

小麦麸皮的品质改良及含麸皮面包烘烤品质的研究

肖志刚¹, 刘璐¹, 王丽爽¹, 陶莉伟¹, 段玉敏¹, 罗志刚², 杨庆余¹

(1. 沈阳师范大学粮食学院, 辽宁沈阳 110034) (2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510641)

摘要: 本研究采用微波辐照联合复合酶法对小麦麸皮进行改良, 将改良后的小麦麸皮添加至高筋粉中得到不同小麦麸皮含量的含麸皮面粉并制作含麸皮面包。结果表明: 改良后小麦麸皮中脂肪酶残余酶活和脂肪氧化酶残余酶活降低至 0 和 10.34%、粗纤维含量降低至 3.21%、还原糖含量上升至 3.79 g/100 g。与改良前的全麦面包相比, 改良后的全麦面包组织结构得以改善, 全麦面包储藏 7 d 后吸热焓值降低了 14.70%、全麦面包中酮基、羰基、醛基含量增多。改良后的全麦面包比容增加了 26.40%、硬度降低了 32.90%、弹性增大了 6.90%。随着改良麸皮添加量的增加, 含麸皮面包组织结构变得粗糙多孔, 含麸皮面包吸热焓值逐渐降低, 酮基、羰基、醛基含量增多, 含麸皮面包芯亮度逐渐变暗、比容逐渐降低、硬度逐渐增加、弹性逐渐减小、感官品质降低。与未稳定化麸皮含量 16% 的全麦面包相比, 稳定化全麦面包的稳定性、贮藏性和质构得到明显提高。

关键词: 麸皮; 含麸皮面包; 品质; 烘烤

文章编号: 1673-9078(2019)11-66-75

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.11.010

Quality Improvement of Wheat Bran and Baking Properties of Bread Incorporated with Wheat Bran

XIAO Zhi-gang¹, LIU Lu¹, WANG Li-shuang¹, TAO Li-wei¹, DUAN Yu-min¹, LUO Zhi-gang², YANG Qing-yu¹

(1.College of Grain, Shenyang Normal University, Shenyang, 110034, China)

(2.South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In this study, wheat bran was modified by microwave irradiation combined with composite enzymatic treatment, and the improved wheat bran was added to the high-gluten wheat flour to obtain wheat bran-containing flour with different contents of wheat bran for the preparation of bran-containing breads. The results revealed that the residual lipase and lipoxidase activities in the improved wheat bran decreased to 0 and 10.34%, respectively, with the crude fiber content decreasing to 3.21% and the reducing sugar content increasing to 3.79 g/100 g. Compared with the unmodified whole wheat bread, the modified whole wheat bread incorporated with different levels of improved wheat bran had an improved bread crumb structure, a decreased (by 14.70%) endothermal enthalpy after 7 days of storage, increased contents of ketone, carbonyl and aldehyde groups, increased specific volume (by 26.40%), decreased hardness (by 32.90%), and increased elasticity (by 6.90%). With an increasing amount of improved wheat bran for addition, the structure of the bran-containing bread became rough and porous, the bread endothermal enthalpy decreased gradually, the contents of ketone, carbonyl and aldehyde groups in the bread increased, causing a lowered sensory quality (darker bread, lower specific volume, higher hardness and lower elasticity). Compared with the whole wheat bread with 16% of unstabilized wheat bran, the whole wheat bread incorporated with stabilized wheat bran had improved stability, storage properties and texture.

Key words: wheat bran; whole wheat bread; quality; baking

收稿日期: 2019-05-31

项目基金: 国家重点研发计划课题 (2018YFD0401003); 沈阳市科技计划项目“双百工程” (Z18-5-019); 辽宁特聘教授课题项目 (马铃薯主食品制造关键技术研究及新产品创制); 辽宁省高等学校基本科研项目 (LQN201708); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目 (RC170367)

作者简介: 肖志刚(1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮食油脂及植物蛋白工程

通讯作者: 杨庆余(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 粮油精深加工及副产物综合利用

小麦麸皮是小麦加工过程的主要副产物, 我国麸皮年产量可达 2000 万 t^[1]。国内外营养学专家一致认为小麦麸皮除含有丰富膳食纤维外, 还含有和多种营养物质, 是一种营养价值极高的小麦副产物, 是含膳食纤维很高的健康食品, 其具有降血糖、降血脂、改善肠道健康、预防肥胖、抗衰老、改善记忆力、抗癌等功能特性。但是, 小麦麸皮中脂肪酶、脂肪氧化酶、粗纤维含量高, 导致全麦面包存在储藏稳定性差、硬度偏大、质地粗糙和口感不佳等问题, 严重限制其

应用^[2]。

很多学者针对小麦麸皮的缺陷进行了改良,例如挤压稳定法、生物法和酶法。挤压预处理可以软化小麦麸皮,此方法虽然改善了全麦面包的口感,但由于麸皮在挤压过程中受到高温、高压、高剪切力的作用,营养物质损失严重,全麦面包的营养价值下降^[3]。王小平等人将发酵后的麸皮添加到面粉中,发酵后的麸皮虽然能改善麸皮面包的风味,但面包的口感不佳,储藏稳定性差^[4]。因此,如何选择合适的小麦麸皮改良方法是制作含麸皮面包的核心要素。与不含麸皮面包相比,全麦面包更加营养健康,但受加工技术制约,目前市场上的全麦面包气味不佳、口感粗糙、质地过于致密,难以被消费者接受。

本实验采用微波辐照与联合酶法相结合方法对小麦麸皮进行品质改良,该方法可显著提高麸皮的储藏稳定性,并改善小麦麸皮的质地和口感。将改良后的小麦麸皮添加至高筋粉中制作含麸皮面包。通过扫描电子显微镜(SEM)、差示量热扫描仪(DSC)和傅里叶红外光谱(FT-IR)对麸皮面包结构进行研究,揭示了麸皮面包组织的微观结构、口感、质地和老化特性的变化规律。研究添加不同量改良麸皮对含麸皮面包焙烤特性的影响规律,为开发高品质含麸皮面包提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

高筋粉、小麦麸皮(水分含量 10.38%),厦门海嘉面粉有限公司;起酥油、糖、盐、酵母,市售;无水乙醇、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、硼酸、浓硫酸、氢氧化钠、亚油酸、吐温 20、天津市大茂化学试剂厂;阿拉伯树胶、橄榄油、柠檬酸、柠檬酸钠,天津市进丰化工公司;木聚糖酶、纤维素酶,河南万邦实业有限公司;亚油酸,上海麦克林生化科技有限公司。其它试剂为分析纯。

