

麦麸酶解对全麦面团和馒头品质特性的影响

李晓月^{1,2}, 李振华², 孙雪原², 王洪尧², 龚魁杰^{1*}, 孙琳琳^{1*}

(1. 山东省农业科学院作物研究所, 山东 济南 250100; 2. 山东省粮油检测中心, 山东 济南 250102)

摘要: 选取纤维素酶、戊聚糖酶及其复合酶对麦麸进行改性处理, 测定酶解前后麦麸和全麦粉物化特性的变化。与对照组相比, 复合酶处理使不溶性膳食纤维含量降低 29.5%, 可溶性膳食纤维含量、低聚糖含量、水溶性阿拉伯木聚糖占比、持水性和持油性分别升高 59.5%、635%、125.0%、5% 和 25.6%, 复合酶处理组的回生值最低, 粉质质量指数最高, 且该组面团结构更均匀且疏松多孔。添加酶解麦麸制作馒头, 其感官和质构特性都得以改善, 其中复合酶处理的馒头品质最佳, 与对照组相比, 比容、弹性、回复性和感官评分分别提高 25.1%、18.8%、42.9% 和 15.0%, 硬度和咀嚼度分别降低 23.0% 和 21.0%。综上, 酶解处理可改善麦麸品质, 纤维素酶和戊聚糖酶复合处理效果最佳, 可以此复配小麦粉制得高品质的全麦粉及全麦馒头。

关键词: 麦麸; 酶解; 全麦; 面团; 馒头

Effects of Enzymatic Hydrolysis of Wheat Bran on Quality Characteristics of Whole Wheat Dough and Steamed Bread

LI Xiaoyue^{1,2}, LI Zhenhua², SUN Xueyuan², WANG Hongyao², GONG Kuijie^{1*}, SUN Linlin^{1*}

(1. Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, Shandong, China;

2. Shandong Cereals and Oils Testing Center, Jinan 250102, Shandong, China)

Abstract: Cellulase, pentosanase, and their combination were used to modify wheat bran, and the physico-chemical properties of wheat bran and whole wheat flour were measured before and after enzymatic hydrolysis. Compared with the control group, the treatment with the enzyme combination reduced the content of insoluble dietary fiber by 29.5% and increased the soluble dietary fiber, oligosaccharides, soluble arabinoxylan, water holding capacity, and oil holding capacity by 59.5%, 635%, 125.0%, 5%, and 25.6%, respectively. The enzyme combination group had the lowest retrogradation value, and the highest farinograph quality number, with the dough being uniform and porous. The addition of hydrolyzed wheat bran improved the sensory and texture properties of steamed bread, and the quality of steamed bread was the best in the enzyme combination group. Compared with the control group, the treatment with the enzyme combination increased the specific volume, elasticity, resilience, and sensory score by 25.1%, 18.8%, 42.9%, and 15.0% and decreased the hardness and chewiness by 23.0% and 21.0%, respectively. The results indicated that the quality of wheat bran was improved by enzymatic hydrolysis, and the combination of cellulase with pentosanase demonstrated the best effect, which produced high-quality whole wheat flour and whole wheat steamed bread.

Key words: wheat bran; enzymatic hydrolysis; whole wheat; dough; steamed bread

引文格式:

李晓月, 李振华, 孙雪原, 等. 麦麸酶解对全麦面团和馒头品质特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 38-44.

LI Xiaoyue, LI Zhenhua, SUN Xueyuan, et al. Effects of Enzymatic Hydrolysis of Wheat Bran on Quality Characteristics of Whole Wheat Dough and Steamed Bread[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 38-44.

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2020CXGC0108053)

作者简介: 李晓月(1989—), 女(汉), 工程师, 硕士, 研究方向: 粮油检测。

*通信作者: 龚魁杰(1970—), 男, 研究员, 博士, 研究方向: 全谷物食品; 孙琳琳(1990—), 女(汉), 助理研究员, 硕士, 研究方向: 全谷物食品。

人群流行病学研究表明,全谷物能够降低体质量、心脑血管疾病和糖尿病的发病风险,其营养健康概念逐渐深入人心^[1-3]。馒头作为我国的传统主食,占小麦消费总量的40%以上^[4]。采用全麦馒头代替普通馒头,对我国居民健康饮食、膳食营养具有重大意义。但当前全麦馒头普遍存在口感粗糙、气味和色泽不佳的问题而难以推广,全麦馒头的口感品质亟待解决。

全麦产品食用品质差的主要原因是麦麸添加导致面团结构劣化,因此,全麦馒头品质改良技术研究得到了广泛关注。大多数研究通过添加谷朊粉或乳化剂等品质改良剂强化面团结构^[5],也有研究采用酶制剂改良全麦馒头品质^[4,6-8],都取得了一定的效果。但这种在馒头制作过程中添加酶制剂的方法一般不适用于家庭生产,且酶解效率不高。

