

糜子粉对面条质构、蒸煮及消化特性的影响

杨文雪, 利杰梅, 兰慧娴, 谢蔼婷, 谢玉婷, 符珍*

(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 该研究探讨了糜子粉的添加对混合粉糊化特性和面条蒸煮特性、质构特性、微观结构和消化特性的影响。研究表明, 面条的硬度、咀嚼性和胶粘性随糜子粉质量分数增加而增大, 断条率减小。当糜子粉质量分数为 40% 时, 糜子面条的硬度最大 (21.54 N), 胶粘性最大 (11.47 N), 咀嚼性最大 (10.55 mj), 弹性为 0.88 mm, 此时的面条品质较佳, 感官评分最高 (82.11 分)。随着糜子粉的增加, 混合粉的峰值粘度、崩解值和糊化温度降低 ($P<0.05$), 回生值无显著变化 ($P>0.05$), 表明糜子粉的添加可以促进混合粉的糊化。然而, 糜子粉的添加会使面条中的面筋蛋白含量减少, 未被包埋的淀粉颗粒增加, 当糜子粉质量分数为 50% 时, 面条中抗性淀粉含量为 22.66%, 较小麦面条减少了 37.64%, 血糖生成指数为 97.81, 升高了 17.84%, 意味着糜子粉的添加会促进面条的消化。研究结果为糜子粉在面制品中的加工应用提供一定的理论参考。

关键词: 糜子粉; 面条; 质构特性; 淀粉消化

文章编号: 1673-9078(2024)11-325-331

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.11.1106

Influences of Finger Millet Powder on Textural, Cooking and Digestive Characteristics of Noodle

YANG Wenxue, LI Jiemei, LAN Huixian, XIE Aiting, XIE Yuting, FU Zhen*

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In this study, the influences of the addition of finger millet powder on the gelatinization properties of mixed flour, and the cooking characteristics, texture features, microstructure and digestion characteristics of the resulting noodles were studied. The results showed that the hardness, chewiness, and adhesiveness of noodles increased while the breakage rate decreased with an elevated finger millet powder content. When the mass fraction of millet powder was 40%, the hardness of the noodles was the highest (21.54 N), the adhesive strength reached the highest (11.47 N), the chewiness was the highest (10.55 mj), and the elasticity was 0.88 mm. The noodle quality was better, with the sensory score being the highest (82.11). With a further increase of added finger millet powder, the peak viscosity, disintegration value, and gelatinization temperature of the mixed powder decreased ($P<0.05$), whilst the retrogradation value did not change significantly ($P>0.05$), indicating that the addition of finger millet powder could promote the gelatinization of the mixed powder. However, the addition of finger millet powder can reduce the gluten protein content in noodles and increase the unembedded starch granules. When the mass fraction of finger millet powder was 50%, the resistant starch content of noodles was 22.66% (a decrease of 37.64% compared

引文格式:

杨文雪,利杰梅,兰慧娴,等.糜子粉对面条质构、蒸煮及消化特性的影响[J].现代食品科技,2024,40(11):325-331.

YANG Wenxue, LI Jiemei, LAN Huixian, et al. Influences of finger millet powder on textural, cooking and digestive characteristics of noodle [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 325-331.

收稿日期: 2023-09-15

基金项目: 大学生国家级创新训练项目 (202210593025)

作者简介: 杨文雪 (2002-), 女, 本科生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 1295838667@qq.com

通讯作者: 符珍 (1986-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 淀粉及植物蛋白精深加工与改性, E-mail: fuzhen13@gxu.edu.cn

to wheat noodles), and the blood glucose generation index was 97.81 (an increase of 17.84%), indicating that the addition of finger millet powder could promote the digestion of noodles. The research results provide certain theoretical reference for the processing and application of finger millet powder in the processing of flour products.

