

发酵麦麸对面包面团生化特征及烘焙学特性的影响

Effect of fermented wheat bran on biochemical and baking properties of dough and bread

杨文丹¹ 张宾乐¹ 庄靓¹ 杨紫璇¹ 蒋慧¹

YANG Wen-dan¹ ZHANG Bin-le¹ ZHUANG Jing¹ YANG Zi-xuan¹ JIANG Hui¹

徐岩² 郑建仙³ 黄卫宁¹ Jacob Ojobi Omedi¹

XU Yan² ZHENG Jian-xian³ HUANG Wei-ning¹ OMEDI Jacob Ojobi¹

(1. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学生物工程学院工业生物技术教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 华南理工大学轻工与食品学院, 广东 广州 510640)

(1. State Key of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Key Laboratory of Industrial Biotechnology of Ministry of Education, School of Biotechnology,

Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 3. School of Light Industry and Food Science,

South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

摘要:采用马克斯克鲁维酵母(*Marx Kluyveromyces*)发酵麦麸,通过生化分析、流变特性测试及微观结构观察(Scanning electron microscope, SEM)等多种分析手段,研究其对面包面团生物化学特征和烘焙学特性的影响。结果表明:马克斯克鲁维酵母发酵麦麸中富含多种天然酶,主要包括纤维素酶、木聚糖酶和阿魏酸酯酶;水解酶在面包制作过程中持续作用,促进木聚糖溶解和酚类化合物释放,赋予面包较高的营养价值;与仅添加木聚糖酶的麦麸面包面团相比,马克斯克鲁维酵母发酵麦麸面包面团具有更好的持气性及连续的面筋网络结构,面包全质构特性和比容显著提升。研究结果显示,马克斯克鲁维酵母发酵麦麸可以作为一种天然面包功能配料。

关键词:马克斯克鲁维酵母;发酵麦麸;面包面团;烘焙学特性;酶;木聚糖

Abstract: The biochemical, rheological and scanning electron microscope (SEM) analysis were respectively used to evaluate the effect of added wheat bran fermented with *Marx Kluyveromyces* on dough

and bread biochemical and baking properties. The results showed that fermented wheat bran was rich in natural enzymes such as cellulase, xylanase and feruloyl esterase. The enzymes produced enhanced the solubilization of arabinoxylan and the release of phenols during bread making, thereby improving nutrition of the bread. Compared to dough with added xylanase, gas retention, continuous wheat gluten networks and the baking characteristics of bread with added *Marx Kluyveromyces* fermented bran significantly improved, especially, the texture and specific volume. These results indicated that fermented bran with *Marx Kluyveromyces* could be used as a natural and functional ingredient for bread making.

Keywords: *Marx Kluyveromyces*; fermented bran; bread dough; baking properties; enzymes; xylan

膳食纤维能预防多种现代病,如糖尿病、肥胖症等^[1],因此越来越受到消费者的关注^[2],作为西方主流食品的烘焙食品是膳食纤维的良好载体^[3]。麸皮是一种成本较低且富含膳食纤维的烘焙原料,而将麸皮应用到面包生产中存在巨大的挑战^[4-5]。严晓鹏等^[6]发现复配型酶制剂通过协同作用降解麸皮中的纤维素和木聚糖,可减少其对面团的劣化作用,强化面筋结构,提高面团柔软度;熊俐等^[7]提出纤维素主要影响新鲜面包品质,而木聚糖酶可以延缓麸皮面包老化。由此可见,酶在高膳食纤维面包制作过程中起着重要的作用^[8]。

马克斯克鲁维酵母(*Marx Kluyveromyces*)是一种新型的食品安全级酵母,相比传统酿酒酵母,它除了具有生长快,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31071595,31571877);“十三五”国家重大专项(编号:2016YFD0400500);福建省“百人计划”项目(编号:2017022);广东省教育部产学研结合项目(编号:2011B090400592);比利时国际合作项目(编号:BE110021000)

作者简介:杨文丹,女,江南大学在读硕士研究生。

通信作者:黄卫宁(1963—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: wnhuang@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2017-12-11

生物量高,耐高温等特点^[9],还可以利用麸皮、玉米浆等发酵生产酶类、乙醇及其它活性成分^[10]。有研究表明马克斯克鲁维酵母在底物诱导下能够分泌木聚糖酶、葡聚糖酶^[11]及 β -葡萄糖苷酶^[10]等纤维素水解酶,在工业发酵领域存在巨大的应用潜力。面包面团中富含多糖、蛋白等多种成分,这些分子在面包制作过程中发生复杂的相互作用,面团体系的化学组分及流变学特性都会发生相应变化^[12]。目前,关于马克斯克鲁维酵母发酵麦麸作为功能配料在烘焙产品中的应用未见报道。

