

转谷氨酰胺酶对米粉、米面团和米面包的改良

张 帅，郭晓雪，范 靖，边 鑫，杨 杨，马春敏，刘晓飞，王 艳，张 娜

Improvement of Rice Flour, Rice Dough and Rice Bread by Transglutaminase

ZHANG Shuai, GUO Xiaoxue, FAN Jing, BIAN Xin, YANG Yang, MA Chunmin, LIU Xiaofei, WANG Yan, and ZHANG Na

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100220>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

转谷氨酰胺酶对大豆分离蛋白酶解物的吸油性与保水性的改善作用

Improvement Effect of Transglutaminase on Oil Absorption and Water Retention of Soybean Proteinase Isolates

食品工业科技. 2020, 41(10): 19–25,31 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.004>

转谷氨酰胺酶对鲤鱼肌原纤维蛋白乳化活性和凝胶特性的影响

Effect of Transglutaminase on the Emulsifying Activity Index and Gel Properties of Common Carp Myofibrillar Protein

食品工业科技. 2019, 40(6): 126–130,278 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.06.021>

转谷氨酰胺酶对即食广式腊肠品质的影响

Effect of transglutaminase on the quality of ready-to-eat cantonese sausage

食品工业科技. 2017(04): 197–201 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.04.029>

响应面优化无麸质大米面包复合改良剂配方的研究

Optimization of Gluten Free Rice Bread Composite Additives by Response Surface Methodology

食品工业科技. 2021, 42(2): 130–137 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030297>

糯米粉特性与速冻汤圆品质相关性分析

Correlation between the Characteristics of Glutinous Rice Flour and Quality of Quick-frozen Glutinous Soup Ball

食品工业科技. 2019, 40(4): 93–99 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.04.015>

马铃薯全粉-碎米混合粉的糊化特性及其挤压重组米品质

Pasting Properties of Rice Powders Blending with Potato Granule and the Quality of Restructured Potato Rice

食品工业科技. 2018, 39(17): 94–98,111 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.17.016>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张帅, 郭晓雪, 范婧, 等. 转谷氨酰胺酶对米粉、米面团和米面包的改良 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 27–35. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100220

ZHANG Shuai, GUO Xiaoxue, FAN Jing, et al. Improvement of Rice Flour, Rice Dough and Rice Bread by Transglutaminase[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 27–35. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100220

· 研究与探讨 ·

转谷氨酰胺酶对米粉、米面团和米面包的改良

张 帅, 郭晓雪, 范 婧, 边 鑫, 杨 杨, 马春敏, 刘晓飞, 王 艳, 张 娜*

(哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150076)

摘要:为改善米面包品质, 揭示转谷氨酰胺酶(TG 酶)对米粉、米面团和米面包品质的影响及各指标之间的联系, 对添加不同质量分数 TG 酶的米粉的粉质特性和糊化特性, 米面团的水分分布、流变特性和发酵特性, 以及米面包的比容、气孔和质构等指标进行了测定。结果表明, 0.60% TG 酶能够改善米粉的粉质特性和糊化特性, 将米粉的稳定时间提高至 8.00 ± 0.77 min, 峰值粘度(PV)、谷值粘度(VV)和最终粘度(FV)分别提升为 5801.00 ± 30.41 、 3805.67 ± 76.14 和 5836.33 ± 106.17 cP, 降低米粉的衰减值(BD)和回生值(SB)等糊化参数至 1990.00 ± 128.11 和 1991.67 ± 34.08 cP; 同时 TG 酶增加米面团中水分结合的紧密程度, 改善米面团的流变特性和发酵特性, 将 S_{21} 升至 $9.24\%\pm13.07\%$ 和将 T_{21} 和 T_{22} 分别降至 1.40 ± 1.80 和 30.45 ± 2.28 ms, H_m 提高至 8.60 ± 0.11 mm; 孔隙率提高至 $50.51\%\pm0.90\%$, 降低米面包的硬度、胶粘性和咀嚼性, 提高米面包的弹性, 改良米面包的质构。相关性分析表明, T_{23} 和形成时间呈负相关, H_m 与 C3、C3~C2 和 VV 呈正相关, 与 BD 和 SB 呈负相关, 咀嚼性和 C1 呈正相关, 比容与 FV 和 PV 呈正相关。实验结果说明, TG 酶可以改善米粉、米面团和米面包的品质, 且改良的各指标间存在不同程度的相关性。

关键词:转谷氨酰胺酶, 米面团, 米面包, 粉质特性, 糊化特性, 水分分布, 发酵特性, 相关性分析

中图分类号: TS213.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)20-0027-09

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2022100220](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100220)



本文网刊:

Improvement of Rice Flour, Rice Dough and Rice Bread by Transglutaminase

ZHANG Shuai, GUO Xiaoxue, FAN Jing, BIAN Xin, YANG Yang, MA Chunmin, LIU Xiaofei,
WANG Yan, ZHANG Na*

(School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

Abstract: In order to improve the quality of rice bread and reveal the effects of transglutaminase (TGase) on the quality of rice flour, rice dough and rice bread, and reveal the relationship among the indexes. The silty properties and pasting properties of TGase containing different mass fractions in rice flour, the water distribution, rheological properties and fermentation capability of rice dough, and the specific volume, gas cells and texture of bread were tested. The results showed that 0.60% TGase could improve the silty and pasting properties of rice flour, and increase the stabilization time of rice flour to 8.00 ± 0.77 min. The peak viscosity (PV), valley viscosity (VV) and final viscosity (FV) were increased to 5801.00 ± 30.41 , 3805.67 ± 76.14 and 5836.33 ± 106.17 cP, respectively. Breakdown (BD) and setback (SB) of rice flour were reduced to 1990.00 ± 128.11 and 1991.67 ± 34.08 cP. At the same time, TGase increased the tightness of water binding, improved the rheological properties and fermentation capability of rice dough, increased S_{21} to $9.24\%\pm13.07\%$, decreased

收稿日期: 2022-10-24

基金项目: 黑龙江省科技重大专项资助 (2020ZX08B02); 国家自然科学基金 (32072258); 中央财政支持地方高校发展专项资金优秀青年人才支持计划项目; 黑龙江省自然科学基金资助项目 (LH2022C047)。

作者简介: 张帅 (1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: roson5@163.com。

* 通信作者: 张娜 (1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学, E-mail: foodzhangna@vip.163.com。

T_{21} 和 T_{22} 分别由 1.40 ± 1.80 和 30.45 ± 2.28 ms 增加至 8.60 ± 0.11 mm。孔隙度增加至 $50.51\%\pm0.90\%$, 降低了大米面包的硬度、粘附性和咀嚼性, 提高了大米面包的弹性和质地。相关性分析显示, T_{23} 与形成时间呈负相关, 而 H_m 与 C_3 、 $C_3\sim C_2$ 和 VV 呈正相关。而 BD 和 SB 呈负相关, 咀嚼性与 C_1 呈正相关, 特定体积与 FV 呈正相关, 而 PV 呈负相关。结果表明, TGase 改善了大米粉、大米面团和大米面包的品质, 并且改善程度不同。

