Vol. 47 No. 4

DOI: 10. 13718/j. cnki. xdzk. 2025. 04. 007

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(4):80-89.

不同超微粉碎强度对甘薯全粉特性的影响

杨世雄^{1,2}, 高飞虎^{1,2}, 张玲^{1,2}, 李雪^{1,2}, 张雪梅^{1,2}, 张欢欢^{1,2}, 梁叶星^{1,2}, 陈贵婷¹, 谭兆涛³

1. 重庆市农业科学院,重庆 401329; 2. 重庆农科粮油加工技术研究有限公司,重庆 401329;

3. 重庆市潼南区农业农村委员会, 重庆 潼南 402660

摘要:采用振动式超微粉碎技术制备甘薯全粉,分析不同超微粉碎时间(5、10、15、20、25、30 min)对全粉的基本 成分、结构和理化性质的影响。结果表明:随着超微粉碎时间的增加,甘薯全粉基本营养成分呈现不同程度的增加 或减少,尤其是蛋白、可溶性膳食纤维和可溶性糖等含量有所增加,全粉粒径显著减小(p<0.05),颗粒形貌呈现 碎片化,大小逐渐趋于一致,但其官能团结构并未发生改变,色泽、持水性、持油性及冻融稳定性均有不同程度的 改善,糊化温度、峰值黏度、最小黏度、最终黏度、崩解值及回生值随着超微粉碎时间的增加呈显著降低趋势,说 明甘薯全粉经超微粉碎后能够显著改善其热糊稳定性和凝胶的抗老化性。超微粉碎 25 min 的甘薯全粉可溶性膳食 纤维含量最高,粒径最小,颗粒大小均匀,且其色泽、持水性、持油性及冻融稳定性表现较好,具有最低的糊化温 度、衰减值和回生值,相比其他粉碎强度条件下的甘薯全粉,具有更优异的功能性和更适宜的加工性。

关键 词: 甘薯全粉; 超微粉碎; 强度

中图分类号: TS215 文献标志码: A

文 章 编 号: 1673-9868(2025)04-0080-10



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

The Effect of Different Ultrafine Grinding Intensities on the Characteristics of Sweetpotato Flour

YANG Shixiong^{1,2}, GAO Feihu^{1,2}, ZHANG Ling^{1,2}, LI Xue^{1,2}, ZHANG Xuemei^{1,2}, ZHANG Huanhuan^{1,2}, LIANG Yexing^{1,2}, CHEN Guiting¹, TAN Zhaotao³

- 1. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China;
- 2. Chongqing Agricultural Science Grain and Oil Processing Technology Research Corporation, Chongqing 401329, China;
- 3. Agricultural and Rural Committee of Tongnan District, Tongnan Chongqing 402660, China

Abstract: Using vibration type ultrafine grinding technology to prepare sweetpotato flour, the effects of

作者简介:杨世雄,硕士,助理研究员,主要从事薯类加工研究。

收稿日期: 2024-05-07

基金项目:重庆市与中国农业科学院战略合作项目(2022-2026);重庆市科研院所绩效激励引导专项(CSTB2024JXJL-YFX0011)。

通信作者:高飞虎,研究员。

different ultrafine grinding times (5, 10, 15, 20, 25, 30 minutes) on the basic composition, structure, and physicochemical properties of the flour were analyzed. The results showed that with the increase of grinding time, the basic nutritional components of sweetpotato flour showed varying degrees of increase or decrease, especially the content of protein, soluble dietary fiber, and soluble sugar increased, and the particle size of the flour significantly decreased (p < 0.05). The particle morphology showed fragmentation, and the size gradually tended to be consistent, but its functional group structure remained unchanged. The color, water holding capacity, oil holding capacity, and freeze-thaw stability were improved to varying degrees. The gelatinization temperature, peak viscosity, minimum viscosity, final viscosity, disintegration value, and retrogradation value showed a significant decreasing trend with the increase of time, showing that the hot paste stability and gel aging resistance of sweetpotato flour can be significantly improved by ultrafine grinding. The sweetpotato flour prepared by 25 min ultrafine grinding had the highest soluble dietary fiber content, the smallest particle size, and uniform particle size, also better color, water holding capacity, and freeze-thaw stability, and the lowest gelatinization temperature, attenuation value, and retrogradation value. Compared to sweetpotato flours prepared with other grinding intensity conditions, it had better functionality and more suitable processability.