本研究选用马克斯克鲁维酵母发酵麦麸制得富含天然酶的功能配料,分析麦麸发酵过程中的生化变化,并将其用于高膳食纤维面包制作中,旨在评估马克斯克鲁维酵母发酵麦麸中的天然酶对面包品质团品质的影响,为开发天然、营养的高膳食纤维面包功能配料提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

麦麸:河北省辛集市福之园面业有限公司;

高级面包粉:中粮面业(秦皇岛)鹏泰有限公司;

马克斯克鲁维酵母(*Marx Kluyveromyces*): ATCC36534,上海一研生物科技有限公司;

羧甲基纤维素钠(CMC-Na):化学纯,国药集团化学试剂有限公司;

福林酚试剂:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

木聚糖:优级纯,美国 Sigma 公司;

搅面缸:SM-25 型,新麦机械(无锡)有限公司;

数显恒温水浴锅:HHS-21-4 型,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;

混合实验仪:Mixolab2 型,法国 Chopin 公司;

发酵流变仪:F3 型,法国 Chopin 公司;

质构仪:CT3 型,美国 Brookfield 公司;

冷场发射扫描电子显微镜:SU8220 型,日本 HITACHI 公司;

物性测试仪:TA·XT2i 型,英国 Stable Micro System 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 发酵麦麸的制作 将马克斯克鲁维酵母在 YM 培养基中活化至对数后期,于 4 000 r/min 离心 10 min,收集菌泥并洗涤 2 次;用无菌生理盐水将菌泥配制成 4×10^7 CFU/mL 悬浮液。取 100 g 麦麸,接种 12 mL 菌悬液调制成 DY190 的麦麸面团,在 30 ℃ 培养箱连续培养 48 h,每 6 h 取样,直接用于酸度、菌落数和酶活测定。

1.2.2 面包面团的制作

(1) 麦麸面包面团(bran dough, BD):80%高筋粉和 20%麦麸。

(2) 马克斯克鲁维酵母发酵麦麸面包面团(fermented bran dough, FBD):80%高筋粉和 20%发酵 24 h 的麦麸。

(3) 木聚糖酶改良面包面团(bran dough with xylanase, XBD):80%高筋粉,20%麦麸和木聚糖酶(60 U/100 g)。

(4) 复合面包面团(fermented bran dough with xylanase, FXBD):80%高筋粉,20%发酵 24 h 的麦麸和木聚糖酶。面团搅拌后(10 min),醒发后(2 h)及焙烤后(冷却 2 h)分别取样,进行冷冻干燥及磨粉处理,过 80 目筛用于化学分析。

1.2.3 pH 及总可滴定酸度(TTA)的测定 根据 AACC 方法(2000)02-52,分别取 10 g 发酵麦麸于锥形瓶中,加入 90 mL 蒸馏水,磁力搅拌 30 min,静置 10 min,测定 pH。用 0.1 mol/L 的 NaOH 滴定至 pH 8.6,消耗的 NaOH 体积即为 TTA,每个样品至少重复操作 3 次。

1.2.4 酵母菌数的测定 按 GB 4789.15—2010 执行。

1.2.5 酶活测定 取 5 g 发酵麦麸于离心管中,加入 20 mL 醋酸钠缓冲液(0.5 mol/L,pH 5.0)混合均匀,于 30 ℃ 摇床提取 60 min,并在 4 ℃、10 000 r/min 离心 20 min,取上清液 4 ℃ 储藏备用。根据 DNS 法,分别以木聚糖^[13]和羧甲基纤维素(CMC)^[14]为底物测定木聚糖酶和纤维素酶活力。1 个酶活力单位(U)定义为:每分钟底物转化为 1 μ mol 木糖/葡萄糖所需的酶量。分别以木糖/葡萄糖标准曲线计算酶活。参照 Espinoza 等^[15]的方法,将 500 μ L 粗酶液加入到 600 μ L 预热的阿魏酸甲酯溶液(2 mg/mL)中,在 45 ℃ 下保温 10 min,将 1 mL 反应混合物加入到 2.5 mL 终止剂(10 mmol/L 甘氨酸缓冲液,用 NaOH 调节 pH 至 10)中,空白组以缓冲液代替酶液。在 325 nm 下测定吸光值,以 1 000~1 500 mmol/L 阿魏酸绘制标准曲线;1 个酶活力单位定义为:每分钟产生 1 μ mol 阿魏酸所需的酶量。

1.2.6 可溶性糖含量变化 采用间苯三酚法^[16]测定面包面团中可溶性阿拉伯木聚糖(WEAX)含量。称取 0.1 g 粉,加入 30 mL 去离子水超声提取 20 min,沸水提取 30 min,提取液 4 000 r/min 离心 10 min,收集上清液到 100 mL 容量瓶;用 30 mL 去离子水洗涤沉淀,室温震荡 10 min,离心并合并上清液,定容至 100 mL。采用苯酚-硫酸显色法^[17]测定样品中可溶性碳水化合物含量。

