

油茶蒲纯化多糖的制备与组分、结构分析

舒斌斌^{1,2,3}, 吴苏喜^{1,2,3}, 谢妍祎¹, 袁成华², 冯宗义³

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南省康多利油脂有限公司, 湖南 常德 415700;
3. 湖南亚美生物科技有限公司, 湖南 株洲 412300)

摘要:为高值化开发利用油茶蒲资源,以油茶蒲为原料,采用水提-醇沉工艺提取粗多糖,采用钠型732阳离子吸附树脂进行纯化并制备油茶蒲纯化多糖。采用紫外可见光谱扫描鉴定洗脱液组分多糖的纯度,利用离子色谱分析油茶蒲纯化多糖的单糖组成,利用红外光谱分析油茶蒲纯化多糖主链结构及官能团,并采用扫描电子显微镜分析其表面结构特征。结果表明:油茶蒲原料的多糖含量为11.38%,油茶蒲纯化多糖纯度为87.40%、得率为2.33%;油茶蒲纯化多糖的单糖组成为岩藻糖0.64%、阿拉伯糖7.68%、半乳糖3.74%、葡萄糖76.43%、木糖2.77%、甘露糖1.60%、半乳糖醛酸5.34%、葡萄糖醛酸1.33%、甘露糖醛酸0.47%;油茶蒲纯化多糖是一种主链为 β 型吡喃糖的酸性多糖,表面紧致略显光滑、有孔洞及气泡状颗粒。综上,油茶蒲通过水提、醇沉和柱层析纯化处理,其多糖纯度提高,可为油茶蒲的后续构效关系探究和工业化开发提供理论基础。

关键词:油茶蒲;多糖;单糖组成;结构;纯化

中图分类号:TQ281;TS229

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2023)04-0119-06

Preparation and component, structure analysis of purified polysaccharides from *Camellia oleifera* fruit hull

SHU Binbin^{1,2,3}, WU Suxi^{1,2,3}, XIE Yanyi¹, YUAN Chenghua², FENG Zongyi³

(1. College of Food and Bio-Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Kangduoli Oil Co., Ltd., Changde 415700, Hunan, China; 3. Hunan Yamei Biology Science and Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412300, Hunan, China)

Abstract: In order to develop and utilize *Camellia oleifera* fruit hull resources with high value, the crude polysaccharide was extracted by water extraction-alcohol precipitation process with *Camellia oleifera* fruit hull as raw material, and it was purified by sodium type 732 cation adsorption resin to obtain purified polysaccharide of *Camellia oleifera* fruit hull. The purity of the eluent component polysaccharide was determined by ultraviolet spectroscopy, the monosaccharide composition of purified polysaccharide of *Camellia oleifera* fruit hull was analyzed by ion chromatography, the main chain structure and functional groups of the purified polysaccharide was analyzed by infrared spectroscopy, and the surface structure characteristics of the purified polysaccharide was analyzed by scanning electron microscopy. The results showed that the polysaccharide content of *Camellia oleifera* fruit hull was 11.38%. The purity of purified polysaccharide of *Camellia oleifera* fruit hull was 87.40% and the yield was 2.33%. The monosaccharide composition of the purified polysaccharide of *Camellia oleifera* fruit hull was fucose 0.64%, arabinose 7.68%, galactose 3.74%, glucose 76.43%, xylose 2.77%, mannose 1.60%,

galacturonic acid 5.34%, glucuronic acid 1.33%, and mannuronic acid 0.47%. The purified polysaccharide obtained from *Camellia oleifera* fruit hull was a kind of acidic polysaccharide with β -type pyranose as main chain, and its surface was tight and slightly smooth with holes and

收稿日期:2022-06-02;修回日期:2022-12-04

基金项目:中央引导地方科技发展专项资金“茶油高效精细化压榨技术与产业化示范”(2020ZYQ040)

作者简介:舒斌斌(1996),男,硕士研究生,研究方向为油茶副产品加工(E-mail)619304279@qq.com。

通信作者:吴苏喜,教授,博士(E-mail)wsx6524@163.com。

bubble particles. In summary, after water extraction, alcohol precipitation and column chromatography purification, the polysaccharide purity of *Camellia oleifera* fruit hull gradually increased, which could provide a theoretical basis for the follow-up structure-activity relationship exploration and industrial development of *Camellia oleifera* fruit hull.