Key words: 转谷氨酰胺酶; 大米; 大米面包; 粉质特性; 烹饪性质; 水分分布; 发酵能力; 相关性分析

面包是世界上 2/3 人群的主食, 一般含有麸质成分^[1]。研究发现, 世界上约 1% 的人口表现出不同程度的麸质不耐受。针对麸质不耐受人群, 目前对其治疗的方法是坚持无麸质饮食^[2]。但无麸质面包质地易碎、面团结构薄弱、醒发不良以及韧性不足, 致使其整体可接受度较低。小麦中的麸质, 不仅有助于提高小麦粉的稳定时间和降低小麦粉的回生值, 改善小麦粉的粉质特性和糊化特性, 还能改善面包的比容、质构和气孔等多项理化特性。麸质中的醇溶蛋白和谷蛋白分别为面团提供粘性和弹性, 并且影响面团的流变和结构等品质^[3~4]。由于蛋白质的功能性可以通过交联来修饰, 因此蛋白质分子间形成分子间交联是改良无麸质面包缺陷的有效途径。研究发现, 转谷氨酰胺酶(transglutaminase, TG 酶)可以使蛋白质发生共价交联, 将可溶蛋白质转化为不溶于水的高分子聚合物, 形成稳定的蛋白质网络, 使含荞麦粉和大豆粉的小麦面包比容增大, 外观接受度更好, 取得更高的感官评分值^[5]。

大米价格低廉、营养丰富、易于消化且致敏性低, 是无麸质产品中最受欢迎的原料。除此之外, 大米蛋白质中含有丰富的赖氨酸(可以作为 TG 酶底物)。虽然已有相关研究 TG 酶对玉米和鹰嘴豆等无麸质原料的粉质特性、糊化特性和流变参数的影响^[6~7], 但是 TG 酶对米粉、米面团和米面包的影响及其各参数之间的联系仍未完全揭示。本研究以米粉、米面团以及米面包作为研究对象, 对比小麦粉及相关制品的特性参数, 分别研究了 TG 酶对米粉、米面团和米面包品质改良的作用效果, 分析各指标的相关性, 揭示 TG 酶对米粉、米面团和米面包品质改良的作用机理, 为 TG 酶在米制品中的应用提供理论依据和实践基础, 为后续改良米面包品质的添加剂和加工工艺的选择提供准确可靠的支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大米 黑龙江武昌市金河米业有限公司; 高筋小麦粉 益海小麦工业有限公司; 酵母 河北马利食品有限公司; 绵白糖 吉林省杞参食品有限公司; 盐 中国盐业股份有限公司; 黄油 山东培元粮油食品有限公司; 奶粉 齐齐哈尔市碾子山乳品有限责任公司; 鸡蛋 市售; 谷氨酰胺转氨酶(酶活力为

100 U/g) 泰兴市东圣生物科技有限公司。

HMJ-A20E1 和面机 小熊电器有限公司; VF-12 湿温自控醒发箱 沈阳市华恒伟业食品机械厂; JE1002 电子天平 上海浦春计量仪器有限公司; YLBD-3A 电烤箱 上海多力食品机械制造有限公司; Mixolab 混合实验仪 法国肖邦技术公司; TCW3.17.3.509 快速黏度分析仪 波通瑞华科学仪器有限公司; NH300 色差仪 深圳市三恩驰科技有限公司; RS-FS1406 粉碎机 合肥荣事达小家电有限公司; TA.XT-Plus 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司; NMI20 核磁共振成像仪 上海纽曼电子科技有限公司; F4 发酵流变仪 法国肖邦技术公司; MCR102 流变仪 奥地利安东帕公司。

1.2 实验方法

1.2.1 米粉制备及水分含量的测定 用粉碎机将 3.50 kg 大米研磨成粉并过 0.18 mm 孔径筛, 然后装入密封袋 4 ℃ 保存备用。按表 1 比例用电子天平将称取 TG 酶和米粉充分混合, 获得含不同质量分数 TG 酶(0、0.20%、0.40%、0.60%、0.80%)的米粉。

表 1 混合粉配制
Table 1 Mix powder configuration

实验组	质量(g)		
	小麦粉	米粉	TG酶
小麦粉	700.00	0.00	0.00
米粉	0.00	700.00	0.00
含 0.20%TG 酶的米粉	0.00	698.60	1.40
含 0.40%TG 酶的米粉	0.00	697.20	2.80
含 0.60%TG 酶的米粉	0.00	695.80	4.20
含 0.80%TG 酶的米粉	0.00	694.40	5.60

米粉和小麦粉的水分含量按照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》在 105.00 ℃ 恒重测定^[8]。每个样品重复测定三次, 取平均值。

1.2.2 米粉粉质特性的测定 参照 Santos 等^[7]的方法稍作修改, 采用 Mixolab 混合实验仪的梗米粉新协议测试方案测试表 1 混合粉的粉质特性, 小麦粉和米粉分别为对照和空白。混合实验仪运作程序如下: 首先, 将仪器温度设置为 30 ℃, 保持 8 min; 然后, 以 4 ℃/min 的速度升至 90 ℃, 并保持 7 min; 最后, 以 4 ℃/min 的速度降至 50 ℃, 并保持 5 min。整

个测定过程的搅拌速度为 80 r/min, 面团总重为 90.00 g, 加水量以满足面团在和面时最大扭矩达到 1.10 ± 0.05 nm 为准, 测试时物料如表 2。最终测得吸水率、C1(和面阶段的最大扭矩)、C2(加热阶段的最小扭矩)、C3(加热阶段的最大扭矩)、C1~C2(蛋白质弱化度)和 C3~C2(糊化速率)。

表 2 面团的制备
Table 2 Preparation of dough

实验组	混合粉(g)	水(g)
小麦粉	55.29	34.71
米粉	51.58	38.42
含 0.20% TG 酶的米粉	51.99	38.91
含 0.40% TG 酶的米粉	51.99	38.91
含 0.60% TG 酶的米粉	51.99	38.91
含 0.80% TG 酶的米粉	51.99	38.91

1.2.3 米粉糊化特性的测定 参照 Palabiyik 等^[9]的方法稍作修改, 用 TCW 3.17.3.509 快速粘度分析仪分析表 1 混合粉的糊化特性, 小麦粉和米粉分别为对照和空白。分别取表 1 中 4.00 g 物料置于样品池, 然后加入 25.00 mL 蒸馏水, 用仪器自带的塑料搅拌器混匀后上机测试。测试程序: 初始搅拌速度为 960 r/min, 持续 10 s, 然后搅拌速度控制在 160 r/min。首先, 以 10 °C/min 的速率将样品加热至 50 °C; 然后, 在 50 °C 下保持 1 min 之后, 以 12 °C/min 的速率将样品继续加热至 95 °C, 并保持 2.50 min; 最后, 以 12 °C/min 的速度将样品冷却至 50 °C, 并持续 2 min。获得 VV(谷值粘度)、PV(峰值粘度)、FV(最终粘度)、BD(衰减值)和 SB(回生值)等糊化参数。每个样品重复测定三次, 取平均值。

1.2.4 米面团水分分布的测定 参照 Niu 等^[10]的方法稍作修改, 使用 NMI20 低场核磁分析表 1 混合粉所制成面团的水分分布, 小麦粉和米粉分别为对照和空白。分别取表 1 中 10.00 g 物料加入水(按表 2 最佳吸水率添加水)揉搓成团后, 将面团用聚乙烯保鲜膜包裹放置 30.00 min, 切 2.00~3.00 g 面团用聚乙烯保鲜膜包裹并放入试管中进行测试, 使用 Carr-Purcell-Meibom-Gill(CPMG)脉冲序列测定面团的 T_2 (横向弛豫时间)。通过分布指数拟合分析面团的 T_2 , 以此来获得面团的 T_{21} (结合水横向弛豫时间)、 T_{22} (不易流动水横向弛豫时间)和 T_{23} (自由水横向弛豫时间), 并通过累积积分确定面团相应的 S_{21} (结合水含量)、 S_{22} (不易流动水含量)和 S_{23} (自由水含量)。每个样品重复测定三次, 取平均值。

