

添加马铃薯雪花粉对面团特性和纸杯蛋糕营养品质的影响

许丹^{1,2}, 赵宇慈^{1,2}, 曾凡逵¹, 刘刚¹

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所, 甘肃兰州 730000) (2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究了马铃薯雪花全粉 (potato flake, PF) 对面团特性和对纸杯蛋糕营养品质的影响。在本研究中, 将马铃薯雪花全粉以不同的浓度 (10%, 30%, 50%) 加入到纸杯蛋糕中。与对照组相比, 添加马铃薯雪花全粉的纸杯蛋糕中蛋白含量增加了 11.04%~16.55%, 脂肪含量降低了 3.10%~13.18%, 总膳食纤维增加了将近 1.00~1.50 倍。所有添加马铃薯雪花全粉的纸杯蛋糕配方在矿物质和氨基酸方面均表现出更高的综合营养价值。添加马铃薯雪花全粉降低了感官评价的得分, 尤其是添加比例为 30% 和 50% 时。用马铃薯雪花全粉部分替代小麦粉制作纸杯蛋糕降低了蛋糕的高度和弹性, 并明显增强了硬度。蛋糕的高度和弹性分别降低了 2.36%~14.91%, 9.55%~18.98%, 硬度增加了 0.43%~42.49%。热机械学特性检测表明面团的吸水率和稳定时间明显升高, 而且马铃薯雪花全粉对混合面团中的蛋白质弱化和淀粉的糊化特性有明显的影 响。使用激光扫描共聚焦显微镜 (confocal scanning laser microscopy, CSLM) 对面团的微观结构进行了表征, 结果表明添加马铃薯雪花全粉破坏了面筋蛋白网络的连续性。

关键词: 马铃薯雪花全粉; 纸杯蛋糕; 营养品质; 热机械学特性; 面团; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2021)03-154-162

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.3.0855

Effects of Supplemented with Potato Flake on Properties of Dough

XU Dan^{1,2}, ZHAO Yu-ci^{1,2}, ZENG Fan-kui¹, LIU Gang¹

(1.Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The effect of potato flake (PF) on the properties of dough and the nutritional quality of cupcakes was investigated. In this work, potato flake (PF) was incorporated in cupcakes at different concentration (10%, 30%, 50%). Compared with the control group, the protein content of the potato flake-added cupcakes increased by 11.04~16.55%, the fat content was reduced by 3.10~13.18%, and the total dietary fiber increased by nearly 1.00~1.50 times. All PF cupcake formulations exhibited higher comprehensive nutritional value in terms of minerals and amino acids. Supplementation of potato flake decreased the score of sensory evaluation, especially at ratio of 30% and 50%. The replacement of wheat flour with the potato flake reduced the height and springiness of cake and enhanced the hardness significantly. The height and springiness were reduced by 2.36~14.91% and 9.55~18.98%, respectively. Their hardness increased by 0.43~42.49%. Thermomechanical properties of the dough demonstrated that the water absorption rate and stability time increased. The protein weakening and the gelatinization properties of starch in mixed dough were significantly affected by potato flake. The microstructure of the dough was characterized by confocal scanning laser microscopy (CSLM) and the results showed that the addition of PF could destroy the continuity of the gluten protein network.

Key words: potato flake; cupcake; nutritional quality; thermomechanical properties; dough; microstructure

引文格式:

许丹,赵宇慈,曾凡逵,等.添加马铃薯雪花全粉对面团特性和纸杯蛋糕营养品质的变化[J].现代食品科技,2021,37(3):154-162

XU Dan, ZHAO Yu-ci, ZENG Fan-kui, et al. Effects of supplemented with potato flake on properties of dough [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(3): 154-162

收稿日期: 2020-09-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0401302-02); 国家马铃薯产业技术体系专项 (CARS-10); 甘肃省科技重大专项 (1602NKDJ022-1); 兰州市科技计划项目 (2016-3-123)

作者简介: 许丹 (1987-), 女, 博士研究生, 研究方向: 马铃薯化学与加工技术

通讯作者: 刘刚 (1962-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 马铃薯化学与加工技术

马铃薯是世界范围内重要的农作物,富含多种生物活性成分,马铃薯中的营养成分可大大改善居民的饮食^[1,2]。据报道,马铃薯蛋白具有很高的生物学价值^[3],且脂肪含量很低^[4]。马铃薯中的氨基酸组成优异^[5],含有更加丰富的赖氨酸和苏氨酸^[6]。另外,马铃薯更是多种矿物质的良好来源^[7,8]。

根据中华人民共和国农业部(MOA)的研究,马铃薯很快将成为中国的主食之一^[9]。以马铃薯为主食的发展战略对确保国家粮食安全和改善健康饮食具有重要意义。新鲜马铃薯很难储存,而工业化加工是扩大主食和多种马铃薯战略储存的有效途径。传统的马铃薯雪花全粉,是将马铃薯块茎磨碎后进行挤压,然后通过气动环形干燥而挤出产生的,会导致水溶性养分的流失,高温脱水后,淀粉糊化并且蛋白质已经变性^[10,11],加工性能较差。根据我们之前的研究,马铃薯雪花全粉不适宜加工面包或者面条,但可能在改善纸杯蛋糕的功能和营养特性方面具有巨大潜力。

Mixolab 混合实验仪是一款全自动的集成粉末质量分析仪,也是一种多功能的检测谷物粉团流变学和酶学特性的分析仪器,可以实现各种专用粉品质的最严格监控。该仪器有效地结合了粉质仪和粘度计的功能,还可用于确定面粉的蛋白质弱化和淀粉糊化特性。该仪器已广泛用于农业育种,谷物的储藏和加工,食品加工和质检部门等行业。许多研究表明,该仪器不仅可以有效地评估面团的蛋白质特性^[12,13],而且可以预测饼干和蛋糕的烘烤质量^[14,15],为小麦粉的分类和使用提供参考。

