

广佛手超微粉的制备及其理化性质分析

刘东杰¹, 刘祎帆^{1,2}, 梁贵强¹, 张任英¹, 谢曦¹, 彭进明^{1,2}, 周昊宇¹, 肖更生¹, 王琴^{1,2*}

(1. 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225) (2. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心, 广东潮州 521000)

摘要: 以广佛手为研究对象, 用普通粉碎方式以及超微粉碎的方式制备不同粒径的广佛手粉(FC), 并探究不同粒径粉体理化性质及其对多糖提取率的影响。实验结果表明, 超微粉碎可以显著降低FC的粒径, 延长超微粉碎时间, 能减小粒径, 使颗粒更细、更均匀, 且经过超微粉碎的粉体其化学组成并不会发生改变。超微粉碎显著提升了粉体水溶性, 降低了粉体持水性, 粉碎后粒径大小对上述性质均有显著影响。粒径降低水溶性显著提升, 持水性显著下降, 粒径 D_{50} 为20.01 μm 的粉体水溶性高达64.49%, 持水性仅有8.64%。在色泽方面, 随着粒径降低, 亮度值逐渐增大、红度值逐渐减小、黄度则先增大后减小。超微粉碎能在一定范围内提高广佛手多糖提取率, 其中粒径 D_{50} 为21.55 μm 的广佛手超微粉多糖提取效率最高, 达到了7.68%。该研究为广佛手的利用和新产品开发提供了一定的理论依据。

关键词: 广佛手; 超微粉碎; 理化品质

文章编号: 1673-9078(2023)11-160-167

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.11.1401

Preparation and Physicochemical Analysis of *Citri medica* ‘Fingered’ Ultra-fine Powder

LIU Dongjie¹, LIU Huifan^{1,2}, LIANG Guiqiang¹, ZHANG Renying¹, XIE Xi¹, PENG Jinming^{1,2},
ZHOU Haoyu¹, XIAO Gengsheng¹, WANG Qin^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture, College of Light Industry and Food Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

(2. Chaozhou Branch of Chemistry and Chemical Engineering Guangdong Laboratory, Chaozhou 521000, China)

Abstract: *Citrus medica* ‘Fingered’ powder (FC) was prepared using conventional grinding and ultrafine grinding methods. The physicochemical properties of FC were investigated, with a focus on different particle sizes and the effect of particle size on the extraction rate of polysaccharides. The results indicated that ultrafine grinding could significantly reduce the particle size of FC. Extending the ultrafine grinding time reduced the particle size, producing finer and more uniform particles; however, it did not affect the chemical composition of the powder. Ultrafine grinding significantly improved the water solubility of the powder and reduced its water-holding capacity. The particle size produced by grinding had a significant impact on the above properties. A reduction in particle size significantly increased water solubility and decreased water-holding capacity. The water solubility of the powder with a particle size (D_{50}) of 20.01 μm was as high as 64.49%, and the water-holding capacity was only 8.64%. In terms of color, as the particle size decreased, the brightness value gradually increased, the redness value gradually decreased, and the yellowness first increased and then

引文格式:

刘东杰,刘祎帆,梁贵强,等.广佛手超微粉的制备及其理化性质分析[J].现代食品科技,2023,39(11):160-167

LIU Dongjie, LIU Huifan, LIANG Guiqiang, et al. Preparation and physicochemical analysis of *Citri medica* ‘Fingered’ ultra-fine powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(11): 160-167

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2021B0707060001); 广东省重点领域研发计划项目(2021B0707010004-03); 广东省教育厅创新团队(自然科学)项目(KA2201626)

作者简介: 刘东杰(1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬采后生理与加工, E-mail: djliu412@163.com

通讯作者: 王琴(1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工利用, E-mail: zhongkai_wq@126.com

decreased. Ultrafine grinding improved the extraction rate of polysaccharides from FC samples within a certain range, with the highest extraction efficiency occurring with a particle size of (D_{50}) of 21.55 μm , reaching 7.68%. This study provided a theoretical basis for the application and product development of *Citrus medica* 'Fingered'.

