

超微粉碎处理对八宝粥粉理化特性及功能特性的影响

赵愉涵, 秦 畅, 孙 斐, 韩 聪, 陈庆敏, 岳凤丽, 崔 波, 杜雅珉, 傅茂润, 李芳瑞

Effects of Superfine Grinding Treatment on the Physicochemical and Functional Properties of Mixed Congee Powder

ZHAO Yuhan, QIN Chang, SUN Fei, HAN Cong, CHEN Qingmin, YUE Fengli, CUI Bo, DU Yamin, FU Maorun, and LI Fangrui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090335>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超微粉碎对竹粉膳食纤维功能特性的影响

Effect of superfine pulverizing on properties of bamboo powder dietary fiber

食品工业科技. 2017(17): 50-55

超微粉碎对木薯淀粉老化特性的影响

Effects of superfine grinding on retrogradation properties of tapioca starch

食品工业科技. 2017(24): 44-47

超微粉碎对方竹笋全粉理化特性及微观结构的影响

Effect of Superfine Grinding on Physicochemical Properties and Microstructure of *Chimonobambusa quadrangularis* Shoot Powder

食品工业科技. 2021, 42(24): 40-47

超微粉碎对竹笋壳粉理化性质的影响

Effect of Ultrafine Grinding on Physical and Chemical Properties of Bamboo Shell Powder

食品工业科技. 2019, 40(1): 34-39

白灵菇蛋白质的理化及功能特性

Physicochemical and Functional Properties of Protein from *Pleurotus nebrodensis*

食品工业科技. 2018, 39(16): 37-41

超微粉碎与超声波组合辅助胃蛋白酶水解乳清蛋白效果研究

Research of the superfine grinding and ultrasonic assisted hydrolysis on the whey protein by pepsin

食品工业科技. 2017(11): 235-239



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵愉涵, 秦畅, 孙斐, 等. 超微粉碎处理对八宝粥粉理化特性及功能特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 21–28. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090335

ZHAO Yuhuan, QIN Chang, SUN Fei, et al. Effects of Superfine Grinding Treatment on the Physicochemical and Functional Properties of Mixed Congee Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 21–28. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090335

· 研究与探讨 ·

超微粉碎处理对八宝粥粉理化特性及功能特性的影响

赵愉涵¹, 秦畅¹, 孙斐¹, 韩聪¹, 陈庆敏², 岳凤丽², 崔波¹, 杜雅珉^{1*}, 傅茂润^{1*}, 李芳瑞³

(1. 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 食品科学与工程学院, 山东济南 250353;

2. 山东农业工程学院食品科学与工程学院, 山东济南 250100;

3. 济南倍力粉体工程技术有限公司, 山东济南 250100)

摘要: 为了提高八宝粥产品的营养及功能性价值, 改善其稳定性, 实验对八宝粥原料进行普通粉碎 (3000 r/min, 1600 W) 及 -20 °C 低温超微粉碎 (960 r/min, 1100 W) 处理, 通过研究超微粉碎对八宝粥粉体的理化特性 (粒径分布、色差、水合特性、填充性、流动性和微观结构) 和功能特性 (抗氧化活性和总酚、黄酮溶出量) 的影响, 以期超微粉碎在八宝粥加工产业的应用推广中提供依据。结果发现, 超微粉碎对八宝粥粉体的理化及功能特性均有显著影响 ($P < 0.05$)。经过超微粉碎后, 八宝粥粉体比表面积明显增大, 持水力及膨胀度下降, 稳定性和流动性明显提高。与普通粉碎相比, 过 300 目筛的超微粉碎还原力和 DPPH 自由基清除能力分别提升至 0.80 和 59.98%, 总酚及总黄酮的溶出量增加至 2.14 和 11.33 mg/g, 显著高于普通粉碎的样品 ($P < 0.05$)。结果表明, 超微粉碎处理提高了八宝粥产品的理化及功能性价值, 为八宝粥粉的深入研究及加工提供一定的理论依据。

关键词: 八宝粥, 超微粉碎, 理化特性, 功能特性

中图分类号: TS213

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)18-0021-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090335



本文网刊:

Effects of Superfine Grinding Treatment on the Physicochemical and Functional Properties of Mixed Congee Powder

ZHAO Yuhuan¹, QIN Chang¹, SUN Fei¹, HAN Cong¹, CHEN Qingmin², YUE Fengli², CUI Bo¹, DU Yamin^{1*}, FU Maorun^{1*}, LI Fangrui³

(1. College of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology

(Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China;

2. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural Engineering University, Jinan 250100, China;

3. Jinan Beili Powder Engineering Technology Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: In order to improve the nutritional and functional value of the mixed congee products, and to improve its stability, the experiment was carried out to prepare mixed congee powders through pulverisation treatments including general (3000 r/min, 1600 W) and superfine grinding (-20 °C, 960 r/min, 1100 W). The effects of superfine grinding on the particle size distribution, color parameters, hydration properties, filling properties, fluidity properties, micro structure, antioxidant activity, the dissolutions of flavonoids and total polyphenols were investigated, which would provide reference for the application and promotion of superfine grinding in mixed congee processing industry. The results showed that superfine grinding had a significant effect on the physicochemical and functional properties of mixed congee powder

收稿日期: 2021-09-29

基金项目: 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 科教产融合创新试点工程项目 (2020KJC-ZD011)。

作者简介: 赵愉涵 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 1493876430@qq.com。

* 通信作者: 杜雅珉 (1991-), 女, 博士, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 778078786@qq.com。

傅茂润 (1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: skyfmr@163.com。

($P<0.05$)。After superfine grinding, the specific surface area of mixed congee powder was significantly increased, the water holding capacity and swelling capacity were reduced, and the stability and fluidity was significantly improved. Compared with coarse ground mixed congee powder, the reducing power and DPPH radical scavenging capacity of superfine powder through 300 mesh sieves were increased to 0.80 and 59.98% respectively, and the dissolution of total phenols and flavonoids increased to 2.14 and 11.33 mg/g, significantly higher than general grinding samples ($P<0.05$). In conclusion, the superfine grinding treatment improved the physicochemical and functional value of the mixed congee products, and could provide a certain theoretical basis for in-depth research and processing of mixed congee powder.