本论文系统地研究了马铃薯雪花全粉在纸杯蛋糕中的应用,详细分析了面团的热机械学特性和蛋糕的营养品质,为提高纸杯蛋糕的品质提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料与试剂

小麦粉:中裕蛋糕用小麦粉(低筋系列),滨州中裕食品有限公司;马铃薯雪花全粉:兴爱兰(磨细),甘肃薯香园农业科技有限公司;蛋糕油:银谷 SP 蛋糕油,广东奇乐趣食品科技有限公司;橄榄油:RONGS 西班牙原装进口特级初榨橄榄油。鸡蛋和细砂糖购于当地的超市。乙醇、碳酸氢钠:天津市科密欧化学试剂有限公司;氨水、硫酸:四川西陇化工股份有限公司;乙酸:天津市大茂化学试剂试剂厂;硫酸铜、硫酸钾:天津市德恩化学试剂有限公司;氢氧化钠:天

津市百世化工有限公司,以上试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

全自动凯氏定氮仪(K1100F):济南海能仪器股份有限公司;自动脂肪测定仪(SZC-101):上海纤检仪器有限公司;分析天平(AB104-N):梅特勒仪器(上海)有限公司;紫外可见分光光度计(UV 2600):日本岛津 Shimadzu;原子吸收光谱仪(PE900T):美国 PE-Perkinelmer; Hitachi 全自动氨基酸分析仪(L-8900):日本;乐米高双棒电动打蛋器(N20D):佛山市乐米高五金电器有限公司; Mixolab 混合实验仪:法国肖邦仪器公司;质构分析仪(MultiTest 2.5-i, Mecmesin, Ltd):英国;数显鼓风干燥箱(DGG-9030B):上海森信实验仪器有限公司;超声波清洗器(KQ-250DB):昆山市超声仪器有限公司;扫描电子显微镜(JSM-5600LV):日本电子株式会社;激光扫描共聚焦显微镜(Olympus Fluoview Fv1200):日本。

1.3 实验方法

1.3.1 营养成分检测

蛋白含量的检测参照 GB 5009.5-2016(第一法)国家标准。脂肪含量的检测参照 GB 5009.6-2016(第二法)国家标准。膳食纤维含量的检测参照 GB 5009.88-2014 国家标准。磷含量的检测方法参照 GB 5009.87-2016(第一法)国家标准;铁、钙、锌、镁和钾含量的检测方法参照 GB 5009.268-2016(第一法)国家标准。氨基酸含量的检测参照 GB 5009.124-2016 国家标准。

1.3.2 纸杯蛋糕的制作

首先准确称量 50 g 细砂糖于容器中,打入两个中等大小的鸡蛋(约 100 g),用打蛋器充分打发至有泡沫,再加入 65 g 面粉或预先混匀的混合粉和 5 g 蛋糕油继续打至发白。最后加入矿泉水 8 g、橄榄油 10 g 并用打蛋器搅拌均匀(注:这一步操作不能过度打发,只需搅拌均匀即可)。将上述制作好的蛋糕面糊用塑料刮刀放入专用纸杯中(每个纸杯中加入 28 g 面糊),待纸杯中的面糊放置均匀后立即放进已经预热好的烤箱中烘烤 15 min 左右即可(烤箱上下火温度均为 150 ℃),取出后放凉,待测。

1.3.3 感官评价

感官评定小组由本单位的 15 名经过训练的小组成员组成(男性和女性)。所有随机的样本由小组成员同时进行测试。小组成员根据 Sudha 等人^[16]的报道分

别评估样品的蛋糕碎屑颜色, 食用品质, 气味, 柔软度, 外观和整体质量。要求参与者使用 5 点评价法 (1 分=非常不喜欢, 2 分=不喜欢, 3 分=既不是喜欢也不是不喜欢, 4 分=喜欢, 5 分=非常喜欢)。要求参与者在评定过程中不得相互交流, 并向小组成员提供矿泉水来进行漱口。

1.3.4 质构分析

蛋糕的质构特征使用质构分析仪并采用 TPA 方法检测样品。将每个样品都放置在平台上, 使用不锈钢圆柱形探针 (75 mm) 以 10 mm/s 的速度将样品压缩至其原始高度的 50%。将质构分析仪与计算机连接并分析数据。从 TPA 曲线计算出各质构参数 (高度、硬度和弹性)。

1.3.5 扫描电子显微镜检测

扫描电子显微镜的测定参考 Bárcenas 等人^[17]的方法。测试前在样品的表面上进行喷金处理。然后以 20 kV 的加速电压以 500 倍的放大倍数进行样品分析。

1.3.6 面团的热机械学特性

检测方法参考《ISO 17718:2013 揉混和加热条件下测定面粉的流变学特性》Chopin+标准测试法^[18], 和面转速为 80 r/min, 目标扭矩为 1.1 ± 0.05 Nm, 粉团重量 (粉和水) 总质量为 75 g。标准测试的温度控制分为 3 个过程: ①恒温阶段: 30 °C 条件下保持 8 min; ②升温阶段, 在 15 min 之内以 4 °C/min 的速度升温到 90 °C 并保持高温 7 min; ③降温阶段, 在 10 min 之内以 4 °C/min 速度降温到 50 °C 并保持 5 min, 整个实验过程共计 45 min。

1.3.7 面团的显微结构观察

准确称量 50 g 面粉或者预先混匀的混合粉, 加入 30 mL 蒸馏水用手揉捏成均匀的面团, 并将面团用干净的自封袋密封并静置 30 min 后进行检测。激光扫描共聚焦显微测定参考 Bernklau 等人^[19]的方法并稍作改动。先用超纯水配制浓度为 0.25% 的罗丹明 B 荧光染液。取适量湿面团轻轻薄涂于载玻片上, 随后滴入几滴罗丹明 B 荧光染液对样品进行染色, 静置两分钟后用超纯水缓缓冲洗多余的染料, 然后盖上盖玻片后用于显微镜观察。测定条件如下: 物镜放大倍数 20×, 目镜放大倍数 10×, 罗丹明 B 的激发波长为 594 nm。