前期研究发现,将麦麸直接进行改性处理,降低麦麸添加对面团网络结构的稀释作用,是提高全麦产品品质的重要途径。麦麸进行酶解处理后,粉碎回添到小麦粉中,可以提升麦麸加工品质,改善全麦面团结构。针对麦麸中的主要组分不溶性阿拉伯木聚糖(water-unextractable arabinoxylan, WUAX)和纤维素,本文分别采用戊聚糖酶(pentosanase, Pn)和纤维素酶(cellulase, Ce)进行酶解,降解大分子组分,实现麦麸改性,同时分析采用改性麦麸制备全麦粉的面团结构变化,评价全麦馒头的感官品质,为解决传统全麦馒头口感粗糙、质地干硬等关键问题提供参考,以获得高品质全麦馒头的制备方法。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦(‘济麦23’):市售;高活性干酵母:安琪酵母有限公司;戊聚糖酶[Pentopan Mono BG, 2 500 FXU/g]、纤维素酶(Celluclast BG, 3 500 EGU/g):诺维信生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

ME103T/02型电子天平(0.001 g):瑞士梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;IM9500近红外谷物分析仪:瑞典波通仪器公司;RVA-4型快速黏度仪:美国Newport公司;S-3000N扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM):日本HITACHI公司;Farinograph-E型粉质仪:德国Brabender公司;ASM-DA600型多功能厨师机:北美电器鑫诺科捷有限公司;160HC型恒温恒湿培养箱:江苏金怡仪器科技有限公司;CUFG5-21F型多功能电热锅:山东多星电器有限公司;MT型面包体积测量仪:河北大宏实验仪器有限公司;TA.XT Plus物性分析仪:英国Stable Micro System公司;CDI AUTO型磨粉机:法国肖邦技术公司;Q150GB型离子溅射镀膜仪:南京覃思科技有限公司;

恒温搅拌罐:山东鲁粮稼禾食品有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备方法

将小麦水分含量调整到15%,润麦24 h,采用磨粉机进行磨粉,出粉率控制在70%左右,所得麦麸作为麦麸处理对照组(Wb-CK)。

按照GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》的方法测定麦麸中的水分含量,计算将麦麸含水量调整到20%所需的加水量。然后将纤维素酶和戊聚糖酶按照2:3(质量比)混合,配成复合酶,分别称取40 mg/kg麦麸的纤维素酶、60 mg/kg麦麸的戊聚糖酶、100 mg/kg麦麸的复合酶溶于水,添加到麦麸中,充分混合均匀,在50℃恒温搅拌罐中搅拌2 h进行酶解反应,取出,105℃烘干灭酶,超微粉碎处理,分别得到纤维素酶处理麦麸(Wb-Ce)、戊聚糖酶处理麦麸(Wb-Pn)和复合酶处理麦麸(Wb-Com)。

将Wb-CK、Wb-Ce、Wb-Pn和Wb-Com 4种麦麸按比例回添到小麦粉中,得到4种不同的全麦粉,分别编号为W-CK、W-Ce、W-Pn和W-Com。使用W-CK、W-Ce、W-Pn和W-Com 4种全麦粉制作的面团分别编号为D-CK、D-Ce、D-Pn和D-Com。使用W-CK、W-Ce、W-Pn和W-Com 4种全麦粉制作的馒头分别编号为SB-CK、SB-Ce、SB-Pn和SB-Com。

1.3.2 麸皮中膳食纤维组成的测定

不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)和可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)含量根据GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》的方法进行检测。

低聚糖含量采用蒽酮硫酸法进行测定。

总膳食纤维(total dietary fiber, TDF)由IDF、SDF和低聚糖三者相加获得。

1.3.3 阿拉伯木聚含量测定

根据NY/T 2335—2013《谷物中戊聚糖含量的测定 分光光度法》中的方法测定阿拉伯木聚糖含量。

1.3.4 改性麦麸持水性测定

将1 g面粉倒入20 mL水中,室温下缓慢搅拌30 min,然后3 000 r/min离心15 min。将上清液倒入已知质量的蒸发皿中。持水性(water absorption, WAI)计算公式如下。

$$W = M_1/M_2 \times 100$$

式中:W为持水性,%;M₁为倾出上清液后沉淀物质量,g;M₂为样品质量,g。

1.3.5 改性麦麸持油性测定

将0.5 g面粉和10 mL成品油混合放入预先称重的离心管中静置10 min,然后以3 000 r/min离心25 min,倒置10 min,排出上清液,称重。持油性(oil absorption, OAC)计算公式如下。

$$O = (W_2 - W_1) / W_0 \times 100$$

式中: O 为持油性, %; W_0 为干燥样品的质量, g; W_1 为干燥样品和离心管的总质量, g; W_2 为离心后残留物和离心管的总质量, g。

1.3.6 糊化特性测定

根据 GB/T 24853—2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速粘度仪法》方法, 使用近红外谷物分析仪测定各组样品的水分含量, 参照水分校正表, 准确称量样品和水, 按照仪器自设程序, 进行操作, 采用快速黏度分析仪 (rapid viscosity analysis, RVA) 分别测定各组样品的峰值黏度、衰减值、最终黏度、回生值、峰值时间和糊化温度。