Key words: mixed congee; superfine grinding; physicochemical properties; functional properties

八宝粥是以多种谷物为主要原料,经熬煮制得的一种中国传统食品,具有滋养肠胃、补虚益气等功效。在日常生活中,八宝粥的制作方式通常是不对原料本身进行处理,而直接采用压力锅熬煮的方式,造成原料中的营养物质及功能性成分不能被完全溶出及释放。在工业生产中,八宝粥类产品多以罐装的八宝粥成品进行销售,极大的增加了包装和运输成本。此外,由于八宝粥选取的原料中,富含淀粉成分,在温度波动较大的情况下,原料内大分子颗粒物质易析出,出现粥水分离等现象^[1],严重影响其口感及商品价值。因此,改良八宝粥的制作方式,提高其稳定性及营养功能价值,对于八宝粥的加工及商品化销售尤为重要。

超微粉碎是指利用机械或流体动力的方法,将物料粒径粉碎至微米级的一种新型食品粉碎技术^[2]。它可以改善物料粉体的口感和理化特性,增大其比表面积和孔隙率,进而促进物料粉体中营养物质和功能性成分的释放和溶出,加快其被人体吸收的速率^[3],因而被广泛应用于药品、食品及材料工程等多个领域^[4]。在食品加工中,对于富含纤维的原料,超微粉碎技术可显著降低物料粉体的粒径值,使其具有更好的分散性、吸附性和溶解性,增强物料粉体的稳定性和黏度、凝胶强度^[5-6]。对于富含淀粉的原料,超微粉碎技术可破坏淀粉颗粒晶体,降低其相对结晶度、糊化温度与热吸收焓,增强物料的稳定性^[7]。

为了获得高营养及功能性价值、高稳定性的八宝粥类产品,扩大八宝粥产品的应用范围,提高其应用价值,本实验以八宝粥原料作为研究对象,通过将其进行普通粉碎和超微粉碎处理,研究超微粉碎对八宝粥理化特性(粒径分布、色差、水合特性、填充性、流动性和微观结构)及功能特性(抗氧化活性和总酚、黄酮溶出量)的影响,以期超微粉碎在八宝粥产业的深加工应用中提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

八宝粥原料 购自于长清大学城家家悦超市。其原料包括:大米(12%)、糯米(15%)、西米(8%)、红豆(8%)、红花芸豆(8%)、绿豆(4%)、豇豆(3%)、大白扁豆(4%)、莲子(6%)、花生(4%)、银耳(4%)、桂圆(6%)、百合(5%)、大枣(5%)、蜜枣(3%)、干果仁(3%)、杏仁(2%)。K₃Fe(CN)₆、Na₂HPO₄、NaH₂PO₄、

NaNO₂、Al(NO₃)₃、NaOH、Na₂CO₃ 国药集团化学试剂有限公司;DPPH 阿拉丁试剂(上海)有限公司;Folin 酚 上海麦克林生化科技有限公司;芦丁 北京索莱宝科技有限公司。

WZJ-6TB 超微粉碎机 济南倍力粉体工程技术有限公司;LS-609 激光粒度分析仪 欧美克仪器有限公司;NR10QC 通用色差计 深圳三恩时科技有限公司;V-1100D 紫外可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;ZeissSupra55 扫描电子显微镜 上海翔研精密仪器有限公司。

1.2 样品处理方法

1.2.1 原料处理 粗粉的制备:取(200±5)g 八宝粥原料采用小型打粉机(3000 r/min, 1600 W)打粉 3 min,粉碎得到的粗粉过 30 目筛,将其命名为 OG。

超微粉的制备:分别取(200±5)g 八宝粥原料置于超微粉碎机(960 r/min, 1100 W)的物料罐内,经磨机的高频震动流入粉碎室,于-20℃低温条件下粉碎 10 和 20 min。粉碎后的样品分别过 150 和 300 目筛,以获得两种均一稳定且不同粒度的超微粉,将其命名为 150 SG、300 SG。

1.3 指标的测定

1.3.1 色差的测定 取 5 g 样品置于透明平板中,使用 NR10QC 通用色差计测定样品的色泽。测定结果用 L^* 、 a^* 和 b^* 表示。

1.3.2 微观结构观察 采用扫描电镜对样品的微观形态进行观察。

1.3.3 粒径测定 采用激光粒度分析仪对八宝粥粉末样品进行粒径分析。取适量八宝粥粉末样品溶于蒸馏水中,倒入盛有蒸馏水的进样容器内进行分散,测定粉体的粒径。其中, D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 和 D_{100} 分别表示粒度小于 10%、50%、90% 和 100% 的累积百分数。 $D_{(3,2)}$ 和 $D_{(4,3)}$ 分别表示表面积的平均直径和体积的平均直径^[8]。