1.3.8 数据处理

以上实验均重复 3 次, 所有数据用 Excel 2010 软件和 SPSS Statistics 22 软件进行处理和分析, 显著性分析采用 Duncan 检验, 显著性水平设定为 $p < 0.05$ 。雷达图使用 Origin 9.0 软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 小麦粉和马铃薯雪花全粉的营养成分

表 1 总结了小麦粉和马铃薯雪花全粉的基本营养成分。与小麦粉 (6.70 g/100 g) 相比, 马铃薯雪花全粉具有较高的蛋白含量 (8.63 g/100 g), 且两种粉末之间有显著性差异 ($p < 0.05$)。这与文献报道的马铃薯是高蛋白质的丰富来源相一致^[3]。脂肪分析结果显示, 小麦粉中的脂肪含量为 2.03 g/100 g, 而马铃薯雪花全粉的脂肪含量为 0.97 g/100 g, 马铃薯雪花全粉中的脂肪含量还不到小麦粉的一半, 这与公认的马铃薯中脂肪含量较低的认识是一致的^[4]。表 1 中还列出了小麦粉和马铃薯雪花全粉中膳食纤维的含量。结果显示, 两种粉末的膳食纤维含量明显不同。马铃薯雪花全粉中的膳食纤维含量远远高于小麦粉, 其中马铃薯雪花全粉 (2.90 g/100 g) 中的总膳食纤维 (TDF) 含量约是小麦粉 (0.10 g/100 g) 的 30 倍, 不溶性膳食纤维 (IDF) 含量约是小麦粉的 40 倍。结果还显示, 马铃薯雪花全粉中不溶性膳食纤维 (IDF) 的比例远高于可溶性膳食纤维 (SDF), 高达 90% 以上。该结果表明, 与小麦粉相比, 马铃薯雪花全粉是膳食纤维的良好来源。矿物质检测结果显示, 马铃薯雪花全粉中磷、钙、镁、铁、钾的含量远远高于小面粉, 但小麦粉中的锌含量 (3.10 g/100 g) 高于马铃薯雪花全粉 (2.78 g/100 g)。已有文献报道马铃薯是不同膳食矿物质的重要来源。即使马铃薯带皮煮熟后, 其大多数的矿物质含量依旧很高^[20]。矿物质结果表明, 与小麦粉相比, 马铃薯雪花全粉具有更优异的矿物质含量。从总体营养价值来看, 马铃薯雪花全粉比小麦粉具有更好的营养价值。

表 1 小麦粉和马铃薯雪花全粉的营养成分

Table 1 Nutritional component of wheat flour and potato flake

营养成分	小麦粉	马铃薯雪花全粉
蛋白/(g/100 g)	6.70±0.26 ^b	8.63±0.15 ^a
脂肪/(g/100 g)	2.03±0.21 ^a	0.97±0.21 ^b
总膳食纤维/(g/100 g)	0.10±0.00 ^b	2.90±0.05 ^a
不溶性膳食纤维/(g/100 g)	0.07±0.00 ^b	2.68±0.05 ^a
可溶性膳食纤维/(g/100 g)	0.03±0.01 ^b	0.22±0.06 ^a
磷(P)/(mg/100 g)	71.80±0.66 ^b	174.00±6.56 ^a
钙(Ca)/(mg/kg)	30.80±0.70 ^b	560.00±19.31 ^a
镁(Mg)/(mg/kg)	148.00±6.08 ^b	366.00±21.28 ^a
铁(Fe)/(mg/kg)	8.56±0.09 ^b	11.30±0.92 ^a
锌(Zn)/(mg/kg)	3.10±0.17 ^a	2.78±0.11 ^b
钾(K)/(mg/kg)	1020.00±43.31 ^b	101000.00±624.50 ^a

注: 不同字母代表差异性显著, $p < 0.05$ 。下表同。

2.2 小麦粉和马铃薯雪花全粉的氨基酸组成

表2 小麦粉和马铃薯雪花全粉的氨基酸组成

Table 2 Amino acid composition of wheat flour and potato flake

氨基酸/(g/100 g)	小麦粉	马铃薯雪花全粉
丙氨酸	0.25±0.02	0.21±0.03
丝氨酸	0.34±0.01 ^a	0.27±0.03 ^b
亮氨酸	0.49±0.03	0.46±0.03
天冬氨酸	0.33±0.03 ^b	1.22±0.05 ^a
异亮氨酸	0.26±0.03	0.21±0.02
甘氨酸	0.28±0.04	0.24±0.03
精氨酸	0.27±0.02	0.28±0.03
组氨酸	0.21±0.04	0.18±0.02
缬氨酸	0.32±0.04	0.29±0.03
脯氨酸	0.95±0.02 ^a	0.33±0.02 ^b
苏氨酸	0.22±0.05 ^b	0.30±0.02 ^a
苯丙氨酸	0.33±0.05	0.30±0.03
蛋氨酸	0.08±0.02	0.06±0.01
谷氨酸	2.21±0.04 ^a	1.08±0.05 ^b
赖氨酸	0.19±0.03 ^b	0.40±0.04 ^a
酪氨酸	0.12±0.03	0.15±0.02

小麦粉和马铃薯雪花全粉的氨基酸组成如表2所示。结果显示小麦粉中丝氨酸、脯氨酸和谷氨酸的含量明显高于马铃薯雪花全粉，两者有显著性差异 ($p<0.05$)，而马铃薯雪花全粉中天冬氨酸、苏氨酸和赖氨酸的含量显著高于小麦粉 ($p<0.05$)。这与文献报道的马铃薯中氨基酸组成更优异，尤其具有较高的赖

氨酸和苏氨酸的结果相一致^[5,6]。氨基酸结果还显示，马铃薯雪花全粉中含有所有的必需氨基酸种类，且与小麦粉相比，马铃薯雪花全粉中必需氨基酸所占比例较高，高达43.91%，而小麦粉中的比例为40.07%。较好的氨基酸组成使马铃薯雪花全粉更具营养价值。