1.3.7 粉质特性测定

采用粉质仪, 根据 GB/T 14614—2019《粮油检验 小麦粉面团流变学特性测试 粉质仪法》的方法测定各组样品的粉质特性。

1.3.8 扫描电子显微镜观察

将双面胶贴于扫描电子显微镜的载物台上, 用牙签蘸取少许冻干后的样品轻轻在双面胶上涂抹均匀。用洗耳球吹去多余的样品, 然后用离子溅射镀膜仪将样品喷炭镀金, 后将载物台取出放入扫描电子显微镜中观察颗粒的表面结构。

1.3.9 馒头制作

每种全麦粉分别配粉, 按照酵母 1%、水 55% 分别称量 (以全麦粉计), 置于多功能厨师机中和面 10 min。取出, 将面团置于 34 °C、相对湿度为 78% 的恒温恒湿培养箱中进行发酵 1 h。发酵结束后分割成 100 g 左右的小面团, 搓圆整形, 醒发 20 min (34 °C, 相对湿度 78%), 蒸制 20 min, 制得馒头成品。

1.3.10 比容测定

采用 GB/T 21118—2007《小麦粉馒头》附录 A 的菜籽置换法, 测定馒头的体积 (mL)。比容计算公式如下。

$$\lambda = V/m$$

式中: λ 为馒头比容, mL/g; V 为馒头体积, mL; m 为馒头质量, g。

1.3.11 感官评价

馒头感官评分标准参照 GB/T 21118—2007《小麦粉馒头》、GB/T 35991—2018《粮油检验 小麦粉馒头加工品质评价》中附录 B 和 GB/T 17320—2013《小麦品种品质分类》中附录 A 的评分标准, 并根据全麦馒头特点作适当修改, 优选 7 名感官评价人员根据表 1 对产品进行感官评价。

1.3.12 质构特性测定

馒头制作完成后室温冷却 1 h, 切成 25 mm 厚度的片, 平放在测试探头正下方进行质构分析 (texture profile analysis, TPA) 测试。测试所用探头为 P/25 柱形

表 1 全麦馒头品质评分标准

Table 1 Quality evaluation criteria of whole wheat steamed bread

项目	评分标准	得分
比容 (15)	比容 ≥ 2.8 mL/g	15
	1.8 mL/g < 比容 < 2.8 mL/g	每下降 0.1 扣 1.0
	比容 ≤ 1.8 mL/g	5
外观 (15)	表面光滑	13~15
	皱缩、塌陷、有气泡或烫斑	8~<13
色泽 (10)	光泽性好	8~10
	稍暗	6~<8
	灰暗	4~<6
组织结构 (15)	气孔细腻均匀	12~15
	气孔基本细腻均匀, 有个别气泡	8~<12
	有大气孔、结构粗糙	5~<8
弹性 (15)	咬劲强、回弹快、能快速复原、可压缩 1/2 以上	12~15
	咬劲强、回弹较快	8~<12
	咬劲一般、回弹弱	5~<8
黏性 (10)	爽口不粘牙	8~10
	稍粘牙或粘牙	3~<8
气味、滋味 (20)	麦香浓郁、无异味	15~20
	味道平淡	8~<15
	有异味	5~<8

探头; 仪器参数设定在 TPA 模式下, 前速率 2.0 mm/s, 中速率 1.0 mm/s, 后速率 1.0 mm/s; 压缩率 50%; 两次压缩的时间间隔为 5.0 s; 触发类型设置为 AUTO; 起点感应力为 5 g; 数据采集速率为 200 pps。

1.4 统计分析

利用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行数据处理和方差分析, 每个试验重复 3 次。显著性分析采用 Duncan 检验, $P < 0.05$ 为差异显著, 试验数据采用平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 改性麦麸膳食纤维含量变化

改性麦麸膳食纤维含量变化如表 2 所示。

表 2 改性麦麸膳食纤维含量变化

Table 2 Changes in dietary fiber content of modified wheat bran

组别	IDF 含量/%	SDF 含量/%	低聚糖含量/%	TDF 含量/%
Wb-CK	31.29 \pm 1.21 ^a	9.54 \pm 0.13 ^c	1.58 \pm 0.12 ^b	42.41 \pm 1.46 ^b
Wb-Ce	22.32 \pm 0.88 ^b	14.27 \pm 0.21 ^a	6.81 \pm 0.32 ^a	43.41 \pm 1.41 ^b
Wb-Pn	24.84 \pm 0.86 ^b	11.18 \pm 0.18 ^b	10.53 \pm 0.89 ^a	46.54 \pm 1.93 ^a
Wb-Com	22.07 \pm 0.76 ^b	15.22 \pm 0.23 ^a	11.61 \pm 0.96 ^a	48.90 \pm 1.94 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

由表 2 可知, 3 种酶解处理方式都会显著降低 IDF 含量 ($P < 0.05$), 显著升高 SDF 含量 ($P < 0.05$)。与 Wb-CK 相比, Wb-Ce 的 IDF 含量降低 28.7%, SDF 含量提高 49.6%, 低聚糖含量上升 331.0%, TDF 含量则变化

