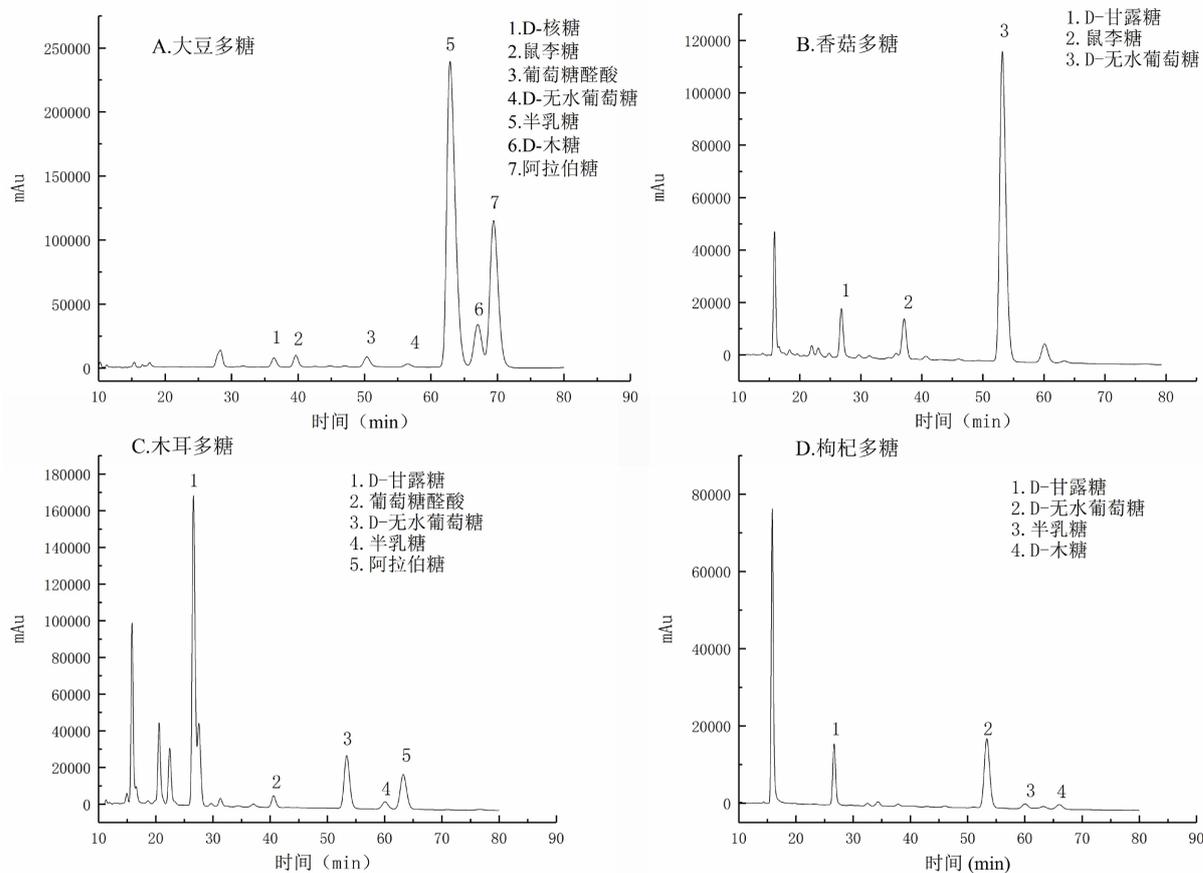


Figure 2. HPLC chromatograms of four plant polysaccharides

图 2. 四种植物多糖的 HPLC 色谱图

Table 10. Analysis of monosaccharide composition and content of four plant polysaccharide samples

表 10. 4 种植物多糖样品的单糖组成及含量分析

样品名称	D-甘露糖	D-核糖	鼠李糖	葡萄糖醛酸	D-无水葡萄糖	半乳糖	D-木糖	阿拉伯糖
大豆多糖	—	400.23	361.45	378.07	256.10	5951.36	2006.45	2886.06
香菇多糖	218.31	—	151.09	—	4062.85	—	—	—
木耳多糖	1166.11	—	—	178.62	936.13	215.71	—	292.00
枸杞多糖	829.12	—	—	—	2835.27	256.84	271.31	—

注: “—”表示未检出, 表中单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

由图 2 和表 10 可知, 大豆多糖是由 D-核糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、D-无水葡萄糖、半乳糖、D-木

糖、阿拉伯糖组成,香菇多糖是由 D-甘露糖、鼠李糖、D-无水葡萄糖组成,木耳多糖是由 D-甘露糖、葡萄糖醛酸、D-无水葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖组成,枸杞多糖是由 D-甘露糖、D-无水葡萄糖、半乳糖、D-木糖组成,此四种植物多糖均为杂多糖。

4. 结论

本研究利用超声辅助提取大豆、香菇、木耳、枸杞多糖,通过酸水解后采用 PMP 衍生化-反相液相色谱法建立了大豆、香菇、木耳、枸杞多糖中单糖的分析方法。以乙腈-磷酸缓冲盐为流动相等度洗脱在 254 nm 检测,发现 D-甘露糖、D-核糖、鼠李糖、D-无水葡萄糖、半乳糖、D-木糖、阿拉伯糖分离度良好,其浓度在 1.03~550 $\mu\text{g/mL}$ 范围内呈良好的线性关系($R^2 > 0.95$),加标回收率在 93.8%~108.4%之间,分离度大于 1.5,检出限大于 2.01 $\mu\text{g/mL}$,定量限大于 6.43 $\mu\text{g/mL}$,精密度与重复性均小于 4%,加标回收率在 98.0%~101.4%之间,说明所建立的色谱方法准确、可靠,可用于大豆、香菇、木耳、枸杞多糖中单糖组成的分析,它还为测定其他多糖的单糖组成提供了参考。

