

## 干燥方式对秋葵多糖结构特征和抗氧化性的影响

王 喆, 马璐瑶, 林海峰, 聂少平, 殷军艺\*  
(南昌大学 食品科学与技术国家重点实验室 南昌 330047)

**摘要** 秋葵中富含黏性多糖类成分。本文研究干燥方式对秋葵多糖结构特征和抗氧化性能的影响。将秋葵原料分别用热风干燥、自然干燥和真空冷冻干燥处理,用水提醇沉法制备获得水溶性多糖,然后对其基本理化性质、单糖组成、红外光谱、黏度和抗氧化性进行比较分析。结果显示:3种多糖主要由I型鼠李糖半乳糖醛酸(RG-I)果胶组成,具有不同的线性程度。3种多糖红外图谱相似,固体形貌具有一定差异,分子质量分布也有一定差异性。通过测定其表观黏度,发现3种多糖在一定质量分数下均具有弱凝胶性质,其中热风干燥处理的秋葵所提取的多糖黏度最大。此外,3种多糖均具有一定的清除 DPPH 自由基、羟自由基以及螯合金属离子的能力,其中自然干燥处理的秋葵多糖的体外抗氧化能力最强。上述3种干燥方法所得秋葵多糖各有特点,可根据多糖的用途来决定秋葵干燥方式。

**关键词** 秋葵; 多糖; 干燥方式; 结构特征; 抗氧化

**文章编号** 1009-7848(2022)02-0310-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.02.033

秋葵 [*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench] 是药食两用的一年生草本,有多个品种<sup>[1]</sup>。最初生长于非洲,现广泛种植于亚热带与热带地区,在我国一些地区(江西、海南、广东等)也有种植。这种营养成分丰富、有一定保健作用的蔬菜深受人们的喜爱。

秋葵多糖是一种酸性多糖,主要由甘露糖、鼠李糖、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖和半乳糖醛酸等组成<sup>[2]</sup>。它具有抗疲劳<sup>[3]</sup>,抗氧化<sup>[4]</sup>,调节血糖、血脂<sup>[5-6]</sup>,改善肠道状况<sup>[7]</sup>,调节免疫<sup>[8]</sup>等多种功能活性。秋葵多糖在合成材料上有应用前景,可以提高絮凝剂的混凝活性<sup>[9]</sup>,提高乙酰二胺的促生长活性<sup>[10]</sup>,强化其它材料的凝胶性<sup>[11]</sup>,甚至还可用于改变羟基磷灰石的孔隙率,有望作为骨与软骨的修复材料<sup>[12]</sup>。在医药领域,秋葵多糖也有一定价值,它可以合成纳米银离子<sup>[13]</sup>,还可以制成运载药物的包材<sup>[14]</sup>。

新鲜秋葵水分含量高,容易腐败变质,干燥后可以延长秋葵的储存时间并保留其营养成分<sup>[15]</sup>。多糖是秋葵中主要的营养成分之一。对于果蔬的

干燥方法已有一些研究,常用的干燥方法有真空干燥、冷冻干燥、热风干燥、红外干燥和微波干燥等<sup>[16-17]</sup>。不同干燥方式的干燥效率与能耗都有所不同,干燥处理后多糖的结构特征和功能性质也会发生变化。本文以秋葵为原料,去头、尾后采用不同干燥方式前处理,然后提取制备多糖,并用多种分析方法比较多糖的结构,分析干燥方式对秋葵水溶性多糖结构特征以及抗氧化功能的影响,为秋葵加工提供理论基础。

### 1 材料与amp;方法

#### 1.1 材料与试剂

新鲜秋葵购于江西省萍乡市福田镇。

葡萄糖(Glucose, Glc)、半乳糖醛酸(Galacturonic acid, GalA)、鼠李糖(Rhamnose, Rha)、阿拉伯糖(Arabinose, Ara)、半乳糖(Galactose, Gal),美国 Merck (Sigma-Aldrich)公司;葡萄糖醛酸(Glucuronic acid, GlcA)、葡聚糖标准品( $M_w$  2.0 $\times$ 10<sup>6</sup>, 5.0 $\times$ 10<sup>5</sup>, 7.0 $\times$ 10<sup>4</sup>, 4.0 $\times$ 10<sup>4</sup>, 1.0 $\times$ 10<sup>4</sup> u)、考马斯亮蓝 G-250、牛血清蛋白、没食子酸、福林酚,上海阿拉丁试剂有限公司;乙醇,西陇科学股份有限公司;浓硫酸等其它化学试剂为国产分析纯级,国药集团化学试剂有限公司。

#### 1.2 仪器与设备

Aglient 1260 超高效液相色谱仪,美国安捷伦科技有限公司;Bruker AVANCE III HD 400

收稿日期: 2021-02-20

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2017YFD0400104); 国家自然科学基金面上项目(31871775)

作者简介: 王喆(1997—),男,硕士生

通信作者: 殷军艺 E-mail: junyi86@163.com

MHz NMR 光谱仪, 瑞士 Bruker 公司; Dionex ICS 5000 离子色谱仪、Nicolet 5700 红外光谱仪、Varioskan Flash 多功能酶标仪, 美国 Thermo Scientific 公司; JSM-7610F 场发射扫描电镜带能谱仪, 日本电子公司; ARES-G2 流变仪, 美国 TA 公司; TU 1900 紫外分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; 12 L 立式冷冻干燥机, 美国 Labconco 公司; DSH-50 A-1 水分测定仪, 上海佑科仪器仪表有限公司; Milli-Q 超纯水仪, 美国 Millipore 公司; AL104 电子天平, 上海梅特勒-托利多仪器公司。