1.2.7 游离酚的释放量 称取面包面团样品 5.0 g,加入 70 ℃ 预热的 70%甲醇溶液 25 mL,玻璃棒搅拌均匀,70 ℃ 下浸提 10 min,不断搅拌,冷却后于 4 000 r/min 离心 20 min,残渣重复提取 1 次,合并上清液定容至 50 mL,锡纸包好备用。取 0.5 mL 提取液,加入 2.5 mL 福林酚试剂,迅速加入 2.0 mL 7.5% Na_2CO_3 溶液,室温避光反应 60 min,在 765 nm 处测定吸光值^[16]。

1.2.8 面团表观黏度 将 1.2.1 中松弛后的适量面团放进质构仪专用盒中,盒盖穿孔可调底。样品通过盖子挤压抬高底部直至被挤压到 1 mm 厚。挤压停止后,通过降低顶部释放压力。1 min 松弛后,玻璃探头下降挤压面团表面。将探头从面团表面分离所需要的力记录下来。每个样品重复 10 次及以上,面团的黏度即读取的面团黏度平均值。

1.2.9 面团热机械学特性 采用混合试验仪对面包面团搅拌性能进行测定。采用 Chopin+协议对 5 个面团的吸水率、面团形成时间和稳定时间进行测定。

1.2.10 面团发酵特性 采用发酵流变仪测定面包面团延伸

特性和持气能力。取面团 250 g 放入发酵篮中,测试条件:温度 38 ℃,面团重量 250 g,砝码 2 000 g,测试时间 3 h。每个样品至少重复 3 次,取平均值。

1.2.11 扫描电镜 挑取 2 g 醒发后(2 h)的面团置于青霉素瓶中进行固定(3%戊二醛),用磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L)漂洗 3 次后,再次进行固定(1%四氧化二锇),用磷酸缓冲液(0.1 mol/L)进行反复冲洗后,再用不同浓度的乙醇(30%, 50%, 70%, 90%, 100%)进行梯度洗脱,最后用醋酸异戊酯对乙醇进行置换,再经过干燥、离子溅射喷金等处理后,用扫描电镜进行观察。

1.2.12 面包烘焙品质分析 将 1.2.1 中的 4 种面团在 38 ℃/85% 条件下醒发 100 min,放进烤箱(170 ℃/210 ℃)焙烤 20 min,冷却 2 h 后,采用菜籽替代法对面包比容进行测定,按式(1)计算比容;用切片器将面包切成 1 cm 的均匀薄片,取中央完整均匀的两片面包进行全质构测定。

$$s = \frac{v}{m}, \quad (1)$$

式中:

s ——比容, mL/g;

v ——面包体积, mL;

m ——面包质量, g。

1.2.13 数据分析 采用 SPSS 17.0 及 Excel 2016 分析软件进行数据统计分析,运用方差分析法(ANOVA)进行显著性分析,显著差异水平取 $P \leq 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 麦麸发酵过程中酸度变化及酵母菌生长情况

由图 1 可知,发酵前期(0~18 h)马克斯克鲁维酵母经过短暂停滞期后即进入对数增长期,活菌数量从 1.7×10^6 CFU/g 增长至 1.3×10^8 CFU/g,产酸量也不断积累;发酵中期(18~30 h),酵母菌生长处于稳定期,活菌数保持在 10^8 CFU/g;发酵后期(30~48 h),酵母菌发生明显衰败,可能还伴随着杂菌的生长。发酵过程中,样品中可滴定酸(TTA)含量从 7.8 mL(0 h)上升至 18.8 mL(48 h),增加了 141%,而 pH 值仅下降了 7.81%,说明马克斯克鲁维酵母在发酵过程中释放了有机酸,且麦麸具有较强缓冲能力^[18]。值得一提的是,发酵麦麸酸度增加主要发生在发酵前期(0~18 h)和发酵后期(30~48 h),可能是前期酵母菌生长旺盛,释放或激活多种水解酶类产生大量有机酸;而后期产酸主要是腐败菌导致的,与菌落生长情况保持一致。

马克斯克鲁维酵母通过改变环境 pH 值影响了各种水解酶活力,有学者认为酸面团低 pH(3.9~4.1)环境会激活面粉中蛋白酶和淀粉酶活力^[19],而阿魏酸酯酶和 β -葡萄糖苷酶最适 pH 为 5.0~7.0^[20]。纤维素降解酶(内切、外切 β -葡聚糖酶)最适作用 pH 值相对较低(5.0)^[21],植物内源性木聚糖酶最适 pH 6.0~6.5^[22]。当然,发酵麦麸的 pH 值受到菌株来源、发酵条件及原料组成的影响。