不大。Wb-Pn 的 IDF 含量降低 20.6%, SDF 含量提高 17.2%, 低聚糖含量上升 566.4%, TDF 含量达到 46.54%, 显著高于 Wb-CK ($P < 0.05$)。表明酶解处理可将麦麸中的部分 IDF 转化为 SDF, 同时增加低聚糖含量, 使 TDF 含量上升^[9]。两种酶复合处理达到了最好的效果, Wb-Com 的 IDF 含量降低 29.5%, SDF 含量提高 59.5%, 低聚糖含量上升 634.8%, TDF 含量上升 15.3%。

2.2 改性麦麸阿拉伯木聚糖含量变化

改性麦麸阿拉伯木聚糖含量变化如表 3 所示。

表 3 改性麦麸阿拉伯木聚糖含量变化

Table 3 Changes in arabinoxylan content of modified wheat bran

组别	总阿拉伯木聚糖含量/(g/100 g)	水溶性阿拉伯木聚糖含量/(g/100 g)	水溶性阿拉伯木聚糖占比/%
Wb-CK	13.60±0.14 ^a	1.96±0.01 ^b	14.41±0.05 ^b
Wb-Ce	12.36±0.01 ^a	2.04±0.02 ^b	16.50±0.02 ^b
Wb-Pn	13.12±0.01 ^a	4.06±0.01 ^a	30.95±0.01 ^a
Wb-Com	13.05±0.04 ^a	4.22±0.05 ^a	32.34±0.05 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

由表 3 可知, 与 Wb-CK 相比, 酶处理后麸皮中的总阿拉伯木聚糖 (arabinoxylan, AX) 含量都有所下降, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。戊聚糖酶处理的水溶性阿拉伯木聚糖 (water-extractable arabinoxylan, WEAX) 含量显著升高 ($P < 0.05$), 纤维素酶处理的 WEAX 也略有升高 ($P > 0.05$)。双酶复合处理的效果最明显, Wb-Com 的 WEAX 含量达到 Wb-CK 的 215.3%。WEAX 占总 AX 的比重都不同程度的上升, 其中 Wb-Pn 和 Wb-Com 的 WEAX 占比均超过 30%。戊聚糖酶处理可把部分水不溶性阿拉伯木聚糖 (water insoluble arabinoxylan, WUAX) 转化为 WEAX, 而纤维素酶处理则可有效降低总阿拉伯木聚糖含量^[10], 两者复合处理效果更佳。

2.3 改性麦麸持水性、持油性变化

改性麦麸持水性、持油性变化如表 4 所示。

表 4 改性麦麸持水性、持油性变化

Table 4 Changes in water holding capacity and oil holding capacity of modified wheat bran

组别	WAI/%	OAC/%
Wb-CK	369±21 ^c	242±19 ^c
Wb-Ce	378±25 ^b	244±18 ^c
Wb-Pn	382±23 ^b	276±20 ^b
Wb-Com	388±28 ^a	304±23 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

由表 4 可知, 与 Wb-CK 相比, Wb-Ce、Wb-Pn 和 Wb-Com 的持水性均显著升高 ($P < 0.05$)。小麦麸皮膳

食纤维的结构致密, 亲水基团多被包裹在结构内部, 因此持水力较低。纤维素酶可使纤维素分子的长链发生断裂, 微晶纤维素结构被破坏, 纤维素分子间的氢键被打开, 使更多的羟基暴露出来, 所以提高了其持水性^[11-12]。而戊聚糖酶处理使 WUAX 转化为 WEAX, 导致其持水性升高。两种酶复合处理效果最佳, 与 Wb-CK 相比, Wb-Com 的持水性升高 5.1%。

经酶改性处理的麦麸持油性也有所提升, Wb-Ce 和 Wb-CK 的持油性差异不显著 ($P > 0.05$), 而 Wb-Pn 和 Wb-Com 的持油性与 Wb-CK 相比显著升高 ($P < 0.05$), 这是因为戊聚糖酶改性后不仅亲水性基团暴露出来, 一些亲油基团也会暴露出来, 进而增加了其持油性。

一般而言, 麸皮的加入对面团流变学性质和面筋蛋白结构都有劣化作用。而对麦麸进行适当酶解处理, 可使部分 IDF 转化为 SDF 和低聚糖, 麦麸内部结构更均匀多孔, 暴露出更多的亲水基和亲油基, 提高其持水性和持油性, 更易被人体消化吸收, 且由此制作的全麦馒头更有利于缓解便秘、改善肠道微环境。同时, 这可在一定程度上减轻麦麸的劣化作用, 改善全麦面团的流变学特性, 提升全麦馒头的适口性。

