

粒度对广昌白莲粉粉质特性的影响

郭晓娟^{1,*}, 张 芷¹, 晏梦星¹, 王 正¹, 朱圭凤¹, 余 帆¹, 张子静¹, 陈苏娟¹, 李凌乐¹, 何桂芳¹

1. 南昌师范学院, 化学与食品科学学院, 江西南昌, 330023

摘要:为进一步促进广昌白莲的深加工,丰富广昌白莲产品品种,以广昌白莲为原料,通过调控粉碎时间制备不同粒度梯度的广昌白莲粉,系统分析了粒度对广昌白莲粉粉质特性的影响。结果表明,随着粉体粒径的减小,松装密度减小(0.46-0.32 g/mL),振实密度减小(0.72-0.57 g/mL),滑角增大(32.33° - 48.33°),休止角先增大后减小,持水性降低(1.31-0.58 g/g),持油力降低(0.82~0.72 g/g)。本研究明确了粒度对广昌白莲粉粉质特性的显著调控作用,为广昌白莲深加工工艺优化及高附加值新产品开发提供了理论支撑与技术参考。

关键词: 广昌白莲; 粒度; 粉体性质

Effect of Particle Size on the Characteristics of Guangchang White Lotus Flour

Xiaojuan Guo^{1,*}, Zhi Zhang¹, Mengxing Yan¹, Zheng Wang¹, Guifeng Zhu¹, Fan Yu¹, Zijing Zhang¹,
Sujuan Chen¹, Lingle Li¹, Guifang He¹

1. College of Chemistry and Food Science, Nanchang Normal University, Nanchang 330023, China

Abstract: To further promote the deep processing of Guangchang white lotus and enrich the variety of Guangchang white lotus products, Guangchang white lotus flour with different particle sizes was prepared by crushing for different durations. The effect of particle size on the characteristics of Guangchang white lotus flour was studied. The results showed that decreasing particle size led to decrease in bulk density (0.46-0.32 g/mL), tap density (0.72-0.57 g/mL), water-holding capacity (1.31-0.58 g/g), and oil-holding capacity (0.82-0.72 g/g), while the slip angle increased (32.33° - 48.33°), and the angle of repose exhibited an initial rise followed by a decline. This study clarifies the significant regulatory effect of particle size on the flour characteristics of Guangchang White Lotus Pflour, providing theoretical support and technical references for the optimization of deep processing technologies and the development of high-value-added new products of Guangchang White Lotus.

Key words: Guangchang White Lotus; particle size; flour characteristics

广昌白莲是江西省广昌县的特产,为国家地理标志产品,以其色白、粒大、味甘清香、营养丰富、药用价值高等特点而闻名。有研究表明,莲子富含淀粉、蛋白质、黄酮类化合物、生物碱及多种微量元素^[1]。其黄酮类成分具有显著的抗氧化活性,可有效清除自由基并抑制脂质过氧化;此外,白莲中的功能性成分(如莲心碱)还被证实具有调节肠道菌群、降低血糖等生理功能^[2]。这些特性使广昌白莲成为功能性食品开发的理想原料。传统的莲子制品有莲蓉、莲子八宝粥、糖莲子、莲子

粉等。近年来，莲子食品的品类愈发丰富，涵盖饮品、甜品、果酱、酸奶、休闲零食及面条等种类^[3]。莲子粉是莲子的重要加工形式，其粉体性质会直接影响其产品品质，而食品粉体性质受其粒度的影响^[4-7]。因此，研究粒度对广昌白莲粉粉质特性的影响是提升广昌白莲产品品质的重要途径。然而，目前莲子粉的加工特性研究较少，尤其是粒度对粉体性质的影响尚未明确。本研究通过制备不同粒度的广昌白莲粉，分析粒度对粉体填充性、流动性、持水性及持油性等影响，以期为白莲深加工提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