Key words: *Camellia oleifera* fruit hull; polysaccharides; monosaccharide composition; structure; purification

油茶蒲,也称油茶果壳,是我国特有的木本油料油茶果的外皮,约占整个油茶果质量的60%^[1]。据统计,2020年我国油茶林种植面积约为453万hm²,年产油茶籽油约63万t,其副产物油茶蒲约300万t^[2]。目前,油茶蒲大多用作生物质燃料或肥料,价格仅500~600元/t,被严重低值化^[3]。油茶蒲中含有丰富的植物多糖^[1],而植物多糖具有多种生物活性,如调节免疫、抗肿瘤、抗凝血、消炎镇痛、降血糖、抗氧化、调节肠道菌群等^[4-5]。因此,研究油茶蒲多糖具有开发油茶加工废弃物资源、促进油茶产业提质增效等重要意义。

目前,人们对油茶蒲多糖的研究主要围绕提取、纯化以及抗氧化功效,而对其单糖组成、结构特征等基础研究报道较少。本文在制备油茶蒲纯化多糖的基础上,对其单糖组成、表面结构特征进行考察,以期对油茶蒲多糖的深度开发利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

油茶蒲:由湖南省康多利油脂有限公司提供的油茶果,经晾晒、裂开所得。

苯酚、浓硫酸、葡萄糖、无水乙醇、三氯乙酸(TCA)、活性炭、三氟乙酸(TFA)、甲醇、氢氧化钠、乙酸钠、溴化钾均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;甘露糖、木糖、果糖、核糖、半乳糖、岩藻糖、葡萄糖、阿拉伯糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、甘露糖醛酸均为分析纯,Sigma公司。

1.1.2 仪器与设备

UV-5200紫外可见分光光度计,上海元析仪器有限公司;Scientz-10N冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;Nicolet Avatar 370傅里叶红外光谱仪,上海昊扩科技发展有限公司;EM-30 Plus扫描电子显微镜,韩国Coxem公司;Thermo(Dionex)ICS-5000离子色谱仪(配电化学检测器),赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 油茶蒲多糖的制备

油茶蒲粗多糖的制备参考沈建福等^[6]的水提

法并适当改进。将油茶蒲烘干、粉碎并过0.178 mm(80目)筛,取适量筛下粉,按料液比1:40加水,在90℃下提取1.5 h,得到水提液(V₁);按醇水体积比4:1添加无水乙醇,于4℃下醇沉12 h,冻干醇沉物,得到水提醇沉物;取适量水提醇沉物溶于蒸馏水,按体积比1:1加入质量分数20%的TCA溶液,振荡,4℃下静置12 h后离心分离脱除蛋白,上清液中按料液比1.5:100加入活性炭,调节pH至4,于50℃下搅拌脱色70 min,离心分离,得到油茶蒲多糖脱色液(V₂)。

油茶蒲纯化多糖的制备参考尹丽敏^[7]的方法。对钠型732阳离子吸附树脂预处理,并装柱;将多糖脱色液(V₂)缓慢加入层析柱,之后用蒸馏水洗脱,洗脱流速为2.0 mL/min,按10 mL 1管收集洗脱液,总计收集30管;使用苯酚硫酸法在490 nm下测定每管洗脱液的吸光度,绘制洗脱曲线。分别汇总最高洗脱峰的洗脱液(V₃)和次高洗脱峰的洗脱液(V₄),将V₃旋蒸、冻干得油茶蒲纯化多糖。