2.4 改性全麦粉糊化特性变化

淀粉的糊化特性对于评估食品品质是不可避免的, 尤其是在改善淀粉基食品的质地和提高其稳定性方面^[13]。改性全麦粉糊化特性变化如表 5 所示。

表 5 改性全麦粉糊化特性变化

Table 5 Gelatinization characteristics of modified wheat wheat flour

组别	峰值黏度/cP	衰减值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	峰值时间/min	糊化温度/°C
W-CK	1 135±11 ^a	432±4 ^a	1 667±12 ^b	947±8 ^a	5.53±0.05 ^a	87.20±0.12 ^a
W-Ce	1 134±12 ^a	377±5 ^b	1 616±15 ^b	885±8 ^b	5.53±0.03 ^a	87.15±0.15 ^a
W-Pn	1 144±14 ^a	389±3 ^b	1 734±17 ^a	922±9 ^a	5.60±0.04 ^a	87.25±0.18 ^a
W-Com	1 151±11 ^a	359±4 ^b	1 739±18 ^a	859±9 ^b	5.73±0.05 ^a	88.80±0.08 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

由表 5 可知, 与 W-CK 相比, 酶处理后的峰值黏度和糊化温度有所变化, 但差异不显著 ($P > 0.05$), 而 W-Pn 和 W-Com 的最终黏度显著升高 ($P < 0.05$)。峰值黏度是因为淀粉吸水膨胀, 溶出物发生摩擦, 糊液黏度急剧增加, 它的高低是衡量淀粉颗粒膨胀程度和直链淀粉溶出数量多少的标准, 显示了淀粉结合水的能力和淀粉酶活性大小, 与最终产品的品质有关^[14-15]。

酶处理均可降低全麦粉的衰减值($P<0.05$)。衰减值与膨胀后淀粉粒的刚性有关,反映淀粉糊的热稳定性,衰减值越低,则淀粉糊稳定性越高。

纤维素酶和复合酶处理可显著降低全麦粉的回生值($P<0.05$),戊聚糖酶效果不显著($P>0.05$)。与 W-CK 相比,W-Ce 的回生值降低了 6.5% 左右,W-Com 则降低了 9.3% 左右。回生值反映淀粉糊化后的老化回生速度,值越大,产品的老化速率越快,货架期也就越短^[16]。

2.5 改性全麦粉粉质特性变化

改性全麦粉粉质特性变化如表 6 所示。

表 6 改性全麦粉粉质特性变化

Table 6 Changes in properties of modified whole wheat flour

组别	吸水率/%	形成时间/ min	稳定时间/ min	弱化度/ FU	粉质质量 指数/mm
W-CK	73.10± 0.02 ^b	3.36± 0.10 ^b	3.49± 0.05 ^b	119±1 ^a	60±1 ^d
W-Ce	74.20± 0.01 ^a	3.53± 0.11 ^b	4.38± 0.04 ^a	105±1 ^a	69±0 ^c
W-Pn	72.80± 0.03 ^b	3.42± 0.12 ^b	3.55± 0.03 ^b	108±1 ^a	76±1 ^b
W-Com	72.70± 0.02 ^b	4.19± 0.13 ^a	5.23± 0.04 ^a	98±1 ^b	86±1 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表 6 可知,W-CK 的吸水率为 73.10%,W-Ce 的吸水率升高为 74.20%,二者差异显著($P<0.05$)。这是因为纤维素酶处理后,更多亲水基团暴露,增加了水结合位点。而 W-Pn 和 W-Com 的吸水率与 W-CK 相比无显著差异($P>0.05$)。这是由于戊聚糖酶会从两方面影响面团的吸水率,一是 WUAX 成分的降解可造成面团吸水率的降低;二是酶解得到的 WEAX 会改善面筋网络,从而促进面团吸水。以上两个方面的作用相互制衡,使得面团吸水率变化较小^[17]。

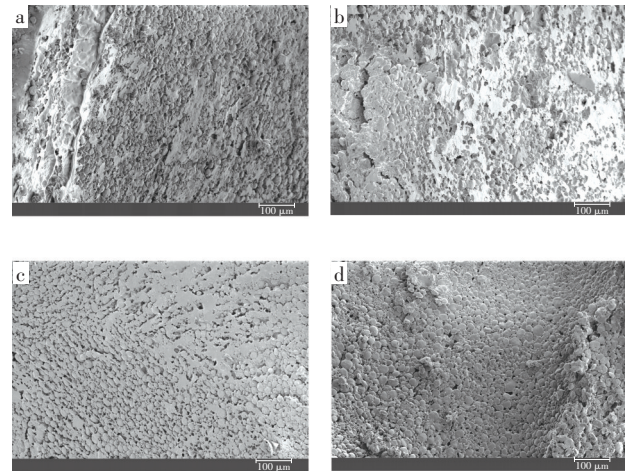
由表 6 可知,酶处理后的面团形成时间和稳定时间较 W-CK 均有所延长,其中纤维素酶的作用效果更为明显,W-Ce 的稳定时间显著高于 W-CK($P<0.05$)。这是因为纤维素酶可使原来在空间上阻碍面筋网络结构形成的部分木聚糖降解,从而使面筋网络结构充分形成,面团稳定时间延长。W-Com 的面团形成时间和稳定时间较 W-CK 分别延长 25% 和 50% 左右,较 W-Pn 分别延长 23% 和 47%,较 W-Ce 均延长 19%,表明纤维素酶和戊聚糖酶复合处理的麸皮更有利于提升全麦粉加工品质。