### 1.3 秋葵干燥与秋葵多糖提取

1.3.1 秋葵预处理 取形态大小相似秋葵等分 3 份, 将其洗净切成 2.5 cm 小段, 一份在 50 °C 干燥 48 h 后粉碎得到热风干燥的秋葵原料, 一份在自然状态下干燥 72 h 后粉碎得到自然干燥的秋葵原料, 一份在 -80 °C 干燥 68 h 后粉碎得到冷冻干燥的秋葵原料。

1.3.2 秋葵多糖提取 称取一定量的秋葵干粉, 按料液比 1:10 加入 95% 乙醇浸泡 24 h 脱色, 过滤收集样品, 挥干乙醇后, 按料液比 1:60 加入蒸馏水, 于 60 °C 下水浴条件下提取 4 h, 离心收集残渣, 沉淀物重复提取一次, 合并上清液, 经过旋转蒸发仪浓缩后缓慢加入 95% 乙醇醇沉 (终体积分数约为 80%), 静置过夜。离心收集沉淀, 加入蒸馏水复溶浓缩后再次醇沉离心收集沉淀, 复溶于水, 浓缩冻干得到秋葵多糖。将从热风干燥、自然干燥和真空冷冻干燥后的秋葵中提取得到的多糖, 分别记为 OPH-60, OPN-60 和 OPF-60。

### 1.4 基本理化性质测定

1) 总糖测定 以葡萄糖为标准品, 采用苯酚-硫酸法测定总糖含量<sup>[18]</sup>。

2) 蛋白质含量测定 以牛血清白蛋白为标准品, 采用考马斯亮蓝法测定蛋白质含量<sup>[19]</sup>。

3) 糖醛酸含量测定 以半乳糖醛酸为标准品, 采用硫酸-咔唑法测定糖醛酸含量<sup>[20]</sup>。

4) 总酚含量测定 以没食子酸为标准品, 采用福林酚法测定总酚含量<sup>[21]</sup>。

### 1.5 单糖组成

称取 5.0 mg 样品加入试管中, 在冰浴条件下加入 12 mol/L 硫酸 0.5 mL 水解, 加入 2.5 mL 超纯水混匀, 于 120 °C 油浴锅中水解 2 h, 然后将水解

液加水定容、稀释, 过孔径为 0.22 μm 的水系滤膜, 进样检测<sup>[22-23]</sup>。

色谱条件: 高效阴离子交换色谱配备 CarboPac™ PA20 保护柱 (3 mm × 30 mm) 和 CarboPac™ PA20 分析柱 (3 mm × 150 mm) 串联; 流动相: A 为 250 mmol/L 氢氧化钠, B 为超纯水, C 为 1 mol/L 醋酸钠, D 为超纯水; 流速为 0.5 mL/min, 进样量为 10 μL。

### 1.6 相对分子质量测定

使用流动相溶解样品配制成 1 mg/mL 溶液, 采用孔径为 0.22 μm 的水系滤膜后进样检测。

色谱条件: 安捷伦 1260 型超高效液相色谱仪系统, 带有 Ultrahydrogel™ 分析柱 (7.8 mm × 300 mm); 流动相为 0.1 mol/L NaNO<sub>3</sub> 和 0.02% NaN<sub>3</sub> 的混合溶液; 流速为 0.6 mL/min; 柱温为 35.0 °C。

### 1.7 红外光谱测定

取适量样品采用压片法, 用傅里叶红外光谱于波长 4 000~500 cm<sup>-1</sup> 区域内进行扫描, 扫描分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>。

### 1.8 核磁共振光谱测定

取多糖样品使其完全溶于 D<sub>2</sub>O 中, 充分交换 12 h 以上然后冻干, 重复 3 次, 最后用 99.9% 的 D<sub>2</sub>O 溶解取适量溶液加入核磁管中, 静置过夜, 采用 400 MHz 核磁共振仪用 5 mm 探头在 50 °C 扫描 64 次进行核磁共振分析。

### 1.9 扫描电镜测定

配置 1 mg/mL 的多糖溶液, 置于液氮中冷却 10 min 后冻干, 取样品进行喷金处理, 用 JSM-6701F 型场发射扫描电镜带能谱仪观察样品表现形态。

### 1.10 表观黏度测定

配置质量分数为 1% 的多糖溶液, 完全溶解后于室温静置 12 h 后用 ARES-G2 流变仪测定, 同时采用 TA-Orchestrator-7 软件采集数据。

测试条件: 温度 25 °C, 40 mm 不锈钢平板, 上下板间距 0.4 mm, 剪切速率 0.01~1 000 s<sup>-1</sup>。

### 1.11 体外抗氧化活性测定

参照文献并略作修改进行试验。分别测定 3 种多糖对 DPPH 自由基清除能力<sup>[24]</sup>、羟自由基清除能力<sup>[25]</sup>以及对金属离子螯合能力<sup>[24]</sup>, DPPH 自由基和羟自由基清除能力试验中以 VC 作为阳性对

