

马铃薯淀粉添加量对混合粉面团特性及发酵面条消化性的影响

李丽¹, 王慧莹¹, 闫含¹, 巩发永², 马涛¹, 李静², 颜朗², 杨立娜^{1*}

(¹渤海大学食品科学与工程学院 辽宁锦州 121013

²攀西特色作物研究与利用四川省重点实验室 西昌学院 四川西昌 615000)

摘要 为促进马铃薯主食化战略,本文通过添加不同含量的马铃薯淀粉,对面团特性及发酵面条的蒸煮特性、质构特性及消化特性等指标进行测定,探究马铃薯淀粉添加量对其的影响。结果显示:随着马铃薯淀粉添加量的增加(0%~55%),混合粉的糊化起始温度降低,热焓值增加,终止温度无明显变化;混合粉面团的吸水率、形成时间和稳定时间均呈下降趋势,使得发酵面条的硬度、弹性和咀嚼性均显著下降($P<0.05$)。模拟淀粉体外消化发现淀粉水解速率随马铃薯淀粉添加量的增加而升高,与对照组相比,添加马铃薯淀粉后血糖生成指数预测值显著降低($P<0.05$)。结论:马铃薯淀粉添加量为 45%时,混合粉面团及发酵面条的糊化、质构特性和消化特性较好。

关键词 马铃薯淀粉; 发酵面条; 面团特性; 质构特性; 消化特性

文章编号 1009-7848(2024)03-0162-10 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.03.016

面条是亚洲国家的主食之一,易于烹饪、咀嚼,营养丰富,美味可口^[1-2]。传统面条通常由小麦粉、水和盐混合后,经过和面、压片和切割制成^[3]。如今消费者对面条产品的要求不再仅限于它的便捷性、口感及风味,对其营养健康方面也有更深层次追求。为改善面条类产品的营养、感官和工艺特性,发酵被应用于面条的工艺制作中^[4]。近年来,对发酵型面条工艺的研究,大致可分为发酵型鲜面和挂面。国内外对发酵型鲜面条的研究主要集中在各类杂粮面条及采用酸面团工艺制作的意大利面的发酵风味上^[5-6]。Fois 等^[5]研究发现采用小麦粉制作的酸面团意大利面的抗氧化活性和接受度有明显提高,面条的营养特性得到极大提升。

马铃薯中营养成分组成均衡,优于谷类蛋白质^[7-8]。马铃薯淀粉颗粒较大,具有良好的糊化、流变及质构特性等^[9-10]。大量研究已确定各类马铃薯淀粉的物理化学性质^[11-15]。小麦粉面条被证实会导致餐后血糖的快速增加,随着时间的推移相关饮食类疾病的风险也会上升^[16-17]。将马铃薯淀粉加入小麦粉中制备面条,可以提高其营养和功能品质,

降低面筋的过敏原及患病风险。Sandhu 等^[18]研究马铃薯淀粉和小米淀粉及其混合淀粉的理化、糊化、凝胶结构特性与面条性能,发现混合后的马铃薯淀粉具有较高的硬度、黏结性和咀嚼性,表现出较高的煮熟质量和蒸煮损失,感官评分较高。Pu 等^[19]发现马铃薯粉替代小麦粉后,吸水率和蛋白弱化值增加,其硬度、蒸煮率和最佳蒸煮时间差异较大,通过环境扫描电子显微镜观察,添加马铃薯淀粉会影响面条微的观结构。鲍欢等^[20]发现在小麦粉中添加马铃薯粉制作面条,其消化性会随马铃薯粉的增加而下降。张子睿^[21]通过葡萄籽原花青素抑制淀粉消化酶的活性来降低马铃薯馒头的 GI 值。

面筋蛋白对面条质量至关重要^[22]。传统小麦面团体系中,面筋充当骨架,小麦淀粉作为填料,若用马铃薯淀粉替代小麦粉,必然会改变蛋白质含量和品质,从而达到改变面团品质的目的。目前已有对马铃薯淀粉在面条及混合粉面团中流变学特性方面的研究,而马铃薯淀粉添加量对面团特性的影响研究较少。本研究探究马铃薯淀粉和小麦粉制备面团的特性及发酵面条的品质,并结合熟制面条的消化特性,分析不同马铃薯淀粉添加量制备的面团和面条的性质,为马铃薯淀粉的应用及相关产品的开发提供参考。

收稿日期: 2023-03-08

基金项目: 辽宁省农村科技特派行动计划项目(2023JH5/10400023)

第一作者: 李丽,女,硕士生

通信作者: 杨立娜 E-mail: yangln10@lzu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦粉,五得利面粉集团;食用马铃薯淀粉,成都达恒毛实业有限公司;酵母粉、食用盐,锦州万维超市; α -淀粉酶、淀粉葡萄糖苷酶、胰蛋白酶,上海源叶生物有限公司;酒石酸钾钠等其它化学试剂为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

TA-XT plus 质构仪,英国 SMS 公司;WFX-12 醒发箱,广东华兴公司;Mixolab 2 混合试验仪,法国肖邦技术公司;Q2000 差示扫描量热仪,美国 TA;恒温摇床,常州市凯航仪器有限公司;UV/VIS-2550 分光光度计,日本岛津公司。

1.3 马铃薯淀粉-小麦发酵面条的制作配方及工艺流程

将酵母(0.8%)完全溶解至纯净水中,置于 35 ℃ 备用。称取小麦粉、马铃薯淀粉(添加量为 0%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%), 水的添加量是混合粉质量的 45%, 食盐为 1.5%, 将混合粉和酵母水倒入和面机中和面 10 min, 37 ℃ 发酵 30 min, 在辊距为 4.0 mm 处复合压延 4 次, 随后反复压片直至面片厚度达 1 mm 左右时, 切条后置于醒发箱内, 首先在 38 ℃, 湿度 85% 下干燥 3 h; 其次 38 ℃, 湿度 65% 干燥 10 h, 最后 25 ℃ 的鼓风烘箱中干燥 4 h 后备用。

