

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90166

糜子粉粒径对小麦面包品质、抗氧化能力、体外消化特性的影响

Effects of different particle sizes of finger millet on the quality, antioxidant ability and *in vitro* digestibility of wheat bread

肖攀飞¹ 谢 华² 陶笑寒¹ 罗旖旎¹ 汤渝华³ 李赤翎¹

XIAO Pan-fei¹ XIE Hua² TAO Xiao-han¹ LUO Yi-ni¹ TANG Yu-hua³ LI Chi-ling¹

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省科学技术信息研究所, 湖南 长沙 410001; 3. 长沙罗莎食品有限公司, 湖南 长沙 410000)

(1. School of Food and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Hunan Institute of Science and Technology Information, Changsha, Hunan 410001, China; 3. Changsha Rosa Food Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China)

摘要:目的: 开发功能性糜子面包。方法: 以面包的理化性质、抗氧化能力、体外消化特性和感官评价作为指标, 探究不同粒径糜子粉对小麦面包的特性品质的影响。结果: 与未添加糜子粉面包相比, 添加了 200 目糜子粉的面包其总酚含量提高了 225.78%, DPPH 自由基清除率提高了 42.96%, 铁离子还原能力提高了 22.97%, 粒径越小, 抗氧化性越强; 另外, 糜子粉的添加改变了面包的消化特性, 降低了快消化淀粉和慢消化淀粉含量, 显著增加了抗性淀粉含量。但面包的比容显著降低, 硬度有所增加。结论: 添加 200 目糜子粉的面包其营养品质与功能性能明显改善, 尤其是粗纤维和钙含量。

关键词: 糜子粉; 粒径; 面包; 质构; 抗氧化; 体外消化

Abstract: **Objective:** This study aimed to exploit the functional bread of finger millet. **Methods:** Based on the physical and chemical properties, antioxidant capacity, special digestion characteristics and sensory evaluation of bread, the effects of different particle sizes of finger millet flour on the characteristics of wheat bread were investigated. **Results:** Compared with the bread without finger millet powder, the bread with 200 mesh finger millet powder increased the total phenol content by 225.78%, the DPPH radical scavenging rate by 42.96% and the iron ion reduction ability by 22.97%. The finger millet powder with smaller particle size showed stronger anti-oxidation ability. Moreover,

the addition of finger millet powder could change the digestion characteristics of bread, reduce the content of fast-digested and slow-digested starch and significantly increased the content of resistant starch. However, the specific volume of bread decreased significantly and the hardness increased. **Conclusion:** The nutritional quality and functionality of bread with 200 mesh finger millet powder were significantly improved, especially the content of crude fiber and calcium.

Keywords: finger millet; particle size; bread; texture; antioxidant ability; *in vitro* digestion

糜子, 又名龙爪粟、龙爪稷等, 属草本植物, 富含膳食纤维、矿物质以及酚类物质, 其中钙含量是糙米、小麦、玉米的 10 倍, 牛奶的 3 倍, 具有很高的营养价值^[1-2], 特别是种皮, 含有大量的酚类化合物, 使得糜子具有较强的抗氧化活性^[3]。

面包是一类可以提供能量和营养的重要主食。但用纯小麦粉制作的面包存在营养不全面、血糖生成指数 (GI) 高等缺点^[4]。有研究^[5-6]表明许多杂粮中含有的多酚物质可以与 α -淀粉酶结合, 抑制淀粉消化, 使杂粮面包中抗性淀粉含量增加, 因此杂粮面包在一定程度上可以抑制餐后血糖升高。但杂粮的加入通常会使面包的硬度增加, 导致口感下降^[7]。杂粮经过微粉化有利于多酚类活性物质的释放^[8], 但杂粮粉粒径大小可能会影响产品的功效性、组织结构及口感^[9-10]。糜子作为一种营养价值较高的杂粮作物, 是制作营养面包的良好选择。试验拟研究糜子粉粒径对小麦面包感官品质、抗氧化活性和体外消化特性的影响, 以期为糜子面制品开发提供参考,

基金项目: 湖南省教育厅重点项目 (编号: 20A026)

作者简介: 肖攀飞, 男, 长沙理工大学在读硕士研究生。

通信作者: 李赤翎 (1966—), 女, 长沙理工大学教授, 博士。

E-mail: baiweili2005@163.com

收稿日期: 2022-03-01

同时为杂粮微粉化改善焙烤制品品质提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

穆子、五谷鸡蛋:市售;

小麦粉:蛇口南顺面粉有限公司;

白砂糖:安琪酵母股份有限公司;

谷朊粉:万康食品配料城;

燕子牌即发酵母:广西丹宝利酵母有限公司;

德亚脱脂纯牛奶:平湿食品股份有限公司;

黄油:光明乳业股份有限公司;