2.2 麦麸发酵过程中酶活力变化

纤维素酶可以破坏纤维素非结晶区,随机水解 β -1,4-糖苷键将较长的纤维素分子链降解成具有还原性末端的小分

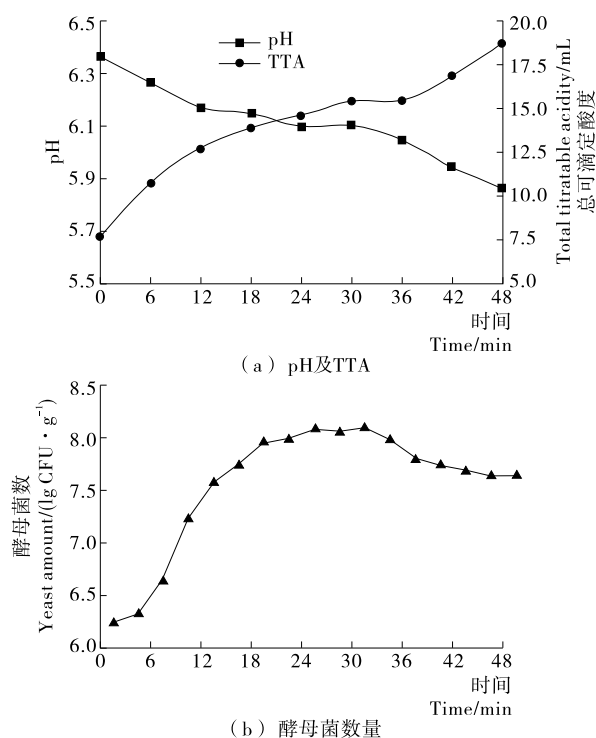


图 1 发酵麦麸 pH、TTA 和酵母菌数量的变化

Figure 1 pH, TTA and microbial counts during fermented process of wheat bran

子片段及单糖^[23-24]。如图 2 所示,随着发酵时间的延长,纤维素酶活力先增加后下降,发酵 6 h 时纤维素酶活力增加至 3 倍,发酵后期(30~48 h)纤维素酶活力保持在较低水平(0.300 U/g),可能与酶底物抑制有关^[25]。麦麸本身具有较高的内源性木聚糖酶活力(0.238 U/g),与 Gurpreet 等^[14]研究结果相近。发酵前期(0~12 h),发酵麦麸面团中木聚糖酶活力发生明显的上升,酶活力最高达 0.354 U/g。伴随着发酵时间的延长,木聚糖酶活力受到抑制,发酵后期(30~48 h)木聚糖酶活力低于 0.100 U/g。

由图 2 还可以看出,随着发酵时间的延长,阿魏酸酯酶活力略有提高随后降低;发酵 36 h 时,发酵麦麸中阿魏酸酯酶活力水平最高为 0.16 U/g,相比发酵 0 h 酶活提升了 39%。但是,在本研究中马克斯克鲁维酵母发酵麦麸代谢的阿魏酸

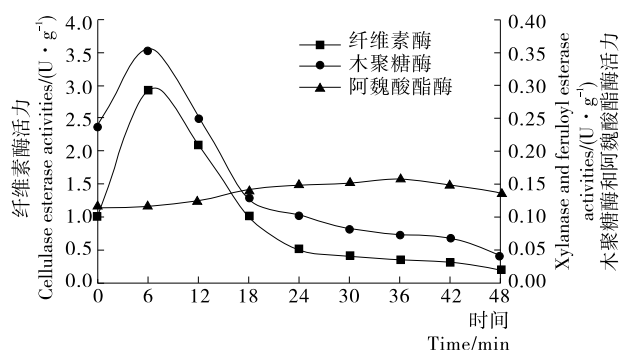


图 2 发酵麦麸中纤维素酶、木聚糖酶和阿魏酸酯酶活力的变化

Figure 2 Cellulase, xylanase and feruloyl esterase activities during fermented process of wheat bran

酯酶活力远低于黑曲霉^[26]等。研究^[27]表明,阿魏酸酯酶活性与体系 pH 值密切相关。酵母菌发酵麦麸时酸化作用较弱且麦麸具有较强缓冲能力,体系 pH 值维持在 6.0 左右[图 1(a)],接近肉桂酯酶最适 pH 值(7.0),而乳酸菌发酵产生大量的有机酸(pH 4.0 左右)抑制了肉桂酯酶活性。

2.3 面包制作过程中可溶性糖和游离酚含量变化

表 1、2 中显示了原料、面团及面包中 WEAX 含量的变化情况。小麦粉、麦麸中 WEAX 含量分别为 3.24、8.01 mg/g,经过 24 h 发酵的麦麸中 WEAX 含量增加了 2.23 倍($P\leq 0.05$)。在和面阶段强烈的机械搅拌作用下,面团中各组分得以充分混匀,木聚糖酶与底物充分接触反应。富含天然酶的发酵麦麸面团(FBD)和木聚糖酶面团(XBD)中 WEAX 含量分别比 BD 高出 45% 和 36%,FXBD 面团中 WEAX 含量最高,达到 6.68 mg/g,说明发酵过程代谢的木聚糖酶和添加的木聚糖酶对 WEAX 含量增加具有协同作用。醒发及焙烤后,4 种面团中 WEAX 含量都有明显增加(醒发后增加范围为 11%~34%;焙烤后增加范围为 45%~62%),这是由在醒发过程中和焙烤初期,麦麸内源性木聚糖酶和微生物来源木聚糖酶持续作用引起的,尤其在焙烤初期,木聚糖酶的活力与其耐热性密切相关^[28]。Priscilla 等^[29]研究表明,大部分的水不溶性阿拉伯木聚糖(WUAX)在搅拌和醒发过程中发生溶解,焙烤过程中部分 WEAX 会与其他组分通过化学链接或物理缠绕变得不可溶。