1.2 仪器与设备

紫外可见分光光度计(UV 9000),上海元都有限公司;微波炉(MZC-1070 M),青岛海尔科技有限公司;离心机(LD4-2),上海安亭科学仪器厂;超声波细胞粉碎机(HN-150Y),宁波新芝生物科技股份有限公司;型粗纤维测定仪(SLQ-6),上海纤检仪器有限公司;质构分析仪(CT3),美国 Brookfield 公司;色差计 ZE-6000,日本电色公司;型高分辨场发射扫描电镜(S-4800),日本日立公司;差示扫描量热仪

(Q20),美国 TA 仪器公司;傅立叶变换红外光谱仪,布鲁克科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 小麦麸皮的改良及含麸皮面粉的配制

(1)小麦麸皮的制备:将高筋粉和粉碎后的小麦麸皮过 80 目筛,将过筛后的高筋粉和小麦麸皮分别封袋,冷藏保存备用。

(2)小麦麸皮的改良:

根据前期优化的结果,恒定微波辐照、酶解、微波辐照联合酶解的处理条件,对小麦麸皮进行三种方式的改良,条件如下:

微波辐照改良小麦麸皮:准确称取 10 g 麸皮置于锥形瓶中,料层厚度为 0.50 cm,料水比为 1:4,微波处理 5 min,微波功率 700 W、微波温度 30 ℃。

酶解改良小麦麸皮:准确称取 10 g 麸皮置于锥形瓶中,向锥形瓶中加入 10 倍麸皮质量的蒸馏水、0.05 g 纤维素酶和 0.10 g 木聚糖酶,将锥形瓶放入 50 ℃ 恒温振荡水浴锅中反应 4 h,对小麦麸皮进行复合酶解。酶解反应结束后,将麸皮混合液置于 100 ℃ 恒温水浴锅中灭酶 10 min。

微波辐照联合酶解:准确称取 10 g 麸皮置于锥形瓶中,料层厚度为 0.50 cm,料水比为 1:4,微波处理 5 min,微波功率 700 W、微波温度 30 ℃。向锥形瓶中额外加入 6 倍麸皮质量的蒸馏水、0.05 g 纤维素酶和 0.10 g 木聚糖酶,将锥形瓶放入 50 ℃ 恒温振荡水浴锅中反应 4 h,对小麦麸皮进行复合酶解。酶解反应结束后,将麸皮混合液置于 100 ℃ 恒温水浴锅中灭酶 10 min。

(3)干燥:将三种不同方式处理后的麸皮混合液分别倒入三个平皿中,置于 35 ℃ 恒温干燥箱中,烘干至麸皮水分含量为 10.38%。

(4)含麸皮面粉的配制:准确称取 84 g 高筋粉,称取 16(db) g 改良前和改良后的小麦麸皮并分别加入至高筋粉中,充分混匀后过 80 目筛,配制改良前全麦粉和改良后全麦粉(麸皮含量为 16 db%)。准确称取 96、92、88、84、80 g 的高筋粉,分别将称重的高筋粉分别与 4、8、12、16、20 g 改良后的小麦麸皮混合,配制成麸皮含量分别为 4%、8%、12%、16%、20% 的改良含麸皮小麦混合粉。以不添加麸皮高筋粉作为对照组。

1.3.2 小麦麸皮脂肪酶残余酶活的测定

准确称取 5 g 改良后的小麦麸皮样品于研钵中,加入 20 mL pH 6.9 的磷酸缓冲液,在冰浴中研磨 10 min,利用超声波细胞破碎仪处理 10 min,时间间隔

设为 5 s, 全程处于冰浴, 将破碎后的麸皮进行离心处理, 离心机设置参数 10000 r/min, 10 min, 4 ℃。离心后取上层清液过滤, 储存于 4 ℃备用。用 0.05 M NaOH 滴定滤液, 记录消耗氢氧化钠溶液的体积。参考 Haniye^[5]等人的方法, 并稍作修改。

公式如下:

$$\text{LA活性} = \frac{[V(\text{NaOH})_1 - V(\text{NaOH})_2] \times 0.05 \times 28.2}{4.6} \quad (1)$$

$$\text{LA残余酶活}(\%) = \frac{\text{LA活性}_1}{\text{LA活性}_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $V(\text{NaOH})_1$: 样品消耗氢氧化钠体积(mL); $V(\text{NaOH})_2$: 空白消耗氢氧化钠体积(mL); 0.05: 配制 NaOH 溶液 0.05 mol/L; LA 活性 1: 样品钝化后酶活性(mL/min); LA 活性 2: 样品钝化前酶活性(mL/min)。

1.3.3 小麦麸皮脂肪氧化酶残余酶活的测定

参照 1.3.2 脂肪酶残余酶活的测定中的方法制备小麦麸皮滤液。再将浓度为 1%(W/V)的亚油酸溶液用 pH 9.0 硼酸缓冲液进行 20 倍稀释, 取 2.70 mL 稀释后的亚油酸, 0.30 mL 滤液于比色皿中, 充分混匀, 在半分钟内迅速将比色皿放入分光光度计中, 在波长为 234 nm 下测定其吸光度并记录数据。参考 Haniye^[5]等人的方法, 并稍作修改。公式如下:

$$\text{LOA残余酶活}(\%) = \frac{A_1}{A_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中: A_1 : 钝化后样品吸光值; A_2 : 钝化前样品吸光值。

1.3.4 小麦麸皮粗纤维含量的测定

小麦麸皮粗纤维含量的测定依据 GB 6193-1986《谷物籽粒粗纤维测定法》中的附录 A 粗纤维快速法进行。

1.3.5 小麦麸皮还原糖含量测定

小麦麸皮还原糖含量测定参考 GB 5009.7-2016《食品中还原糖含量的测定》法。

1.3.6 面包的制备

取 60 g 含麸皮面粉、将 1.40 g 酵母、适量的水加入面粉中搅拌成团, 30 ℃下发酵 3 h。再将 40 g 含麸皮面粉、5 g 糖、1.50 g 盐、3 g 起酥油和适量的水加入发酵好的面团中, 30 ℃下发酵 1 h。将第二次发酵好的面团分割成若干个 50 g 的小面团, 在 35 ℃下醒发 30 min。入炉烘烤 10 min (上、下火 150 ℃)。烘烤完成的面包在 20 ℃室温条件下密封保藏。同样的方法制备对照组面包。

1.3.7 傅里叶红外光谱(FT-IR)的测定

取 2.00 mg 冷冻干燥后的面包芯样品研磨均匀, 再用压片机压片, 压力保持 15 kPa, 光谱范围为 4000~400 cm^{-1} , 扫描累加 64 次, 分辨率为 4 cm^{-1} 。

