

黄秋葵籽多糖的组成结构及抗氧化活性研究

刘瑞馨^{1,2}, 郭佳敏^{1,2}, 刘锐^{1,2*}, 赵云蛟^{1,2}, 张民^{1,3}, 吴涛^{1,2}, 隋文杰^{1,2}

(1. 天津科技大学省部共建食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457;

2. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 3. 天津农学院, 天津 300384)

摘要: **目的** 分析黄秋葵籽多糖(okra seed polysaccharides, OSPs)的组成结构并对其抗氧化活性进行评价。**方法** 样品经DEAE-52阴离子交换柱和Sephacryl S-400凝胶色谱柱分离纯化得到黄秋葵籽多糖, 采用尺寸排阻色谱柱分析其分子量, 并对其化学成分、单糖组成、糖苷键链接方式、傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared, FT-IR)结构信息及抗氧化活性进行研究。**结果** 分离纯化的OSP的重均分子量(M_w)为 7.09×10^5 Da, 数均分子量(M_n)为 7.01×10^5 Da, M_w/M_n 为1.01, 表明OSP有较高的纯度, 得率为0.45%。酸降解和糖醇衍生化后经气相色谱测得OSP由甘露糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖和鼠李糖组成, 摩尔百分比为36.98:31.29:15.61:8.87:3.37。FT-IR结果表明OSP含有甘露糖残基。高碘酸氧化、Smith降解实验结果表明OSP主要含有1 \rightarrow 、1 \rightarrow 6、1 \rightarrow 2、1 \rightarrow 2,6糖苷键。此外, OSP具有良好的抗氧化能力, 特别是对O₂⁻自由基的清除。**结论** OSP的组成结构初步被明确, OSP具有良好的抗氧化能力, 本研究为黄秋葵籽资源的高值化利用提供理论基础。

关键词: 黄秋葵籽; 多糖; 化学组成; 结构分析; 抗氧化活性

Chemical compositions and antioxidant activities of *Abelmoschus esculentus* L. Moench seed polysaccharides

LIU Rui-Xin^{1,2}, GUO Jia-Min^{1,2}, LIU Rui^{1,2*}, ZHAO Yun-Jiao^{1,2}, ZHANG Min^{1,3},
WU Tao^{1,2}, SUI Wen-Jie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 3. Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the composition structure of *Abelmoschus esculentus* L. Moench okra seed polysaccharides (OSP) and evaluate its antioxidant activity. **Methods** OSP was subjected to DEAE-cellulose-52 separation and Sephadex S-400 HR gel filtration. The molecular weight (M_w) was determined by size exclusion chromatography, and the chemical compositions, monosaccharide compositions, glycosidic bond type, Fourier-transform infrared spectral (FT-IR) analysis information and antioxidant activities of OSP were studied. **Results** The OSP had a weight average molecular weight (M_w) of 7.09×10^5 Da and a number average molecular weight (M_n) of 7.01×10^5 Da, and M_w/M_n was 1.01, indicating that OSP had good purity and the yield of OSP was 0.45%. OSP was determined to be composed of mannose, galactose, xylose, arabinose and rhamnose by gas

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972012)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31972012)

*通信作者: 刘锐, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: lr@tust.edu.cn

*Corresponding author: LIU Rui, Ph.D, Associate Professor, State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, School of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China. E-mail: lr@tust.edu.cn

chromatography after acid degradation and glycol derivation, and the mole percentage was 36.98:31.29:15.61:8.87:3.37. FT-IR result represented the existence of mannose residue. The periodate oxidation and Smith degradation results indicated that the existence of 1→, 1→6, 1→2 and 1→2,6-linked glycosidic bonds. Besides, the OSPs exhibited effective antioxidant activities, especially against superoxide anion radicals. **Conclusion** The composition of OSPs has been preliminarily defined, and it has good antioxidant capacity. These investigations provide a theoretical basis for the high value utilization of okra seed resources.

KEY WORDS: *Abelmoschus esculentus* L. Moench seed; polysaccharide; chemical composition; structural analysis; antioxidant activity

0 引言

天然植物多糖是单糖以直链或支链方式通过糖苷键连接所组成的天然高分子聚合物, 具有免疫调节、抗氧化、抗肿瘤、降血糖、抗凝血等生物活性, 广泛应用于食品和医药工业领域^[1]。多糖的活性功能与其单糖组成、分子量和化学结构等密不可分。开发天然植物多糖, 并深入研究其结构和活性对于了解多糖的构效关系具有重要意义。

