

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.80023

椰子粉对小麦粉热机械流变特性的影响

Effects of coconut powder on thermomechanical rheology properties of wheat flour

李 铭¹ 盛 政² 李则均¹ 张海华²LI Ming¹ SHENG Zheng² LI Ze-jun¹ ZHANG Hai-hua²

(1. 三亚中瑞酒店管理职业学院, 海南 三亚 572000; 2. 浙江农林大学食品与健康学院, 浙江 杭州 311300)

(1. Hospitality Institute of Sanya, Sanya, Hainan 572000, China;

2. Zhejiang A&F University, College of Food and Health, Hangzhou, Zhejiang 311300, China)

摘要:目的:为椰子粉在面制品中的应用提供基础数据。

方法:将冻干椰子粉与小麦粉进行不同比例混合,采用 GB/T 37511—2019 中混合实验仪法测定椰子粉对小麦面筋蛋白和淀粉两个主要组分特性的影响。**结果:**椰子粉对淀粉特性和面筋蛋白均有较大影响,随着椰子粉添加量的增加,混合粉的吸水率下降、面团稳定时间降低,面筋蛋白弱化度、淀粉峰值黏度、淀粉回生度降低。**结论:**椰子粉不利于面筋网络的形成,但提高了网络的稳定性、促进了淀粉的糊化、抑制了回生。

关键词:椰子;面团;面筋蛋白;淀粉;糊化;回生

Abstract: Objective: In order to develop coconut utilization in wheat dough products, the effects of coconut powder on the thermomechanical rheology properties of wheat flour was studied. **Methods:** Freeze dried coconut flour and wheat flour were mixed in different proportions, then mixed flour was analyzed by GB/T 37511—2019 of Mixolab mixing instrument. **Results:** The changes of the properties of gluten and starch in wheat flour were analyzed and discussed respectively. It was found that coconut powder had great effects on the properties of both starch and gluten. As the increase of coconut powder, the water absorption of mixed powder decreased and the dough stability time decreased, and the weakening degree of gluten protein, peak viscosity and retrogradation degree of starch decreased. **Conclusion:** Coconut powder was not good for gluten formation, but it can improve the stability of the network, and promote the gelatinization and retrogradation inhibition of starch.

Keywords: coconut; dough; gluten; starch; pasting

基金项目:海南省教育厅重点科研项目(编号: Hnky2022ZD-27)

作者简介:李铭,男,三亚中瑞酒店管理职业学院副教授,硕士。

通信作者:张海华(1982—),女,浙江农林大学研究员,博士。

E-mail: hhzhang@zafu.edu.cn

收稿日期:2022-03-14 **改回日期:**2022-06-27

properties; retrogradation

椰子风味独特、营养丰富,所含的蛋白质中具有人体所需的 18 种氨基酸,且必需氨基酸配比合理^[1],尤其是所含的椰油热量低、代谢速度快^[2]、易于消化吸收^[3],还含有大量的膳食纤维。将椰子去壳后取椰果果肉和椰汁经冷冻干燥制成椰子全粉,保留了椰子的全部营养成分,再将椰子全粉与小麦粉混合可用于开发具有椰香风味、营养独特的面食品。开发含有椰子全粉的面食品需先了解椰子全粉对小麦粉的流变特性的影响,然而当前尚未见相关研究报道。

流变特性是小麦粉最重要的加工特性,也是决定面制品品质的最关键特性。良好的流变特性,可赋予面团良好的加工性能,如面条不断条、不黏结、易成型等,以及面制品良好的质地品质,如面条弹性、硬度更佳等。小麦面团独特的流变特性是由小麦面筋蛋白分子间通过氢键、范德华力、二硫键和疏水作用等形成面筋网络骨架,其中包裹/镶嵌小麦淀粉分子,进而形成的大分子聚合物所决定的^[4]。然而,面制品的面团流变特性除与小麦粉有关外,还受到配方中其他组分的影响,如盐、糖、脂、蛋白、纤维素等。研究^[5-7]表明,大量脂肪、纤维素、非面筋类蛋白的存在会影响面筋蛋白的水合形成面筋网络,降低吸水率,面团稳定时间降低,进而影响面团质构和黏弹性。少量添加纤维素,可以形成纤维素—蛋白—淀粉之间的弱作用和纤维素自身形成刚性的凝胶结构有利于面团的形成^[8-10]。

