DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80671

超微粉碎处理对椰粕营养与理化特性的影响

李家祺[1,2] 黄晓兵[1] 彭芳丹[1] 周 伟[1] 邓福明[3] 李积华[1]

（1. 中国热带农业科学院农产品加工研究所农业农村部热带作物产品加工重点实验室，广东 湛江 524001；2. 华中农业大学食品科学技术学院，湖北 武汉 430070；3. 中国热带农业科学院椰子研究所，海南 文昌 571339）

摘要：[**目的**]推动椰粕超微粉在食品领域的高值化利用。[**方法**]以椰粕为原料，系统分析振动式超微粉碎处理对其营养成分、活性成分、理化与结构特性的影响。[**结果**]经超微粉碎处理后，椰粕中粗蛋白、脂肪、灰分、多酚、黄酮等组分含量变化不明显，但可溶性蛋白、可溶性膳食纤维和可溶性多糖含量分别提高了 60.08%，125.83%，33.99%；50 min超微粉碎处理使椰粕粉粒径从 324.25 μm减小至 14.78 μm，比表面积增加了约 34 倍，但流动性变差；超微粉碎处理使椰粕粉颜色变得更白，水溶性显著提升，由粗粉的 4.95% 增加到 12.04%，但持水性、持油性分别从 6.89，1.84 g/g 降至 3.35，1.36 g/g；超微粉碎处理使椰粕粉表面变得更加粗糙，膳食纤维的晶体结构受到破坏，相对结晶度降低，热稳定性下降。[**结论**]超微粉碎处理能够明显提升椰粕粉的营养特性和功能价值。

关键词：椰粕；超微粉碎；营养评价；理化特性

Effect of ultrafine grinding treatment on the nutritional and physicochemical properties of coconut pulp

LI Jiaqi[1,2] *HUANG Xiaobing*[1] *PENG Shaodan*[1] *ZHOU Wei*[1] *DENG Fuming*[3] *LI Jihua*[1]

（1. *Key Laboratory of Tropical Crop Products Processing of Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Agricultural Products Processing Research Institute*, *Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences*, *Zhanjiang*, *Guangdong* 524001, *China*; 2. *College of Food Science and Technology*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan*, *Hubei* 430070, *China*; 3. *Coconut Research Institute*, *Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences*, *Wenchang*, *Hainan* 571339, *China*）

Abstract: [**Objective**] To promote the high-value utilization of coconut pulp (CP) ultrafine powder in the food industry. [**Methods**] Using CP as the raw material, the effects of vibrating ultrafine grinding on its nutritional components, active ingredients, and physicochemical and structural properties were systematically analyzed. [**Results**] After ultrafine grinding treatment, the content of crude protein, fat, ash, polyphenols, flavonoids, and other components in CP did not change significantly. However, the content of soluble protein, soluble dietary fiber, and soluble polysaccharides increased by 60.08%, 125.83%, and 33.99%, respectively. After 50 min of ultrafine grinding treatment, the particle size of CP powder decreased from 324.25 μm to 14.78 μm, and the specific surface area increased by about 34 times. However, the fluidity became poorer. The color of CP became whiter, and its water solubility significantly increased, from 4.95% to 12.04%. However, its water-holding capacity and oil-holding capacity decreased from 6.89 g/g and 1.84 g/g to 3.35 g/g and 1.36 g/g, respectively. The surface of CP powder became rougher, the crystal structure of dietary fiber was damaged, the relative crystallinity decreased, and thermal stability was reduced. [**Conclusion**] The ultrafine grinding treatment can significantly improve the nutritional characteristics and functional value of CP powder.

Keywords: coconut pulp (CP); ultrafine grinding; nutritional evaluation; physicochemical properties

椰子（*Cocos nucifera* L.）是棕榈科椰子属植物，在世界范围内的种植面积达 1 300 万 hm^2，年产量约 6 246 万 t，是世界热带和亚热带地区主要的油料作物和食品能源作物[1]。中国椰子种植面积达 3.4 万 hm^2，年加工椰子约 25 亿个，主要加工产品 40 余种[2]。椰油是椰子的主要加工产品之一，被广泛应用于食品工业，而其加工副产物椰

基金项目：海南省重点研发项目（编号：ZDYF2023XDNY073）；海南省自然科学基金（编号：321MS0797）；中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金（编号：1630122022005）

通信作者：黄晓兵（1986—），男，中国热带农业科学院副研究员，硕士。E-mail：huang5102@foxmail.com

收稿日期：2024-07-15 **改回日期：**2025-01-10

粕产出率较高,占椰肉总质量的40%~60%[3],每年全球约有500万t椰粕产生[4]。

椰粕是一种潜在膳食纤维资源,其膳食纤维含量高达73%[5],但由于椰粕不溶性膳食纤维含量高、口感粗糙,限制了其可溶性膳食纤维功能价值的发挥和适口性产品的开发。对膳食纤维进行改性以促进不溶性膳食纤维向水溶性膳食纤维转化,是拓展膳食纤维功能价值的重要手段,而超微粉碎作为常用的物理改性技术,具有快速、可控、绿色等优势,对膳食纤维、蛋白、多酚等生物分子有明显的改性效果,在快速减小物料尺寸提高适口性的同时,可有效改善物料的溶解性和生物可及性[6],而目前关于椰粕膳食纤维超微粉碎改性的研究鲜有报道。研究拟采用振动式超微粉碎机对椰粕粉进行改性,考察超微粉碎时间对椰粕营养成分、活性成分、理化与结构特性的影响,以期为椰粕超微粉在食品领域的高值化利用提供数据指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

椰粕:中国热带农业科学院;

石油醚(30~60 ℃)、苯酚、氯化钠、冰醋酸、氢氧化钠:分析纯,西陇科学股份有限公司;