1.3.8 场发射扫描电镜(SEM)的测定

取少量冷冻干燥后的面包芯样品, 用导电银胶粘到扫描电镜样品台上, 将样品台放入喷金仪中进行喷金。将处理好的样品立即放入电镜载物腔内抽真空加压, 放大倍数 1000 倍。参照 Gómez 等人的方法^[6]稍作修改。

1.3.9 老化特性(DSC)的测定

采用差示量热扫描仪对面包芯的老化特性进行测定。将面包样品放置 1 d、3 d、5 d 和 7 d, 准确称取干基 3 mg 面包, 加水比例 1:2, 以空坩埚作为对照, 升温速率为 10 ℃/min, 扫描温度范围为 20~130 ℃。老化测定参考 Yao Zhang 的测试方法并稍作修改^[7]。

1.3.10 色差的测定

面包温度冷却至室温后进行切片处理, 干燥后磨成粉末。用色差仪测定面包芯的 L^* 、 a^* 、 b^* 值 (L^* 值表示明暗度; a^* 值代表红绿色; b^* 值代表黄蓝色)。色差测定参考 Esther Iglesias-Puig (2015) 的测试方法并稍作修改^[8]。

1.3.11 质构的测定

烘焙出炉的面包室温冷却 2 h, 切成厚度为 1 cm, 直径为 1 cm 的圆柱体。将其置于质构分析仪操作台上, 选用 P/36R 测试探头, 测前速度 2.00 mm/s, 测试速度 1.00 mm/s, 测后速度 1.00 mm/s^[9]。

1.3.12 比容的测定

取冷却好的面包, 称其质量, 采用油菜籽置换法测定面包体积^[10]。公式如下:

$$\text{比容}(\text{mL/g}) = \frac{\text{体积}(\text{mL})}{\text{质量}(\text{g})}$$

1.3.13 保水性的测定

面包出炉后冷却 2 h, 称其质量。将测量后的样品暴露于室温条件下, 每 24 h 称重 1 次, 共称量 5 d^[11]。

1.3.14 感官评定的测定

面包评分参照刘婷婷的方法^[12]稍作修改, 评分指标如表 1 所示。

以 10 人 (22~30 岁, 其中女性 5 名, 具备面包感官评分的基础知识) 组成评分小组, 于室温条件下进行感官评价。

表 1 面包感官评定评分指标

Table 1 Bread sensory evaluation index

体积	面包皮色泽	质地	对称性	均一性	面包芯颜色	纹理	质地	口感	香气	总分
15 分	5 分	5 分	5 分	5 分	10 分	15 分	15 分	15 分	10 分	100 分

1.3.15 数据统计分析

采用 Origin 9.1 进行数据分析与统计, 采用 SPSS 20.0 并进行单因素方差分析 (Tukey's Test), 数据以 $X \pm SD$ 表示, 显著性 $p < 0.05$ 。每个样品重复测三次, 取其平均值。

2 结果与讨论

2.1 小麦麸皮品质改良前后脂肪酶、脂肪氧化酶、粗纤维含量的变化规律

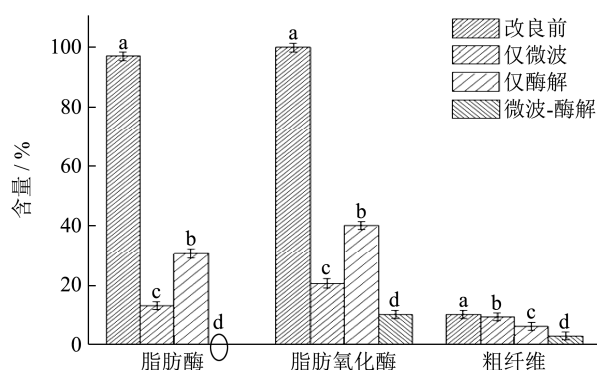


图1 小麦麸皮改良前后脂肪酶、脂肪氧化酶、粗纤维含量变化

Fig.1 The contents of lipase, fat oxidase, crude fiber in wheat bran were changed after improvement

注: 不同的小写字母表示具有显著差异 ($p < 0.05$)。下同。

图1为小麦麸皮经四种不同方式改良前后的脂肪酶、脂肪氧化酶、粗纤维含量的变化规律。由图1可知, 与改良前的小麦麸皮相比, 仅微波、仅酶解和微波-酶解改良后的小麦麸皮中脂肪酶、脂肪氧化酶、粗纤维含量均下降, 其中微波-酶解效果最为显著。微波-酶解后的小麦麸皮中脂肪酶残余酶活和脂肪氧化酶残余酶活分别降低至0和10.34%, 粗纤维含量下降至3.21%。微波辐照使小麦麸皮中的极性分子(水、蛋白质的极性基团等)产生高速的取向运动而使分子间剧烈摩擦, 导致脂肪酶和脂肪氧化酶变性失活。高微波辐照功率使麸皮中水分降低明显, 麸皮中水分的流失对脂肪的水解起到了抑制作用, 麸皮的贮藏稳定性得到明显的改善。小麦麸皮中粗纤维和木聚糖两种大分子以互相缠绕的方式存在^[13], 木聚糖酶作用于木聚糖后, 增加了纤维素酶与粗纤维的接触面积, 破坏粗纤维间的交联作用, 使得麸皮中粗纤维含量下降。谢璇^[14]采用蒸汽爆破降解麦麸中的粗纤维, 处理后的麸皮中粗纤维含量仅下降了16.50%, 远不及本实验达到的效果这可能是因为微波可降低麸皮中粗纤维成分之间结合的紧密程度, 进而提高酶解效果^[15]。

2.2 小麦麸皮品质改良前后还原糖含量的变化规律

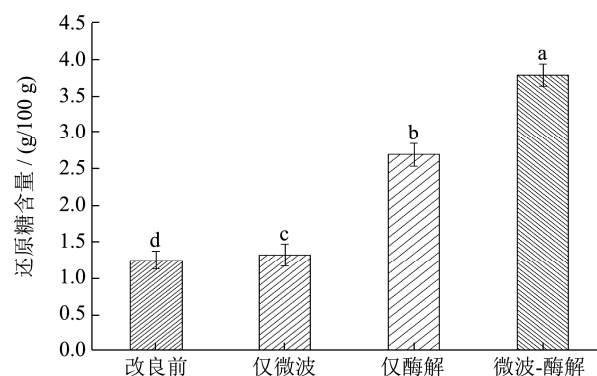


图2 小麦麸皮改良前后还原糖含量变化

Fig.2 The contents of reducing sugar in wheat bran were changed after improvement