Key words: finger millet powder; noodles; texture characteristics; starch digestion

中国是面食起源之地, 面条是我国人民的传统主食之一, 从古代的手擀面到现代的各式各样的面条品类, 面条一直是中国人餐桌上的常见食物, 可见其地位之重。为提高面条的口感及营养价值, 许多研究将各种杂粮谷物经加工后和小麦粉按照不同的比例混合, 制作成多种多样的杂粮面条, 如鹰嘴豆杂粮面条^[1]、荞麦面条^[2]、藜麦面条^[3]等。相较于普通的食物, 杂粮面条不仅味道好, 也更有助于控制体重和维持健康的饮食习惯。

穆子, 别称为鸭脚粟、龙爪粟、红稗等, 是一种禾本科穆属的草本植物, 原产于非洲, 在我国分布于山东、河南、陕西、西藏及长江以南各省区^[4]。据《本草纲目》记载, “穆子, 甘涩、无毒, 补中益气, 厚肠胃”, 常用于尿频、脾虚腹泻、消化不良等症^[5]。穆子营养丰富, 富含膳食纤维、蛋白质和多酚, 其中还含有丰富的维生素 B、钾、钙、铁等营养物质, 对于维持身体健康和正常代谢具有重要作用^[6], 因此多被研发制成各类食品, 如穆子面条、穆子面包、穆子曲奇饼干等^[7-9]。将穆子打磨成粉与其他材料混合制作杂粮食品, 可以提高膳食纤维含量, 而膳食纤维可以促进人体肠道蠕动, 有效预防便秘问题, 并且有利于维持肠道健康菌群的平衡^[10]。此外, 穆子富含多种维生素以及其他抗氧化物质, 有助于清除自由基、延缓衰老过程的抗氧化功效^[11,12]。目前鲜少有采用穆子制成杂粮面条的研究报道, 因此, 本文将穆子粉加入小麦粉中制成穆子杂粮面条, 研究穆子粉的添加量对穆子面条品质的影响。通过单因素试验, 探究不同穆子粉质量分数对小麦-穆子混合粉糊化特性的影响以及对面条蒸煮特性、质构特性、微观结构和淀粉体外消化特性的影响, 为开发穆子杂粮面条提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

小麦粉: 益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司, 水分质量分数为 5.72%, 淀粉为 83.38%, 脂肪 9.93%, 蛋白质 10.68% (干基); 穆子粉: 资源山里

山农产品有限公司, 水分质量分数为 6.28%, 淀粉 74.41%, 脂肪 9.98%, 蛋白质 6.28% (干基); 面筋粉: 新良面粉有限责任公司; 猪胰腺 α -淀粉酶 (20 000 U/mL): 上海源叶生物科技有限公司; 葡萄糖苷酶 (100 000 U/mL): 上海麦克林生化科技股份有限公司; NaOH、HCl、浓硫酸、葡萄糖、无水乙醇、乙酸、3,5-二硝基水杨酸 (DNS)、乙酸钠、乙酸铅、石油醚、硫酸钠 (均为分析纯)。

1.2 仪器与设备

JYN-YM1-A 手动压面机, 九阳股份有限公司; HMJ-A50B1 和面机, 广东小熊电器有限公司; INFINITE E PLEX 多功能酶标仪, 奥地利帝肯有限公司; TMS-PRO 质构仪, 美国 FTC 公司; RVA 4500 快速粘度分析仪, 澳大利亚 PERTEN 公司; F16502 扫描电镜 (表面微观测试仪), 荷兰 PHENOM 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理和面条的制备

使用电动粉碎机将穆子粉粉碎后过筛 (60 目), 以穆子粉与小麦粉的混合粉质量为基准, 控制穆子粉的添加量, 配置成不同质量分数的小麦-穆子混合粉, 分别为 0%、10%、20%、30%、40% 和 50%, 依次命名为 CX0、CX10、CX20、CX30、CX40 和 CX50, 密封保存。

取 400 g 含有小麦-穆子混合粉, 并以此为基准加入质量分数分别为 47% 的水, 2% 的面筋粉, 2% 的食盐, 和面 15 min 后, 将面团放入醒发室中, 设置湿度为 85%, 温度 25 °C, 醒发 20 min, 之后将面团反复压片至表面光滑, 再通过压宽面组件得到 4 mm 宽、1.5 mm 厚的面条。参照 GB/T 40636-2021《挂面》中水分含量的指标, 将面条置于烘箱中 40 °C 烘干, 干燥时间为 24 h, 得到水分含量 $\leq 14.5\%$ 的干面条。

1.3.2 原料基本组分的测定

取粉碎过筛后的穆子粉与小麦粉, 参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准食品中蛋白质

的测定》测定原料的蛋白质含量, 参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》测定原料的脂肪含量, 采用水分测定仪测定原料中的水分含量, 参考黄晓钰等^[13]的方法测定原料的淀粉含量。