1.2.5 米面团流变特性的测定 参照 Li 等^[11]的方法稍作修改, 用 MCR102 流变仪分析表 1 混合粉的所制成面团的流变特性, 小麦粉和米粉分别为对照和空白。分别取表 1 中 10.00 g 物料加入水(按表 2 最佳吸水率添加水)揉搓成团后, 将得到的面团用聚乙烯保鲜膜包裹放置 30 min, 然后将面团用擀面杖制

成厚度为 2.00 mm 的面皮, 立即将面皮放到流变仪上, 刮除多余的面皮。选取直径 40.00 mm 平板, 设定两板之间的间隙为 2.00 mm。在 30 °C 下, 面团以 0.50% 的应变进行范围为 0.1~40 Hz 的对数频率扫描, 共记录了 21 个检测点, 获得面团在频率扫描过程中的 G'(储能模数)和 G''(损耗模数)。

1.2.6 米面团发酵特性的测定 参照 Cao 等^[12]的方法稍作修改, 用 Chopin Technologies 发酵流变仪测定表 1 混合粉所制成面团的发酵力, 小麦粉和米粉分别为对照和空白。分别取表 1 中 200.00 g 物料、2.40 g 干酵母和 4.00 g 盐加入水(按表 2 最佳吸水率减去 2.00 % 添加水)和成面团, 取 315.00 g 面团迅速置于发酵篮中, 将面团用手压平至发酵篮的孔隙之下, 安上未放置圆柱形砝码的活塞开始测量。面团在 35 °C 下发酵 3 h 得到面团在发酵过程中的 Hm(最大高度)、Tx(开始泄露 CO₂ 的时间)和 R(气体保持系数)。

1.2.7 面包制作工艺 分别取表 1 物料 200.00 g, 加入 12.00 g 奶粉和 36.00 g 白糖均匀, 获得干料。称量 16.00 g 蛋液获得湿料 A; 将 2.40 g 酵母用少量 38±2 °C 的温水活化 5 min, 获得湿料 B。

将干料、湿料 A 和湿料 B 混合均匀, 加剩余的温水(总用水量为吸水率的 85.00%)^[13], 揉搓成团后加入 16.00 g 黄油, 待黄油融入面团后再加入 1.60 g 盐搅拌后获得最终面团。称取 300.00 g 面团在环境湿度为 85.00%、温度为 37 °C 的醒发箱中醒发 2 h 后, 放入上火 185 °C, 下火 180 °C 的烤箱中烤 20 min 取出, 获得面包。

1.2.8 米面包比容的测定 比容的测定参照 Kim 等^[14]的方法稍作修改。面包充分冷却后称量面包的重量。将面包包裹在两层聚乙烯薄膜中(抑制水的渗透), 然后浸入水中以获得面包的体积。每个面包重复测量三次, 取平均值。然后使用以下公式计算每个面包的比容:

$$\text{比容}(\text{mL/g}) = \frac{V}{M}$$

式中: V 为面包体积, mL; M 为面包质量, g。

1.2.9 米面包气孔的测定 参照 Santos 等^[7]的方法稍作修改。烘焙出炉的面包在室温冷却 2.00 h 后, 切成厚度为 25.00 mm 薄片, 采集照片后用 image 软件对面包的孔隙率进行分析。

1.2.10 质构的测定 参照 Calle 等^[15]的方法稍作修改, 采用 TA.XT-Plus 质构仪测定面包的质构。面包冷却 2.00 h 后, 从每个面包中心取三个 2.00 cm×2.00 cm×3.00 cm 的面包芯用于质构检测, 取样时避免选取大气孔区域。使用直径为 25.00 mm 的圆柱形探头, 探头以 1.00 mm/s 的下降速度进行试验, 探头下压距离为 37.00 mm, 面包的压缩深度为 50.00%。根据压缩曲线计算硬度、弹性、胶粘性和咀嚼性。每

个样品重复三次, 取平均值。

1.3 数据处理

数据分析运用 SPSS 19 软件进行单因素方差分析(ANOVA), 平均数之间的显著差异通过 Duncan 确定。当 $P<0.05$ 时, 差异显著, 数据显示为平均值±标准差。采用 Origin 绘制图形和采用皮尔逊检验进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 TG 酶对米粉粉质特性的影响

混合实验仪能够描述加热和冷却期间面团的稠度, 测量米粉的蛋白质和淀粉特性。如表 3 所示, 纯米粉的吸水率($68.80\% \pm 1.92\%$)高于小麦粉的吸水率($60.00\% \pm 1.72\%$), 可能是由于米粉中高含量的淀粉破损导致吸水率升高^[16]。添加 TG 酶后, 米粉的吸水率进一步升高, 这与单成俊等^[17]用 TG 酶作用于糯小麦粉后吸水率升高的结论一致, 可能是添加 TG 酶后, 米蛋白中谷氨酰胺残基和赖氨酸残基之间通过 ϵ -(γ -谷氨酰基)赖氨酸异肽键连接后使整个米蛋白的持水能力增强, 也可能是脱氨基化反应使谷蛋白分子内的谷氨酰胺水解生成亲水性更强的谷氨酸残基, 致使蛋白质亲水性的增强^[18]。吸水率升高有利于降低米面包因水分含量少而产生的淀粉回生、开裂和收缩, 从而提高米面包品质。在米粉中 TG 酶含量持续增加, 吸水率保持不变(70.40%), 但 C1 值逐渐降低($1.12\sim 1.05\text{ Nm}$), 说明在相同加水量条件下 TG 酶含量的增加使米面团搅拌的扭矩越来越小, 即面团越来越软。稳定时间代表米面团的耐揉性, 稳定时间越长, 米面团越耐揉。米粉的稳定时间比小麦粉短, TG 酶的添加使得米粉的稳定时间升高, 米粉中含 0.60%TG 酶时稳定时间高达 $8.00 \pm 0.77\text{ min}$ (最高), 这可能与 TG 酶催化蛋白质与蛋白质之间形成交联, 使蛋白的二硫键更牢固, 增加米面团的延伸性有关, 因此米面团稳定时间增加^[17]。与含 0.60%TG 酶的米粉相比, 含 0.80%TG 酶的米粉稳定时间有所降低, 这可能是因为交联过度破坏了部分蛋白和淀粉分子网络结构。C1~C2 是米面团对机械搅拌的承受能力, 该值越大表明米面团不易成型, 易塌陷。与纯米粉相比($0.60 \pm 0.03\text{ Nm}$), 添加 TG 酶后的米粉 C1~C2 值均降低 TG 酶含量为 0.60% 时达到最低值($0.40 \pm$

0.01 Nm), 因此添加 TG 酶的米面团不易塌陷而易于成型。C3~C2 代表淀粉的糊化特性, 该值越大说明越容易糊化。和纯米粉相比($1.36 \pm 0.10\text{ Nm}$), 添加 TG 酶后米粉易于糊化, 其中 TG 酶含量为 0.40% 时米粉最易糊化($1.54 \pm 0.12\text{ Nm}$)。形成时间是指粉质从加水开始至达到最大稠度所需要的时间, 既反映粉质水合速度的快慢, 也表明蛋白网络结构的强弱^[7]。米粉的形成时间比小麦粉低, 一方面是小麦面团的吸水速率低于米面团(与最佳吸水率有关), 另一方面是小麦面团最后所形成的蛋白网络结构强于米面团(与稳定时间有关)。随着纯米粉中 TG 酶含量的增加, 米面团形成时间呈现先减后增的趋势(米粉中含 0.4%TG 酶时面团形成时间最短)。仅从粉质特性角度分析, 米粉中含 0.60%TG 酶时改良的效果最优。