图2为小麦麸皮经四种不同方式改良前后的还原糖含量的变化规律。由图2可知, 与改良前的小麦麸皮相比, 仅微波、仅酶解和微波-酶解改良后的小麦麸皮中还原糖含量均上升, 其中微波-酶解效果最显著。微波-酶解后的小麦麸皮中还原糖含量由1.25 g/100 g上升至3.79 g/100 g。这可能因为微波可降低麸皮中粗纤维成分之间结合的紧密程度, 使酶可以和粗纤维充分结合, 麸皮中粗纤维大分子的糖苷键断裂, 聚合度减小, 使得部分粗纤维降解成小分子还原糖, 使得小麦麸皮中还原糖含量升高。木聚糖酶能使麸皮中阿拉伯木聚糖发生酶解, 作用水不溶性木聚糖时能先将其降解为水溶性木聚糖, 对麸皮品质起到改善作用^[16-18]。

2.3 不同改良麸皮添加量对含麸皮面包结构的影响

图3是不同改良麸皮含量的麸皮面包红外光谱图。1685 cm^{-1} 、1750 cm^{-1} 、2925 cm^{-1} 处的吸收峰分别代表酮基、羰基、醛基伸缩振动吸收峰, 微生物发酵过程中会产生酮基、羰基与醛基等基团结构。与改良前的全麦面包(麸皮含量16%)相比, 改良后全麦面包(麸皮含量16%)的醛基振动吸收峰强度增加, 这可能是因为改良后麸皮中还原糖含量增加, 酵母菌在发酵过程中利用还原糖形成一定量的含有醛基的新物质, 在面包在焙烤过程中发生美拉德反应, 生成多种具有酮基、羰基、醛基等基团结构的物质^[19-21]。随着改良麸皮添加量的增加, 含麸皮面包中三种振动吸收峰均逐渐加强, 可能是面包制作过程中酮基、羰基、醛基的含量增多引起特征吸收峰的强度增加。麸皮中

含有淀粉酶和蛋白酶,两者的反应产物既可作为微生物代谢产生含酮基、羰基、醛基等基团结构的原料,也可为非酶促褐变反应提供前体^[22]。

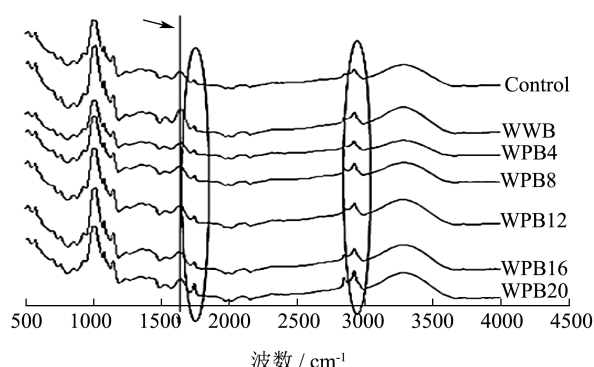


图3 不同改良麸皮添加量对含麸皮面包化学结构的影响

Fig.3 Effects of pretreatment wheat bran addition on chemical structure of bread with wheat bran

注: Control 和 WWB 分别为高筋粉、改良前全麦面包。WPB4、WPB8、WPB12、WPB16、WPB20 为改良小麦麸皮添加量分为 4%、8%、12%、16%、20% 的含麸皮面包。

2.4 不同改良麸皮添加量对含麸皮面包微观组织结构的影响

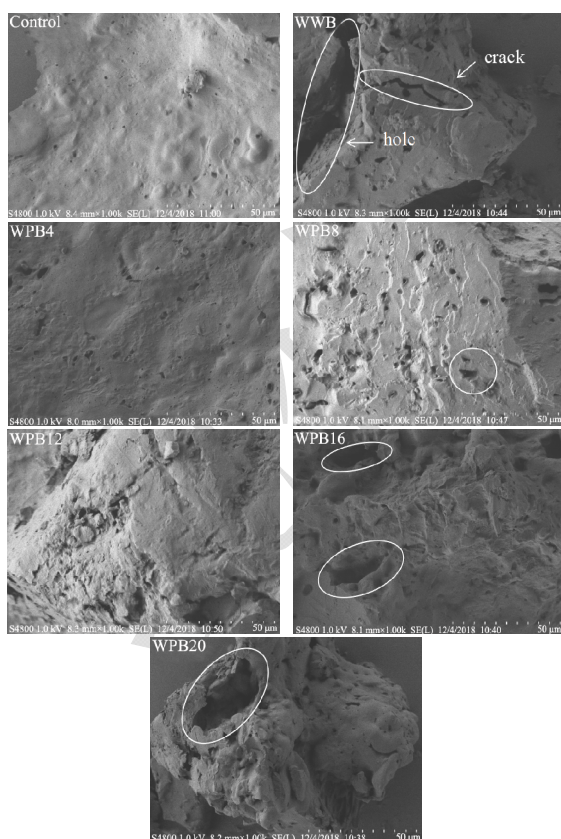


图4 不同改良麸皮添加量制作含麸皮面包的扫描电镜图片

Fig.4 SEM images of bread with bran were made with different modified bran contents

图4为含麸皮面包的扫描电镜图谱。由图4可知,高筋粉制作的面包其组织结构表面细腻光滑,几乎没有孔洞。未改良小麦麸皮制作的全麦面包组织结构表面出现不规则的大孔洞,孔洞之间互相贯通,形成断层,甚至出现裂痕。改良后小麦麸皮制作的全麦面包其组织结构表面孔洞明显减小,组织结构变得连续。这可能是微波联合酶解处理小麦麸皮可提高麸皮中阿拉伯木聚糖含量,阿拉伯木聚糖会与面粉中的蛋白质发生氧化交联作用,使面粉中蛋白质能更好的与水结合,面筋网络结构形成得更充分^[23]。随着改良后小麦麸皮添加量的增加,含麸皮面包微观结构表面孔洞逐渐增多,孔洞面积逐渐增大。改良后麸皮含量达到20%,面包微观结构受到严重破坏,几乎观察不到完整连续的组织结构。可能是由于麸皮含量的增加,导致面团中粗纤维含量增多,破坏面筋蛋白网络结构,阻碍了面筋蛋白二硫键的形成,影响面筋蛋白的稳定性^[24],最终导致含麸皮面包组织结构表面塌陷,孔洞增多。这与含麸皮面包横截面图片结果相一致。