Key words: sweetpotato flour; ultrafine grinding; intensity

甘薯,又称番薯等,是继水稻、小麦、玉米、马铃薯后的第5大农作物^[1]。作为全球最大的甘薯生产 地,我国甘薯产量约占全球产量的56.6%^[2]。甘薯富含淀粉、蛋白、膳食纤维、多糖及花青素等多种营养 成分和活性物质,具有促消化、预防癌变、提高机体免疫力等功能^[3-5]。目前,甘薯的加工利用仍然主要集 中在块根部分^[6],其常见加工产品主要有甘薯淀粉^[7-8]、甘薯果脯^[9]、甘薯脆片^[10]、甘薯全粉^[11-13]及提取的 花青素^[14]、糖蛋白^[15]等,而提取淀粉仍是当前甘薯块根的主要利用方式。在甘薯淀粉生产中,为了分离淀 粉和提高淀粉纯度,会产生大量的加工废水及薯渣,无法对甘薯进行全组分的高效利用。

甘薯全粉不仅包含了淀粉、蛋白等营养成分,更富含了甘薯膳食纤维、多糖、酮类、酚类等功能性物质。近年来,甘薯全粉在食品中的应用研究逐渐增多,范会平等^[16]将紫薯全粉添加至米粉中,研制出了低血糖指数(Glycemic Index,GD)紫薯河粉。Umer等^[17]研究了添加不同比例甘薯全粉替代油脂制备蛋黄酱, 发现添加甘薯全粉的样品在口感、质地和总体可接受性方面表现较好。甘薯全粉在食品中的应用既丰富了 产品的外观花色,同时也强化了其营养品质,但因甘薯全粉中膳食纤维等大量引入会降低面团等的加工品 质,从而使面条出现硬度大、口感粗糙、易断条,馒头、面包等口感偏硬、弹性差,饼干难成形等问题,这 在很大程度上阻碍了甘薯全粉在食品中的应用。大量研究发现,经超微粉碎得到的物料具有粉体比表面积 大、粒度更加微小和均匀、溶解性能好、营养成分溶出率高、易于人体吸收等优点^[18-19]。Sun等^[20]对蔷薇 果种子、果肉及全果进行了超微粉碎和普通粉碎,结果发现超微粉碎后的维生素 C含量比普通粉碎的要 高。Speroni等^[21]对橄榄渣进行了超微粉碎,发现其酚含量有所增加。任晓婵等^[22]研究了超微粉碎对大麦 全粉品质特性的影响,结果发现经超微粉碎后大麦全粉的品质有了显著提升,同时改善了其口感。超微粉 碎对甘薯全粉中膳食纤维等成分进行了超细化处理,当添加适当比例超微甘薯全粉不但不会影响引入食品 的感官品质,而且还会提升其营养价值^[23-24]。目前,对于甘薯全粉的研究主要集中在主食化应用等方面, 而有关不同超微粉碎强度对甘薯全粉品质特性的影响研究较少。

本研究在制得普通粉碎甘薯全粉的基础上进行了不同时间的超微粉碎,制备出不同强度条件下的甘 薯全粉,系统探究不同超微粉碎强度对甘薯全粉基本成分、颗粒表面结构和官能团结构及理化性质的影 响,旨在探明适宜的超微粉碎强度所制备的高品质甘薯全粉,为其在食品中更好地应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

甘薯(商薯19),重庆市农业科学院特色作物研究所;实验用水均为去离子水;其他试剂均为国产分析纯。

SYFM-8型振动超微粉碎机,济南松岳机械有限责任公司;HELOS-OASIS型激光粒度仪,德国新帕泰克有限公司;CM-5色差计,柯尼卡美能达控股有限公司;RVA-TecMaster快速黏度分析仪,澳大利亚珀金埃尔默企业有限公司;MDF-U4186S超低温冰箱,日本SANYO公司;日立S-3000N扫描电子显微镜,日本日立仪器有限公司;赛默飞Nicolet iS20红外光谱仪,美国赛默飞世尔光谱公司。

1.2 实验方法

1.2.1 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉的制备

1.2.1.1 工艺流程

以商薯 19 为实验原料,制备普通粉碎甘薯全粉,再将普通粉碎甘薯全粉进行不同时间的超微粉碎,制备甘薯超微全粉。具体工艺流程见图 1。



图1 工艺流程

1.2.1.2 工艺要点

① 护色:选用 0.02%抗坏血酸和 0.06% 柠檬酸混合液作为护色液,浸泡 30 min 后用清水洗涤 2~3 次。

② 干燥:采用热泵干燥,设定温度 55 ℃,干燥时间 14 h,含水率控制在 10%以内。

③ 普通粉碎:采用小型磨粉机进行粉碎,过 80 目筛,命名为 HF_{ck}。

④ 超微粉碎:将普通粉碎甘薯全粉分别在不同时间(5、10、15、20、25、30 min)条件下进行超微粉碎, 分别命名为:HF₁、HF₂、HF₃、HF₄、HF₅、HF₆。

1.2.2 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉基本成分测定

水分含量测定参照《食品安全国家标准 食品中水分的测定》(GB 5009.3—2016)进行; 蛋白含量测定 参照《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》(GB 5009.5—2016)进行; 淀粉含量测定参照《食品安全 国家标准 食品中淀粉的测定》(GB 5009—2016)进行; 脂肪含量测定参照《食品安全国家标准 食品中脂 肪的测定》(GB 5009.3—2016)进行; 膳食纤维含量测定参照《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测 定》(GB 5009.88—2023)进行; 可溶性糖测定参照上海植物生理学会主编的《作物生理研究法》中的蒽酮 比色法进行; 灰分含量测定参照《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》(GB 5009.6—2016)进行。 1.2.3 不同超微粉碎强度条件下甘著全粉粒径测定

