

李越, 王龙, 苗榕芯, 等. 不同改良剂对发芽糙米-小麦面团性质及馒头品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 222-228. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020256

LI Yue, WANG Long, MIAO Rongxin, et al. Influence of Different Improvers on Germination Brown Rice-Wheat Flour Dough Properties and Steamed Bread Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 222-228. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020256

· 食品添加剂 ·

不同改良剂对发芽糙米-小麦面团性质及馒头品质的影响

李 越¹, 王 龙¹, 苗榕芯¹, 孙 莹^{1,*}, 朱秀清^{2,*}

(1. 哈尔滨商业大学旅游烹饪学院, 黑龙江哈尔滨 150028;

2. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028)

摘 要: 研究了不同浓度的改良剂羟丙基甲基纤维素 (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC)、黄原胶 (xanthan gum, XG) 和葡萄糖氧化酶 (Glucose oxidase, GOX) 对发芽糙米-小麦面粉 (1:1) 面团性质和馒头品质的影响。以不添加改良剂为对照, 分析不同面团的热机械性能和吹泡特性, 并以色泽、质构、比容、高径比和感官得分作为指标, 评价不同馒头的整体品质。结果表明, HPMC 的添加显著 ($P<0.05$) 降低了面团的形成时间、稳定性、C2 和 CS。然而, XG 和 GOX 的添加增加了面团的形成时间、稳定性和 C2。不同改良剂的添加可能增强了蛋白质与蛋白质或淀粉分子之间的相互作用, 从而加强面团的面筋网络。此外, 改良剂的添加显著 ($P<0.05$) 提高了馒头弹性和感官评分。因此, 适当添加 HPMC 和 XG 可以改善发芽糙米-小麦面粉馒头品质。本研究为改善馒头品质和促进 GBRF 在面制品体系中的应用提供了理论参考。

关键词: 发芽糙米面团, 改良剂, 馒头, 热机械性能

中图分类号: TS213.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)24-0222-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020256

本文网刊:



Influence of Different Improvers on Germination Brown Rice-Wheat Flour Dough Properties and Steamed Bread Quality

LI Yue¹, WANG Long¹, MIAO Rongxin¹, SUN Ying^{1,*}, ZHU Xiuqing^{2,*}

(1. Tourism & Cuisine, College Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: Different levels of hydroxypropyl methylcellulose (HPMC), xanthan gum (XG) and Glucose oxidase (GOX) were applied to germination brown rice-wheat flour (1:1) to evaluate the effects of improvers on the dough properties and Chinese steamed bread (CSB) quality. With no improver as control, thermo-mechanical and alveograph properties of different dough were analyzed, and the overall quality of different steamed bread was evaluated by color, texture, specific volume, height/diameter ratio and sensory score. The results showed that the addition of HPMC significantly ($P<0.05$) decreased the dough development time, stability, C2 and CS. However, the addition of XG and GOX increased the dough development time, stability and C2. The addition of different improvers might enhance the interaction between protein and protein or starch molecules, thus strengthening the gluten network of the dough. In addition, the addition of improve significantly ($P<0.05$) improved the springiness and sensory score of CSB. Therefore, proper addition of HPMC and XG could improve the quality of germination brown rice-wheat flour steamed bread. This study provides a theoretical reference for improving the quality of steamed bread and promoting the application of GBRF in Flour products systems.

收稿日期: 2023-02-23

基金项目: 哈尔滨商业大学青年创新人才支持计划 (2020CX01)。

作者简介: 李越 (1989-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 烹饪科学, E-mail: liyue_0810@163.com。

* 通信作者: 孙莹 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 烹饪科学, E-mail: sunying625@163.com。

朱秀清 (1968-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 蛋白质分子化学及大豆深加工, E-mail: xqzhuwang@163.com。

Key words: germination brown rice dough; improvers; Chinese steamed bread; thermo-mechanical properties

馒头(Chinese steamed bread, CSB)是以小麦面粉(wheat flour, WF)为主要原料制作的发酵食品,作为中国北方居民的膳食主食,几乎占小麦消费量的40%^[1]。如今考虑到健康饮食、营养安全等各方面原因,使用混合面粉生产高品质 CSB 是一种新的趋势。研究表明,在面包中添加发芽糙米粉(germinated brown rice flour, GBRF)可以显著提高营养价值^[2]。因此,在 CSB 中添加 GBRF 可能增强产品的营养价值和感官属性。

稻谷经脱壳过程分离为稻壳和糙米(brown rice, BR),BR 可进一步分离成淀粉性胚乳(约 92%)、胚(约 2%)、麸皮(约 6%)^[3]。糙米的碾磨精制过程中胚部和麸皮被去除,只保留了营养素单一的淀粉性胚乳,称为精米,也叫白米(white rice, WR)。麸皮和胚中含有许多营养素和生物活性成分,包括 γ -氨基丁酸、膳食纤维、 γ -谷维素、维生素和矿物质等,因此含有麸皮和胚部的 BR 比 WR 具有更高的营养价值^[4]。但由于糙米中植酸盐、糠蜡等物质以及麸皮的存在,导致糙米制品存在吸水率低,不易煮熟、口感粗糙、风味不佳等问题。通过发芽可有效改善熟化糙米的蒸煮品质、口感、质地、风味等属性,从而提高食用质量^[5]。此外有关研究报道,在 BR 的萌发过程中,由于吸收水分的增加以及一些生化反应的发生,导致质地软化、聚合物降解,并促进 GABA、可溶性膳食纤维、 γ -谷维素和抗氧化剂如维生素 E、酚类化合物等植物化学物质的合成和积累^[6]。但根据籽粒类型或不同的浸泡、发芽条件,关键营养物质含量的增加或减少往往会有不同的结果。