1.3.4 溶解度的测定 参考唐明明等^[9]的方法,取 1 g 八宝粥粉末样品溶于 30 mL 蒸馏水,于 80℃下磁力搅拌 30 min。样品冷却后,4500 r/min 离心 20 min。取上清液于锥形瓶中,置于 105℃烘箱中干燥至恒重后称重。计算公式为:

$$\text{溶解性(g/g)} = \frac{(W_3 - W_2)}{W_1}$$

式中: W_1 为八宝粥粉的质量(g); W_2 为锥形瓶的质量(g); W_3 为锥形瓶和样品的质量(g)。

1.3.5 持水力的测定 参考唐明明等^[9]的方法,取 1 g 八宝粥粉末样品溶于 30 mL 蒸馏水,于 25 °C 下磁力搅拌 30 min。4500 r/min 离心 20 min,弃去上清液,精确称量样品沉淀与离心管的重量。计算公式为:

$$\text{持水力(g/g)} = \frac{(W_3 - W_2 - W_1)}{W_1}$$

式中: W_1 为八宝粥粉的质量(g); W_2 为空离心管的质量(g); W_3 为离心管和样品的质量(g)。

1.3.6 膨胀度的测定 参考 Meng 等^[10]方法,精确称取 2 g 的八宝粥粉末放到刻度试管中,记录初始粉末的体积。加入 15 mL 的蒸馏水溶解后,于室温下放置 24 h,记录粉末占据的体积。计算公式为:

$$\text{膨胀力(mL/g)} = \frac{(V_2 - V_1)}{m}$$

式中: m 为八宝粥粉末样品的质量(g); V_1 为初始粉末的体积(mL); V_2 为 24 h 后粉末的体积(mL)。

1.3.7 堆积密度和振实密度的测定

1.3.7.1 堆积密度 参考 Zhao 等^[11]的方法,取 2 g 八宝粥粉末样品放入 25 mL 刻度试管中,记录粉末占据的体积。计算公式为:

$$\text{堆积密度(g/mL)} = \frac{m}{V}$$

式中: m 为八宝粥粉末样品的质量(g); V 为粉末在刻度试管中占据的体积(mL)。

1.3.7.2 振实密度 将上述刻度试管在厚纱布上连续振荡,直至样品的体积不再变化为止,读取此刻样品的体积。计算公式为:

$$\text{振实密度(g/mL)} = \frac{m}{(V_1 - V_2)}$$

式中: m 为八宝粥粉末样品重量(g); V_1 为振荡前粉末的体积(mL); V_2 为振荡后粉末的体积(mL)。

1.3.8 休止角和滑角的测定

1.3.8.1 休止角 参考傅茂润等^[12]的方法,将玻璃漏斗垂直置于玻璃平板上方,持续稳定地倒入八宝粥粉末,直至落下的粉末形成的锥体尖部达到漏斗出口。待锥体稳定后,测量锥体的半径及高度。计算公式为:

$$\text{休止角} \theta = \arctg\left(\frac{2R}{H}\right)$$

式中: R 为锥体的半径; H 为漏斗尾端距玻璃平板的垂直距离。

1.3.8.2 滑角 将 5 g 八宝粥粉末样品置于洁净的玻璃平板一侧(长 9 cm)上,缓慢调节平板的倾斜角度至样品开始移动,通过测量平板距水平面高度来计算样品的滑角。计算公式为:

$$\text{滑角} \alpha = \arcsin\left(\frac{H}{L}\right)$$

式中: H 为玻璃平板距平面的高度; L 为玻璃平板的长度。

1.3.9 抗氧化活性的测定

1.3.9.1 还原力 参考 Fu 等^[13]的方法,取 0.75 mL 0.2 mol/L 的磷酸缓冲液、0.75 mL 0.03 mol/L 的 $K_3Fe(CN)_6$ 溶液和 0.1 mL 八宝粥粉末乙醇提取液于试管中,充分混匀后经 50 °C 水浴 20 min,冷却至室温后加入 0.75 mL 10% 的三氯乙酸溶液、2.5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 0.16% 的 $FeCl_3$,静置 10 min 后,于波长 700 nm 下测定样品的吸光值。

1.3.9.2 DPPH 自由基清除能力 参考阎然等^[14]的方法,取 0.2 mL 八宝粥粉末乙醇提取液和 3.8 mL 120 $\mu\text{mol/L}$ DPPH 溶液于试管中,在避光环境下经 25 °C 保温 30 min 后,于 525 nm 处测定吸光值。计算公式为:

$$\text{DPPH自由基清除能力(\%)} = (A_1 - A_2)/A_1 \times 100$$

式中: A_1 为未加入被检测物质的空白对照吸光值; A_2 为加入不同剂量的被检测物质的吸光值。

1.3.10 总酚含量的测定 参考 Wei 等^[15]的方法,取 0.2 mL 八宝粥粉末乙醇提取液、1 mL Folin 酚试剂和 0.8 mL 7.5% 的 Na_2CO_3 溶液于试管中,25 °C 避光保温 2 h 后,于 765 nm 处测量样品的吸光度。其中标准曲线为: $y=0.0154x$, $R^2=0.9993$ 。

1.3.11 总黄酮含量的测定 参考 Fu 等^[13]的方法,取 1 mL 八宝粥粉末乙醇提取液、0.15 mL 5% 的 $NaNO_2$ 溶液、0.15 mL 10% 的 $Al(NO_3)_3$ 溶液和 1 mL 4% 的 $NaOH$ 溶液于试管中,充分反应后,于 510 nm 处测量样品的吸光度。其中标准曲线为: $y=0.5069x+0.0006$, $R^2=0.997$ 。