黄秋葵(*Abelmoschus esculentus* L. Moench), 亦称咖啡黄葵、秋葵等, 属于锦葵科秋葵属, 普遍认为起源于非洲和亚洲等热带地区, 目前在我国南北方各地均有种植^[2-3]。由于黄秋葵具有较高的营养品质和食用功能^[4-5], 素有“蔬菜之王”的美誉。黄秋葵籽不仅富含膳食纤维、蛋白质、油脂等营养素, 还含有生物碱、多酚类化合物以及微量元素, 具有很高的营养功能和潜在的开发利用价值^[6-9]。目前, 有研究分离纯化得到秋葵籽蛋白质组分, 经结构分析及活性评价, 得到具有抗炎、凝血活性等功能的凝集素^[7]; 有对黄秋葵籽中酚类物质、维生素 C、总黄酮及其抗氧化活性进行评价的相关研究^[8]。关于黄秋葵籽多糖的研究却鲜有报道。因此, 本研究以黄秋葵籽为原料, 经分离纯化得到黄秋葵籽多糖组分, 并测定其结构和抗氧化活性, 为黄秋葵籽的开发利用提供实验依据和技术支撑, 同时也为天然植物活性多糖资源的挖掘提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

LC-20AT 高效液相色谱仪[岛津企业管理(中国)有限公司]; Agilent 7890A 气相色谱仪(美国安捷伦科技公司); iS50 红外光谱仪(美国尼高利仪器公司); K9840 全自动凯氏定氮仪(山东海能科学仪器有限公司); TU-1810PC 紫外可见分光光度计(北京谱析通用仪器有限责任公司)。

单糖组成测定标准品: 阿拉伯糖、木糖、鼠李糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖、岩藻糖(分析纯)、葡聚糖标准品(分子量 5300、3700、2400、2000、500、110、70、40 kDa)(分析纯, 美国 Sigma 公司)。

黄秋葵籽(食品级, 安徽省亳州市中药材国强药业有限公司); 纤维素 DEAE-52 (粒径 50 μm)、丙烯葡聚糖凝胶 Sephacryl-400 (粒径 45~165 μm)(天津鼎国生物技术有限责任公司); 三氟乙酸、冰醋酸(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 盐酸、三氯甲烷(分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 实验室用水为 Milli-Q 超纯水; 高碘酸钠、石油醚、考马斯亮蓝 G-250 (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 硼氢化钠(分析纯, 上海天莲精细化工有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 黄秋葵籽多糖的提取、分离纯化

(1)黄秋葵籽粗多糖的提取: 准确称取 100 g 的黄秋葵籽粉, 加入 500 mL 石油醚回流提取 6 h, 以脱除部分色素和油脂; 过滤得沉淀, 收集干燥滤渣, 按 1:10 (m:V)比例加入蒸馏水, 52 °C 提取 1 h, 3500 r/min 离心 15 min, 浓缩后采用 Sevage 法脱蛋白 10 次; 加入 4 倍体积的 95% (V:V)乙醇溶液在 4 °C 下醇沉 24 h; 沉淀经透析、干燥后获得黄秋葵籽粗多糖。

(2)黄秋葵籽多糖的分离纯化: 采用 DEAE-52 阴离子交换柱和 Sephacryl S-400 凝胶色谱柱对黄秋葵籽粗多糖进行分离纯化^[10]。选取 DEAE-52 色谱柱(Φ16 mm×200 mm)上样 30 mg/mL 黄秋葵籽粗多糖 2 mL, 梯度洗脱分离纯化粗多糖, 蒸馏水洗脱出中性多糖, NaCl 梯度洗脱出酸性多糖, NaCl 梯度洗脱浓度分别设定为 0.1、0.2、0.4、0.6 mol/L, 洗脱流速 1 mL/min, 每管 5 mL, 每个梯度洗脱 20 管, 各管的蛋白含量在波长为 280 nm 下检测, 多糖含量采用硫酸苯酚法检测^[11], 绘制洗脱曲线。将 DEAE-52 色谱柱水洗脱出来的多糖进行冷冻干燥, 再用蒸馏水配制成质量浓度为 20 mg/mL 的溶液, 采用丙烯葡聚糖凝胶 Sephacryl-400 (Φ16 mm×500 mm)进行上样洗脱, 上样量 1 mL, 蒸馏水洗脱, 洗脱流速为每滴 6~8 s, 每管 2 mL, 采用硫酸苯酚法^[11]检测各管多糖含量, 绘制洗脱曲线。

1.2.2 黄秋葵籽多糖分子量的测定

采用尺寸排阻色谱法测定黄秋葵籽多糖的分子量。色谱条件为: LC-20AT 型高效液相色谱仪, OHPak SB-805 HQ 凝胶色谱柱, 示差检测器, 流动相为超纯水, 流速 0.8 mL/min, 柱温设置为 30 °C, 压力 1.0 MPa, 进样量 20 μL, 多糖样品和葡聚糖标准品质量浓度为 1.0 mg/mL。