葡萄糖标准品:美国Sigma公司;

牛血清白蛋白、无水碳酸钠:分析纯,麦克林生物科技有限公司;

考马斯亮蓝、没食子酸:分析纯,上海源叶生物科技有限公司;

福林酚:分析纯,北京索莱宝科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

万能粉碎机:1000Y型,永康市铂欧五金制品有限公司;

振动式超微粉碎机:WZJ6型,济南倍力粉技术工程有限公司;

水分分析仪:MRS 120-3型,德国Kern公司;

激光粒度仪:LT2200E型,珠海真理光学仪器有限公司;

凯氏定氮仪:Kjelte 8400型,丹麦Foss公司;

膳食纤维测定仪:DF-06型,海能未来技术集团股份有限公司;

马弗炉:1U-13型,上海康路仪器设备有限公司;

粉体综合特性测试仪:BT-1000型,丹东百特科技有限公司;

扫描电子显微镜:S4800型,日本日立公司;

差示扫描量热仪:DSCQ2000型,美国TA公司;

傅里叶变换红外光谱仪:INVENNIO S型,德国Bruker公司。

1.2 方法

1.2.1 椰粕超微粉的制备 椰粕经超临界脱脂后,用万能粉碎机粉碎过60目筛,得椰粕粗粉,用振动式超微粉碎机在5 ℃条件下分别粉碎5,10,20,30,40,50 min,收集粉体密封保存,分别命名为SG-5、SG-10、SG-20、SG-30、SG-40、SG-50,以粗粉为对照组(CK)。

1.2.2 基础营养成分测定

(1)水分:参照GB 5009.3—2016第一法(直接干燥法)。

(2)粗蛋白:参照GB 5009.5—2016第一法(凯氏定氮法)。

(3)粗脂肪:参照GB 5009.6—2016第一法(索氏提取法)。

(4)灰分:参照GB 5009.4—2016第一法(直接灰分法)。

1.2.3 可溶性蛋白测定 称取3.0 g样品,加入45 mL蒸馏水混匀,用0.1 mol/L NaOH溶液调整pH至10,45 ℃水浴提取60 min,于4 000 r/min离心20 min,取上清液定容至50 mL即为可溶性蛋白提取液,标准曲线及样品的测定参照Xu等[7]的方法并稍作修改,以牛血清蛋白作为标准品计算样品中蛋白含量。

1.2.4 膳食纤维组成分析 采用膳食纤维测定仪测定样品中的可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber,SDF)、不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber,IDF)以及总膳食纤维(total dietary fiber,TDF)含量。

1.2.5 活性成分测定

(1)可溶性多糖:称取2.0 g样品于50 mL离心管中,加入40 mL沸水,在80 ℃下超声(300 W)辅助提取30 min,趁热抽滤,取冷却至室温的滤液定容至50 mL即为可溶性多糖提取液。标准曲线及样品的测定参照Jiménez等[8]的方法,以葡萄糖为标准品绘制标准曲线并计算样品中多糖含量。

(2)总黄酮:称取3.0 g样品于离心管中,加入30 mL体积分数为80%的乙醇,摇匀,300 W超声提取30 min,4 000 r/min离心30 min,重复提取一次,合并两次提取所得上清液即为黄酮及总酚的提取液。标准曲线及样品的测定参照Chumroenphat等[9]的方法,样品中总黄酮的含量由芦丁标准曲线计算得到。

(3)总酚:取总黄酮提取液,参照Huang等[10]的方法测定总酚含量。

1.2.6 粒度及比表面积测定 采用激光粒度仪测定样品的粒径和比表面积,以蒸馏水为分散介质,折射率取1.43。称取适量样品于烧杯中与蒸馏水充分振荡混匀,300 W超声60 s后滴加样品至测量槽内,测量时以2 500 r/min的转速使其遮光度在测量范围内缓慢波动。

1.2.7 色泽分析 采用色差仪测定各组样品的L^*、a^*和b^*值,按式(1)计算样品的色差值。

$$\Delta E=\sqrt{\left(L_n^*-L_0^*\right)^2+\left(a_n^*-a_0^*\right)^2+\left(b_n^*-b_0^*\right)^2},\quad(1)$$

式中：

ΔE——色差值；

L_0^*、a_0^*、b_0^*——对照组的亮度值、红色度和黄色度；

L_n^*、a_n^*、b_n^*——超微粉的亮度值、红色度和黄色度。

1.2.8　扫描电镜分析（SEM）　样品经喷金处理后，在10.0 kV加速电压下放大50倍或2 000倍来观察样品的微观结构。离子溅射仪的喷金电流30 mA、喷金时间15 min，所用金属靶材为铂。

1.2.9　水合特性分析

（1）水溶性：称取2.0 g样品于50 mL离心管中，加入30 mL蒸馏水，振荡使样品完全分散，在60 ℃水浴中振荡60 min，4 000 r/min离心20 min，将上清液倒入烧杯，105 ℃烘干至恒重，按式（2）计算样品的水溶性。

$$W_S=\frac{m_2-m_1}{m_0}\times 100\%,\quad(2)$$

式中：

W_S——水溶性，%；

m_0——样品质量，g；

m_1——烧杯质量，g；

m_2——烘干至恒重的烧杯和样品质量，g。

（2）溶胀性：称取3.0 g样品，置于50 mL量筒，摇动使表面平整，记录初始体积，向量筒中加40 mL蒸馏水，混合均匀，室温静置24 h，读取样品的自由膨胀体积，按式（3）计算样品的溶胀性。

$$S_P=\frac{V_1-V_0}{M},\quad(3)$$

式中：

S_P——溶胀性，mL/g；

V_1——溶胀后样品体积，mL；

V_0——初始样品体积，mL；

M——初始样品质量，g。

（3）持水性与持油性：称取1.0 g样品与30 mL蒸馏水（大豆油）充分混合，室温下振荡40 min，4 000 r/min离心20 min，弃去上清液，按式（4）计算样品的持水性和持油性。