1.4 马铃薯淀粉-小麦混合粉面团特性

1.4.1 热力学特性 参照 Xue 等^[23]方法测定面团热力学特性。称取发酵后的面团 8 mg 后放入坩埚加盖密封, 由室温以 5 ℃/min 降至 -40 ℃, 保温 5 min, 再由 5 ℃/min 升至 40 ℃, 以密封的空坩埚为对照, 记录样品结晶时的焓变和温度变化。

1.4.2 Mixolab 混合实验仪 参考 AACC 54-60.01 方法并改进^[24]。采用 Chopin+ 实验协议, 水合后面团质量 75 g, 目标扭矩(C1)(1.1±0.05)Nm, 揉混速率为 80 r/min, 水箱温度 30 ℃。试验共 3 个阶段: 1) 面团的形成和淀粉的预糊化阶段, 30 ℃, 8 min; 2) 淀粉糊化与淀粉的崩解, 以 4 ℃/min 升至 90 ℃, 持续 7 min; 3) 淀粉老化, 4 ℃/min 降至 50 ℃, 持续 5 min。

1.5 马铃薯淀粉添加量对发酵面条品质的影响

1.5.1 蒸煮特性 称取 10 g 面条, 放入 500 mL 煮沸的去离子水中煮 7 min。煮好的面条捞出用去离子水冲洗后吸干表面水分并称重。煮面水、冲洗水定容 500 mL 后取 100 mL 至烧杯中, 加热烧杯使烧杯中大部分水蒸发, 转移至烘箱中烘干至恒重。

$$\text{断条率}(\%) = \frac{\text{断条数}}{\text{面条总数}} \times 100$$

$$\text{吸水率}(\%) = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100$$

$$\text{蒸煮损失率}(\%) = \frac{M_0 - M_2}{M_0} \times 100$$

注: M ——生鲜面条质量, g; M_0 ——面条干重, g; M_1 ——煮后面条湿重, g; M_2 ——煮后面条干重, g。

1.5.2 质构特性 选用 HDP/PFS 型探针, 测前速度 2 mm/s, 测中 0.8 mm/s, 测后 0.8 mm/s, 触发力 Auto-10.0 g, 压缩程度 75%, 两次压缩时间间隔 5 s, 每个样品测 6 次。

1.5.3 感官评价 感官评价小组由经过培训的 15 名研究生组成, 评分细则参照 LS/T 3202-1993 (见表 1)。

表 1 面条感官评定评分标准

Table 1 Sensory evaluation scoring criteria for noodles

项目	满分	评分标准
外观	颜色	10 白色(8~10); 奶白色、淡黄色(6~8); 黄色发灰或其它色(1~6)
	光泽	10 光亮(8~10); 一般(6~8); 暗沉(1~6)
口感	光滑性	10 光滑(8~10); 较光滑(6~8); 粗糙(1~6)
	黏性	20 不黏牙(15~20); 微黏牙(10~15); 黏牙(1~10)
	韧性	20 柔软、有嚼劲(15~20); 一般(10~15); 较软糯(1~10)
	硬度	20 硬度大(15~20); 一般(10~15); 较烂(1~10)
	食味	10 麦香味(8~10); 一般(6~8); 无麦香味(1~6)

1.6 马铃薯淀粉添加量对发酵面条消化特性的影响

1.6.1 快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS) 参照 Englyst 等^[25]方法作略微改动。准确称取 (1.5±0.05)g 发酵面条样品置于离心管中,加入胃蛋白酶溶液(2 500 U/mL,5 mL),37 ℃下恒温振荡(200 r/min,30 min)后加入 NaOH 溶液(0.01 mol/L,5 mL),磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L,pH 6.8,15 mL), α -淀粉酶溶液(250 U/mL,5 mL),淀粉葡萄糖苷酶溶液(3 000 U/mL,0.1 mL)和胰蛋白酶溶液(1 mg/mL,1.0 mL),随后开始振荡(37 ℃,180 r/min),在 0,20,60,90,120,150,180 min,取 1 mL 消化液后沸水浴 3 min。离心(8 000 r/min,10 min)后取上清液,DNS 法测定葡萄糖的产生量。

$$\text{RDS}(\%) = (G_{20} - G_0) \times 0.9 / \text{TS} \times 100$$

$$\text{SDS}(\%) = (G_{120} - G_{20}) \times 0.9 / \text{TS} \times 100$$

$$\text{RS}(\%) = (\text{TS} - (\text{RDS} + \text{SDS})) \times 0.9 / \text{TS}$$

式中: G_0 是水解 0 min 时产生的葡萄糖量; G_{20} 、 G_{120} 分别是 20,120 min 时产生的葡萄糖量;TS 是样品总质量;上述单位均为 mg。

1.6.2 水解速率(Hydrolysis rate, HR)

$$\text{HR} = \text{已水解葡萄糖量} \times 0.9 / \text{TS}$$

1.6.3 血糖指数预测值 (Predicted glycemic index, PGI)^[26]

$$\text{PGI} = 39.21 + 0.803 \times \text{HR}_{90}$$

1.7 数据统计分析

采用 SPSS 19.0 和 Origin 2018 统计分析软件对数据进行方差分析(以 $P < 0.05$ 为显著性检验标准)和作图,结果用平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 马铃薯淀粉-小麦混合粉面团特性