采用 HELOS-OASIS 型激光粒度仪测定甘薯全粉粒径。吸气压力 0.1~0.6 MPa,测试范围 0.1~ 3 500 μm,仪器自动测空白对照,称取约1g甘薯全粉样品,加入样品台,开始自动进样测试,并保存测试 结果。粒度 D_n(μm)表示占总质量 n%的颗粒粒径小于该粒径值,平均粒径取 D₅₀,并计算离散度(D_{am}):

$$D_{\bar{B}\bar{B}} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \tag{1}$$

式中: D_{10} 为累计分布达到 10%时对应的粒径值; D_{50} 为累计分布达到 50%时对应的粒径值; D_{90} 为累计 分布达到 90%时对应的粒径值。

1.2.4 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉颗粒外观形貌分析

采用电子扫描显微镜观察甘薯全粉样品颗粒表面的微观形态。将 0.1g干燥后的甘薯全粉样品涂于 导电双面胶上,然后将载有待测样品的双面胶贴在样品台上,把样品放入镀金仪器中进行喷炭镀金,最 后将其放入电子显微镜样品仓中,在 5 kV 电压下将放大倍数分别调至 1 000 和 3 000 后进行扫描电镜 的观察与拍照。 1.2.5 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉官能团结构分析

参照 Wang 等^[25]的方法并稍作修改,采用傅里叶红外光谱分析甘薯全粉样品的官能团结构,称取样品 在红外灯下将样品与 KBr 粉末混匀并充分研磨,利用真空压片机进行压片,置于傅里叶红外光谱仪中扫 描,扫描范围为4000~500 cm⁻¹,绘制红外光谱图。

1.2.6 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉色泽测定

取适量样品粉末铺于色差仪样品杯内,样品要没过样品杯的底面但不高于样品杯的高度,抖动样品杯 使得样品紧实并且表面平整后置于色差仪上进行测定。色差仪可以测量甘薯全粉的明度指数*L**(色泽亮 度)、彩度指数*a**(正数代表红色,负数代表绿色)和彩度指数*b**(正数代表黄色,负数代表蓝色)。本实验 以白板为标准,通过测量全粉的*L**、*a**、*b**值来比较不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉的色泽差异。 1.2.7 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉持水性测定

参照赵时珊等^[1]的方法并稍作修改,分别称取样品 HF₁、HF₂、HF₃、HF₄、HF₅、HF₆ 2.5 g 于离心管 中,并称质量,加入 30 mL 蒸馏水,在沸水中加热 15 min 并加以搅拌,待糊冷却至室温,在 3 000 r/min 条 件下离心 15 min,将离心管倒置在试管架上,下面垫吸水纸,静置 10 min 沥尽水分后精确称取质量,以 HF_{ck} 作为对照。持水性(*C*_{WH})计算公式为:

$$C_{\rm WH} = \frac{W_2 - W_1}{W} \tag{2}$$

式中:W为样品干物质质量;W₁为离心管与样品质量;W₂为离心沥尽水后样品与离心管质量。 1.2.8 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉持油性测定

分别称取 HF₁、HF₂、HF₃、HF₄、HF₅、HF₆ 样品 5.0 g 于离心管中,称质量,按料液比 1:10(g/g) 加入鲁花一级压榨菜籽油,在沸水中加热 20 min 并充分混匀后,待糊冷却至室温,在 3 000 r/min 条件下 离心 15 min,小心倾倒出上层游离油,然后将离心管倒置 15 min,沥尽油后准确称取质量,以 HF_{ck} 作为对 照。持油性(C_{OH})计算公式为:

$$C_{\rm OH} = \frac{M_2 - M_1}{M}$$
(3)

式中: M 为样品干物质质量; M₁ 为离心管与样品质量; M₂ 为离心沥尽油后样品与离心管质量。 1.2.9 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉冻融稳定性测定

参照 Wang 等^[26]的方法并稍作修改, 配置 10%的样品淀粉浆于离心管中, 称质量, 在 95 ℃ 糊化 30 min 再冷却到室温, 将其放在 4 ℃冰箱中冷藏 16 h, 再放在-18 ℃冰箱中冷冻 24 h, 取出凝胶在室温 下解冻 12 h, 再放入-18 ℃冰箱中冷冻 24 h, 如此反复 3 次, 3 500 r/min 离心 15 min, 沥尽水分后称质量, 测定样品的析水率, 以 HF_{ck} 作为对照。析水率(*R*_{析水})计算公式为:

$$R_{\text{tr},\text{tr}} = \frac{M_1 - M_2}{M} \times 100 \tag{4}$$

式中:M为淀粉浆质量; M_1 为离心管与糊化前淀粉浆质量; M_2 为离心管与离心沥尽水分后淀粉凝胶质量。

1.2.10 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉的糊化特性测定

使用快速黏度分析仪(RVA)测定甘薯全粉的糊化特性。测定步骤:选择测定程序,使用样品质量计算器,输入样品水分含量,得到修正后的样品质量和加水质量(标准品质量 3.00 g、标准水质量 25.00 g)。准确称取修正后样品和蒸馏水于 RVA 专用铝盒内,迅速用桨叶上下搅拌几次使样品分散在水中,将铝盒放入仪器中进行测量。测试程序为:50 ℃保持 1 min,然后以 12 ℃/min 升至 95 ℃,95 ℃保持 2.5 min,以 12 ℃/min 降至 50 ℃,保持 2 min。