盐:湖南雪天技术开发有限公司;

石油醚:分析纯,郑州派尼化学试剂厂;

二硫代苏糖醇(TPTZ):分析纯,上海甄准生物科技有限公司;

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、氯化铁、甲醇、无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

高速粉碎机:DFY-500型,温岭市林大机械有限公司;

低速离心机:TG16K型,长沙湘怡仪器有限公司;

色度计:WSC-S型,上海仪电物理光学仪器有限公司;

质构仪:TA-XT plus型,英国 Stable Micro Sytem 公司;

高效液相色谱仪:Agilent 1100型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

紫外可见分光光度计:UV765型,上海翱艺仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 面包制作

(1) 原料配比:小麦粉 95 g,谷朊粉 5 g,酵母 2 g,黄油 5 g,白砂糖 10 g,鸡蛋 8 g,牛奶 50 g,盐 1 g。

(2) 试验分组:试验组为不同粒径的穆子粉与小麦粉混合后制作的面包,即小麦粉 65 g,穆子粉 30 g,其他配料不变。其中 D1 组:添加 60 目(过筛孔直径为 0.25 mm 的筛子)穆子粉,D2 组:添加 100 目(过筛孔直径为 0.15 mm 的筛子)穆子粉,D3 组:添加 200 目(过筛孔直径为 0.075 mm 的筛子)穆子粉。对照组(D0)为未添加穆子粉的小麦面包。

(3) 面包制作流程:

原料混合成面团→首次发酵(1 h)→整型后二次发酵(30 min)→烘烤(上管温度 135 ℃、下管温度 180 ℃、烘焙 13 min)→冷却至室温(25 ℃)

1.3.2 基本营养物质测定

(1) 蛋白质:按 GB/T 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》执行。

(2) 脂肪:按 GB/T 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》执行。

(3) 碳水化合物:GB/T 5009.10—2003《植物类食品中粗纤维的测定》执行。

(4) 灰分:GB/T 24872—2010《粮油检验 小麦粉灰分含量测定 近红外法》执行。

(5) 钙、维生素 B₂、胡萝卜素:按 GB/T 5009.268—2016《食品安全标准 食品中多元素的测定》执行。

1.3.3 面包比容测定 面包体积的测定按 GB/T 20981—2007《面包》中的菜籽置换法执行,使用电子天平测定面包的重量。按式(1)计算面包比容。

$$P=V/m, \quad (1)$$

式中:

P ——面包比容,mL/g;

V ——面包体积,mL;

m ——面包重量,g。

1.3.4 面包颜色测定 用色度计分别测定每种面包的面包皮和面包芯的颜色值,用 L^* 、 a^* 、 b^* 分别表示明暗、红绿、黄蓝。色度计用白色标准瓷砖校准。

1.3.5 面包孔隙度测定 根据王明^[11]的方法,用图像扫描仪获得 30 mm×30 mm 的面包截面图,再使用 Matlab R2018 软件进行分析,得到面包的气孔数量 n ,按式(2)计算面包的气孔密度。

$$\rho_{\text{气孔}}=n/S, \quad (2)$$

式中:

$\rho_{\text{气孔}}$ ——面包的气孔密度;

n ——面包气孔数量;

S ——面包截面面积,mm²。

1.3.6 面包多酚含量和抗氧化测定

(1) 多酚提取:参照代雅杰等^[12]的方法,稍作修改。将面包样品冷冻干燥后磨粉,准确称取 10 g 样品,再将样品添加到 100 mL 80% 的甲醇溶液中,在 50 ℃ 下超声提取 1 h,再将提取物在 2 800 r/min 下离心 10 min,并收集上清液。再重复提取 2 次,将 3 次上清液合并放置到 -4 ℃ 下备用。

(2) 总酚含量测定:参照 Macedo 等^[13]的方法。使用注射器过滤器过滤提取物,然后进行高效液相色谱分析。色谱条件:色谱柱 Diamonsil C₁₈ (250 mm×4.6 mm, 5 μm);流动相 A:1% 冰乙酸水溶液,B:纯甲醇;柱温 30 ℃;流速 1 mL/min;检测波长 280 nm;进样量 20 μL;运行时间 50 min;洗脱程序:0 min (95% A+5% B), 10 min (70% A+30% B), 25 min (50% A+50% B), 30 min (40% A+60% B), 35 min (30% A+70% B), 40 min (95% A+5% B)。结果表示为每克干样品中游离酚类化合物的总微克数(μg/g)。