广昌白莲：广昌莲香食品有限公司；金龙鱼植物调和油：益海嘉里食品营销有限公司。

FW135 中草药粉碎机，天津市泰斯特仪器有限公司；BSA124S 分析天平，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；60、80、100、120、200 目标准筛，长沙市思杨仪器纱筛厂；TD4-2 低速离心机，长沙湘智离心机仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品粉碎处理

称取适量原料分别按照 25 s、40 s、60 s、80 s、120 s 粉碎时间进行粉碎，用秒表准确计时。所得样品分别命名为 F1、F2、F3、F4、F5。

1.2.2 样品粒度分布测定

样品的粒度及分布用筛分法进行测定^[8]，选择 60 目、100 目、120 目、200 目、300 目型号的标准筛对每个样品白莲粉进行振荡筛分，最后得到六个粒径范围的粉，测得各部分质量占比。

1.2.3 松装密度和振实密度

松装密度：将粉碎程度不同的米粉粉体分别从漏斗加入已知重量的 10 mL 量筒中，装到 10 mL，不振动称量此时量筒和样品的质量，差值为样品质量，计算其松装密度 ρ_1 (g/mL)，计算公式 (1-1) 为^[9]：

$$\rho_1 = m/V \quad (1-1)$$

式中：m 为样品质量，V 为样品体积。

振实密度：除振动样品直至样品体积不再变化外，其他操作同松装密度。

1.2.4 滑角和休止角

滑角：准确称取一定质量不同粉碎时间粉碎的白莲粉，轻轻振摇并均匀分布在一块平滑玻璃板上，缓缓向上提起玻璃板的一侧，待白莲粉开始向下滑动，测定玻璃板和水平面的夹角即为滑角^[10]。

休止角：在铁架台上固定好铁圈，在铁圈上放置一个洁净的玻璃漏斗，使得漏斗下端距桌面约 10 cm，称取 3.0 g 白莲粉，使粉体缓慢的均匀的通过漏斗，自然下落呈现出完整锥体，用直尺测定其椎体的高度 H 与底面半径 R^[10]。

$$\text{休止角 } (\beta) \text{ 计算公式: } \beta = \arctan(H/R) \quad (1-2)$$

式中：β——休止角 (°)；

H——米粉堆高度 (cm)；

R——米粉堆底面半径 (cm)。

1.2.5 持水力和持油力

持油力：将一定质量（W）的白莲粉分散于 20 mL 塑料离心管中，加入适量的油，充分混匀并且静置 2 h，离心（4000 rpm，15 min），弃去上层油，称量残渣质量 W₁，持油力计算公式为：

$$\text{持油性} = (W_1 - W) / W \quad (1-3)$$

持水力：持水力测定操作与持油力相同，将上面油换成水^[11]。

1.3 数据处理

结果用平均值±标准偏差表示。数据采用 SPSS 软件、Excel 进行分析，样本均值之间的显著性差异 ($p < 0.05$) 根据 Duncan 检验采用单因素方差分析 (ANOVA) 确定。采用 Origin 2017 软件对数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 广昌白莲粉粒度分布

不同粉碎时间的广昌白莲粉筛分后各部分质量占比如图 1 所示。从图中可以看出，随着粉碎时间的延长，粒径范围在 60 目以上的粉体逐渐减少，粒径范围在 300 目以下的粉体逐渐增多，说明大颗粒粒径随着粉碎时间延长逐渐变小。结果表明，延长粉碎时间能够显著减小广昌白莲粉的粒径，且明显改变广昌白莲粉的粒径分布。该结果表明已经成功制备粒度不同的广昌白莲粉。

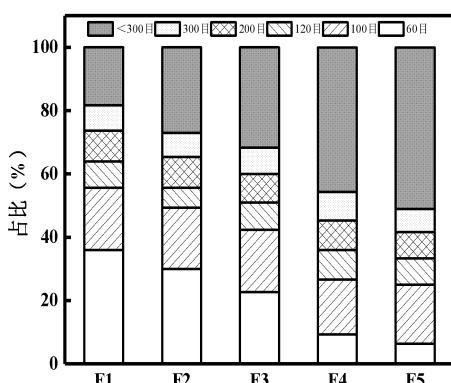


图 1 广昌白莲粉筛分结果柱状图

Fig. 1 Bar chart of particle size sieving results for Guangchang White Lotus flour