2.2 TG 酶对米粉糊化特性的影响

糊化特性在一定程度上反映面制品的品质, 这对于面包品质有一定的参考价值。PV 是淀粉膨胀至极限(即将破裂)的粘度, VV 代表加热阶段结束时的最低粘度, FV 是测试结束时粘度。BD 代表热糊稳定性, SB 反映冷糊稳定性, BD 和 SB 是判断米面包老化的常用指标, 其值越大米面包越易老化^[19]。如表 4 所示, 与小麦粉相比, 米粉的 PV、VV、BD、FV 和 SB 较高。Bruneel 等^[20]表明, 当用 DTT 破坏蛋白的网络结构时面粉的黏度降低。本实验中添加 TG 酶后米粉粘度增加, 这可能与 TG 酶增强蛋白网络结构有关。因为 TG 酶可以增加米粉的最终粘度, 因此使米粉易于糊化而被淀粉酶水解, 更有利于人体的消化吸收。当米粉中含 0.60%TG 酶时, 米粉的 PV、VV 和 FV 均达到最高, 分别为 5801.00 ± 30.41 、 3805.67 ± 76.14 和 $5836.33 \pm 106.17\text{ cP}$ 。随着 TG 酶含量的进一步增大, 蛋白质与水的共价结合增强导致淀粉对水的竞争力相对减弱, 与淀粉结合的水量减少, 从而抑制淀粉溶胀, 使淀粉不易糊化^[21], 因此含 0.80%TG 酶的米粉最终粘度低于含 0.60%TG 酶。与小麦粉相比, 米粉的 BD 和 SB 值较大, 而 TG 酶的加入降低了米粉的 BD 和 SB, 可能是 TG 酶交联形成的蛋白网络结构可以构建一个更连续的相, 淀粉颗粒镶嵌其中, 因此当淀粉吸水溶胀即将破裂时被周围的蛋白网络所抑制, 从而降低米粉的 BD 和 SB, 抑制米面

表 3 不同 TG 酶含量对米粉粉质特性的影响

Table 3 Effects of different TGase content on the properties of rice flour

酶含量(%)	最佳吸水率(%)	扭矩(Nm)					稳定时间(min)	形成时间(min)
		C1	C2	C3	C1~C2	C3~C2		
小麦粉	$60.00 \pm 1.72^{\text{c}}$	$1.07 \pm 0.14^{\text{c}}$	$0.48 \pm 0.01^{\text{d}}$	$1.88 \pm 0.16^{\text{c}}$	$0.59 \pm 0.02^{\text{a}}$	$1.40 \pm 0.11^{\text{b}}$	$7.10 \pm 0.68^{\text{b}}$	$3.35 \pm 0.30^{\text{a}}$
0.00	$68.80 \pm 1.92^{\text{b}}$	$1.12 \pm 0.19^{\text{a}}$	$0.52 \pm 0.03^{\text{c}}$	$1.89 \pm 0.17^{\text{c}}$	$0.60 \pm 0.03^{\text{a}}$	$1.36 \pm 0.10^{\text{c}}$	$3.50 \pm 0.32^{\text{d}}$	$1.02 \pm 0.07^{\text{b}}$
0.20	$70.40 \pm 2.07^{\text{a}}$	$1.10 \pm 0.17^{\text{b}}$	$0.63 \pm 0.08^{\text{ab}}$	$2.14 \pm 0.16^{\text{b}}$	$0.46 \pm 0.02^{\text{b}}$	$1.51 \pm 0.12^{\text{b}}$	$6.30 \pm 0.60^{\text{c}}$	$0.87 \pm 0.05^{\text{c}}$
0.40	$70.40 \pm 2.09^{\text{a}}$	$1.07 \pm 0.15^{\text{c}}$	$0.62 \pm 0.06^{\text{b}}$	$2.16 \pm 0.19^{\text{a}}$	$0.45 \pm 0.01^{\text{b}}$	$1.54 \pm 0.12^{\text{a}}$	$6.50 \pm 0.52^{\text{c}}$	$0.78 \pm 0.04^{\text{d}}$
0.60	$70.40 \pm 1.98^{\text{a}}$	$1.05 \pm 0.15^{\text{c}}$	$0.65 \pm 0.09^{\text{a}}$	$2.15 \pm 0.18^{\text{b}}$	$0.40 \pm 0.01^{\text{d}}$	$1.50 \pm 0.11^{\text{b}}$	$8.00 \pm 0.77^{\text{a}}$	$0.87 \pm 0.05^{\text{c}}$
0.80	$70.40 \pm 1.96^{\text{a}}$	$1.05 \pm 0.14^{\text{c}}$	$0.65 \pm 0.08^{\text{a}}$	$2.16 \pm 0.19^{\text{a}}$	$0.40 \pm 0.01^{\text{c}}$	$1.51 \pm 0.12^{\text{b}}$	$7.60 \pm 0.73^{\text{b}}$	$1.05 \pm 0.08^{\text{b}}$

注: 每列不同的上标小写字母代表浓度之间的差异显著($P<0.05$); 表4~表7同。

表 4 不同 TG 酶含量对米粉糊化特性的影响
Table 4 Effects of different TGase content on gelatinization characteristics of rice flour

酶含量(%)	粘度(cP)				
	PV	VV	BD	FV	SB
小麦粉	3432.67±32.01 ^d	2358.67±44.74 ^e	1062.33±30.53 ^d	3780.33±51.08 ^e	1429.00±8.00 ^d
米粉	5655.33±115.60 ^c	3457.67±67.06 ^b	2197.67±94.82 ^a	5580.00±74.08 ^d	2122.33±7.02 ^a
0.20	5651.33±43.68 ^c	3669.67±156.15 ^c	2053.00±64.90 ^b	5638.33±108.51 ^c	2039.33±115.63 ^b
0.40	5779.67±20.74 ^b	3726.67±82.37 ^b	1981.67±140.01 ^c	5766.00±104.31 ^b	1968.67±58.23 ^c
0.60	5801.00±30.41 ^a	3805.67±76.14 ^a	1990.00±128.11 ^c	5836.33±106.17 ^a	1991.67±34.08 ^c
0.80	5670.67±229.24 ^c	3680.67±116.00 ^c	1995.33±81.38 ^c	5672.33±131.80 ^c	2030.67±31.82 ^b

包的老化从而提高储藏性能^[22]。其中, TG 酶含量为 0.40% 时, 米粉的 BD 和 SB 降至最低, 分别为 1981.67±140.01 和 1968.67±58.23 cP, 具有较好的抗老化效果。糊化特性结果表明, 当 TG 酶含量为 0.60% 时米粉易于糊化。不仅因为测量时粉与水的比例相差太大, 更因 Mixolab 和 RVA 仪器测定对象和目的不一样。Mixolab 前段需要模拟面团揉混, 需要持续更长时间, 所以其最低扭矩是蛋白弱化后的值, 而 RVA 针对的就是淀粉的糊化过程, 因此糊化测定的结果与 2.1 部分中粉质特性的 C3~C2 结果不完全相同。