照,金属离子螯合能力试验以 EDTA 为阳性对照。根据以下公式得出多糖及阳性对照的清除率和螯合率。

$$\text{清除率/螯合率}(\%) = \frac{A_0 - A_2 + A_1}{A_0} \times 100$$

式中, $A_0$ ——蒸馏水的吸光度; $A_1$ ——多糖溶液本身的吸光度; $A_2$ ——加入多糖后的吸光度。

### 1.12 数据分析

文中表格数据采用 SPSS 的单因素方差分析进行评价,图是根据数据由 Origin 2017 处理绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 秋葵多糖基本理化性质及单糖组成

秋葵经不同干燥方式处理后提取所得水溶性多糖,其基本理化性质和单糖组成结果如表 1 所示。3 种多糖的总糖、糖醛酸、蛋白质、总酚含量分别处于 67.0%~69.6%、34.3%~38.4%、2.6%~4.5% 和 0.6%~1.0%。其中,冷冻干燥后的样品 OPF-60 中总糖和糖醛酸含量最高,达到 69.6%和 38.4%,

这可能是由于冷冻干燥过程中植物机制内会形成冰晶,导致了植物细胞结构更大程度的破裂,促进了样品中活性成分的提取<sup>[28]</sup>,而在热风干燥和自然干燥过程中,糖醛酸等会因为较高的环境温度而变性<sup>[29]</sup>。

通过离子色谱仪测定 3 种干燥方式多糖单糖组成,发现均主要由 Rha (13.9%~14.9%)、Gal (21.4%~23.4%) 和 GalA (10.3%~14.7%) 组成,而在含量上有所不同,具有结构差异。常用 6 种单糖组成比来评价果胶多糖的结构特征<sup>[26-27]</sup>,其中  $R_1$  是果胶主链糖 GalA 与侧链中所含中性糖的比例,常用作估算果胶线性度。 $R_2$  表示鼠李半乳糖醛酸(RG)对果胶的贡献,多糖的  $R_2$  值依次为 OPN-60>OPH-60>OPF-60,表明冷冻干燥降低了果胶的支链程度; $R_3$  值反映了 RG 的半乳糖侧链长度,OPN-60 在 3 种干燥方式中显示出最高的 RG 分支。在这 3 种多糖中,I 型鼠李糖半乳糖醛酸聚糖(RG-I)的范围为 97.7 至 100.0。

表 1 3 种干燥方式秋葵多糖的理化性质( $n=3$ )

Table 1 Physical and chemical properties of okra polysaccharides in three drying methods( $n=3$ )

	OPH-60	OPN-60	OPF-60
多糖得率/% <sup>AB</sup>	6.8 ± 1.8 <sup>a</sup>	8.5 ± 0.7 <sup>a</sup>	7.1 ± 0.5 <sup>a</sup>
总糖含量/% <sup>B</sup>	68.2 ± 4.1 <sup>a</sup>	67.0 ± 3.3 <sup>a</sup>	69.6 ± 3.7 <sup>a</sup>
蛋白质含量/% <sup>B</sup>	2.6 ± 0.5 <sup>a</sup>	4.5 ± 0.4 <sup>b</sup>	3.0 ± 0.1 <sup>c</sup>
糖醛酸含量/% <sup>B</sup>	34.3 ± 0.6 <sup>a</sup>	36.2 ± 0.4 <sup>b</sup>	38.4 ± 0.4 <sup>c</sup>
总酚含量/% <sup>B</sup>	0.7 ± 0.1 <sup>a</sup>	1.0 ± 0.1 <sup>b</sup>	0.6 ± 0.0 <sup>a</sup>
Rha/% <sup>B</sup>	14.1 ± 0.2 <sup>a</sup> (28.9)	13.9 ± 0.9 <sup>a</sup> (28.4)	14.9 ± 0.8 <sup>a</sup> (30.5)
Gal/% <sup>B</sup>	21.4 ± 0.1 <sup>a</sup> (39.9)	22.3 ± 0.4 <sup>ab</sup> (41.6)	23.4 ± 0.3 <sup>b</sup> (43.7)
Glc/% <sup>B</sup>	-	0.1 ± 0.0(0.2)	-
GalA/% <sup>B</sup>	11.6 ± 0.5 <sup>a</sup> (20.2)	10.3 ± 0.8 <sup>a</sup> (17.8)	14.7 ± 0.7 <sup>b</sup> (25.4)
GlcA/% <sup>B</sup>	2.1 ± 1.0 <sup>a</sup> (3.6)	2.5 ± 0.8 <sup>a</sup> (4.4)	1.6 ± 0.3 <sup>a</sup> (2.8)
$R_1$ <sup>C</sup>	0.3	0.3	0.3
$R_2$ <sup>C</sup>	1.4	1.6	1.2
$R_3$ <sup>C</sup>	1.4	1.5	1.4
RG-I <sup>C</sup>	97.7	98.4	100.0

注:A. 得率以秋葵干重计算;B. 结果表示为平均值±标准偏差,括号中值为摩尔百分比;C. 根据文献[26-27]中公式计算所得, $R_1 = \text{GalA}/(\text{Rha} + \text{Ara} + \text{Gal})$ , $R_2 = \text{Rha}/\text{GalA}$ , $R_3 = \text{Gal}/\text{Rha}$ , $\text{HG} = \text{GalA} - \text{Rha}$ , $\text{RG-I} = 2\text{Rha} + \text{Ara} + \text{Gal}$ ;-. 未检测到;同一行不同字母间具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