(3) DPPH 自由基清除活性和铁离子还原能力测定:参照 Sasipriya 等^[14]的方法。以 Trolox 作为标准化合物,

测量结果表示为每克干样品(mg TE_s/g)的 Trolox 当量。

1.3.7 体外消化试验

(1) 体外消化模拟:参照张子敬等^[15]的方法,并稍作修改。

模拟唾液:将 0.238 g 硫酸氢钠、0.019 g 硫酸二氢钾、0.8 g 氯化钠和 2.0 g α-淀粉酶加入容量瓶中,用蒸馏水定容至 100 mL。

模拟胃液:0.1 g 胃蛋白酶溶解于盐酸(pH 2.0)中,体系体积为 100 mL。

模拟肠液:称取 1 g 胰蛋白酶,1.2 mL 淀粉糖苷酶和 2.2 g 猪胰腺 α-淀粉酶置于容量瓶中,然后用 KH₂PO₄-NaOH 缓冲溶液(pH 6.8)溶解并定容至 100 mL。

取 0.2 g 面包粉末样品置于 50 mL 离心瓶中,加入 5 mL 醋酸缓冲液和 3 颗沸珠,37 °C 恒温水浴振荡器中振荡,使样品完全分散开,加入 1 mL 唾液模拟溶液,振荡反应 2 min 后,加入 0.23 mL 6 mol/L 的盐酸溶液终止反应。加入 2.5 mL 的胃液模拟溶液,振荡反应 2 h 后,加入 0.6 mL 400 g/L 的 NaOH 溶液和 10 mL 的醋酸缓冲液。继续加入 2.5 mL 肠液模拟溶液,37 °C 水浴振荡器中培养。通过计算 0,20,60,120,180 min 释放的葡萄糖量得出消化淀粉水平,并将淀粉进一步分类为快速消化淀粉(RDS)(20 min 内消化)、缓慢消化的淀粉(SDS)(20~120 min 消化)及抗性淀粉(RS)(120 min 内未消化)^[16]。

(2) 消化后面包的抗氧化能力:参照 Amin 等^[4]的方法稍作修改,模拟消化结束后,将面包悬浮液在 3 600 r/min 下离心 20 min,并根据 1.3.6(3)描述的方法评估上清液的抗氧化能力。

1.3.8 面包的感官评价 感官评价小组由 10 名受过感官评定培训的食品专业学生组成,10 名人员按照表 1 的评分标准进行面包烘焙品质评分。

1.4 数据分析

使用 SPSS 23.0 软件进行数据分析,所有试验处理均设 3 次重复,测定数据以平均值±标准偏差的形式表示。使用 Origin 2020 绘图分析。

2 结果分析

2.1 基本营养成分分析

由表 2 可知,添加穆子粉的面包,粗纤维含量提高了 56.25%,钙含量高达 236 mg/100 g,提高了 62.23%。摄入天然钙有助于预防骨质疏松等骨骼疾病,而穆子粉是一个很好的钙来源。

2.2 穆子粉粒径对面包品质的影响

2.2.1 面包颜色 由表 3 可知,与对照组相比,添加穆子粉的面包皮 a* 值和 b* 值有显著性的差异(P<0.05),说明穆子粉会使面包皮的黄色和红色减弱;粒径对面包皮色泽无显著性影响。穆子粉的加入使面包芯的 L* 值和 b* 值显著性降低(P<0.05),a* 值显著增大。随着穆子

表 1 感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

项目	评分标准	得分
色 泽 (15 分)	金黄色、淡棕色或棕灰色,色泽均匀、正常	11~15
	面包颜色正常,色泽较均匀	6~10
	面包色泽不均匀,有焦斑	0~5
形 态 (15 分)	面包完整、丰满,表面平滑,无凹陷,形态对称	11~15
	面包较完整丰满,表面有少量褶皱,形状较规则	6~10
	面包表面粗糙,有凹陷,形状不规则	0~5
面包芯质地(20 分)	面包芯柔软且富有弹性,切面细腻	15~20
	面包芯有一定弹性和硬度,较细腻	6~14
	面包芯弹性差,结构粗糙,有明显碎渣,按下难以复原	0~5
面包纹理结构 (20 分)	面包芯气孔均匀细腻,孔壁薄	15~20
	面包芯有部分气孔分布不均匀,有少量大孔洞	6~14
	面包芯气孔大小不一,极不均匀,大孔洞多	0~5
口 感 (30 分)	具有发酵和烘烤后的面包香味,松软适口,不粘牙,无异味	21~30
	面包香味较弱,不够松软或粘牙,口感一般	11~20
	无面包香味,口感较差或有其他异味	0~10

粉粒径的减小,面包整体的颜色有明显变化(P<0.05),但 D2 和 D3 组面包颜色无显著差异(P>0.05)。

综上,穆子粉的添加会使面包的颜色变暗,这和穆子粉富含纤维素有关^[17],Raymundo 等^[18]也报道了随着纤维含量的增加,饼干的色度会变暗,主要是因为纤维具有多种糖组分,高纤维会增强加工过程中的非酶促褐变(羰氨反应)。