1.3.3 小麦-糜子混合粉的淀粉糊化特性

取 3 g 过 60 目筛的面条样品粉末与 25 g 去离子水混合均匀, 参照 GB/T 24853-2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定快速黏度仪法》测定小麦-糜子混合粉的淀粉糊化特性^[14], 采用标准程序 1。将混合样品置于黏度分析仪中, 初始温度下 (50 °C 平衡 10 s, 以 160 r/min 的速度加热到 95 °C, 维持 90 s, 然后以同样的速率降温至 50 °C, 测定面团的糊化特性。RVA 特征参数采用 TCW 配套软件进行分析。

1.3.4 蒸煮品质测定

1.3.4.1 糜子面条的最佳蒸煮时间

取长度基本一致的面条 10 根, 放入盛有 50 倍样品质量的沸水烧杯中, 让水保持微沸状态, 加热 2 min 后开始取样, 每隔 30 s 取 1 根面条, 观察面条的横截面, 横截面中硬心消失时记录的时间即为最佳蒸煮时间^[15]。

1.3.4.2 糜子面条蒸煮损失率

取 30 根长度基本一致的面条, 称重后放入盛有 50 倍样品质量的沸水烧杯中, 按 1.3.4.1 的方法蒸煮到最佳蒸煮时间, 以煮沸的蒸馏水为空白对照, 取煮沸后的面汤在波长 460 nm 处检测其吸光度, 以面汤的吸光度表示面汤的浊度, 进而反映该面条的蒸煮损失^[16]。

$$X = \frac{A}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

X ——蒸煮损失率, %;

A ——面汤吸光值;

M ——干面条的质量, g。

1.3.5 糜子面条的质构分析

面条参照 1.3.3.1 的最佳蒸煮时间下煮制后捞出, 用厨房纸吸干表面水分备用。采用质构仪对面条的质构进行分析。选用 P35 探头, 测试参数为测试前、中、后速度均为 1.00 mm/s, 应变位移为 70%, 时间间隔为 1.00 s, 感应力为 5.00 g。每次将 1 根面条水平放置于载物台上, 对每个试样做 6~8 次平行试验。

1.3.6 糜子面条的感官评价

参考张艳等^[17]的评分方法制定糜子面条感官评分标准, 如表 1 所示。面条煮熟后, 由 10 名具有一定感官评价经验的人员对 6 个样品进行评分, 去掉每项的最高分与最低分, 以平均分作为最终得分。

表 1 糜子面条感官评定指标及标准

Table 1 Sensory evaluation indicators and standards for finger millet noodles

评分指标	评分标准	分值
色泽 (10)	色泽均匀、无斑驳	8.5~10
	色泽较均匀	6~8.4
	色泽不均, 斑驳	1~6
外观状态 (10)	表面结构细密、光滑	8.5~10
	中间等级	6~8.4
	表面粗糙、膨胀、变形严重	1~6
适口性 (20)	适中得分	17~20
	稍偏硬或软	12~17
	硬或太软	1~12
韧性 (25)	有咬劲、富有弹性	21~25
	弹性一般	15~21
	咬劲差、弹性不足	1~15
光滑性 (10)	光滑	8.5~10
	中间	6~8.4
	光滑程度差	1~6
食味 (25)	具糜子清香	21~25
	基本无异味	15~21
	有异味	1~15

1.3.7 糜子面条微观结构观察

取 1.3.1 中得到的 6 个不同质量分数的糜子面条样品, 粉碎后过 60 目筛, 参照文献^[18]的方法, 使用扫描电子显微镜观察样品的表面微观结构。

1.3.8 糜子面条淀粉体外消化特性

根据施建斌等^[19]和 Ye 等^[20]的方法作一定修改。在 50 mL 离心管中加入 0.5 g 煮熟的糜子面条和 20 mL 乙酸钠缓冲液 (0.2 mol/L, pH 值 5.5) 混合均匀, 再加入 6 mL 的猪胰腺 α -淀粉酶 (250 U/mL) 和淀粉葡萄糖苷酶 (260 U/mL) 混合酶液, 于 37 °C 下恒温水浴振荡, 分别在 0、20、40、60、90、120、180 min 时取 2 mL 消化液在沸水浴 10 min 进行灭酶处理, 冷却后离心取上清液稀释至合适浓度, 采用 DNS 比色法测定消化液中葡萄糖含量并计算淀粉水解率, 不同时间下淀粉水解葡萄糖含量记为

