

## 麸皮发酵对全麦面团及半干面品质的影响

徐晨雅, 郭晓娜\*, 朱科学  
(江南大学食品学院 江苏无锡 214122)

**摘要** 麦麸对全麦面团及半干面品质有负面影响。为改善全麦面团及半干面品质,对麸皮进行发酵,研究不同麸皮发酵方式(未发酵、自然发酵、酒曲发酵、酵母发酵、酒曲酵母发酵)对全麦面团水分分布、动态流变学特性和全麦半干面品质的影响。低场核磁共振分析表明,麸皮发酵后的全麦面团  $T_{21}$  值增加, $T_{22}$  值降低,对强结合水的束缚力减弱,弱结合水的可移动性增加,水分可能从麸皮迁移至蛋白、淀粉中。流变学试验中,酵母酒曲发酵组全麦面团弹性模量  $G'$  和黏性模量  $G''$  低于未发酵组。与未发酵组相比,酒曲酵母发酵组的全麦半干面蒸煮时吸水率增加,煮后硬度和黏附性降低。面条表面状态和微观结构观察表明,酒曲酵母发酵后全麦半干面的内部结构疏松,出现孔隙结构,改善了全麦半干面的品质。同时,经酒曲酵母发酵后,植酸含量降低,多酚含量增加,提高了全麦半干面的营养价值。

**关键词** 麦麸; 发酵; 水分可移动性; 食用品质; 半干面

文章编号 1009-7848(2022)09-0145-08 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2022.09.015

全麦食品富含膳食纤维和生物活性物质<sup>[1]</sup>,符合现代健康饮食的需求,受到消费者的青睐。半干面是一种水分含量介于生湿面和挂面之间的面条,具有风味口感方面的优势<sup>[2]</sup>。全麦半干面具有较高的营养价值,市场潜力巨大。

小麦麸皮具有强吸水性,在一定程度上影响全麦面团内部的水分分布<sup>[3]</sup>,从而影响其流变特性<sup>[4]</sup>及半干面的品质。安兆鹏等<sup>[5]</sup>发现,添加小麦麸皮后面团的吸水率和形成时间增加,面筋蛋白的稳定性降低。毕宁宁等<sup>[6]</sup>研究表明,随着麸皮添加量的增加,全麦馒头的硬度、咀嚼性、胶黏性增加,口感粗糙。Niu 等<sup>[7]</sup>将不同碾磨程度的麸皮加入面条制作中,发现麸皮使煮制后的面条硬度显著增加,破坏了全麦面条的品质。高纤维含量导致全麦食品硬度偏高,感官品质差,对麸皮进行预处理成为研究热点。

目前麸皮的加工方式主要有超微粉碎<sup>[8]</sup>、挤压膨化<sup>[9-10]</sup>、热处理<sup>[11]</sup>等,这些技术虽对麸皮有一定的改性作用,但成本较高,且物理方式处理效果单一。生物加工被认为是一种改善麸皮理化及加工特性的有效方法。崔晨晓<sup>[12]</sup>通过固态发酵改性麸皮,麸皮中可溶性阿拉伯木聚糖、多酚含量增加,

面团发酵流变特性改善,进而影响全麦馒头的品质。Salmenkallio-Marttila 等<sup>[13]</sup>使用酵母或乳酸菌发酵麸皮,提高了高纤维面包的比容并延长了货架期。然而,目前将发酵麸皮应用于面条制作的研究报道很少。本研究将酒曲和酵母应用于麸皮发酵,用发酵后的麸皮与面粉混合和面,制备全麦半干面。本文旨在探究麸皮发酵处理方式(未发酵、自然发酵、酒曲发酵、酵母发酵、酒曲酵母发酵)对全麦面团水分分布、流变学特性的影响,以及全麦半干面品质以及活性物质的变化,为全麦半干面的工业化生产提供理论参考。