根据葡聚糖标准曲线确定黄秋葵籽多糖的分子量。

1.2.3 黄秋葵籽多糖的成分分析

化学组成分析: 采用苯酚硫酸法测定碳水化合物含量^[11]; 采用硫酸-吡啶法测定糖醛酸含量^[12]; 采用考马斯亮蓝法测定蛋白含量^[13]; 采用 DNS 法测定还原糖含量^[14]。

1.2.4 黄秋葵籽多糖单糖组成的测定

采用气相色谱法测定黄秋葵籽多糖的单糖组成^[15]。色谱条件为: 毛细管柱 OV-1701 (30 m×0.32 mm, 0.5 μm), 进样量 5 μL, 分流比 10:1, 检测器为氢离子火焰检测器, 检测器温度为 250 °C, 进样口温度为 250 °C, 氮气流量为 34 mL/min, 氢气流量为 40 mL/min, 空气流量为 450 mL/min, 进样口温度 250 °C, 载气为氮气。

升温程序: 柱温 150 °C, 保持 1 min, 以 10 °C/min 升高至 200 °C, 保持 10 min, 以 5 °C/min 升高至 220 °C, 以 1.5 °C/min 升高至 240 °C, 保持 20 min。

1.2.5 高碘酸氧化和 Smith 降解

(1)高碘酸氧化: 准确称取 5 mg 多糖, 溶解于 30 mmol/L 的硼氢化钠溶液中, 定容至 25 mL, 4 °C 下避光反应。每隔 24 h 取 0.1 mL 反应液, 蒸馏水定容至 25 mL, 蒸馏水作空白, 测 223 nm 处吸光度值; 吸光度值稳定后, 根据高碘酸氧化前后吸光度的差值和标准曲线计算高碘酸的消耗量; 加 0.2 mL 乙二醇以终止反应; 取 2 mL 反应液, 以酚酞作指示剂, 以 0.01 mol/L NaOH 溶液进行滴定, 通过 NaOH 溶液消耗的体积计算甲酸的生成量; 收集剩余反应液, 流水透析 48 h, 进行 Smith 降解反应。

(2)Smith 降解: 向上述透析液中加入 30 mg NaBH₄, 在 4 °C 下避光反应 12 h; 使用冰醋酸中和, 以除尽未完全反应的 NaBH₄; 反应液透析 48 h, 浓缩, 冻干; 5 mg 冻干样品加入 1 mL 三氟乙酸(2 mol/L), 封管, 120 °C 反应 6 h; 酸降解产物浓缩, 干燥, 加入 1 mL 甲醇, 真空旋干, 重复此操作 5 次以除尽三氟乙酸; 将干燥后的产物、赤藓醇、甘油进行糖醇衍生化处理后进行气相色谱分析, 色谱条件同 1.2.4。

1.2.6 傅里叶变换红外光谱测定

称取 1 mg 黄秋葵籽多糖, 加入 100 mg 干燥 KBr 粉末, 充分研磨; 压片机压片 30 s 后, 迅速放入红外光谱仪进行扫描。扫描范围为 400~4000 cm⁻¹, 扫描次数为 16 次。

1.2.7 黄秋葵籽多糖抗氧化活性的测定

抗氧化活性测定包括: DPPH 自由基、ABTS⁺自由基、O₂⁻自由基和 OH 自由基清除能力。

(1)DPPH 自由基清除能力测定: 分别配制质量浓度为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mg/mL 黄秋葵籽多糖溶液; 将 2 mL 不同浓度多糖溶液与 2 mL 浓度为 0.2 mmol/L DPPH 甲醇溶液, 混合均匀, 37 °C 避光反应 30 min; 以抗坏血酸为阳性对照, 于波长 517 nm 处测定吸光度, 按照公式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = [1 - (A_1 - A_2) / A_0] \times 100 \quad (1)$$

式中: A₀, A₁, A₂ 分别为空白、样品、溶剂的吸光度值。

(2)ABTS⁺自由基清除率测定: 将 5 mL ABTS 缓冲液(7.4 mmol/L)与 5 mL 过硫酸钾(7.4 mmol/L)混匀, 避光放置 16 h, 配制成 ABTS⁺工作液。将 ABTS⁺工作液用磷酸盐缓冲液(phosphate buffer saline, PBS, pH=7.4)稀释至 734 nm 下吸光度值范围在 0.7~0.8 之间, 取 0.4 mL 不同浓度多糖溶液与 4 mL ABTS⁺在 25 °C 下避光反应 6 min, 测定 734 nm 下的吸光度值, 按照公式(2)计算 ABTS⁺自由基清除率。

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = (A_0 - A_3) / A_0 \times 100 \quad (2)$$