2.2 粒径对广昌白莲粉松装密度和振实密度的影响

粉体填充性主要由松装密度和振实密度反映，松装密度和振实密度越大，粉体填充性越好^[12]。松装密度，是指粉体或颗粒材料在自然松散堆积状态下，单位体积的质量。本研究了不同颗粒度广昌白莲粉松装密度，测定结果如图 2 所示。F1、F2、F3、F4、F5 的松装密度分别为 0.46、0.44、0.42、0.37、0.32 g/mL，广昌白莲粉的松装密度随着粒径的减小而显著降低。这可能是因为随着粉体粒径逐渐减小，粉体的比表面积增大，颗粒表面分子间范德华力、静电力等短程力增强，颗粒更易团聚形成松散的多孔结构，所以松装密度逐渐减小^[13]。吴进等^[14]研究也发现随着石榴粉粒径的减小，粉体的松装密度逐渐降低。

粉体振实密度在食品行业中贯穿从原料处理到终端产品的多个环节，直接影响生产效率、成本控制、产品质量及用户体验。粒度对广昌白莲粉振实密度的影响如图 2 所示，F1、F2、F3、F4、F5 的振实密度分别为 0.72、0.70、0.67、0.65、0.57 g/mL，随着粉体粒径逐渐减小，广昌白莲粉的振实密度逐渐减小。这可能是由于随着广昌白莲粉粒径减小，比表面积增大，有效作用位点增多，粉体会发生团聚现象，使得振实密度减小。寇福兵的研究也发现随着板栗粉粒度的减小，其粉体振实密

度逐渐减小^[15]。综上，随着粉体粒度的减小，粉体的填充性变差。

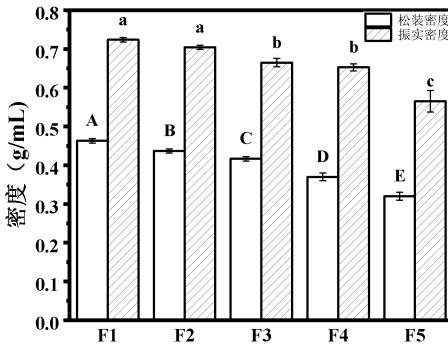


图 2 不同粒径广昌白莲粉的松装密度和振实密度

Fig. 2 Bulk density and tap density of Guangchang White Lotus flour with different particle sizes

2.3 粒径对广昌白莲粉滑角和休止角的影响

滑角是指粉体在自由堆积时，其斜面与水平面形成的最大夹角，它是衡量粉体流动性的重要指标之一，广泛应用于食品、制药、化工等领域。粒度对广昌白莲粉滑角的影响如图 3A 所示。F1、F2、F3、F4、F5 的滑角分别 32.3° 、 37.3° 、 41.0° 、 45.0° 、 48.3° ，随着广昌白莲粉粒径的减小，其粉体滑角逐渐增大。这可能是由于粉体粒径减小导致颗粒比表面积增加，粉体间接触频率增大，另外粉体自身凝聚力和吸附作用引起聚合力增大，吸附性增强，摩擦力变大，导致流动性降低^[16]。

广昌白莲粉粒度对休止角的影响如图 3B 所示。F1、F2、F3、F4、F5 的休止角分别为 29.6° 、 34.9° 、 35.4° 、 32.0° 、 33.8° 。随着粉体粒径的减小，休止角先增大后减小。先增大可能是由于颗粒粒径逐渐减小，比表面积增大，颗粒间摩擦力增强，粉体流动性变差，导致休止角逐渐增大。当粒径降低到一定程度时，颗粒过细可能导致团聚现象，流动性改善，休止角可能会减小或趋于稳定。因此，合理控制粉碎时间可优化粉末流动性。