研究拟采用 Mixolab 混合实验仪考察不同配比椰子全粉对小麦粉热机械流变特性的影响,以期开发含椰子全粉的面食品提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

金龙鱼多用途麦芯中筋小麦粉;益海嘉里金龙鱼粮

油食品股份有限公司;

椰子粉:实验室自制(将海口市售椰果的果肉和椰汁经打浆后冷冻干燥即得,其中含粗脂肪 69%、蛋白质 8%、纤维素 18%)。

1.2 仪器与设备

混合实验仪: Mixolab2 型, 法国肖邦技术公司;

电子分析天平: HZ2002A 型, 慈溪红钻衡器设备有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱: DHG-9053A 型, 上海精宏实验设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 水分含量测定 按 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法执行。

1.3.2 复配粉制备 以小麦粉为基础, 按质量分数分别添加 0%, 1%, 3%, 5% 的椰子粉, 充分混合即为椰子粉—小麦粉复配粉, 分别标记为 y0、y1、y3 和 y5, 密封待用。

1.3.3 热机械流变特性测定 依据 GB/T 37511—2019, 采用 Mixolab 混合实验仪研究复配粉在搅拌和加热及冷却过程中面团的热机械流变特性。仪器参数设置: 选择 Chopin+ 协议, 揉面刀转速 80 r/min, 测试面团重量为 75.0 g, 面团的稠度以 $(1.10 \pm 0.05) \text{ N} \cdot \text{m}$ 为标准, 水箱温度恒定 30 °C。试验温度程序设置: 先 30 °C 恒温 8 min; 以 4 °C/min 的速度升温到 90 °C, 保持 7 min; 再以 4 °C/min 的速度降温到 50 °C, 保持 5 min; 整个测定过程共 45 min。

1.4 数据处理

每个样品重复试验 3 次, 取平均值作为最终分析的指标数据。采用 Origin 2021 进行作图, 使用 SPSS 25.0 统计软件在 $P < 0.05$ 水平下进行数据间显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 复配粉的热机械流变曲线

将各复合粉按设定程序进行热机械流变特性测定, 结果见图1。通过图1可以获得面团形成时间、稳定时

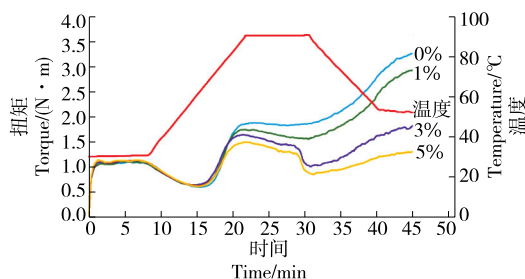


图1 复合粉的热机械流变曲线

Figure 1 Thermomechanical rheology of wheat flour mixing coconut flour

间、面筋蛋白弱化时间和弱化温度、淀粉糊化温度和凝胶化温度、峰值黏度、降落值等, 表征面团在热和机械搅拌共同作用下的流变特征指标。从曲线图上可以直观观察到, 椰子粉对面筋蛋白主导的面团形成与弱化阶段的影响, 和淀粉主导的糊化凝胶化阶段的影响。

2.2 椰子粉对面筋蛋白特性的影响

2.2.1 吸水率 根据 GB/T 37511—2019, 吸水率 (ABS) 是指面团在机械搅拌下稠度首次到达 $1.100 \text{ N} \cdot \text{m}$ (C1) 时的加水量, 以占 14% 湿基小麦粉的质量分数表示。吸水率是小麦粉的重要物理特性, 对于特定的小麦粉和标准测试条件下, 主要受体系中添加剂的影响, 其与面团的硬度、回复性等质构和黏弹性等流变特性紧密相关^[5]。