水溶性碳水化合物包括可溶性淀粉、纤维素、半纤维素、果胶等糖类物质,WF 中主要的碳水化合物是淀粉,且含量远高于 WB。经过马克斯克鲁维酵母发酵,FB 中可溶性碳水

表 1 小麦粉、麦麸及发酵麦麸中可溶性糖和游离酚含量[†]

Table 1 The content of soluble sugar and free phone of wheat flour, wheat bran and fermented wheat ran

原料样品	WEAX 含量/ (mg · g ⁻¹)	可溶性总糖 含量/%	游离酚含量/ (μg · g ⁻¹)
WB	8.01 ^b	8.21 ^a	1 610 ^b
FB	25.89 ^c	8.94 ^a	2 780 ^c
WF	3.24 ^a	31.43 ^b	577 ^a

† WB 为麦麸;FB 为马克斯克鲁维酵母发酵 24 h 的麦麸;WF 为小麦粉。同一列数据中标有不同小写字母表示组间差异显著($P\leq 0.05$)。

化合物含量略有上升(表 1)。相比 BD,FBD 和 FXBD 具有较高的可溶性碳水化合物含量,这是因为发酵促进难溶性纤维素的降解。木聚糖占碳水化合物比例较低,因此木聚糖酶对水溶性碳水化合物含量影响非常小。醒发后,面团中可溶性膳食纤维含量有所降低,可能是可发酵糖类作为酵母碳源被利用。但是不可否认的是,醒发过程中面团中纤维素降解酶类仍然会发生作用。焙烤后,面包中水溶性碳水化合物进一步降低,可能是由于还原糖类和氨基化合物发生了美拉德反应生成一些难溶性聚合物。

由表 1 可知,麦麸(WB)中游离酚酸含量高达 1 610 μg/g (约是 WF 的 2.8 倍),经过 24 h 发酵麦麸(FB)中游离总酚含量增加至 1.7 倍。面团面包制作过程中游离总酚含量与 WEAX 含量变化趋势相同,这都归因于内源或者外源纤维素酶对细胞壁的广泛降解作用^[30]。

表 2 面团搅拌、醒发和焙烤过程中可溶性糖和游离酚含量的变化[†]

Table 2 The change of the content of soluble sugar and free phone of dough during bread making

面团样品	WEAX 含量/(mg · g ⁻¹)			可溶性总糖含量/%			游离酚含量/(μg · g ⁻¹)		
	搅拌	醒发	焙烤	搅拌	醒发	焙烤	搅拌	醒发	焙烤
BD	3.76 ^a	5.04 ^a	6.09 ^a	30.01 ^b	29.44 ^a	25.68 ^a	729 ^a	846 ^b	1 334 ^a
FBD	5.44 ^b	6.89 ^b	8.62 ^c	27.13 ^{ab}	27.85 ^a	33.22 ^d	737 ^a	962 ^c	1 815 ^b
XBD	5.11 ^b	6.61 ^b	7.66 ^b	24.31 ^a	31.04 ^a	29.70 ^c	808 ^b	745 ^a	1 258 ^a
FXBD	6.68 ^c	7.44 ^c	9.73 ^d	34.31 ^c	28.60 ^a	27.47 ^{bc}	955 ^c	782 ^a	1 913 ^b

† 同一列数据中标有不同小写字母表示组间差异显著($P\leq 0.05$)。

2.4 面团微观结构

4 种麦麸面团(BD、FBD、XBD 和 FXBD)经过 2 h 醒发后分别在不同放大倍数的扫描电镜下观察,结果见图 3。从 BD 面团中可以观察到明显的粗纤维片段,这些片段从空间位置上阻断了面筋的连续性,面筋结构呈现出断裂、稀疏且不均匀。这可能是由于大量的难溶性阿拉伯木聚糖与面筋蛋白竞争水分子,导致面筋水合不充分^[31]。木聚糖酶处理对面团中面筋结构的影响并不明显,但是较大纤维素片段数量显著减少。从 FBD 和 FXBD 面团中可以观察到明显的片状面筋蛋白,在其之间有粗细不同的面筋束相互交联,几乎看不到断裂的面筋碎片和粗纤维片段。