2.5 不同改良麸皮添加量对含麸皮面包回生特性的影响

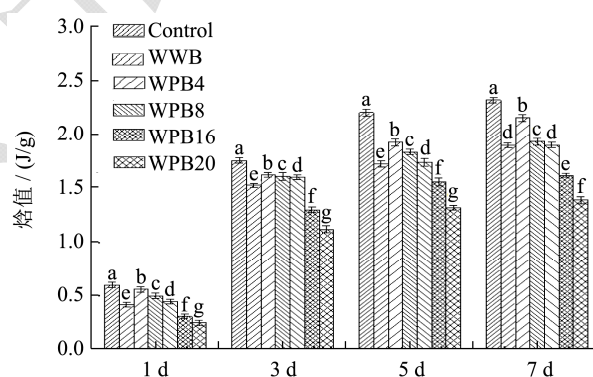


图5 不同改良麸皮添加量的含麸皮面包储藏期间的面包芯老化焓值

Fig.5 The core aging enthalpy of bran bread with different modified bran loading during storage

图5为改良后麸皮对含麸皮面包回生焓值的影响。由图5可知,随着储藏期的延长,含麸皮面包的吸热焓值增加,说明含麸皮面包在储藏过程中老化程度增加。储藏7 d后,与改良前全麦面包相比,改良后全麦面包老化程度降低,改良后全麦面包吸热焓值降低了14.70%。这可能是因为改良后麸皮中还原糖含量的上升加强了淀粉链与链间的次价键^[25,26],从而抑制了淀粉链的重排,改良后麸皮可以延缓淀粉回生,使得全麦面包吸热焓值下降。随着改良麸皮添加量的增加,含麸皮面包吸热焓值呈降低趋势,面包中水分

的均衡分布有利于延缓支链淀粉的回生^[27],降低老化速率,小麦麸皮具有较好的吸水能力,抑制了面包中水分向外的迁移扩散。

2.6 不同改良麸皮添加量对含麸皮面包色差的影响

表2是含麸皮面包色差测定结果。由表2可知,高筋粉制作的面包芯的L值最大、a*值、b*值最小,分别为78.35、5.42、18.32。与未改良的全麦面包相比,改良后全麦面包差异显著,L值降低,a*、b*值增加。可能是因为小麦麸皮在改良过程中纤维素断键游离为单糖和寡糖,面包烘烤时提供的高温环境中,能与氨基化合物发生美拉德反应,使得面包芯褐变反应更加明显^[8],b*值升高可能是由于加入了纤维素酶和木聚糖酶所致^[28]。随着改良麸皮含量的增加,含麸皮面包芯的L值降低,a*、b*值随之增加。这可能是因为面包中麸皮的含量会影响面包芯的颜色。小麦麸皮中包含叶绿素、叶黄素、类胡萝卜素等色素,麸皮含量越多,面包颜色就越暗。与面包芯颜色的变化相比,面包皮无明显变化。面包皮的色度受到麸皮添加量的影响显著,可能是由于面包制作过程中美拉德反应和焦糖化反应引起面包皮颜色加深,这与Nahla Dhena的

研究结果一致^[29]。

2.7 不同改良麸皮添加量对含麸皮面包质构特性的影响

表3为含麸皮面包质构特性的测定结果。由表3可以看出,与未改良的全麦面包相比,改良后的全麦面包的硬度下降了32.90%,弹性上升了6.90%。面包的内聚性与咀嚼性也有明显的改善。这可能是因为麸皮改良过程中,木质素和半纤维素中糖苷键相互作用发生水解降低了麸皮中粗纤维含量,使得小麦麸皮质地变得柔软。木聚糖酶作用于木聚糖使得麸皮中阿拉伯木聚糖含量升高,阿拉伯木聚糖的吸水性和持水性较强,小麦麸皮中阿拉伯木聚糖含量的增多使面团筋蛋白更好地与水结合,面筋网络结构形成更加充分,提高了全麦麸皮面包的弹性。随着改良麸皮含量的增加,含麸皮面包的硬度呈逐渐上升的趋势,弹性呈下降趋势,这与李真的研究结果一致^[30]。这可能是因为随着麸皮含量的增加,全麦粉中面筋含量降低,导致面团中形成连续的三维面筋网络结构减少,面团醒发不能较好的保持气体而降低了低面团粘弹性,引起面团硬度增加、弹性降低。

表2 含麸皮面包色差测定结果

Table 2 Color difference of whole wheat bread

样品号	面包芯			面包皮		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
Control	78.35±1.50 ^a	5.42±0.52 ^b	18.32±1.52 ^b	53.73±1.52 ^e	12.35±1.50 ^b	28.1±1.52 ^f
WWB	65.25±1.51 ^e	6.42±0.61 ^d	19.90±1.81 ^f	53.77±1.71 ^e	13.96±1.10 ^c	30.88±1.51 ^c
WPB4	70.28±1.43 ^b	5.56±0.42 ^f	21.09±1.52 ^e	53.78±1.53 ^e	12.96±1.40 ^e	31.49±1.55 ^b
WPB8	69.42±1.30 ^c	5.96±0.51 ^e	21.25±1.53 ^d	54.43±1.42 ^c	14.64±1.21 ^a	32.47±1.47 ^a
WPB12	66.84±1.51 ^d	6.61±0.42 ^c	21.57±1.32 ^c	54.67±1.31 ^b	13.84±1.12 ^d	30.90±1.23 ^c
WPB16	59.80±1.30 ^f	6.85±0.63 ^b	21.60±1.21 ^b	53.95±1.20 ^d	14.50±1.53 ^b	30.13±1.35 ^d
WPB20	57.69±1.23 ^g	7.74±0.74 ^a	22.66±1.62 ^a	55.94±1.54 ^a	12.42±1.40 ^f	28.30±1.52 ^e

注:同一列中不同的小写字母表示具有显著差异($p<0.05$)。

表3 含麸皮面包的质构测定结果

Table 3 Texture of whole wheat bread

样品号	硬度/g	弹性/mm	内聚性	咀嚼性/mJ
Control	200.01±1.51 ^b	30.63±1.51 ^a	0.46±0.02 ^d	32.12±1.52 ^d
WWB	630.22±2.62 ^a	25.62±1.62 ^e	0.44±0.01 ^b	62.62±1.41 ^b
WPB4	244.21±2.33 ^f	29.58±1.53 ^a	0.41±0.01 ^a	31.60±1.53 ^e
WPB8	266.50±2.51 ^e	29.15±1.35 ^b	0.32±0.02 ^b	31.73±1.44 ^c
WPB12	311.53±2.52 ^d	28.88±1.54 ^c	0.30±0.03 ^e	43.73±1.62 ^a
WPB16	423.32±2.62 ^c	27.38±1.25 ^d	0.56±0.04 ^b	45.01±1.42 ^f
WPB20	500.03±2.43 ^b	19.11±1.54 ^f	0.58±0.01 ^c	51.83±1.21 ^g