$$W_{RC}/O_{RC}=\frac{m_2-m_1}{m_1},\quad(4)$$

式中：

W_{RC}——持水性，g/g；

O_{RC}——持油性，g/g；

m_1——样品干基质量，g；

m_2——样品湿基质量，g。

1.2.10　流动性评价

（1）密度及压缩度：将样品置于10 mL量筒内并填充至10 mL刻度处，记录样品和量筒的质量，再将装有样品的量筒在厚纱布上振实300次，至样品体积无变化读取样品体积，分别按式（5）~式（7）计算堆积密度（ρ_b）、振实密度（ρ_t）和压缩度。

$$\rho_b=\frac{m_1-m_0}{10},\quad(5)$$

$$\rho_t=\frac{m_2-m_0}{V_f},\quad(6)$$

$$C=\frac{\rho_t-\rho_b}{\rho_t}\times 100\%,\quad(7)$$

式中：

ρ_b——样品堆积密度，g/mL；

m_1——样品和量筒总质量，g；

m_0——量筒质量，g；

ρ_t——样品振实密度，g/mL；

m_2——振实后样品和量筒总质量，g；

V_f——振实后样品体积，mL；

C——压缩度，%。

（2）休止角和滑角：采用粉体综合特性测试仪测定。

1.2.11　热力学分析（DSC）　称取5 mg样品置于铝坩埚中，与空白坩埚一起放到DSC样品架上进行扫描，在40~250 ℃范围内以10 ℃/min匀速升温，记录样品DSC曲线。载气为氮气，流量为50 mL/min。

1.2.12　X-射线衍射分析（XRD）　将样品放在载玻片上压平，在管流为30 mA，管压为30 kV，靶型为Cu的条件下进行分析，以10（°）/min的扫描速度在2θ=5°~90°范围内对样品进行扫描，步长为0.02°，利用JADE软件计算相对结晶度（relative crystallinity，RC）。

1.2.13　傅里叶红外光谱分析（FT-IR）　称取2 mg样品与溴化钾按质量比1∶100的比例混合，研磨成均匀的粉末，烘干，压片后测试，在4 000~400 cm^{-1}的吸收模式下扫描FT-IR光谱，扫描次数为32次，分辨率为4 cm^{-1}。

1.3　数据统计与分析

试验结果均为至少3次重复试验的平均值，表示为均值±标准差，采用Excel 2021进行试验数据统计分析，采用Origin 2021进行图形绘制。

2　结果与分析

2.1　超微粉碎对椰粕营养成分的影响

由表1可知，不同处理时间椰粕超微粉的水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分含量与对照组相比无明显差异，表明超微粉碎处理并未对椰粕的基础营养组分造成明显影响。但超微粉碎对椰粕粉中可溶性蛋白含量影响显著，随着超微粉碎时间延长，椰粕粉中可溶性蛋白含量显著增加，与对照组相比，经过20 min超微粉碎处理后椰粕超微粉中的可溶性蛋白含量增加了58.81%。这可能是因为一定时间的超微粉碎处理破坏了椰粕组织内的细胞壁，更有利于椰粕蛋白的溶出，提高了蛋白提取率[11]。

膳食纤维是脱脂椰粕的主要成分，其含量高达71.06 g/100 g，其中IDF占比在90%以上。随着超微粉碎

表1　不同超微粉碎时间椰粕粉营养成分测定结果†

Table 1　Determination results of nutrients of CP at different grinding times　　g/100 g

样品	水分	总蛋白	粗脂肪	灰分	可溶蛋白	TDF	IDF	SDF
CK	8.48±0.27^{b}	13.85±0.64	3.38±0.16	2.41±0.07	10.27±0.22^{d}	71.06±4.24^{a}	68.05±4.23	3.02±0.02^{d}
SG-5	8.88±0.07^{b}	13.79±0.12	3.39±0.17	2.43±0.07	13.03±0.66^{c}	13.03±0.66^{b}	69.68±1.82	3.22±0.22^{d}
SG-10	8.50±0.12^{b}	13.53±0.54	3.29±0.16	2.47±0.04	14.53±0.46^{b}	70.37±1.56^{a}	66.99±1.71	3.38±0.15^{d}
SG-20	8.57±0.06^{b}	13.44±0.25	3.43±0.12	2.53±0.04	16.31±0.23^{a}	71.35±0.31^{a}	67.30±0.14	4.05±0.17^{c}
SG-30	8.50±0.18^{b}	13.51±0.32	3.38±0.19	2.39±0.04	15.62±0.25^{a}	72.90±0.52^{a}	67.50±0.36	5.40±0.16^{b}
SG-40	8.70±0.15^{b}	13.28±0.41	3.31±0.10	2.44±0.01	15.02±0.16^{b}	73.60±0.99^{a}	67.75±0.82	5.85±0.17^{b}
SG-50	9.35±0.12^{a}	13.50±0.12	3.38±0.03	2.47±0.01	16.44±0.62^{a}	73.68±0.22^{a}	66.86±0.13	6.82±0.10^{a}