1.3 数据处理

应用 Excel 2010 统计所有数据,采用分析软件 SPSS 17.0 处理数据,使用最小显著差异法(LSD)进行 差异显著性分析(p < 0.05),采用软件 Origin 7.5 对实验数据进行绘图。所有样品均做 3 次重复实验,最终 结果以 $\overline{x} \pm s$ 表示。

2 结果与分析

2.1 不同超微粉碎强度对甘薯全粉基本成分的影响

由表1可知,甘薯全粉淀粉、蛋白及总膳食纤维含量呈现出先增大后减小的趋势,而脂肪含量呈现总体下降趋势,说明随着超微粉碎强度的增加,破坏了部分脂肪的分子结构,致使其含量有所降低。可溶性膳食纤维含量呈现出先增后降的趋势,且HF。的可溶性膳食纤维每100g达到了5.40g,可能是因为随着粉碎强度的增强,部分木质素、纤维素等被降解为小分子化合物,因此可溶性膳食纤维含量增加^[27],而超强度的粉碎会破坏部分膳食纤维的分子结构,致使HF。的含量又有所降低。可溶性糖含量随着粉碎强度的增加呈现不同程度的升高,这可能是更多的小分子可溶性糖被释放了出来^[28]。总之,超微粉碎使得样品中处于交联结合态的物质被释放,因此,甘薯全粉经超微粉碎后部分营养成分含量有所增加^[29-30],但过度粉碎会破坏部分营养物质的分子结构,致使其含量有所减少。

表 1 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉基本成分的比较

_	44 苗	-14/2/	25 至 1	座占 /	比比 /	当联会好好/	可应从联合灯始/	可溶肿症/	た 八 /
	日者	小刀/	從 忉 /	蛋日/	周首 AJJ /	忌膳良纤维/	可浴性膳良纤维/	可浴性椐/	灰牙/
	全粉	$(g \cdot g^{-1})$	$(mg \bullet g^{-1})$	$(mg \cdot g^{-1})$	$(mg \cdot g^{-1})$	g	g	mg	g
	$\mathrm{HF}_{\mathrm{ck}}$	$0.06 \pm 0.00a$	286.07±2.46ab	76.02±1.52bc	0.99±0.07a	28.95±2.47ab	2.65 ± 0.07 cd	122.64 \pm 0.72b	$2.33\pm0.01\mathrm{b}$
	HF_1	$0.05 \pm 0.01 \mathrm{b}$	288.22±6.28ab	75.83±0.43c	$0.79 \pm 0.03 \text{bc}$	29.05±1.06ab	2.45 \pm 0.49d	132.99±0.62a	2.50 \pm 0.01a
	HF_2	$0.06 \pm 0.00 a$	286.31±4.04ab	75.98±2.43c	$0.88 \pm 0.05 \mathrm{b}$	26.60±0.42b	4.20 \pm 0.28b	135.01 \pm 2.32a	2.55 \pm 0.06a
	HF_3	$0.06 \pm 0.00 a$	302.34 \pm 6.33a	79.06 \pm 0.18a	$0.70 \pm 0.01c$	28.45±1.63ab	4.40±0.28b	129.24±4.17a	2.47 \pm 0.07a
	HF_4	$0.06 \pm 0.00a$	293.59±8.33ab	79.06±1.66a	$0.68 \pm 0.01c$	30.65 \pm 2.90a	5.10±0.14a	130.65 \pm 0.34a	2.51 \pm 0.05a
	HF_5	$0.06 \pm 0.00a$	288.92±0.71ab	76.61±1.56b	$0.78 \pm 0.04 \text{bc}$	e 31.10±2.26a	5.40 \pm 0.28a	130.87±1.36a	2.42±0.01ab
	HF_{6}	$0.06 \pm 0.00a$	280.21 \pm 2.57b	77.00 \pm 4.10b	$0.48 \pm 0.04 d$	26.85 \pm 1.06b	$3.30 \pm 0.14c$	135.57 \pm 3.12a	2.43±0.03ab

注:基本营养成分的测定均是在干基条件下进行的,小写字母不同表示 p<0.05,差异有统计学意义;总膳食纤维、可溶性膳食纤维、可 溶性糖、灰分含量以每 100 g 计。