2.3 TG 酶对米面团水分分布的影响

粉中各种颗粒与水发生水合作用, 形成具有黏弹性的面团。面团中水分的分布影响着面团多种性质, 与面团的品质有很大关系。如表 5 所示, 本实验中横向弛豫时间分布曲线有 3 个 CMPG 质子群: T₂₁、T₂₂ 和 T₂₃, T₂₁ 代表与蛋白网络紧密结合的结合水, T₂₂ 对应于蛋白网络内部存在的不易流动水, T₂₃ 代表蛋白网络结构之外的自由水^[22]。T₂ 时间越低表明水与蛋白质的结合越紧密, S 值越小代表该部分水分的含量越低。与小麦面团相比, 纯米面团的 T₂₃ 值较高, 即米面团中自由水的结合程度低于小麦粉。和纯米粉相比, 当 TG 酶含量为 0.40% 时米面团中 S₂₁ 为 21.02%±0.21%, 此时米面团中 S₂₂ 和 S₂₃ 最低, 因为一定含量的 TG 酶交联米蛋白后米蛋白与淀粉等大分子物质形成更加稳定的蛋白网络体系, 有助于提高面团的持水能力, 将部分不易流动水与自由水转变为结合水。随着 TG 酶含量增加, 米面团的 T₂₂ 减少, 当米粉中含 0.80% TG 酶时米面团的 T₂₂ 降至 28.45±0.04 ms, 因为偶极子之间的相互

作用变弱致使蛋白质聚集降低氢质子的弛豫时间, 所以 TG 酶使米面团中的不易流动水的结合程度较为紧密。综上, 米面团中水分结合程度不如小麦面团, 而 TG 酶可通过增加米面团中 T₂₂ 和 S₂₁ 来提高米面团的水分结合程度。相比之下, 含 0.40% TG 酶的米面团 S₂₁ 最大, 其持水力最强, 对米面团中水分分布改良效果最优。

2.4 TG 酶对米面团流变特性的影响

面团流变性的检验评价是谷物加工的基础。通常来讲, 米粉对面团的流变性的影响主要是通过影响蛋白网络的形成和结构来实现。图 1 为米面团的 G'、G" 和 tanδ 随着频率变化的曲线。G' 反映弹性物质的类固性质, G" 反映粘性物质的类液性质, tanδ 是 G" 与 G' 的比值^[23]。由图 1A 和图 1B 可知, 与小麦粉面团相比, 米面团的 G' 和 G" 值较高, TG 酶降低米面团的 G' 和 G", 使米面团的流变特性接近于小麦面团。Tomi 等^[24] 通过将 0.50% TG 酶加入含有米蛋白的小米面团后也观察到 G' 与 G" 降低的现象。研究蛋白质聚合与流变性的关系发现, 当蛋白质发生聚合时 G' 和 G" 下降, 本实验发现 G' 与 G" 下降, 可能是 TG 酶聚合米蛋白而造成^[25]。也可能与米面团水分分布有关, TG 酶通过增加米面团中水分结合的紧密程度使米面团的抗变形能力降低而软化^[26]。由图 1C 可知, 所有面团的 tanδ 均小于 1.00, 说明面团弹性要比面团粘性大, 具有类固性质。且面团 tanδ 随频率的增加而升高, 说明面团在迅速变形时具有更强的液体性质^[27]。与小麦面团相比, 米面团的 tanδ 较低, TG 酶含量的增加使米面团的 tanδ 升高, 说明 TG 酶使米面团从弹性固体向粘性液体转变, 接近小

表 5 不同 TG 酶含量对米面团水分分布的影响
Table 5 Effects of different TGase content on water distribution in rice dough

酶含量(%)	时间(ms)			含量(%)		
	T ₂₁	T ₂₂	T ₂₃	S ₂₁	S ₂₂	S ₂₃
小麦粉	0.00±0.00 ^c	49.76±0.56 ^a	220.76±21.75 ^c	0.00±0.00 ^c	99.46±0.02 ^a	0.54±0.02 ^a
米粉	0.00±0.00 ^c	32.37±0.38 ^b	407.19±74.71 ^b	0.00±0.00 ^c	99.90±0.02 ^a	0.10±0.02 ^{cd}
0.20	0.00±0.00 ^c	32.48±0.03 ^b	464.73±165.11 ^b	0.00±0.00 ^c	99.72±0.08 ^a	0.28±0.08 ^{bcd}
0.40	3.76±0.00 ^a	30.56±3.47 ^c	733.93±49.15 ^a	21.02±0.21 ^a	78.94±0.21 ^b	0.04±0.01 ^d
0.60	1.40±1.80 ^b	30.45±2.28 ^c	618.29±298.20 ^{ab}	9.24±13.07 ^b	90.40±12.86 ^a	0.36±0.21 ^{ab}
0.80	0.00±0.00 ^c	28.45±0.04 ^d	271.44±97.14 ^c	0.00±0.00 ^c	99.70±0.10 ^a	0.30±0.10 ^{abc}

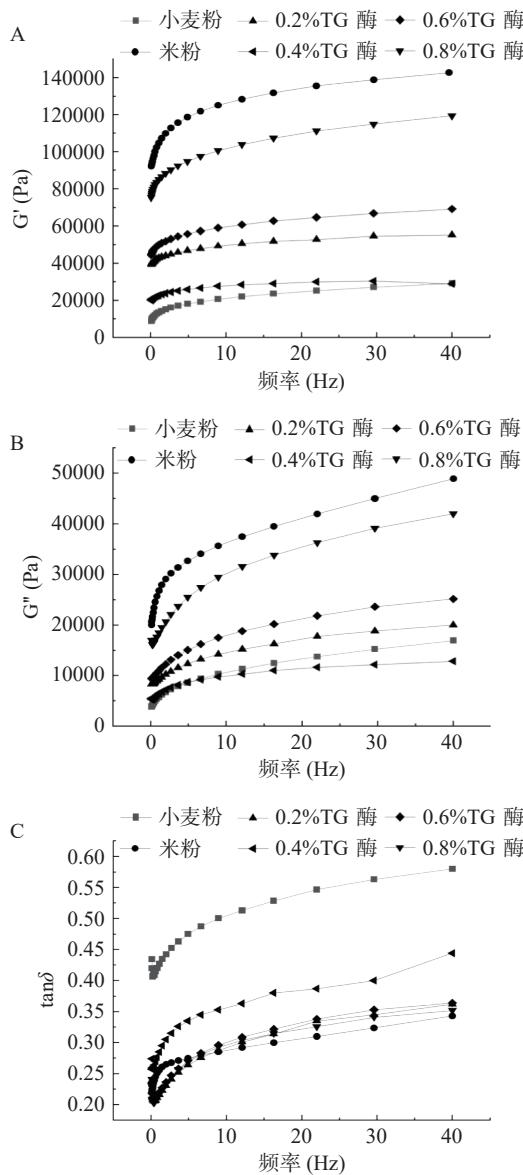


图 1 不同 TG 酶含量对米面团流变特性的影响

Fig.1 Effects of different TGase addition levels on rheological properties of rice dough

注: A: 储能模量; B: 损耗模量; C: 损耗角正切。

麦面团的流变性质。从流变特性来看,米面团比小麦面团硬,TG 酶使米面团从弹性固体向粘性液体转变,其中 0.40% TG 酶的作用效果最好,最接近小麦面团的流变特性。