### 1 材料与amp;方法

#### 1.1 材料与试剂

小麦麸皮、小麦粉,益海嘉里粮油有限公司;其它试剂均为分析纯。

#### 1.2 设备与仪器

JHMZ-200 型针式和面机,北京东孚久恒仪器技术有限公司;JMTD-168/140 压面机,北京东孚久恒仪器技术有限公司;Discovery HR-3 流变仪,美国 TA 仪器公司;MesoMR23-060V-I 型低场核磁共振分析仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;TA.XT plus 物性分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;LSM710 型激光共聚焦显微镜,德国蔡司公司;UV-1100 紫外-可见分光光度计,北京瑞利分析仪器公司。

收稿日期: 2021-09-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0401003)

作者简介: 徐晨雅(1997—),女,硕士

通信作者: 郭晓娜 E-mail: xiaonaguo@jiangnan.edu.cn

### 1.3 方法

#### 1.3.1 全麦面团及半干面的制备

1) 未发酵组 20 g 麸皮与 80 g 小麦粉混匀, 加水 and 和面 7 min, 于 38 °C 醒发 30 min; 在面条机 2.0 mm 辊距下压延形成全麦面团待测; 调节辊距, 依次压延至面片厚度为 1.0 mm, 面片切成宽度为 2.0 mm 的全麦面条, 于 105 °C 烘箱干燥至水分含量(22.5±0.5)%, 形成全麦半干面。

2) 自然发酵组: 20 g 麸皮与水混匀后至于 38 °C 发酵 3.5 h, 与 80 g 小麦粉混合, 和面 7 min, 压延形成 2.0 mm 厚度的全麦面团待测; 依次压延切条形成厚度 1.0 mm 宽度 2.0 mm 的全麦面条, 置于 38 °C 下发酵 3 h, 再干燥脱水形成全麦半干面(水分含量 22.5%±0.5%)。

3) 酒曲发酵组 20 g 麸皮、酒曲与水混匀, 于 38 °C 发酵 3.5 h, 全麦面团、全麦半干面的制备步骤同自然发酵组。

4) 酵母发酵组 20 g 麸皮、酵母与水混匀, 于 38 °C 发酵 3.5 h, 全麦面团、全麦半干面的制备步骤同自然发酵组。

5) 酵母酒曲发酵组 20 g 麸皮、酒曲、酵母与水混匀, 于 38 °C 发酵 3.5 h, 全麦面团、全麦半干面的制备步骤同自然发酵组。

1.3.2 全麦面团动态流变学特性的测定 参考 Ghoshal 等<sup>[14]</sup>的方法并作修改。将 1.3.1 节中制备的全麦面团置于直径 20 mm 的平板间, 进行动态频率扫描。扫描参数: 应变量为 0.05%, 测试间隙为 2 500 μm, 频率范围为 0.01~10 Hz, 温度 25 °C。

1.3.3 全麦面团水分分布的测定 参考刘锐等<sup>[15]</sup>的方法并略作改动。称取一定量全麦面团于样品瓶中, 用生料带封口, 放入直径为 25 mm 的核磁测试管内, 置于核磁共振腔体内, 采用 CPMG 序列测定全麦面团的弛豫时间  $T_2$ 。具体参数: 采样频率 SW=100 kHz, 累加次数 NS=2, 回波时间 TE=0.25 ms, 回波个数 NECH=3 000, 采样间隔时间 TW=3 000 ms。通过  $T_2$  反演程序得到全麦面团的弛豫时间。

1.3.4 全麦半干面吸水率的测定 将质量为  $m_1$  的全麦半干面(水分含量为  $w$ )置于 500 mL 沸水中煮至最佳蒸煮时间, 捞出在冷水中冷却 30 s, 用滤纸吸干面条表面的水分后, 称量煮后面条的质

量  $m_2$ , 全麦半干面吸水率计算如公式(1):

$$\text{吸水率} = \frac{m_2 - m_1}{m_1(1-w)} \times 100\% \quad (1), \text{ 每个样品设置}$$