1.2.2 多糖含量的测定

采用苯酚硫酸法测定多糖含量,具体参考汤慧民等^[8]的方法。

1.2.2.1 样品处理

对于液体样品(油茶蒲水提液),取1.0 mL样品用蒸馏水稀释50倍,制成样品测试液;对于固体样品(水提醇沉物和油茶蒲纯化多糖),取0.1 g样品,用蒸馏水溶解定容至100 mL,再取1.0 mL溶解液用蒸馏水稀释50倍,制成样品测试液。

1.2.2.2 葡萄糖标准曲线的绘制

参考刘晓涵等^[9]的方法,以葡萄糖质量浓度(C, μg/mL)为横坐标、吸光度(A)为纵坐标制作标准曲线,得回归方程: $A = 0.0097C + 0.0026$, $R^2 = 0.9995$ 。

1.2.2.3 多糖含量的测定

取1.0 mL样品测试液,按照1.2.2.2方法测得吸光度A₁,根据回归方程计算测试液中多糖质量浓度(C₁),再根据公式(1)计算样品中多糖的含量(H)。

$$H = C_1 NV \times 10^{-6} / W \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_1 为 1.0 mL 测试液对应的多糖质量浓度, $\mu\text{g}/\text{mL}$; N 为稀释倍数, 50; V 为测试液体积, mL; W 为样品质量, g。

1.2.2.4 多糖产品得率计算

将提取、纯化阶段所得多糖产品, 按照公式(2)计算其多糖产品得率(T)。

$$T = W_1 / W_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_1 为水提醇沉物或油茶蒲纯化多糖的质量, g; W_0 为油茶蒲原料质量, g。

1.2.3 油茶蒲多糖的纯度鉴定

将 1.2.1 中收集的多糖脱色液 V_2 、洗脱液 V_3 和洗脱液 V_4 分别在 190 ~ 800 nm 范围内进行紫外可见光谱扫描, 以扫描波长为横坐标、吸光度为纵坐标绘制油茶蒲多糖溶液的紫外光谱扫描曲线。

1.2.4 油茶蒲多糖的单糖组成测定

1.2.4.1 色谱条件

色谱柱为 DionexTM CarboPacTM PA20 (Thermo Fisher Scientific); 流动相 A 相为 ddH₂O、B 相为 100 mmol/L NaOH、C 相为 100 mmol/L NaOH / 200 mmol/L NaAC; 流速 0.5 mL/min; 洗脱梯度为 0 ~ 25 min 时 97.5% A、2.5% B, 25 ~ 40 min 时 77.5% A、2.5% B、20% C, 40 ~ 60 min 时 97.5% A、2.5% B。

1.2.4.2 标准工作液的配制

取 15 mL EP 刻度离心管, 加入 8 mL 无菌水, 依次加入岩藻糖 (Fuc)、阿拉伯糖 (Ara)、半乳糖 (Gal)、葡萄糖 (Glc)、木糖 (Xyl)、甘露糖 (Man)、果糖 (Fru)、核糖 (Rib)、半乳糖醛酸 (Gal-AC)、葡萄糖醛酸 (Glc-AC)、甘露糖醛酸 (Man-AC) 各 100 mg, 溶解后定容至 10 mL, 配制成 10 mg/mL 的混标母液, 再梯度稀释成 5、10、15、20、25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 和 30 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 标准工作液。

1.2.4.3 标准品定量分析回归方程的确定

取标准工作液, 按 1.2.4.1 色谱条件检测, 根据不同质量浓度下单糖和糖醛酸标准品的离子色谱图, 建立各标准组分峰面积(y)与质量浓度(x)之间的回归方程, 如表 1 所示。

表 1 标准品的回归方程

标准品	保留时间/ min	回归方程	相关系数 (R^2)
Fuc	3.492	$y = 0.319 2x + 0.789 1$	0.992 2
Ara	7.734	$y = 0.376 6x + 0.598 2$	0.997 2
Gal	9.867	$y = 0.449 6x + 0.598 2$	0.995 2
Glc	11.275	$y = 0.617 1x + 1.551 2$	0.991 3