2.2 不同超微粉碎强度对甘薯全粉粒径的影响

由表 2 可知,相比 HF_{ek}, HF₁ 的 D_{50} 从 20.50 µm 减小至 15.77 µm,且各实验组之间差异有统计学意 义(p<0.05)。当继续延长超微粉碎时间至 30 min 时,即 HF₆ 的 D_{50} 不仅没有持续减小,而是呈现出略增 大的迹象,这可能是由于全粉颗粒太小引起粉体团聚。与 HF_{ek} 比较,超微粉碎后全粉离散度明显减小,随 着超微粉碎时间的增加,离散度并没有随着时间增加呈现减小的趋势。HF₂ 的离散度最小,为 1.66,说明 HF₂ 粒径较集中,粒度分布范围窄。随着粉碎强度的进一步增加,由于颗粒之间的团聚效应使得全粉颗粒 较大或者较小的颗粒数增多,粒径分布不均匀。综合表明,采用不同强度超微粉碎能够显著减小甘薯全粉 的粒径,也能明显改变甘薯全粉的粒径分布^[31]。

计嵌入机		粒径/µm			
日者王初	D_{10}	D_{50}	D_{90}	呙 舣 及	
$\mathrm{HF}_{\mathrm{ck}}$	$7.53 \pm 0.04a$	20.50 \pm 0.03a	56.59±0.06a	2.39 \pm 0.01a	
HF_1	5.34 \pm 0.04b	15.77 \pm 0.03b	32.02 \pm 0.18b	$1.69 \pm 0.01 e$	
HF_2	4.17±0.06c	13.85 \pm 0.05c	27.18 \pm 0.14c	1.66 \pm 0.01f	
HF_3	3.41 \pm 0.03d	12.79 \pm 0.09d	24.92 \pm 0.27d	$1.68 \pm 0.01 e$	
HF_4	$3.01 \pm 0.03 e$	12.25 \pm 0.07e	24.35 \pm 0.24e	1.74 \pm 0.01d	
HF_5	2.64 \pm 0.03g	11.47 \pm 0.03f	23.44 \pm 0.06f	$1.81 \pm 0.01 \mathrm{b}$	
HF_6	$2.88 \pm 0.03 f$	11.80 \pm 0.03f	23.63 \pm 0.01f	$1.76 \pm 0.01c$	

表 2 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉粒径的比较

注:小写字母不同表示 p<0.05,差异有统计学意义。

2.3 不同超微粉碎强度对甘薯全粉颗粒形貌的影响

由图 2 可知,与 HF_{ck}相比较,经不同时间超微粉碎后的甘薯全粉的颗粒结构被破坏,颗粒多呈碎片状,粒径逐渐减小,随着超微粉碎强度的增加,全粉颗粒越细碎、越均匀。综合表明,超微粉碎不仅使甘薯 全粉各物质间的交联结构被破坏,且全粉颗粒本身的完整性也遭到破坏^[31],但随着粉碎时间的继续增加, 全粉颗粒表面性能被激活,粒径较小的颗粒间交互面积增加,使其容易团簇聚集,颗粒粒径略有增大。



a. HF_a分别放大1000和3000倍的颗粒电镜照片



b. HF,分别放大1 000和3 000倍的颗粒电镜照片



c. HF,分别放大1000和3000倍的颗粒电镜照片



d. HF₃分别放大1 000和3 000倍的颗粒电镜照片



e. HF₄分别放大1 000和3 000倍的颗粒电镜照片



f. HF,分别放大1 000和3 000倍的颗粒电镜照片



g. HF₆分别放大1000和3000倍的颗粒电镜照片



2.4 不同超微粉碎强度对甘薯全粉官能团结构的影响

由图 3 可知,经不同强度超微粉碎后甘薯全粉的红外光谱主要是单峰而且峰的位置和形状基本一致, 表明所其所含官能团基本一致。在约 3 419 cm⁻¹ 处的吸收峰强度较大,是由 O-H 伸缩振动引起的;在 2 927 cm⁻¹ 处的吸收峰是由 C-H 伸缩振动引起的,为 CH₂ 反对称烷烃振动峰;1 371~1 644 cm⁻¹ 位 置附近有较弱的振动峰,为 CH₃ 变角振动峰; 1 100~1 371 cm⁻¹ 位置附近为 CH₂ 面外摇摆烷 烃振动峰;927~1 015 cm⁻¹ 位置附近有较为弥 散的糖类 C—OH 伸缩振动峰;763~860 cm⁻¹ 位置有 C—H 面外弯曲振动峰;574 cm⁻¹ 处附 近吸收峰为淀粉的骨架模式振动。综合表明, 不同强度粉碎后甘薯全粉的红外光谱基本一致, 说明样品经超微粉碎后主要成分的官能团结构 基本未出现明显变化^[32]。