2.2.2 面包比容和气孔密度 由图 1 可知,穆子粉的添加会导致面包的比容显著下降(P<0.05)。这是因为穆子粉中含有大量的粗纤维会阻碍面筋网络形成,使面筋结构稳定性降低从而导致面包比容降低^[19]。随着穆子粉粒径的降低,面包的比容随之降低,由 3.20 mL/g 降至 2.57 mL/g,与 Azeem 等^[20]研究结果一致,但 D2 和 D3 组面包比容无明显差异(P>0.05)。

由表 4 可知,添加穆子粉后,相同截面面积的面包气孔数量显著增加(P<0.05),随着穆子粉粒径的下降,气孔数量无显著变化(P>0.05)。面包截面图经 Matlab 处理后可知气孔分布情况,D0 组切片的气孔密度小、直径大,D1、D2 和 D3 组的面包的气孔密度相较于 D0 组的有

表 2 样品基本营养成分[†]
Table 2 Basic nutrients of samples

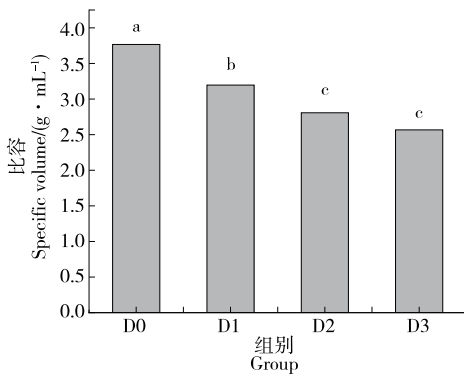
样品种类	脂肪/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	蛋白质/ %	淀粉/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	粗纤维/ %	灰分/ %	碳水化合物/ (10 ⁻² g·g)	钙/ (10 ⁻² mg·g ⁻¹)	胡萝卜/ (10 ⁻² μg·g ⁻¹)	维生素 B2/ (10 ⁻² mg·g ⁻¹)
小麦粉	1.20±0.02	12.20±0.30	75.80±0.90	0.50±0.05	0.51±0.03	76.80±0.80	14.40±0.40	<0.5	<0.020
糜子粉	0.80±0.02	5.36±0.03	62.60±0.60	10.60±0.40	1.87±0.01	63.00±0.40	236.40±1.30	<0.5	0.066±0.001
对照组	5.80±0.75	13.80±0.40 ^a	42.60±0.60	1.60±0.03 ^b	0.91±0.02 ^b	47.50±1.00	45.80±1.50 ^b	<0.5	0.154±0.002
糜子面包	5.90±0.30	12.60±0.30 ^b	42.40±0.80	2.50±0.04 ^a	1.08±0.01 ^a	46.10±1.00	74.30±2.00 ^a	<0.5	0.150±0.001

[†] 同列字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

表 3 糜子粉粒径对面包颜色的影响[†]
Table 3 Effect of different particle sizes of finger millet powder on the bread color

指标	D0		D1		D2		D3	
	面包皮	面包芯	面包皮	面包芯	面包皮	面包芯	面包皮	面包芯
L^*	54.10±1.11 ^a	75.03±0.81 ^a	54.08±1.23 ^a	56.71±1.43 ^b	54.29±1.62 ^a	46.94±0.11 ^c	55.81±1.13 ^a	46.11±0.32 ^c
a^*	20.34±0.83 ^a	3.54±0.30 ^c	15.04±0.38 ^b	7.16±0.27 ^b	15.81±1.51 ^b	10.69±1.47 ^a	14.50±0.48 ^b	10.79±0.21 ^a
b^*	44.28±0.42 ^a	30.25±1.52 ^a	36.31±0.65 ^b	18.11±0.72 ^c	36.31±0.97 ^b	20.60±1.66 ^{bc}	36.15±0.85 ^b	21.54±0.80 ^b

[†] 字母不同表示组间显著差异($P<0.05$)。



字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)

图 1 糜子粉粒径对面包比容的影响

Figure 1 Effect of different particle sizes of finger millet powder on the specific volume of bread

所增加。原因可能是:① 糜子粉的加入稀释了面筋蛋白;② 与小麦粉不相融合的糜子颗粒分布于面团中,使面包内部保留的气体减少^[21]。这会让面包蓬松度下降,影响面包的口感。综上,粒径对糜子粉面包的比容、气孔密度基本没有影响。

表 4 糜子粉粒径对面包气孔密度的影响[†]

Table 4 Effect of different particle sizes of finger millet powder on the stomatal density of bread

组别	切片截面积/mm ²	气孔数量	气孔密度
D0	900	457.00±8.96 ^b	0.51
D1	900	565.00±6.08 ^a	0.63
D2	900	572.00±4.16 ^a	0.64
D3	900	575.00±7.77 ^a	0.64