†　同列小写字母不同表示样品间差异显著($P<0.05$)。

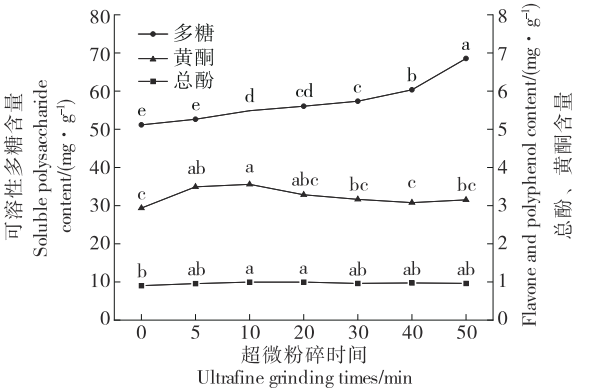
时间的延长,椰粕粉中SDF含量显著增加,而TDF和IDF含量变化不明显,经过50 min超微粉碎后,SDF含量从粗粉的3.02 g/100 g提高到6.82 g/100 g,占比由4.24%提高到9.25%,而IDF呈相反的变化趋势,表明超微粉碎处理能够促进椰粕IDF转溶,有助于提升椰粕粉的生理活性。这可能是由于超微粉碎过程中强烈的机械作用使结晶度较高的IDF长链被打断,促进其转化为可溶性成分[12];同时由于椰粕超微粉的粒径小、比表面积大,疏松的结构和较大的比表面积提高了淀粉酶对底物的作用效率,从而增加了SDF的溶出率[13]。

2.2　超微粉碎对椰粕活性成分的影响

从图1可以看出,超微粉碎对黄酮和总酚溶出率的影响不显著,而随超微粉碎时间的延长,椰粕粉中的可溶性多糖含量持续增加,超微粉碎50 min后多糖含量达到了68.55 mg/g,较对照组的51.16 mg/g增加了33.99%,这与2.1中SDF的含量变化基本一致。由于超微粉碎处理使一部分IDF转化为SDF,增加了可溶性多糖含量,超微粉较大的比表面积和孔隙率,增加了多糖的溶出率,同时超微粉碎的破壁作用也会促进胞内多糖的释放[14]。

2.3　超微粉碎对椰粕粉理化特性的影响

2.3.1　粒度及比表面积　如表2所示,随粉碎时间的延长,椰粕粉粒径逐渐变小,比表面积逐渐变大,经50 min超



小写字母不同表示不同样品间差异显著($P<0.05$)

图1　超微粉碎处理对椰粕粉活性成分含量的影响

Figure 1　Effect of ultrafine grinding on the content of active ingredients in CP

微粉碎处理后,椰粕粉平均粒径从324.25 μm减小至14.78 μm,比表面积从30.57 m^2/kg增加到1 072.33 m^2/kg,与对照组相比增加了约34倍,表明椰粕超微粉在应用于后续食品加工过程中,更易与其他粉体混合,产品的适口性更佳。此外,超微粉碎处理50 min后,$D_{[4,3]}$和$D_{[3,2]}$的差值从粗粉的156.40 μm减至11.34 μm,二者数值越来越接近,说明样品颗粒的形状更加趋近于球体,粒度分布更加

表2　不同超微粉碎时间的椰粕粉粒度测定结果†

Table 2　Determination results of grain size of CP at different ultrafine grinding times

样品	D_{10}/μm	D_{50}/μm	D_{90}/μm	$D_{[4,3]}$/μm	$D_{[3,2]}$/μm	比表面积/(m^2·kg^{-1})
CK	104.35±0.94^{a}	324.25±2.10^{a}	635.80±5.83^{a}	352.66±2.20^{a}	196.26±1.89^{a}	30.57±0.29^{g}
SG-5	70.73±1.02^{b}	244.75±0.81^{b}	499.15±8.34^{b}	269.93±3.01^{b}	145.43±1.19^{b}	41.26±0.33^{f}
SG-10	44.65±0.27^{c}	151.02±0.97^{c}	311.04±0.66^{c}	167.86±0.58^{c}	96.23±0.52^{c}	62.35±0.33^{e}
SG-20	18.31±0.01^{d}	57.38±0.09^{d}	137.06±0.99^{d}	69.18±0.26^{d}	39.45±0.02^{d}	152.10±0.10^{d}
SG-30	11.81±0.06^{e}	31.79±0.23^{e}	73.62±0.84^{e}	38.17±0.37^{e}	22.84±0.16^{e}	262.63±1.80^{c}
SG-40	7.33±0.08^{f}	19.65±0.16^{f}	43.28±0.80^{f}	23.12±0.34^{f}	14.36±0.13^{f}	417.87±3.63^{b}
SG-50	4.57±0.01^{g}	14.78±0.12^{g}	31.94±0.72^{g}	16.93±0.32^{g}	5.59±0.04^{g}	1 072.33±8.50^{a}

†　D_{50}表示粉体的平均粒径,D_{10}和D_{90}分别表示样品粒径累计分布为10%和90%时所对应的粒径,$D_{[3,2]}$和$D_{[4,3]}$分别代表样品的表面积平均径和体积平均径;同列小写字母不同表示样品间差异显著($P<0.05$)。

集中[15]。

从图2可以看出，所有样品的粒径分布特征曲线均呈正态分布，说明椰粕粉颗粒的尺寸分布较为均匀，且随超微粉碎时间的延长，主峰的出现位置明显左移，平均粒径分布差异较为显著。

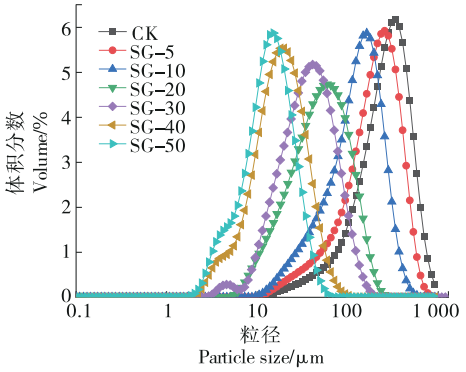


图2　不同超微粉碎时间椰粕粉粒度分布特征曲线

Figure 2　Characteristic curves of particle size distribution of CP at different ultrafine grinding times