G_0 、 G_{20} 、 G_{60} 、 G_{90} 、 G_{120} 、 G_{180} 。其中，快速消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉的质量分数按照下面公式计算，样品的总淀粉（Total Starch, TS）质量分数根据原料的淀粉质量分数计算得到。

$$F = \frac{G_{20} - G_0}{B} \times 100\% \quad (2)$$

$$S = \frac{G_{120} - G_{20}}{B} \times 100\% \quad (3)$$

$$C = \frac{B - F - S}{B} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

F —RDS，快速消化淀粉，%；

S —SDS，慢消化淀粉，%；

C —抗性淀粉（RS），%；

B —总淀粉质量分数（TS），%。

淀粉的体外消化水解曲线遵循一级反应方程式，通过对样品和参考食品（白面包）淀粉水解曲线下面积的积分得到淀粉水解指数，根据淀粉水解指数预估穆子面条血糖生成指数，具体计算公式如下，

$$D = \frac{AUC_1}{AUC_0} \times 100 \quad (5)$$

$$E = 39.71 + 0.549 \times D \quad (6)$$

式中：

D —淀粉水解指数（HI）；

AUC_1 —样品淀粉水解曲线下面积；

AUC_0 —白面包淀粉水解曲线下面积；

E —血糖生成指数（eGI）。

1.3.9 数据处理

每组试验均重复3次，结果用平均值±标准差表示，采用Excel或Origin 2019对所得数据进行作图处理。采用SPSS 16.0进行显著性（ $P < 0.05$ ）差异分析。

2 结果与分析

2.1 穆子粉质量分数对混合粉糊化特性的影响

由表2可知，随着穆子粉质量分数的增加，混合粉糊化加热时，其峰值粘度、崩解值、最终黏度、峰值时间和糊化温度逐渐降低，与添加了藜麦粉的混合粉^[21]呈现一样的趋势。当穆子粉的质量分数为50%时，峰值黏度从1 881.33/cP降至1 509.67/cP，同比降低19.76%，表明穆子粉能够抑制淀粉颗粒糊化膨胀，提升体系在剪切条件下的热稳定^[22]。崩解值从592.33/cP降至454.33/cP，降低了23.30%；回生值无明显变化（ $P > 0.05$ ），表明穆子粉的对面团制品的回生速率以及老化无显著影响^[21]。穆子粉的加入使混合粉的峰值时间和糊化温度降低，表明穆子粉质量分数越大，混合粉越容易糊化^[23]。

2.2 穆子粉质量分数对面条质构特性的影响

由表3可知，随着穆子粉质量分数增加，面条的硬度、胶粘性、咀嚼性均增大；穆子粉质量分数为40%时，其面条的硬度、胶黏性和咀嚼性达到最大值，分别为21.54 N、11.47 N、10.55 mj。但穆子粉加入量为50%时，其硬度、胶粘性和咀嚼性均下降。咀嚼性随穆子粉添加量先增大后减小，施建斌等研究的荞麦面条也得到了类似的结果^[19]，可能的原因是穆子粉质量分数占比太高，面团难以成形，使得面条硬度下降，该结果与穆子-小麦混粉糊化性质的影响结果一致^[23]。比未添加的穆子粉面条相比，穆籽面条的弹性均显著降低（ $P < 0.05$ ），可能原因是穆子粉的醇溶蛋白含量比小麦粉的低^[5]，穆子粉质量分数的增加会导致面条的面筋蛋白含量降低，造成面条内部筋力不断减弱，从而使弹性下降^[24]。

表2 穆子粉质量分数对混合粉糊化特性的影响

Table 2 Effect of finger millet powder content on gelatinization properties of powder mix