两种酶单独处理后的全麦粉弱化度较 W-CK 均有不同程度下降,但未达显著水平($P>0.05$)。酶处理麸皮均显著提高了全麦粉的粉质质量指数($P<0.05$),而戊聚糖酶处理的粉质质量指数显著高于纤维素酶($P<$

0.05)。复合酶解处理表现出更低的弱化度和更高的粉质质量指数,各项指标综合评判,纤维素酶和戊聚糖酶复合处理效果最好,更有利制备高品质的全麦粉。

2.6 改性全麦面团微观结构变化

面团的组成、蛋白质与淀粉的空间排列以及它们之间结合键的种类等都直接影响面团的流变学特性。面团的微观结构决定着面团的宏观特性,因此分子水平的微观结构观察将有利于面团结构的研究^[18]。改性全麦面团扫描电子显微镜图谱如图 1 所示。



a. D-CK; b. D-Ce; c. D-Pn; d. D-Com。

图 1 改性全麦面团 SEM 图谱($\times 500$)

Fig.1 SEM images of modified whole wheat dough ($\times 500$)

由图 1a 可知,醒发完成的面团结构中可以看到淀粉颗粒镶嵌在充分水化的蛋白质形成的面筋网络中。对比图 1a 和图 1b 可以发现,经纤维素酶处理后的面团结构变化明显,表面变得凹凸不平。这是因为在纤维素酶的作用下部分纤维素被水解,纤维素分子间的部分氢键被打开,导致表面出现凹痕,结构变得松散。

由图 1c 可知,经戊聚糖酶处理后的小麦麸皮制备的全麦面团,网络结构更加开放疏松多孔,可以观察到更多的淀粉颗粒,且气孔较均匀。这可能是戊聚糖酶的加入使得水溶性戊聚糖含量增加,分子间发生氧化交联,凝胶能力增强。

由图 1d 可知,纤维素酶和戊聚糖酶复合处理的全麦面团表现出更为优良的面团结构,表面出现明显的孔状结构,形成较多的空洞,相较于 D-Pn,气孔更小更均匀。表明双酶复合作用可更深入纤维分子内部,使原来排列紧密的纤维素分子结构变得更加疏松,分子间氧化交联程度提高。

2.7 改性全麦馒头感官评价

改性全麦馒头感官评分如表 7 所示。

由表 7 可知,未经酶解改性处理的全麦馒头比容小,缺乏弹性,组织结构粗糙,较硬,感官评分较低。除

表7 改性全麦馒头感官评分

Table 7 Sensory scores of modified whole wheat steamed bread

组别	比容得分	外观	色泽	组织结构	弹韧性	黏性	气味、滋味	总分
SB-CK	11.21±0.21 ^b	12.34±0.42 ^b	8.56±1.11 ^b	8.25±1.12 ^b	8.31±0.46 ^b	7.78±1.20 ^b	17.37±2.08 ^b	73.82±6.60 ^d
SB-Ce	13.56±0.43 ^a	12.89±0.47 ^a	9.67±0.93 ^a	9.72±0.93 ^a	8.45±0.58 ^b	9.46±0.43 ^a	18.36±1.82 ^a	82.11±5.59 ^c
SB-Pn	13.99±0.23 ^a	13.37±0.53 ^a	9.65±0.66 ^a	9.54±0.78 ^a	9.02±0.81 ^a	9.39±0.83 ^a	18.40±1.73 ^a	83.36±5.57 ^b
SB-Com	14.02±0.52 ^a	13.95±0.51 ^a	9.91±0.85 ^a	9.26±0.75 ^a	9.38±0.62 ^a	9.42±0.81 ^a	18.92±1.82 ^a	84.86±5.88 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

弹韧性外,两种酶分别处理的全麦馒头均较 SB-CK 有显著提升($P<0.05$)。纤维素酶改性处理的全麦馒头比容、组织结构和弹韧性得分分别比 SB-CK 升高 21.0%、17.8% 和 1.7%。这是因为纤维素酶处理改变了纤维素的结晶结构,使纤维素分子之间的氢键破坏,产生部分可溶性的微结晶。SB-Pn 的馒头比容、组织结构和弹韧性得分分别比 SB-CK 升高 24.8%、15.6% 和 8.5%。这是因为戊聚糖酶把部分 WUAX 转化为 WEAX, WEAX 是亲水胶体,可在一定程度上消除 WUAX 的负面影响,吸水形成网络结构^[19],从而增加比容,改善组织结构,提高弹韧性,降低黏度。