式中: A₀, A₃ 分别为空白、样品的吸光度值。

(3)O₂⁻自由基清除能力测定: 将 5.0 mL Tris-HCl 缓冲液(pH=8.4)和 4.0 mL 蒸馏水混合摇匀, 30 °C 水浴 25 min, 加入 1.5 mL 样品和 0.4 mL 邻苯三酚, 混合均匀后, 反应 6 min, 立即加入 2 滴浓盐酸终止反应。在 321 nm 处测定吸光度值, 按照公式(3)计算 O₂⁻自由基清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = [1 - (A_4 - A_5) / A_0] \times 100 \quad (3)$$

式中: A₀, A₄, A₅ 分别为空白、样品、对照的吸光度值。

(4)OH⁻自由基清除能力测定: 取 2 mL 不同浓度多糖样品, 加入 9 mmol/L FeSO₄ 溶液 2 mL, 再加入 9 mmol/L 乙醇水杨酸溶液 2 mL, 最后加入 8.8 mmol/L H₂O₂ 溶液 2 mL 启动反应, 混匀后于 37 °C 水浴放置 30 min, 于 520 nm 处测定吸光度值, 按照公式(4)计算 OH⁻自由基清除率。

$$\text{OH}^- \text{ 自由基清除率}(\%) = [1 - (A_6 - A_7) / A_0] \times 100 \quad (4)$$

式中: A₀, A₆, A₇ 分别为空白、样品、对照的吸光度值。

1.3 数据处理

采用 SPSS 软件对数据进行统计分析, origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 黄秋葵籽多糖的提取、分离纯化

黄秋葵籽粗多糖的提取得率为 5.82%。粗多糖采用 DEAE-52 阴离子交换柱分别经过蒸馏水、0.1、0.2、0.4、0.6 mol/L NaCl 洗脱得到洗脱曲线(图 1A)。图 1A 表明经过 DEAE-52 阴离子交换柱纯化的黄秋葵籽多糖主要为中性多糖, 含有少量酸性多糖。因此, 收集中性多糖部分进行透析、冷冻干燥。采用 Sephacryl-400 凝胶色谱柱继续纯化, 得到的洗脱曲线, 如图 1B 所示。中性糖部分可以分离出 2 个部分, 由于第 1 个峰分量少, 只对第 2 个峰部分对应的黄秋葵籽多糖进行收集, 经旋转蒸发、浓缩、冷冻干燥得到纯化的黄秋葵籽多糖组分(okra seed polysaccharides, OSPs)。图 1C 为 OSPs 的高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)谱图, 具有单一对称峰, 重均分子量(M_w)为 7.09×10⁵ Da, 数均分子量(M_n)为 7.01×10⁵ Da, M_w/M_n 为 1.01, 表明 OSPs 有较高的纯度, 得率为 0.45%。