样品	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	崩解值/cP	最终粘度/cP	回生值/cP	峰值时间/min	糊化温度/℃
CX0	1 881.33+49.66 ^a	1 289.00+33.00 ^a	592.33+18.82 ^a	2 428.67+65.25 ^a	1 139.67+33.50 ^a	6.05+0.04 ^a	87.50+0.48 ^a
CX10	1 780.00+4.24 ^b	1 194.00+9.90 ^b	586.00+5.66 ^a	2 332.50+2.12 ^{ab}	1 138.50+7.78 ^a	5.93+0.00 ^{ab}	87.18+0.04 ^a
CX20	1 705.33+22.59 ^b	1 143.67+34.08 ^{bc}	561.67+26.50 ^a	2 277.00+43.92 ^{bc}	1 133.33+10.21 ^a	5.85+0.04 ^{bc}	86.40+0.00 ^b
CX30	1 594.67+76.83 ^c	1 086.00+52.16 ^{cd}	508.67+25.11 ^b	2 229.33+71.18 ^{bc}	1 143.33+19.22 ^a	5.73+0.07 ^c	86.10+0.43 ^b
CX40	1 552.33+55.14 ^c	1 071.67+45.32 ^{cd}	480.67+9.81 ^{cd}	2 215.67+61.91 ^c	1 144.00+16.82 ^a	5.73+0.12 ^c	85.27+0.45 ^c
CX50	1 509.67+50.05 ^c	1 055.33+32.87 ^d	454.33+20.50 ^d	2 193.67+46.82 ^c	1 138.33+14.64 ^a	5.76+0.08 ^c	85.03+0.49 ^c

注：同列不同的小写字母表示具有显著差异（ $P < 0.05$ ）。下表同。

表 3 穆子粉质量分数对面条质构特性的影响

Table 3 Effect of finger millet powder content on textural properties of noodles

样品	硬度/N	弹性/mm	胶粘性/N	咀嚼性/mj
CX0	17.96 ± 0.82 ^c	1.11 ± 0.10 ^a	9.22 ± 1.18 ^b	10.40 ± 0.80 ^a
CX10	10.79 ± 0.46 ^c	0.94 ± 0.12 ^{bc}	5.68 ± 1.18 ^d	5.04 ± 0.64 ^d
CX20	15.69 ± 0.27 ^d	1.01 ± 0.15 ^b	7.62 ± 1.36 ^c	7.38 ± 0.40 ^c
CX30	18.07 ± 0.65 ^c	0.93 ± 0.04 ^{bc}	9.61 ± 0.94 ^b	8.96 ± 0.53 ^b
CX40	21.54 ± 0.98 ^a	0.88 ± 0.07 ^{cd}	11.47 ± 0.40 ^a	10.55 ± 0.50 ^a
CX50	19.25 ± 0.19 ^b	0.81 ± 0.07 ^d	10.96 ± 0.84 ^a	8.76 ± 0.48 ^b

2.3 穆子粉质量分数对面条蒸煮特性的影响

面条与热水长时接触使面条最外层结构中的淀粉颗粒、可溶性膳食纤维等物质溶出，蒸煮损失升高^[3]。由表 4 可知，面条的蒸煮损失率与穆子粉添加量成正比，与添加了藜麦的面条有类似结果^[25]。随着穆子粉的添加，蒸煮损失率增大，从 0.86% 增加到 2.41% ($P < 0.05$)，主要原因是穆子粉中含有的膳食纤维含量比小麦粉的高^[5]，随着穆子粉的添加，面条含有的膳食纤维增加，煮制时溶出的可溶性膳食纤维增加，面汤浑浊度也随之增大。

表 4 穆子粉质量分数对面条蒸煮品质和感官评分的影响

Table 4 Effect of finger millet powder content on noodle quality

样品	蒸煮损失率/%	感官评分
CX0	0.86 ± 0.01 ^d	80.86 ± 2.91 ^{ab}
CX10	0.90 ± 0.01 ^d	76.44 ± 4.72 ^b
CX20	1.19 ± 0.04 ^c	78.14 ± 4.85 ^{ab}
CX30	1.49 ± 0.03 ^b	80.29 ± 2.93 ^{ab}
CX40	2.39 ± 0.06 ^a	82.11 ± 2.57 ^a
CX50	2.41 ± 0.04 ^a	77.20 ± 6.48 ^{ab}

2.4 穆子粉质量分数对面条感官评分的影响

穆子粉对面条感官评分的影响如表 4 所示。随着穆子粉质量分数的增加，穆子粉面条风味逐渐增强，面条的感官评分先增大后减小，但趋势不显著 ($P < 0.05$)，在穆子粉质量分数为 40% 时有最高感官评分 82.11 分，质量分数为 50% 时评分降低至 77.20 分，低于未添加组 80.86 分。面条煮后的硬度、弹性和咀嚼度是影响面条品质的重要指标，综合考虑面条的硬度、弹性和咀嚼度，该结果与面条质构的影响结果一致。