### 2.2 分子质量分布

采用 HPGPC 法测定干燥方式对多糖的分子

质量分布的影响(图 1),根据标准品洗脱的时间和分子质量建立标准曲线计算 3 种多糖的分子质

量,3种多糖在7~16 min范围内主要有5个信号峰,信号峰的分布范围较宽且互相重叠,其中10 min左右的峰分子质量最大( $>2 \times 10^6$  u),3种干燥方式多糖分子质量分布基本相似,然而在低分子质量区域还是存在一定的不同。

表2列出了秋葵多糖每个信号峰对应的具体分子质量数值,3种多糖的分子质量分布在 $1.76 \times 10^4 \sim 2.04 \times 10^7$  u,出峰时间最早的组分P1的相对分子质量最大的为OPN-60和OPF-60,最小的为OPH-60。

### 2.3 干燥方式对秋葵多糖红外光谱的影响

由图2可知,3400  $\text{cm}^{-1}$ 处的强吸收峰为多糖类物质的特征吸收峰,是O-H的伸缩振动<sup>[30]</sup>。在2970  $\text{cm}^{-1}$ 和2925  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰可能为 $\text{CH}_2$ 、 $\text{CH}_3$ 或GalA单元的C-H伸缩振动<sup>[31]</sup>。而在1600  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰为COO-的伸缩振动<sup>[32]</sup>。1400  $\text{cm}^{-1}$ 和1260  $\text{cm}^{-1}$ 附近的弱吸收峰为GalA和GlcA中羧酸的C-O伸缩振动<sup>[33]</sup>。此外,1048  $\text{cm}^{-1}$ 附近为果胶的特征吸收峰<sup>[34]</sup>;在880  $\text{cm}^{-1}$ 左右的吸收峰表明多糖可能存在 $\beta$ 构型,而840  $\text{cm}^{-1}$ 也出现了代表 $\alpha$ 构型的弱吸收峰。由以上结果可知,3种多糖主要官能团相似,且都具有果胶多糖的特征吸收峰。

### 2.4 干燥方式对秋葵多糖<sup>1</sup>H NMR的影响

图3为不同干燥方式秋葵多糖于50  $^{\circ}\text{C}$ 条件下的<sup>1</sup>H NMR谱图。与文献报道相比本试验的NMR谱图向低场方向略有偏移。3种多糖的谱图

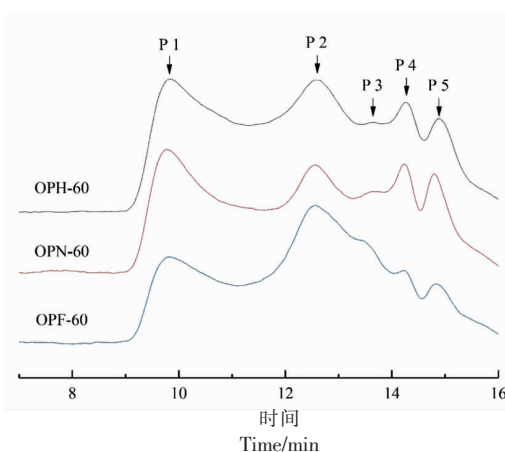


图1 3种干燥方式秋葵多糖的HPGPC图

Fig.1 HPGPC diagram of okra polysaccharides in three drying methods

表2 3种干燥方式秋葵多糖的分子质量分布(u)

Table 2 Molecular weight distribution of okra polysaccharides in three drying methods (u)

	OPH-60	OPN-60	OPF-60
P 1	$1.97 \times 10^7$	$2.04 \times 10^7$	$2.04 \times 10^7$
P 2	$4.18 \times 10^5$	$4.46 \times 10^5$	$4.36 \times 10^5$
P 3	$1.11 \times 10^5$	$0.90 \times 10^5$	$2.59 \times 10^5$
P 4	$4.30 \times 10^4$	$4.40 \times 10^4$	$4.42 \times 10^4$
P 5	$1.76 \times 10^4$	$2.00 \times 10^4$	$1.97 \times 10^4$

虽然相似,但也有一定的差异。很明显,3种多糖中都含有非支链的 $\alpha$ -1,2-连接的鼠李糖( $\delta$  1.41)和支链 $\alpha$ -1,2,4-连接的鼠李糖( $\delta$  1.49),在 $\delta$  2.07~

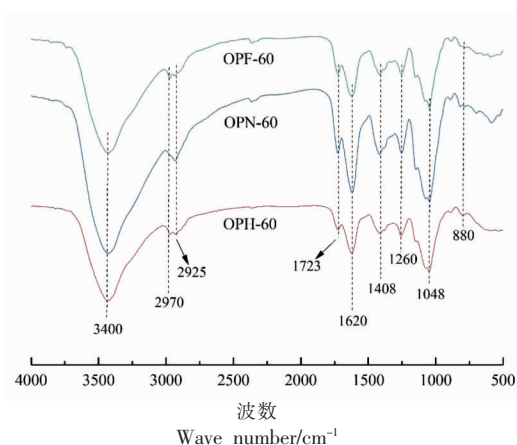


图2 3种干燥方式对秋葵多糖红外光谱特征的影响

Fig.2 Effects of three drying methods on infrared spectra characteristics of okra polysaccharides