在中水分面制食品(如面包、馒头等)中使用各种改良剂(乳化剂、亲水胶体和酶等),可提高小麦面粉(Wheat flour, WF)面团的可加工性,起到改善产品感官品质的作用。Liu 等^[7]向全麦馒头中添加戊聚糖酶和葡萄糖氧化酶(Glucose oxidase, GOX)显著提高了面筋网络的连续性、延伸性和致密性,从而增强面团品质。使用羟丙基甲基纤维素(hydroxypropyl methylcellulose, HPMC)可改善面糊和黑糯米面团的流变特性^[8]。Li 等^[9]发现,果胶、瓜尔胶和黄原胶(xanthan gum, XG)可以改善面包质量,增加面团体积稳定性和气体保留。因此,本研究以 GBRF 和 WF 为研究对象,评估不同改良剂 HPMC、XG 和 GOX 对 GBRF-WF 面团热机械性能、吹泡特性、破损淀粉值以及 GBRF-WF 馒头品质的影响,以期改善馒头品质和促进 GBRF 在面制品体系中的应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小麦面粉 哈尔滨金沙河集团;糙米 黑龙江黑土庄园有机农业发展有限公司;活性干酵母 安琪

酵母有限公司;HPMC 上海阿拉丁生化科技有限公司;GOX 河南万邦实业有限公司;XG 河南中兴化工有限公司;谷朊粉 安徽安特食品有限公司;其他化学试剂均为分析纯级,上海蓝季生物有限公司。

THZ-98A 恒温振荡器、BPG-9070A 精密鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;WK-500B 新诺多功能粉碎机 上海新诺仪器设备有限公司;Mixolab2 混合试验仪、Alveograph 吹泡仪、SDmatic 破损淀粉仪 法国肖邦仪器公司;TA-XT Plus 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司;CM-700d 色差仪 日本柯尼卡美能达公司;HE83 水分测定仪 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;YDX-120 两用蒸饭柜 北京广利鸿盛厨房设备有限公司;16/13 豪华食品醒箱 澳大利亚联合厨房用具有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 GBRF 的制备 BR 的萌芽参考 Xu 等^[10]的方法并改进。BR 用蒸馏水清洗三次,并在 0.5% 次氯酸钠溶液中消毒 15 min 后用足够的蒸馏水清洗。在 30 ℃ 下将 BR 浸泡在 2 mmol/L 氯化钙水溶液中 12 h 后,排空浸泡液置于培养皿中,并用纱布覆盖,在 30 ℃ 和 85% 相对湿度的恒温振荡器中黑暗条件下发芽 24 h。发芽后,发芽糙米(germinated brown rice, GBR)在 45 ℃ 的鼓风干燥箱中干燥 7 h 后,使用多功能粉碎机将 GBR 研磨成粉,并用 80 目筛网进行筛分备用。

1.2.2 GBRF-WF 馒头的制备 GBRF-WF 馒头的制备参考 Wu 的方法并改进^[11]。参考文献 [7-9] 改良剂的添加量略微改动,将添加 HPMC(1%、2%、3%、4%)、XG(0.1%、0.2%、0.3%、0.4%)和 GOX(0.01%、0.02%、0.03%、0.04%)的 GBRF-WF 混合粉(1:1)100 g 与 60%、35 ℃ 的温水;10% 的谷朊粉;1.5% 的活性干酵母(以混合粉质量计)混合并揉合至表面光滑均匀,无生粉夹杂。以不含改良剂的 GBRF-WF 面团为对照组,将每个面团分为三个 50±0.5 g 的样品,在 38 ℃ 和 80% 相对湿度的条件下,于食品醒箱中分别发酵 90 min 和 20 min。最后将面团在蒸饭柜中蒸 20 min,冷却 60 min 后进行测试。

1.2.3 热机械性能测定 使用混合试验仪分别测量了恒温混合期和加热和冷却期的 GBRF-WF 面团热机械性能。Mixolab2 设置为遵循 Chopin+程序,试验初始温度为 30 ℃,保温时间为 8 min,然后以 4 ℃/min 的速度将温度升至 90 ℃。保温时间为 8 min 后,温度以-4 ℃/min 的速度将温度降至 50 ℃,搅拌速度恒为 80 r/min,总实验时间为 45 min。

1.2.4 吹泡特性试验 参考 GB/T 14614.4-2005 的方法使用吹泡仪进行吹泡特性试验^[12]。吹泡特性参数由计算机软件程序自动记录,P: 面团韧性,表示抵抗变形的能力;L: 面团延展性或面筋气体保持能力;

P/L: 表示韧性和延展性之间的平衡; W: 面团烘焙强度或气泡膨胀至破裂所需能量。

1.2.5 破损淀粉值(SD)测定 使用破损淀粉仪测定破损淀粉值,将 120 mL 蒸馏水、3.0 g 硼酸粉末、3.0 g 碘化钾粉末和一滴硫代硫酸钠溶液加入反应容器中。准确称量 1 g GBRF-WF 面粉,用勺子放入破损淀粉仪中,仪器循环 6~7 min 后,记录样品的破损淀粉含量^[13]。

1.2.6 比容和高径比测定 对冷却后的 GBRF-WF 馒头样品进行称重,用油菜籽置换法测定其体积,并计算比容^[14]。用游标卡尺测量馒头的直径和高度,并计算高径比以确定形状。

1.2.7 色泽测定 使用色度计的反射率法测定馒头的表面颜色,工作条件为: C/2 光源,测定光斑直径为 10 mm,以标准陶瓷白板为标准样。色泽指标为 L^* (0: 黑色, 100: 白色)、 a^* ($-a^*$: 绿色, $+a^*$: 红色)、 b^* ($-b^*$: 蓝色, $+b^*$: 黄色)^[15]。

1.2.8 质地分析 使用质构仪进行质地剖面分析(TPA)。参数设置为试验前速度为 1 mm/s、测试速度 1 mm/s、试验后速度为 2 mm/s、触发力 5 g、保持时间 5 s、压缩率 40%,数据采集速率 200 pps,记录样品硬度、弹性、咀嚼性、内聚性^[16]。

1.2.9 感官评价 参考 Zhu 等^[17]的方法对 GBRF-WF 馒头进行感官评价。随机对馒头样品进行编号,评分标准按照 GB/T21118-2007。挑选食品专业年龄在 23 岁至 26 岁之间的 15 名(男生 7 人,女生 8 人)学生,以 GBRF-WF 馒头为样本进行适当培训后组建一个感官评价小组。饭后 2 h 后进行感官评价,评分标准如表 1。