2.3 蛋糕的营养成分

表3列出了蛋糕的基本营养成分。与对照组(7.43 g/100 g)相比，添加马铃薯雪花全粉的蛋糕具有较高的蛋白含量，且随着添加比例的增多，蛋白含量也随之升高(分别增加了11.04%~16.55%)。众所周知，马铃薯是高品质蛋白的良好来源^[21]。据报道，发展中国家的人们在饮食中缺乏蛋白质的摄入，而马铃薯可以作为这种重要膳食营养素的廉价来源。脂肪结果显示，随着马铃薯雪花全粉添加比例的增多，蛋糕中的脂肪含量降低，脂肪含量分别降低了3.10%~13.18%，但只有添加50%组的蛋糕，其脂肪含量与对照组相比有显著性差异 ($p<0.05$)。从制作蛋糕的材料来看，蛋糕中脂肪含量的来源主要来自于橄榄油。表3还列出了蛋糕的膳食纤维含量，结果显示与对照组(1.16 g/100 g)相比，添加马铃薯雪花全粉的蛋糕具有较高的膳食纤维含量，且随着添加比例的增多，蛋糕中的膳食纤维含量显著升高 ($p<0.05$)，其中总膳食纤维含量增加了将近1.00~1.50倍。该结果表明，马铃薯雪花全粉可明显提高蛋糕中的膳食纤维含量。

表3 不同配方纸杯蛋糕的营养成分

Table 3 Nutritional component of cupcakes with different formulas

营养成分	对照组	PF 10%	PF 30%	PF 50%
蛋白/(g/100 g)	7.43±0.16 ^b	8.25±0.72 ^{ab}	8.50±0.26 ^a	8.66±0.40 ^a
脂肪/(g/100 g)	12.90±0.61 ^a	12.50±0.26 ^a	12.10±0.44 ^{ab}	11.20±0.70 ^b
总膳食纤维/(g/100 g)	1.16±0.06 ^c	2.25±0.10 ^b	2.30±0.20 ^b	2.83±0.11 ^a
不溶性膳食纤维/(g/100 g)	1.02±0.04 ^c	1.56±0.12 ^b	1.65±0.06 ^b	2.19±0.15 ^a
可溶性膳食纤维/(g/100 g)	0.14±0.02 ^b	0.69±0.06 ^a	0.65±0.09 ^a	0.64±0.06 ^a
磷(P)/(mg/100 g)	42.20±0.79 ^c	57.00±1.51 ^b	57.60±1.13 ^b	73.30±0.60 ^a
钙(Ca)/(mg/kg)	163.00±8.19 ^d	605.00±14.42 ^c	798.00±16.64 ^b	869.00±9.85 ^a
镁(Mg)/(mg/kg)	1160.00±60.83 ^d	1670.00±105.83 ^c	2660.00±70.00 ^b	2840.00±88.88 ^a
铁(Fe)/(mg/kg)	14.90±0.79 ^b	15.60±1.06 ^{ab}	16.40±1.65 ^{ab}	17.20±0.36 ^a
锌(Zn)/(mg/kg)	4.70±0.17 ^a	4.24±0.10 ^b	4.30±0.12 ^b	4.03±0.15 ^b
钾(K)/(mg/kg)	1270.00±55.68 ^d	18800.00±173.21 ^c	28000.00±173.21 ^b	34700.00±264.58 ^a

Jeddou 等人^[22]也已经报道并证实了马铃薯是蛋糕制作中膳食纤维的良好来源。蛋糕中的矿物质结果显示，如前所述，由于马铃薯雪花全粉中磷、钙、镁、钾的含量远远高于小麦粉，因此添加马铃薯雪花全粉的蛋糕中磷、钙、镁、钾的含量要显著高于对照组，且都具有显著性差异 ($p<0.05$)。尽管马铃薯雪花全粉

中铁的含量要比小麦粉高(表1)，但只有添加50%组的蛋糕，其铁的含量与对照组相比有显著性差异 ($p<0.05$)。因为小麦粉中的锌含量要高于马铃薯雪花全粉，所以随着添加比例的增多，蛋糕中的锌含量随之降低。总之，从整体营养价值来看，添加马铃薯雪花全粉可极大地提高纸杯蛋糕的营养价值。

2.4 蛋糕的氨基酸组成

蛋糕的氨基酸组成如表 4 所示。结果显示对照组蛋糕中的精氨酸、组氨酸和脯氨酸含量最高。马铃薯雪花全粉的加入使得蛋糕中有较高含量的天冬氨酸、苏氨酸、缬氨酸和赖氨酸。苏氨酸、缬氨酸和赖氨酸都是人体重要的必需氨基酸。氨基酸是人体所需的重要生物成分,主要参与生物合成、神经传递和其他代谢活动^[23]。较高的赖氨酸含量使马铃薯成为中国的主食变得更加有吸引力,传统主食小麦和小米中缺乏赖氨酸,而马铃薯可以弥补这一缺憾。

2.5 蛋糕的感官评价

通过感官评估来评价蛋糕的质量在很大程度上基于个人判断和主观定性评估,其结果虽然不是绝对的,

但可以反映出消费者的偏好^[22]。马铃薯雪花全粉的不同添加量对蛋糕的感官评价结果列于表 5 和图 1 中。结果显示马铃薯雪花粉的添加对蛋糕的气味没有显著影响 ($p>0.05$),但对蛋糕的碎屑颜色、食用品质、柔软度、外观和整体质量有明显的影响。综合 6 项感官评价的结果,对照组蛋糕获得了最高的感官评价得分。从表 5 和图 1 中可以看出马铃薯雪花粉的添加对蛋糕的食用品质影响不大,只有添加 50% 组的蛋糕具有最低的食用品质得分 (3.80),且与其他组相比有显著性差异 ($p<0.05$)。随着添加量的增多,蛋糕的感官评价得分明显降低。另外,从图 2 中可以观察到,蛋糕表面上出现的裂缝随着马铃薯雪花全粉比例的增加而变得越来越小,应该注意的是,这可能会影响评估者的感官评分,较小的裂缝使得蛋糕降低了吸引力。感官评价的结果与 Jeddou 等人^[22]的报道结果基本一致。