2.5 TG 酶对米面团发酵特性的影响

面团的发酵能力是保证发酵面制品的关键因

素,通常以面团发酵过程中的膨胀体积和产气能力来评估。Hm 与米面包的比容有关,综合反映米面团的产气性和持气性;Tx 和 R 与米面团持气性有关,Tx 越大表明 CO₂ 气体溢出晚,即持气性好;R 为保留 CO₂ 与总 CO₂ 的比值,R 越大表明米面团持气性越好^[28]。如表 6 所示,与小麦面团相比,米面团的 Hm 值较小。一方面,米面团的产气性(总 CO₂ 体积)弱于小麦面团。另一方面,米面团的蛋白网络结构较差,使米面团的持气性差,出现 Tx 时间短(面团气体过早的出现损失),即产气性和持气性差,严重限制了米面团的 Hm^[29]。TG 酶能在一定程度上改良米面团的发酵特性,将面团的 Hm 从 7.00±0.06 mm 提高至 8.90±0.13 mm,这主要是 TG 酶能增加米面团的持气性,将米面团的 R 值从 84.90%±0.35% 提升至 86.20%±0.25%。米面团的持气性主要取决于流变特性,所以 TG 酶通过交联米蛋白获得与小麦面团类似的流变特性有助于截留 CO₂,提高米面团的持气性,改良米面团的发酵特性,但是交联过度破坏了部分蛋白和淀粉分子网络结构降低米面团持气性^[12]。从发酵特性来看,米面团的产气和持气性低于小麦面团,TG 酶在一定程度上改良米面团的持气性,其中 0.4% TG 酶的持气性最好。

2.6 TG 酶对米面包比容的影响

比容是米面包品质的主要参数^[30]。如图 2 可知,小麦面包比容(2.50±0.19 mL/g)明显高于米面包(1.49±0.15 mL/g),不同含量的 TG 酶均能提高米面包的比容(1.51~1.67 mL/g),改良米面包的品质。当 TG 酶含量为 0.40% 时米面包的比容最大(1.67±0.17 mL/g),此结果与含 0.40% TG 酶的米面团持气性最好相符。随着米粉中 TG 酶含量的进一步提高,但随着 TG 酶添加量增加,蛋白聚合程度升高,面包内部组织结构致密、紧实,发酵性能降低,造成面包比容减小。米面包的比容出现一定的下降。所以,米粉中含 0.40% TG 酶时米面包的比容最大,但是与小麦面包的比容还是存在一定的差距。

2.7 TG 酶对米面包气孔的影响

一般来说,气孔结构数量多、分布均匀、大小统一的米面包其品质较好、口感最佳^[7]。如图 3 所示,和小麦面包相比,米面包的气孔较少,孔隙率低。随着 TG 酶含量的增加,米面包的孔隙率呈现先增后减

表 6 不同 TG 酶含量对米面团发酵力的影响

Table 6 Effects of different TGase content on fermentation capacity of rice dough

酶含量(%)	Hm(mm)	Tx(min)	总CO ₂ (mL)	损失CO ₂ (mL)	R(%)
小麦粉	35.80±0.32 ^a	88.50±3.02 ^a	2357.00±9.78 ^a	245.00±0.92 ^a	99.90±0.31 ^a
米粉	7.00±0.06 ^e	37.50±1.48 ^c	1436.00±6.13 ^b	217.00±0.83 ^c	84.90±0.35 ^c
0.20	7.90±0.07 ^d	33.00±1.35 ^d	1407.00±7.92 ^c	222.00±0.70 ^c	84.30±0.23 ^c
0.40	8.90±0.13 ^b	40.50±1.52 ^b	1318.00±5.42 ^d	183.00±0.82 ^d	86.20±0.25 ^b
0.60	8.60±0.11 ^c	31.50±1.22 ^d	1441.00±6.82 ^b	235.00±0.78 ^b	83.70±0.46 ^d
0.80	8.40±0.09 ^c	30.50±1.09 ^d	1395.00±6.24 ^c	239.00±0.85 ^b	82.80±0.49 ^e

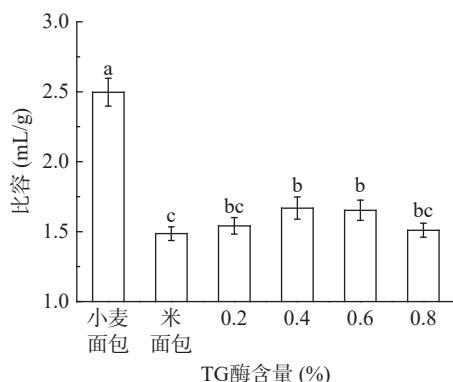


图 2 不同 TG 酶含量对米面包的比容的影响

Fig.2 Influence of different TGase content on specific volume of rice bread

注: 图中不同小写字母表示差异显著 $P<0.05$ 。

的趋势, 其中 0.60% TG 酶的米面包的孔隙率最高 ($50.51\%\pm0.90\%$), 与小麦面包的孔隙率 ($50.80\%\pm0.65\%$) 相近, 因为一定含量的 TG 酶使米面团中的米蛋白交联, 形成更均匀、完整的蛋白网络, 其持气性增强。所以从气孔来看含 0.60% TG 酶的米面包孔隙率大、气孔较明显而品质最好。

2.8 TG 酶对米面包质构的影响

硬度、胶粘性和咀嚼性数值越大, 米面包表现为缺乏弹性, 质地较差。由表 7 可知, 和小麦面包相比, 米面包的硬度、胶粘性和咀嚼性较高, 弹性较低。TG 酶降低米面包的硬度、胶粘性和咀嚼性, 增加米面包的弹性。0.40% TG 酶将米面包的胶粘性从 2.28 ± 0.53 N 降至 1.54 ± 0.40 N。随着 TG 酶含量的增加, 米面包的硬度降低并逐渐接近小麦面包, 因为 TG 酶增加米面包孔隙率, 使面包变软而出现硬度下降。米面包的弹性随着 TG 酶含量增大呈现先增后降, 0.40% TG 酶将米面包的弹性从 12.75 ± 0.54 mm 升至 13.17 ± 0.76 mm, 与小麦面包的 13.18 ± 1.28 mm

相接近。所以, TG 酶通过降低硬度、胶粘性和咀嚼性, 提高弹性来改良米面包的质构性能, 其中米粉中含 0.40% TG 酶和 0.60% TG 酶时米面包结构更为蓬松, 口感更为柔软, 在咀嚼时, 耐咀嚼性较好且所需要的能量相对较小, 与小麦面包的质构参数相近。

2.9 米粉、米面团和米面包各指标之间的相关性分析

图 4 为米粉、米面团和米面包各指标间相关性分析图。TG 酶的添加, 增加了米粉的 C3、C3~C2、PV、VV 和 FV, 降低了米粉的形成时间、C1、BD、SB。米面团的形成时间能反映米面团的吸水情况, T_{23} 和形成时间呈负相关 ($R^2=-0.92, P<0.05$), 即米面团自由水结合程度的降低与形成时间的变短有关, 所以 TG 酶降低米面团的 T_{23} 。Hm 的影响因素持气性与米面团中蛋白网络结构有关, 而蛋白网络结构可以构建一个更连续的相, 使得淀粉颗粒镶嵌在其中影响米粉的糊化特性, 因此 Hm 与 C3 ($R^2=0.89, P<0.05$)、C3~C2 ($R^2=0.91, P<0.05$) 和 VV ($R^2=0.91, P<0.05$) 呈正相关, 与 BD ($R^2=-0.97, P<0.01$) 和 SB ($R^2=-0.98, P<0.01$) 呈负相关, 由此可见 TG 酶增加米面团的 Hm 后米面包易于糊化且不易老化。C1 越小说明搅拌时扭矩较小, 即米面团较软, 而咀嚼性是将米面包咀嚼成能够吞咽状态所需要的能量, 其值越小代表米面包越柔软, 因此咀嚼性和 C1 呈正相关 ($R^2=0.90, P<0.05$), 所以 TG 酶降低米面包的咀嚼性与米粉的 C1 降低有关。粘度较高有利于与面筋蛋白相互作用产生更强的网络结构, 改良蛋白网络结构的持气性, 使得面包比容增大^[31], 所以比容与 FV ($R^2=0.96, P<0.05$) 和 PV ($R^2=0.94, P<0.05$) 呈正相关。并且与小麦粉相比, 米粉中缺少为面团提供粘性的醇溶蛋白, 说明了 TG 酶通过增加粘度而改良无面筋米面包的应用是合理的。通过相关性分析表明, 米粉、米面团和米面包各指标之间存在显著的相关性, TG 酶通