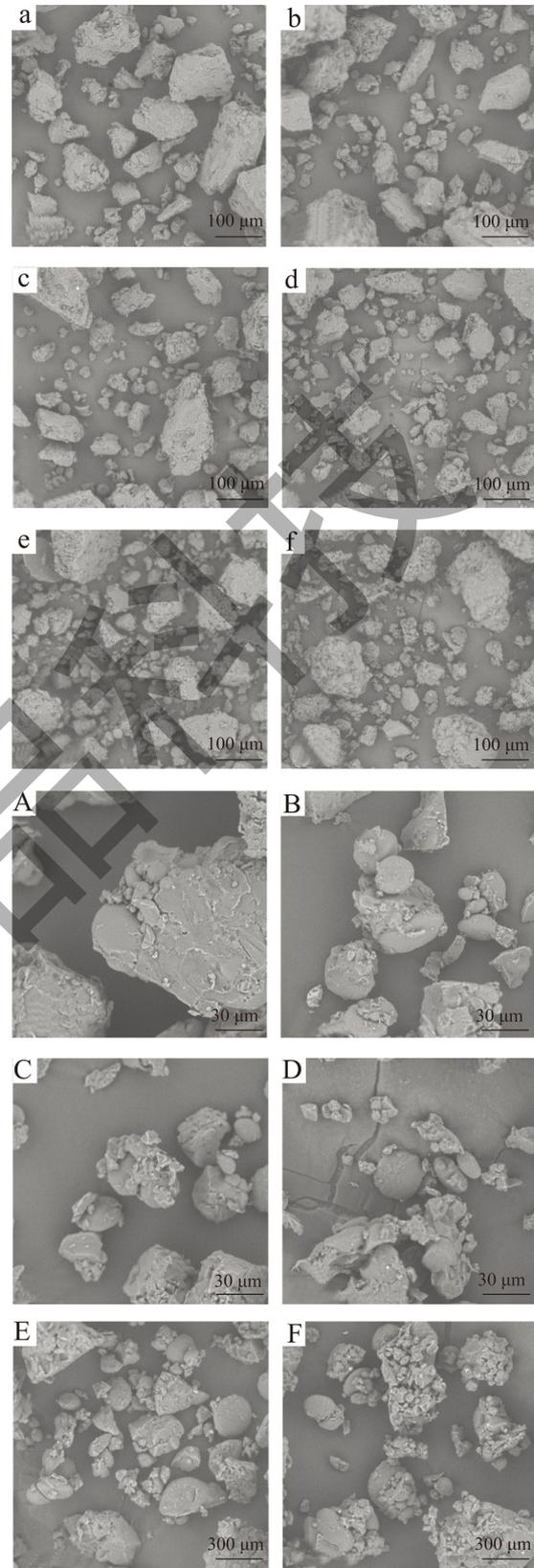


图 1 穆子面条颗粒的 SEM 图

Fig.1 SEM diagram of finger millet noodle particles

注：A、a：CX0；B、b：CX10；C、c：CX20；D、d：CX30；E、e：CX40；F、f：CX50。其中图 a~f 放大倍数为 ×500，图 A~F 放大倍数为 ×2 000。

表 5 面条淀粉体外消化特性

Table 5 *In vitro* digestion characteristics of noodle starch

样品	淀粉质量分数 /%	RDS/%	SDS/%	RS/%	eGI
CX0	71.86	24.80 ± 0.39 ^c	37.59 ± 1.63 ^{ab}	36.34 ± 0.23 ^a	83.00 ± 1.24 ^d
CX10	72.73	27.68 ± 1.40 ^c	42.16 ± 3.39 ^a	34.16 ± 1.26 ^{ab}	86.55 ± 0.71 ^c
CX20	73.59	34.79 ± 2.68 ^b	31.21 ± 2.26 ^c	31.48 ± 3.14 ^{bc}	88.82 ± 1.15 ^{cd}
CX30	74.45	35.64 ± 1.93 ^b	34.41 ± 1.34 ^{bc}	29.20 ± 1.36 ^{cd}	93.12 ± 0.12 ^b
CX40	75.31	37.51 ± 1.29 ^b	35.44 ± 0.12 ^{bc}	27.05 ± 1.41 ^d	94.97 ± 2.02 ^{ab}
CX50	76.18	49.42 ± 2.25 ^a	30.94 ± 1.27 ^c	22.66 ± 0.80 ^e	97.81 ± 1.93 ^a