2.1.1 热力学特性 马铃薯-小麦混合粉中淀粉的糊化过程由面团的热力学特性反应。糊化起始温度(T_0)反映了样品糊化的难易程度, T_0 越小,表明水分子越容易进入到淀粉分子中^[27]。如表 2 所示,添加马铃薯淀粉后, T_0 、峰值温度(T_p)均显著下降($P < 0.05$),糊化终止温度(T_c)无显著性差异,说明小麦粉较马铃薯-小麦混合粉更难糊化。 ΔH 是糊化淀粉颗粒所需能量,淀粉含量越高,淀粉分子中打开螺旋结构所需能量就越高^[23]。随着添加量的增加, T_0 、 T_p 呈下降趋势, ΔP 显著增大($P < 0.05$),55%时 ΔH 达到最大值,40%~50%时 ΔH 无显著性差异($P < 0.05$)。这与 Xu 等^[28]的研究马铃薯淀粉对小麦粉热力学特性影响时得到的结果类似。小麦粉中富含蛋白质、脂肪等物质,而蛋白质与淀粉竞争吸水干扰淀粉吸水膨胀,进而影响淀粉的糊化^[29],导致 T_0 降低。

表 2 马铃薯淀粉-小麦混合粉面团热力学特性的影响

Table 2 Effect of potato starch-wheat mixed flour dough thermodynamic properties

马铃薯淀粉添加量/%	糊化起始温度 T_0 / $^{\circ}\text{C}$	峰值温度 T_p / $^{\circ}\text{C}$	糊化终止温度 T_c / $^{\circ}\text{C}$	热焓值 ΔH / $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$
0	-8.31 ± 0.28 ^a	-3.54 ± 0.34 ^a	-1.16 ± 0.03 ^a	4.80 ± 0.06 ^d
30	-8.85 ± 0.14 ^a	-3.92 ± 0.04 ^b	-1.15 ± 0.05 ^a	11.33 ± 0.25 ^c
35	-11.36 ± 1.02 ^{ab}	-4.28 ± 0.11 ^c	-1.13 ± 0.14 ^a	11.68 ± 0.29 ^c
40	-12.70 ± 1.05 ^{bc}	5.18 ± 0.08 ^d	-1.12 ± 0.14 ^a	14.50 ± 1.03 ^b
45	-13.17 ± 1.9 ^{bc}	-5.46 ± 0.07 ^{de}	-1.07 ± 0.02 ^a	14.69 ± 0.51 ^b
50	-13.52 ± 2.41 ^{bc}	-5.63 ± 0.26 ^c	-1.08 ± 0.05 ^a	15.11 ± 0.72 ^b
55	-15.28 ± 2.96 ^c	-6.27 ± 0.11 ^f	-1.04 ± 0.03 ^a	16.64 ± 0.41 ^a

注:同列不同小写字母表示有显著性差异($P < 0.05$)。

2.1.2 流变特性分析 由表 3 所示,马铃薯-小麦混合粉的吸水率随马铃薯淀粉添加量的增加而显著降低($P < 0.05$),混合粉面团的形成时间和稳定时间逐渐降低,与 Sarker 等^[30]研究结果一致。C1 值无显著变化。C2 值减小即混合粉面团的弱化度逐渐升高,由 (0.498±0.009) N·m 下降到 (0.334±

0.017) N·m。这是因为马铃薯淀粉的添加降低混合粉内面筋的形成,弱化蛋白质水合作用和面筋网络结构,而且混合粉中破损淀粉和膳食纤维含量也会影响吸水率^[31],纤维中羟基与水分子通过氢键相互作用结合,吸收大量水分,从而造成吸水率下降。

随着添加量的增加, (C3-C2) 值先增加再减小且在马铃薯淀粉添加量 $\geq 45\%$ 时无显著性变化 ($P < 0.05$), 说明淀粉的糊化特性较好; 淀粉的热稳定性 (C3-C4) 先升高后降低, 添加量为 45% 的面团 (C3-C4) 值明显高于其它组, 且热稳定性最弱, 说明马铃薯淀粉的添加能够降低淀粉糊化及热稳定性。添加量为 50% 时, (C3-C4) 值降低到 $(0.673 \pm 0.021) \text{N} \cdot \text{m}$, 面团热稳定性增强。回生值 (C5-C4) 先下降后上升, 0%~30% 时淀粉的回生特性减弱, 30%~55% 时 (C5-C4) 值增加, 与陈金凤等^[32] 研究结果一致, 由于直链淀粉的增加, 回生特性增强。

2.1.3 目标指数分析 混合试验是通过吸水指数、混合指数、面筋指数、黏度指数、淀粉酶指数和回生指数来评价面团特性。如图 1 所示, 马铃薯淀粉的添加使得吸水指数 (9 至 3) 降低; 混合指数下降 (2 至 1) 造成混合粉面团稳定性降低; 面筋指数 (7 至 6) 和淀粉酶指数 (7 至 5) 也出现下降的趋势; 黏度指数 (6 至 9) 升高, 这与马铃薯淀粉黏度

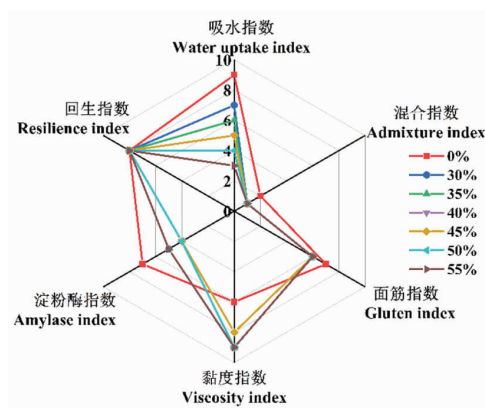


图 1 不同比例马铃薯淀粉-小麦混合粉指数剖面图
Fig.1 Profiles of potato starch-wheat blended flour index at different proportions