2.2 黄秋葵籽多糖的成分分析

由表 1 可知, OSPs 主要由甘露糖、半乳糖、木糖、阿

拉伯糖和鼠李糖组成。根据黄秋葵籽多糖的峰面积计算得到各单糖的摩尔百分比, 其中, 甘露糖和半乳糖所占比例最高, 阿拉伯糖和木糖比例次之, 鼠李糖比例最少。

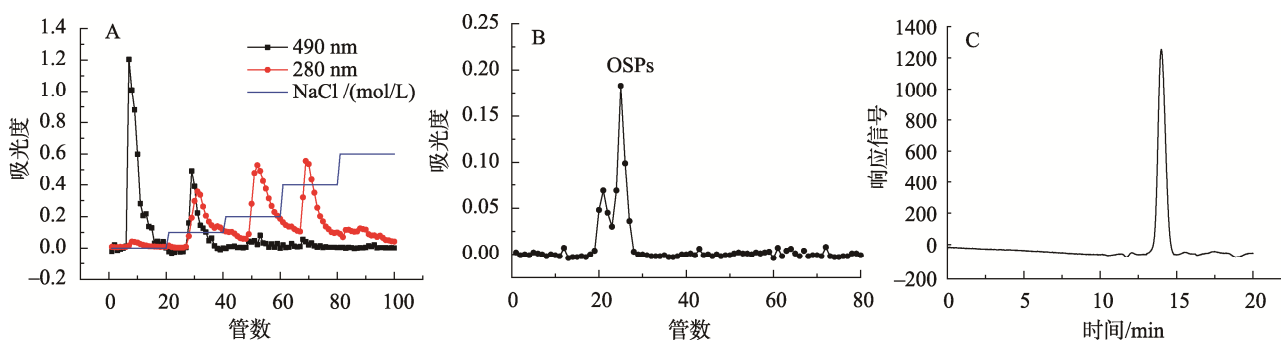
2.3 黄秋葵籽多糖的高碘酸氧化与 Smith 降解

高碘酸钠的消耗量为 0.1173 mmol, 用 0.001 mol/L 氢氧化钠滴定反应液, 得到甲酸生成量为 0.0203 mmol。由高碘酸氧化结果可知, OSPs 消耗了高碘酸且生成甲酸, 说明 OSPs 含有 1→或 1→6 糖苷键; 高碘酸钠消耗量大于甲酸生成量的 2 倍, 说明含有只消耗高碘酸而不生成甲酸的 1→2、1→2,6、1→4、1→4,6 糖苷键^[16]。进一步以甘油、赤藓醇和单糖产物确定糖残基类型。甘油、赤藓醇、混合标准品和 OSPs 经高碘酸氧化和 Smith 降解后的气相色谱图如图 2 所示。由图 2 可知, 降解产物中含有大量的甘油、少量的甘露

糖和木糖, 阿拉伯糖和半乳糖未检出, 表明 OSPs 主要含有 1→、1→6、1→2、1→2,6 糖苷键; 甘露糖可能以 1→3、1→3,6、1→2,3、1→2,4、1→3,4、1→2,3,4 糖苷键存在; 木糖可能以 1→2、1→3、1→2,3、1→4、1→3,4 糖苷键存在。

2.4 黄秋葵籽多糖的红外光谱分析

红外光谱可用于分析糖苷键类型、糖环类型^[17]。OSP 红外光谱分析如图 3 所示, 3416 cm^{-1} 处强而宽的吸收峰为 O-H 伸缩振动峰, 2921 cm^{-1} 吸收峰为 C-H 伸缩振动峰, 这 2 处吸收峰为多糖的特征吸收峰^[18]。1655 cm^{-1} 和 1421 cm^{-1} 处吸收峰代表了 C=O 和 C=C 伸缩振动, 表明 OSPs 中存在蛋白质^[19]。1200~100 cm^{-1} 区域 C-O-C 和 C-O 强伸缩峰代表了多糖的存在^[20]。867 cm^{-1} 处吸收峰表明糖苷键和甘露糖残基的存在^[21]。



注: A: 黄秋葵籽粗多糖的 DEAE-52 色谱柱洗脱曲线; B: 黄秋葵籽中性多糖的 Sephacryl-400 色谱柱洗脱曲线;

C: 纯化黄秋葵籽多糖的 HPLC 色谱图。

图 1 各级黄秋葵籽多糖洗脱曲线和色谱图

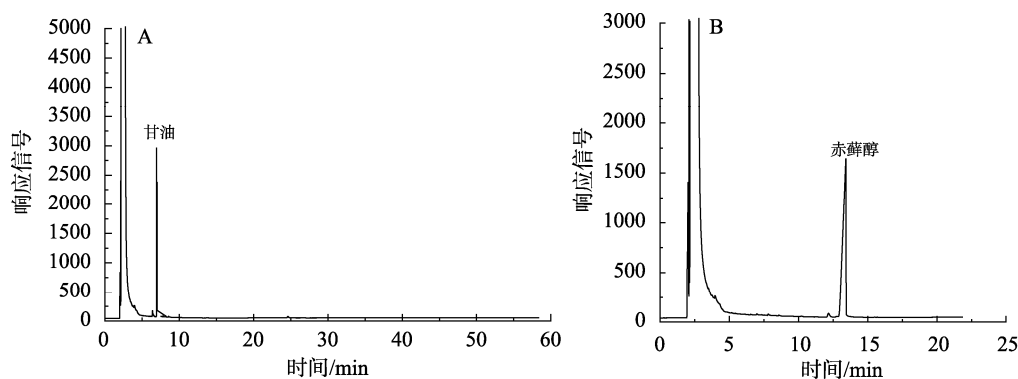
Fig.1 Elution curves and HPLC chromatograms of all levels of okra seed polysaccharides

表 1 OSPs 的成分分析和单糖组成

Table 1 Component analysis and monosaccharide composition of the OSPs

OSP	成分分析					单糖组成			
	总糖*	糖醛酸*	蛋白质*	还原糖*	鼠李糖#	阿拉伯糖#	木糖#	甘露糖#	半乳糖#
含量/%	85.58±0.12	1.02±0.04	8.95±0.05	0.01±0.00	3.37±0.69	8.87±0.36	15.61±2.16	36.98±1.44	31.29±2.20