面团发酵过程中,酵母产生大量的 CO₂ 充斥在面筋网络中形成气孔,这些气孔多为中小尺寸且分布均匀^[31]。如图 3

所示,BD 面团结构致密,几乎没有看到明显的气孔;XBD 面团含有少量不规则孔隙,而 FBD 和 FXBD 面团中气孔分布均匀且边缘平滑。这都归因于发酵麦麸中富含多种纤维素水解酶类促进纤维素溶解^[15],有利于酵母产气及面团持气。微观结构分析显示,马克斯克鲁维酵母发酵麦麸制作的面包面团中面筋网络结构更加均匀、连续;面团产气和持气性能较好。

2.5 面包面团流变发酵特性及烘焙学特性

表面胶黏的面团对于现代工业化生产加工非常不利,这些面团不仅容易粘住加工设备而导致食品生产线受阻,还会造成产品质量下降和货架期缩短^[12]。搅拌后 XBD 面团中 WEAX 含量与 FBD 相当(表 2),但是前者表面更加胶黏。这可能与木聚糖酶的底物偏好性有关,Verjans 等^[29]研究认为外

源木聚糖酶更倾向作用于可溶性木聚糖,生产较多的小分子木聚糖片段增加面团黏度。令人惊讶的是,FXBD 面团表观黏度与 FBD 面团相近,并未受到添加的木聚糖酶影响(表 3)。

相比 BD 面团,FBD 面团的吸水率降低了 5.64%,形成时间和面团稳定时间分别增加了 46.17%和 44.85%。这是由于发酵麦麸中的天然酶(图 2)影响了麦麸中阿拉伯木聚糖的溶解性,进而改变了面团中水分子分布状态。由表 3 可知,与 BD 相比,FBD 和 FEBD 最大程度提升了面团的发酵高度(23.60%~26.73%)和持气率(18.77%~18.91%),且仅添加木聚糖酶对面团的发酵特性影响较小。这可能是发酵麦麸中的多种水解酶促进难溶性纤维素溶解,面筋网络结构呈现出连续性;而仅添加木聚糖酶倾向作用于可溶性木聚

糖,对面筋网络影响较小,与面团微观结构(图 3)和 WEAX 含量变化(表 2)结果保持一致。

富含天然酶的发酵麦麸和木聚糖酶对面包比容的影响与面团发酵特性保持一致(表 3)。正如微观结构所示(图 3),BD 面团面筋断裂且气孔稀少,面包比容只有 4.49 mL/g。相比 BD 面团面包,FBD 和 XBD 面包比容分别提高了 10.69%和 2.90%,而 FXBD 面包提高了 17.15%。除了面团膨胀体积,面包比容也受到面包水分含量(质量)的影响^[32]。值得一提的是,FXBD 面包芯硬度非常小,表明 FXBD 面包具有较柔软的面包芯结构。这都归因于马克斯克鲁维酵母发酵麦麸中麸皮内源酶,酵母代谢酶及添加的木聚糖酶活力^[31]的影响。

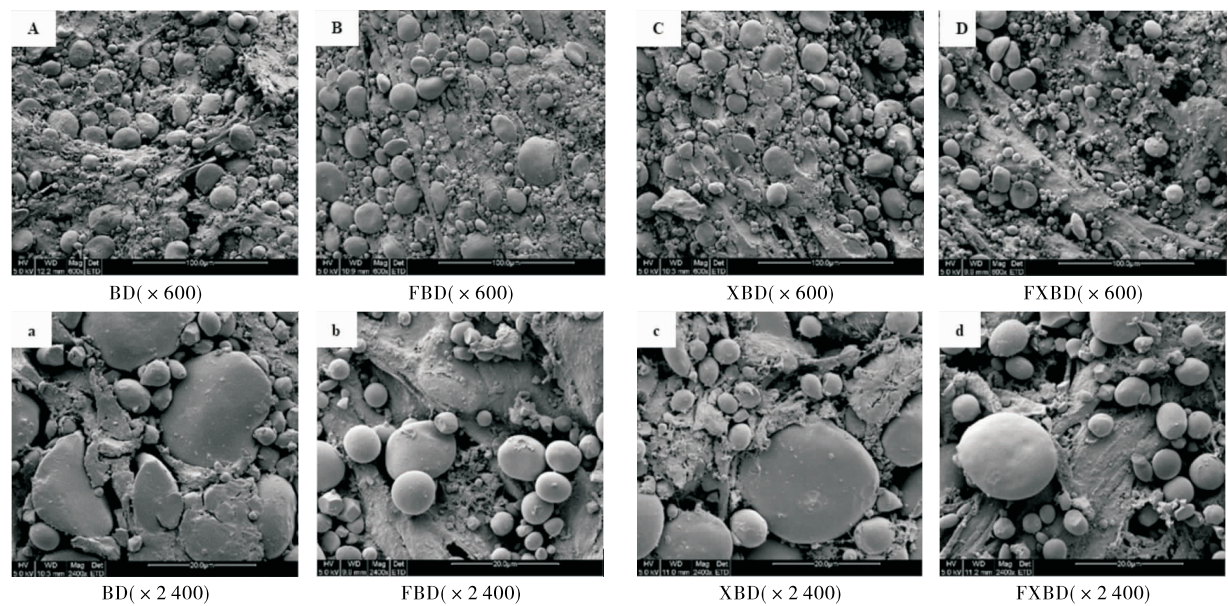


图 3 马克斯克鲁维酵母发酵麦麸对面团微观结构的影响

Figure 3 Effects of fermented bran with *Marx Kluyveromyces* on microstructure of doughs.