1.4 数据处理

每种样品设置 3 个平行,实验数据使用 Excel 2010 软件进行绘制图表,用 SPSS 25.0 软件进行差异显著性分析,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示,采用方差分析进行邓肯氏检验,以 $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 超微粉碎对八宝粥粉色差的影响

八宝粥原料样品、粗粉和超微粉的颜色如图 1 所示。与粗粉相比,超微粉的颜色更白,亮度更高。图 2 展示了粗粉与超微粉的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。经过超微粉碎处理,八宝粥粉体的 L^* 值显著上升($P<0.05$),从

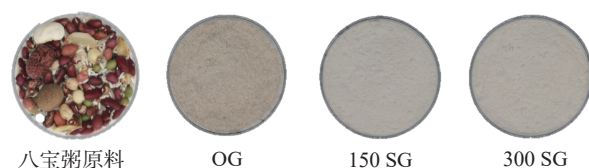


图 1 不同粉碎粒度八宝粥粉末的色泽差异

Fig.1 Color changes of mixed congee powders with different particle sizes

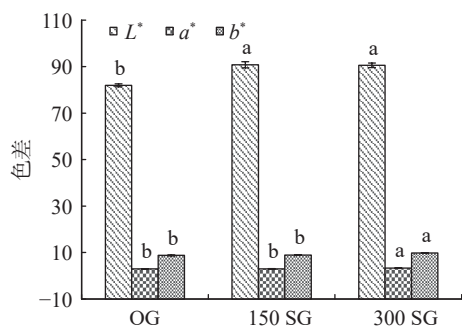


图2 八宝粥粗粉及超微粉的色差

Fig.2 Color parameters of mixed congee powders with different particle size

注: 不同字母表示同一指标数据间的显著差异($P<0.05$); 图5~图8同。

81.94(OG)增加至 91.79(150 SG)和 91.57(300 SG), 这与图1所示结果相同。 a^* 值和 b^* 值只出现了轻微的变化, 粗粉与 150 SG 相比无显著差异($P>0.05$), 而与 300 SG 相比, a^* 值和 b^* 值分别从 2.97 增加到 3.31, 8.76 增加到 9.82。先前的研究成果中也得到相同的结论, 例如 Ozdemir 等^[16]发现高剪切均质可以使得榛子皮粉末的亮度更高, 颜色更红更黄; 同样, Meng 等^[8]也发现超微粉碎也会使铁皮石斛的颜色较亮, 略带黄色。这可能是因为原料经过高程度的粉碎后, 原料中的有色成分得到充分暴露, 同时粉末粒

径的减小, 表面积的增加, 也使得粉末亮度更亮。

2.2 超微粉碎对八宝粥粉微观结构的影响

八宝粥粗粉和超微粉的扫描电镜图(1000 和 2000 倍)如图3所示, 在相同的放大倍数下, 八宝粥粗磨粉的颗粒较超微粉更为圆润光滑, 呈现出紧密包裹的完整球状空间结构。而经超微粉碎后, 随着粉碎程度的增强, 分子键的断裂, 八宝粥粉末颗粒从有序结构转变为无序结构^[11], 球状结构逐渐消失, 颗粒呈现不完整的碎片状。同时超微粉碎后形成的颗粒粉体, 在分子作用力的影响下更易团聚附着在大颗粒的表面^[17], 300 SG 超微粉较 150 SG 超微粉更易发生颗粒的团聚, 导致粉体的尺寸增大。

2.3 超微粉碎对八宝粥粉粒径分布的影响

粉体的粒径大小是评价其品质的重要指标之一。八宝粥粗粉(OG)和超微粉(150 SG 和 300 SG)的粒径分布如图4所示。与粗粉相比, 经过超微粉碎后, 八宝粥粉体的粒径明显下降, 并且 150 SG 超微粉和 300 SG 超微粉的粒度分布无明显变化。表1总结了八宝粥粗粉与超微粉的粒径分布与比表面积。粒径分布由 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、 D_{100} 、峰值粒径、 $D_{(4,3)}$ 和 $D_{(3,2)}$ 值表征。与粗粉相比, 超微粉 D_{50} 、 D_{90} 、 D_{100} 、峰值粒径和 $D_{(4,3)}$ 和 $D_{(3,2)}$ 均发生了显著下降($P<0.05$), 但 150 SG 超微粉和 300 SG 超微粉之间没有显著差异($P>0.05$), 这与上文中 2.2 的现象相

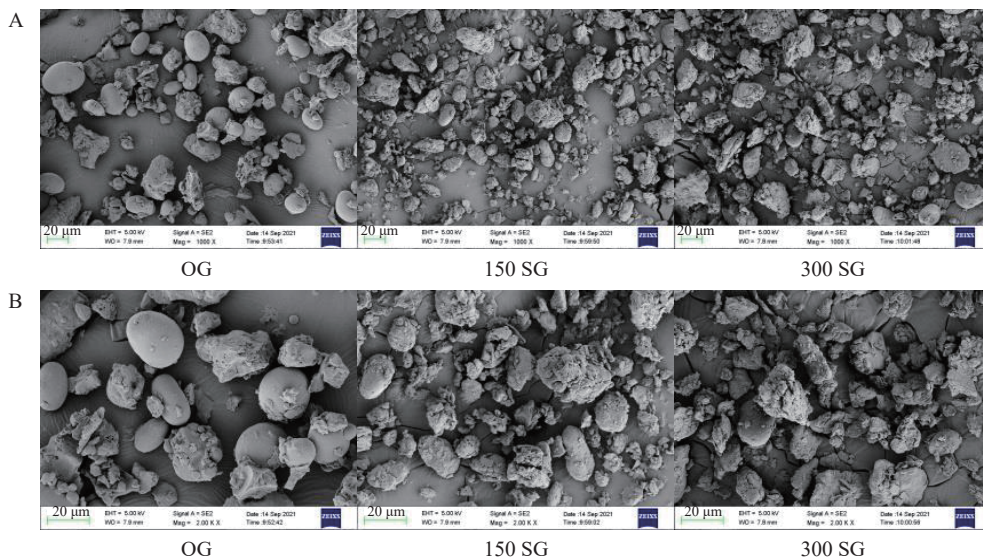


图3 八宝粥粗粉及超微粉的电镜扫描图

Fig.3 Electron microscope scan of mixed congee powders with different particle size