1.3 数据处理

所有实验重复三次,实验结果均以平均值±标准偏差表示。采用 SPSS 软件进行数据统计、单因素方差分析(ANOVA)和 Tukey HSD 显著性差异检验, $P<0.05$ 具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 改良剂对混合粉破损淀粉含量的影响

与对照组(12.85)相比(图 1),除添加 2% HPMC

的样品外,其他实验样品的 DS 值均显著($P<0.05$)增加,添加 0.3% XG 的样品 DS 值含量最高(14.75)。相关研究表明,较高破损淀粉含量的精制面粉制得的馒头具有较高的比容、相对较低的硬度、较高的胶粘性 and 耐嚼性,这可能是由于较高破损淀粉含量使馒头醒发性增加,使馒头获得较高品质^[18]。但也有报道,破损淀粉含量会导致面团吸水率增加、搅拌稳定性降低,无法支撑馒头的体积^[19]。因此,结合热机械性能和吹泡特性实验结果,添加 0.3% XG 适当增加了 GBRF-WF 混合粉的破损淀粉值,有利于改善制得馒头品质。

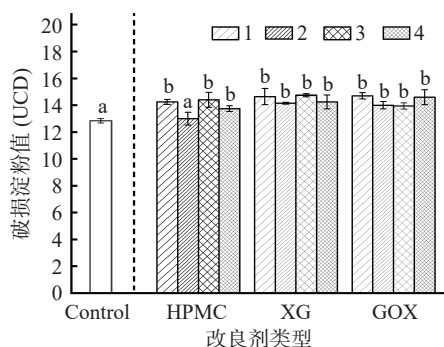


图 1 不同改良剂的添加量对 GBRF-WF 混合面粉破损淀粉值的影响

Fig.1 Effects of different amounts of improver on damaged starch value of GBRF-WF mixed flour
注: 1、2、3、4 表示改良剂的不同水平。

2.2 改良剂对 GBRF-WF 面团热机械性能的影响

2.2.1 恒温混合期 添加改良剂的 GBRF-WF 面团吸水率、形成时间和稳定时间如表 2 所示。与对照组相比,添加 HPMC、XG 和 0.01% GOX 后,GBRF-WF 面团吸水率增加,而添加 0.02%、0.03% 和 0.04% GOX 对吸水率无显著影响,HPMC 和 XG 均为亲水胶体,可能与亲水胶体结构中的羟基通过氢键导致更多的水相互作用有关^[20]。不同的改良剂对形成时间(development time, DT)值的影响不同,原因可能是这些聚合物的分子结构影响了水合过程的动力^[21]。添加 4.0% HPMC 显著($P<0.05$)降低了 GBRW 面团的 DT 值(从 5.29 min 降低到 2.49 min),而添加 0.2%、0.3%、0.4% 的 XG 和 0.03%、0.04% 的 GOX 显著

表 1 GBRF-WF 馒头感官评价表

Table 1 Sensory evaluation table of GBRF-WF Chinese steamed bread

项目	分值(分)	评分标准
色泽	15	颜色明亮均匀(10.1~15分),颜色暗淡不均匀(5.1~10分),颜色灰暗不均匀(0~5分)
外观	20	表面光滑、馒头立体圆润(16.1~20分),体积微缩、表面褶皱、形状不饱满(10.1~16分),体积萎缩严重、表面褶皱程度大(0~10分)
内部结构	10	纵切面气孔均匀且密集(7.1~10分),气孔大小适中,较不密集(4.1~7分),气孔少且大小不均匀(0~4分)
口味	15	有发酵香味、微甜、浓郁的发芽糙米香气(10.1~15分),甜味下降、发芽糙米香气较淡(5.1~10分),无香气和甜味(0~5分)
适口性	20	面质柔软适口(16.1~20分),面质柔软度轻微下降(10.1~16分),面质稍硬、口感粗糙(0~10分)
弹性	20	面体回弹速度快、能复原(16.1~20分),回弹性和复原度减弱(10.1~16分),回弹弱、复原度差(0~10分)

($P<0.05$)提高了面团的 DT 值,表明添加 HPMC 可缩短面团的水合时间。稳定时间(stability time, ST)代表面团强度,较软的面团 ST 值较短^[22]。与对照组相比,添加 HPMC 明显降低了面团的 ST 值,添加 0.4% XG 的样品显著($P<0.05$)提升了面团的 ST 值,表明 XG 可减缓面团的形成,从而提升面团强度、增加面团稳定时间。

表 2 不同改良剂添加量对 GBRF-WF 面团混合测试参数的影响

Table 2 Effect of different amounts of improver on mixing test parameters of GBRF-WF dough

改良剂种类	添加量(%)	吸水率(%)	形成时间(min)	稳定时间(min)
Control	0	62.52±0.02 ^{abc}	5.29±0.24 ^c	7.54±0.19 ^d
	1	67.81±0.02 ^e	3.79±0.06 ^b	5.82±0.14 ^c
HPMC	2	71.01±0.02 ^f	2.72±0.01 ^a	3.91±0.16 ^b
	3	74.60±0.03 ^g	2.54±0.02 ^a	3.15±0.13 ^a
	4	75.34±0.65 ^h	2.49±0.17 ^a	3.91±0.16 ^b
	0.1	62.79±1.04 ^{bcd}	5.69±0.21 ^c	7.58±0.28 ^d
XG	0.2	62.83±0.02 ^{bcd}	7.47±0.95 ^d	7.86±0.05 ^d
	0.3	63.13±0.23 ^{cd}	8.20±0.05 ^d	8.00±0.45 ^{de}
	0.4	63.23±0.40 ^{cd}	8.20±1.25 ^d	8.42±0.01 ^e
	0.01	63.56±0.48 ^d	5.55±0.22 ^c	7.69±0.08 ^d
GOX	0.02	61.96±0.03 ^{ab}	5.74±0.11 ^c	7.76±0.26 ^d
	0.03	61.90±0.35 ^{ab}	7.72±0.17 ^d	8.02±0.48 ^{de}
	0.04	61.72±0.03 ^a	7.80±0.09 ^d	7.96±0.08 ^{de}