续表 1

标准品	保留时间/ min	回归方程	相关系数 (R^2)
Xyl	13.300	$y = 0.445 4x + 3.020 9$	0.998 3
Man	13.825	$y = 0.332 7x + 0.193 7$	0.997 5
Fru	15.867	$y = 0.140 2x - 0.0410$	0.999 6
Rib	17.459	$y = 0.359 4x + 0.165 7$	0.999 7
Gal-AC	35.309	$y = 0.261 6x - 0.093 7$	0.999 4
Glc-AC	38.300	$y = 0.445 3x + 0.001 1$	0.999 9
Man-AC	39.780	$y = 0.204 9x - 0.058 6$	0.999 1

1.2.4.4 样品前处理

精确称量(5.00 \pm 0.05) mg 油茶蒲纯化多糖, 加入 1 mL 2 mol/L 的 TFA 溶液, 121 $^{\circ}\text{C}$ 加热 2 h 进行酸解。通氮气, 吹干。加入甲醇清洗, 再吹干, 重复甲醇清洗 2 ~ 3 次。加无菌水溶解, 转入色谱瓶中待测。

1.2.4.5 样品检测及定量分析

取样品提取液, 按 1.2.4.1 色谱条件进行检测, 并对照所得标准品回归方程定量, 按公式(3)计算各单糖组分含量(Z)。

$$Z = X \times V_1 \times F \times 10^{-3} / M \times 100\% \quad (3)$$

式中: X 为样品测试液单糖组分质量浓度, $\mu\text{g}/\text{mL}$; V_1 为样品提取液体积, mL; F 为稀释因子; M 为样品质量, mg。

1.2.5 油茶蒲纯化多糖的分子结构分析

称取 1 mg 油茶蒲纯化多糖, 与 100 mg 溴化钾混匀, 用玛瑙研钵研磨至均匀、压片, 在 500 ~ 4 000 cm^{-1} 区间进行红外光谱分析, 探究油茶蒲多糖的分子结构。

1.2.6 油茶蒲纯化多糖的空间微观构象分析

将油茶蒲纯化多糖粘贴于扫描电子显微镜样品台面的双面纸胶上, 真空喷镀金膜后移入扫描电子显微镜样品室, 在 10 kV 加速电压下观察并拍照, 对油茶蒲纯化多糖的空间微观构象进行分析。

2 结果与讨论

2.1 油茶蒲多糖的纯度及得率(见表 2)

由表 2 可知, 以油茶蒲水提液为基准进行测定, 得到油茶蒲原料的多糖含量为 11.38%。通过水提、醇沉和柱层析纯化处理, 所得多糖产品纯度逐步增大, 油茶蒲纯化多糖的纯度达 87.40%, 得率为 2.33%, 具有潜在的工业化开发价值。