表 4 不同配方纸杯蛋糕的氨基酸组成

Table 4 Amino acid composition of cupcakes with different formulas

氨基酸/(g/100 g)	对照组	PF 10%	PF 30%	PF 50%
丙氨酸	0.38±0.02	0.36±0.02	0.38±0.02	0.37±0.02
丝氨酸	0.48±0.04	0.45±0.06	0.50±0.05	0.51±0.02
亮氨酸	0.61±0.05	0.59±0.06	0.63±0.03	0.64±0.05
天冬氨酸	0.66±0.03 ^{bc}	0.62±0.08 ^c	0.74±0.03 ^{ab}	0.80±0.03 ^a
异亮氨酸	0.34±0.03 ^{ab}	0.31±0.01 ^b	0.36±0.02 ^a	0.35±0.03 ^{ab}
甘氨酸	0.27±0.03	0.25±0.04	0.28±0.02	0.27±0.03
精氨酸	0.42±0.03 ^a	0.36±0.03 ^b	0.41±0.03 ^{ab}	0.41±0.03 ^{ab}
组氨酸	0.25±0.03 ^a	0.16±0.02 ^b	0.17±0.02 ^b	0.16±0.02 ^b
缬氨酸	0.42±0.03 ^b	0.43±0.01 ^{ab}	0.48±0.03 ^a	0.46±0.03 ^{ab}
脯氨酸	0.47±0.03 ^a	0.32±0.05 ^b	0.31±0.03 ^b	0.30±0.03 ^b
苏氨酸	0.24±0.03 ^b	0.30±0.05 ^a	0.34±0.03 ^a	0.36±0.02 ^a
苯丙氨酸	0.41±0.03	0.36±0.04	0.38±0.03	0.40±0.04
蛋氨酸	0.24±0.04	0.22±0.03	0.25±0.00	0.24±0.02
谷氨酸	1.31±0.07	1.20±0.07	1.26±0.03	1.25±0.03
赖氨酸	0.37±0.02 ^c	0.41±0.02 ^{bc}	0.46±0.04 ^{ab}	0.47±0.03 ^a
酪氨酸	0.22±0.02 ^{ab}	0.20±0.03 ^b	0.22±0.02 ^{ab}	0.26±0.02 ^a

表 5 不同配方纸杯蛋糕的感官评价结果

Table 5 Sensory evaluation results of cupcakes with different formulas

评价项目	对照组	PF 10%	PF 30%	PF 50%
蛋糕碎屑颜色	4.80±0.45 ^a	4.10±0.65 ^b	3.66±0.42 ^b	3.64±0.49 ^b
食用品质	4.90±0.22 ^a	4.52±0.45 ^a	4.62±0.27 ^a	3.80±0.67 ^b
气味	4.92±0.18	4.00±0.71	4.06±0.75	4.10±0.82
柔软度	4.76±0.43 ^a	3.92±0.70 ^b	3.82±0.63 ^b	3.36±0.43 ^b
外观	4.80±0.27 ^a	3.30±1.68 ^{ab}	3.16±1.66 ^{ab}	2.32±1.54 ^b
整体质量	4.70±0.45 ^a	4.16±0.98 ^{ab}	3.72±0.38 ^b	3.40±0.42 ^b

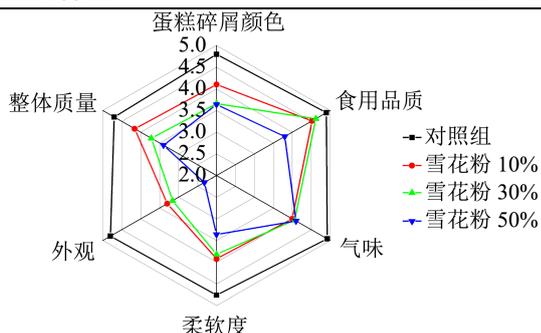


图1 不同配方纸杯蛋糕的感官评价结果

Fig.1 Sensory evaluation results of cupcakes with different formulas

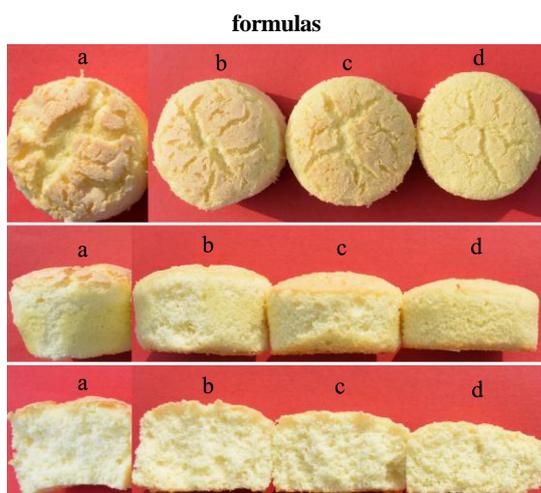


图2 不同配方纸杯蛋糕的照片

Fig.2 Photographs of cupcakes with different formulas

注：图中 a 为对照组；b 为 PF 10% 组；c 为 PF 30% 组；d 为 PF 50% 组。

2.6 蛋糕的质构分析

蛋糕的质构分析结果总结于表 6 中。结果表明，小麦粉中添加马铃薯雪花全粉会影响蛋糕的高度、硬度和弹性。结果显示随着马铃薯雪花全粉的添加，蛋糕的高度显著降低，高度分别降低了 2.36%~14.91%。从图 2 中也可以观察到各组蛋糕的高度差异。

从表 6 可知，添加马铃薯雪花全粉对蛋糕的硬度也有影响，硬度分别增加了 0.43%~42.49%。当添加量为 10% 时，与对照组相比，蛋糕硬度增加，但没有显

著性差异 ($p>0.05$)。随着添加比例的继续升高，蛋糕硬度显著增加，添加比例为 50% 的蛋糕硬度最大 (13.18 N)，且显著高于其他组 ($p<0.05$)。硬度增加将严重影响蛋糕的质量。