注: A 为 1000 倍下的扫描电镜图; B 为 2000 倍下的扫描电镜图。

表1 八宝粥粉的粒径和比表面积

Table 1 Particle size and specific surface area of mixed congee powders

样品	$D_{10}(\mu\text{m})$	$D_{50}(\mu\text{m})$	$D_{90}(\mu\text{m})$	$D_{100}(\mu\text{m})$	$D_{(3,2)}(\mu\text{m})$	$D_{(4,3)}(\mu\text{m})$	峰值粒径(μm)	跨距	比表面积(m^2/kg)
OG	6.63 ± 0.25^a	75.06 ± 5.64^a	352.71 ± 70.25^a	767.90 ± 177.68^a	16.82 ± 0.62^a	132.19 ± 20.93^a	200.00 ± 0.00^a	4.57 ± 0.59^a	357.19 ± 13.27^b
150 SG	6.53 ± 0.18^a	24.50 ± 0.36^b	69.19 ± 0.59^b	194.40 ± 3.69^b	13.98 ± 0.23^b	32.31 ± 0.34^b	31.03 ± 0.87^b	2.56 ± 0.04^b	429.17 ± 6.94^a
300 SG	6.57 ± 0.05^a	23.55 ± 0.03^b	60.71 ± 0.85^b	155.94 ± 0.00^b	13.98 ± 0.05^b	29.46 ± 0.19^b	30.75 ± 0.98^b	2.30 ± 0.04^b	429.28 ± 1.52^a

注: 不同字母表示同一指标数据间的显著差异($P<0.05$); 表2~表4同。

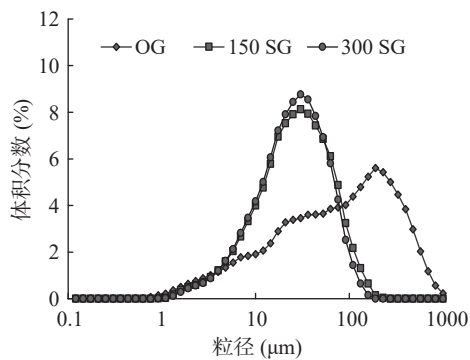


图 4 八宝粥粗粉和超微粉的粒径分布

Fig.4 Particle size distribution of mixed congee powders

同,可能是由于 300 SG 超微粉较 150 SG 超微粉,粉体的破碎程度更强,分子间作用力也更明显,更易发生颗粒的团聚,导致粉体的尺寸增大。跨度值(span)也是衡量粉体粒径分布的重要指标,跨度值越小,则粒径越均匀,粒径分布越窄^[18]。表 1 和图 1 均表明,超微粉的跨度值小于粗粉($P<0.05$),其粒径比粗粉均匀,分布范围更窄。此外,超微粉的比表面积约为粗粉的 1.2 倍,表明经过超微粉碎后,八宝粥粉体更易与其他物质混匀^[19]。

2.4 超微粉碎对八宝粥粉水合特性的影响

表 2 比较了八宝粥粗粉(OG)和超微粉(150 SG 和 300 SG)的溶解度、持水力及膨胀度差异。300 SG 的超微粉其溶解度为 0.30 g/g,高于 150 SG 超微粉的溶解度(0.28 g/g),但三者无显著差异($P>0.05$)。这可能是由于高温(80 ℃)促进了粉体中不溶性物质向可溶性物质的转变,且颗粒内部的可溶性物质在温度较高时被完全释放,从而造成了粗粉和超微粉之间差异不显著。郝竞霄等^[20]的研究也表明,在高温条件下,不同品种茶树菇的粗粉与超微粉溶解度无明显差别。

表 2 八宝粥粗粉及超微粉的水合特性

Table 2 Hydration properties of mixed congee powders with different particle size

样品	溶解度(g/g)	持水力(g/g)	膨胀度(mL/g)
OG	0.28±0.02 ^a	9.69±0.29 ^a	1.08±0.01 ^a
150 SG	0.28±0.02 ^a	9.43±0.36 ^a	0.58±0.04 ^b
300 SG	0.30±0.00 ^a	6.05±0.82 ^b	0.18±0.02 ^c

持水力能够反映粉体对水分的束缚能力,超微粉碎后八宝粥 150 SG 超微粉的持水力为 9.43 g/g,略低于粗粉的持水力(9.69 g/g),但两者并无显著差异($P>0.05$)。而 300 SG 超微粉的持水力为 6.05 g/g,显著低于粗粉和 150 SG 超微粉($P<0.05$)。这可能是由于八宝粥原料中易吸水溶胀的膳食纤维含量较高,经超微粉碎后,破坏了部分纤维及基团结构,使其持水性下降^[21]。此外 300 SG 进一步将原有的膳食纤维滤除,造成粉体束缚水分的能力降低^[22-23]。