纤维素酶和戊聚糖酶复合处理组的馒头比容、组织结构和弹韧性都得到了明显提高,比容增幅达

25.1%,总分比 SB-CK 提高 15.0%。这得益于两种酶之间的互相补充。纤维素酶首先切断纤维素长链之间的纤丝,然后继续水解纤维素分子。由于纤维素和阿拉伯木聚糖两种大分子以互相缠绕的方式存在,纤丝部分水解后,内切木聚糖酶才能够作用于阿拉伯木聚糖,阿拉伯木聚糖部分水解后,与之结合的水逐渐释放出来,这些水在馒头面筋和破损淀粉之间重新分配,从而改善了面团的延伸性和持气性,提高面团的柔软性^[20]。

2.8 改性全麦馒头质构特性

在一定范围内,馒头的硬度、黏聚性、咀嚼度与馒头品质呈负相关,而馒头的弹性、回复性与馒头的持气性和品质呈正相关^[21]。改性全麦馒头质构特性如表 8 所示。

表8 改性全麦馒头质构特性

Table 8 Texture characteristics of modified whole wheat steamed bread

组别	硬度/g	弹性/%	黏聚性/g	胶着度	咀嚼度/g	回复性
SB-CK	2 498.71±62.00 ^a	0.80±0.02 ^b	0.703±0.002 ^a	1 756.22±39.81 ^a	1 636.80±48.84 ^a	0.28±0.01 ^b
SB-Ce	2 337.84±188.26 ^b	0.93±0.01 ^a	0.688±0.013 ^a	1 606.72±114.09 ^b	1 279.31±107.70 ^b	0.39±0.07 ^a
SB-Pn	2 159.03±303.65 ^c	0.95±0.04 ^a	0.711±0.102 ^a	1 516.20±70.43 ^c	1 442.69±83.92 ^a	0.40±0.01 ^a
SB-Com	1 922.85±169.15 ^d	0.95±0.01 ^a	0.708±0.017 ^a	1 360.88±108.27 ^d	1 292.86±96.13 ^b	0.40±0.01 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表 8 可知,与 SB-CK 相比,SB-Ce 馒头硬度降低 6.4%、咀嚼度降低 21.8%,弹性提高 16.3%、回复性提高 39.3%。全麦粉含有大量纤维基质,导致馒头发硬,同时纤维基质对淀粉-面筋网络结构产生破坏,限制或迫使气体在特定方向上膨胀,从而影响馒头气室结构。万仁口等^[22]研究表明,纤维素酶的添加有利于改变纤维素结晶结构,水分子的介入使纤维素分子之间的氢键破坏,产生部分可溶性的微结晶,同时纤维素酶的添加,有可能降低对戊聚糖的物理束缚,促进可溶性戊聚糖的释放,因而可能对全麦馒头品质产生有利影响。

与 SB-CK 相比,SB-Pn 馒头硬度降低 13.6%、咀嚼度降低 11.9%,弹性提高 18.8%、回复性提高 42.9%。这是因为戊聚糖酶可把水不溶性戊聚糖转化为水溶性戊聚糖,而水溶性戊聚糖可以显著增加面团吸水量,延长面团的稳定时间,增大馒头体积,改善内部质地结构,延缓淀粉老化。两种酶复合处理也表现出更好的

馒头质构特性,与 SB-CK 相比,SB-Com 馒头硬度降低 23.0%、咀嚼度降低 21.0%,弹性提高 18.8%、回复性提高 42.9%。全麦馒头质构表现出与全麦馒头感官评价相似的结果,表明两种酶的复合处理更有利于制备高品质的馒头。

3 结论

纤维素酶和戊聚糖酶复合酶解改性麦麸,纤维素酶可将部分 IDF 转化为 SDF 和低聚糖,WUAX 转化为 WEAX。对比未处理组,SDF 和低聚糖含量分别从 9.54% 和 1.58% 提高到 15.22% 和 11.61%;WEAX 从 1.96% 增加到 4.22%。改性麦麸持水性和持油性显著提升($P<0.05$)。改性之后的麦麸进行超微粉碎,回添到小麦粉中制成全麦粉,回生值降低了 9.3% 左右;全麦面团形成时间和稳定时间均有不同程度地延长;面团表面出现明显的孔状结构,形成气孔更小更均匀。

采用双酶复合改性制备的全麦馒头,对比未处理组,比容增加 25.1%,总分提高 15.0%,硬度降低 23.0%,咀嚼度降低 21.0%,弹性提高 18.8%,回复性提高 42.9%。全麦馒头疏松多孔,感官特性和食用品质都得到很大改善。改性全麦粉可直接用于家庭或馒头作坊,生产高品质的全麦馒头产品。

参考文献:

- [1] HUANG T, XU M, LEE A, et al. Consumption of whole grains and cereal fiber and total and cause - specific mortality: Prospective analysis of 367, 442 individuals[J]. BMC Medicine, 2015, 13: 59.
- [2] LIU S M. Intake of refined carbohydrates and whole grain foods in relation to risk of type 2 diabetes mellitus and coronary heart disease[J]. Journal of the American College of Nutrition, 2002, 21(4): 298-306.
- [3] RICCARDI G, COSTABILE G. Carbohydrate quality is key for a healthy and sustainable diet[J]. Nature Reviews Endocrinology, 2019, 15(5): 257-258.
- [4] 刘丽娅, 岳颖, 蔺艳君, 等. 复合酶制剂对全麦馒头品质的改良作用[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(2): 14-19.
LIU Liya, YUE Ying, LIN Yanjun, et al. Quality improvement of whole wheat Chinese steamed buns by complex enzymes[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(2): 14-19.
- [5] 王佳玉, 陈凤莲, 吴迪, 等. 双乙酰酒石酸单双甘油酯对全麦面团特性及全麦馒头品质影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(9): 1-6.
WANG Jiayu, CHEN Fenglian, WU Di, et al. Effects of diacetyl tartaric acid ester of monoglycerides on the properties of whole wheat dough and the quality of whole wheat steamed bread[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(9): 1-6.
- [6] 孙亚森, 郑学玲. 戊聚糖酶对面粉中淀粉-面筋蛋白分离效果的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 138-142.
SUN Yasen, ZHENG Xueling. Effect of pentosanase on the separation of starch-gluten protein in flour[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(11): 138-142.
- [7] LIU L Y, 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] 蔺艳君. 复合酶处理对全麦馒头品质的改良作用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
LIN Yanjun. Quality improvement of whole wheat Chinese steamed bread with compound enzyme[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [9] 杨炜. 酶制剂在全麦馒头品质改良中的应用及其机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
YANG Wei. Study on the application and mechanism of enzymes in the quality improvement of whole wheat Chinese steamed bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [10] 王立, 杨炜, 钱海峰, 等. 麦麸非淀粉多糖对烘焙品质的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 248-255.
WANG Li, YANG Wei, QIAN Haifeng, et al. Effects of non-starch polysaccharides in wheat bran on quality of baking products[J]. Food & Machinery, 2015, 31(4): 248-255.
- [11] SAEED F, PASHA I, ANJUM F M, et al. Arabinoxylans and Arabinoxylans: A comprehensive treatise[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2011, 51(5): 467-476.
- [12] 王秋月, 林美柔. 酶解处理提升谷物麸皮营养价值与功能的研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(7): 155-159, 166.
WANG Qiuyue, LIN Meirou. Research progress on enzymatic hydrolysis to improve the nutritional value and function of grain bran[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(7): 155-159, 166.
- [13] 阎俊, 张勇, 何中虎. 小麦品种糊化特性研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(1): 9-13.
YAN Jun, ZHANG Yong, HE Zhonghu. Investigation on paste property of Chinese wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(1): 9-13.
- [14] WANG S J, WANG J R, YU J L, et al. A comparative study of annealing of waxy, normal and high-amylose maize starches: The role of amylose molecules[J]. Food Chemistry, 2014, 164: 332-338.
- [15] ZHOU L, MU T H, MA M M, et al. Staling of potato and wheat steamed breads: Physicochemical characterisation and molecular mobility[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(10): 2880-2886.
- [16] 郭颖, 刘付英, 陈国艳. 青稞全粉与中筋小麦粉复配体系品质特性研究[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(2): 79-85.
GUO Ying, LIU Fuying, CHEN Guoyan. Study on the quality characteristics of a compounded system composed by highland barley flour and medium strength flour[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(2): 79-85.
- [17] DEMIR M K, ELGÜN A. Comparison of autoclave, microwave, IR and UV-C stabilization of whole wheat flour branny fractions upon the nutritional properties of whole wheat bread[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(1): 59-66.
- [18] 王君荣, 曹佳兴, 刘翀, 等. 预处理不同粒度荞麦麸皮对面团及荞麦挂面品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(7): 30-38.
WANG Junrong, CAO Jiaying, LIU Chong, et al. Effect of pretreatment of buckwheat bran with different particle sizes on the quality of dough and buckwheat dried noodles[J]. Food Research and Development, 2023, 44(7): 30-38.
- [19] COURTIN C M, DELCOUR J A. Arabinoxylans and endoxylanases in wheat flour bread-making[J]. Journal of Cereal Science, 2002, 35(3): 225-243.
- [20] GHOSHAL G, SHIVHARE U S, BANERJEE U C. Effect of xylanase on quality attributes of whole-wheat bread[J]. Journal of Food Quality, 2013, 36(3): 172-180.
- [21] 孙莹, 李欣, 花玥, 等. 米糠粉、麦麸粉添加量对馒头及面团品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(2): 138-143.
SUN Ying, LI Xin, HUA Yue, et al. Effects of rice bran powder and wheat bran powder on the quality of steamed bun and dough[J]. Food Research and Development, 2023, 44(2): 138-143.
- [22] 万仁口, 贺杨正, 李功景, 等. 酶解制备竹笋可溶性膳食纤维及其抗氧化活性研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(3): 153-160.
WAN Renkou, HE Yangzheng, LI Gongjing, et al. Preparation and antioxidant activity of bamboo shoot soluble dietary fiber extracted by enzyme method[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(3): 153-160.