3 次平行。

1.3.5 全麦半干面的质构特性测定 将全麦半干面煮至最佳蒸煮时间后捞出, 在冷水中冷却 30 s, 滤纸吸干表面水分后保鲜膜包裹待测。全质构测试参考 Guo 等<sup>[16]</sup>的方法, 并稍作修改: P36 探头, 测前速度 1.0 mm/s, 测试速度 1.0 mm/s, 测后速度 1.0 mm/s, 形变量 75%。剪切测试参考陶海腾等<sup>[17]</sup>的方法并作改动: ALK/B-F 探头, 测试速度: 0.17 mm/s, 起始距离: 5.0 mm, 压缩距离: 4.5 mm。每个样品至少重复 4 次。

1.3.6 全麦半干面截面微观结构观察 根据 Silva 等<sup>[18]</sup>的方法并作改动。将全麦半干面切成 1 cm 左右的长度后, 用徕卡胶进行包埋并冷冻, 再经冰冻切片器切成厚度为 40 μm 的样品切片, 将切片附于载玻片上, 使用混合染色液(0.25% 异硫氰酸荧光素和 0.025% 罗丹明 B) 对其染色约 1 min, 漂洗后盖上盖玻片倒置, 在显微镜下观察。

1.3.7 全麦半干面植酸含量的测定 根据 Haug 等<sup>[19]</sup>的方法, 称取 0.5 g 全麦半干面冻干粉溶于 25 mL 0.5 mol/L 盐酸溶液中, 旋转混合提取 3 h, 离心后取 1 mL 上清液与 2 mL 0.02% 硫酸铁铵溶液混匀, 于沸水浴中反应 30 min, 冰浴下终止反应后离心。取 2 mL 上清液与 3 mL 1% 双吡啶溶液混合均匀, 在 519 nm 下测定吸光度。用植酸钠标准液绘制标准曲线, 依据标准曲线计算全麦半干面植酸含量。

1.3.8 全麦半干面总酚含量的测定 称取 0.5 g 全麦半干面冻干粉溶于 5 mL 70% 甲醇溶液(预热至 70 °C)中, 振荡提取 30 min, 离心后收集上清液, 重复提取 1 次沉淀物, 合并提取液, 用 70% 甲醇溶液定容至 10 mL 后取 1 mL 提取液与 4 mL 福林酚试剂混匀, 反应 5 min, 加入 5 mL 7.5% 碳酸钠溶液, 混匀后避光反应 1 h, 于 765 nm 测定吸光度, 根据没食子酸标准曲线计算总酚含量<sup>[20]</sup>。

### 1.4 数据处理

通过软件 IBM SPSS 22 和 Origin 8.5 分析数据。比较均值使用 Duncan 检验将显著性差异定义为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同麸皮发酵方式对全麦面团水分分布的影响

通过低场核磁共振(LF-NMR)技术探究了不同麸皮发酵方式对全麦面团  $T_2$  弛豫时间的影响。试验结果表明,全麦面团的  $T_2$  弛豫时间曲线中出现了 3 个氢质子信号峰,分别为强结合水峰、弱结合水峰和自由水峰,其峰顶点时间分别为  $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 、 $T_{23}$ 。 $T_2$  弛豫时间代表了全麦面团中的水分活度, $T_2$  弛豫时间越短,水分可移动性越低,与底物的结合程度越高<sup>[21]</sup>。

由表 1 可知,与未发酵组相比,自然发酵组全麦面团的  $T_{21}$ 、 $T_{22}$  值没有明显变化,酒曲发酵、酵母发酵和酒曲酵母发酵组  $T_{21}$  值显著增加( $P<0.05$ ),  $T_{22}$  值显著降低( $P<0.05$ )。表明在全麦面团体系中,  $T_{21}$  峰代表的强结合水被束缚的程度降低,  $T_{22}$  峰代表的弱结合水可移动性降低。经酒曲和酵母发酵后,尤其是酒曲酵母联合发酵组,可能是麸皮结合的水分可移动性增加,水分与蛋白和淀粉的结合程度增加,表明一部分水分有可能从麸皮迁移至蛋白、淀粉中<sup>[21]</sup>,一定程度上影响全麦面团的流变