膨胀度是表征粉体水合能力的重要参数,膨胀

度与粉体在水中的稳定性正相关^[24]。由表 2 可知,随着八宝粥粉体粒径的减小,其膨胀度显著降低($P<0.05$)。超微粉碎后,300 SG 超微粉的膨胀度(0.18 mL/g),显著低于 150 SG 超微粉(0.58 mL/g)及粗粉(1.08 mL/g)。这是由于八宝粥粉体中含有大量的淀粉、蛋白和纤维等大分子长链结构,超微粉碎可使长链变短,降低其水合能力,造成粉体不易吸水膨胀^[25]。在苦荞麸皮^[26]、茶树菇粉体^[20]及青稞麸皮^[17]中也得到了同样的结论。

2.5 超微粉碎对八宝粥粉填充性的影响

粉体的填充性受堆积密度和振实密度的影响,密度越大,粉体填充性能越佳^[27]。如表 3 所示,八宝粥 150 SG 和 300 SG 超微粉的堆积密度分别为 0.45 和 0.37 g/mL,均显著低于粗粉的堆积密度 0.61 g/mL,并且随粒径的减小而显著下降($P<0.05$)。这可能是由于超微粉的比表面积大于粗粉,颗粒间的静电吸引力易使颗粒发生团聚形成大的集团,从而造成颗粒间空隙增大,堆积密度减小^[28]。粗粉和 150 SG 超微粉的振实密度无显著差异($P>0.05$),而 300 SG 的超微粉的振实密度为 1.02 g/mL,显著低于粗粉及 150 SG 超微粉($P<0.05$),表明经过 300 目筛过滤后,超微粉更不宜压缩。

表 3 八宝粥粗粉及超微粉的填充性

Table 3 Filling properties of mixed congee powders with different particle size

样品	堆积密度(g/mL)	振实密度(g/mL)
OG	0.61±0.04 ^a	1.72±0.39 ^a
150 SG	0.45±0.01 ^b	2.08±0.14 ^a
300 SG	0.37±0.01 ^c	1.02±0.03 ^b

2.6 超微粉碎对八宝粥流动性的影响

休止角和滑角与粉体的流动性密切相关,休止角和滑角越小,粉体的流动性越好^[12]。如表 4 所示,八宝粥 150 SG 和 300 SG 超微粉的休止角分别为 44.27°和 41.80°,均显著小于粗磨粉的休止角,46.26°,并随粉末粒径的减小呈现下降的趋势($P<0.05$);八宝粥 150 SG 超微粉的滑角为 43.55°,与粗粉及 300 SG 超微粉的滑角并无明显差异,而 300 SG 超微粉的滑角为 42.24°,显著小于粗粉的滑角 45.03°($P<0.05$)。表明超微粉碎后的八宝粥粉末拥有更好的流动性。这可能是由于随着粉碎程度的加强,粉体的粒径减小,比表面积增大,颗粒间的分子间作用力增强^[29],八宝粥粉末更易团聚形成大颗粒,在重力的作

表 4 八宝粥粗粉及超微粉的流动性

Table 4 Fluidity of mixed congee powders with different particle size

样品	休止角(°)	滑角(°)
OG	46.26±0.29 ^a	45.03±0.62 ^a
150 SG	44.27±0.66 ^b	43.55±0.68 ^{ab}
300 SG	41.80±0.67 ^c	42.24±0.77 ^b

用下粉体易滑动,从而流动性增大。

2.7 超微粉碎对八宝粥粉抗氧化活性的影响

还原力是评价粉体抗氧化活性的重要指标,还原力的高低与样品的抗氧化活性呈正比。如图5所示,八宝粥粗粉的还原力最低,为0.59,经超微粉碎处理后,150 SG超微粉和300 SG超微粉的还原力显著上升($P<0.05$),并随着粒径的减小而增加,分别为0.77和0.80,但两者差异不显著($P>0.05$)。

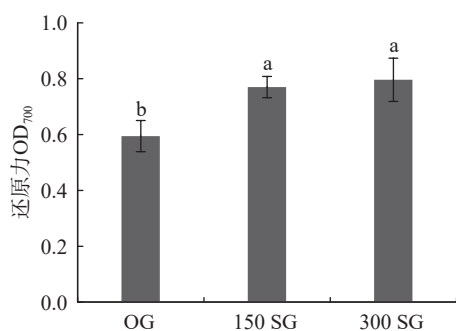


图5 八宝粥超微粉的还原力

Fig.5 Reducing power of mixed congee superfine powder

DPPH法已被广泛应用于评价各种天然化合物的抗氧化活性^[30]。八宝粥粗粉及不同粒径超微粉对DPPH自由基的清除能力如图6所示。其中150 SG和300 SG的超微粉对DPPH自由基的清除能力无显著差异,分别为55.83%和59.98%($P>0.05$),但其显著高于粗粉对DPPH自由基的清除能力44.28%($P<0.05$)。这是由于粗粉中原本仅有少量游离的抗氧化活性物质,所以其抗氧化活性较低,但经超微粉碎处理后,粉体颗粒中处于结合或包埋状态的抗氧化活性物质被释放,使其抗氧化活性增强。Zhang等^[31]和Zhong等^[32]的研究结果也表明超微粉碎有助于提高样品的抗氧化性。