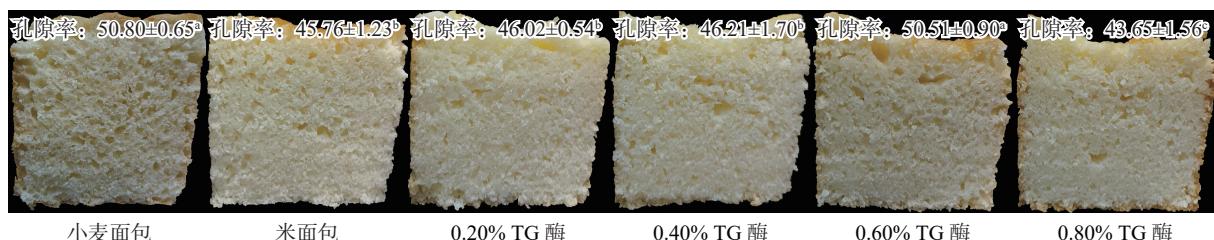


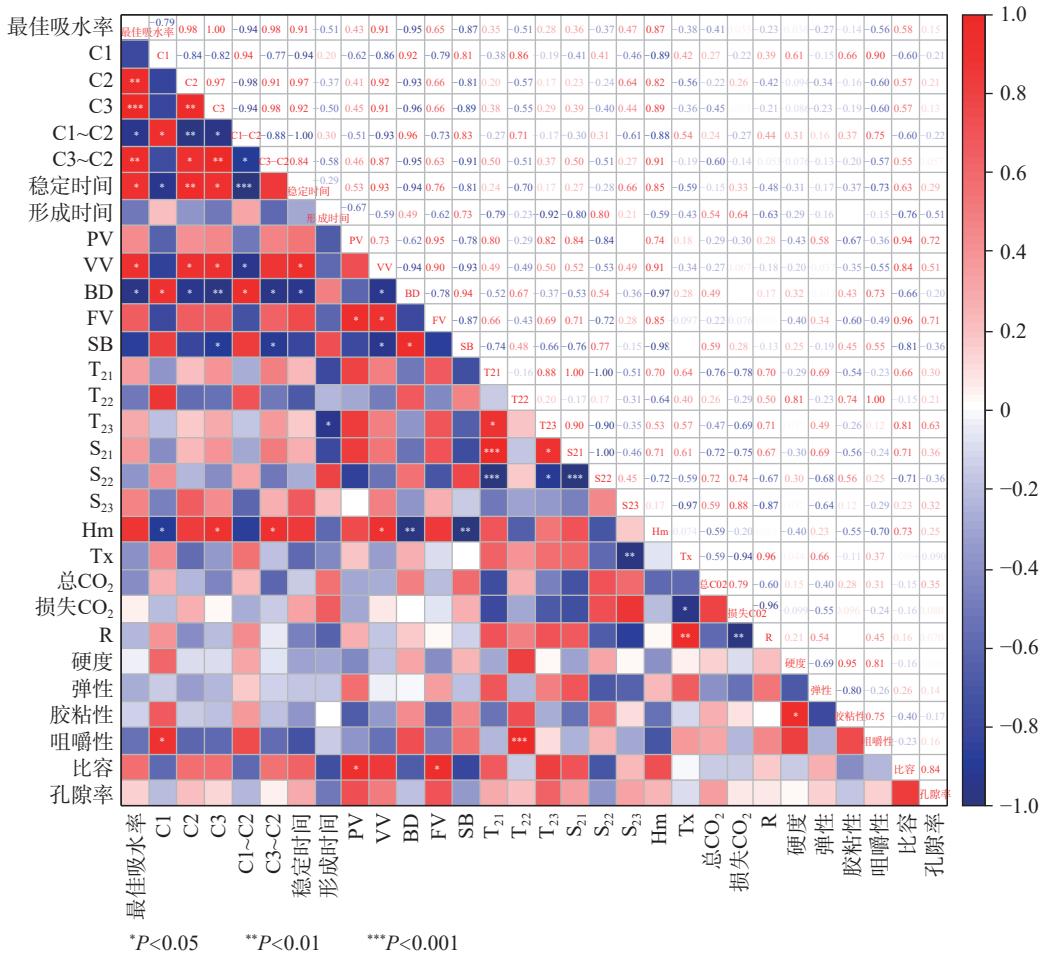
图 3 不同 TG 酶含量对米面包的气孔的影响

Fig.3 Effects of different TGase content on stomata of rice bread

表 7 不同 TG 酶含量对米面包的质构的影响

Table 7 Effects of different TGase content on texture of rice bread

酶含量(%)	硬度(N)	弹性(mm)	胶粘性(N)	咀嚼性(mJ)
小麦粉	1.75 ± 0.23^d	13.18 ± 1.28^a	1.06 ± 0.12^a	14.07 ± 2.76^{ab}
米粉	3.85 ± 0.90^a	12.75 ± 0.54^b	2.28 ± 0.53^b	28.87 ± 5.71^c
0.20%	3.75 ± 0.14^a	11.44 ± 0.44^b	3.38 ± 0.06^c	28.70 ± 2.18^c
0.40%	3.34 ± 0.82^b	13.17 ± 0.76^a	1.54 ± 0.40^{ab}	20.21 ± 4.43^b
0.60%	3.24 ± 0.60^b	12.54 ± 0.24^b	1.60 ± 0.07^{ab}	20.10 ± 0.44^b
0.80%	2.57 ± 1.60^c	12.27 ± 0.51^b	1.65 ± 0.93^{ab}	12.91 ± 0.95^a



*P<0.05 **P<0.01 ***P<0.001

图 4 米粉、米面团和米面包各指标之间的 Pearson 相关系数矩阵

Fig.4 Pearson correlation coefficient matrix of rice flour, rice dough and rice bread

过影响米粉的粉质特性和糊化特性,从而改良了米面团的T₂₃和Hm,降低米面包的咀嚼性和提高比容。

3 结论

本研究通过在米粉中添加转谷氨酰胺酶,探究转谷氨酰胺酶对米粉、米面团和米面包的影响,得出以下结论:相比小麦粉,米粉稳定时间短和易老化;米面团中水分结合程度不够紧密,呈现弹性固体的流变特性,且持气性能差;米面包的比容小、孔隙率低、质构差。添加TG酶能够改善米粉的粉质特性和糊化特性;同时增加米面团中水分结合的紧密程度,改善米面团的流变特性和持气性;增加米面包的比容,改善气孔和质构,使米面包的咀嚼性降低,从而解决因缺乏面筋蛋白而导致的米粉、米面团和米面包品质不良的问题。相关性分析表明,转谷氨酰胺酶通过影响米粉的粉质特性和糊化特性改善米面团的水分分布和发酵特性,使米面包的咀嚼性降低和比容提高。但是与小麦面包的硬度、咀嚼性还是存在一定的差距,这方面在以后的研究中可以结合加工工艺进行深入研究探讨,提高米面包的可接受度,使米面包得以商品化、市场化。

参考文献

[1] 胡宇薇,高梦祥.气相离子迁移色谱解析白砂糖和黄油对面包感官品质和风味物质的影响[J].食品科学,2022,43(10):66-

72. [HU Y W, GAO M X. Effects of sugar and butter on sensory quality and flavor of bread by gas phase ion migration chromatography[J]. Food Science, 2022, 43(10): 66–72.]