Key words: *Citrus medica* 'Fingered'; ultrafine grinding; physicochemical property

佛手 (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle) 为我国传统的名贵中药材, 含有多种生物活性成分, 具有多种药理作用, 在医药、食品、日用品、化妆品等行业已经广泛使用。广佛手作为佛手的其中一大类, 是药食两用植物资源。广佛手由于生长快、果实饱满硕大、产量高而成为目前研究较多的一个品种^[1]。近年来, 对于广佛手的研究包括佛手的栽培管理^[2]、佛手的药理作用以及佛手的化学成分^[3]。目前对佛手化学成分的研究报道较多, 且主要集中在挥发油、黄酮类、多糖、香豆素类、多酚等物质^[4]。作为岭南特色药食同源成分之一的广佛手可以作为食品原料, 具有突出的医学药用价值, 在研究与开发利用方面有一定的商业价值。

佛手含有黄酮、多酚、多糖等常见的活性成分^[5,6]。超微粉碎技术对植物细胞具有破壁的效果, 粉碎过的样品粉末具有特殊的理化性质, 并且能在一定程度上促进植物体内活性成分的提取。通过对物料进行剪切、研磨等方式, 将其粉碎至微米或纳米级的微细颗粒, 粉体颗粒分布更加均匀, 比表面积增加, 空隙率与表面能大^[7], 当进行各种反应如生物、化学反应时接触面积增大, 溶解速度、反应速率等就被提高^[8]。现已广泛应用于食品加工中^[9-11]。在食品加工生产中, 采用超微粉碎技术可以减小原料颗粒并提高食品原料的功能性、理化特性、加工性和质量。

目前, 国内外已经将超微粉碎技术应用到中药材、西兰花、海带、板栗、香菇、笋干、葡萄皮渣、苹果渣和柑橘类水果等材料上, 并研究了相关粉体特征, 但在佛手超微粉碎加工转化方面研究不足, 佛手全粉粉体特征及相关特性研究未见相关成果报道。为了研究不同粒径的广佛手粉(FC)在理化性质方面和活性成分提取率方面的区别, 利用超微粉碎技术处理广佛手, 通过色差、持水性、活性物质的提取率等指标的测定, 对粉碎后不同粒径广佛手粉的物理品质特性进行研究, 旨在提高超微粉碎技术在广佛手加工上的应用价值, 并且能充分利用广佛手中的功能活性物质, 为广佛手粉在食品加工中的应用提供数据支持和理论指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

产自肇庆的广佛手(*Citrus medica* 'Fingered')。国药集团化学试剂有限公司出产的国产分析纯级别的无水乙醇、苯酚、浓硫酸、无水葡萄糖、溴化钾。

1.2 广佛手粉的制备

将广佛手药材置于烘箱, 在 60 °C 干燥至恒重, 使用磨粉机进行粗打粉, 得到粗粉 A, 备用, 并将广佛手粉末命名为 FC。将粗粉 A 分别过 20 目筛与 60 目筛, 得到 FC-1 与 FC-2; 将粗粉 A 分别超微粉碎 5、10 和 15 min, 得到超微粉碎粉 FC-3、FC-4 和 FC-5。

1.3 广佛手粉粒径分布

本试验使用 Malvern Mastersizer 2000 激光衍射粒度分析仪对广佛手粒度及其分布进行测定。取一定量 FC, 参数选择气压为 0.2 MPa、遮光度为 0.5%~5%、测定方式为湿法、分散剂为水的测定条件进行测试。试验重复 3 次。

1.4 广佛手粉体微观结构观察

将佛手粉样品粘到导电胶上, 缓慢放入 Oxford Quorum SC7620 溅射镀膜仪喷金 45 s, 取出载有样品载物台放在 TESCAN MIRA LMS 扫描电子显微镜的样品支架上, 设置电压为 3 kV, 观察样品颗粒的表面形态和结构, 分别放大 500、1 000 和 1 500 倍^[12,13], 进行拍照保存。

1.5 广佛手粉的红外光谱测定

采用 KBr 压片法, 将 FC 与适量的纯 KBr 研磨混匀, 用油压机压成透明薄片。薄片用傅里叶红外光谱仪 (Thermo Scientific Nicolet iS50) 进行扫描, 设置波数 400~4 000 cm^{-1} , 扫描次数 32 次, 分辨率 4 cm^{-1} 。

1.6 广佛手粉色差分析

利用 CR-400 型色差仪进行色差测定。开机后使用白板进行校正,校正后测试样品,采用白板标准板 ($L_0^*=95.36$, $a_0^*=-0.75$, $b_0^*=1.03$) 进行校准。测定参数为 L^* 、 a^* 和 b^* ,其中 L^* 表示为亮度值, a^* 表示为红绿值, b^* 表示为黄蓝值。

$$\Delta E = \sqrt{(L^*-L_0^*)^2 + (a^*-a_0^*)^2 + (b^*-b_0^*)^2} \quad (1)$$

1.7 广佛手粉的水溶性测定

准确称量 1.00 g 样品,溶于 50 mL 去离子水中,磁力搅拌 1 h,后离心 (4 000 r/min, 15 min),取上清液于 105 °C 烘干至恒重。计算公式如下:

$$Q = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

Q —样品的水溶性, %;

m_1 —称取样品的质量, g;

m_2 —处理后样品的质量, g。

1.8 广佛手粉的持水性测定

持水性参照梁琪等^[14]的方法。精确称取 0.25 g FC (m_1) 于 10 mL 离心管中,加入 4.75 mL 水,沸水 20 min,样品冷却到室温后,以 6 000 r/min 转速,离心 20 min,去除上清液体,样品称质量 (m_2)。持水性计算公式如下:

$$H = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (3)$$

式中:

H —样品的持水性, g/g;

m_1 —称取样品的质量, g;

m_2 —处理后样品的质量, g。

1.9 广佛手多糖提取

分别称取不同粒径大小 5 g FC,按照 1:30 (g/mL) 料液比例加入蒸馏水,在 90 °C 水浴中浸提 2 h。离心 (4 500 r/min, 10 min) 后收集上清液,于 50 °C 旋转蒸发浓缩至 100 mL。加入 4 倍体积 $\varphi=95\%$ 乙醇,于 4 °C 醇沉 12 h。离心 (4 500 r/min, 20 min),移去乙醇上清液,保留多糖沉淀,冷冻干燥,即得水提多糖,并采用苯酚-硫酸法^[15]测定 FCP 的含量。

$$Y (\%) = \frac{W_1 - P}{W_2} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

Y —多糖提取率, %;

W_1 —多糖质量, g;

W_2 —FC 质量, g;

P —多糖纯度, %。

1.10 数据统计与分析

测定结果采用 $\bar{x} \pm SD$ 表示,所有数据采用 SPSS 20 统计软件进行单因素方差分析,显著性检验 ($P < 0.05$) 以最小显著性差异法 (LSD) 进行。

2 结果与讨论

2.1 不同广佛手粉粒径分布分析

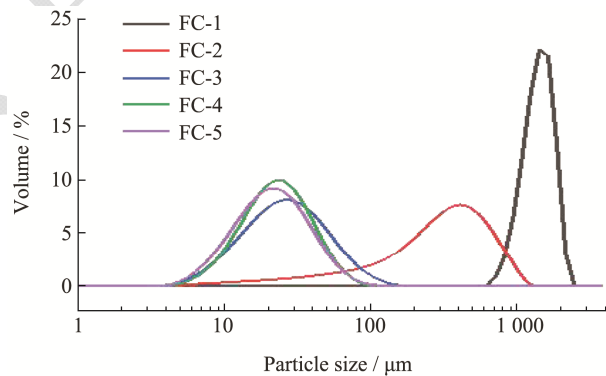


图 1 五种不同粒径的 FC 的粒径正态分布

Fig.1 Normal particle size distribution of Finger Citron powder with 5 different particle sizes

表 1 五种 FC 的粒径大小、比表面积和离散程度

Table 1 Determination results of particle size distribution of 5 kinds of Finger Citron powder

样品	粒径/ μm			比表面积/ (m^2/g)	离散度
	D_{10}	D_{50}	D_{90}		
FC-1	956.75 \pm 2.83 ^a	1 342.97 \pm 8.77 ^a	1 746.12 \pm 16.67 ^a	0.004 9 \pm 0.001 ^e	0.63 \pm 0.06 ^c
FC-2	56.63 \pm 2.04 ^b	297.65 \pm 6.56 ^b	653.66 \pm 11.21 ^b	0.05 \pm 0.001 ^d	2.01 \pm 0.04 ^a
FC-3	10.31 \pm 0.10 ^c	24.64 \pm 0.24 ^c	56.27 \pm 0.27 ^c	0.30 \pm 0.002 ^c	1.87 \pm 0.01 ^b
FC-4	10.48 \pm 0.11 ^c	21.55 \pm 0.32 ^c	41.91 \pm 0.84 ^c	0.33 \pm 0.004 ^b	1.46 \pm 0.01 ^d
FC-5	9.29 \pm 0.06 ^c	20.01 \pm 0.20 ^c	41.50 \pm 0.62 ^c	0.36 \pm 0.003 ^a	1.61 \pm 0.01 ^c

注: 同列右肩字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

通过超微粉碎得到五种不同粒径的FC的正态分布见图1,从图1可以看出FC-1、FC-2、FC-3、FC-4、FC-5的 D_{50} 分别为1342.97、297.65、24.64、21.55、20.01 μm 。另外,随着粒径的减少,粒径分布曲线图呈现越来越对称的趋势,推测可能超微粉碎能将粉末粒径控制在一定的范围内,微粉的粒径分布范围较窄,粉体的均一性较好。

表1为五种FC的粒径分布测定结果。中位直径 D_{50} 是应用中评价粉体粒度的典型指标,常用来表示粒径的平均粒度,代表粉末的累计粒度分布百分比达到50%时所对应的粒径。可以看出,普通粉