表 2 油茶蒲多糖纯度及得率 %

样品	得率	纯度
油茶蒲原料	-	11.38
水提醇沉物	10.35	21.50
油茶蒲纯化多糖	2.33	87.40

2.2 油茶蒲多糖的柱层析洗脱曲线

柱层析纯化过程所得 30 管洗脱液的吸光度测定结果如图 1 所示。

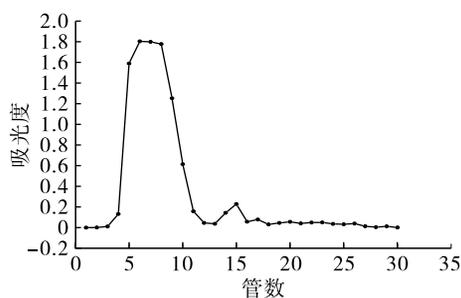


图 1 油茶蒲多糖的柱层析洗脱曲线

由图 1 可知,油茶蒲多糖的柱层析洗脱曲线有 2 个明显的吸光度峰,其中最高峰由第 4 ~ 11 管洗脱液的吸光度构成,收集第 6 ~ 8 管洗脱液,为洗脱液 V_3 ;另一个峰由第 13 ~ 16 管洗脱液的吸光度构成,收集第 14 ~ 15 管洗脱液,为洗脱液 V_4 。由于吸光度反映测试液中的多糖组分,故洗脱液 V_3 中的多糖组分含量最高,洗脱液 V_4 次之。根据阳离子树脂交换物质原理,其会吸附上样液中带有阴离子的物质,而多糖类化合物含有许多醇羟基或羧基等阴离子基团^[10],因此阳离子树脂会吸附多糖。在洗脱阶段,前几管洗脱液的冲洗可能不足以克服多糖与树脂之间的吸附力,故其中的多糖含量很低;而洗脱液达到第 4 管以后,多糖与树脂之间的吸附力被克服,多糖就慢慢地被洗脱下来,直到第 6 ~ 8 管洗脱液,其中的多糖含量达最大,之后多糖含量慢慢下降,直到第 12 管洗脱液的多糖含量接近零,故洗脱液 V_3 中多糖含量最高。而洗脱液 V_4 是过度洗脱后得到的洗脱液,其洗脱峰可能是树脂本身所带的结合不太牢靠的少量阳离子基团或者是与树脂结合非常牢靠的少量蛋白质基团等杂质。洗脱液 V_3 中的多糖含量最高,能满足后续多糖结构研究。

2.3 油茶蒲多糖的纯度鉴定

多糖脱色液 V_2 、洗脱液 V_3 与洗脱液 V_4 的紫外可见光扫描图谱分别见图 2、图 3 和图 4。

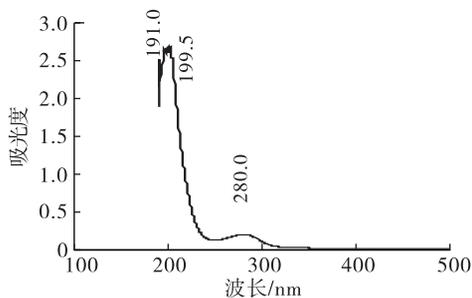


图 2 多糖脱色液 V_2 的紫外可见光扫描图谱

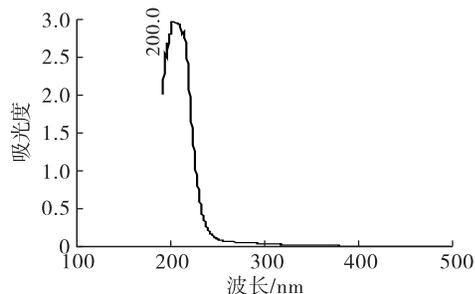


图 3 洗脱液 V_3 的紫外可见光扫描图谱

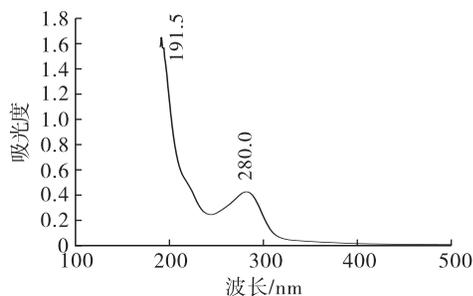


图 4 洗脱液 V_4 的紫外可见光扫描图谱

由图 2 可知,多糖脱色液 V_2 在 191.0 nm 和 199.5 nm 处各有 1 个特征吸收峰,在 280 nm 处附近还有 1 个吸收峰。由于多糖的紫外特征吸收峰^[11]波长为 190 ~ 200 nm,蛋白质的特征吸收峰波长在 260 ~ 280 nm 附近^[12],因此多糖脱色液 V_2 中不仅含有多糖类化合物,还含有蛋白质等其他杂质,需要进一步分离纯化。

由图 3 可知,洗脱液 V_3 的紫外可见光扫描图谱只在 190 ~ 200 nm 之间出现了特征吸收峰,而在 280 nm 附近没有出峰,表明 V_3 组分含有较多的多糖类化合物而不含或极少含蛋白质等其他杂质。