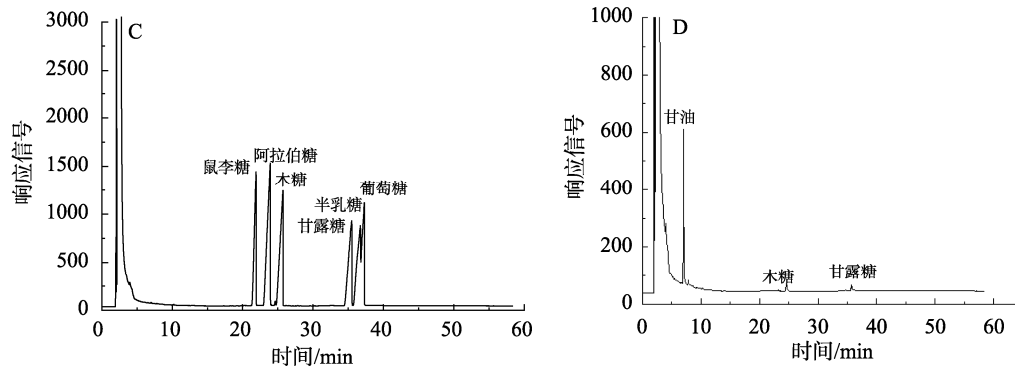
注: *为样品干基含量百分数; #为摩尔百分比, 表中数据按照平均值±SD 形式表示。