碎(FC-1、FC-2)和超微粉碎的平均粒径有显著差异($P<0.05$),从表中可以看出,各种粒径的粉末在 $D_{10}\sim D_{100}$ 中,数量是呈上升趋势的,但是在 D_{50} 范围内:FC-1>FC-2>FC-3>FC-4>FC-5,说明超微粉碎能够显著降低粉末的粒径大小。本试验表明,随着FC粒径的减小,即每单位重量的粉体中将含有更多的颗粒,从而粉体的比表面积显著增大,与外界的接触面积增大,另外与其他物质搅拌时更容易混合均匀,这个特征也为超微粉碎粉末的物理特性提供了参考。

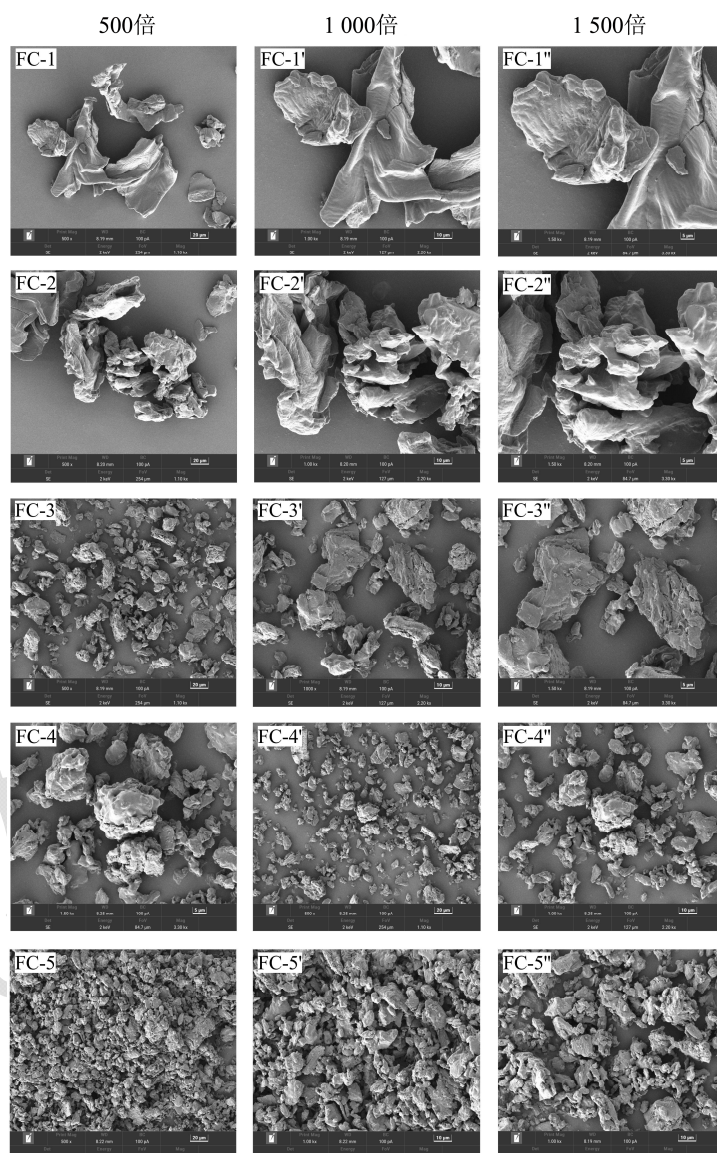


图2 不同粒径FC微观结构

Fig.2 Scanning electron microscopic images of 5 kinds of finger citron powder

2.2 不同粒径广佛手粉的微观结构差异

为了观察不同粒径FC的外观形状特征,利用扫描电子显微镜(SEM)在放大倍数为500、1000

和1500倍下分别进行观察,不同粒径广佛手的电子显微镜图如图2所示。在超微粉碎的作用下,FC颗粒在冲击、剪切、摩擦等机械作用力下,稍大一点的颗粒发生碎裂,大多数颗粒逐渐变成不规则的