由图 4 可知,洗脱液 V_4 的紫外可见光扫描图谱在 191.5 nm 处有多糖特征吸收峰,在 280 nm 附近也有蛋白质吸收峰,说明洗脱液 V_4 中既有多糖成分(2.2 已说明该多糖成分可能是树脂成分),也有少量蛋白质成分。可见,油茶蒲多糖主要分布在洗脱液 V_3 中,且 V_3 组分更加纯净,能达到进一步检测油茶蒲多糖组分的要求。

2.4 油茶蒲纯化多糖的单糖组成

油茶蒲纯化多糖的离子色谱图如图 5 所示。由图 5 可知,油茶蒲纯化多糖由岩藻糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖 6 种单糖以及半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸、甘露糖醛酸 3 种糖醛酸组成,各成分含量见表 3。

由表 3 可知:油茶蒲纯化多糖中葡萄糖含量最高,阿拉伯糖次之,其他单糖含量较低,未检测出果糖以及核糖;3 种糖醛酸中半乳糖醛酸含量最高。

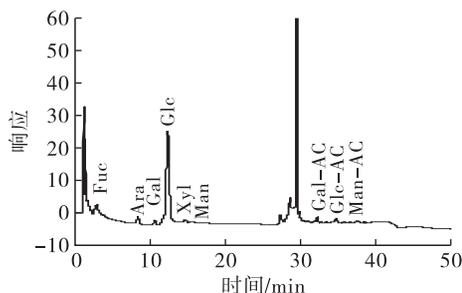


图5 油茶蒲纯化多糖的离子色谱图

表3 多糖中各组分含量

组分	含量/%
Fuc	0.64 ± 0.03
Ara	7.68 ± 0.10
Gal	3.74 ± 0.08
Glc	76.43 ± 1.02
Xyl	2.77 ± 0.20
Man	1.60 ± 0.04
Fru	-
Rib	-
Gal-AC	5.34 ± 0.24
Glc-AC	1.33 ± 0.08
Man-AC	0.47 ± 0.06

2.5 油茶蒲纯化多糖的分子结构

油茶蒲纯化多糖的红外光谱分析结果如图6所示。

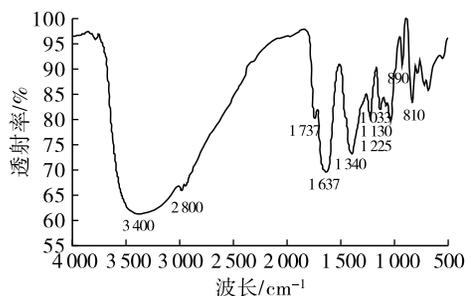


图6 油茶蒲纯化多糖的红外光谱图

图6中 3400 cm^{-1} 附近为分子间氢键的吸收峰,其宽峰主要是由多糖的配糖体羟基缔合伸缩振动引起的,由于羟基形成氢键缔合后, O—H 拉长,偶极距增大,所以表现出强而宽的峰^[13];而 2800 cm^{-1} 处是醛基的吸收峰,可能是糖环中 C—H 的伸缩振动引起的^[14]; 1737 cm^{-1} 处为 C=O 的振动吸收产生的吸收峰, 1637 cm^{-1} 处有吸收峰,表明有酰胺基的 C—O 伸缩振动,可以判断出具有酮类和醛类化合物,有以二聚体形式存在的游离羧酸,表明可能含有糖醛酸^[15]; 1340 cm^{-1} 处有吸收峰,表明存在 C—O—C 的非对称^[13];由以上结果可以判断出油茶蒲多糖是一种酸性多糖。 1130 cm^{-1} 处有吸收峰,表明可能存在 C—O ,是吡喃糖环上的特征吸收

峰^[16], 1033 cm^{-1} 处有吸收峰,主要是糖单元之间连接的糖苷键引起的,或为醚键(C—O—C)的伸缩振动峰^[17-18],上述2个特征吸收峰可以确定含有吡喃葡萄糖环结构。另外, 890 cm^{-1} 处具有较强的吸收峰,表明在吡喃糖构型中,基端 C—H 的不同异构体存在不同的吸收峰,在此基端 C—H 为直立型,即为 β 型吡喃糖^[15], 810 cm^{-1} 处存在吸收峰,说明存在甘露糖^[19]。由红外光谱扫描结果可推断出油茶蒲纯化多糖是一种酸性多糖,具有吡喃糖和 β -糖苷键的结构,其主链为 β 型吡喃糖,含有甘露糖、糖醛酸。