2.5 不同超微粉碎强度对甘薯全粉色泽的影响

由表 3 可知,相比 HF_{ck},随着粉碎强度的增加,全粉的 L*值显著增大,a*值和 b*值均显著减小。这是因为随着粒径持续减小,甘薯中的淀粉和蛋白也显露出来,不同颜色的颗粒间相互混合,



http://xbbjb. swu. edu. cn

图 3 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉官能团结构的比较

红色和黄色均明显减弱,全粉颜色更为白亮、均匀。不同强度的超微粉碎有助于改善甘薯全粉的色泽品 质^[27]。a*经过超微粉碎后与 HF_{ck} 相比呈现显著减小,当超微粉碎时间在 15~25 min 时,a* 值变化不大, 但当超微粉碎时间达 30 min 时,a* 相比较其他组有了显著增加。b* 经过超微粉碎后与 HF_{ck} 相比较显著减 小,HF₃ 最小;当继续延长超微粉碎时间后,b* 开始增加,且差异有统计学意义。

甘薯全粉	L^{*}	<i>a</i> *	<i>b</i> *
$\mathrm{HF}_{\mathrm{ck}}$	85.62±0.02d	9.03±0.02a	11.01±0.02a
HF_1	88.20 \pm 0.09c	$6.32 \pm 0.08c$	9.42±0.16b
HF_2	89.02±0.10b	5.87 \pm 0.03e	8.67±0.07c
HF_3	89.29±0.32ab	6.11±0.08d	7.94 \pm 0.18f
HF_4	89.53 \pm 0.21a	$6.08 \pm 0.06 d$	8.12±0.11ef
HF_5	89.67±0.13a	6.08±0.10d	8.29±0.18de
HF_{6}	89.43±0.06a	6.48±0.06b	8.44±0.11d

表 3 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉色泽的比较

注:小写字母不同表示 p<0.05,差异有统计学意义。

2.6 不同超微粉碎强度对甘薯全粉持水性的影响

由图 4 可知,相比 HF_{ck},经不同强度超微粉碎后甘薯全粉的持水率均有不同程度的增加,HF₆ 持水率 最大,为 793.56%,说明经一定强度超微粉碎后甘薯全粉的持水性要显著优于普通粉碎的甘薯全粉。这可 能是因为随着超微粉碎强度的增加,甘薯全粉颗粒粒径随之减小,从而使得甘薯全粉颗粒间的孔隙率开始 逐渐增大,这样会提高全粉的吸水能力。甘薯全粉持水率因其吸水能力的提高而得以改善^[18-33]。

2.7 不同超微粉碎强度对甘薯全粉持油性的影响

由图 5 可知,相比 HF_{ck},经不同时间超微粉碎后甘薯全粉的持油性均有不同程度的改善,且 HF₅ 持 油率最大,达到了 110.03%。这可能是因为甘薯全粉经不同强度超微粉碎后颗粒空隙变大,粉体表面积 也随之进一步增大,使得甘薯全粉持油力上升。当超微粉碎时间至 30 min(HF₆)时,其持油性相比 HF₅ 有所降低,这可能是因为随着粉碎强度的进一步增加,样品内部的多孔网状结构被破坏,导致甘薯全粉 滞留油的能力下降^[34]。





2.8 不同超微粉碎强度对甘薯全粉冻融稳定性的影响

由图 6 可知,相比 HF_{ck},经不同时间超微粉碎后 甘薯全粉的冻融稳定性均有不同程度的改善。HF_{ck} 冻融稳定性最差,析水率达到了 30.20%,而 HF₄ 析 水率仅为 1.30%;当继续增加超微粉碎强度后,虽然 其析水率有所下降,但是相较于 HF₄ 差异没有统计 学意义。综合表明,在一定粉碎强度下,甘薯全粉析 水率随着粉碎强度的增加而显著减小,说明经过超 微粉碎后其冻融稳定性得到了明显改善。这是因为 随着超微粉碎强度的增加,全粉颗粒间的孔隙率也 逐渐加大,吸水能力有了进一步提升,在经过冻融 之后析水量随之下降,这在一定程度上改善了甘薯 全粉的冻融稳定性。

2.9 不同超微粉碎强度对甘薯全粉糊化特性的影响

由表 4 可知,相比 HF_e,随着超微粉碎强度的

表 4

增加,全粉糊化温度、峰值黏度、最小黏度、最终黏度、衰减值、回生值随着粉碎强度的增加呈逐渐降低的趋势,且HF₅的值均为最低,分别为 69.78 ℃、2 223.00 cP、1 397.50 cP、2 054.00 cP、825.50 cP、656.50 cP,说明经不同强度粉碎后甘薯全粉的热糊稳定性和抗老化性变得更优,尤其是HF₅有着最低的糊化温度、衰减值及回生值,表明其具有更好的加工性能^[32]。