[†] 同列字母不同表示组间显著差异($P<0.05$)。

2.2.3 面包质构 由表 5 可知,糜子粉的添加以及糜子粉粒径的变化对面包的弹性无显著影响($P>0.05$)。添加糜子粉后,面包的硬度和咀嚼度显著增大($P<0.05$),原因是糜子不含面筋蛋白,但富含膳食纤维,使面筋水合能力和持气量下降,导致面团在发酵过程中得不到充分膨胀,最终使面包硬度和咀嚼度增大^[22]。随着糜子粉粒径的降低,面包的硬度下降,可能是因为糜子粉粒径越小越容易嵌入面筋网络结构中,对面团面筋破坏力度较小^[23]。与 D0 组相比, D1 组的黏聚性显著降低($P<$

表 5 糜子粉粒径对面包质构的影响[†]

Table 5 Effect of different particle sizes of finger millet powder on the texture of bread

组别	硬度/N	弹性	黏聚性	咀嚼度	回复性
D0	335.28±1.07 ^d	0.76±0.05 ^a	0.58±0.06 ^a	150.11±4.48 ^c	0.18±0.04 ^{ab}
D1	519.11±5.20 ^a	0.73±0.04 ^a	0.49±0.03 ^b	170.24±2.62 ^a	0.13±0.02 ^b
D2	420.73±5.91 ^b	0.77±0.03 ^a	0.55±0.02 ^{ab}	170.30±2.41 ^a	0.17±0.01 ^{ab}
D3	350.44±6.30 ^c	0.78±0.02 ^a	0.58±0.02 ^a	160.33±4.51 ^b	0.20±0.02 ^a

[†] 同列字母不同表示组间显著差异($P<0.05$)。

0.05),但随着添加穆子粉粒径的减小,面包黏聚性逐渐升高,D3 组的黏聚性与 D0 组的无显著性差异($P>0.05$)。因为,粒径大的粗粮会影响面筋蛋白的形成,从而影响面包的黏聚性^[24]。

2.2.4 面包感官品质 由图 2 可知,D0 组感官评价总分最高。D0 组和 D3 组相比,除色泽外,其他方面无显著性差异($P>0.05$)。且 D3 组感官评定总分显著高于 D1 和 D2 组,原因是 D3 组添加穆子粉粒径小,对面团影响较小,烘烤出的面包表面光滑,色泽均匀,质地柔软而有弹性;而 D1 和 D2 组表面粗糙,面包芯有明显的颗粒感,硬度较大,使感官评分降低。感官评定的结果与 2.2.3 中面包质构数据分析相符。从感官品质考虑,D3 组的面包与对照组最接近。

2.3 穆子粉粒度对面包消化特性的影响

由表 6 可知,D1、D2、D3 组面包的 RDS 和 SDS 含量相对于 D0 组显著性降低($P<0.05$),而 D1、D2、D3 组的 RS 含量相对于 D0 组显著性增加。添加穆子粉后,面包的 RS 含量增加,与 Chen 等^[2]研究结果一致。穆子粉富含的多酚类物质可以与直链淀粉通过疏水作用形成复杂的络合物,其结构在淀粉酶消化过程中不易水解^[25],因而穆子粉中抗性淀粉含量较高。

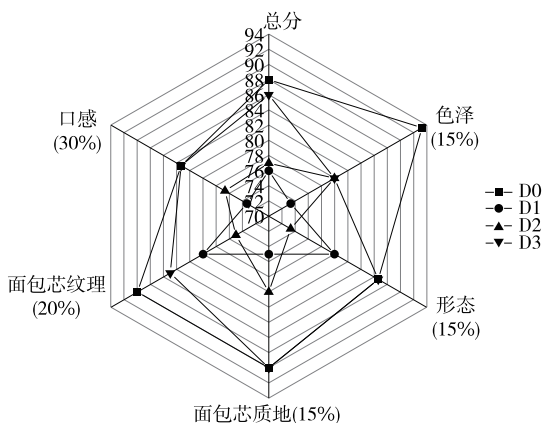


图 2 添加不同粒度穆子粉面包的感官评分图
Figure 2 Sensory scoring diagram of bread with different particle sizes of finger millet powder

表 6 穆子粉粒径对小麦面包 RDS、SDS 和 RS 百分含量的影响[†]

Table 6 Effects of different particle sizes of finger millet powder on the percentages of RDS, SDS and RS in wheat bread

组别	RDS 含量/%	SDS 含量/%	RS 含量/%
D0	57.77±1.20 ^a	34.82±1.15 ^a	7.41±0.20 ^c
D1	47.80±1.00 ^b	31.08±1.29 ^b	21.13±0.81 ^a
D2	48.37±1.03 ^b	30.91±0.80 ^b	20.72±0.51 ^a
D3	48.43±0.49 ^b	32.05±0.37 ^b	19.52±0.14 ^b