对于纯粹的小麦面团体系而言, 吸水率越高, 表明小麦粉中面筋蛋白的水合能力越强。但当体系添加其他物质时, 面筋蛋白的水合能力会受到影响。如图 2(a) 所示, 随着椰子粉添加量的增加, 吸水率显著降低, 说明小麦面筋蛋白的水合能力受到了椰子粉的影响。已知椰子粉主要化学组成为粗脂肪 69%、蛋白质 8%、纤维素 18%, 按添加量 1%, 3%, 5% 计算, 相应样品中分别增加粗脂肪 6.9, 20.7, 34.5 mg/g, 蛋白质 0.8, 2.4, 4 mg/g, 纤维素 1.8, 5.4, 9.0 mg/g。增加的粗脂肪和纤维素比对照中筋小麦粉中原有含量多, 会影响小麦粉中面筋蛋白的水合。纤维素会吸水、锁水, 面团的柔软度相应的增加^[6]; 脂质会伸展形成片状油膜^[7], 并附着在蛋白质和淀粉等其他成分上, 阻碍了蛋白与水的接触, 进而影响了蛋白分子水化层的形成, 降低了吸水率。纤维素和脂肪两方面拮抗作用中明显脂肪占了优势, 所以吸水率表现出降低趋势。

2.2.2 面团的形成时间 面团的形成时间 (DT) 是水和面粉在机械力的不断作用下, 形成面筋网络结构的时间, 其形成时间与面粉中面筋蛋白质量呈正比。在 Mixolab 中表征为面团扭矩达到 $1.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ (固定值 C1) 时所用时间。如图 2(b) 所示, 复配面团的形成时间随椰子粉添加量增加出现先增后降的趋势。与对照相比, 添加 1% 和 5% 椰子粉时面团的形成时间明显降低, 而 3% 的椰子粉显著增加了面团的形成时间。研究表明, 少量添加纤维素, 可以形成纤维素—蛋白—淀粉之间的弱作用和纤维素自身形成刚性的凝胶结构有利于面团的形成^[8,10], 而大量添加纤维, 则物理空间位阻和稀释效应或改变了面筋蛋白的二级结构, 而不利于面团的形成^[9]。中性脂的存在, 极不利于面团结构, 同时球蛋白也不利于面筋网络形成。综合上述几方面因素推断: 添加 1% 椰子粉时, 椰子中的脂质和球蛋白对面团形成的破坏作用明显高于纤维素的正向作用, 因而导致形成时间降低; 添加 5% 时, 无论是纤维素还是脂质和蛋白, 都不利于面筋蛋白交联形成网络结构, 因而形成时间也降低; 对于 3% 添加量, 纤维素的正向作用很可能强于脂质和蛋白的破坏作用, 使得

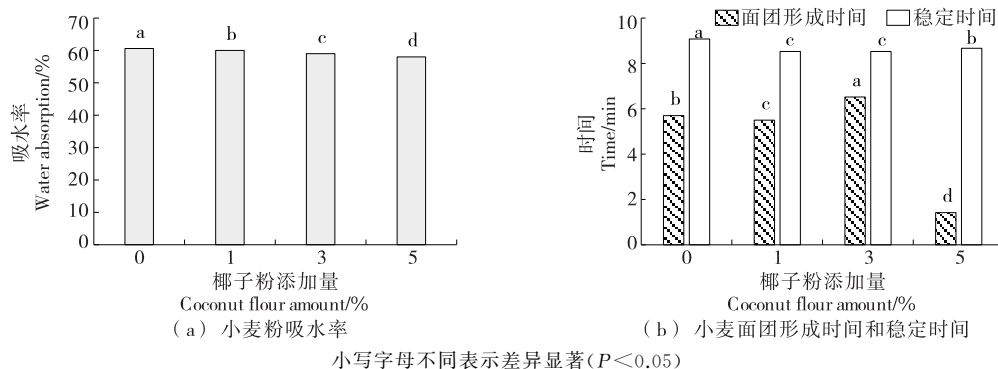


图 2 椰子粉对小麦粉混合特征指标的影响

Figure 2 Effects of coconut powder on flour properties of wheat flour

面团形成时间明显增加。

2.2.3 面团的稳定时间 面团的稳定时间(ST)反映了在 30 °C 时面团的耐揉性,稳定时间越长,面团耐揉性越好,面筋强度越大。如图 2(b)所示,添加椰子粉后的面团稳定时间显著低于对照组 ($P < 0.05$)。说明添加椰子粉,降低了面团的抗机械性,这可能由于椰子粉的存在,稀释了原有小麦粉中面筋蛋白组分占比^[11],以及椰子脂肪的润滑作用和纤维素的空间位阻效应^[12]共同起作用,导致难以形成稳定的网络结构,所以耐揉性降低。这一结果与形成时间相对应。