不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉糊化特性的比较

	糊化温度/	峰值黏度/	最小黏度/	最终黏度/	衰减值/	回生值/
日者王初	°C	cP	cP	cP	cP	cP
$\mathrm{HF}_{\mathrm{ck}}$	80.33±0.60a	7 244.50±40.31a	3 803.00±2.83a	5 229.50±12.02a	3 441.50±37.48a	1 426.50 \pm 9.19a
HF_1	78.68±0.53ab	4 986.00±140.01b	2 958.00 \pm 73.54b	3 879.50±82.73b	2 028.00±66.49b	921.50 \pm 9.19b
HF_2	76.64±0.73bc	4 248.50±89.80c	2 647.00±110.31c	3 550.50 \pm 98.29b	1 601.50 \pm 20.51c	903.50±12.02b
HF_3	74.30±1.20c	3 259.50 \pm 378.30d	1 955.50 \pm 224.15d	2 770.50 \pm 310.42c	1 304.00 \pm 154.15d	815.00±86.27b
HF_4	73.90 \pm 0.64c	2 993.00±178.19d	1 802.00 \pm 137.18d	2 642.50±171.83c	1 191.00 \pm 41.01d	$840.50 \pm 34.65 \mathrm{b}$
HF_5	69.78 \pm 0.53d	2 223.00±33234e	1 397.50 \pm 235.47d	$2 054.00 \pm 332.34c$	825.50±96.87e	656.50 \pm 96.87b
HF_6	75.45 \pm 1.70c	2 641.50±372.65de	1 683.00 \pm 257.39d	2 465.50 \pm 385.37c	958.50±115.26e	782.50 \pm 127.991



87

小写字母不同表示 p<0.05, 差异有统计学意义。





小写字母不同表示 p<0.05,差异有统计学意义。 图 6 不同超微粉碎强度条件下甘薯全粉析水率的比较

注:小写字母不同表示 p<0.05,差异有统计学意义。

3 结论

本文以甘薯全粉为研究对象,测定不同粉碎强度对甘薯全粉基本营养成分、颗粒表面微观形貌和官能 团结构及理化性质的影响。结果表明,随着超微粉碎强度的增加,甘薯全粉基本营养成分含量有不同程度 增加或减少,尤其是蛋白、可溶性膳食纤维及可溶性糖等含量的增加,让其具有了更好的营养性和功能性; 甘薯全粉粒径随着粉碎强度的增加而不断减小;颗粒表面微观形貌结构破坏严重,但其官能团结构并未发 生明显改变;经不同超微粉碎强度后显著改善了全粉色泽、持水性、持油性及冻融稳定性,且在热糊稳定 性和凝胶的抗老化性等方面表现较好,让其具有了较好的加工性能。尤其是超微粉碎 25 min(HF₅)时的可 溶性膳食纤维含量最高,粒径最小,颗粒大小均匀,且其色泽、持水性、持油性及冻融稳定性表现较好,具 有最低的糊化温度、衰减值和回生值,相比其他粉碎强度条件下的甘薯全粉,具有更优异的功能性和更适 宜的加工性。

综上,可利用超微粉碎后甘薯全粉较高的营养性开发全粉主食类产品,如甘薯馒头、甘薯面条等,添 加适量甘薯全粉会丰富主食类食品的营养物质,均衡人们的膳食;也可利用超微粉碎后甘薯全粉较好的功 能性开发甘薯全粉功能类产品,如甘薯功能饮料、甘薯功能奶茶等,由于全粉粒径变小,制作的奶茶等口 感更细腻,不易产生沉淀;还可利用超微粉碎后甘薯全粉较好的热糊稳定性和抗老化性开发甘薯全粉特色 美食类产品,如甘薯米粉等,因其不易老化会使得米粉口感软糯,更具弹性。不同强度的超微粉碎明显改 善了甘薯全粉营养、功能及加工性能,因此,不同强度超微粉碎在甘薯全粉的加工改性中具有很强的可行 性,且有广泛的开发应用前景,为甘薯全粉在食品加工中的应用提供了新的选择。

参考文献:

- [1] 赵时珊,蔡芳,隋勇,等.不同品种甘薯全粉品质特性比较 [J].现代食品科技,2022,38(8):218-228.
- [2] 肖满秋,兰孟焦,吴问胜,等. 江西甘薯地方种质资源表型性状的遗传多样性分析 [J]. 南方农业学报,2023,54(7): 1903-1913.
- [3] 何鸿举,王婧茹,刘红,等. 近红外光谱技术在甘薯品质检测方面的应用研究进展 [J]. 食品科学,2023,44(21): 341-350.
- [4] 王礼群,刘硕,杨春贤,等.鲜切甘薯不同部位褐变机理差异[J].食品科学,2018,39(1):285-290.
- [5] 赵祥颖,刘丽萍,张家祥,等. 基于气相色谱-离子迁移谱联用技术分析甘薯块根不同组分对甘薯特征风味剂香气的贡献[J]. 食品与发酵工业,2021,47(12):236-243.
- [6] 高琦,段文瀚,彭雪,等.不同富硒方式对甘薯叶蛋白抗氧化活性的影响[J].食品科学,2024,45(9):29-35.
- [7] SUN Y Y, QIN R B, ZENG J, et al. Effect of Heat-moisture Treatment on the Structure and Digestibility of Sweet Potato Starch [J]. Foods, 2023, 12(16): 3076.
- [8] ROLANDELLI G, RODRÍGUEZ S D, DEL PILAR BUERA M. Modulation of the Retrogradation Kinetics of Sweet Potato Starch by the Addition of Pectin, Guar Gum, and Gallic Acid [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109211.
- [9] 隋勇,施建斌,蔡沙,等.响应面法优化低糖甘薯果脯制作工艺[J].食品工业,2021,42(5):83-87.
- [10] AUGUSTYN G H, LAWALATA V N, SIPAHELUT S G. Characteristics of Yellow Sweet Potato Flakes (*Ipomoea batatas* L.) with the Addition of Moringa Leaf Flour (Moringa Oleifera) [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 883(1): 012026.
- [11] ZHANG X N, JIA Y J, SUN Y Y, et al. Effects of Fatty Acid-blending Heat-moisture Treatment on the Physicochemical and in vitro Digestion Properties of Sweet Potato Flour [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(2): 535-542.
- [12] YUANSAH S C, LAGA A, PIRMAN. Enzymatic Saccharification of Purple Sweet Potato Flour by α-Amylase, Xylanase, Mannanase and Amyloglucosidase for Liquid Sugar Production [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1182(1): 012044.