多面体,表面略粗糙。由图中可以看出,五种不同粒径的 FC 具有较完整的组织结构,其中 FC-1 和 FC-2 颗粒粒径较大,而且形状大小不一、沟壑较为清晰、形状呈不规则片状结构、杆状和束状结构。微粉 FC-3、微粉 FC-4、微粉 FC-5 粒随着超微粉碎时间的增加,其粒径明显减小,颗粒越细碎且颗粒大小越均一,粉末颗粒间的间隙减小,分布也较为均匀,沟壑不明显、多为椭圆形球形。这与牛潇潇等^[16]在马铃薯超微粉中的研究结果一致。超微粉碎时间越久,组织破坏程度明显增大(图 2 中 1 500 倍下不同粒径粉体表面),有助于改善粉末的性质,如水溶性和持水性。此外,随着超微粉碎的时间增加,部分粉末颗粒间呈现团聚现象,这可能是在超微粉碎的作用下,粒径不断减少,颗粒表面性能被激活,微小颗粒之间的交互面积增加,吸附作用力增大,导致分子间发生粘结聚集现象。Jiang 等^[17]发现随着辣木叶颗粒粒径的减小,其比表面积不断增大,颗粒间的聚集力增强,同时由于颗粒的减小吸水性增强,导致颗粒更容易聚集在一起。

2.3 不同粒径广佛手粉红外光谱比较分析

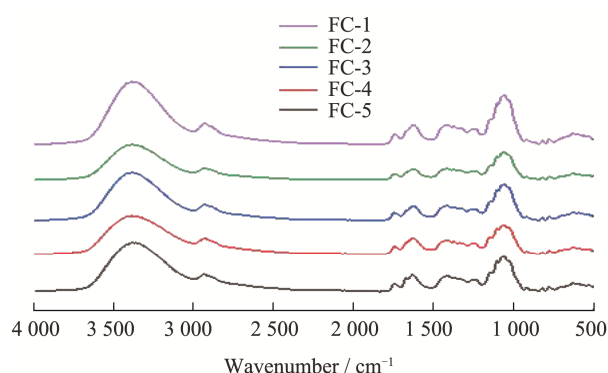


图 3 不同粒径的 FC 的红外光谱图

Fig.3 Infrared spectra of five different particle sizes of finger citron powder

为了观察不同粒径对 FC 内部官能团的影响,五种不同粒径的 FC 的红外光谱测定结果如图 3 所示,不同粒径的 FC 红外光谱图相似,只是强度出现差异,说明粉碎程度对 FC 的官能团没有明显影

响, Meng 等^[18]对铁皮石斛超微粉研究也有同样的结论。在 $3\ 385\ \text{cm}^{-1}$ 与 $2\ 928\ \text{cm}^{-1}$ 处均有 1 个吸收较强的吸收峰,分别为 O-H 伸缩振动和 C-H 伸缩振动, $1\ 200\sim 1\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 是 C-O-H 的伸缩振动和 C-O-C 糖苷键振动,表明样品为多糖^[19]。五种多糖均在 $1\ 744\sim 1\ 631\ \text{cm}^{-1}$ 左右出现吸收峰,猜测是糖醛酸存在下,羧基基团的 C=O 键的伸缩振动,与糖醛酸含量测定结果相符合^[20,21]。在 $1\ 417\ \text{cm}^{-1}$ 处附近宽的吸收峰,是由 C-H 键的变形振动引起的。 $1\ 240\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰,是由于 S=O 的伸缩振动引起的,表明多糖含有硫酸基团^[21]。在 $1\ 250\sim 1\ 015\ \text{cm}^{-1}$ 区间,有吸收较强的峰出现,表明存在吡喃糖苷键。 $818\ \text{cm}^{-1}$ 处,是 α -型糖苷键特征吸收峰^[22]。 $919\ \text{cm}^{-1}$ 和 $779\ \text{cm}^{-1}$ 分别是吡喃环的非对称和对称伸缩振动。结果表明,不同粒径的 FC 吸收峰的位置基本没有发生改变,峰波强度随粒径减小,强度增大,说明超微粉碎粒径没有改变粉末的官能团,即其超微粉碎没有改变粉体的化学组成。

2.4 超微粉碎对粉体色泽的影响

原材料的颜色是其加工中重要的品质之一,同时色泽是干制品重要的评价指标之一。不同粒径 FC 的颜色结果如表 2 所示,超微粉碎 FC 体与常规粉碎 FC 相比亮度值 (L^*) 差异显著 ($P<0.05$),随着粒径的降低,粉体的亮度值增大,但 FC-4 和 FC-5 的亮度无明显差异,表明超微粉碎技术使粉体粒径更小时,会使得粉体看起来更透亮有光泽,粉末的亮度会提高。本实验使用低温超温粉碎,因此不存在 FC 随着粉碎的时间延长不断升温受热导致的氧化褐变,亮度值保持相对稳定,这一点与其他超微粉碎研究结果不同^[23]。 a^* 表示粉体的红绿值,数值越大粉体越红,FC 随着粒径的减小红度呈减小的趋势且差异显著; b^* 表示粉体黄蓝值,数值越大粉体越黄,FC 随着粒径的减小黄度呈先增大后减小的趋势且差异显著,说明 FC 的颜色受粒径的显著影响。