另外，增加马铃薯雪花全粉的添加量会导致蛋糕的弹性降低，弹性分别降低了 9.55%~18.98%。显然，对照组的蛋糕具有最大的弹性 (15.28 mm)，且显著高于其他组 ($p<0.05$)。随着添加比例的增多，蛋糕的弹性也随之降低。质构特征的检测结果与 Jeddou 等人^[22]的报道结果基本一致。

2.7 马铃薯雪花全粉对面团热机械学特性的影响

由表 7 所示，添加的马铃薯雪花全粉越多，混合面粉的吸水率越高。吸水率是面粉质量的重要指标，主要决定面团的产量。对于生产者而言，同等重量的面粉，吸水率高的就可以获得更多的面团。当添加比例为 50% 时，吸水率可高达 94.90%，显著高于其他组 ($p<0.05$)。除了马铃薯雪花全粉中的极性基团对水分有较强的吸附作用以外，淀粉的破坏率可能是高吸水率的主要原因。吸水率主要受蛋白质含量和淀粉破坏率的影响。蛋白质含量和淀粉破坏率越高，吸水率就越高，但是过多的淀粉破坏率会影响食品质量^[24,25]。从图 3 中可以看出，马铃薯雪花全粉淀粉颗粒的形状几乎消失，并且已经完全糊化，这是由于加工过程中的高温处理所致。

稳定时间可以反映面团的耐剪切能力和面筋的强度^[26]。面团的稳定时间越长，面筋的强度越强。表 7 所示，添加马铃薯雪花全粉后，其稳定时间远远高于对照组，且随着添加比例的增加，混合面团的稳定时间显著降低 ($p<0.05$)，这表明面团中的面筋结构开始被破坏。但是，此处的稳定时间的延长并不意味着面筋强度的增加，而是因为添加过量的马铃薯雪花全粉会增强面团的稠度。可以断定的是，马铃薯雪花全粉的添加对面团稳定时间和面团稳定性具有显著影响。

表 6 不同配方纸杯蛋糕的质构特征

Table 6 Textural properties of cupcakes with different formulas

质构特征	对照组	PF 10%	PF 30%	PF 50%
高度/mm	40.70±1.17 ^a	39.74±0.75 ^a	37.09±0.27 ^b	34.63±0.21 ^c
TPA 硬度/N	9.25±0.30 ^c	9.29±0.13 ^c	10.61±0.38 ^b	13.18±0.45 ^a
弹性/mm	15.28±0.56 ^a	13.82±0.23 ^b	12.94±0.08 ^c	12.38±0.14 ^c

表 7 马铃薯雪花全粉对面团热机械学特性的影响

Table 7 Effects of addition of PF on the thermomechanical properties of dough

热机械学特性	对照组	PF 10%	PF 30%	PF 50%
吸水率/%	47.00±0.00 ^d	59.30±0.50 ^c	75.70±0.70 ^b	94.90±0.80 ^a
C ₁ 时间/min	0.70±0.04 ^b	3.12±0.35 ^a	0.94±0.05 ^b	1.19±0.01 ^b
C ₁ 扭矩/(N·m)	1.13±0.00	1.12±0.06	1.15±0.02	1.16±0.03
稳定时间/min	1.20±0.04 ^d	4.16±0.08 ^a	3.12±0.05 ^b	2.36±0.01 ^c
C ₁ -C ₂ /(N·m)	0.75±0.01 ^c	0.93±0.06 ^b	0.99±0.01 ^{ab}	1.02±0.01 ^a
C ₂ 扭矩/(N·m)	0.38±0.01 ^a	0.19±0.00 ^b	0.16±0.01 ^c	0.14±0.01 ^c
C ₂ 温度/min	52.85±0.07 ^d	54.95±0.21 ^c	59.50±0.57 ^b	62.45±0.21 ^a
C ₃ 扭矩/(N·m)	2.37±0.13 ^a	1.84±0.03 ^b	1.03±0.01 ^c	0.57±0.01 ^d
C ₄ 扭矩/(N·m)	2.31±0.04 ^a	1.70±0.01 ^b	0.93±0.02 ^c	0.46±0.01 ^d
C ₃ -C ₄ /(N·m)	0.05±0.01 ^c	0.15±0.02 ^a	0.11±0.01 ^b	0.09±0.01 ^{bc}
C ₅ 扭矩/(N·m)	3.49±0.03 ^a	2.40±0.04 ^b	1.42±0.02 ^c	0.72±0.01 ^d
C ₅ -C ₄ /(N·m)	1.18±0.06 ^a	0.70±0.03 ^b	0.49±0.00 ^c	0.26±0.00 ^d

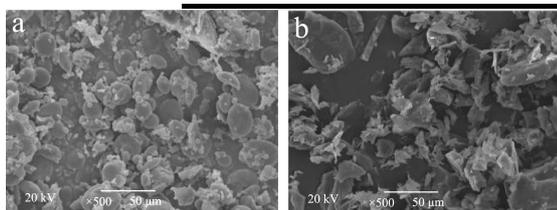


图 3 小麦粉和马铃薯雪花全粉的扫描电子显微镜照片

Fig.3 Scanning electron micrographs of wheat flour and potato flake

注：图中 a 为小麦粉；b 为马铃薯雪花全粉。

C₂ 值可以表示由于机械功和温度升高而导致的蛋白质弱化^[27]。如表 7 所示，随着马铃薯雪花全粉从 10% 增加到 50%，C₂ 值显著降低 ($p < 0.05$)。面筋蛋白在很大程度上减弱，面团变软且发粘，不易加工，其烘烤质量也不佳。添加马铃薯雪花全粉后的面团 C₂ 值降低，表明面筋蛋白的网络结构减弱^[28]。尽管马铃薯中也含有丰富的蛋白质，但它不同于小麦面筋蛋白，无法形成像小麦面粉一样的面筋网络结构^[25]。再加上马铃薯雪花全粉在加工过程中蛋白已经变性，因此对面团的加工性能造成不利的影响。