表 1 全麦面团的水分分布

Table 1 Moisture distribution of whole wheat dough			
麸皮处理方式	$T_{21}/\text{ms}$	$T_{22}/\text{ms}$	$T_{23}/\text{ms}$
未发酵	$0.40 \pm 0.03^b$	$6.14 \pm 0.00^a$	$27.24 \pm 2.14^b$
自然发酵	$0.40 \pm 0.06^b$	$6.14 \pm 0.00^a$	$41.69 \pm 7.00^a$
酒曲发酵	$0.45 \pm 0.04^{ab}$	$5.60 \pm 0.46^b$	$39.53 \pm 3.26^a$
酵母发酵	$0.48 \pm 0.10^{ab}$	$5.10 \pm 0.40^c$	$37.65 \pm 0.00^a$
酒曲酵母发酵	$0.55 \pm 0.09^a$	$4.64 \pm 0.00^c$	$37.89 \pm 5.28^a$

注:同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

特性和全麦半干面的品质。另外,经发酵处理,  $T_{23}$  值增加,表明自由水的流动性增加,水分重新分布。酒曲酵母联合发酵麸皮使得面团的强结合水流动性增强,降低了麸皮的竞争吸水作用,减弱麸皮对全麦面团的负面影响。

### 2.2 不同麸皮发酵方式对全麦面团动态流变学特性的影响

由图 1 可知,随着扫描频率的增加,不同麸皮发酵方式下的全麦面团的弹性模量  $G'$  和黏性模量  $G''$  均呈现上升趋势,且弹性模量  $G'$  大于黏性模量  $G''$ ,这与面团本身的固体属性相符<sup>[22]</sup>。

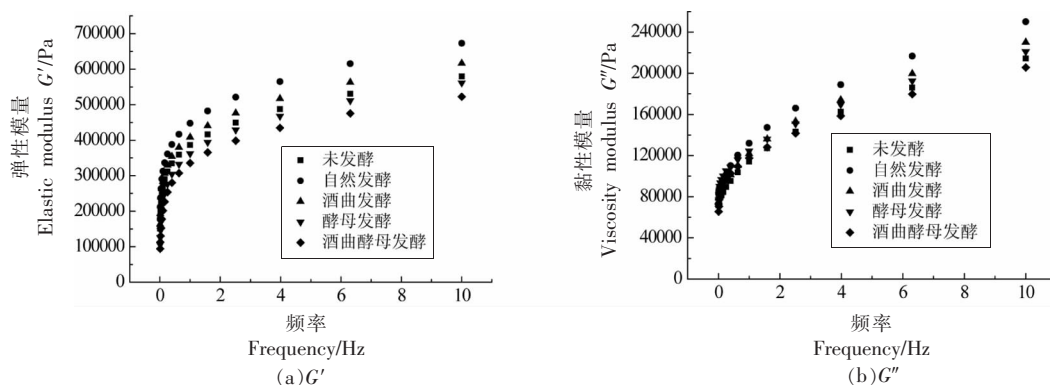


图 1 全麦面团的动态流变学特性

Fig.1 Dynamic rheological properties of whole wheat dough

从图 1a 可看出,自然发酵和酒曲发酵麸皮使得全麦面团的弹性模量  $G'$  均大于未发酵组,而酵母发酵、酒曲酵母发酵组均小于未发酵组。与未发酵组相比,自然发酵和酒曲发酵组的黏性模量  $G''$  增加,酵母发酵组近似接近于未发酵组,而酒曲酵母发酵组的黏性模量  $G''$  降低(图 1b)。这可能是由于不同麸皮发酵方式下的水分分布状态不同,结

合 2.1 节中水分分布的分析,相比于自然发酵组和酒曲发酵组,酵母发酵组和酒曲酵母发酵组水分分布的变化更加明显;另外,由于酵母组和酒曲酵母组的微生物代谢产气更为激烈,微生物分泌产生的水解酶能够改变麸皮中的可溶性部分,促进游离水的释放,降低了面团的黏弹性。杨文丹<sup>[23]</sup>采用酵母发酵小麦麸皮发现,发酵麸皮的面团弹