表 2 不同粒径的 FC 的色差值结果

Table 2 Results of color difference of different particle sizes of finger citron powder

样品	FC-1	FC-2	FC-3	FC-4	FC-5
L^*	69.99 ± 2.29^d	71.88 ± 0.53^c	82.95 ± 0.50^b	83.92 ± 0.46^{ab}	85.01 ± 0.27^a
a^*	3.00 ± 0.66^a	2.65 ± 0.53^a	0.38 ± 0.01^b	-0.21 ± 0.03^c	-0.44 ± 0.02^c
b^*	21.10 ± 0.62^b	23.48 ± 0.19^a	19.25 ± 0.28^c	19.42 ± 0.22^c	19.40 ± 0.14^c
ΔE^*	29.22 ± 1.61^a	29.14 ± 0.49^a	18.42 ± 0.49^b	18.02 ± 0.42^{bc}	17.45 ± 0.18^c

注:同行右肩字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

此外, FC-5 偏差最小 (ΔE^* 值为 17.45), 其次为 FC-4 和 FC-3, 偏差最大的是 FC-2 与 FC-1。褚飞洋^[24]对超微红茶粉的色差研究也得到了类似的结论。色差主要受颗粒大小所影响, 粒径减少混合均匀度提高, 同时表比面积增大, 并且粒径减小使粉末内部物质 (例如纤维素和半纤维素) 结构暴露出来, 从而影响粉体的颜色。当粉体粒径降低到 60 μm 以下时, 由于粉质更均一, 细胞结构破坏程度基本一致, 颜色也趋于稳定。

2.5 不同粒径广佛手粉水溶性分析

水溶性是表征粉体溶解度的重要指标, 水溶性越高, 粉末的溶解性越好。由图 4 可知, 本研究中五种不同粒径的 FC-1~FC-5 的水溶性分别是: 18.40%、27.09%、39.42%、54.88%、64.49%, 超微粉碎后的 FC 水溶性显著增加 ($P < 0.05$), 且粒径越小水溶性越好。Gong 等^[25]对香菇粉理化性质的研究中也发现了同样的现象。粒径对水溶性的影响, 可能是由于超微粉碎破坏了 FC 的颗粒结构, 且粒径越小, 粉体的比表面积越大, 使其水溶性增强^[26]。Zhang 等^[14]研究发现, 物料在经过超微粉碎后, 随着其颗粒粒径的不断减小, 致密纤维结构被打破, 结构变得更加松散, 孔隙率会不断增大, 使水分与粉体能更充分地接触, 导致粉末在溶解过程中的水化速率加快, 从而增强水溶性。也有可能是在超微粉碎机内各种强作用力下, 组成细胞壁的部分不溶性的半纤维素和果胶类化合物会发生了链接键的断裂或者熔融现象, 从而使不溶物质转化成水溶性聚合物成分。

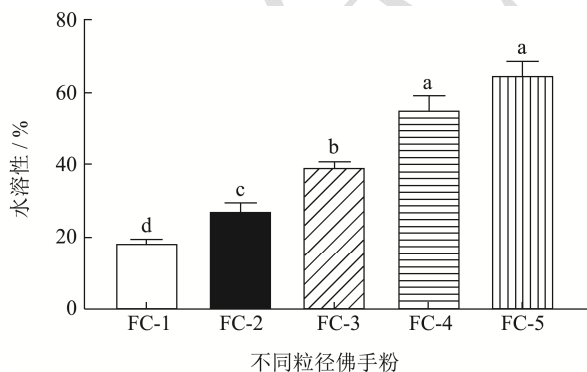


图 4 不同粒径 FC 对水溶性的影响

Fig.4 Effect of different particle size on water solubility of Finger Citron powder

注: 图中不同字母表示各组间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 下同。

2.6 不同粒径广佛手粉持水性分析

持水性是评价物料保水性能的指标。由图可知, 五种粉末的持水性分别是: 15.51%、12.43%、9.61%、9.14%、8.64%。随着粒径的减小, FC 的持水性显著降低 ($P < 0.05$)。这可能由于随着粒径的减小, 粉粒的比表面积增大, 颗粒的结构遭到超微粉碎机机械力破坏, 破坏了粉末内的亲水基团, 使亲水基团不能与水结合, 水化作用增强, 导致持水性降低^[27]。有研究表明样品的持水性还与样品维持水分的基质有关^[28], 例如膳食纤维含量, 随着超微粉碎时间的不断延长, 粉末的粒径不断减小, 粉末中含有的膳食纤维结构可能被粉碎破坏, 例如部分长链分子纤维素被机械剪切成短链分子, 导致总膳食纤维含量不断降低, 而膳食纤维对水有束缚作用, 导致样品对水分子的束缚力减少, 引起样品的持水性不断降低。粒径降低到一定程度后, 持水性相对稳定。