表 4 面包保水性测定结果

Table 4 Water-holding capacity of bread samples

样品号	1 d/g	2 d/g	3 d/g	4 d/g	5 d/g
Control	67.72±1.51 ^g	62.31±1.52 ^g	58.36±1.43 ^g	54.63±1.54 ^g	52.41±1.25 ^g
WWB	78.59±1.50 ^b	74.58±1.30 ^b	72.30±1.54 ^b	71.21±1.42 ^b	70.32±1.53 ^b
WPB4	75.23±1.53 ^f	70.29±1.53 ^f	67.92±1.63 ^f	65.65±1.50 ^f	64.91±1.55 ^f
WPB8	76.13±1.41 ^e	73.51±1.61 ^d	70.16±1.32 ^d	68.91±1.53 ^e	66.24±1.36 ^e
WPB12	76.95±1.32 ^d	74.08±1.40 ^c	72.26±1.21 ^c	70.98±1.20 ^c	67.32±1.24 ^d
WPB16	77.21±1.40 ^c	72.13±1.43 ^e	70.36±1.33 ^e	70.16±1.21 ^d	68.10±1.13 ^c
WPB20	79.98±1.5 ^a	76.25±1.5 ^a	74.99±1.5 ^a	73.51±1.6 ^a	73.29±1.5 ^a

2.8 不同改良麸皮添加量对含麸皮面包比容的影响

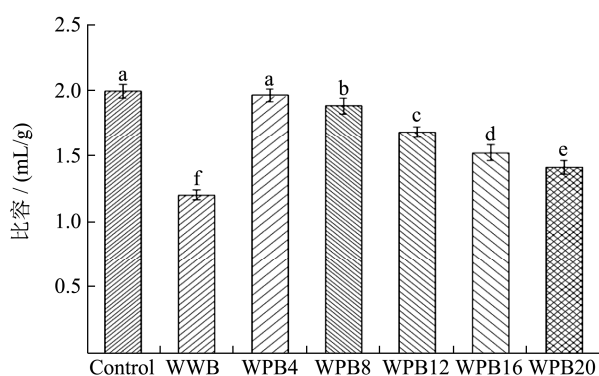


图 6 含麸皮面包比容测定结果

Fig.6 Specific volume of whole wheat bread

图 6 为含麸皮面包比容的测定结果。由图 6 可知, 对照组面包的比容最大 (2 mL/g)。与改良前的全麦面包相比, 改良后全麦面包的比容显著增加了 26.40%, 差异显著。这可能是复合酶降解麸皮中的粗纤维, 面包比容增加, 未处理的小麦麸皮内仍含有脂肪酶, 催化脂类物质发生水解型酸败, 其产物中游离脂肪酸不稳定性增加, 对面包的体积有负面影响^[31]。随着麸皮含量的增加, 麸皮面包的比容呈下降趋势。这可能是因为麸皮添加量导致面团中粗纤维含量增多, 酵母发酵面团产气的过程中破坏部分面筋蛋白质膜, 导致面团持气力下降, 含麸皮面包比容逐渐下降^[32]。

2.9 不同改良麸皮添加量对含麸皮面包保水性的影响

表 4 为麸皮面包保水性的测定结果。由表 4 可以看出, 对照组面包在 5 天内质量损失最大 (22.60%), 保水性最差。随着改良麸皮含量的增加, 含麸皮面包

在 5 天内的质量损失逐渐减小, 保水性呈上升趋势。改良麸皮含量为 20% 的含麸皮面包保水性最佳, 面包的质量损失仅为 8.36%。这可能是因为小麦麸皮中的粗纤维可以结合面团中的淀粉形成稳定的复合物, 促进淀粉与亲水性成分结合, 从而增加面包结合水的能力, 在一定程度上抑制水分扩散速度, 增加面包内部组织持水能力, 提高面包的保水性^[33], 另外, 小麦麸皮中粗纤维的多糖具有多孔结构, 多孔性结构通过氢键与水相互作用可实现最大程度的保持水分。面包中麸皮含量越多, 储藏过程中保水性越好^[34]。与未改良的全麦面包相比, 改良后的全麦面包保水性降低。这可能是因为粗纤维含量的降低使面团中粗纤维与淀粉形成的复合物减少, 微波-酶解处理破坏了小麦麸皮中粗纤维的结构, 不利于提高面包的持水性。

2.10 不同改良麸皮添加量对含麸皮面包感官特性的影响

表 5 为含麸皮面包感官评价的结果。如表 5 所示, 全麦面包改良前后的感官评分分别为 75 分和 90 分。改良后的全麦面包的体积、均一性、纹理、口感、香气方面都有明显改善。这可能是因为微波-酶解处理后的麸皮中阿拉伯木聚糖和还原糖含量增多, 使全麦粉中蛋白质能更好地与水结合, 面筋网络结构形成更充分^[35], 还原糖含量的增多加剧了美拉德反应的发生, 增加了面包的香气。随着改良麸皮含量的增加, 含麸皮面包的整体感官评分降低, 面包体积缩小, 色泽和质地等均呈不同程度降低, 含麸皮面包皮的香气评分逐渐增加。这可能是因为随着麸皮含量的增加, 破坏部分面筋蛋白质膜, 面团持气力下降, 面包体积减小, 各感官品质均下降。但小麦麸皮焙烤后具有特殊的香味, 赋予面包特殊的风味。随着麸皮含量的增加, 面包香气呈上升趋势^[36-38]。

表 5 面包感官评价

Table 5 Sensory evaluation of bread samples

样品号	面包体积 15 分	面包皮				面包芯					总分 100 分
		色泽	质地	对称性	均一性	色泽	纹理	质地	口感	香气	
		5 分	5 分	5 分	5 分	10 分	15 分	15 分	15 分	10 分	
Control	15	5	5	5	5	10	15	15	15	8	98
WWB	10	4	4	4	3	8	10	13	10	9	75
WPB4	15	5	5	5	5	10	15	15	15	7	97
WPB8	15	5	5	5	5	9	14	14	14	9	95
WPB12	14	4	4	5	5	9	13	14	14	10	92
WPB16	14	4	4	4	4	8	14	14	14	10	90
WPB20	13	4	4	4	4	9	13	13	11	10	85