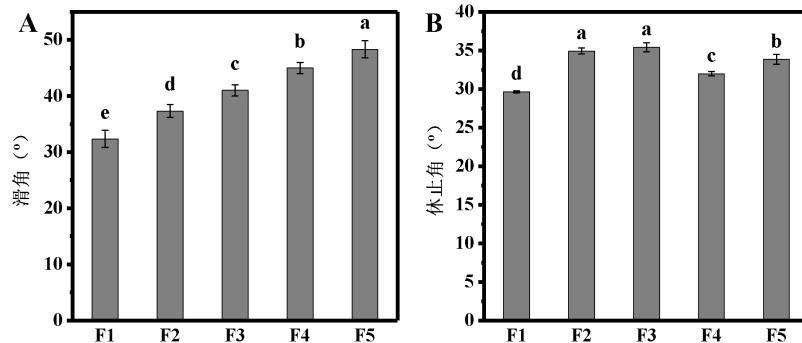


图 3 不同粒径广昌白莲粉的滑角(A)和休止角(B)

Fig. 3 Angle of repose (A) and angle of slide (B) of Guangchang White Lotus Powder with different particle sizes

2.4 粒径对广昌白莲粉持水性的影响

持水力的本质是食品中的成分通过物理或化学作用吸附、截留或束缚水分的能力。粒度对广昌白莲粉持水性的影响如图 4 所示，F1、F2、F3、F4、F5 的持水力分别为 1.31、1.27、1.26、0.64、0.58 g/g。随着广昌白莲粉粒径的减小，其持水性呈现逐渐下降的趋势。可能是由于粉碎的作用力破

坏了广昌白莲中的细胞结构，细胞破损比例增加，从而对水分束缚变小，导致粉体的持水力下降^[17]。夏晓霞等的研究也发现随着枣粉粒径减小，其粉体持水性逐渐降低^[18]。

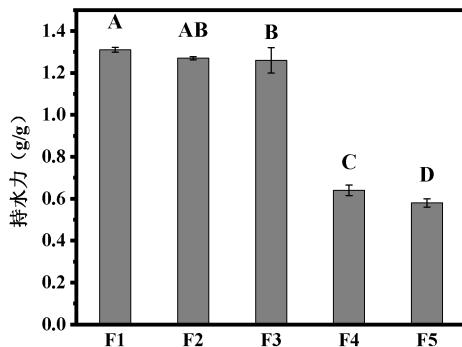


图 4 不同粒径广昌白莲粉的持水力

Fig. 4 Water-holding capacity of Guangchang White Lotus Powder with different particle sizes

2.5 粒径对广昌白莲粉持油性的影响

持油力是指食品成分（如蛋白质、多糖、膳食纤维等）吸附和保持油脂的能力，它是食品功能特性的重要指标之一，尤其在含脂食品、乳化体系及替代蛋白产品中具有关键作用。粒度对广昌白莲粉持油力的影响如图 5 所示，F1、F2、F3、F4、F5 的持油力分别为 0.82、0.76、0.76、0.75、0.72 g/g。粉碎时间由 25 s (F1) 增至 40 s (F2) 时，广昌白莲粉的持油力显著降低，当粒径进一步减小时 (F2-F5)，广昌白莲粉的持油力无显著性差异，粉碎时间为 25 s 时粉体持油力最大。张明等在对大麦苗粉碎后粉体品质的研究中发现，适当的粉碎有利于油脂吸附，但当粉体粒度过小时，粉体在油脂中易发生团聚，表面与油脂无法很好接触吸附，将导致持油力降低^[19]。

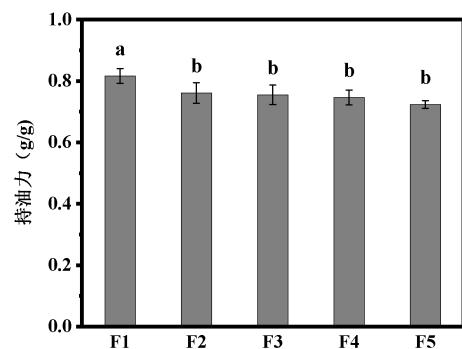


图 5 不同粒径广昌白莲粉的持油力

Fig. 5 Oil-holding capacity of Guangchang White Lotus Powder with different particle sizes