通过该方法对大豆、香菇、木耳、枸杞多糖中各单糖的分析,结果发现大豆多糖是由 7 种单糖组成,每种单糖的含量依次为半乳糖 > 阿拉伯糖 > D-木糖 > D-核糖 > 葡萄糖醛酸 > 鼠李糖 > D-无水葡萄糖,为基于半乳糖的杂多糖,半乳糖含量为 53.40%;香菇多糖是由 3 种单糖组成,每种单糖的含量依次为 D-无水葡萄糖 > D-甘露糖 > 鼠李糖,为基于 D-无水葡萄糖的杂多糖,且 D-无水葡萄糖的含量为 45.74%;木耳多糖是由 5 种单糖组成,每种单糖的含量依次为 D-甘露糖 > D-无水葡萄糖 > 阿拉伯糖 > 半乳糖 > 葡萄糖醛酸,为基于 D-甘露糖的杂多糖,且 D-甘露糖的含量为 18.64%;枸杞多糖是由 4 种单糖组成,每种单糖的含量依次为 D-无水葡萄糖 > D-甘露糖 > D-木糖 > 半乳糖,为基于 D-无水葡萄糖的杂多糖,且 D-无水葡萄糖的含量为 21.07%。

基金项目

本研究受陕西省教育厅自然科学专项项目“20JK0617”、陕西省教育厅一般专项项目“22JK0362”、陕西秦岭特色生物资源产业技术研究院项目“23HKY035”资助。

参考文献

- [1] 娜日苏. 天然植物多糖提取工艺及研究进展[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2022, 38(9): 29-34.
- [2] 王文丽, 张金玲, 魏亚宁, 桑雨梅, 薛宏坤. 天然多糖提取、纯化及生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 470-480.
- [3] 刘子怡, 李仪晴, 张仁群, 等. 天然植物多糖抗氧化活性的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2024, 30(8): 40-46.
- [4] 杜清, 徐晓辉, 林鹏程, 等. 植物多糖的研究进展及开发前景[J]. 转化医学电子杂志. 2017, 4(4): 78-82.
- [5] 张娜, 刘扬, 陈小强, 等. 化学修饰植物多糖的生物活性及其在食品领域中的应用研究进展[J/OL]. 食品工业科技, 2024: 1-16. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030466>, 2024-08-21.
- [6] Sedayu, B.B., Cran, M.J. and Bigger, S.W. (2019) A Review of Property Enhancement Techniques for Carrageenan-Based Films and Coatings. *Carbohydrate Polymers*, **216**, 287-302. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.021>
- [7] Abdillah, A.A. and Charles, A.L. (2021) Characterization of a Natural Biodegradable Edible Film Obtained from Arrowroot Starch and Iota-Carrageenan and Application in Food Packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, **191**, 618-626. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.141>
- [8] Cui, Y., Zhu, L., Li, Y., Jiang, S., Sun, Q., Xie, E., et al. (2021) Structure of a Laminarin-Type β -(1 \rightarrow 3)-Glucan from Brown Algae *Sargassum henslowianum* and Its Potential on Regulating Gut Microbiota. *Carbohydrate Polymers*, **255**, Article 117389. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117389>
- [9] 张蕾. 单糖和双糖分析方法研究进展[J]. 现代食品, 2023, 29(5): 62-68, 90.
- [10] 李培, 倪斌, 郑佳, 等. 色谱技术在中国白酒风味物质检测中的研究进展[J]. 中国酿造, 2024, 43(7): 14-20.

-
- [11] Honda, S., Suzuki, S. and Taga, A. (2003) Analysis of Carbohydrates as 1-Phenyl-3-Methyl-5-Pyrazolone Derivatives by Capillary/Microchip Electrophoresis and Capillary Electrochromatography. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **30**, 1689-1714. [https://doi.org/10.1016/s0731-7085\(02\)00512-5](https://doi.org/10.1016/s0731-7085(02)00512-5)
- [12] Chen, Y., Du, X., Zhang, Y., Liu, X. and Wang, X. (2017) Ultrasound Extraction Optimization, Structural Features, and Antioxidant Activity of Polysaccharides from *Tricholoma matsutake*. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, **18**, 674-684. <https://doi.org/10.1631/jzus.b1600239>
- [13] 梁晗业, 张君, 董升, 等. 柱前衍生化高效液相色谱法分析车前草多糖特征图谱[J]. 辽宁中医药大学学报, 2018, 20(10): 75-77.
- [14] 杨兴斌, 赵燕, 周四元, 等. 柱前衍生化高效液相色谱法分析当归多糖的单糖组成[J]. 化学分析研究简报. 2005, 33(9): 1287-1290.
- [15] 梁军, 王迪, 杨琦, 等. 植物多糖分析方法研究进展[J]. 中医药学报, 2012, 40(6): 120-122.
- [16] 郭元亨, 张利军, 曹丽丽, 等. 植物多糖中单糖组成分析技术的研究进展[J]. 食品科学报. 2018, 39(7): 326-332.