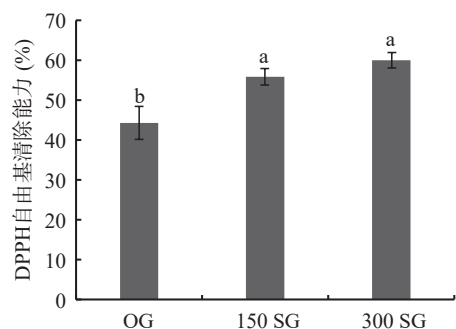


图6 八宝粥超微粉的DPPH自由基清除能力

Fig.6 DPPH free radical scavenging ability of mixed congee superfine powder

2.8 超微粉碎对八宝粥粉主要活性物质溶出量的影响

不同粒径八宝粥粉中主要活性成分的溶出量如图7和图8所示。粉体中总酚及总黄酮的溶出量均随着粒径的减小呈现出上升趋势。尤其是300 SG的超微粉,其总酚及总黄酮的溶出量分别为2.14和11.33 mg/g,均显著高于粗粉的1.83及8.99 mg/g($P<$

0.05),是粗粉的1.16和1.22倍。这可能是由于高强度超微粉碎使原料的细胞壁破碎,粉体的粒径减小,比表面积增大,同时粉末的孔隙率增大,使得细胞内物质可以迅速且充分的释放在溶媒中,从而增加了粉体中主要活性物质的溶出量,提高了其生物利用率。

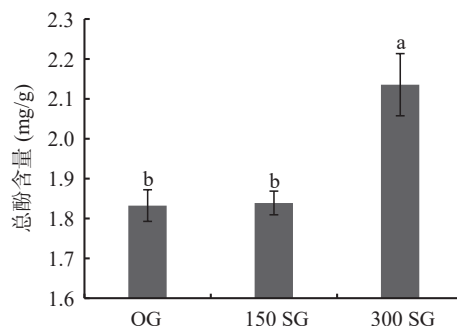


图7 八宝粥超微粉的总酚含量

Fig.7 Total phenol content of mixed congee superfine powder

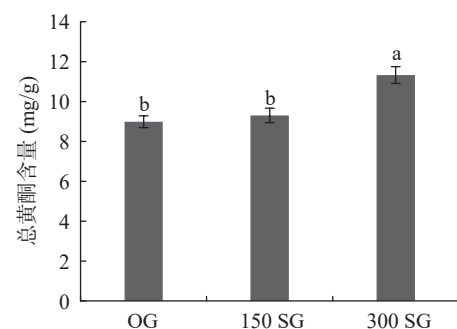


图8 八宝粥超微粉的总黄酮含量

Fig.8 Total flavonoids content of mixed congee superfine powder

3 结论

本实验对八宝粥原料进行超微粉碎及过筛处理,研究了超微粉碎处理对八宝粥理化特性及功能特性的影响。结果表明,经过超微粉碎处理后,八宝粥粉体的粒径、持水力及膨胀度均显著下降($P<0.05$),且300 SG比150 SG下降幅度更大。随着粉碎程度的增加,粉体比表面积增大,小分子颗粒更易附着在大分子颗粒的表面形成较大的颗粒,使超微粉碎后的粉体更难压缩,色泽更鲜亮。同时较大的颗粒在重力的作用下更易滑下,使得粉体的流动性增大。与粗粉相比,超微粉粉体粒径越小,其抗氧化活性及主要活性物质溶出量越高。综上所述,超微粉碎提高了八宝粥产品的营养及功能性价值,改善了其稳定性,为超微粉碎技术在八宝粥的深加工产业的应用推广提供了理论基础。

参考文献

- [1] 贵东旭,周小悦,陶文初,等.八宝粥原料冻融稳定性研究[J].食品科技,2015,40(12):56-59. [BEN D X, ZHOU X Y, TAO W C, et al. The freeze-thaw stability of the ingredients in canned mixed congee[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(12): 56-59.]
- [2] 张丽媛,陈如,田昊,等.超微粉碎对苹果膳食纤维理化性质