2.2.4 面团中面筋蛋白网络的弱化 如图 3(a)所示,添加椰子粉后 C2(和面阶段稠度最小值)均增大,说明随着温度升高,面团的耐机械搅拌性增强。这可能是因为:① 随着温度升高,面筋蛋白从开始变性到变性程度越来越大,导致面筋蛋白分子链舒展,网络结构内部基团暴露,尤其是高度重复的疏水氨基酸脯氨酸残基,与椰子粉中的脂质和蛋白作用增强面团结构;② 椰子粉中纤维素受热吸水,从面筋蛋白网络中夺取水分造成面筋蛋白之间作用增强,同时纤维素还会产生空间位阻,造成面面对机械搅拌的抵抗;③ 椰子脂质可能在体系中起润滑剂的作用^[13],对面团起软化作用^[14],降低耐搅拌性。将 C2 与稳定时间结合来看,椰子面团内部结构受热后可能是纤

维素起了更大作用,引起了 C2 的升高。

2.2.5 面筋蛋白的弱化速率 如图 3(c)所示,添加椰子粉后 α (C1 和 C2 之间曲线切线的斜率,表征面筋蛋白的弱化速率)表现不一(图 3), $y_1 > y_5 > y_0 > y_3$,说明添加 3% 时弱化速度最慢,与其较强的面筋网络结构相对应且与 C2 一致。椰子粉中脂质有润滑作用^[13],在混合过程中,椰子脂质和淀粉颗粒相互作用,阻止面筋链的粘合^[15],加速了面筋弱化。

2.3 椰子粉对淀粉特性的影响

2.3.1 糊化特性 椰子粉的加入显著影响了面团中淀粉的糊化特性,C3(糊化峰值黏度)、C3—C2 值(表征淀粉糊化特性)随着椰子粉添加量的增加而降低, β (C2 和 C3 之间曲线切线的斜率,表征淀粉糊化速率)随着椰子粉添加量增大而升高(见图 3),说明添加椰子粉后面团中淀粉更易糊化,糊化速度快且易形成凝胶、峰值黏度低。淀粉糊化共经历 3 个重要阶段:可逆吸水、不可逆吸水和淀粉颗粒解体。椰子面团体系中存在的脂质、纤维素及蔗糖、葡萄糖等小分子糖的存在,在可逆吸水阶段会阻碍水与淀粉的接触进而减缓可逆吸水,但随着温度的升高,纤维素强烈吸水,增加脂质与直链淀粉接触并形成复合物,这又进一步加速了直链淀粉的溶出,同时纤维素等组分的空间位阻效应阻碍了溶出的直链淀粉的分子重排,进而淀粉

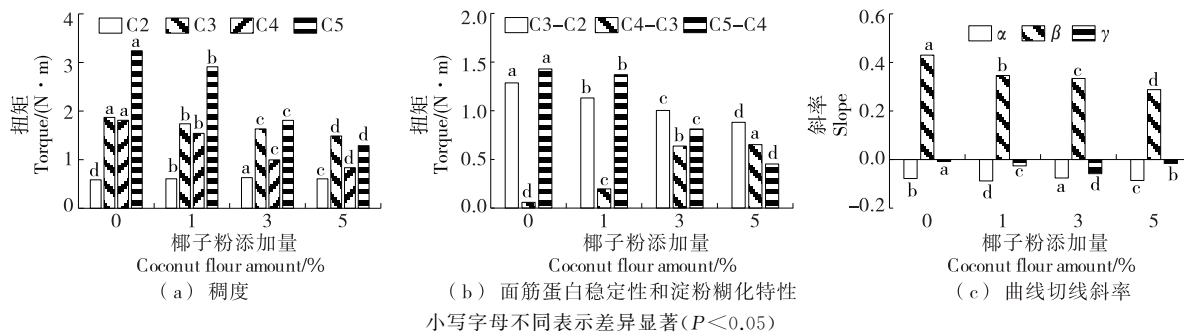


图 3 椰子粉对面团热稳定指标的影响

Figure 3 Effects of coconut powder on gelatinization characteristics of wheat flour