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$),表3~表6同。

2.2.2 加热冷却期 Mixolab2 曲线的第二阶段表明,GBRF-WF 面团的淀粉糊化特性受到混合和加热的限制。C2、C3、C4 和 C5 是研究改良剂对面团热机械性能影响的重要参数^[19]。C2 表示由于暴露于物理机械和热应力而导致的面团稠度损失,由表 3 可知,添加 XG 和 GOX 后,GBRF-WF 面团的 C2 值无显著变化,但添加 HPMC 的样品 C2 显著降低($P<0.05$)。添加不同的改良剂导致 C3 变化显著($P<0.05$),随着 HPMC 添加量的增加,GBRF-WF 面团

糊化峰值 C3 降低,原因可能与蛋白质聚集体引起的淀粉颗粒溶胀能力降低以及 β -葡聚糖的降解有关^[23]。相反,C3 值随着 GOX 和 XG 的添加而增加,尤其是 0.4% XG 最高。与对照组相比,添加 3% 和 4% HPMC 的面团 C4 显著($P<0.05$)降低,但添加 XG 和 GOX 的面团的 C4 值差异不显著。C5 是冷却时产生的最大扭矩,代表淀粉的回生特性,改良剂对 C5 值有不同的影响,2% HPMC 和 0.3% XG 的添加,会使 C5 值降低,表明 GBRF-WF 面团的老化速率和硬度下降。但 GOX 的加入导致 C5 值增加,可能与淀粉和阿拉伯木聚糖(Arabinoxylan, AX)之间的相互作用有关。GOX 通过氧化反应促进 AX 凝胶的生成。此外,AX 的持水能力在氧化后发生变化,这影响了面团中淀粉的糊化和回生以及自由水的分布^[24-25]。CS 值随着 HPMC 含量的增加而显著($P<0.05$)降低,而添加 0.2% 和 0.4% XG 的样品 CS 值相比对照组明显增加,0.1%、0.3% XG 和 GOX 对 GBRF-WF 馒头 CS 值没有显著影响。

其他指标,如弱化速度($-\alpha$)、糊化速度(β)、酶解速度(γ)和糊化温度范围($T_0\sim T_1$),均在 Mixolab2 完全测试中,如表 3 所示。与对照组相比,添加 HPMC 使面团 $-\alpha$ 值显著($P<0.05$)降低,但添加 XG 和 GOX 的样品 $-\alpha$ 值无显著变化。三种改良剂对 β 值均无显著影响。与对照组相比,添加 HPMC 和 GOX 的面团 γ 值降低,添加 XG 的面团 γ 值无显著差异。Moreira 等^[22]发现 HPMC 降低了栗子粉的 γ 值。Liu 等^[26]发现 HPMC 可以提高马铃薯粉的 γ 值。因此,HPMC 对不同原料制作的面团可能具有不同的作用效果。淀粉糊化延迟对于改善淀粉类食品的内部结构、质地和其他品质至关重要^[27]。因此,2% HPMC 和 0.2% XG 可以作为 GBRF-WF 馒头的改良剂。改良剂的添加导致最终温度显著($P<0.05$)降低,当添加 2% 的 HPMC 时最明显,与 Sudha 等^[28]之前的研究结果相同,添加 1% 的 HPMC 降低了全麦面团的最

表 3 不同改良剂添加量对 GBRF-WF 面团加热冷却测试参数的影响

Table 3 Effect of different amounts of improver on parameters of GBRF-WF dough during complete tests

改良剂种类	添加量(%)	C2(Nm)	C3(Nm)	C4(Nm)	C5(Nm)	CS(Nm)	$-\alpha$ (Nm/min)	β (Nm/min)	γ (Nm/min)	$T_0\sim T_1$
Control	0	0.28±0.01 ^d	1.37±0.01 ^{cd}	0.35±0.01 ^{bc}	0.42±0.01 ^{bcd}	1.03±0.01 ^d	0.093±0.001 ^{bc}	0.273±0.013 ^{ab}	0.138±0.004 ^{def}	56.1 ^{bc} ~74.6 ^c
	1	0.23±0.01 ^c	1.31±0.01 ^c	0.34±0.01 ^{bc}	0.41±0.01 ^{bcd}	0.90±0.01 ^c	0.083±0.001 ^b	0.293±0.021 ^{ab}	0.130±0.010 ^{bcd}	55.4 ^{ab} ~73.9 ^{bc}
HPMC	2	0.19±0.01 ^b	1.18±0.02 ^b	0.27±0.01 ^b	0.36±0.01 ^b	0.79±0.02 ^b	0.060±0.002 ^a	0.286±0.018 ^{ab}	0.109±0.005 ^{abcd}	56.3 ^c ~73.4 ^b
	3	0.15±0.01 ^a	1.06±0.01 ^a	0.19±0.01 ^a	0.27±0.01 ^a	0.72±0.02 ^a	0.060±0.001 ^a	0.298±0.016 ^{ab}	0.101±0.001 ^{ab}	56.2 ^c ~72.4 ^a
	4	0.14±0.01 ^a	1.15±0.01 ^b	0.17±0.01 ^a	0.23±0.03 ^a	0.81±0.01 ^b	0.054±0.002 ^a	0.288±0.036 ^{ab}	0.111±0.003 ^{abcd}	56.1 ^{bc} ~73.1 ^b
	0.1	0.28±0.01 ^d	1.44±0.01 ^{de}	0.35±0.01 ^{bc}	0.44±0.02 ^{cde}	1.06±0.06 ^{de}	0.096±0.006 ^{bc}	0.288±0.036 ^{ab}	0.138±0.004 ^{def}	56.2 ^c ~73.8 ^{bc}
XG	0.2	0.30±0.02 ^d	1.49±0.02 ^e	0.32±0.05 ^{bc}	0.41±0.03 ^{bcd}	1.12±0.02 ^e	0.099±0.023 ^{bc}	0.299±0.017 ^{ab}	0.135±0.001 ^{cdef}	56.4 ^c ~73.7 ^{bc}
	0.3	0.30±0.01 ^d	1.47±0.01 ^e	0.34±0.02 ^{bc}	0.40±0.01 ^{bc}	1.09±0.04 ^{de}	0.093±0.007 ^{bc}	0.260±0.004 ^{ab}	0.148±0.006 ^f	56.3 ^c ~74.4 ^c
	0.4	0.30±0.01 ^d	1.54±0.02 ^e	0.37±0.02 ^c	0.44±0.04 ^{cde}	1.13±0.04 ^e	0.108±0.012 ^c	0.302±0.040 ^{ab}	0.160±0.006 ^f	55.9 ^{bc} ~73.9 ^{bc}
	0.01	0.28±0.03 ^d	1.48±0.05 ^e	0.35±0.10 ^{bc}	0.48±0.07 ^e	1.05±0.02 ^d	0.095±0.005 ^{bc}	0.323±0.003 ^b	0.112±0.036 ^{ef}	56.1 ^{bc} ~73.9 ^{bc}
GOX	0.02	0.28±0.01 ^d	1.44±0.02 ^{de}	0.34±0.01 ^{bc}	0.48±0.01 ^{de}	1.08±0.03 ^{de}	0.099±0.001 ^{bc}	0.279±0.011 ^{ab}	0.107±0.003 ^{abc}	55.3 ^c ~73.5 ^b
	0.03	0.31±0.03 ^d	1.45±0.13 ^{de}	0.41±0.01 ^c	0.56±0.02 ^f	1.10±0.04 ^{de}	0.099±0.005 ^{bc}	0.3007±0.005 ^{ab}	0.093±0.011 ^a	55.4 ^{ab} ~73.5 ^b
	0.04	0.28±0.01 ^d	1.48±0.01 ^e	0.39±0.02 ^c	0.58±0.01 ^f	1.07±0.01 ^{de}	0.102±0.004 ^{bc}	0.332±0.006 ^b	0.103±0.005 ^{ab}	55.7 ^{abc} ~74.5 ^c