2.5 穆子粉质量分数对面条微观结构的影响

图 1 为不同质量分数的穆子面条粉碎后的扫描电镜图。由图 1 可以看出，未添加穆子粉的样品 (CX0)，面筋的网络结构连续性比较好，淀粉颗粒充当填充物被包裹于蛋白质网络结构中。随着穆子粉质量分数的增加，游离于网络结构外的淀粉颗粒越来越多，尤其是穆子粉添加量在 50% 时，面筋网络结构较散乱，淀粉颗粒之间缝隙较大，连接不紧密。这是由于穆子粉含有的蛋白质含量比小麦粉少，随着穆子粉的添加，面团中的面筋蛋白被稀释，蛋白质之间的相互作用力减小；另一方面，穆子粉的加入破坏了面筋蛋白的片层网络结构^[26]。

2.6 穆子粉对面条淀粉体外消化特性的影响

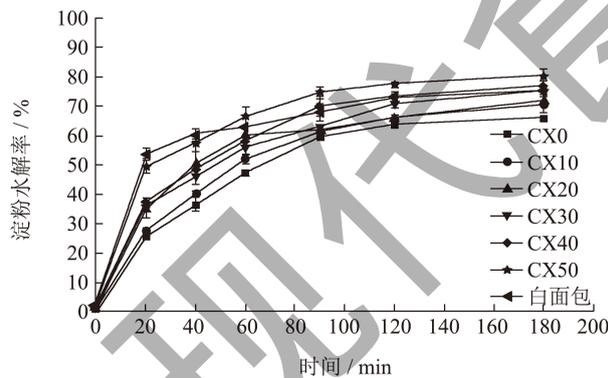


图 2 不同面条及参照食品 (白面包) 的淀粉水解曲线

Fig.2 Starch hydrolysis curves of noodles and the reference food (white bread)

从图 2 可以看出，面条中淀粉水解主要发生在前 90 min，消化终点时，小麦面条和不同质量分数 (从小到大) 穆子面条的淀粉水解率分别是 65.95%、70.48%、72.13%、74.71%、77.19%、80.33%，随着穆子粉质量分数的增加，面条消化终点的淀粉水解率逐渐增大。

由表 5 得知，随着穆子粉质量分数的增加，面

条的抗性淀粉质量分数逐渐减少，添加了 50% 穆子粉的面条抗性淀粉质量分数为 22.66%，比小麦面条的减少 13.68%。随着穆子粉质量分数的增加，面条的血糖生成指数从 83.00 升至 97.81，表明穆子粉面条更易促进餐后血糖的上升。RS 以及 eGI 的变化趋势与添加了穆子粉的小麦面包^[27]和穆子米粉^[28]的体外消化特性结果不一致，与其他添加了杂粮粉如荞麦粉、藜麦粉的面条消化性结果也不一致^[19,21]。根据面条的微观结构分析结果，穆子粉的添加稀释了小麦面筋蛋白，进而抑制面筋网络结构的形成，未被包裹的淀粉颗粒增加，导致酶与底物的接触面积增大，提高了酶解效率，因此添加了穆子粉的面条更易消化。

3 结论

穆子粉的添加对小麦粉的糊化特性及其面条的蒸煮特性、质构特性、感官评分、微观结构和淀粉体外消化特性有不同程度的影响。混合粉的峰值粘度、谷值粘度和糊化温度与穆子粉的添加量成反比，当穆子粉添加至 50% 时，此时混合粉的峰值粘度从 1 881.33/cP 降至 1 509.67/cP，谷值黏度从 1 289.00/cP 降至 1 055.33/cP，糊化温度从 87.50 °C 降至 85.03 °C，回生值无显著变化 ($P > 0.05$)。在蒸煮特性上，穆子粉添加至 40% 时，感官评分最高为 82.11 分，蒸煮损失率为 2.41%。穆子粉质量分数为 40% 时，面条有最大硬度 21.54 N，最大胶粘性 11.47 N，最大咀嚼性 10.55 mj，弹性为 0.88 mm，此时面条品质较佳。随着穆子粉添加量的增加，面条中的面筋蛋白含量减少，未被包埋的淀粉颗粒增加。面条的抗性淀粉含量与穆子粉添加量成反比，与血糖生成指数成正比。当穆子粉添加量为 50% 时，面条的抗性淀粉含量从 36.34% 降为 22.66%，血糖生成指数从 83.00 升为 97.81，表明穆子粉的添加会