颗粒更快崩解^[16],淀粉的峰值黏度降低^[17]。

2.3.2 面团凝胶的热稳定性 随着椰子粉添加量的增加,C4(糊化最低黏度,表征淀粉凝胶的稳定性)显著降低($P<0.05$)、C4—C3值(表征淀粉糊化热稳定性)显著增大, γ (C3和C4之间曲线切线的斜率,表征淀粉酶解率)表现为 $y_1<y_3<y_0<y_5$,且与对照相比, y_3 和 y_5 变化幅度非常大,其C4分别降低了46.66%和53.89%,C4—C3值增加了90.74%和90.95%,且还在90℃恒温阶段的最后3min内观察到一个陡降现象。说明椰子粉的添加,显著降低了淀粉在热机械力下的凝胶稳定性。淀粉凝胶热稳定性的降低,一方面可能是体系中酶活力的增强或水解作用更强,所制冻干椰子粉中有一定活性的淀粉酶,直接增加了体系中总淀粉酶的活力;另一方面可能是椰子纤维素、脂质等组分与淀粉之间的弱作用,破坏了淀粉凝胶结构^[18],降低了稳定性。

2.3.3 淀粉的回生 C5(降温阶段最大黏度)表征了淀粉的回生,数值越大回生度越高。C5—C4值(表征淀粉老

化性质)对应于快速黏度仪(RVA)中降落值指标,表征随着温度的降低淀粉回生特性,数值越小,降落值越小。如图3(a)和图3(b)所示,随着椰子粉添加量的增加,C5和C5—C4值都显著降低($P<0.05$),当椰子粉添加量分别为3%和5%时,与对照相比C5值分别降低了44.17%和60.25%。这可能由于椰子粉脂肪可与淀粉形成复合物^[19],与纤维素的空间位阻等共同作用,从而延缓了淀粉的回生^[20]。

2.4 椰子面团的指数剖面图

Mixolab混合实验仪内置软件设计了吸水率、混合、面筋⁺、黏度、淀粉酶和回生6个指数,每个指数有10个等级刻度,可直观量化反映面粉品质。如图4所示,添加不同量的椰子粉都明显改变了中筋小麦粉品质特性:小麦粉的吸水指数随椰子粉添加量增加而降低;混合指数表征了面团面筋网络的热稳定性,添加3%椰子粉可增加面团的混合指数;椰子粉的面筋⁺指数不变;黏度、淀粉酶和回生指数变化较为明显,随椰子粉添加量增大大幅下降。