3 结论与讨论

本文研究了粒径对广昌白莲粉粉体性质的影响规律。结果表明，在粉质特性方面，随着粒径的减小，粉体的松装密度和振实密度显著降低，表明其颗粒填充性能逐渐变差；粉体的流动性下降，具体表现为滑角持续增大，而休止角则呈现先升高后降低的变化规律；同时，粉体的持水性与持油性也均随粒径减小而降低。上述结果表明，粒径是调控广昌白莲粉粉体性质的关键因素，其差异可能进一步影响相关深加工产品的理化性状与加工适应性，相关机制及应用优化将在后续研究中进一

步探讨。

参考文献

- [1] 胡晗. 莲子速溶粉加工工艺的研究及代餐粉的开发[D]. 福建农林大学, 2020.
- [2] Liu X, Dong W, Yi Y, et al. Comparison of nutritional quality and functional active substances in different parts of eight lotus seed cultivars[J]. Foods, 2024, 13(15): 2335-2335.
- [3] 王晔洋, 李伟荣, 黄莎, 等. 莲子在食品领域的开发研究现状[J]. 农产品加工, 2024, (14): 80-86.
- [4] Guo X, He X, Dai T, et al. The physicochemical and pasting properties of purple corn flour ground by a novel low temperature impact mill[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102825.
- [5] 史早, 张甫生, 杨金来, 等. 超微粉碎对方竹笋全粉理化特性及微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 40-47.
- [6] Qin W, Lin Z, Wang A, et al. Influence of particle size on the properties of rice flour and quality of gluten-free rice bread[J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 151: 112236.
- [7] Pang J, Guan E, Yang Y, et al. Effects of wheat flour particle size on flour physicochemical properties and steamed bread quality[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(9): 4691-4700.
- [8] 田潇凌. 小麦制粉中机械力化学效应及其对品质影响机制[D]. 河南工业大学, 2022.
- [9] 李振江, 刘莹, 支莉, 等. 球磨超微粉碎对桦褐孔菌粉体颗粒特性及多糖提取效果的影响[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(11): 1-8.
- [10] 郝竟霄, 石福磊, 惠靖茹, 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(03): 95-100.
- [11] 郭晓娟. 低温冲击磨中紫玉米的粉碎机理及品质调控机制研究[D]. 南昌大学, 2023.
- [12] 冯瑜霞, 曲美霖, 程哲, 等. 磨粉方式对苦荞叶粉理化特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(10): 21-27.
- [13] Antonios D, Lito A-P, Vasiliki E, et al. Physical and textural properties of biscuits containing jet milled rye and barley flour[J]. Journal of food science and technology, 2019, 56(1): 367-375.
- [14] 吴进, 郭艳, 张爽, 等. 石榴皮粉粒径对其理化及抗氧化特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(05): 132-138.
- [15] 寇福兵. 超微粉碎板栗粉理化性质及其对面条加工特性的影响[D]. 西南大学, 2022.
- [16] 曾小峰, 颜蜜, 盖智星, 等. 超微粉碎对羊肚菌粉品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(09): 192-199.
- [17] 杨世雄, 高飞虎, 张玲, 等. 不同超微粉碎强度对甘薯全粉特性的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(04): 80-89.
- [18] 夏晓霞, 寇福兵, 薛艾莲, 等. 超微粉碎对枣粉理化性质、功能特性及结构特征的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(12): 37-45.
- [19] 张明, 马超, 王崇队, 等. 不同粉碎粒度对大麦苗粉体品质和加工特性的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(07): 224-228.

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2401907); 南昌师范学院博士科研启动基金资助项目(NSBSJJ2023011); 南昌师范学院校级科研项目(24XJZX01); 南昌师范学院学生科研创新项目(23XSKY93); 南昌师范学院学生科研创新项目(25XSKY58)。

第1作者/通讯作者简介: 郭晓娟(1991-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 农产品加工。E-mail: gxjnc137808@163.com。