高于小麦淀粉黏度有关^[33]; 回生指数无变化, 与上述表 3 研究结果与推测一致。根据中式面条目标剖面图设定, 当 6 个指数均在目标剖面图中时, 可用于该类产品的研发。通过比较发现, 当马铃薯淀粉添加量为 40% 和 45% 时符合面条研发要求。

表 3 马铃薯淀粉-小麦混合粉面团流变特性的影响

Table 3 Effect of potato starch-wheat mixed flour on dough rheological properties

添加量/%	C1/Nm	C2/Nm	C3/Nm	C4/Nm	C5/Nm	吸水率/%	形成时 间/min	稳定时 间/min	(C3-C2)/ Nm	(C3-C4)/ Nm	(C5-C4)/ Nm
0	1.115 ± 0.009 ^a	0.498 ± 0.009 ^a	1.882 ± 0.001 ^c	1.720 ± 0.012 ^d	3.355 ± 0.009 ^{cd}	66.133 ± 0.115 ^a	3.073 ± 0.175 ^a	5.833 ± 0.153 ^a	1.384 ± 0.006 ^d	0.162 ± 0.015 ^d	1.635 ± 0.018 ^b
30	1.107 ± 0.019 ^a	0.453 ± 0.013 ^b	2.596 ± 0.009 ^d	1.951 ± 0.057 ^b	3.278 ± 0.067 ^d	59.933 ± 0.114 ^b	0.977 ± 0.006 ^b	3.167 ± 0.208 ^b	2.144 ± 0.019 ^d	0.645 ± 0.063 ^{bc}	1.327 ± 0.014 ^c
35	1.087 ± 0.053 ^a	0.405 ± 0.024 ^c	2.622 ± 0.027 ^{cd}	1.916 ± 0.018 ^{bc}	3.286 ± 0.052 ^d	59.267 ± 0.114 ^c	0.950 ± 0.020 ^b	2.133 ± 0.635 ^c	2.217 ± 0.005 ^c	0.706 ± 0.045 ^b	1.369 ± 0.033 ^c
40	1.095 ± 0.015 ^a	0.406 ± 0.013 ^c	2.662 ± 0.024 ^{abc}	1.8870 ± 0.023 ^c	3.301 ± 0.012 ^d	58.667 ± 0.058 ^d	0.950 ± 0.070 ^b	1.533 ± 0.289 ^d	2.256 ± 0.021 ^b	0.775 ± 0.021 ^a	1.414 ± 0.012 ^c
45	1.098 ± 0.015 ^a	0.394 ± 0.006 ^c	2.708 ± 0.015 ^a	1.923 ± 0.012 ^{bc}	3.471 ± 0.107 ^{bc}	58.200 ± 0.000 ^c	0.847 ± 0.075 ^b	1.400 ± 0.173 ^d	2.314 ± 0.020 ^a	0.785 ± 0.026 ^a	1.548 ± 0.119 ^b
50	1.099 ± 0.043 ^a	0.353 ± 0.045 ^d	2.689 ± 0.035 ^{ab}	2.0163 ± 0.032 ^a	3.573 ± 0.099 ^b	57.567 ± 0.058 ^f	0.860 ± 0.010 ^b	1.267 ± 0.058 ^d	2.336 ± 0.016 ^a	0.673 ± 0.021 ^b	1.557 ± 0.068 ^b
55	1.140 ± 0.008 ^a	0.334 ± 0.017 ^d	2.650 ± 0.045 ^{bc}	2.061 ± 0.047 ^a	3.858 ± 0.132 ^a	57.200 ± 0.200 ^g	0.667 ± 0.065 ^c	1.033 ± 0.058 ^d	2.316 ± 0.029 ^a	0.589 ± 0.036 ^c	1.797 ± 0.095 ^a

注: 同列不同字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

2.2 马铃薯淀粉添加量对发酵面条品质的影响

2.2.1 蒸煮特性 面筋蛋白的网络结构和淀粉与蛋白的结合程度相互作用影响面条的蒸煮特性^[34]。如图 2 所示, 添加马铃薯淀粉后, 面条断条率减小

且低于对照组; 在 0%~40% 范围内, 随着添加量的增加, 吸水率显著增加 ($P < 0.05$), 干物质损失率逐渐升高, 45% 时损失率下降, 随后继续升高。在 40%~50% 时, 混合粉中蛋白、淀粉含量达到较好

的比例,使得淀粉与蛋白网状结构结合紧密^[35-36],导致发酵面条中干物质损失率和断条率均稳定在5%~8%之间。因此,马铃薯淀粉的添加在一定范

围内,可以增加面条内部结构的稳定性,减少蒸煮损失。

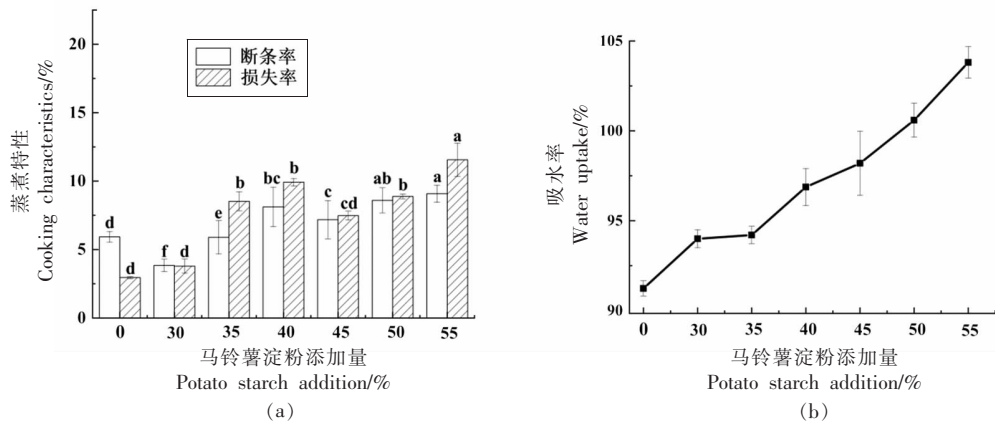


图2 不同比例马铃薯淀粉对发酵面条蒸煮特性的影响

Fig.2 Effects of different proportions of potato starch on cooking characteristics of fermented noodles