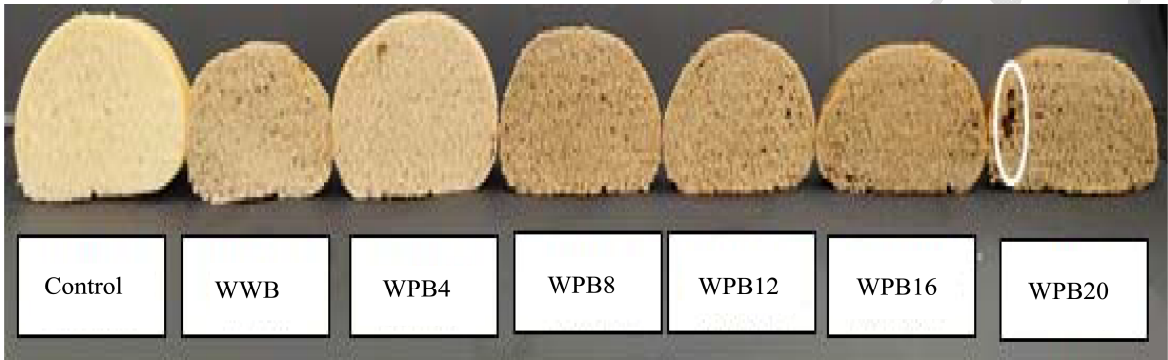


图 7 含麸皮面包的横切面图片

Fig.7 Slice the bran bread

2.11 含麸皮面包的横截面图片

图 7 为含麸皮面包的表面及横截面图片。由图 7 可以看出，高筋粉制作出的面包蓬松而均匀的气孔结构较多。随着改良麸皮含量的增加，含麸皮面包的体积逐渐减小、颜色逐渐加深、大孔洞的数量显著增加。与未改良的全麦面包相比，改良后的全麦面包组织变得细腻，体积显著增加，面包品质得到显著改善。这与面包扫描电镜结果相一致。当麸皮含量增加到 20% 时，面包切面气孔极不均匀，局部有明显的大气孔，靠近烤盘的上部有明显的塌陷，且切片时极易掉渣。改良前的全麦面包切片气孔大且不均匀、外部轮廓不规则，体积小。

3 结论

本文采用微波辐照联合复合酶法对小麦麸皮进行改良，改良后的小麦麸皮中脂肪酶全部灭活、脂肪氧化酶残余酶活和粗纤维含量显著下降，还原糖含量显著升高。小麦麸皮的贮藏稳定性和适口性得到明显改善。扫描电子显微镜(SEM)、差示量热扫描仪(DSC)和傅里叶红外光谱(FT-IR)表明，改良后的全麦面包组织结构得以提升，表现为面包组织孔洞减少、抗老化

程度提高、全麦面包中酮基、羰基、醛基含量增多。随着改良麸皮添加量的增多，含麸皮面包组织结构下降，表现为含麸皮面包组织结构孔洞增加、含麸皮面包吸热焓值降低、麸皮面包中酮基、羰基、醛基含量增多。与改良前全麦面包相比，改良后全麦面包的硬度下降、弹性上升、比容、感官评定得分提高。随着改良麸皮含量的增加，面包的烘焙特性逐渐下降，表现为含麸皮面包硬度逐渐上升、弹性逐渐下降、比容逐渐下降、感官评定逐渐降低，但含麸皮面包的保水性逐渐增强。

参考文献

[1] 王蓓.麦麸中阿魏酸提取及纯化技术的研究[D].西安:陕西科技大学,2012
WANG Bei. Study on extraction and purification of ferulic acid from wheat bran [D]. Xian: Shaanxi University of Science and Technology, 2012

[2] Lauren Tebben, Yanting Shen, Yonghui Li. Improvers and functional ingredients in whole wheat bread: A review of their effects on dough properties and bread quality [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 81: 10-24

[3] 汪丽萍,刘宏,田晓红,等.挤压处理对麸皮、胚芽及全麦粉品

- 质的影响研究[J].食品工业科技,2012,33(16):141-144
- WANG Li-ping, LIU Hong, TIAN Xiao-hong, et al. Research of influence on quality of bran, germ and whole-wheat flour by extrusion processing [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(16): 141-144
- [4] 王小平,雷激,刘刚,等.发酵麸皮混合物对面包品质的影响[J].食品科学,2017,15:159-164
- WANG Xiao-ping, LEI Ji, LIU Gang, et al. Effect of fermented mixture of wheat bran, soybean flour and peanut flour on bread quality [J]. Food Science, 2017, 15: 159-164
- [5] Haniye T, Mohammad A, Hamid G, et al. The impact of atmospheric cold plasma treatment on inactivation of lipase and lipoxygenase of wheat germs [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 47: 346-352
- [6] Analía V, Gómez, Ferrer E G, María C, et al. Changes in secondary structure of gluten proteins due to emulsifiers [J]. Journal of Molecular Structure, 2013, 1033(5): 51-58
- [7] Yao Zhang, Dan-dan Lia, Na Yang, et al. Comparison of dextran molecular weight on wheat bread quality and their performance in dough rheology and starch retrogradation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 98: 39-45
- [8] Iglesias-Puig E, Monedero V, Haros M. Bread with whole quinoa flour and bifidobacterial phytases increases dietary mineral intake and bioavailability [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(1): 71-77
- [9] 蔡金鑫,黄秋葵粉对面团和面包质构特性的影响[J].食品工业科技,2018,ISSN 1002-0306,CN 11-1759/TS
- CAI Jin-xin. Effect of okra powder on texture properties of dough and bread [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, ISSN 1002-0306, CN 11-1759/TS
- [10] 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
- SUN Yin-feng, XU Yan, HUANG Wei-ning, et al. Impacts of sourdoughs made from different media on bread baking and staling properties of yeast dough system [J]. Food Science, 2015, 36(13): 37-42.
- [11] 孔晓雪,王爱,丁其娟,等.高膳食纤维面团粉质特性与面包烘焙特性的研究[J].食品科学,2013,34(17):111-115
- KONG Xiao-xue, WANG Ai, DING Qi-juan, et al. Farinograph properties and baking characteristics of dietary fiber-fortified wheat dough [J]. Food Science, 2013, 34(17): 111-115
- [12] 刘婷婷,矫艳平,刘鸿铖,等.鲜平菇处理方法对面包品质的影响[J].食品科学,2015,24(36):29-34
- LIU Ting-ting, JIAO Yan-ping, LIU Hong-cheng, et al. Effect of addition of fresh *Pleurotus ostreatus* subjected to different processing methods on bread quality [J]. Food Science, 2015, 24(36): 29-34
- [13] Bindzus, Wolfgang A, Paul A. Amphoteric starches used in papermaking [P]. US 6365002, 2002-04-02
- [14] 谢璇.麦麸对面团特性的影响及其作用机理[D].天津:天津科技大学,2017
- XIE Xuan. Effects of bran on dough properties and its mechanism [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2017
- [15] 吴俊男,马森,张弛,等.小麦麸皮膳食纤维的微波-酶法改性研究[J].粮食与油脂,2017,42(2):175-180
- WU Jun-nan, MA Sen, ZHANG Chi, et al. Microwave-enzyme modification of dietary fiber from wheat bran [J]. Grains and Fats, 2017, 42(2): 175-180
- [16] 孙静,邵佩兰,徐明,等.高温蒸煮结合酶解改性枣渣膳食纤维[J].食品工业科技,2017,38(23):137-142
- SUN Jing, SHAO Pei-lan, XU Ming, et al. Technology optimization on steam-cooking combining with enzymatic hydrolysis modification of dietary fiber from jujube residues [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(23): 137-142
- [17] 严晓鹏,王璋,许时婴.酶制剂对于麸皮面包的改良研究[J].食品工业科技,2007,1:206-209
- YAN Xiao-peng, WANG Zhang, XU Shi-ying. Study on the improvement of enzyme preparation for bran bread [J]. Science and Technology of Food Industry. 2007, 1: 206-209
- [18] 李玉忠,路宏科,陈兴叶,等.利用生物酶解技术提高小麦麸皮食用性的研究[J].价值工程,2014,11(24):301-303
- LI Yu-zhong, LU Hong-ke, CHEN Xing-ye, et al. Research on using bio-enzymolysis techniques to enhance the edibility of wheat bran [J]. Value Engineering, 2014, 11(24): 301-303
- [19] 朱昌玲,孙达峰,张卫明,等.豆渣高温蒸煮制备水溶性多糖的研究[J].食品研究与开发,2014,35(17):1-4
- ZHU Chang-ling, SUN Da-feng, ZHANG Wei-ming, et al. Study on preparation of water-soluble polysaccharides from okara cooked at high temperature food [J]. Research and Development, 2014, 35(17): 1-4
- [20] 张薇,程晓燕,黄卫宁,等.含天然酵母粉发酵面包的营养与老化特性及风味化合物特征[J].食品科学,2014,35(23):33-38
- ZHANG Wei, CHENG Xiao-yan, HUANG Wei-ning, et al. Nutritional properties, staling characteristics and volatile flavor compounds of natural yeast sourdough bread [J]. Food