[2] 袁娟丽,单玲克,高金燕,等.品质改良剂及燕麦酸面团对燕麦面团黏弹特性的改善[J].食品科学,2016,37(15):56–62.

[3] YUAN J L, SHAN L K, GAO J Y, et al. Improvement of viscoelastic properties of oat dough by quality improver and oat sour dough[J]. Food Science, 2016, 37(15): 56–62.]

[4] 杨剑婷,夏树凤,周琴,等.面筋蛋白对小麦粉理化性质及面包烘焙品质的影响[J].麦类作物学报,2020,40(5):620–629.

[5] YANG J T, XIA S F, ZHOU Q, et al. Effects of gluten protein on physical and chemical properties of wheat flour and bread baking quality[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(5): 620–629.]

[6] BARAK S, MUDGIL D, KHATKAR B S. Relationship of gliadin and glutenin proteins with dough rheology, flour pasting and bread making performance of wheat varieties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(1): 211–217.

[7] 侯东丽,张正茂,师俊玲,等.谷氨酰胺转氨酶和大豆粉在荞麦面包加工中的应用[J].西北农业学报,2010,19(5):191–196.

[8] HOU D L, ZHANG Z M, SHI J L, et al. Application of transglutaminase and soybean flour in the processing of buckwheat bread[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(5): 191–196.]

[9] 邹怀帅,杨嘉琪,宋春丽,等.转谷氨酰胺酶对玉米面团加工特性的影响[J].食品工业,2020,41(4): 157–160. [GAO H S, YANG J Q, SONG C L, et al. Effect of transglutaminase on processing characteristics of corn dough[J]. Food Industry, 2020, 41(4):

- 157–160.]
- [7] SANTOS F G, AGUIAR E V, CENTENO A, et al. Effect of added psyllium and food enzymes on quality attributes and shelf life of chickpea-based gluten-free bread[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 134: 110025.
- [8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National standard for food safety-determination of moisture in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-2.]
- [9] PALABIYIK I, YILDIZ O, TOKER O S, et al. Investigating the addition of enzymes in gluten-free flours-The effect on pasting and textural properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 69: 633–641.
- [10] NIU M, XING L, ZHANG B, et al. Comparative study on protein polymerization in whole-wheat dough modified by transglutaminase and glucose oxidase[J]. *LWT*, 2017, 90: 323–330.
- [11] LI D, ZHAO Y, FEI T, et al. Effects of *Streptococcus thermophilus* GtFB enzyme on dough rheology, bread quality and starch digestibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 134–139.
- [12] CAO Y, JIANG L, SUO W, et al. Influence of emulsifiers and enzymes on dough rheological properties and quality characteristics of steamed bread enriched with potato pulp[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360(5): 130015.
- [13] 王强. 糯米粉对面团特性及其面包品质影响研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019. [WANG Q. Effects of mi rice flour on dough characteristics and bread quality[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019.]
- [14] KIM E A, LEE S Y. Quality characteristics of steamed rice bread prepared with different contents of proteolytic enzyme[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2016, 59(1): 95–102.
- [15] CALLE J, BENAVENT G Y, ROSELL C M. Development of gluten free breads from colocasia esculenta flour blended with hydrocolloids and enzymes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105243.
- [16] 沈莎莎, 田建珍, 郑学玲, 等. 淀粉及热损伤淀粉对小麦品质的影响初探[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(24): 5–8. [SHEN S S, TIAN J Z, ZHENG X L, et al. Effects of starch and heat-damaged starch on wheat flour quality[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(24): 5–8.]
- [17] 单成俊, 周剑忠. 谷氨酰胺转氨酶和葡萄糖氧化酶改善糯小麦粉粉质特性的研究[J]. *江苏农业科学*, 2008(6): 229–230.
- [18] SHAN C J, ZHOU J Z. Effects of transaminase and glucose oxidase on the properties of glutinous wheat flour[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2008(6): 229–230.]
- [19] ROMEIH E, WALKER G. Recent advances on microbial transglutaminase and dairy application[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 62: 133–140.
- [20] BRUNEL C, PAREVT B, BRIIS K, et al. The impact of the protein network on the pasting and cooking properties of dry pasta products[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120(2): 371–378.
- [21] GUI Y F, ZOU F X, ZHU Y, et al. The structural, thermal, pasting and gel properties of the mixtures of enzyme-treated potato protein and potato starch[J]. *LWT*, 2021, 154(15): 112882.
- [22] XIAO H, LI C, YAN H, et al. Impact of celluloses and pectins restrictions on gluten development and water distribution in potato-wheat flour dough[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 206(1): 534–542.
- [23] SARABHAI S, TAMILSELVAN T. Role of enzymes for improvement in gluten-free foxtail millet bread: It's effect on quality, textural, rheological and pasting properties[J]. *LWT*, 2021, 137: 110365.
- [24] TOMI J, TORBICA A, BELOVI M. Effect of non-gluten proteins and transglutaminase on dough rheological properties and quality of bread based on millet (*Panicum miliaceum*) flour[J]. *LWT*, 2020, 118: 108852.
- [25] 王香玉. 馒头制作过程中蛋白交联行为及其对品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2016. [WANG X Y. Protein cross-linking behavior and its effect on quality in steamed bread production[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.]
- [26] ALTUNA L, RIBOTTA P D, TADINI C C. Effect of a combination of enzymes on the fundamental rheological behavior of bread dough enriched with resistant starch[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2016, 73: 267–273.
- [27] ILKEM D. Rheological properties of gluten-free bread formulations[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 96(2): 295–303.
- [28] 刘彦, 黄卫宁. 阿拉伯胶和羧甲基纤维素钠对荞麦面团发酵流变学及烘焙特性的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(17): 5–9. [LIU Y, HUANG W N. Effects of gum arabic and sodium carboxymethyl cellulose on fermentation rheology and baking properties of buckwheat dough[J]. *Food Science*, 2013, 34(17): 5–9.]
- [29] ARAI C, HIROSE R, TOZAKI M, et al. Effect of adding acid-soluble wheat protein to dough on the quality stabilization of wheat flour and rice flour blend bread[J]. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 2018, 65(11): 518–528.
- [30] MUDGIL D, BARAK S, KHATKAR B S. Optimization of bread firmness, specific loaf volume and sensory acceptability of bread with soluble fiber and different water levels[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 186–191.
- [31] 刘然然, 范素琴, 王晓梅, 等. 不同黏度海藻酸丙二醇酯(PGA)对面包品质改良效果研究[J]. *中国食品添加剂*, 2018, 6(6): 137–140. [LIU R R, FAN S Q, WANG X M, et al. Effects of different viscosity of propylene glycol alginate (PGA) on bread quality improvement[J]. *China Food Additives*, 2018, 6(6): 137–140.]