2.2.2 质构特性 质构特性可以通过感觉系统地反映食物的物理性质^[37]。如图3所示,随着添加量的增加,面条的硬度、咀嚼度、弹性、回复性和黏聚性显著降低($P<0.05$);混合粉中淀粉含量增加,蛋白质降低,形成较少面筋,造成其结构弱化,膨胀能力减弱,面团发酵后变软,体系松散,延伸性降低^[32]。添加量在0%~35%时,对面条的硬度、咀嚼度变化影响较大,弹性有微弱的减小趋势;添加量大于35%时,硬度、咀嚼度及弹性均显著下降($P<$

0.05),且所有指标在添加量最大时(55%)达到最小。黏聚性随着添加量的增加极小幅度增长后又显著下降($P<0.05$),由于面筋网络结构减弱了直链淀粉溶解,从而降低了面条的黏聚性,整体变化趋势与Pu等^[19]和陈金凤等^[32]研究结果一致。另一方面,面条的黏聚性与淀粉糊化过程中直链淀粉的溶解也高度相关^[38],马铃薯淀粉添加量增加使淀粉糊化作用降低,造成面条黏聚性下降。因此,添加量在45%时发酵面条硬度适宜,弹性较好。

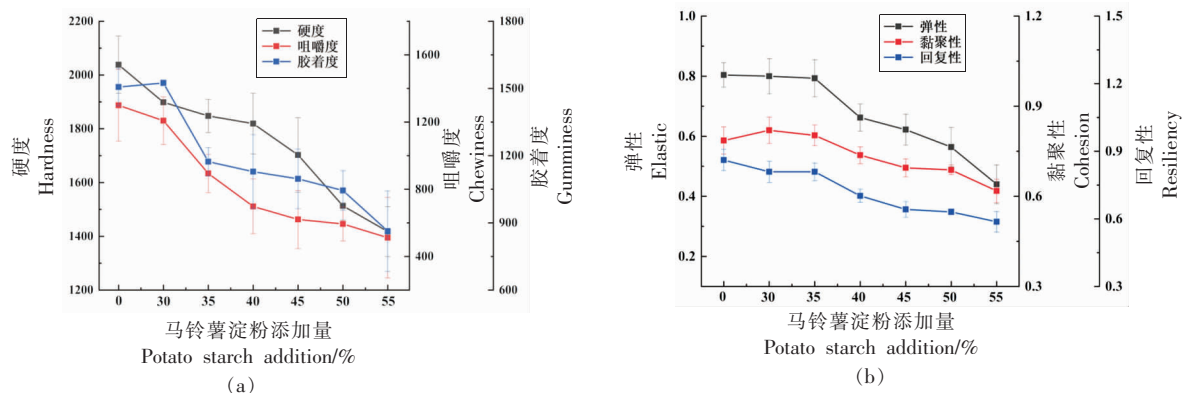


图3 不同比例马铃薯淀粉对发酵面条质构特性的影响

Fig.3 Effects of different proportions of potato starch on texture properties of fermented noodles

2.2.3 感官评价 如图4所示,15名感官评定员分别对7组发酵面条的颜色、光泽、光滑、黏性、韧性、硬度和食味进行评定。发酵面条均呈现淡黄

色,因此马铃薯淀粉的添加量对发酵面条颜色、光泽和光滑程度的影响较小。随着添加量的增加,面条黏性增加,硬度和韧性降低,弹性下降,口感显

著下降 ($P < 0.05$), 进而对食味评分造成影响。面条内部结构发酵后不均匀, 会产生明显的气孔, 添加量大于 35% 时, 面条光滑、光泽和黏性感官评分也随着添加量的增加而降低。马铃薯淀粉具有较高的黏性, 与对照组相比, 添加马铃薯淀粉后硬度明显下降, 与质构测定结果一致。除小麦粉自身的香味外, 经发酵后的产品其风味也会产生一定的变化, 其食味也更加丰富。马铃薯淀粉添加量为 45% 的发酵面条滋味可口、感官评分最高。

2.3 马铃薯淀粉-小麦混合粉发酵面条体外淀粉消化特性分析

2.3.1 发酵面条 RDS、SDS 和 RS 分析 马铃薯淀粉添加量对发酵面条 RDS、SDS 和 RS 的影响如图 5 所示, RDS 的消化率随添加量的增加而增加, 当添加量大于 40% 时, 消化率趋于稳定; SDS 消化率呈先减小再缓慢增加的趋势, 整体无显著变化 ($P < 0.05$); RS 消化率随添加量的增加而减少。这与 Dhital 等^[39]研究结果一致, 淀粉消化率与直链淀粉含量成正比, 当马铃薯淀粉添加量的增加, 一方面促进了酶反应底物的含量, 另一方面膳食纤维和蛋白可以将淀粉包裹, 进而影响酶与淀粉的结合, 混合粉中膳食纤维和蛋白的含量逐渐减少, 阻碍作用也相应减少^[40], 因此 RDS 含量随之增多。综上所述, 马铃薯淀粉添加量为 40% 时, 发酵面条中淀粉是最难被消化的。