注: A: 甘油; B: 赤藓醇。

图 2 各物质的气相色谱图

Fig.2 Gas chromatograms of each substance



注: C: 混合标准品; D: OSPs 高碘酸氧化、Smith 降解后的气相色谱图。

图 2(续) 各物质的气相色谱图

Fig.2 Gas chromatograms of each substance

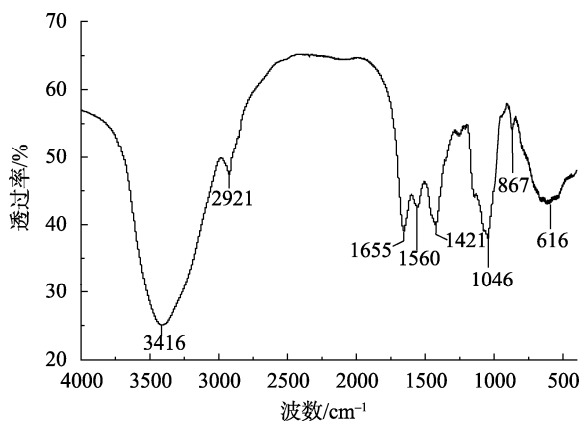


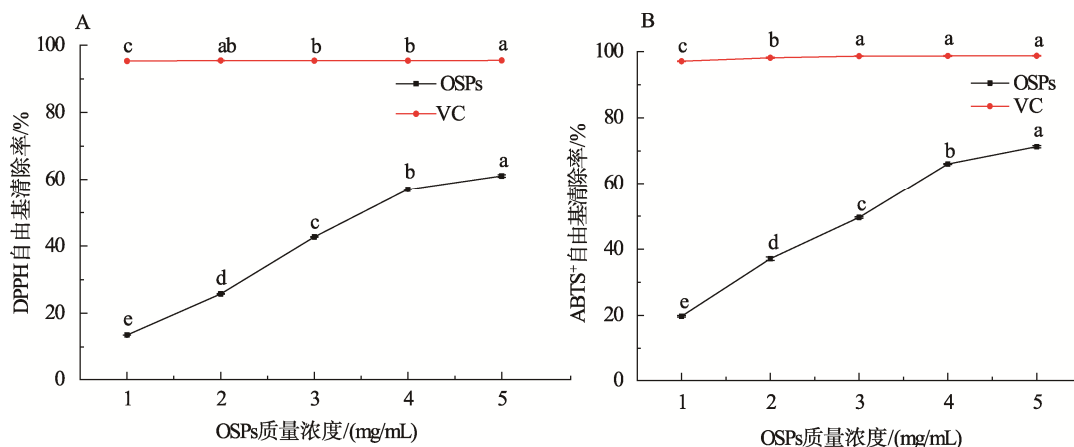
图 3 OSPs 的傅里叶变换红外光谱图

Fig.3 Fourier transform infrared spectrum of the OSPs

2.5 黄秋葵籽多糖的抗氧化活性分析

黄秋葵籽多糖的抗氧化活性, 包括 DPPH、ABTS⁺、

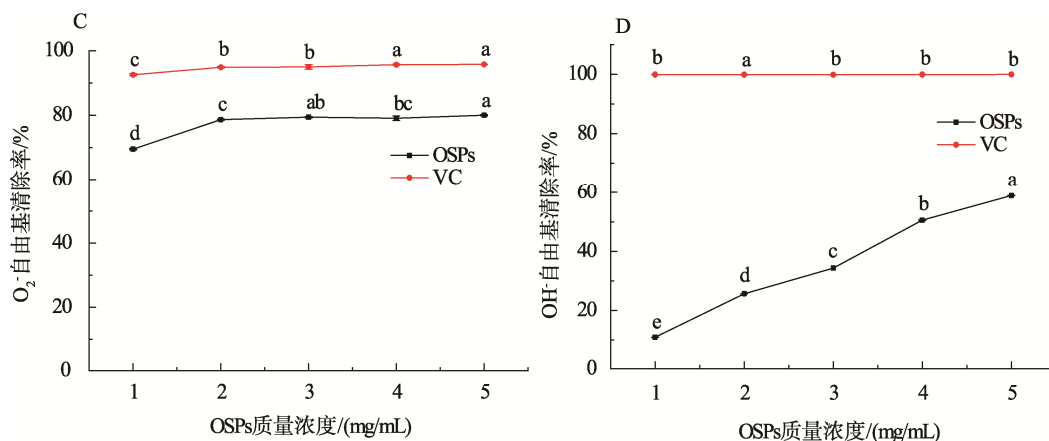
O₂⁻、OH⁻ 自由基清除率测试结果, 如图 4 所示。由图 4A 可知, OSPs 的 DPPH 自由基清除率随着 OSPs 质量浓度的增加而增加, 但低于同浓度下 VC 的 DPPH 自由基清除率; 当 OSPs 质量浓度为 1~5 mg/mL 时, DPPH 自由基清除率为 13.54%~61.08%。图 4B 显示 OSPs 的 ABTS⁺ 自由基清除率同样呈现浓度依赖; 当 OSPs 质量浓度为 5 mg/mL 时, 其 ABTS⁺ 自由基清除率达到 71.3%。图 4C 表明 OSPs 具有很强的 O₂⁻ 自由基清除率; OSPs 质量浓度为 1~5 mg/mL 时对应的 O₂⁻ 自由基清除率在 69.49%~80% 之间, 且当 OSPs 质量浓度高于 3 mg/mL 时, 其 O₂⁻ 自由基清除率无显著性增加, 稳定在 80% 左右。图 4D 显示 OSPs 的 OH⁻ 自由基清除率随浓度变化规律与 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除率的变化一致, 但自由基清除率相对较低, 这可能是由于 OSPs 对不同自由基的清除机制不同所致; O₂⁻ 自由基清除活性相对较高, 可能是因为 OSPs 与 O₂⁻ 自由基结合, 形成稳定的自由基从而终止自由基链式反应^[22]。



注: a~e: 同组中, 不同字母表示具有显著性差异($P < 0.05$)。

图 4 OSPs 的 DPPH (A)、ABTS⁺ (B)、O₂⁻ (C)、OH⁻ (D) 的自由基清除率($n=3$)

Fig.4 DPPH (A), ABTS⁺ (B), O₂⁻ (C) and OH⁻ (D) radical scavenging activities of the OSPs ($n=3$)



注: a~e: 同组中, 不同字母表示具有显著性差异($P < 0.05$)。

图 4(续) OSPs 的 DPPH (A)、ABTS⁺ (B)、O₂^{·-} (C)、OH[·] (D) 的自由基清除率($n=3$)
Fig.4 DPPH (A), ABTS⁺ (B), O₂^{·-} (C) and OH[·] (D) radical scavenging activities of the OSPs ($n=3$)

3 结论

通过分离纯化得到黄秋葵籽多糖组分(OSPs), 重均分子量和数均分子量比值为 1.01, 得率为 0.45%。其由甘露糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖和鼠李糖组成, 摩尔百分比为 36.98:31.29:15.61:8.87:3.37; 主要含有 1→、1→6、1→2、1→2,6 糖苷键。OSPs 具有良好的抗氧化能力, 尤其对 O₂^{·-} 自由基清除率较高。本文目前仅开展了黄秋葵籽中性多糖的分离纯化及其初步结构和抗氧化性分析, 亟待进一步解析黄秋葵籽多糖的分子结构, 更进一步研究其理化性质及功能活性, 以拓展其在食品行业领域的应用。

参考文献

- [1] 刘锐, 许晨, 史春悦, 等. 枸杞多糖及其水解产物的抗氧化活性研究[J]. 中国果菜, 2014, 34(4): 1-7.
LIU R, XU C, SHI CY, *et al.* Antioxidant activities of *Fructus lycii* polysaccharides and their hydrolysates [J]. China Fruit Veget, 2014, 34(4): 1-7.
- [2] 张艳军, 李靖, 张玉领, 等. 黄秋葵多糖缓冻协同微波提取工艺优化及其降血糖作用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 161-167.
ZHANG YJ, LI J, ZHANG YL, *et al.* Optimization of polysaccharide from okra by slow freezing-microwave assisted extraction method and its hypoglycemic activity [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(4): 161-167.
- [3] FAN SJ, ZHANG Y, SUN QH, *et al.* Extract of okra lowers blood glucose and serum lipids in high-fat diet-induced obese C57BL/6 mice [J]. J Nutr Biochem, 2014, 25(7): 702-709.
- [4] 赵云蛟, 郭佳敏, 刘锐, 等. 黄秋葵饮料的抗氧化活性及抗疲劳活性研究[J]. 饮料工业, 2019, 22(1): 5-11.
ZHAO YJ, GUO JM, LIU R. *et al.* Antioxidant and anti-fatigue activities of okra beverage [J]. Beverage Ind, 2019, 22(1): 5-11.
- [5] ADELAKUN OE, OYELADE OJ, ADE-OMOWAYE BIO, *et al.* Influence of pre-treatment on yield chemical and antioxidant properties of