2.6 油茶蒲纯化多糖的空间微观构象

对油茶蒲纯化多糖在扫描电子显微镜放大1000倍和5000倍下进行研究,结果如图7所示。

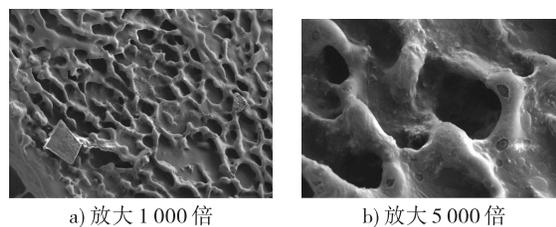


图7 油茶蒲纯化多糖的扫描电子显微镜图

由图7可知:油茶蒲纯化多糖放大1000倍时整体紧致略显光滑,表面凹凸不平成坑洼状、有孔洞,部分区域有不规则碎屑出现;放大5000倍时表面有气泡状细小颗粒出现,可能是多糖晶体结构。

3 结论

油茶蒲中的水溶多糖含量为11.38%,通过水提、醇沉、柱层析纯化处理,所制备的油茶蒲纯化多糖产品的纯度为87.40%,得率为2.33%;油茶蒲纯化多糖产品的各组分含量为岩藻糖0.64%、阿拉伯糖7.68%、半乳糖3.74%、木糖2.77%、葡萄糖76.43%、甘露糖1.60%、半乳糖醛酸5.34%、葡萄糖醛酸1.33%、甘露糖醛酸0.47%;油茶蒲纯化多糖是一种酸性多糖,具有吡喃糖和 β -糖苷键的结构特征,初步判断其主链为 β 型吡喃糖,且含有甘露糖;油茶蒲纯化多糖表面有坑洼、孔洞,还有气泡状细小颗粒,可能是多糖晶体结构。

参考文献:

- [1] 何东平,相海. 油茶籽加工技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,2015:1-2.
- [2] 蒋越华,罗再历,蒲琦,等. 油茶蒲综合利用研究进展[J]. 农业研究与应用,2021,34(4):44-49.
- [3] 廖永丽,陈景斯,郭华敏,等. 不同产地油茶果壳多糖含量的研究[J]. 广东药科大学学报,2017,33(5):620-623.

(下转第139页)

随着热风温度与加热平板温度的升高,平均含水率均匀下降, J_{sw} 基本保持不变;热风风速5 m/s、热风温度80℃、加热平板温度85℃为最佳运行参数。经过优化,对比原始结构烘干机,油茶籽平均含水率从7.94%降至4.76%, J_{sw} 由25.5%提高至83.2%。

参考文献:

- [1] 刘增革,相海,胡淑珍,等.油茶籽干燥工艺与设备研究[J].中国油脂,2014,39(2):74-77.
- [2] 李长友.粮食干燥传递和转换特征及其理论表达[J].农业工程学报,2018,34(19):1-8.
- [3] 张建友,洪灿东,戚雅楠,等.小麦胚芽红外干燥工艺优化及其对贮藏品质的影响[J].核农学报,2018,32(6):1144-1152.
- [4] 杨潇,相海,胡淑珍,等.湿花生热风干燥工艺研究[J].食品科技,2017,42(6):111-115.
- [5] 刘品,刘寅,张艳,等.干燥介质相对湿度对红枣热风干燥特性的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(11):185-190.
- [6] 郝立群.干燥后玉米水分不均匀度影响因素的分析与建议[J].中国粮油学报,2005,20(4):110-114,121.
- [7] 张仲欣,赵永玲,张玉先.横流循环式烘干机气流分布均匀性的试验研究[J].农业工程学报,2001,17(6):

17-21.