2.3.2 发酵面条淀粉 HR 值分析 在模拟消化过程中(图 6), 各发酵面条样品组在前 20 min 内 HR 值快速增长, 20~180 min 时, 增长趋势逐渐缓慢, 180 min 时达到最大值。未添加马铃薯淀粉的发酵面条 HR 值最小, 添加马铃薯淀粉后, 发酵面条的 HR 值随添加量的增加而提高。当添加量大于 40% 时, 对其 HR 值无显著性影响 ($P < 0.05$)。HR 值与 RS 和 SDS 的含量密切相关, 而 SDS 和 RS 的含量随着添加量的增加而缓慢降低, 所以发酵面条的 HR 值也逐渐趋于平缓, 与上述试验中混合试验仪测定的淀粉水解率结果一致。

2.3.3 发酵面条 PGI 值变化分析 血糖指数是人类对食物中碳水化合物相对升糖反应的指标^[41]。通过模拟淀粉在体外的消化过程来预测发酵面条的血糖指数^[42]。如图 7 所示, 与对照组相比, 添加马铃薯淀粉后 PGI 值显著降低 ($P < 0.05$); 而添加

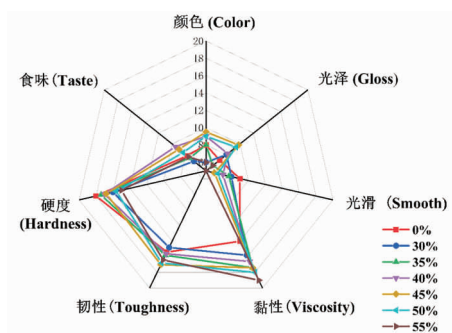


图 4 不同比例马铃薯淀粉对发酵面条感官品质的影响

Fig.4 Effects of different proportions of potato starch on sensory quality of fermented noodles

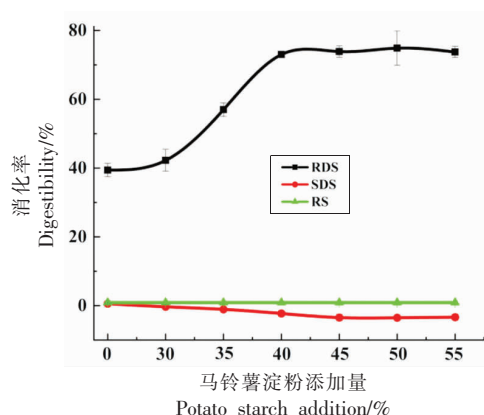


图 5 不同比例马铃薯淀粉对发酵面条 RDS、SDS 和 RS 的影响

Fig.5 Effects of different proportions of potato starch on RDS, SDS and RS of fermented noodles

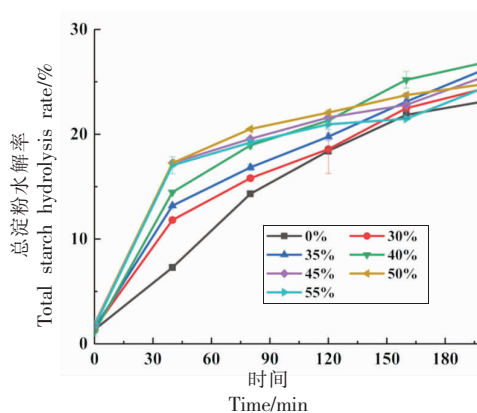


图 6 不同比例马铃薯淀粉对发酵面条总淀粉水解率的影响

Fig.6 Effects of different proportions of potato starch on the hydrolysis rate of total starch in fermented noodles

马铃薯淀粉后, 发酵面条的 PGI 值随添加量的增加小幅度降低且无显著性差异 ($P < 0.05$)。这是由

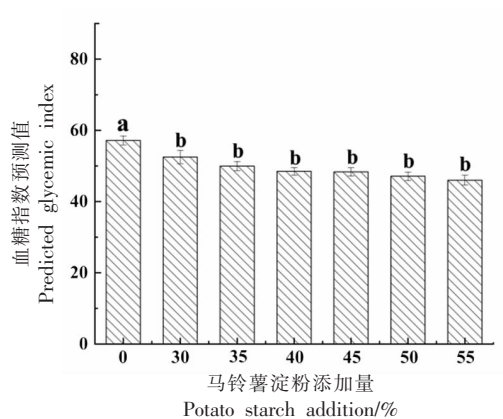


图7 不同比例马铃薯淀粉对发酵面条血糖指数预测值的影响

Fig.7 Effects of different proportions of potato starch on the predicted value of glycemic index of fermented noodles

于直链淀粉中葡萄糖之间的氢键相对于支链淀粉较多,导致淀粉分子的酶消化减少^[43],而直链淀粉含量较高导致GI值降低^[44-45]。文献报道称,马铃薯淀粉适合作为原料制备低GI食品研究结果一致^[46-47]。因此,马铃薯淀粉的添加会降低面条的PGI值。

3 结论

马铃薯淀粉的添加对发酵面条的蒸煮、质构和消化特性及面团特性均有一定影响。随着马铃薯淀粉添加量的增加, T_0 、 T_p 均呈现下降的趋势, ΔH 显著增大($P<0.05$),当添加量为55%时 ΔH 达到最大。混合试验仪结果表明,马铃薯-小麦混合粉的吸水率显著降低($P<0.05$),面团的形成时间和稳定时间均有所减少。C2值随着添加量的增加而减小即混合粉面团的弱化度逐渐升高,添加量大于45%时混合粉的淀粉糊化热稳定性降低,淀粉的糊化特性整体较好。蒸煮特性和感官特性对面条品质的影响差异显著,与对照组相比,添加马铃薯淀粉后,断条率、损失率及吸水率均显著升高($P<0.05$),马铃薯淀粉添加量为45%时,感官接受度较高。体外淀粉消化特性分析发现马铃薯淀粉添加量为40%时,发酵面条中淀粉最难被消化;添加马铃薯淀粉后,发酵面条的淀粉水解速率随着添加量的增加而提高。