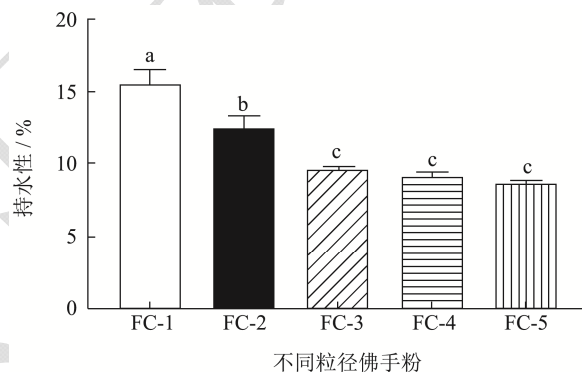


图 5 不同粒径 FC 对持水性的影响

Fig.5 Effect of different particle size of Finger Citron powder on water holding capacity

2.7 超微粉碎对广佛手多糖提取率的影响

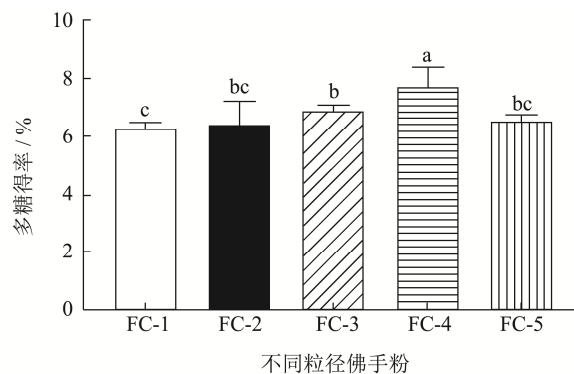


图 6 不同粒径的 FC 多糖的得率

Fig.6 The extraction rate of polysaccharide in different particle sizes of finger citron powder

有文献报道和常规粗粉相比,超微粉碎使水稻秸秆、小麦秸秆的可溶性糖含量提高约2倍^[29],南瓜超微粉碎后多糖的提取率高于粗粉1倍^[30]。图6所示是不同粒径的广佛手多糖的得率,超微粉FC-3、FC-4多糖得率高于未经过超微处理的粗粉FC-1,FC-2,这与上述报道结果相符,说明超微粉碎能在一定程度内提高广佛手多糖的得率。而随着粒径的减小,广佛手多糖得率先增加后降低,FC-4时得率达到最高值,为7.68%。其次是FC-3、FC-5及FC-2,分别为6.86%、6.51%、6.40%。广佛手多糖得率随着粒径减小出现先增加后降低的原因可能是粒径较大时(FC-1/2/3),多糖未能完全被释放出来;而FC-5粉碎时间较长,导致超微粉碎时受到各种外力的作用,可能对多糖的结构进行了破坏,从而使多糖物质损失,导致多糖类提取率提高不多。但是总体来说,超微粉碎可提高广佛手多糖的提取率。

3 结论

广佛手经超微粉碎处理后,粒径显著减小,细腻度增加,并且随着粒径的减小,颗粒粒度越细碎且更均一,粉末颗粒间的间隙减小,分布也更为均匀,且其比表面积显著增大,粉末的离散程度也呈上升趋势。粒径降低到60 μm后,粉体的亮度值达到最大且基本不再改变。超微粉碎并没有改变粉体的化学组成,只是通过改变粉体表面物理性质改变其水溶性和持水性。随着粒度的减小,FC的水溶性显著增大,持水性则显著减小,最小粒径D₅₀为20.01 μm的粉体水溶性高达64.49%,持水性仅有8.64%。多糖得率在一定范围内随着粒径的减小,先增加后降低,其中粒径D₅₀为21.55 μm的超微粉最高,达到了7.68%。超微粉碎是一种广佛手有效加工方式,有效提高其中活性多糖的提取效率,并改变其粉体的理化性质。