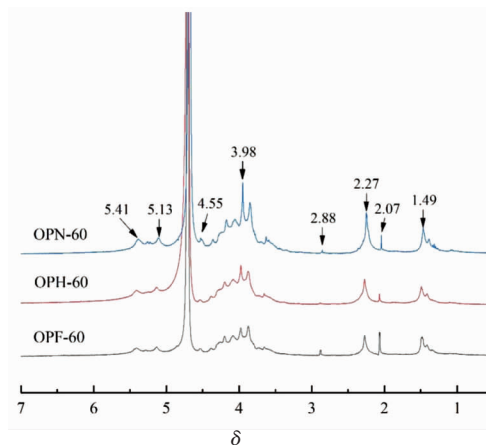


图3 3种干燥方式对秋葵多糖<sup>1</sup>H NMR谱图的影响

Fig.3 Effects of three drying methods on <sup>1</sup>H NMR diagram of okra polysaccharides

2.27 范围的共振信号为 $-\text{CH}_3$ 的质子峰,证明了O-乙酰基的存在<sup>[35]</sup>。在 $\delta$  4.45~4.65 范围内出现的异头信号表明存在末端半乳糖或1,4-连接的半乳糖<sup>[36]</sup>。在 $\delta$  3.98 处有一处较大的信号峰,可能是由于甲基与半乳糖醛酸上羧基的结合所致<sup>[37]</sup>。

## 2.5 干燥方式对秋葵多糖表面形貌的影响

由图4可知,3种多糖的微观结构相似,其主

体均由线性结构和片状结构组成。其中,OPH-60为线性结构,OPN-60为线性结构和片状结构交联,OPF-60主要为线性和片状结构,除此之外还分布着多孔结构,这是由于原料在冷冻干燥过程中,水分直接由固态升华到气态而未受到外力的破坏所致<sup>[28]</sup>。

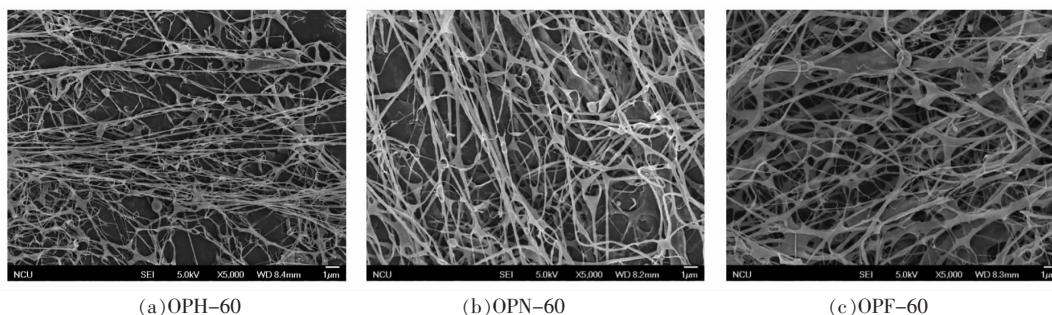


图4 3种干燥方式对秋葵多糖微观结构的影响(5 000×)

Fig.4 Effects of three drying methods on the microstructure of okra polysaccharides (5 000×)

## 2.6 干燥方式对秋葵多糖流变特性的影响

由图5可知,剪切速率在 $0.1\sim 1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 范围,3种秋葵多糖的表观黏度随着剪切速率的增大而减小,表现出明显的剪切稀化现象,多糖黏度减小原因是随着剪切速率的加快,分子间的相互作用力被破坏,使得多糖流动性增大<sup>[38]</sup>。在 $0.1\sim 1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 范围的剪切速率下,OPH-60表观黏度最大,OPF-60表观黏度其次,OPN-60的表观黏度最小,这可能与样品总蛋白质与单糖组成的类型和含量有关<sup>[39]</sup>,例如有文献报道称,蛋白质含量降低,黏度增大<sup>[40]</sup>。此外3个组分间的黏度差异可能和分子质量也有关系,即通过测定过膜前、后多糖的糖含量,发现其含量差异较大,滤膜对于多糖的截留率从大到小依次为OPF-60(50.93%)>OPN-60(45.86%)>OPH-60(40.58%),这可能是由于较小孔径的水系滤膜将多糖中较大的分子质量的组分截留在膜外,因此导致较大分子质量组分未通过仪器检测,使得测得的分子质量相似。

采用Power-law模型计算3种干燥方式秋葵多糖剪切稀化的流变参数,模型拟合 $R^2>0.99$ ,表3中可以发现它们的流动特性指数均小于1,表明3种多糖均属于假塑性流体。它们的K值大小依次是OPH-60>OPF-60>OPN-60,与表观黏度的变

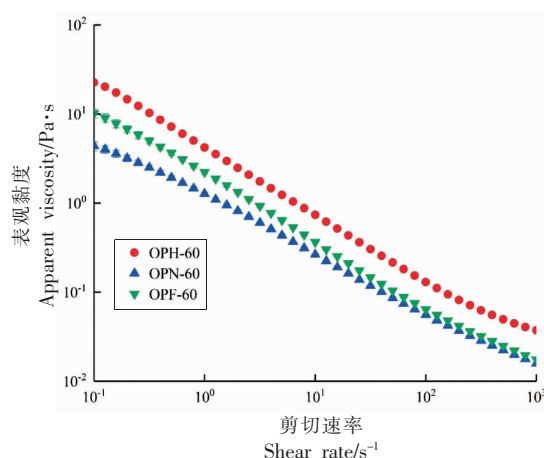


图5 3种干燥方式对秋葵多糖表观黏度的影响

Fig.5 Effects of three drying methods on apparent viscosity of okra polysaccharides