- [8] BEIGI M, TOHIDI M, TORKI - HARCHEGANI M. Exergetic analysis of deep - bed drying of rough rice in a convective dryer[J]. Energy, 2017, 140:374 - 382.
- [9] 赵金红,岳晓禹,施娥娟,等.多层带式干燥机风速场CFD模拟及检验[J].干燥技术与设备,2007,5(1):15-21.
- [10] RAO P S, BAL S, GOSWAMI T K. Modelling and optimization of drying variables in thin layer drying of parboiled paddy[J]. J Food Eng, 2007, 78(2):480-487.
- [11] 李奇,何仁财,邱璐.基于CFD烘干平板传热模拟分析[J].中国农机化学报,2013,34(6):129-123.
- [12] 耿铁,王仕琪,段二亚,等.小麦热风干燥过程的数值模拟及试验研究[J].河南农业科学,2020,49(11):166-171.
- [13] 王晶,焦燕,任一平,等. Shannon - Wiener 多样性指数两种计算方法的比较研究[J].水产学报,2015,39(8):1257-1263.
- [14] 李长友,马兴灶,方壮东,等.粮食热风干燥热能结构与解析法[J].农业工程学报,2014,30(9):220-228.
- [15] SOUZA G F M V, MIRANDA R F, LOBATO F S, et al. Simultaneous heat and mass transfer in a fixed bed dryer [J]. Appl Therm Eng, 2015, 90: 38 - 44.

(上接第123页)

- [4] XIE J H, JIN M L, MORRIS G A, et al. Advances on bioactive polysaccharides from medicinal plants [J]. CRC Crit Rev Food Sci Nutr, 2016, 56:S60 - S84.
- [5] YU Y, SHEN M Y, SONG Q Q, et al. Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: a review [J]. Carbohydr Polym, 2018, 183:91 - 101.
- [6] 沈建福,康海权,陈亚琪,等.油茶果壳多糖的提取及抗氧化作用研究[J].中国粮油学报,2010,25(8):51-54.
- [7] 尹丽敏.油茶籽工艺水中多糖及油茶皂素的分离纯化研究[D].长沙:湖南农业大学,2013.
- [8] 汤慧民,周丽菊.超声波辅助纤维素酶提取核桃壳多糖及其抗氧化活性研究[J].中国油脂,2020,45(2):101-105.
- [9] 刘晓涵,陈永刚,林励,等.蒽酮硫酸法与苯酚硫酸法测定枸杞子中多糖含量的比较[J].食品科技,2009,34(9):270-272.
- [10] 曾俊.西洋参多糖的提取分离、结构表征及抗氧化活性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [11] 朱芳坤,范文秀,祝勇,等.南瓜多糖的性质及光谱分

析[J].光谱实验室,2009,26(3):609-612.

- [12] 李军.蛋白质的二维紫外光谱模拟[D].合肥:中国科学技术大学,2017.
- [13] 冯丽琴,杨芙莲,董文宾.富硒茶多糖的分离纯化及抗氧化性研究[J].陕西科技大学学报(自然科学版),2016,34(5):133-136.
- [14] 樊海燕,刘江英,陈贵林.红外光谱结合有效成分分析在锁阳多糖提取分离中的应用[J].光谱学与光谱分析,2018,38(S1):75-76.
- [15] 姚月华,唐宁,应熙锐,等.红萍多糖结构特征、流变特性及抗氧化活性[J].食品与机械,2022,38(3):154-159,172.
- [16] 夏朝红,戴奇,房韦,等.几种多糖的红外光谱研究[J].武汉理工大学学报,2007(1):45-47.
- [17] 张琪琳.香菇多糖的结构鉴定及抗肿瘤作用机制研究[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [18] 魏达凤,朱瑜瑜,王杨,等.大孔树脂分离纯化枸杞多糖的研究[J].山东化工,2019,48(2):25-27,32.
- [19] LIU Y H. Identification of polysaccharides from (*Dioscoreae oppositifolia* "Qi") by infrared spectroscopy [J]. Agric Sci Technol, 2016, 17(8):1941-1943,1951.