[†] 同列字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)。

2.4 穆子粉粒度对面包抗氧化活性的影响

由表 7 可知,D1、D2、D3 组面包中的游离总酚含量显著高于 D0 组的($P<0.05$),D1、D2、D3 组的总酚含量无明显差异($P>0.05$)。由图 3 可知,D1、D2、D3 组的 DPPH 清除能力和铁离子还原能力显著高于 D0 组($P<0.05$),而 D1 和 D2 组抗氧化能力无明显差异,D3 组抗氧化能力最强。穆子含有丰富的酚类化合物,具有较好的抗氧化活性^[26],因此添加了穆子粉的面包表现出更强的抗氧化性。

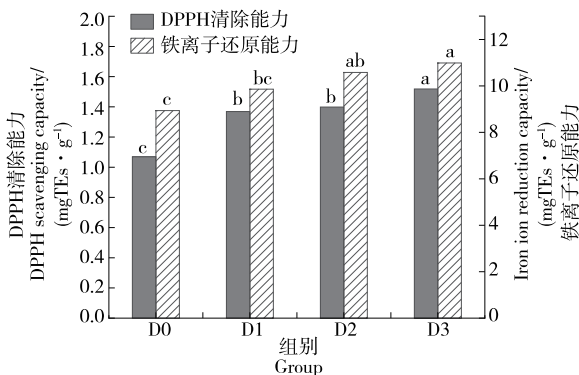
图 4 为经过体外模拟消化试验后各面包的抗氧化能

表 7 不同粒径穆子粉面包的游离总酚含量

Table 7 Total free phenol content of bread with different particle sizes of finger millet powder $\mu\text{g/mL}$

组别	D0	D1	D2	D3
总酚含量	10.59±0.66 ^b	34.14±0.16 ^a	34.90±0.74 ^a	34.50±0.90 ^a

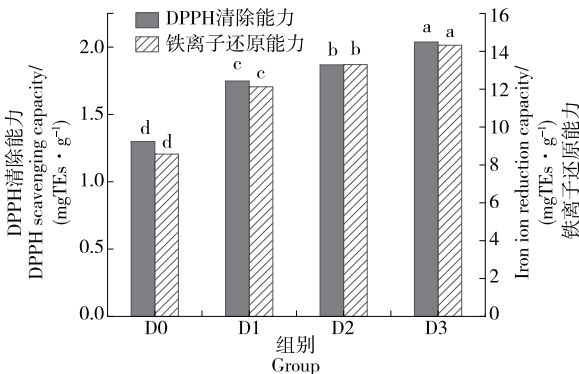
[†] 字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)。



字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)

图 3 不同粒径穆子粉面包的抗氧化能力

Figure 3 Antioxidant capacity of bread with different particle sizes of finger millet powder



字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)

图 4 不同粒径穆子粉面包模拟体外消化后的抗氧化能力

Figure 4 Antioxidant capacity of bread with different particle sizes of finger millet powder after in vitro simulated digestion

力结果。D1、D2、D3 组的 DPPH 清除能力和铁离子还原能力显著高于 D0 组 ($P < 0.05$), 且随着穆子粒度的减小, 面包的抗氧化能力逐渐提高。经过体外消化后, D1、D2、D3 组的抗氧化能力提高可能是因为胃和小肠消化能够促进穆子面包中黄酮类物质的释放, 而黄酮有抗氧化活性, 与马艺超等^[27] 研究结果一致。D3 组抗氧化能力最强, 可能是因为穆子粒度小相对容易消化使得多酚生物利用率较高。

3 结论

考察了 3 种不同粒度穆子粉对小麦面包理化参数、质构特性、抗氧化性能的影响。试验结果表明, 添加了穆子粉的面包其粗纤维和钙的含量、消化模拟前后的抗氧化能力、抗性淀粉含量均大幅度地提高。穆子粉粒径对小麦面包品质几乎无影响, 除抗氧化性以外。穆子粉粒径越小, 面包的抗氧化能力越强。添加 200 目穆子粉感官评价得分最高。总体而言, 粒径 200 目的穆粉可有效改善普通小麦面包的营养品质且不影响其口感。后续将进一步研究穆子粉面包降血糖等功能特性。