a Nigerian okra seed (*Abelmoschus esculentus* Moench) flour [J]. Food Chem Toxicol, 2009, 47(3): 657-661.

- [6] MONTE LG, SANTI-GADELHA T, REIS LB, *et al.* Purification and biological activities of *Abelmoschus esculentus* seed lectin [J]. Protein J, 2012, 31(8): 674-680.
- [7] ADETUYI FO, IBRAHIM TA. Effect of fermentation time on the phenolic, flavonoid and vitamin C contents and antioxidant activities of okra (*Abelmoschus esculentus*) seeds [J]. Niger Food J, 2014, 32(2): 128-137.
- [8] PETROPOULOS S, FERNANDES A, BARROS L, *et al.* Chemical composition, nutritional value and antimicrobial properties of *Abelmoschus esculentus* seed [J]. Food Funct, 2017, 8(12): 4733-4743.
- [9] 李茜, 吴涛, 刘锐, 等. 植物多糖与肠道菌群互作及其对代谢综合征的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(21): 7649-7655.
LI Q, WU T, LIU R, *et al.* Interaction between plant polysaccharide-intestinal microbiota interaction and its effect on metabolic syndrome [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(21): 7649-7655.
- [10] HU L, LIU R, WU T, *et al.* Structural properties of homogeneous polysaccharide fraction released from wheat germ by hydrothermal treatment [J]. Carbohydr Polym, 2020, 240: 116-238.
- [11] DUBOIS M, GILLES KA, HAMILTON JK, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. Anal Biochem, 1956, 28: 350-356.
- [12] KARAMANOS NK, HJERPE A, TSEGENIDIS T, *et al.* Determination of iduronic acid and glucuronic acid in glycosaminoglycans after stoichiometric reduction and depolymerization using high-performance liquid chromatography and ultraviolet detection [J]. Anal Biochem, 1988, 172(2): 410-419.
- [13] BRADFORD MM. 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: 248-254.
- [14] BALLESTEROS LF, TEIXEIRA JA, MUSSATTO SI. Extraction of polysaccharides by autohydrolysis of spent coffee grounds and evaluation

- of their antioxidant activity [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 157: 258–266.
- [15] BEZERRA IDL, CAILLOT ARC, PALHARES LCGF, *et al.* Structural characterization of polysaccharides from Cabernet Franc, Cabernet Sauvignon and Sauvignon Blanc wines: Anti-inflammatory activity in LPS stimulated RAW 264.7 cells [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 186: 91–99.
- [16] YUN LY, WU T, LIU R, *et al.* Structural variation and microrheological properties of a homogeneous polysaccharide from wheat germ [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(11): 2977–2987.
- [17] JEDDOU KB, CHAARI F, MAKTOUF S, *et al.* Structural, functional, and antioxidant properties of water-soluble polysaccharides from potatoes peels [J]. *Food Chem*, 2016, 205: 97–105.
- [18] LIU XX, LIU HM, YAN YY, *et al.* Structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides extracted from jujube using subcritical water [J]. *LWT*, 2020, 117: 108645.
- [19] GUO R, CAO N, WU Y, *et al.* Optimized extraction and molecular characterization of polysaccharides from *Sophora alopecuroides* L. seeds [J]. *Biol Macromol*, 2016, 82: 231–242.
- [20] KAVITAKE D, DEVI PB, SINGH SP, *et al.* Characterization of a novel galactan produced by *Weissella confusa* KR780676 from an acidic fermented food [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 86: 681–689.
- [21] HUI H, LI X, JIN H, *et al.* Structural characterization, antioxidant and antibacterial activities of two heteropolysaccharides purified from the bulbs of *Lilium davidii* var. *unicolor* cotton [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 133: 306–315.
- [22] WANG Y, MAO F, WEI X. Characterization and antioxidant activities of polysaccharides from leaves, flowers and seeds of green tea [J]. *Carbohydr Polym*, 2012, 88: 146–153.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

作者简介

刘瑞馨, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: liu1374839133@163.com

刘锐, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: lr@tust.edu.cn