注: C2(与蛋白质弱化相关)、C3(与淀粉老化相关)、C4(糊化热胶稳定性)、C5(与淀粉回生相关)、CS(8分钟稠度值)、 $-\alpha$ (弱化速度)、 β (糊化速率)、 γ (酶解速度)、 $T_0\sim T_1$ (糊化温度范围)。

终糊化温度。糊化温度的变化可能是因为改良剂具有不同的化学成分以及直链淀粉、支链淀粉和改良剂之间的一些相互作用导致^[29]。

2.3 改良剂对 GBRF-WF 面团吹泡特性的影响

添加改良剂的 GBRF-WF 面团的吹泡特性参数如表 4 所示。面团的韧性(P)用于预测面团的气体保持能力^[30]。随着 HPMC 和 XG 添加量的增加 P 值增大,且 XG 添加 0.4% 时影响最大,可能的原因是 GBRF-WF 面粉中的亲水胶体和蛋白质之间的相互作用造成的。与对照组相比,GOX 的添加使 P 值略有减小,且当 GOX 含量为 0.03% 时,面团 P 值显著($P<0.05$)降低。同样,3%、4% HPMC 的面团延伸性(L)显著($P<0.05$)增加,但对照组和其他改良剂处理的面团之间没有显著差异。标准品质面团的烘焙力(W)值一般高于 160^[31]。与对照组相比,除了 1% 的 HPMC 和添加 GOX 的样品,其他实验样品 W 值均显著增加。P/L 比率可以预测面团的弹性阻力与延展性之间的平衡,亲水胶体有助于提高 P/L 比,除 1% HPMC 和 0.1% XG 的样品之外,添加亲水胶体对 GBRF-WF 面团的 P/L 值有显著($P<0.05$)影响。特别是,当 XG 添加量为 0.2%、0.3% 和 0.4% 时,P/L 比率显著($P<0.05$)增加,可能是因为 XG 和 GBRF-WF 面粉中的蛋白质之间的相互作用最强。与对照组相比,GOX 的添加显著($P<0.05$)降低了 P/L 比,但添加 0.01% GOX 的样品除外。结果显示,HPMC、XG 和 GOX 可以通过多种机制改善面团品质,添加 0.3% XG 对面团吹泡特性作用效果最好。

表 4 不同改良剂的添加量对 GBRF-WF 面团吹泡特性参数的影响

Table 4 Effects of different amounts of improver on alveograph characteristics of GBRF-WF dough

改良剂种类	添加量 (%)	P(mm)	L(mm)	W($\times 10^{-4}$ J)	P/L
Control	0	145.00 $\pm$ 1.00 ^b	25.00 $\pm$ 1.00 ^{ab}	167.00 $\pm$ 1.00 ^c	5.80 $\pm$ 0.10 ^c
	1	144.00 $\pm$ 1.00 ^b	24.67 $\pm$ 0.58 ^{ab}	161.00 $\pm$ 5.20 ^b	5.78 $\pm$ 0.04 ^c
HPMC	2	155.33 $\pm$ 1.15 ^c	26.00 $\pm$ 1.00 ^{abc}	179.33 $\pm$ 1.15 ^d	5.97 $\pm$ 0.05 ^{cd}
	3	166.00 $\pm$ 1.73 ^c	30.00 $\pm$ 1.00 ^d	207.67 $\pm$ 2.08 ^f	6.00 $\pm$ 0.02 ^{cd}
	4	173.33 $\pm$ 0.58 ^f	29.00 $\pm$ 2.00 ^{cd}	217.00 $\pm$ 1.73 ^b	5.99 $\pm$ 0.02 ^{cd}
	0.1	146.00 $\pm$ 1.73 ^b	27.67 $\pm$ 0.58 ^{bcd}	180.00 $\pm$ 3.46 ^d	5.30 $\pm$ 0.05 ^{ab}
XG	0.2	161.00 $\pm$ 1.00 ^d	26.00 $\pm$ 2.00 ^{abc}	186.00 $\pm$ 2.00 ^e	6.20 $\pm$ 0.01 ^d
	0.3	162.00 $\pm$ 2.00 ^d	25.00 $\pm$ 2.00 ^{ab}	181.00 $\pm$ 2.00 ^d	6.48 $\pm$ 0.10 ^c
	0.4	179.67 $\pm$ 2.31 ^g	26.00 $\pm$ 1.00 ^{abc}	212.00 $\pm$ 2.00 ^g	6.96 $\pm$ 0.04 ^f
	0.01	142.00 $\pm$ 2.00 ^{ab}	24.00 $\pm$ 1.00 ^a	157.00 $\pm$ 1.00 ^a	5.92 $\pm$ 0.08 ^c
GOX	0.02	143.00 $\pm$ 3.00 ^{ab}	26.00 $\pm$ 1.00 ^{abc}	167.33 $\pm$ 2.31 ^c	5.47 $\pm$ 0.05 ^b
	0.03	139.33 $\pm$ 1.15 ^a	27.00 $\pm$ 1.00 ^{abcd}	168.00 $\pm$ 1.73 ^c	5.16 $\pm$ 0.05 ^a
	0.04	143.00 $\pm$ 1.73 ^{ab}	27.00 $\pm$ 1.00 ^{abcd}	170.33 $\pm$ 0.58 ^c	5.31 $\pm$ 0.03 ^{ab}