性模量  $G'$  和黏性模量  $G''$  均小于未发酵麸皮的面团,推测与阿拉伯木聚糖的降解、游离水的释放有关。

### 2.3 不同麸皮发酵方式对全麦半干面食品质的影响

由表 2 可知,相比于未发酵组,自然发酵组全麦半干面的蒸煮吸水率没有显著性差异,酒曲发酵组的吸水率显著降低,酵母发酵和酒曲酵母发酵组的吸水率显著增加。面条蒸煮过程中的吸水率表示了面条的膨胀程度,与面条的内部结构有关。酵母发酵和酒曲酵母发酵组中酵母发酵产气,面条内部出现类似于传统空心面条的孔隙结构<sup>[24]</sup>,加快了蒸煮过程中水分的进入和热量的传递,在缩短蒸煮时间的同时也增加了吸水率,这符合餐

饮面条快速吸收汤汁的需求,具有实际的生产应用价值。

从煮后全麦半干面的剪切试验结果可以看出,麸皮发酵处理组的全麦半干面硬度比未发酵组的低 ( $P < 0.05$ ),尤其是酒曲酵母发酵组。有研究表明,麸皮的不溶性纤维含量越高,煮后全麦面条的硬度越高,一定程度上影响口感<sup>[25]</sup>。酵母发酵和酒曲酵母发酵利用微生物代谢、微生物酶的作用,对麸皮中的不溶性成分(如阿拉伯木聚糖等)进行降解,改善了全麦体系的水分分布,减弱了麸皮对全麦半干面品质的负面影响。另一方面,酵母的发酵产气作用也使得面条内部结构疏松,口感变软,提高全麦半干面的适口性。

表 2 全麦半干面的食用品质

Table 2 Eating qualities of semi-dried whole wheat noodles

麸皮处理方式	吸水率/%	硬度/g	内聚性	胶黏性
未发酵	171.69 ± 1.73 <sup>b</sup>	147.22 ± 0.62 <sup>a</sup>	0.473 ± 0.001 <sup>a</sup>	1 486.67 ± 20.28 <sup>b</sup>
自然发酵	177.05 ± 2.05 <sup>b</sup>	141.00 ± 3.25 <sup>b</sup>	0.475 ± 0.005 <sup>a</sup>	1 620.68 ± 16.64 <sup>a</sup>
酒曲发酵	155.63 ± 1.88 <sup>c</sup>	124.80 ± 4.82 <sup>c</sup>	0.445 ± 0.002 <sup>c</sup>	1 487.27 ± 54.36 <sup>b</sup>
酵母发酵	181.62 ± 1.18 <sup>a</sup>	123.27 ± 4.72 <sup>c</sup>	0.458 ± 0.001 <sup>b</sup>	1 479.43 ± 65.34 <sup>b</sup>
酒曲酵母发酵	183.68 ± 2.37 <sup>a</sup>	111.78 ± 0.99 <sup>d</sup>	0.456 ± 0.006 <sup>b</sup>	1 442.53 ± 54.56 <sup>b</sup>

注:同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

通过全质构试验模拟人体口腔咀嚼面条的力,对全麦半干面进行质构特性分析。由表 2 可以看出,酵母发酵和酒曲酵母发酵组煮后面条的内聚性显著低于未发酵组和自然发酵组,这与其内部形成的孔隙结构有关。酒曲发酵组的内聚性显著降低,可能是由于其内部水分没有均匀分布,从而使得内部结构不够紧密。胶黏性一定程度上反映了煮后面条在咀嚼过程中的黏牙程度,酵母发酵和酒曲酵母发酵组的煮后面条胶黏性均低于其它 3 组,可能由于发酵改善了弱结合水与底物的结合程度,使得淀粉与水分结合更紧密,减少了面条蒸煮过程中淀粉的溶出。

### 2.4 全麦半干面截面的微观结构

面条内部微观结构直观地反映了淀粉和蛋白的状态,与全麦半干面的品质相关联。采用激光共聚焦显微镜观察全麦半干面截面的微观结构,使用混合染料进行染色,其中异硫氰酸荧光素使淀粉呈绿色,罗丹明 B 使蛋白呈红色。