表3 3种干燥方式秋葵多糖的剪切稀化流变参数( $n=3$ )

Table 3 Rheological parameters of shear thinning of okra polysaccharide in three drying modes ( $n=3$ )

	OPH-60	OPN-60	OPF-60
K	$4.21 \pm 0.13^c$	$1.27 \pm 0.05^a$	$2.22 \pm 0.12^b$
n	$0.24 \pm 0.00^a$	$0.32 \pm 0.01^b$	$0.22 \pm 0.01^a$
R <sup>2</sup>	$0.99 \pm 0.00$	$0.99 \pm 0.00$	$0.99 \pm 0.00$

注:K:稠度系数;n:流动性指数;R<sup>2</sup>:相关系数;同一行不同字母间具有显著性差异( $P<0.05$ )。

化趋势一致,OPN-60 的  $n$  值最大,其假塑性相对最低。

## 2.7 干燥方式对秋葵多糖体外抗氧化活性的影响

图 6 显示 3 种秋葵多糖对 DPPH 自由基、羟自由基清除能力和金属离子螯合能力。从图中可以看出,随着多糖质量浓度的增加,3 种多糖对 DPPH 自由基、羟自由基清除能力和金属离子螯合能力也都增强。在相同的多糖质量浓度,对于 DPPH 自由基的清除能力依次为 OPN-60>OPH-60>OPF-60;对于羟自由基,OPN-60 的清除能力最强,OPH-60 和 OPF-60 的清除能力相似;3 种多糖对金属离子的螯合能力依次为 OPN-60>OPH-60>OPF-60。总体数据来看,3 种秋葵多糖都具有体外抗氧化活性,OPN-60 的体外抗氧化活性最强,这可能是与多糖中的总酚含量有一定关系,有研究表明多糖中其抗氧化作用的主要物质是多酚<sup>[41]</sup>。

## 3 结论

3 种干燥方式处理秋葵,得到的秋葵多糖都是 RG-I 型果胶多糖,它们的得率和化学组成都有所不同,秋葵多糖的蛋白质含量、糖醛酸含量、总酚含量出现了显著变化。通过单糖组成、红外光谱和表面形貌分析,发现干燥方式主要对多糖相关成分的含量(如单糖组成比例、官能团响应值之间的比例)产生影响,而对它们的种类影响不明显。3 种干燥方式秋葵多糖都表现出弱凝胶行为,都属于假塑性流体,热风干燥处理的秋葵所提取的多糖黏度相对较大,在体外抗氧化活性中可以发现 OPN-60 的抗氧化活性最好,真空冷冻干燥得到的多糖中总糖、糖醛酸含量最高。3 种方法在对样品的处理后得到的多糖都有其各自结构和功能特性。

## 参 考 文 献

- [1] NIE X R, LI H Y, DU G, et al. Structural characteristics, rheological properties, and biological activities of polysaccharides from different cultivars of okra (*Abelmoschus esculentus*) collected in China[J].

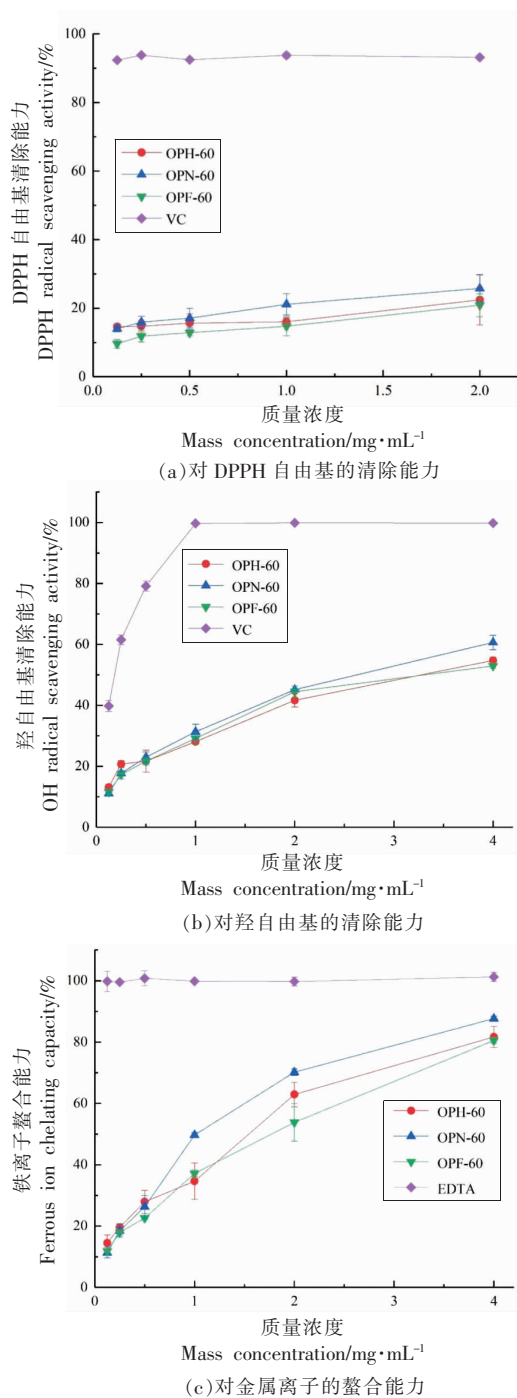


图 6 3 种干燥方式秋葵多糖的抗氧化能力

Fig.6 Antioxidant capacity of okra polysaccharide in three drying methods

International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 139: 459-467.