提高面条的消化性。鉴于本研究所制杂粮面条消化率较高,更适合消化能力较差的人群。本研究为后续糜子粉与杂粮面条的进一步开发提供一定的参考价值。

参考文献

- [1] 宋佳阳,王婧萱,李新宸,等.冻结模式对冷冻熟制鹰嘴豆杂粮面条品质的影响[J].食品研究与开发,2023,44(16):53-58.
- [2] 侯惠花,刘瑞,孙元琳,等.基于响应面分析优化荞麦面条制备工艺[J].食品研究与开发,2022,43(2):63-70.
- [3] 张林华,张红玉,谢凯文,等.探究后处理工艺对藜麦挤压面条品质的影响[J].中国粮油学报,2023,8(25):1-12.
- [4] 池福敏,幸塔,辜雪冬,等.西藏察隅龙爪稷营养成分、重金属含量与农药残留分析[J].食品与发酵工业,2015,41(5):187-191.
- [5] 李基光,王艳兰,汤睿.湖南糜子创新利用与发展前景[J].安徽农业科学,2018,46(30):66-67.
- [6] 王双辉,陈致印,谢晶,等.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.
- [7] DISSANAYAKE B. Development of a method for manufacturing noodles from finger millet [J]. Procedia Food Science, 2016, 6: 293-297.
- [8] CALVIN O, KARENIA S L, KIBET L, et al. Utilisation of amaranth and finger millet as ingredients in wheat dough and bread for increased agro-food biodiversity [J]. Foods, 2022, 11(7): 911.
- [9] REKHA S, BINDU S. Use of finger millet in cookies and their sensory and nutritional evaluation [J]. Asian Journal of Dairy and Food Research, 2017, 36(3): 264-266.
- [10] 黄素雅,钱炳俊,邓云.膳食纤维功能的研究进展[J].食品工业,2016,37(1):273-277.
- [11] 徐蒙蒙.糜子麸皮多酚提取及应用研究[D].舟山:浙江海洋大学,2023.
- [12] THOMPSON L U. Potential health benefits and problems associated with antinutrients in foods[J]. Food Research International, 1993, 26(2): 131-149.
- [13] 黄晓钰,刘邻渭.食品化学综合实验[M].北京:中国农业出版社,2002:153-155.
- [14] GB/T 24853-2010,小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定快速粘度仪法[S].
- [15] 张丰娥.福建4种薏苡面条加工品质分析[J].现代食品,2023,29(1):81-87.
- [16] 许彦腾,张建新,宋真真,等.豆渣膳食纤维面条制作工艺的优化[J].西北农业学报,2015,24(11):157-164.
- [17] 张艳,阎俊,王德森,等.中国面条的标准化实验室制作与评分方法研究[J].麦类作物学报,2007,1:158-165.
- [18] LI M Y, AN F K, LUO H L, et al. Physicochemical properties and digestion characteristics of acylated arenga pinnata starches [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(4): 301-315.
- [19] 施建斌,隋勇,蔡沙,等.荞麦面条配方优化及其体外消化特性[J].食品研究与开发,2023,44(10):153-161.
- [20] YE J, HU X, LUO S et al. Effect of endogenous proteins and lipids on starch digestibility in rice flour [J]. Food Research International, 2018, 106: 404-409.
- [21] 王庆卫,刘启玲.藜麦粉对面条品质以及体外消化特性的影响[J].粮食与油脂,2021,34(1):31-34.
- [22] 刘德志,武云娇,王一飞,等.抗性糊精对面粉流变特性及糊化凝胶的影响[J].包装工程,2023,44(1):253-258.
- [23] 曹蒙,王雪菲,柳诚刚,等.葛根粉对面条质构和蒸煮品质的影响及葛根面条配方优化[J].中国食品添加剂,2023,34(7):149-158.
- [24] 孙粮,孙君庚,王充,等.香菇粉对面粉和面条品质的影响[J].食品工业,2021,42(4):239-242.
- [25] 马永革,邓瑞强,王瑞萍,等.藜麦杂粮面条配方与工艺[J].农业科技与信息,2019,23:47-49,52.
- [26] 张剑,王亚运,胡广甫,等.玉米粉对面条的蛋白质二级结构及微观结构的影响[J].粮食与饲料工业,2017,6:14-18.
- [27] 肖攀飞,谢华,陶笑寒,等.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[J].食品与机械,2022,38(5):12-18.
- [28] 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.