2.3.2　色泽　由表3可知，超微粉碎处理对椰粕粉亮度（L^*）影响不明显，但对椰粕粉的红绿色值（a^*）和黄蓝色值（b^*）影响显著。随着超微粉碎时间的增加，椰粕粉的红色度从2.85降至1.69，黄色度从5.88降至0.45。这是由于粉体粒度的降低导致比表面积增大，进而使颗粒对红光和黄光的反射减弱，导致样品颜色变白，这与肉眼观测结果一致。当$\Delta E>2$时代表两种颜色的差异具有可识别性[16]，除SG-5外，其余各组的ΔE值均大于2，说明超微粉与对照组之间的色差较大，超微粉碎处理对椰粕色泽改善效果明显。

2.3.3　微观形态　图3为不同粉碎时间椰粕粉的扫描电子显微镜图像。在50倍下，椰粕粉多呈不规则块状，椰粕粗粉的颗粒较大、粒径分布不均匀，而超微粉颗粒较小，粒径分布较为均匀，但超微粉碎时间超过30 min，颗粒开始出现一定范围的团聚现象，表现出分布密集的现象。在2 000倍下，未经超微粉碎处理的样品颗粒表面致密光滑，而超微粉碎处理使椰粕粉颗粒呈现出更多不规则的脊状表面和碎片状结构，表面比粗粉更粗糙，并可以清晰地观察到超微粉表面的裂纹和破碎结构。

表3　不同超微粉碎时间椰粕粉色泽指数†

Table 3　Pink color index of CP at different ultrafine grinding times

样品	L^*值	a^*值	b^*值	ΔE
CK	96.82±0.12^{bc}	2.85±0.03^{a}	5.88±0.05^{a}	
SG-5	97.12±0.13^{ab}	2.40±0.01^{b}	4.36±0.05^{b}	1.61
SG-10	97.15±0.12^{ab}	2.23±0.03^{c}	3.74±0.10^{c}	2.25
SG-20	97.32±0.03^{a}	2.18±0.02^{c}	2.83±0.03^{d}	3.16
SG-30	97.35±0.07^{a}	2.14±0.05^{c}	1.79±0.03^{e}	4.18
SG-40	96.93±0.19^{bc}	1.87±0.13^{d}	1.15±0.02^{f}	4.83
SG-50	96.68±0.22^{c}	1.69±0.07^{e}	0.45±0.03^{g}	5.55

†　同列小写字母不同表示样品间差异显著（$P<0.05$）。

2.3.4　水合特性　由表4可知，超微粉的水溶性随着粉碎时间的延长呈逐步增加的趋势，经过50 min粉碎处理后，椰粕粉的水溶性由粗粉的4.95%增加到12.04%，增加了1.43倍。在超微粉碎过程中，机械剪切作用使椰粕粉中的极性基团暴露，与水之间的结合位点增加，导致水溶性增加[17]，这也是部分IDF转化为SDF的原因。

椰粕粉的溶胀性随着超微粉碎时间的延长呈先升后降的趋势，经过10 min超微粉碎后，椰粕粉的溶胀性显著增大，达到12.94 mL/g，随着粉体粒径逐渐减小，颗粒比表

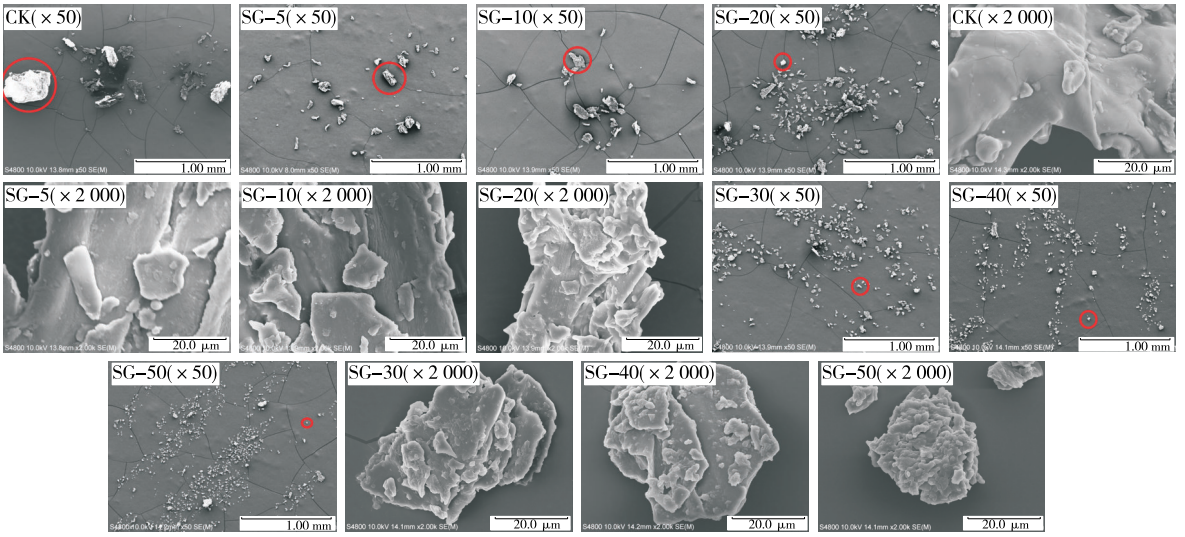


图3　不同超微粉碎时间椰粕粉形态结构SEM图

Figure 3　SEM diagram of the morphological structure of CP at different ultrafine grinding times

面积增加,亲水性基团暴露,椰粕粉的溶胀性显著增加。然而,随着粉碎时间的进一步延长,椰粕粉的溶胀性呈下降趋势,甚至低于粗粉的溶胀性,主要原因可能是在长时间、高强度剪切力的作用下,椰粕膳食纤维空间网状结构被破坏,结构中原有的气孔坍塌,阻碍了椰粕粉的吸水溶胀[18],故超微粉的溶胀性呈先升高后降低的趋势。