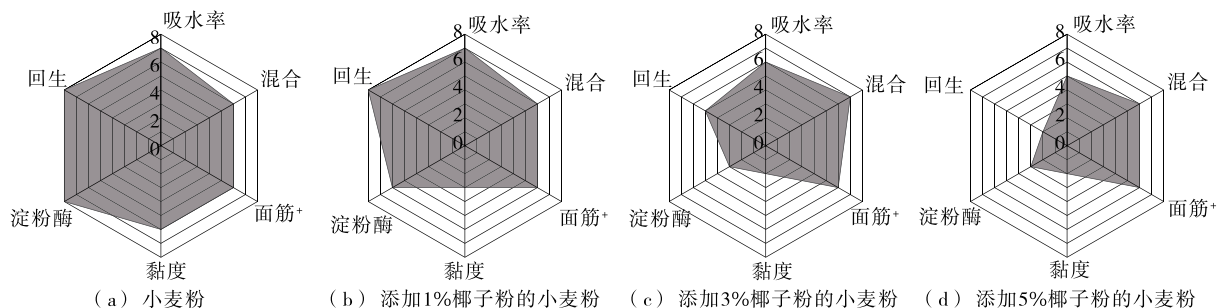


图4 椰子粉对小麦粉指数剖面图的影响

Figure 4 Effect of coconut powder on profile of wheat flour

3 结论

采用 Mixolab 混合实验仪对添加不同量椰子粉的小麦复配粉的面团热机械流变特性进行了研究,发现椰子粉对小麦粉中面筋蛋白和淀粉特性影响明显,随着椰子粉添加量的增大,复配粉的吸水率、稳定时间、峰值黏度、回生值下降,糊化速率增大,而面团形成时间、面筋蛋白弱化速率、淀粉酶解速率则表现不一。从指数剖面图看,添加1%椰子粉的复配粉与对照小麦粉的品质最为接近,而3%和5%的椰子粉显著影响了复配粉的品质,尤其对淀粉糊化、凝胶和老化特性的影响。体系中脂质、纤维素、蛋白、淀粉之间作用相当复杂,椰子粉中哪种组分起了主导作用及作用机制如何,还需后续研究。

参考文献

[1] GEORGET D M R, UNDERWOOD-TOSCANO C, POWERS S J, et al. Effect of variety and environmental factors on gluten proteins: An analytical, spectroscopic, and rheological study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(4): 1 172-1 179.

[2] 郭帅, 李艳. 椰子活性蛋白与功能肽的研究进展[J]. 食品科技, 2018, 43(5): 67-71.
GUO S, LI Y. Study progress on the active protein and functional peptides of coconut[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(5): 67-71, 76.
[3] 李夏, 苏谕涵, 谢光杰. 椰子油微胶囊制备工艺优化及其在代餐粉中的应用[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(1): 87-91.
LI X, SU Y H, XIE G J. Optimization of preparation process of coconut oil microcapsule and its application in meal substitute powder[J]. Grain and Oil, 2022, 35(1): 87-91.
[4] 沈晓君, 李瑞, 邓福明, 等. 初榨椰子油在烘焙食品中的应用[J]. 中国油脂, 2019, 44(8): 147-149.
SHEN X J, LI R, DENG F M, et al. Application of virgin coconut oil in baking field[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(8): 147-149.
[5] 彭文怡, 包杰, 陈凤香, 等. 预糊化糯米粉的添加对糯米粉 Mixolab 参数的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(9): 57-59.
PENG W Y, BAO J, CHEN F X, et al. Effect of pre gelatinized glutinous rice flour on Mixolab parameters of glutinous rice flour[J]. Grain and Oil, 2021, 34(9): 57-59.