2.4 改良剂对 GBRF-WF 馒头品质的影响

2.4.1 质构特性 质构是评价 GBRF-WF 馒头质量的重要属性之一,表 5 列举了改良剂对 GBRF-WF 馒头质地参数(硬度、弹性、咀嚼性和内聚性)的影响。添加改良剂后,相比对照组(76.27 N),实验组硬

度整体下降,尤其是 2%HPMC(32.28N)和 0.2% XG (34.68N)的样本,表明改良剂对 GBRF-WF 馒头具有软化作用。Zhang 等^[32]同样发现,添加 GOX 降低了 CSB 的硬度,这可能与改良剂的添加强化了面筋网络有关。与对照组相比,实验组的 GBRF-WF 馒头弹性没有显著改变,添加 4% HPMC、0.3% 和 0.4% XG、0.03 和 0.04% GOX 后,样本弹性略有降低。咀嚼度随改良剂添加量的增加,呈现先减小后增加的趋势,含 1% 和 2% HPMC 的样本咀嚼度最低。内聚性可以量化食物内部结构阻力,内聚性低会导致馒头干燥、高度破碎,导致消费者对馒头的接受度下降^[33]。与对照样品(0.51)相比,实验组样品内聚性整体提高(范围为 0.52~0.60),表明添加改良剂的馒头样品具有更完整的基质。

表 5 不同改良剂的添加量对 GBRF-WF 馒头质构参数的影响

Table 5 Effects of different amounts of improver on texture parameters of GBRF-WF steamed bread

改良剂种类	添加量 (%)	硬度(N)	弹性	咀嚼性(N)	内聚性
Control	0	76.27 $\pm$ 1.29 ^f	6.14 $\pm$ 0.30 ^a	223.23 $\pm$ 5.71 ^d	0.51 $\pm$ 0.02 ^a
	1	44.81 $\pm$ 1.84 ^{bc}	6.82 $\pm$ 0.85 ^a	131.33 $\pm$ 9.51 ^a	0.54 $\pm$ 0.04 ^{abc}
HPMC	2	32.28 $\pm$ 3.57 ^a	7.15 $\pm$ 1.13 ^a	127.57 $\pm$ 1.32 ^a	0.52 $\pm$ 0.01 ^{ab}
	3	44.92 $\pm$ 3.06 ^{bc}	6.10 $\pm$ 0.28 ^a	190.00 $\pm$ 3.80 ^{bcd}	0.56 $\pm$ 0.01 ^{abcd}
	4	49.50 $\pm$ 2.01 ^{cd}	5.69 $\pm$ 0.12 ^a	191.63 $\pm$ 4.50 ^{bcd}	0.57 $\pm$ 0.01 ^{bcd}
	0.1	49.08 $\pm$ 3.08 ^{cd}	6.67 $\pm$ 0.99 ^a	189.47 $\pm$ 4.20 ^{bcd}	0.53 $\pm$ 0.01 ^{ab}
XG	0.2	34.68 $\pm$ 1.38 ^a	7.10 $\pm$ 0.42 ^a	145.17 $\pm$ 2.55 ^a	0.55 $\pm$ 0.01 ^{abcd}
	0.3	53.62 $\pm$ 1.30 ^{cde}	6.04 $\pm$ 0.46 ^a	160.03 $\pm$ 5.84 ^{abc}	0.55 $\pm$ 0.01 ^{abcd}
	0.4	56.53 $\pm$ 3.97 ^{de}	5.72 $\pm$ 0.55 ^a	208.77 $\pm$ 2.93 ^d	0.57 $\pm$ 0.04 ^{abcd}
	0.01	56.68 $\pm$ 1.01 ^{de}	6.45 $\pm$ 0.34 ^a	184.23 $\pm$ 9.51 ^{bcd}	0.56 $\pm$ 0.02 ^{abcd}
GOX	0.02	39.72 $\pm$ 3.72 ^{ab}	6.94 $\pm$ 0.42 ^a	155.17 $\pm$ 5.47 ^{ab}	0.60 $\pm$ 0.03 ^d
	0.03	58.09 $\pm$ 2.59 ^{de}	5.88 $\pm$ 0.24 ^a	200.07 $\pm$ 6.14 ^{cd}	0.60 $\pm$ 0.02 ^d
	0.04	59.24 $\pm$ 2.37 ^e	5.71 $\pm$ 0.20 ^a	217.13 $\pm$ 7.10 ^d	0.59 $\pm$ 0.02 ^{cd}