- 及羟自由基清除能力的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(15): 139–144. [ZHANG L Y, CHEN R, TIAN H, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and hydroxyl radical scavenging capacity of apple dietary fiber[J]. *Food Science*, 2018, 39(15): 139–144.]
- [3] 郭妍婷, 黄雪, 陈曼, 等. 超微粉碎技术在食品加工中的应用[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2017, 30(3): 60–64. [GUO Y T, HUANG X, CHEN M, et al. Application of superfine grinding technology in food processing[J]. *Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering*, 2017, 30(3): 60–64.]
- [4] 杨春瑜, 柳双双, 梁佳钰, 等. 超微粉碎对食品理化性质影响的研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(1): 220–224. [YANG C Y, LIU S S, LIANG J Y, et al. Effects of superfine grinding technology on physical and chemical property of food[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(1): 220–224.]
- [5] 刘月如, 王海林, 杨茂, 等. 超微化膳食纤维功能特性的研究进展[J]. *食品科技*, 2020, 341(3): 74–78. [LIU Y R, WANG H L, YANG M, et al. Research progress of functional properties of superfine dietary fiber[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 341(3): 74–78.]
- [6] LI G H, GUO W Y, GAO X L, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of soybean residue powder[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8: 1208–1214.
- [7] 王立东, 寇芳, 刘婷婷. 气流超微粉碎对蜡质玉米淀粉结构及理化性质的影响[J]. *高分子通报*, 2017(2): 59–66. [WANG L D, KOU F, LIU T T. Effect of jet superfine pulverization on the structure and physicochemical properties of waxy corn starch[J]. *Polymer Bulletin*, 2017(2): 59–66.]
- [8] MENG Q R, FAN H, XU D, et al. Superfine grinding improves the bioaccessibility and antioxidant properties of *Dendrobium officinale* powders[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52: 1440–1451.
- [9] 唐明明, 孙汉巨, 赵金龙, 等. 超微粉碎对水芹粉末理化性质及抗氧化活性的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(7): 55–65. [TANG M M, SUN H J, ZHAO J L, et al. Effect of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activities of water dropwort powder[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(7): 55–65.]
- [10] MENG Q R, FAN H, CHEN F, et al. Preparation and characterization of *Dendrobium officinale* powders through superfine grinding[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2017, 8: 15902–15912.
- [11] ZHAO X, YANG Z, GAI G, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91: 217–222.
- [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. [FU M R, ZHAO S, QU Q L, et al. Effects of superfine grinding on physicochemical properties and processing characteristics of red rice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2013, 39(4): 96–100.]
- [13] FU M R, QU Q L, YANG X Y, et al. Effect of intermittent oven drying on lipid oxidation, fatty acids composition and antioxidant activities of walnut[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016: 65.
- [14] 阎然, 陈庆敏, 傅茂润, 等. 1-MCP 处理对山芹货架期品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2019, 19(5): 33–39. [YAN R, CHEN Q M, FU M R, et al. Effect of 1-MCP treatment on the shelf life quality of wild celery (*Ostericum sieboldii*)[J]. *Storage and Process*, 2019, 19(5): 33–39.]
- [15] WEI F, CHEN Q M, DU Y M, et al. Effects of hulling methods on the odor, taste, nutritional compounds, and antioxidant activity of walnut fruit[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 120: 108938.
- [16] OZDEMIR KS, YILMAZ C, DURMAZ G, et al. Hazelnut skin powder: A new brown colored functional ingredient[J]. *Food Research International*, 2014, 65: 291–297.
- [17] 赵萌萌, 党斌, 张文刚, 等. 超微粉碎对青稞麸皮粉微观结构及功能特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36: 278–286. [ZHAO M M, DANG B, ZHANG W G, et al. Effect of superfine grinding on microstructure and functional properties of highland barley bran powder[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36: 278–286.]
- [18] MING J, CHEN L, HONG H, et al. Effect of superfine grinding on the physico-chemical, morphological and thermogravimetric properties of *Lentinus edodes* mushroom powders[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 95: 2431–2437.
- [19] RILEY C K, ADEBAYO S A, WHEATLEY A O, et al. Surface properties of yam (*Dioscorea* sp.) starch powders and potential for use as binders and disintegrants in drug formulations[J]. *Powder Technology*, 2008, 185(3): 280–285.
- [20] 郝竞霄, 惠靖茹, 程洋洋, 等. 普通粉碎与超微粉碎对茶树菇粉体加工物理特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021(47): 95–100. [HAO J X, HUI J R, CHENG Y Y, et al. Effects of common grinding and ultrafine grinding on physical properties of *Agrocybe cylindracea* powder processing[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021(47): 95–100.]
- [21] ZHANG M, ZHANG C J, SHRESTHA S. Study on the preparation technology of superfine ground powder of *Agrocybe chaxingu* Huang[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 67(3): 333–337.
- [22] 乔小全, 任广跃, 段续, 等. 超微粉碎辅助提取黑豆皮水溶性膳食纤维及其特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2018(33): 92–98, 104. [QIAO X Q, REN G Y, DUAN X, et al. Study on the extraction and characteristics of water-soluble dietary fiber from black soybean hull by superfine grinding[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018(33): 92–98, 104.]
- [23] 崔蕊静, 邹静, 康维民. 枸杞普通粉超微粉碎对其物化特性的影响[J]. *食品科技*, 2017, 42(4): 49–52, 56. [CUI R J, ZOU J, KANG W M. Effect of super micro-milling on physio-chemical properties of *Lycium barbarum* L. powders[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(4): 49–52, 56.]
- [24] 陈如, 何玲. 超微粉碎对苹果全粉物化性质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(13): 150–154. [CHEN R, HE L. Effect of superfine grinding on physicochemical properties of apple powder[J]. *Food Science*, 2017, 38(13): 150–154.]
- [25] ODUNAYO C A, VASUDEVA S. Physico-chemical proper-

- ties of the flours and starches of two cowpea varieties (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(1): 92-100.
- [26] 郑慧, 王敏, 吴丹. 超微处理对苦荞麸理化及功能特性影响的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2006, 32(8): 5-9. [ZHENG H, WANG M, WU D. Effects of ultramicro treatment on physicochemical and functional properties of tartary buckwheat bran[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2006, 32(8): 5-9.]
- [27] 符群, 李卉, 王路, 等. 球磨法和均质法改善薇菜粉物化及功能性质[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(9): 285-291. [FU Q, LI H, WANG L, et al. Ball milling and homogenization improving physicochemical and functional properties of *Osmunda japonica* Thunb [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(9): 285-291.]
- [28] 王会党. 香菇超微粉制作菇精调味品的工艺及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012. [WANG H D. Processing of edible mushroom essence seasoning with *Lentinus edodes* ultrafine powder and its application[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.]
- [29] 吴翔, 董军, 伍玉茜, 等. 真空冷冻干燥香菇普通粉和超微粉物理特性研究[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(34): 152-154, 157. [WU X, DONG J, WU Y H, et al. Physical properties of ordinary powder and ultrafine powder in mushroom with vacuum freeze drying[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2018, 46(34): 152-154, 157.]
- [30] HU F L, LU R L, HUANG B, et al. Free radical scavenging activity of extracts prepared from fresh leaves of selected Chinese medicinal plants[J]. *Fitoterapia*, 2004, 75: 14-23.
- [31] ZHANG M, WANG F, LIU R, et al. Effects of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of *Lycium barbarum* polysaccharides[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 58(2): 594-601.
- [32] ZHONG C, ZU YG, ZHAO X H, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of pomegranate peel[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, 51(1): 212-221.