椰粕粉的持水性和持油性随着超微粉碎时间的延长呈下降趋势。经过50 min超微粉碎处理,椰粕粉的持水力和持油力分别从6.89,1.84 g/g降至3.35,1.36 g/g。这可能是机械粉碎使椰粕粉中纤维基质以及致密的多孔网状结构遭到破坏,致密的网状结构对水和油的约束力较弱,滞留、吸附在其内部空隙间的水分、油脂抵御外力的作用减弱,导致其持水力及持油力下降[19]。

2.3.5　流动性　由表5可知,超微粉碎处理对椰粕粉的堆积密度、振实密度和压缩度有较为显著的影响,随着粉碎时间的延长,粉体的堆积密度逐渐减小,振实密度逐渐增加,压缩度从30.13%增加到52.77%,休止角和滑角分别从50.77°,44.40°增加到61.10°,61.50°,说明超微粉碎使椰粕粉体颗粒间的摩擦力明显增大,流动性明显变差。主要是因为随着粉碎时间延长,椰粕粉粒径不断减小,颗粒更易发生团聚,导致椰粕粉的整体流动性变差[20]。

表4　不同超微粉碎时间的椰粕粉水合特性测定结果†

Table 4　Determination of hydration characteristics of CP at different ultrafine grinding times

样品	水溶性/%	溶胀性/(mL·g^{-1})	持水性/(g·g^{-1})	持油性/(g·g^{-1})
CK	4.95±0.33^{f}	9.19±0.25^{c}	6.89±0.11^{a}	1.84±0.03^{a}
SG-5	6.15±0.10^{e}	11.40±0.24^{b}	6.85±0.14^{a}	1.71±0.04^{b}
SG-10	6.95±0.27^{d}	12.94±0.09^{a}	6.18±0.07^{b}	1.73±0.03^{b}
SG-20	8.20±0.14^{c}	7.32±0.14^{d}	4.72±0.10^{c}	1.58±0.01^{c}
SG-30	9.41±0.09^{b}	7.27±0.18^{d}	3.88±0.08^{d}	1.57±0.02^{c}
SG-40	9.25±0.47^{b}	6.46±0.26^{e}	3.46±0.02^{e}	1.57±0.01^{c}
SG-50	12.04±0.18^{a}	6.46±0.20^{e}	3.35±0.04^{e}	1.36±0.01^{d}

†　同列小写字母不同表示样品间差异显著(P<0.05)。

表5　不同超微粉碎时间椰粕流动性评价指标†

Table 5　Liquidity indicators of CP at different ultrafine grinding times

样品	堆积密度/(g·mL^{-1})	振实密度/(g·mL^{-1})	压缩度/%	休止角/(°)	滑角/(°)
CK	0.343 3±0.002 1^{a}	0.491 4±0.003 8^{c}	30.13±0.12^{e}	50.77±0.87^{d}	44.40±0.85^{f}
SG-5	0.320 7±0.003 5^{b}	0.496 9±0.002 1^{c}	35.47±0.45^{d}	52.17±0.76^{d}	46.87±0.81^{e}
SG-10	0.315 0±0.004 0^{b}	0.516 5±0.005 4^{b}	39.00±1.32^{c}	56.23±0.75^{c}	49.17±0.29^{d}
SG-20	0.270 3±0.004 2^{c}	0.521 9±0.007 4^{b}	48.20±0.10^{b}	57.60±0.79^{bc}	53.73±0.25^{c}
SG-30	0.265 0±0.004 4^{cd}	0.540 1±0.001 2^{a}	50.93±0.75^{a}	58.00±0.50^{bc}	55.23±0.25^{c}
SG-40	0.256 3±0.004 2^{d}	0.540 8±0.002 2^{a}	52.60±0.69^{a}	59.23±0.25^{ab}	58.97±0.40^{b}
SG-50	0.255 7±0.002 9^{d}	0.541 3±0.003 7^{a}	52.77±0.25^{a}	61.10±0.66^{a}	61.50±0.87^{a}

†　同列小写字母不同表示样品间差异显著(P<0.05)。

2.3.6　热稳定性　不同超微粉碎时间椰粕粉的DSC曲线见图4。在40~450 ℃范围内,不同处理时间椰粕粉的DSC曲线形状基本相同,均出现了一个放热峰和一个吸热峰,在80~120 ℃附近出现了明显的吸热峰,主要是由水分蒸发引起,与对照组相比,超微粉的水分蒸发吸热峰向左平移,表明超微粉中的水分更易蒸发,可能是因为超微粉比表面积变大,更加有利于水分蒸发。在300 ℃附近出现明显放热峰,是由纤维热降解引起,在此温度范围内,椰粕粉中的木质素、半纤维素等成分发生降解并放出热量[21]。与对照组相比,超微粉的放热峰向左移动,经过50 min粉碎处理后,峰值温度从粗粉的300.40 ℃降低到了296.77 ℃,表明超微粉碎处理使椰粕膳食纤维的热稳定性变差,可能是由于剧烈的机械粉碎破坏了膳食纤维晶体结构,导致热稳定性下降。