2.4.2 GBRF-WF 馒头品质分析 添加改良剂对 GBRF-WF 馒头质量参数(比容、高径比、色泽和感官得分)的影响如表 6 所示。GBRF-WF 馒头的比容值仅在添加 2% HPMC 和 0.2% XG 时显著($P<0.05$)增大。最大比容(2.53 ml/g)是对照样品的 1.17 倍,这也证实了添加 2% HPMC 和 0.2% XG 通过与面粉蛋白质或淀粉分子之间相互作用而形成更稳定面团。除对照组和 0.04% GOX 的样品外,大多数样品的高径比均高于 0.5,表明样品呈椭圆形。2% HPMC(0.64)的样品高径比最大,对照组的样品最小 0.40。相关研究表明, L^* 值被认为是影响馒头色泽的最重要参数^[34-35]。添加 HPMC 显著($P<0.05$)改善了 GBRF-WF 馒头 L^* 值,而 XG 和 GOX 的添加对 L^* 值没有显著影响,表明添加 HPMC 可以提高 CSB 的整体亮度,Mezaize 等^[36]也曾得到相同观点。不同的改良剂对 GBRF-WF 馒头感官得分结果有显著($P<0.05$)影响,与不添加改良剂的馒头相比,添加 HPMC、XG 或 GOX 可以改善馒头的感官属性,从而获得更高的消费者可接受性分数,特别是含有 2%

表 6 改良剂对 GBRF-WF 馒头品质的影响

Table 6 Effect of food additive on quality of GBRF-WF steamed bread

改良剂种类	添加量(%)	比容(mL/g)	高径比	L^*	a^*	b^*	感官得分(分)
Control	0	2.16±0.05 ^a	0.40±0.02 ^a	69.81±0.55 ^{abc}	1.93±0.15 ^{bcd}	22.86±0.71 ^{cde}	76.39±0.12 ^a
	1	2.41±0.06 ^{ab}	0.59±0.01 ^e	75.52±0.39 ^d	1.29±0.08 ^a	20.32±0.33 ^a	84.10±0.30 ^{de}
HPMC	2	2.53±0.12 ^b	0.64±0.02 ^f	75.24±0.13 ^d	1.83±0.08 ^{abc}	22.94±0.42 ^{cde}	85.11±0.63 ^e
	3	2.40±0.11 ^{ab}	0.56±0.02 ^{cde}	74.93±2.01 ^d	1.77±0.35 ^{abc}	22.50±0.94 ^{bcd}	83.22±0.54 ^{cde}
	4	2.39±0.12 ^{ab}	0.52±0.02 ^{bcd}	75.31±1.04 ^d	1.53±0.07 ^{ab}	21.01±0.20 ^{ab}	81.43±1.20 ^c
	0.1	2.43±0.18 ^{ab}	0.57±0.03 ^{de}	72.36±0.72 ^c	1.85±0.17 ^{abc}	21.58±0.51 ^{abc}	83.46±0.49 ^{de}
XG	0.2	2.52±0.14 ^b	0.60±0.02 ^e	67.45±0.72 ^a	3.01±0.90 ^f	24.89±0.50 ^e	84.93±0.55 ^e
	0.3	2.30±0.09 ^{ab}	0.53±0.02 ^{cd}	70.34±0.64 ^{bc}	2.55±0.16 ^{ef}	23.81±0.36 ^{de}	82.27±0.76 ^{cd}
	0.4	2.20±0.03 ^{ab}	0.51±0.03 ^{bc}	68.93±0.69 ^{ab}	2.75±0.58 ^f	22.98±1.99 ^{cde}	79.39±1.10 ^b
	0.01	2.42±0.19 ^{ab}	0.54±0.02 ^{cd}	71.45±1.16 ^{bc}	2.19±0.26 ^{cde}	23.52±0.77 ^{cde}	83.05±0.90 ^{cde}
GOX	0.02	2.49±0.14 ^{ab}	0.59±0.03 ^e	69.32±0.59 ^{ab}	2.17±0.11 ^{cde}	23.18±0.49 ^{cde}	84.88±0.51 ^e
	0.03	2.34±0.02 ^{ab}	0.51±0.02 ^{bc}	71.16±1.82 ^{bc}	2.50±0.30 ^{def}	23.77±0.47 ^{cde}	81.26±1.30 ^c
	0.04	2.28±0.02 ^{ab}	0.47±0.03 ^b	72.29±0.72 ^c	1.99±0.15 ^{bcd}	23.37±0.31 ^{cde}	78.68±1.21 ^b

HPMC 和 0.2% XG 的 GBRF-WF 馒头更容易被消费者接受。但当改良剂含量增加时,感官得分有所下降,因此适当添加改良剂可 GBRF-WF 馒头感官品质。

3 结论

研究表明,改良剂的类型和添加量对 GBRF-WF 面团特性和 GBRF-WF 馒头品质影响显著($P<0.05$)。改良剂(HPMC、XG 和 GOX)的添加有效增强了 GBRF-WF 面团的面筋网络。添加改良剂可显著($P<0.05$)改善 GBRF-WF 面团的热机械性能,HPMC、XG 和 GOX 可以通过多种机制改善面团品质,0.3% XG 对面团吹泡特性作用效果最好。此外,GBRF-WF 馒头质量参数结果表明,添加改良剂后,馒头的比体积、质地参数、颜色和感官评分都得到了改善。综合考虑 GBRF-WF 面团的热机械性能、吹泡特性、破损淀粉值和 GBRF-WF 馒头质量,HPMC 和 XG 改良剂对于生产优质 GBRF-WF 馒头具有良好的效果,同时也表明用 GBRF 替代部分 WF 制作馒头存在潜在的可能性,但 WF 和 GBRF 的最佳配比有待进一步研究。

参考文献

- [1] POPPER L, SCHÄFER W, FREUND W. Future of flour: A compendium of flour improvement[M]. Clenze: Verlag Agrimedia, 2006, 309-318.
- [2] CHAROENTHAIKIJ P, JANGCHUD K, JANGCHUD A, et al. Germination conditions affect selected quality of composite wheat-germinated brown rice flour and bread formulations[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(6): S312-S318.
- [3] CHO D H, LIM S T. Germinated brown rice and its bio-functional compounds[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 259-271.
- [4] 蒋静,马涛. 营养液培养糙米发芽富集 GABA 工艺条件优化[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 195-199. [JIANG J, MA T. Technological conditions optimization of GABA enrichment of brown rice germination using nutrient water culture method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(5): 195-199.]
- [5] BEAULIEU J C, MOREAU R A, POWELL M J, et al. Lipid profiles in preliminary germinated brown rice beverages compared to non-germinated brown and white rice beverages[J]. Foods, 2022,

11(2): 220.