- [2] 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.
- ZHOU Y Q, WU G B, CHEN F H. Analysis of monosaccharide composition of polysaccharides from okra by pre-column derivatization high performance liquid chromatography[J]. Food Science, 2019, 40(4): 266–271.
- [3] 钟雨. 黄秋葵抗疲劳活性部位筛选及其生化机制研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- ZHONG Y. Study on screening anti-fatigue part of okra and its biochemical mechanism in mice [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.
- [4] 周志航, 苏文浩. 黄秋葵嫩荚粗多糖的抗氧化活性研究[J]. 农产品加工, 2018(3): 11–15.
- ZHOU Z H, SU W H. Antioxidant activity of okra fruit crude polysaccharides[J]. Farm Products Processing, 2018(3): 11–15.
- [5] LIU J, ZHAO Y P, WU Q X, et al. Structure characterisation of polysaccharides in vegetable ‘okra’ and evaluation of hypoglycemic activity[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 211–216.
- [6] 张灵敏. 黄秋葵水提物对实验性2型糖尿病大鼠血糖、血脂及尿酸水平的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- ZHANG L M. The effects of the aqueous extract of okra on metabolisms of glucose, lipids, and uric acid in the experimental model of type 2 diabetes mellitus rats[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [7] GAO H, ZHANG W C, WU Z Y, et al. Preparation, characterization and improvement in intestinal function of polysaccharide fractions from okra [J]. Journal of Functional Foods, 2018, 50: 147–157.
- [8] SHEU S C, LAI M H. Composition analysis and immuno-modulatory effect of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) extract[J]. Food Chemistry, 2012, 134(4): 1906–1911.
- [9] FREITAS T K F S, OLIVEIRA V M, DE SOUZA M T F, et al. Optimization of coagulation–flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 76: 538–544.
- [10] HIROSE K, ENDO K, HASEGAWA K. A convenient synthesis of lepidimoide from okra mucilage and its growth-promoting activity in hypocotyls [J]. Carbohydrate Research, 2004, 339(1): 9–19.
- [11] CHEN J, CHEN W T, DUAN F X, et al. The synergistic gelation of okra polysaccharides with kappa-carrageenan and its influence on gel rheology, texture behaviour and microstructures[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 425–435.
- [12] DIMOPOULOU M, RITZOULIS C, PAPASTERGIADIS E S, et al. Composite materials based on okra hydrocolloids and hydroxyapatite[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 42: 348–354.
- [13] MOLLICK M M R, RANA D, DASH S K, et al. Studies on green synthesized silver nanoparticles using *Abelmoschus esculentus* (L.) pulp extract having anticancer (*in vitro*) and antimicrobial applications[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(8): 2572–2584.
- [14] OGAJI I J, HOAG S W. Novel extraction and application of okra gum as a film coating agent using theophylline as a model drug[J]. Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research, 2014, 5(2): 70–77.
- [15] YUAN Q, HE Y, XIANG P Y, et al. Influences of different drying methods on the structural characteristics and multiple bioactivities of polysaccharides from okra (*Abelmoschus esculentus*) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 147: 1053–1063.
- [16] YAN J K, WU L X, QIAO Z R, et al. Effect of different drying methods on the product quality and bioactive polysaccharides of bitter melon (*Momordica charantia* L.) slices[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 588–596.
- [17] FU Y, FENG K L, WEI S Y, et al. Comparison of structural characteristics and bioactivities of polysaccharides from loquat leaves prepared by different drying techniques[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 145: 611–619.
- [18] DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350–356.
- [19] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein–dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2): 248–254.
- [20] RADHAKRISHNAMURTHY B, BERENSON G S.