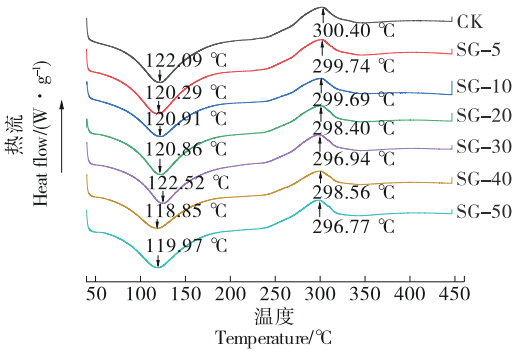


图4　不同超微粉碎时间椰粕粉DSC曲线

Figure 4　DSC curves of CP at different ultrafine grinding times

2.3.7　晶体结构　椰粕粗粉及不同处理时间超微粉的X射线衍射图谱如图5所示,对照组在2θ为16.16°,20.24°处出现两个较强的结晶衍射峰,在2θ为23.58°,25.12°,33.34°处出现3个强度较弱的结晶衍射峰,属于典型的天然纤维素I型晶体结构的特征衍射峰[22],表明椰粕纤维的晶体类型属于纤维素I型。与对照组相比,超微粉的出峰位置、峰形并无明显差异,均保留了16°和21°附近的衍射

峰，说明超微粉碎处理对椰粕粉纤维结晶区破坏程度不大，超微粉仍保持着与对照组相同的晶体结构。但超微粉碎处理使椰粕粉的结晶峰强度和相对结晶度显著降低，经过 50 min 的超微粉碎处理，椰粕粉在 23.87°，25.42°，34.44°附近的衍射峰几乎完全消失，结晶度从 11.02%降至 5.66%，说明超微粉碎处理影响了样品的无定形区结构，这可能是长时间、高强度的机械作用力破坏了椰粕粉中的部分结晶纤维素[23]。结晶区的破坏导致包裹在紧密的结晶结构内的水溶性成分更易溶出，进一步解释了超微粉碎处理导致样品的水溶性增加、可溶性成分得率增加等试验结果。

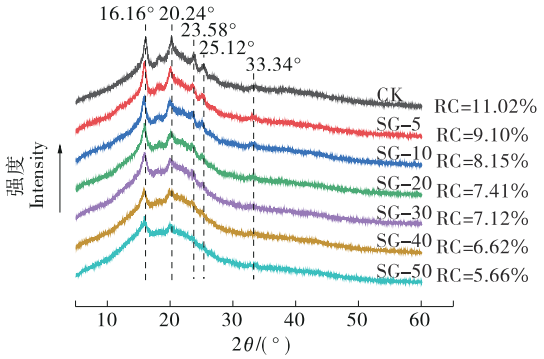


图 5　不同超微粉碎时间椰粕粉 XRD 图谱

Figure 5　XRD patterns of CP at different ultrafine grinding times

2.3.8　分子结构　从图 6 可以看出，椰粕超微粉与粗粉的图谱形状相似，但特征吸收峰的峰高和峰面积有所不同。其中，红外吸收光谱在 3 600~3 200 cm^{-1}的波谱带反映了纤维素和半纤维素中 O—H 的伸缩振动，与对照组相比，椰粕超微粉在 3 398 cm^{-1}附近的 O—H 吸收峰宽而强，说明超微粉碎处理可能破坏了纤维素或半纤维素的链状结构，使更多的 O—H 得以暴露，增加了椰粕粉的水溶性和溶胀性；2 950~2 850 cm^{-1}范围内存在的两个峰，分别对应蛋白和油脂的脂肪链中—CH_2和—CH_3基团的对称和不对称伸缩振动[24]；1 659，1 387 cm^{-1}附近的特征峰分别对应酯羰基（C═O）和羧酸酯（COO—）的伸缩振动，是半纤维素的特征吸收峰[25]，超微粉碎使峰强度增加，可能是因为超微粉碎增加了样品中的半纤维素含量，此外，超微粉碎使椰粕粉中的蛋白分子暴露，也可能会增强该特征峰的强度；1 200~1 000 cm^{-1}范围内的强吸收峰对应糖苷键的伸缩振动，随着超微粉碎时间的延长，该吸收峰逐渐增强，表明超微粉碎处理破坏了椰粕中膳食纤维的糖链结构，暴露了其中的糖苷键。

3　结论

超微粉碎处理能够显著提高样品中的可溶性蛋白、可溶性膳食纤维和可溶性多糖含量，而对黄酮、多酚含量

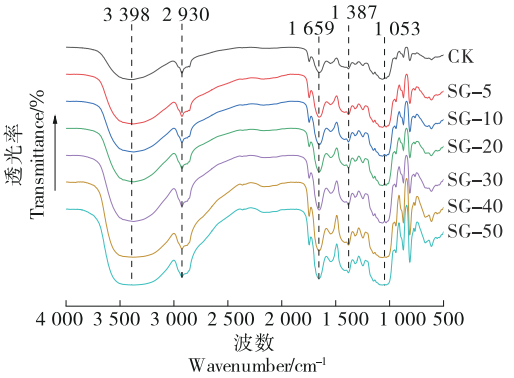


图 6　不同超微粉碎时间椰粕粉 FT-IR 图

Figure 6　FT-IR diagram of CP at different ultrafine grinding times

影响不大；在理化特性方面，超微粉碎能够改善椰粕粉的水溶性、溶胀性、色泽等指标，而长时间的粉碎使椰粕粉的持水性、持油性和流动性变差，说明在利用超微粉碎技术对椰粕粉进行改性时，需要根据加工物料的实际需求而选择适宜的粉碎时间；在结构表征方面，热力学分析、X-射线衍射分析和傅里叶红外光谱分析结果也表明，超微粉碎处理破坏了椰粕膳食纤维的晶体结构，粉体的热稳定性下降，这很好地解释了经超微粉碎处理后椰粕粉水溶性、溶胀性和可溶性成分溶出率增加的现象。研究结果表明，超微粉碎可使椰粕粉的粒径减小到微米级，并能有效提升原料中可溶性膳食纤维、可溶性蛋白和可溶性多糖含量，对椰粕改善效果较好。

参考文献

[1] RAMESH S V, PANDISELVAM R, SHAMEENA BEEGUM P P, et al. Review of *Cocos nucifera* L. testa-derived phytonutrients with special reference to phenolics and its potential for encapsulation[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(1): 1-10.