- [6] 王丹. 萌芽留胚糙米制备工艺研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017. [WANG D. Study on the Preparation technology of germination and leaving brown rice[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.]
- [7] LIU L, YANG W, CUI S W, et al. Effects of pentosanase and glucose oxidase on the composition, rheology and microstructure of whole wheat dough[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 545-551.
- [8] ITTHIVADHANAPONG P, JANTATHAI S, SCHLEINING G. Improvement of physical properties of gluten-free steamed cake based on black waxy rice flour using different hydrocolloids[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(6): 2733-2741.
- [9] LI J X, ZHU Y P, YADAV M P, et al. Effect of various hydrocolloids on the physical and fermentation properties of dough[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 165-173.
- [10] XU J, ZHANG H, GUO X N, et al. The impact of germination on the characteristics of brown rice flour and starch[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(2): 380-387.
- [11] WU P, LIU B, CHEN J S, et al. QTL analysis of textural property traits for Chinese northern-style steamed bread[J]. Euphytica, 2011, 179(2): 265-276.
- [12] 北京市粮食科学研究院. GB/T 14614.4-2005 小麦粉面团流变特性测定(吹泡仪法)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005. [Beijing Grain Science Research Institute. GB/T 14614.4-2005 Determination of rheological properties of wheat flour dough (Alveograph) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.]
- [13] MA S, LI L, WANG X X, et al. Effect of mechanically damaged starch from wheat flour on the quality of frozen dough and steamed bread[J]. Food Chemistry, 2016, 202: 120-124.
- [14] FLANDER L, SALMENKALLIO-MARTTILA M, SUORTTI T, et al. Optimization of ingredients and baking process for improved wholemeal oat bread quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(5): 860-870.
- [15] LUO D L, LIANG X, XU B C, et al. Effect of inulin with different degree of polymerization on plain wheat dough rheology and the quality of steamed bread[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 75: 205-212.
- [16] LIU X L, MU T H, YAMUL K D, et al. Evaluation of different hydrocolloids to improve dough rheological properties and bread quality of potato-wheat flour[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(6): 1597-1607.

- [17] ZHU F, SAKULNAK R, WANG S N. Effect of black tea on antioxidant, textural, and sensory properties of Chinese steamed bread[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 1217–1223.
- [18] WANG P, YANG R Q, GU Z X, et al. Comparative study of deterioration procedure in chemical-leavened steamed bread dough under frozen storage and freeze/thaw condition[J]. *Food Chemistry*, 2017, 229: 464–471.
- [19] 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.
- [20] FRIEND C P, WANISKA R D, ROONEY L W. Effects of hydrocolloids on processing and qualities of wheat tortillas[J]. *Cereal chemistry (USA)*, 1993, 70(3): 252–256.
- [21] GHARAIE Z, AZIZI M H, BARZEGAR M, et al. Effects of hydrocolloids on the rheological characteristics of dough and the quality of bread made from frozen dough[J]. *Journal of Texture Studies*, 2015, 46(5): 365–373.
- [22] MOREIRA R, CHENLO F, TORRES M D. Rheology of commercial chestnut flour doughs incorporated with gelling agents[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(5): 1361–1371.
- [23] APRODU I, BANU I. Influence of dietary fiber, water, and glucose oxidase on rheological and baking properties of maize based gluten-free bread[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2015, 24(4): 1301–1307.
- [24] PRIMO-MARTÍN C, MARTÍNEZ-ANAYA M A. Influence of pentosanase and oxidases on water-extractable pentosans during a straight breadmaking process[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(1): 31–41.
- [25] COURTIN C M, DELCOUR J A. Arabinoxylans and endoxylanases in wheat flour bread-making[J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 35(3): 225–243.
- [26] LIU X L, MU T H, SUN H N, et al. Influence of different hydrocolloids on dough thermo-mechanical properties and *in vitro* starch digestibility of gluten-free steamed bread based on potato flour[J]. *Food Chemistry*, 2018, 239: 1064–1074.
- [27] WADA K, TAKAHASHI K, SHIRAI K, et al. Differential thermal analysis (DTA) applied to examining gelatinization of starches in foods[J]. *Journal of Food Science*, 1979, 44(5): 1366–1368.
- [28] SUDHA M L, RAO G V. Influence of hydroxypropyl methylcellulose on the rheological and microstructural characteristics of whole wheat flour dough and quality of puri[J]. *Journal of Texture Studies*, 2009, 40(2): 172–191.
- [29] SHARMA R, OBEROI D P S, SOGI D S, et al. Effect of sugar and gums on the pasting properties of cassava starch[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2009, 33(3): 401–414.
- [30] GRAÇA C, FRADINHO P, SOUSA I, et al. Impact of *Chlorella vulgaris* on the rheology of wheat flour dough and bread texture[J]. *LWT*, 2018, 89: 466–474.
- [31] KAYA Y, SAHIN M. Non-parametric stability analyses of dough properties in wheat[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 35: 509–515.
- [32] ZHANG T, CUI Q, ZHANG F, et al. Effects of microencapsulated glucose oxidase on wheat flour dough properties and Chinese steamed bread quality[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(7): 1657–1665.
- [33] LINDARTE ARTUNDUAGA J, GUTIÉRREZ L F. Effects of replacing fat by betaglucans from *Ganoderma lucidum* on batter and cake properties[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(1): 451–461.
- [34] MA S, WANG X X, ZHENG X L, et al. Improvement of the quality of steamed bread by supplementation of wheat germ from milling process[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(3): 589–594.
- [35] WU M Y, SHIAU S Y. Effect of the amount and particle size of pineapple peel fiber on dough rheology and steamed bread quality[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 549–558.
- [36] MEZAIZE S, CHEVALLIER S, LE BAIL A, et al. Optimization of gluten-free formulations for french-style breads[J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(3): E140–E146.