C₃、C₄ 和 C₅ 值可以反映淀粉的糊化特性^[14,27]。如表 7 所示，随着马铃薯雪花全粉的增加，C₃ (淀粉糊化)，C₄ (淀粉稳定性) 和 C₅ (淀粉回生) 值均显著降低，这表明添加马铃薯雪花全粉对淀粉的糊化特性具有明显的改变。Kahraman 等人^[15]已经报道过面粉中淀粉的糊化在蛋糕制作中非常重要。较低的 C₃、C₄ 和 C₅ 值将对烘烤产品产生一系列负面影响，例如，直径和比容变小，导致牙齿粘腻，韧性和耐嚼强度被改变等^[18]。

2.8 马铃薯雪花全粉对面团微观结构的影响

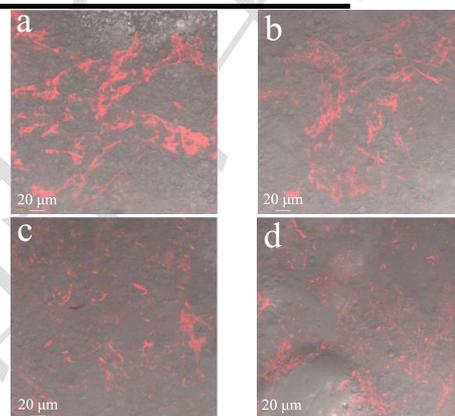


图 4 面团的激光共聚焦显微镜图

Fig.4 Confocal scanning laser microscope (CSLM) of dough

注：图中 a 为对照组；b 为 PF 10% 组；c 为 PF 30% 组；d 为 PF 50% 组。

添加不同比例的马铃薯雪花全粉后，面团的激光共聚焦显微结构如图 4 所示。从图中可以看出，对照组的面筋网络结构最佳 (图 4a)，而添加 50% 马铃薯雪花全粉的面筋网络最差 (图 4d)。对照组中的面筋蛋白均匀地覆盖在淀粉颗粒的表面，形成了较为紧密的蛋白质交联，这对面团的稳定性十分有利。当添加量为 10% 时，面筋蛋白的网络结构依旧可以很好地保持，但与对照组相比，明显有所降低。这表明较低的添加量对面筋蛋白的网络结构破坏并不大。随着面团中马铃薯雪花全粉的添加比例达到 30% 时，面筋蛋白的网络结构被进一步破坏，网络结构断裂且含量明显减少，并且被面筋蛋白覆盖的淀粉颗粒进一步暴露。当添加比例达到 50% 时，几乎完全破坏了面团中的蛋白网络结构。总之，马铃薯雪花全粉的添加可以破坏面筋蛋白网络的连续性，尤其是添加比例为 30% 和 50% 时，效果较明显。

3 结论

本文初步探索了不同马铃薯雪花全粉添加比例(10%、30%和50%)对纸杯蛋糕品质的影响。结果表明添加马铃薯雪花全粉后,纸杯蛋糕中的蛋白质和膳食纤维含量明显提升,并极大地丰富了矿物质种类和赖氨酸组成。这意味着马铃薯雪花全粉在纸杯蛋糕制作中显示出巨大的潜力,可以显著提高其营养品质。但马铃薯雪花全粉的添加对蛋糕的质构特性产生了不利的影响,降低了蛋糕的高度和弹性,并增加了蛋糕的硬度。同时,相应地降低了感官评估的综合评分。通过 Mixolab 分析的面团的热机械学性质,发现马铃薯雪花全粉明显增加了面团的吸水率和稳定时间,并对面筋蛋白的弱化和淀粉的糊化特性具有显著改变。激光共聚焦检测结果显示马铃薯雪花全粉对面团的微观结构有影响,马铃薯雪花全粉的添加可破坏面筋蛋白网络的连续性。

参考文献

- [1] Friedman M. Acrylamide: inhibition of formation in processed food and mitigation of toxicity in cells, animals, and humans [J]. *Food Function*, 2015, 6(6): 1752-1772
- [2] Jayanty S S, Diganta K, Raven B. Effects of cooking methods on nutritional content in potato tubers [J]. *American Journal of Potato Research*, 2019, 96: 183-194
- [3] Xu D, Liu H, Jin C Y, et al. A new potato variety grown in China suitable for raw eating [J]. *European Food Research and Technology*, 2018, 244(5): 851-860
- [4] Zhou L, Mu T H, Ma M M, et al. Nutritional evaluation of different cultivars of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) from China by grey relational analysis (GRA) and its application in potato steamed bread making [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(1): 231-245
- [5] Murniece I, Karklina D, Galoburda R, et al. Nutritional composition of freshly harvested and stored latvian potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties depending on traditional cooking methods [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24(4-5): 699-710
- [6] Camire M E, Kubow S, Donnelly D J. Potatoes and human health [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2009, 49(10): 823-840
- [7] Navarre D A, Shakya R, Hellmann H. Vitamins, Phytonutrients, and Minerals in Potato [M]. *Advances in Potato Chemistry and Technology*, 2016: 117-166
- [8] Nordbotten A, Loken E B, Rimestad A H. Sampling of potatoes to determine representative values for nutrient content in a national food composition table [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2000, 13(4): 369-377
- [9] Su W, Wang J. Potato and food security in China [J]. *American Journal of Potato Research*, 2019, 96(1): 100-101
- [10] Gosset V, Goebel C, Laine G, et al. The role of oxylipins and antioxidants on off-flavor precursor formation during potato flake processing [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(23): 11285-11292
- [11] Jin C Y, Xu D, Zeng F K, et al. A simple method to prepare raw dehydrated potato flour by low-temperature vacuum drying [J]. *International Journal of Food Engineering*, 2017, 13: 1-10
- [12] Bonet A, Blaszczyk W, Rosell C M. Formation of homopolymers and heteropolymers between wheat flour and several protein sources by transglutaminase-catalyzed cross-linking [J]. *Cereal Chemistry*, 2006, 83(6): 655-662
- [13] Collar C, Bollain C, Rosell C M. Rheological behaviour of formulated bread doughs during mixing and heating [J]. *Food Science and Technology International*, 2007, 13(2): 99-107
- [14] Ozturk S, Kahraman K, Tiftik B, et al. Predicting the cookie quality of flours by using mixolab [J]. *European Food Research and Technology*, 2008, 227(5): 1549-1554
- [15] Kahraman K O, Sakiyan S, Ozturk H, et al. Utilization of Mixolab® to predict the suitability of flours in terms of cake quality [J]. *European Food Research and Technology*, 2008, 227: 565-570
- [16] Sudha M L, Vetrmani R, Leelavathi K. Influence of fiber from different cereals on the rheological characteristics of wheat flour dough and on biscuit quality [J]. *Food Chemistry*, 2007, 100: 1365-1370
- [17] Bárcenas M E, Altamirano-Fortoul R, Rosell C M. Effect of high pressure processing on wheat dough and bread characteristics [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2010, 43: 12-19
- [18] 曾凡逵,刘刚,林罡,等.用 Mixolab 分析马铃薯生全粉的流变学特性[J].*现代食品科技*,2017,33(3):146-154
ZENG Fan-kui, LIU Gang, LIN Gang, et al. Analysis of the rheological properties of raw dehydrated potato flour by mixolab [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017,33(3):146-154
- [19] Bernklau I, Lucas L, Jekle M, et al. Protein network analysis-A new approach for quantifying wheat dough microstructure [J]. *Food Research International*, 2016, 89(1): 812-819