参考文献

- [1] 王双辉, 陈致印, 谢晶, 等. 穆子营养成分及功能利用研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(13): 329-334.
WANG Shuang-hui, CHEN Zhi-yin, XIE Jing, et al. Research progress in nutrient composition, function and utilization of finger millet[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(13): 329-334.
- [2] CHEN J L, WANG L, XIAO P F, et al. Informative title: Incorporation of finger millet affects in vitro starch digestion, nutritional, antioxidative and sensory properties of rice noodles[J]. LWT, 2021, 151: 112145.
- [3] ANIL K, MAMTA M, SANVEEN K, et al. Nutraceutical value of finger millet [*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.], and their improvement using omics approaches[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 934.
- [4] AMIN K, HASSAN A G, ROGHAYEH A S, et al. Effect of maize germ protein hydrolysate addition on digestion, in vitro antioxidant activity and quality characteristics of bread[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 97: 103148.
- [5] 郑妍, 张馨匀, 隋勇. 莲原花青素对面包品质及功能特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 62-68.
ZHENG Yan, ZHANG Xin-yun, SUI Yong, et al. Effect of lotus seedpod procyanidins on bread quality and functional properties[J]. Food Science, 2020, 41(8): 62-68.
- [6] 王玉婉, 涂政, 叶阳. 超微茶粉对全麦面包品质及其淀粉消化特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 79-85.
WANG Yu-wan, TU Zhen, YE Yang. Effect of superfine tea powder on quality and starch digestion properties of whole-wheat bread[J]. Food Science, 2021, 42(1): 79-85.
- [7] 周韵, 高冉, 李建婷, 等. 苹果全粉对小麦粉加工性能及吐司面包品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 161-167.
ZHOU Yun, GAO Ran, LI Jian-ting, et al. The effects of apple powder on the processing properties of wheat flour and the quality of toast bread[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(24): 161-167.
- [8] 蔡婷, 汪丽萍, 刘明, 等. 超微粉碎对苦荞多酚及抗氧化活性的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 95-99.
CAI Ting, WANG Li-ping, LIU Ming, et al. The influence of micronization on polyphenols and antioxidant activity of buckwheat powder[J]. Journal of The Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(10): 95-99.
- [9] PROTONOTARIOU S, STERGIU P, CHRISTAKI M, et al. Physical properties and sensory evaluation of bread containing micronized whole wheat flour [J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126497.
- [10] 郭婷, 汪丽萍, 孙宝国, 等. 微粉化豌豆粉对面条理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(2): 157-162.
GUO Ting, WANG Li-ping, SUN Bao-guo, et al. Effects of micronization on the physicochemical properties of pea powder[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(2): 157-162.
- [11] 王明. 面包品质与质构特性的研究[D]. 成都: 西华大学, 2013: 14-16.
WANG Ming. A study on quality and texture characteristics of Bread[D]. Chengdu: Xihua University, 2013: 14-16.
- [12] 代雅杰, 黑雪, 邓莉梅, 等. 橘皮粉对面包烘焙品质及其酚类物质抗氧化能力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 154-158.
DAI Ya-jie, HEI Xue, DENG Li-mei, et al. Effect of flaved powder on the bread baking quality and poly phenols antioxidant activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(4): 154-158.
- [13] MACEDO A, SANTANA L, CRAWFORD M, et al. Integrated microwave-and enzyme-assisted extraction of phenolic compounds from olive pomace[J]. LWT, 2021, 138: 110621.
- [14] SASIPRIYA G, SIDDHURAJU P. Perumal I. Effect of different processing methods on antioxidant activity of underutilized legumes, *Entada scandens* seed kernel and *Canavalia gladiata* seeds[J]. Food & Chemical Toxicology, 2012, 50(8): 2 864-2 872.
- [15] 张子敬, 朱璠, 孙娟, 等. 微波预处理和熟化对红米消化和理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 165-170.
ZHANG Zi-jing, ZHU Ban, SUN Juan, et al. Effects of microwave pretreatment and cooking on digestion and physicochemical properties of red rice[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(15): 165-170.
- [16] TANG M Y, WANG L Y, CHENG X X, et al. Non-starch constituents influence the in vitro digestibility of naked oat (*Avena nuda* L.) starch[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124953.
- [17] PRADHAN A, NAG S K, PATIL S K. Dietary management of finger millet (*Eleusine coracana* L. Gaertn) controls diabetes[J].