- Effect of temperature and time of heating on the carbazole reaction of uronic acids and acid mucopolysaccharides[J]. *Analytical Chemistry*, 1963, 35(9): 253–259.
- [21] SADILOVA E, STINTZING F R. Anthocyanins, colour and antioxidant properties of eggplant (*Solanum melongena* L.) and violet pepper (*Cap-sicum annuum* L.) peel extracts[J]. *Zeitschrift Fur Naturforschung C A Journal of Biosciences*, 2006, 61(7/8): 527–535.
- [22] LIU X Y, MA L Y, WANG L, et al. Monosaccharide composition analysis of arabinoxylan by high performance anion exchange chromatography with pulsed amperometric detection[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2017, 45(3): 416–422.
- [23] FENG L, YIN J Y, NIE S P, et al. Fractionation, physicochemical property and immunological activity of polysaccharides from *Cassia obtusifolia*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 91: 946–953.
- [24] CAO Y Y, JI Y H, LIAO A M, et al. Effects of sulfated, phosphorylated and carboxymethylated modifications on the antioxidant activities *in-vitro* of polysaccharides sequentially extracted from *Amana edulis*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 146: 887–896.
- [25] CHEN S H, HUANG H L, HUANG G L. Extraction, derivatization and antioxidant activity of cucumber polysaccharide[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 140: 1047–1053.
- [26] HOUBEN K, JOLIE R P, FRAEYE I, et al. Comparative study of the cell wall composition of broccoli, carrot, and tomato: Structural characterization of the extractable pectins and hemicelluloses[J]. *Carbohydrate Research*, 2011, 346(9): 1105–1111.
- [27] DENMAN L J, MORRIS G A. An experimental design approach to the chemical characterisation of pectin polysaccharides extracted from *Cucumis melo* Inodorus[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 117: 364–369.
- [28] ZHANG C C, LIU D Q, GAO H Y. Kinetics, physicochemical properties, and antioxidant activities of *Angelica keiskei* processed under four drying conditions [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2018, 98: 349–357.
- [29] 李然, 段梦颖, 尚红梅, 等. 干燥方式对白三叶多糖理化性质和抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(17): 98–103.
- LI R, DUAN M Y, SHANG H M, et al. Effects of drying methods on physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharides from the aerial part of *Trifolium repens* L.[J]. *Food Science*, 2018, 39(17): 98–103.
- [30] CHEN J C, ZHANG X, HUO D, et al. Preliminary characterization, antioxidant and alpha -glucosidase inhibitory activities of polysaccharides from *Mallotus furetianus* [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 215: 307–315.
- [31] MONSOOR M A, KALAPATHY U, PROCTOR A. Determination of polygalacturonic acid content in pectin extracts by diffuse reflectance fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2001, 74(2): 233–238.
- [32] KAZEMI M, KHODAIYAN F, HOSSEINI S S. Utilization of food processing wastes of eggplant as a high potential pectin source and characterization of extracted pectin [J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 339–346.
- [33] VRIESMANN L C, DE OLIVEIRA P, CARMEN L. Polysaccharides from the pulp of cupuassu (*Theobroma grandiflorum*): Structural characterization of a pectic fraction[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77(1): 72–79.
- [34] COIMBRA M A, BARROS A, BARROS M, et al. Multivariate analysis of uronic acid and neutral sugars in whole pectic samples by FT-IR spectroscopy [J]. *Carbohydrate Polymers*, 1998, 37(3): 241–248.
- [35] SHI X D, YIN J Y, ZHANG L J, et al. Studies on polysaccharides from leaf skin of *Aloe barbadensis* Miller: Part II. Structural characteristics and molecular properties of two lower molecular weight fractions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 86: 50–61.
- [36] SENGKHAMPARN N, VERHOEF R, SCHOLS H A, et al. Characterisation of cell wall polysaccharides from okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) [J]. *Carbohydrate Research*, 2009, 344(14): 1824–1832.
- [37] ALBA K, LAWS A P, KONTOGIORGOS V. Isolation and characterization of acetylated LM -pectins extracted from okra pods [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 43: 726–735.
- [38] 刘晓霞. 黄秋葵花果胶类多糖的提取工艺及其性质



- 的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- LIU X X. Extraction and characterization of pectin polysaccharides from okra flower[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [39] YOUSSEF M K, WANG Q, CUI S W, et al. Purification and partial physicochemical characteristics of protein free fenugreek gums[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(8): 2049–2053.
- [40] AMID B T, MIRHOSSEINI H. Influence of different purification and drying methods on rheological properties and viscoelastic behaviour of durian seed gum [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(1): 452–461.
- [41] BERMUDEZ –ORIA A, RODRIGUEZ –GUTIERREZ G, ALAIZ M, et al. Polyphenols associated to pectic polysaccharides account for most of the antiproliferative and antioxidant activities in olive extracts [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 62: 103530.

### Effects of Drying Methods on Structure and Antioxidant Properties of Okra Polysaccharide

Wang Zhe, Ma Luyao, Lin Haifeng, Nie Shaoping, Yin Junyi\*

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047)

**Abstract** Okra is rich in viscous polysaccharide. This paper intended to study the effects of different drying methods on the structure and antioxidant properties of okra polysaccharide. After the okra raw material dried by hot air, natural drying and vacuum freeze-drying, the water-soluble polysaccharide was prepared by water extraction and alcohol precipitation method. Then, the basic physicochemical properties, monosaccharide composition, infrared spectrum, viscosity and antioxidant properties of okra were compared and analyzed. The results showed that the three polysaccharides were mainly composed of type I rhamnogalacturonan (RG-I) pectin, but with different linearity. Infrared spectra of the three polysaccharides were similar, while the solid morphology and molecular weight distribution were different to some extent. By measuring the apparent viscosity, it was found that the three polysaccharides had weak gel properties at a certain mass fraction, among which the polysaccharide viscosity was the highest in okra dried by hot air. In addition, the three polysaccharides all had certain ability of scavenging DPPH free radical, hydroxyl free radical and chelating metal ion, among which the antioxidant ability of okra polysaccharide was the strongest after natural drying treatment *in vitro*. In conclusion, the polysaccharides obtained from okra through the above three drying methods have their own characteristics, and the final drying method of okra can be determined according to the purpose of the final polysaccharide.

**Keywords** okra; polysaccharide; drying method; structural characteristics; antioxidant