[2] 张建国, 宋菲. 我国椰子产业现状及发展战略分析[J]. 中国农业信息, 2016(12): 139-141.
ZHANG J G, SONG F. Current situation and development strategy of coconut industry in China[J]. China Agricultural Information, 2016(12): 139-141.

[3] 邓宝华, 李向阳, 杨建振, 等. 椰子副产物精深加工及高值利用研究进展[J]. 中国果菜, 2023, 43(11): 25-30.
DENG B H, LI X Y, YANG J Z, et al. Research progress in deep processing and high value utilisation of coconut by-products[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(11): 25-30.

[4] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Report of the FAO high level expert consultation on coconut sector development in Asia and the Pacific[R]. Bangkok: FAO, 2003.

[5] HANAFI F N A, KAMARUDING N A, SHAHARUDDIN S. Influence of coconut residue dietary fiber on physicochemical,

probiotic (*Lactobacillus plantarum* ATCC 8014) survivability and sensory attributes of probiotic ice cream[J]. LWT, 2022, 154: 112725.

[6] 杨蕾, 贾艳菊, 刘敬科, 等. 超微粉碎技术对粮食产品营养物质及特定生理功能影响的研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39 (12): 200-207, 213.
YANG L, JIA Y J, LIU J M, et al. Research progress on the effects of ultrafine grinding technology on nutrients and specific physiological functions of grain products[J]. Food & Machinery, 2023, 39(12): 200-207, 213.

[7] XU L, FANG X J, WU W J, et al. Effects of high-temperature pre-drying on the quality of air-dried shiitake mushrooms (Lentinula edodes)[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 406-413.

[8] JIMÉNEZ P Q, MONTENEGRO O, SOSA R, et al. Total carbohydrates concentration evaluation in products of microbial origin[J]. Afinidad, 2019, 76(587): 195-202.

[9] CHUMROENPHAT T, SOMBOONWATTHANAKUL I, SAENSOUK S, et al. Changes in curcuminoids and chemical components of turmeric (*Curcuma longa* L.) under freeze-drying and low-temperature drying methods[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128121.

[10] HUANG Z T, CHEN Q Q, HU K X, et al. Effects of in vitro simulated digestion on the free and bound phenolic content and antioxidant activity of seven species of seaweeds[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56 (5): 2 365-2 374.

[11] 于森. 超微粉碎对香菇蛋白提取影响的研究[J]. 现代化农业, 2017(5): 36-37.
YU M. Study on the effect of ultrafine grinding on the extraction of lentinan protein[J]. Modernizing Agriculture, 2017(5): 36-37.

[12] YAN L, LI T, LIU C H, et al. Effects of high hydrostatic pressure and superfine grinding treatment on physicochemical/functional properties of pear pomace and chemical composition of its soluble dietary fibre[J]. LWT, 2019, 107: 171-177.

[13] MUTTAKIN S, KIM M S, LEE D U. Tailoring physicochemical and sensorial properties of defatted soybean flour using jet-milling technology[J]. Food Chemistry, 2015, 187: 106-111.

[14] YUE X J, XU P W, ZHU Y, et al. Effect of hydrochloric acid and citric acid with ultrasound processing on characteristics of superfine-ground pectic polysaccharides from okra (*Abelmoschus esculentus* L.) peel[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259: 129076.

[15] 蒋丽娜, 张秀清, 裴海生, 等. 超微粉碎对花椒籽粉品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 67-74.
JIANG L N, ZHANG X Q, PEI H S, et al. Effect of superfine grinding technology on the quality characteristics of zanthoxylum bungeanum seed powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 67-74.

[16] NHI T T Y, PHAT D T, QUYEN N N, et al. Effects of vacuum concentration on color, polyphenol and flavonoid contents and antioxidant activity of pomelo citrus maxima (*Burm. f.*) merr. juice[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 991(1): 012060.

[17] WANG J, WANG C, LI W W, et al. Ball milling improves extractability and antioxidant properties of the active constituents of mushroom Inonotus obliquus powders[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51 (10): 2 193-2 200.

[18] RAGHAVENDRA S N, RAMACHANDRA SWAMY S R, RASTOGI N K, et al. Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: a source of dietary fiber[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72(3): 281-286.

[19] TAN Y Y, LI S X, LI C F, et al. Glucose adsorption and α-amylase activity inhibition mechanism of insoluble dietary fiber: comparison of structural and microrheological properties of three different modified coconut residue fibers[J]. Food Chemistry, 2023, 418: 135970.

[20] 盖国胜, 陶珍东. 粉体工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 50.
GAI G S, TAO Z D. Powder engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 50.

[21] KANWAR P, YADAV R B, YADAV B S. Cross-linking, carboxymethylation and hydroxypropylation treatment to sorghum dietary fiber: effect on physicochemical, micro structural and thermal properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123638.

[22] SI J Y, YANG C R, CHEN Y, et al. Structural properties and adsorption capacities of *Mesona chinensis* Benth residues dietary fiber prepared by cellulase treatment assisted by *Aspergillus niger* or Trichoderma reesei[J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135149.

[23] ZHAO X Y, CHEN J, CHEN F L, et al. Surface characterization of corn stalk superfine powder studied by FTIR and XRD[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, 104: 207-212.

[24] RAZA M A, SAEED F, AFZAAL M, et al. Comparative study of cross-and uncross-linked Arabinoxylans extracted from maize bran with special reference to their structural and antioxidant potential[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 2 495-2 504.

[25] SUNGSINCHAI S, NIAMNUY C, JAREE A, et al. Influences of pretreatment and drying methods on composition, micro/molecular structures and some health - related functional characteristics of dietary fibre powder from orange pulp residues[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(10): 2 217-2 229.