- Current Science, 2010, 98(6): 763-765.
- [18] RAYMUNDO A, FRADINHO P, NUNES M C. Effect of Psyllium fibre content on the textural and rheological characteristics of biscuit and biscuit dough[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2014, 3(2): 96-105.
- [19] 罗文珊, 谢文佩. 柚皮粉膳食纤维面包的加工工艺及品质影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(9): 122-128.
- LUO Wen-san, XIE Wen-pei. Processing technology and quality influence of pomelo powder dietary fiber bread[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(9): 122-128.
- [20] AZEEM M, MU T H, ZHANG M. Influence of particle size distribution of orange-fleshed sweet potato flour on dough rheology and simulated gastrointestinal digestion of sweet potato-wheat bread[J]. *LWT*, 2020, 131: 109690.
- [21] MILLAR C, BARRY R R, et al. Dough properties and baking characteristics of white bread, as affected by addition of raw, germinated and toasted pea flour[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 56: 102189.
- [22] 贾玉华, 钟耀广. 甘薯渣粉对小麦粉面团物化特性及面包品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(21): 81-85.
- JIA Yu-hua, ZHONG Yao-guang. Effect of sweet potato residue flour on the physico-chemical properties of dough and the quality of bread[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(21): 81-85.
- [23] 王玺, 闫晨苗, 李铁梅, 等. 马铃薯粉粒度对面包风味及品质的影响[J]. *食品工业*, 2020, 41(12): 137-141.
- WANG Xi, YAN Chen-miao, LI Tie-mei, et al. Effect of potato flour mesh size on the flavor and quality of bread[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(12): 137-141.
- [24] 李叶贝, 任广跃, 屈展平, 等. 不同粒度马铃薯全粉对复合面条品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(19): 55-60.
- LI Ye-bei, REN Guang-yue, QU Zan-ping, et al. Effects of different grain sizes of potato flour on the quality of wheat based composite flour noodles[J]. *Food Science*, 2017, 38(19): 55-60.
- [25] XIE F, HUANG Q, FANG F, et al. Effects of tea polyphenols and gluten addition on in vitro wheat starch digestion properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 126: 525-530.
- [26] HEGDE P S, RAJASEKARAN N S, CHANDRA T S. Effects of the antioxidant properties of millet species on oxidative stress and glycemic status in alloxan-induced rats [J]. *Nutrition Research*, 2005, 25(12): 1 109-1 120.
- [27] 马艺超, 路飞, 马凤鸣, 等. 体外模拟消化对苦荞面包黄酮及抗氧化的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(9): 20-27.
- MA Yi-chao, LU Fei, MA Feng-ming, et al. Effects of in vitro simulated digestion on flavonoids and antioxidants in tartary buckwheat bread[J]. *Journal of The Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(9): 20-27.
-
- (上接第 11 页)
- [11] 万茵, 罗成, 张鸿婷, 等. 海藻酸钠微胶囊对乳酸菌产乙醛脱氢酶在体外胃肠消化环境中保护作用[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(9): 61-65.
- WAN Yin, LUO Cheng, ZHANG Hong-ting, et al. The protective effect of sodium alginate microcapsules on acetaldehyde dehydrogenase produced by lactic acid bacteria in vitro gastrointestinal digestion environment[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2018, 44(9): 61-65.
- [12] 叶军. 深海细菌 *Halomonas axialensis* ACH-L-8 的醛类降解功能分析及应用研究[D]. 厦门: 集美大学, 2016: 30-32.
- YE Jun. Aldehyde degradation function analysis and application of halomonas axialensis ACH-L-8 [D]. Xiamen: Jimei University, 2016: 30-32.
- [13] 付湘晋. 白鲢鱼脱腥及其低盐鱼糜制备的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 92.
- FU Xiang-jin. Study on deodorization of silver carp and preparation of low-salt surimi [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009: 92.
- [14] 刘薇丛. 抗冻酵母的筛选及其代谢物的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018: 34.
- LIU Wei-cong. Screening of antifreeze yeasts and their metabolites[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018: 34.
- [15] 衣海龙. 利用超声波法破碎啤酒酵母细胞壁的工艺研究[J]. *酿酒*, 2015, 42(4): 83-85.
- YI Hai-long. Study on breaking beer yeast cell wall by ultrasonic method[J]. *Winemaking*, 2015, 42(4): 83-85.
- [16] OKIBE N, AMADA K, HIRANO S, et al. Gene cloning and characterization of aldehyde dehydrogenase from a petroleum-degrading bacterium, strain HD-1[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 1999, 88(1): 7-11.
- [17] 刘天龙. 异丙醇脱氢酶固定化工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 27.
- LIU Tian-long. Study on the immobilization process of isopropanol dehydrogenase[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 27.
- [18] 李文, 王陶, 李同祥. 醋化醋杆菌产乙醛脱氢酶发酵条件优化及酶学性质[J]. *食品科技*, 2013, 38(11): 24-28.
- LI Wen, WANG Tao, LI Tong-xiang. Optimization of fermentation conditions and enzymatic properties of aldehyde dehydrogenase from acetobacter[J]. *Food Science and Technology*, 2013, 38(11): 24-28.
- [19] 王静, 揣玉多, 汤卫华, 等. 海藻酸钠包埋法固定 L-阿拉伯糖异构酶的研究[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(16): 92-95.
- WANG Jing, CHUAI Yu-duo, TANG Wei-hua, et al. Study on immobilization of L-arabinose isomerase by sodium alginate embedding method[J]. *Food Research & Development*, 2017, 38(16): 92-95.