表 3 马克斯克鲁维酵母发酵麦麸对面包面团流变发酵特性和烘焙学特性的影响[†]

Table 3 Effects of fermented bran with *Marx Kluyveromyces* on dough rheology, fermentation and baking characteristics

面团样品	表观黏度/g	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	发酵最大高度/mm	持气率/%	比容/(mL·g ⁻¹)	芯硬度/g
BD	20.45 ^a	62.00 ^c	4.70 ^a	7.07 ^b	57.50 ^a	66.10 ^a	4.49 ^a	460.67 ^d
FBD	22.78 ^b	58.50 ^b	6.87 ^b	10.24 ^c	71.07 ^c	78.51 ^c	4.97 ^c	324.33 ^b
XBD	25.29 ^c	57.70 ^a	4.64 ^a	6.90 ^a	60.90 ^b	73.13 ^b	4.62 ^b	395.67 ^c
FXBD	22.21 ^b	58.00 ^a	6.84 ^b	10.19 ^c	72.87 ^d	78.60 ^c	5.26 ^d	267.67 ^a

[†] 同一列数据中标有不同小写字母表示组间差异显著(P≤0.05)。

3 结论

马克斯克鲁维酵母在麦麸基质中生长良好,发酵过程中可滴定酸含量(TTA)显著增加,而 pH 值维持在 6.0 左右,使这些天然酶(纤维素酶、木聚糖酶和阿魏酸酯酶)在面包制作过程中保持活力;在面团醒发和焙烤初期可溶性糖和游离酚含量显著增加,赋予面包较好的营养价值。扫描电镜(SEM)观察发现:相比仅添加木聚糖酶的麦麸面团,富含天然酶的发酵麦麸面团中面筋网络结构更加均匀、连续,气孔更加细腻光滑。与麦麸面包面团相比,添加发酵麦麸的面团稳定时

间长、持气率高且比容较大。值得关注的是,富含天然酶的发酵麦麸和木聚糖酶结合使面包比容进一步提高,且面包芯硬度显著(P≤0.05)降低。马克斯克鲁维酵母在高膳食纤维面包体系中有良好的应用潜力。

参考文献

[1] 黄卫宁, 邹奇波, 王凤, 等. 一种含有高磷脂酶活性脂肪酶和半纤维素酶的高膳食纤维健康面包及其生产方法: 中国, 201410485786.0[P]. 2015-01-21.
[2] 钟京, 王凤, 刘娜, 等. 乳酸菌发酵麸皮酸面团对高纤维面包面