- [13] CHIANG M C, LIU Y C, CHEN B Y, et al. Purple Sweet Potato Powder Containing Anthocyanin Mitigates High-Fat-Diet-Induced Dry Eye Disease [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(8): 6983.
- [14] ZHI Q, LEI L, LI F H, et al. The Anthocyanin Extracts from Purple-fleshed Sweet Potato Exhibited Anti-photoaging Effects on Ultraviolent B-irradiated BALB/c-Nu Mouse Skin [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103640.
- [15] TIAN C, WANG M M, LIU S S, et al. A New Glycoprotein SPG-8700 Isolated from Sweet Potato with Potential Anti-Cancer Activity Against Colon Cancer [J]. Natural Product Research, 2019, 33(16): 2322-2328.
- [16] 范会平,司艺蕾,李真,等. 低血糖生成指数紫薯河粉的最优生产工艺 [J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(5): 839-848.
- [17] UMER Z, ADRIS A, ZAHRA S U, et al. Exploring the Influence of Sweet Potato Powder on the Physicochemical Characteristics, Oxidative Potential and Sensory Perception of Mayonnaise [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(5): 3258-3270.
- [18] 王朝川,李新胜,马超,等. 金针菇超微粉体物理特性及其制备工艺优化研究 [J]. 食品工业, 2016, 37(6): 19-22.
- [19] 肖仕芸. 超微粉碎处理对薏苡仁全粉及其凝胶品质特性的影响 [D]. 贵阳:贵州大学,2020.
- [20] SUN J, ZHANG A, WANG N, et al. Effect of Superfine Pulverization Technology on the Determination of Vitamin C Content in Fructus Rosae Laxae [J]. Journal of Planar Chromatography-Modern TLC: JPC, 2020(2): 33.
- [21] SPERONI C S, STIEBE J, GUERRA D R, et al. Micronization and Granulometric Fractionation Improve Polyphenol Content and Antioxidant Capacity of Olive Pomace [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 137: 347-355.
- [22] 任晓婵,张风雪,常婧瑶,等.不同粒径对超微粉碎大麦全粉品质特性的影响 [J]. 食品与发酵工业,2023,49(3): 227-233.
- [23] 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.
- [24] 许青莲, 岳天义, 张萍, 等. 超微粉碎对苦荞物化性质的影响 [J]. 包装工程, 2020, 41(11): 25-32.
- [25] WANG S J, LUO H Y, ZHANG J, et al. Alkali-Induced Changes in Functional Properties and in Vitro Digestibility of Wheat Starch: The Role of Surface Proteins and Lipids [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(16): 3636-3643.
- [26] WANG Y, WANG L, ZHANG S C, et al. Influence of pH-shifting and Transglutaminase on the Freeze-thaw Stability and Thermal Gel Properties of Mung Bean Protein-based Liquid Egg Substitute Prepared with Two Different Oil Phases [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109182.
- [27] 吴迪, 葛飞, 马红, 等. 不同磨粉方式对青稞全粉理化特性的影响 [J]. 中国粮油学报, 2022, 37(3): 59-67.
- [28] 杨沫. 花椒籽黑种皮超微粉品质特性及在饼干中应用研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [29] ZHONG C, ZU Y G, ZHAO X H, et al. Effect of Superfine Grinding on Physicochemical and Antioxidant Properties of Pomegranate Peel [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2015, 51(1): 212-221.
- [30] 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.
- [31] 张氽, 陈志宏, 刘洋, 等. 球磨法制备芡实超微粉及其理化功能性质分析 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 241-246.
- [32] 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(8): 278-286.
- [33] YAN T C, LIU R, SHI L, et al. Superfine Grinding Improves the Physicochemical, Sensory and Functional Characteristics of Hanfu Apple Pomace [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(4): 2077-2084.
- [34] 杨芙莲, 王平平, 王艳莉. 超微粉碎对甜荞麦全粉理化特性的影响 [J]. 食品科技, 2018, 43(10): 234-238.

责任编辑 周仁惠