观察图 2a 可知,未发酵组全麦半干面内部蛋白分布较为分散,淀粉颗粒之间较为紧密。经自然发酵后(图 2b),面条的淀粉状态与未发酵组相比没有明显差别,蛋白更均匀分散。从图 2c 可看出,酒曲发酵组的全麦半干面蛋白呈部分聚集,淀粉颗粒之间比较分散,相互之间出现裂缝,这与煮后面条的内聚性降低相对应。观察图 2d 和图 2e,酵母发酵和酒曲酵母发酵产生二氧化碳,使得面条内部出现不规则的孔隙结构(图 2d 和 2e 中箭头处),蛋白结构比较连续且均匀分布,与淀粉均匀包裹,和未发酵组、自然发酵组、酒曲发酵组相比,蛋白分布更为均匀连续。相比于未发酵组和自然发酵组,酵母发酵组和酒曲酵母发酵组内部结构较为疏松,这与发酵麸皮在面团中的作用类似<sup>[26]</sup>,与熟面条的硬度、内聚性相一致。

### 2.5 不同麸皮发酵方式对全麦半干面表观形态的影响

观察图 3a 可以看出,未发酵组、自然发酵组、

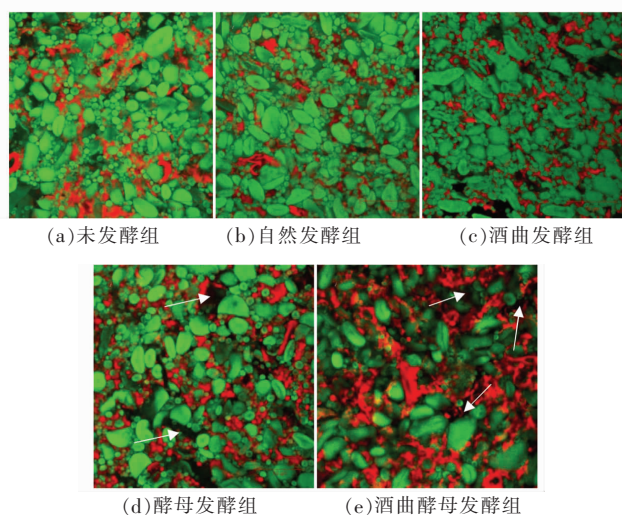


图 2 全麦半干面的截面微观结构

Fig.2 Cross-sectional microstructure of whole wheat semi-dried noodles

酒曲发酵组全麦半干面的截面结构没有明显差异,呈长方形,且结构致密,没有肉眼可见的孔隙,面条整体呈长方体,属于宽型面条,表面结构无明显变化;而酵母发酵组合酒曲酵母发酵组的全麦半干面呈不规则圆柱形,面条内部出现孔隙结构,面条膨胀,体积变大,与传统空心面的结构类似<sup>[24]</sup>。这是由于酵母菌的呼吸作用产生二氧化碳,而酒曲中的米根霉分泌淀粉酶降解淀粉颗粒<sup>[27]</sup>,为酵母菌提供充足的可发酵糖类,促进了酵母的发酵和二氧化碳的产生。同时,这两组全麦半干面内部孔隙的产生与其硬度的降低相对应,二氧化碳赋予了其更为疏松的结构。

结合图 3b 分析可得,麸皮经自然发酵和酒曲发酵后,全麦半干面的颜色明显变深变暗,而酵母发酵和酒曲酵母发酵组的颜色明显亮于自然发酵组和酒曲发酵组,给全麦半干面增加了原麦麸皮色。

## 2.6 不同麸皮发酵方式对全麦半干面活性物质含量的影响

如表 3 所示,与未发酵组相比,麸皮经过发酵处理后的全麦半干面中的植酸含量显著下降 ( $P < 0.05$ )。其中,酒曲酵母发酵组的植酸含量最低,从  $7.31 \text{ mg/g}$  降低至  $4.26 \text{ mg/g}$ ,表明发酵使得植酸发生了降解,可能是酒曲和酵母的代谢作用,微生物分泌的酶可以降解植酸<sup>[28]</sup>。Zhao 等<sup>[29]</sup>使用酵母发