参 考 文 献

- [1] AHMED I, QAZI I M, JAMAL S. Quality evaluation of noodles prepared from blending of broken rice and wheat flour[J]. *Starch-Stärke*, 2015, 67(11/12): 905-912.
- [2] KAUR A, SINGH N, KAUR S, et al. Relationship of various flour properties with noodle making characteristics among durum wheat varieties[J]. *Food Chemistry*, 2015, 188(1): 517-526.
- [3] FU B X. Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing[J]. *Food Research International*, 2008, 41(9): 888-902.
- [4] MONTEMURRO M, CODA R, RIZZELLO C G. Recent advances in the use of sourdough biotechnology in pasta making[J]. *Foods*, 2019, 8(4): 129.
- [5] FOIS S, CAMPUS M, PIU P P, et al. Fresh pasta manufactured with fermented whole wheat semolina: Physicochemical, sensorial, and nutritional properties[J]. *Foods*, 2019, 8(9): 422.
- [6] 徐一涵, 陈玉婧, 张建华. 植物乳杆菌发酵对马铃薯全粉面条品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(3): 124-130.
XU Y H, CHEN Y J, ZHANG J H. Effects of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the quality of potato noodles[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(3): 124-130.
- [7] BÁRTOVÁ V, BÁRTA J, BRABCOVÁ A, et al. Amino acid composition and nutritional value of four cultivated South American potato species[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2015, 40: 78-85.
- [8] EZEKIEL R, SINGH N, SHARMA S, et al. Beneficial phytochemicals in potato—a review[J]. *Food Research International*, 2013, 50(2): 487-496.
- [9] M CAO, Q GAO. Effects of high-voltage electric field treatment on physicochemical properties of potato starch[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2019, 13(4): 3069-3076.
- [10] ZHANG C, LIM S T, CHUNG H J. Physical modification of potato starch using mild heating and freezing with minor addition of gums [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 294-303.
- [11] DUPUIS J H, TSAO R, YADA R Y, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility

- of potato starch after inclusion with vanillic acid[J]. LWT—Food Science and Technology, 2017, 85: 218–224.
- [12] HEO H, LEE Y K, CHANG Y H. Rheological, pasting, and structural properties of potato starch by cross-linking[J]. International journal of food properties, 2017, 20(sup2): 2138–2150.
- [13] WON C, JIN Y I, CHANG D C, et al. Rheological, pasting, thermal and retrogradation properties of octenyl succinic anhydride modified potato starch[J]. Food Science and Technology, 2017, 37(2): 321–327.
- [14] VAFINA A, PROSKURINA V, VOROBIEV V, et al. Physicochemical and morphological characterization of potato starch modified by bacterial amylases for food industry applications [J]. Journal of Chemistry, 2018(3): 1–9.
- [15] XU M, SALEH A S, GONG B, et al. The effect of repeated versus continuous annealing on structural, physicochemical, and digestive properties of potato starch[J]. Food Research International, 2018, 111: 324–333.
- [16] FAN J X, GUO X N, ZHU K X. Impact of lactase-induced protein cross-linking on the *in vitro* starch digestion of black highland barley noodles[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107298.
- [17] RAUNGRUSMEE S, SHRESTHA S, SADIQ M B, et al. Influence of resistant starch, xanthan gum, inulin and defatted rice bran on the physicochemical, functional and sensory properties of low glycemic gluten-free noodles[J]. LWT—Food Science and Technology, 2020, 126: 109279.
- [18] SANDHU K S, KAUR M. Studies on noodle quality of potato and rice starches and their blends in relation to their physicochemical, pasting and gel textural properties[J]. LWT—Food Science and Technology, 2010, 43(8): 1289–1293.
- [19] PU H, WEI J, WANG L, et al. Effects of potato/wheat flours ratio on mixing properties of dough and quality of noodles[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 76: 236–242.
- [20] 鲍欢, 周家萍, 于璟琳. 乙醇干燥制备马铃薯粉及其对面条品质特性和消化性的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(5): 137–141, 150.
- BAO H, ZHOU J P, YU J L. Effect on the quality characteristics and the *in vitro* digestibility of the noodles with the ethanol drying potato flour[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(5): 137–141, 150.
- [21] 张子睿. 低 GI 马铃薯馒头的开发及其对原花青素体外释放的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- ZHANG Z R. The development of low GI potato steamed bread and its effect on the *in vitro* digestion release of procyanidins[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [22] KATYAL M, VIRDI A S, KAUR A, et al. Diversity in quality traits amongst Indian wheat varieties I: flour and protein characteristics [J]. Food chemistry, 2016, 194: 337–344.
- [23] XUE J, NGADI M. Thermal properties of batter systems formulated by combinations of different flours[J]. LWT—Food Science and Technology, 2007, 40(8): 1459–1465.
- [24] SABOVICS M, STRAUMITE E, GALOBURDA R. Assessment of the rheological properties of flour using the mixolab [C]//Proceedings of the 6th Baltic Conference on Food Science and Technology ‘Innovations for Food Science and Production’ FOOD-BALT-2011. 2011: 5–6.
- [25] ENGLYST K N, LIU S, ENGLYST H N. Nutritional characterization and measurement of dietary carbohydrates[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2007, 61(1): S19–S39.
- [26] GOÑI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index[J]. Nutrition Research, 1997, 17: 427–437.
- [27] 吴彤娇, 王玮, 白利琴, 等. 不同改良剂改善小米粉面团流变学及热力学特性的比较研究[J]. 食品科技, 2018, 43(2): 272–278.
- WU T J, WANG W, BAI L Q, et al. Compared on improving the rheological and thermodynamics properties of millet flour dough by different additives [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(2): 272–278.
- [28] XU F, LIU W, LIU Q, et al. Pasting, thermo, and Mixolab thermomechanical properties of potato starch-wheat gluten composite systems[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(5): 2279–2287.
- [29] JEKLE M, MÜHLBERGER K, BECKER T. Starch-gluten interactions during gelatinization and its functionality in dough like model systems[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 196–201.
- [30] SARKER M Z I, YAMAUCHI H, KIM S J, et al.