- [20] True R H, Hogan J M, Augustin J, et al. Mineral composition of freshly harvested potatoes [J]. American Journal of Potato Research, 1979, 56(7): 339-350
- [21] Jin C Y, Zeng F K, Liu G. Recovery of protease inhibitors from potato fruit water by expanded bed adsorption chromatography in pilot scale [J]. American Journal of Potato Research, 2018, 95: 1-8
- [22] Jeddou K B, Bouaziz F, Zouari-Ellouzi S, et al. Improvement of texture and sensory properties of cakes by addition of potato peel powder with high level of dietary fiber and protein [J]. Food Chemistry, 2017, 217: 668-677
- [23] Adebisi J A, Obadina A O, Adebo O A, et al. Comparison of nutritional quality and sensory acceptability of biscuits obtained from native, fermented, and malted pearl millet (*Pennisetum glaucum*) flour [J]. Food Chemistry, 2017, 232: 210-217
- [24] Liu X L, Mu T H, Sun H N, et al. Influence of potato flour on dough rheological properties and quality of steamed bread [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(11): 2666-2676
- [25] Zeng F K, Liu H, Yu H, et al. Effect of potato flour on the rheological properties of dough and the volatile aroma components of bread [J]. American Journal of Potato Research, 2019, 96(1): 69-78
- [26] 王红娜,曹欣然,黄莲燕,等.膳食纤维与阿魏酸复配对面团和面筋蛋白性质的影响[J].食品科学,2019,40(12):62-69
WANG Hong-na, CAO Xin-ran, HUANG Lian-yan, et al. Effects of dietary fiber and ferulic acid on properties of dough and gluten [J]. Food Science, 2019, 40(12): 62-69
- [27] Svec I, Hruskova M. The mixolab parameters of composite wheat/hemp flour and their relation to quality features [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 60(1): 623-629
- [28] Jang A, Kim J Y, Lee S. Rheological, thermal conductivity, and microscopic studies on porous-structured noodles for shortened cooking time [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 74: 1-6

(上接第 186 页)

- [13] 程志博,胡婧琼,孙帅,等.湿法研磨结合液相层积技术制备吡喃妥因缓释微丸[J].沈阳药科大学学报,2017,34(2):109-115
CHENG Zhi-bo, HU Jing-qiong, SUN Shuai, et al. Nitrofurantoin sustained release pellets with preparation using wet-milling combined liquid layering technology [J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, 2017, 34(2): 109-115
- [14] Andre O Berings, Fagner M Souza. Technological development of *Ceropia glaziovi* extract pellets by extrusion-spheronization [J]. Brazilian Journal of Pharmacognosy, 2013, 23(1): 160-168
- [15] 惠歌,张小东,杨春辉,等.人参皂苷Rh2和20-(s)-Rh2的红外与拉曼光谱研究[J].长春中医药大学学报,2014,30(6):1013-1018
HUI Ge, ZHANG Xiao-dong, YANG Chun-hui, et al. Infrared and raman spectral study on ginsenoside Rh2 and 20-(s)-Rh2 [J]. Journal of Changchun University of Chinese Medicine, 2014, 30(6): 1013-1018
- [16] 闫珂巍,陈美君,梅国荣,等.近红外光谱法测定三七 3 种皂苷的总含量[J].药物分析杂志,2016,36(4):691-696
YAN Ke-wei, CHEN Mei-jun, MEI Guo-rong, et al. Determination of three saponins in panax notoginseng by NIR [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2016, 36(4): 691-696

(上接第 226 页)

- [24] Mezgebo G B, Monahan F J, O'Riordan EG, et al. Fatty acid, volatile and sensory characteristics of beef as affected by grass silage or pasture in the bovine diet [J]. Food Chem, 2017, 235: 86-97
- [25] Chiaia H L J, Peripolli E, de Oliveira Silva R M, et al. Genomic prediction ability for beef fatty acid profile in Nelore cattle using different pseudo-phenotypes [J]. J Appl Genet, 2018, 59(4): 493-501
- [26] De Lemos M V A, Peripolli E, Berton M P, et al. Association study between copy number variation and beef fatty acid profile of Nelore cattle [J]. J Appl Genet, 2018, 59(2): 203-223