- Science, 2014, 35(23): 33-38
- [21] 李里特. 焙烤食品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006: 29-30
- LI Li-te. Baking Technology [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2006: 29-30
- [22] 王益姝. 生香酵母及其面团发酵过程与面包香气特征研究[D]. 江苏: 江南大学, 2016
- WANG Yi-shu. Study on flavoring yeast, its fermentation process and aroma characteristics of bread [D]. Jiangsu: Jiangnan University, 2016
- [23] 马瑞杰, 温纪平, 徐启恩. 阿拉伯木聚糖(AX)添加量对馒头品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 3: 48-51
- MA Rui-jie, WEN Ji-ping, XU Qi-en. Effect of arabinoxylan (ax) addition on quality of steamed bread [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 3: 48-51
- [24] 黄莲燕, 张小爽, 张君慧, 等. 不同谷物麸皮对面团流变学特性及面筋蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2017, 23: 8-14
- HUANG Lian-yan, ZHANG Xiao-shuang, ZHANG Jun-hui, et al. Effect of different cereal brans on dough rheological properties and gluten secondary structure [J]. Food Science, 2017, 23: 8-14
- [25] Bechte W G, Meisner D F. Staling studies of bread made with flour fractions. III Effect of crumb moisture and of tailings starch [J]. Cereal Chemistry, 1954, 31: 176
- [26] 张君. 蜂蜜干粉对面包面团发酵烘焙以及储藏特性的影响研究[D]. 江苏: 江南大学, 2013
- ZHANG Jun. Study on the effects of honey powder on the fermentation, baking and storage characteristics of bread dough [D]. Jiangsu: Jiangnan University, 2013
- [27] Lodi A, Abduljalil A M, Vodovotz Y. Characterization of water distribution in bread during storage using magnetic resonance imaging [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2007, 25(10): 1449-1458
- [28] 李治. 不同处理方式对小麦麸皮理化性质影响的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018
- LI Zhi. Effects of different treatments on physicochemical properties of wheat bran [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018
- [29] Nahla Dhena, Ines Ben Rejeba, Hager Boukhrish. Physicochemical and sensory properties of wheat-apricot kernels composite bread [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, (95): 262-267
- [30] 李真, 董英, 於来婷, 等. 大麦全粉对面团特性及面包焙烤品质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 4: 197-202
- LI Zhen, DONG Ying, YU Lai-ting, et al. Effect of whole barley flour addition on dough properties and quality of bread [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 4: 197-202
- [31] 马福敏, 李晓磊, 刘博. 氧化酶在含麸皮全麦面包制作中的应用研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 147-159
- MA Fu-min, LI Xiao-lei, LIU Bo. Study on the application of oxidase in making bran bread [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2017, 32(9): 147-159
- [32] 唐胜, 崔春, 赵谋明. 小麦面筋蛋白深度酶解过程中呈味物质变化趋势的研究[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(3): 32-35
- TANG Sheng, CUI Chun, ZHAO Mou-ming. Study on the change trend of flavor substances during deep enzymatic hydrolysis of wheat gluten protein [J]. Food and Fermentation Industry, 2009, 35(3): 32-35
- [33] 田海娟, 朱珠, 高筠鹏, 等. 荞麦粉对面团特性及面包品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(12): 30-32
- TIAN Hai-juan, ZHU Zhu, GAO Jun-peng, et al. Effect of buckwheat flour on dough properties and bread quality [J]. Grains and Fats, 2018, 31(12): 30-32
- [34] 刘婷婷, 刘健影, 王大为. 玉米高品质膳食纤维对面包质构特性影响[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(9): 27-30
- LIU Ting-ting, LIU Jian-ying, WANG Da-wei. Effect of corn high quality dietary fiber on physical properties of bread [J]. Grains and Fats, 2013, 26(9): 27-30
- [35] 王红娜, 曹欣然, 黄莲燕, 等. 膳食纤维与阿魏酸复配对面团和面筋蛋白性质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(12): 62-69
- WANG Hong-na, CAO Xin-ran, HUANG Lian-yan, et al. Effects of dietary fiber and ferulic acid on properties of dough and gluten [J]. Food Science, 2019, 40(12): 62-69
- [36] Rizzello C G, Lorusso A, Montemurro M, et al. Use of sourdough made with quinoa (*Chenopodium quinoa*) flour and autochthonous selected lactic acid bacteria for enhancing the nutritional, textural and sensory features of white bread [J]. Food Microbiology, 2016, 56: 1-13
- [37] 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
- [38] Lauren T, Shen Y, Li Y H. Improvers and functional ingredients in bread with wheat bran: A review of their effects on dough properties and bread quality [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 81: 10-24