参考文献

- [1] 肖培根.新编中药志[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [2] 曹瑞,郝二伟,杜正彩,等.广佛手化学成分、药理作用的研究进展及质量标志物的预测分析[J].中华中医药学刊,2022,40(9):135-145,277.
- [3] 张爵玉,蒋林,王琴,等.佛手的研究现状及进展[J].中国调味品,2008,3:34-37.
- [4] 张思荻,杨海燕,曾俊,等.佛手的研究进展[J].中华中医药杂志,2018,33(8):3510-3514.
- [5] Luo X, Wang J, Chen H, et al. Identification of flavonoids from finger citron and evaluation on their antioxidative and antiaging activities [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2020, 7: 584900.
- [6] Zaixiang L, Jie C, Fuhao Y, et al. The antioxidant, antibacterial, antibiofilm activity of essential oil from citrus medical. var. *Sarcodactylis* and its nanoemulsion [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 80: 371-377.
- [7] 王丽宏,张延,张宝彤,等.超微粉碎技术的特点及应用概况[J].饲料博览,2013,10:13-16.
- [8] Wenjie G, Feng C, Xi W, et al. Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 2222-2255.
- [9] Min C, Baoguo L, Xianzhou C. Discussion on the application of Is-dyna in superfine grinding of wheat bran [J]. *Grain and Oil Science and Technology*, 2018, 3(1): 138-144.
- [10] Dhiman A, Prabhakar P K. Micronization in food processing: A comprehensive review of mechanistic approach, physico-chemical, functional properties and self-stability of micronized food materials [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 292: 110248.
- [11] Xiaoyan Z, Fangling D, Qingjun Z, et al. Effect of superfine pulverization on properties of *Astragalus membranaceus* powder [J]. *Powder Technology*, 2010, 3(203): 620-625.
- [12] 傅茂润,赵双,曲清莉,等.超微粉碎对红米理化性质和加工特性的影响[J].食品与发酵工业,2013,39(4):96-100.
- [13] 刘素稳,李军,赵玉华,等.干法超微粉碎对苹果渣纤维特性的影响[J].河北科技师范学院学报,2012,26(1):19-25.
- [14] 梁琪,毕阳,米兰,等.沙枣细粉超微粉碎后对物化特性的影响研究[J].食品工业科技,2012,33(11):76-78.
- [15] Michel D, K A G, J K H, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. *Anal Chem*, 1956, 28(3): 350-356.
- [16] 牛潇潇,梁亮,王宁,等.超微粉碎及不同粒度对马铃薯渣功能特性的影响[J].中国粮油学报,2022,37(1):37-45.
- [17] Jiang L, Xu Q, Qiao M, et al. Effect of superfine grinding on properties of *Vaccinium bracteatum* Thunb leaves powder [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2017, 26(6): 1571-1578.
- [18] Meng Q, Fan H, Chen F, et al. Preparation and characterization of *Dendrobium officinale* powders through superfine grinding [J]. *Journal of the Science of*

- Food and Agriculture, 2018, 98(5): 1906-1913.
- [19] Biyu Z, Minghua S, Qingxi C, et al. Antioxidant and hepatoprotective activities of polysaccharides from *Anoectochilus roxburghii* [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 153: 391-398.
- [20] Xin Y, Di Qin, Xinglong H, et al. Characterization and bioactivity of polysaccharides obtained from pine cones of *Pinus koraiensis* by graded ethanol precipitation [J]. Molecules, 2013, 18(8): 9938-9943.
- [21] Yijun F, Xingjin H, Songdong Z, et al. Composition analysis and antioxidant activity of polysaccharide from *Dendrobium denneanum* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2009, 45(2): 169-173.
- [22] Jialong F, Zhongwei W, Tianhu Z, et al. Characterization, antioxidant and hepatoprotective activities of polysaccharides from *Ilex latifolia* Thunb [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 101: 990-997.
- [23] 张雪,陈复生,邹建,等.超微粉碎对小米、怀山药物化性质及功能成分影响的研究[J].食品科技,2019,44(6):176-182.
- [24] 褚飞洋.超微红茶粉物化和降血脂降血糖功能特性分析及其在冰淇淋加工中的应用[D].重庆:西南大学,2018.
- [25] Gong P, Huang Z, Guo Y, et al. The effect of superfine grinding on physicochemical properties of three kinds of mushroom powder [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(8): 3528-3541.
- [26] Jiangtao Z, Yushan D, Tanzeela N, et al. Effect of superfine-grinding on the physicochemical and antioxidant properties of *Lycium ruthenicum* Murray powders [J]. Powder Technology, 2020, 372: 68-75.
- [27] Jiang G, Ramachandraiah K, Wu Z, et al. Impact of ball-milling time on the physical properties, bioactive compounds, and structural characteristics of onion peel powder [J]. Food Bioscience, 2020, 36: 100630.
- [28] Yuan T Z, Liu S, Reimer M, et al. Evaluation of pasting and gelling properties of commercial flours under high heating temperatures using rapid visco analyzer 4800 [J]. Food Chemistry, 2020, 344: 128616.
- [29] 杨旸.不同粉碎粒径小麦秸秆粉体组成结构和理化性质表征[D].北京:中国农业大学,2013.
- [30] 胡立玉.超微粉碎对南瓜营养成分提取率及抗氧化能力的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2013.