- A farinograph study on dough characteristics of mixtures of wheat flour and potato starches from different cultivars[J]. *Food Science and Technology Research*, 2008, 14(2): 211–216.
- [31] 王杰琼, 钱海峰, 王立, 等. 谷朮粉对高含量荞麦面团的影响及其作用机理[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(8): 140–147.
- WANG J Q, QIAN H F, WANG L, et al. Effect of wheat gluten content on buckwheat dough and its mechanism of action[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(8): 140–147.
- [32] 陈金凤, 张盛贵, 马云翔, 等. 马铃薯淀粉对低筋粉面团特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(10): 66–71.
- CHEN J F, ZHANG S G, MA Y X, et al. Effect of potato starch on properties of low-gluten dough[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(10): 66–71.
- [33] 马畅, 王小凤, 梁春艳, 等. 不同淀粉对小麦面团流变学特性及馒头品质的影响[J]. *农业科技与装备*, 2021(1): 45–48.
- MA C, WANG X F, LIANG C Y, et al. Effects of different starches on rheological properties of dough and quality of steamed bread [J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2021(1): 45–48.
- [34] 熊小青. 发酵风味挂面加工技术的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
- XIONG X Q. Study on the processing technology of dried fermented noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.
- [35] WANG R, LI M, CHEN S, et al. Effects of flour dynamic viscosity on the quality properties of buckwheat noodles[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 207: 815–823.
- [36] HU X Z, WEI Y M, WANG C, et al. Quantitative assessment of protein fractions of Chinese wheat flours and their contribution to white salted noodle quality[J]. *Food Research International*, 2007, 40(1): 1–6.
- [37] LUO L J, GUO X N, ZHU K X. Effect of steaming on the quality characteristics of frozen cooked noodles[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2015, 62(2): 1134–1140.
- [38] LI M, DHITAL S, WEI Y. Multilevel structure of wheat starch and its relationship to noodle eating qualities[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017, 16(5): 1042–1055.
- [39] DHITAL S, WARREN F J, BUTTERWORTH P J, et al. Mechanisms of starch digestion by α -amylase—Structural basis for kinetic properties[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(5): 875–892.
- [40] 闫巧珍, 高瑞雄, 邢沁浚, 等. 马铃薯-小麦粉混粉的理化性质与消化特性研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(22): 173–177.
- YAN Q Z, GAO R X, XING Q H, et al. Study on physicochemical properties and digestibility of potato and wheat flour blends[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(22): 173–177.
- [41] ADEDAYO B C, ADEBAYO A A, NWANNA E E, et al. Effect of cooking on glycemic index, antioxidant activities, α -amylase, and α -glucosidase inhibitory properties of two rice varieties[J]. *Food Science & Nutrition*, 2018, 6(8): 2301–2307.
- [42] 李明娟, 张雅媛, 游向荣, 等. 青香蕉粉饼干感官品质评价及其消化性能[J]. *食品科学*, 2015, 36(21): 68–73.
- LI M J, ZHANG Y Y, YOU X R, et al. Sensory quality evaluation and digestion properties of biscuits containing green banana powder[J]. *Food Science*, 2015, 36(21): 68–73.
- [43] LI H, GIDLEY M J, DHITAL S. High - amylose starches to bridge the ‘Fiber Gap’: development, structure, and nutritional functionality[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(2): 362–379.
- [44] CHI C, LI X, HUANG S, et al. Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 154–168.
- [45] GOEBEL J, KAUR L, COLUSSI R, et al. Microstructure of indica and japonica rice influences their starch digestibility: A study using a human digestion simulator[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 191–198.
- [46] 徐箐, 柳嘉, 林静, 等. 低GI淀粉原料的筛选及理化特性和体外消化特性的研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(20): 8–14.
- XU Q, LIU J, LIN J, et al. Screening of low glycemic index starch and study on physico-chemical and *in vitro* digestive properties[J]. *Food Re-*

search and Development, 2020, 41(20): 8-14.
[47] 马畅. 马铃薯全粉/小麦粉面团特性及馒头品质研究与改良[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2021.

MA C. Potato/wheat flour dough properties and bread quality research and improvement [D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2021.

Effect of Potato Starch Addition on the Characteristics of Blended Dough and Starch Digestibility of Fermented Noodles

Li Li¹, Wang Huiying¹, Yan Han¹, Gong Fayong², Ma Tao¹, Li Jing², Yan Lang², Yang Lina^{*}

¹College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning

²Panxi Crops Research and Utilization Key Laboratory of Sichuan Province, Xichang University, Xichang 615000, Sichuan)

Abstract In order to promote the strategy of potato staple food, this paper investigates the effect of potato starch addition on the dough characteristics, cooking, textural and digestive properties of fermented noodles by adding different levels of potato starch. The results showed that with the increase of potato starch addition (0%–55%), the gelatinization initial temperature of the mixed powder decreases, the enthalpy value increases, and the termination temperature does not change significantly. The water absorption, formation time and stabilization time of the flour mix dough all tended to decrease and the dough tended to be more of a solid material, resulting in a significant decrease in the firmness, elasticity and chewiness of the fermented noodles ($P<0.05$). By simulated *in vitro* starch digestion, the rate of starch hydrolysis was found to increase with the addition of potato starch, and the predicted value of glycemic index was significantly lower with the addition of potato starch compared to the control group ($P<0.05$). In summary, the pasting, textural and digestive characteristics of the flour dough mix and fermented noodles were better at 45% potato starch addition.

Keywords potato starch; fermented noodles; dough properties; textural properties; digestion characteristics