- [6] GUILLON F, CHAMP M. Structural and physical properties of dietary fibres, and consequences of processing on human physiology[J]. Food Research International, 2000, 33(3/4): 233-245.
- [7] 郭孝源, 陆启玉, 章绍兵, 等. 不同种类油脂对面粉品质的影响研究[J]. 食品科技, 2013, 38(4): 160-164.
GUO X Y, LU Q Y, ZHANG S B, et al. Effects of different kinds of oils and fats on flour quality [J]. Food Science and Technology, 2013, 38(4): 160-164.
- [8] 张书静, 王展, 沈汪洋, 等. 膳食纤维对面团和面筋蛋白影响的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(12): 7-9.
ZHANG S J, WANG Z, SHEN W Y, et al. Research progress on the effects of dietary fiber on dough and gluten protein[J]. Grain and Oil, 2020, 33(12): 7-9.
- [9] WANG C C, YANG Z, XING J J, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the rheological properties of dough[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107008.
- [10] 张玉爽, 李景明, 倪元颖, 等. 朝鲜蓟超微粉对面团特性及馒头品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(24): 65-71.
ZHANG Y H, LI J M, NI Y Y, et al. Effects of artichoke superfine flour on dough characteristics and steamed bread quality[J]. Food Research and Development, 2020, 41(24): 65-71.
- [11] XIAO F, ZHANG X, NIU M, et al. Gluten development and water distribution in bread dough influenced by bran components and glucose oxidase [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137: 110427.
- [12] YAZAR G, KOKINI J L, SMITH B. Effect of endogenous wheat gluten lipids on the non-linear rheological properties of the gluten network[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130729.
- [13] MERT B, DEMIRKESEN I. Reducing saturated fat with oleogel/shortening blends in a baked product[J]. Food Chemistry, 2016, 199: 809-816.
- [14] LIU N, MA S, LI L, et al. Study on the effect of wheat bran dietary fiber on the rheological properties of dough [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2019, 2: 1-5.
- [15] GORANOVA Z, MARUDOVA M, BAEVA M. Influence of functional ingredients on starch gelatinization in sponge cake batter[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124997.
- [16] WANG M, ZHAO Z, NIU M, et al. Thermomechanical behaviors and protein polymerization in bread dough modified by bran components and transglutaminase[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 133: 109894.
- [17] CAI J, CHAO C, NIU B, et al. New insight into the interactions among starch, lipid and protein in model systems with different starches[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106323.
- [18] NHOUCI Z, BOTOSOA E P, CHÈNÉ C, et al. Mid infrared as a tool to study the conformational structure of starch and proteins with oil addition during gelatinization[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 157: 113093.
- [19] WANG S, CHAO C, CAI J, et al. Starch-lipid and starch-lipid-protein complexes: A comprehensive review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19: 1 056-1 079.
- [20] MILICEVIC N, SAKAC M, HADNADEV M, et al. Physico-chemical properties of low-fat cookies containing wheat and oat bran gels as fat replacers[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103056.
- (上接第 43 页)
- [5] 王家宝, 黄美凤, 杨笛, 等. 脂肪酶替代双乙酰酒石酸单双甘油酯对压面面团流变学和面包烘焙特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 38-42.
WANG J B, HUANG M F, YANG D, et al. A comparative study of lipase and diacetyl tartaric esters of mono-glycerides (DATEM) on rheological properties of dough by pressing process and baking properties of bread[J]. Food & Machinery, 2020, 36(9): 38-42.
- [6] LOKHA Y, ARANA-PENA S, RIOS N S, et al. Modulating the properties of the lipase from *Thermomyces lanuginosus* immobilized on octyl agarose beads by altering the immobilization conditions[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2020, 133: 109461.
- [7] BAUER T L, BUCHHOLZ P C F, PLEISS J. The modular structure of α/β -hydrolases[J]. The FEBS Journal, 2020, 287(5): 1 035-1 053.
- [8] HAMDAN S H, MAIANGWA J, ALI M S M, et al. Thermostable lipases and their dynamics of improved enzymatic properties[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2021, 105(19): 7 069-7 094.
- [9] PURKAYASTHA A, KANG T J. Stabilization of proteins by covalent cyclization [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2019, 24(5): 702-712.
- [10] HEMU X Y, ZHANG X H, BI X B, et al. Butelase 1-mediated ligation of peptides and proteins[J]. Enzyme-Mediated Ligation Methods, 2019, 2 012: 83-109.
- [11] CAO Y, BI X. Butelase-1 as the prototypical peptide asparaginyl ligase and its applications: A review[J]. International Journal of Peptide Research and Therapeutics, 2022, 28(1): 1-16.
- [12] CAO Y, NGUYEN G K T, TAM J P, et al. Butelase-mediated synthesis of protein thioesters and its application for tandem chemoenzymatic ligation[J]. Chem Commun (Camb), 2015, 51(97): 17 289-17 292.
- [13] 季亚美, 王立梅, 齐斌. 常压室温等离子体诱变选育高产脂肪酶解脂耶氏酵母[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 10-15.
JI Y M, WANG L M, QI B. Breeding of *Yarrowia lipolytica* with high lipase production by atmospheric room temperature plasma mutagenesis[J]. Food & Machinery, 2020, 36(11): 10-15.
- [14] HEMU X, ZHANG X, NGUYEN G K T, et al. Characterization and application of natural and recombinant butelase-1 to improve industrial enzymes by end-to-end circularization [J]. RSC Advances, 2021, 11(37): 23 105-23 112.
- [15] NAUMANN T A, SAVINOV S N, BENKOVIC S J. Engineering an affinity tag for genetically encoded cyclic peptides [J]. Biotechnol Bioeng, 2005, 92(7): 820-830.