- 团流变发酵学及烘焙特性的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(9): 49-54, 57.
- [3] ZHU Hui-yan, WANG Feng, HUANG Wei-ning, et al. Rheofermentometer fermentation and breadmaking characteristics of dough containing xylo-oligosaccharide hydrolyzate from wheat bran[J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(3): 1 878-1 883.
- [4] GÓMEZ M, JIMÉNEZ S, RUIZ E, et al. Effect of extruded wheat bran on dough rheology and bread quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(10): 2 231-2 237.
- [5] 孙银凤, 徐岩, 黄卫宁, 等. 不同发酵基质的酸面团对酵母面团体系面包烘焙及老化特性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(13): 37-42.
- [6] 严晓鹏, 王璋, 许时婴. 酶制剂对于麸皮面包的改良研究[J]. 食品添加剂, 2007(1): 206-209.
- [7] 熊俐, 曹新志, 吕开斌, 等. 复合菌和酶制剂在麸皮面包品质改良上的应用[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(16): 22-25.
- [8] 黄卫宁, 王晓燕, 郑建仙, 等. 新型高膳食纤维法式发酵面包及其生产方法: 中国, 201110423119.6[P]. 2012-06-27.
- [9] 吴玥, 周峻岗, 吕红. 信号肽对木聚糖酶在马克斯克鲁维酵母中分泌表达的影响[J]. 复旦学报, 2017, 56(4): 446-454.
- [10] FONSECA G G, HEINZLE E, WITTMANN C, et al. The yeast *Kluyveromyces marxianus* and its biotechnological potential[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2008, 79(3): 339-354.
- [11] 陈成, 汪洪涛, 陈宝宏, 等. 马克斯克鲁维酵母发酵产 β -葡聚糖工艺优化[J]. 食品工业, 2015, 36(1): 133-136.
- [12] 黄卫宁, 贾春利, 李先玉, 等. 食品(面团)体系表面胶粘性的流变学机理及其表征[J]. 食品与生物技术学报, 2006, 25(2): 120-126.
- [13] ZHANG Hui, SANG Qing. Production and extraction optimization of xylanase and β -mannanase by *Penicillium chrysogenum* QML-2 and primary application in saccharification of corn cob[J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 97: 101-110.
- [14] DHILLON G S, OBEROI H S, KAUR S, et al. Value-addition of agricultural wastes for augmented cellulase and xylanase production through solid-state tray fermentation employing mixed-culture of fungi[J]. Industrial Crops and Products, 2011, 34(1): 1 160-1 167.
- [15] FIGUEROAESPINOZA M C, POULSEN C, BORCH S J, et al. Enzymatic solubilization of arabinoxylans from isolated rye pentosans and rye flour by different endo-xylanases and other hydrolyzing enzymes: Effect of a fungal caccase on the flour extracts oxidative gelation[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2002, 50(22): 6 473-6 484.
- [16] ZHAO Hui-min, GUO Xiao-na, ZHU Ke-xue. Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 28-36.
- [17] 祝义伟, 周令国, 叶宸志, 等. 香菇柄中可溶性糖的测定[J]. 农产品加工, 2015(1): 43-45.
- [18] QIN Meng-zhen, SHEN Yi-xin. Effect of application of a bacteria inoculant and wheat bran on fermentation quality of peanut vine ensiled alone or with corn stover[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(3): 556-560.
- [19] WU Chao, LIU Ruo-shi, HUANG Wei-ning, et al. Effect of sourdough fermentation on the quality of Chinese Northern-style steamed breads[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(2): 127-133.
- [20] ANDREASEN M F, KROON P A, WILLIAMSON G, et al. Esterase activity able to hydrolyze dietary antioxidant hydroxycinnamates is distributed along the intestine of mammals[J]. J. Agric. Food Chem, 2001, 49: 5 679-5 684.
- [21] WANG Yu-guo, WANG Xiao-nan, TANG Ren-tao, et al. A novel thermostable cellulase from *Fervidobacterium nodosum*[J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2010, 66(3/4): 294-301.
- [22] KUGE T, WATANABE A, HASEGAWA S, et al. Functional analysis of arabinofuranosidases and a xylanase of *Corynebacterium alkanolyticum* for arabinoxylan utilization in *Corynebacterium glutamicum*[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2017, 101(12): 5 019-5 032.
- [23] XUE Dong-sheng, LIANG Long-yuan, ZHENG Gang, et al. Expression of *Piromyces rhizinflata* cellulase in marine *Aspergillus niger* to enhance halostable cellulase activity by adjusting enzyme-composition [J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 117: 156-161.
- [24] LYND L R, WEIMER P J, VAN ZYL W H, et al. Microbial cellulose utilization: Fundamentals and biotechnology[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2002, 66(3): 506-577.
- [25] VÄLJAMÄE P, PETTERSSON G, JOHANSSON G. Mechanism of substrate inhibition in cellulose synergistic degradation[J]. Eur. J. Biochem, 2001, 268: 4 520-4 526.
- [26] 赵浩源, 张迎亚, 蒋侃侃, 等. 黑曲霉固态发酵产阿魏酸酯酶及酶解麸皮制备阿魏酸[J]. 林业工程学报, 2016, 32(5): 52-57.
- [27] BOSKOV HANSEN H, ANDREASEN M, NIELSEN M, et al. Changes in dietary fibre, phenolic acids and activity of endogenous enzymes during rye bread-making[J]. European Food Research and Technology, 2014, 214(1): 33-42.
- [28] DORNEZ E, VERJANS P, ARNAUT F, et al. Use of psychrophilic xylanases provides insight into the xylanase functionality in bread making[J]. J Agric Food Chem, 2011, 59(17): 9 553-9 562.
- [29] VERJANS P, DORNEZ E, DELCOUR J A, et al. Selectivity for water-unextractable arabinoxylan and inhibition sensitivity govern the strong bread improving potential of an acidophilic GH11 *Aureobasidium pullulans* xylanase[J]. Food Chemistry, 2010, 123(2): 331-337.
- [30] KATINA K, SALMENKALLIO-MARTTILA M, PARTANEN R, et al. Effects of sourdough and enzymes on staling of high-fibre wheat bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2006, 39(5): 479-491.
- [31] MESSIA M C, REALE A, MAIURO L, et al. Effects of pre-fermented wheat bran on dough and bread characteristics[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 138-144.
- [32] DAMEN B, POLLET A, DORNEZ E, et al. Xylanase-mediated in situ production of arabinoxylan oligosaccharides with prebiotic potential in whole meal breads and breads enriched with arabinoxylan rich materials[J]. Food Chemistry, 2012, 131(1): 111-118.