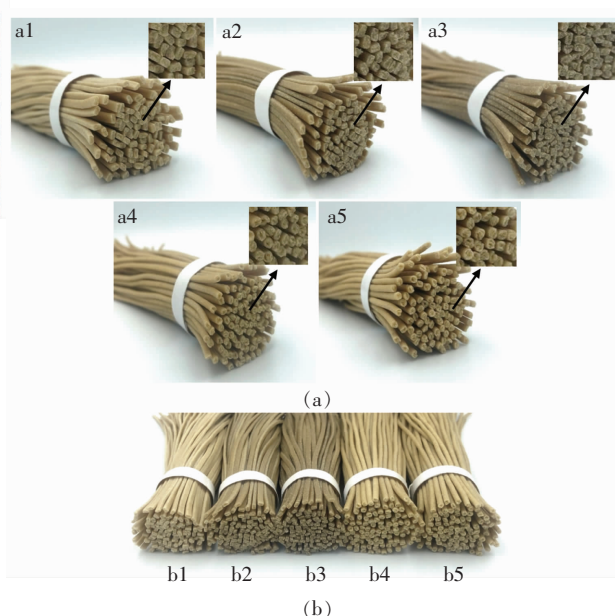


图 3 全麦半干面的表现形态

Fig.3 External appearance of semi-dried whole wheat noodles

注:1-5 分别代表未发酵组、自然发酵组、酒曲发酵组、酵母发酵组、酒曲酵母发酵组。

表 3 全麦半干面活性物质的含量

Table 3 Content of bioactive substances in semi-dried whole wheat noodles

麸皮处理方式	植酸含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	多酚含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$
未发酵	$7.31 \pm 0.26^a$	$1.00 \pm 0.02^d$
自然发酵	$6.17 \pm 0.18^b$	$1.01 \pm 0.02^d$
酒曲发酵	$5.87 \pm 0.31^b$	$1.07 \pm 0.01^c$
酵母发酵	$4.47 \pm 0.04^c$	$1.10 \pm 0.01^b$
酒曲酵母发酵	$4.26 \pm 0.05^c$	$1.18 \pm 0.00^a$

注:同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

酵小麦麸皮,发现发酵过后的麸皮植酸含量下降超过 20%。Manini 等<sup>[30]</sup>对麸皮进行类似酸面团法的发酵,发现发酵后麸皮的植酸降解率超过 90%。另一方面,酵母菌发酵过程中代谢产生有机酸<sup>[31]</sup>,降低了麸皮以及全麦半干面体系的 pH 值,可能激活一部分内源植酸酶,促进了植酸的降解,这与 Buddrick 等<sup>[32]</sup>的研究结果一致,植酸在酸性条件下易发生降解。植酸作为一种抗营养因子,能与矿物质、蛋白形成络合物,影响人体对矿物质和蛋白的

吸收利用。麸皮经发酵后,植酸含量降低,提高了蛋白质、矿物质等组分的生物利用率,有利于提高全麦半干面的营养价值。

从表3可得出,与未发酵组相比,自然发酵组的多酚含量没有显著差异,而酒曲发酵组、酵母发酵组、酒曲酵母发酵组的多酚含量依次显著增加( $P<0.05$ ),尤其是酒曲酵母发酵组从1.00 mg/g增加至1.18 mg/g,多酚含量最高。麸皮发酵处理使得多酚含量增加,这与Katina等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。酵母菌在发酵过程中分泌微生物酶分解细胞壁,使得其中的结合酚酸游离出来,因此经麸皮发酵后游离酚的含量增加<sup>[12]</sup>。多酚类物质具有抗氧化能力,能够通过清除自由基、络合金属离子等方式实现抗氧化作用<sup>[20,34]</sup>,游离酚含量的增加提高了全麦半干面的生物活性及营养价值。

### 3 结论

小麦麸皮进行发酵处理后,全麦面团水分分布和动态流变学特性、全麦半干面宏观品质发生了变化,进而从微观层面对全麦半干面的蛋白及活性物质进行了分析。研究表明,酵母、酒曲的发酵方式使得全麦面团的 $T_{21}$ 值增加, $T_{22}$ 值降低,对强结合水的束缚力减弱,弱结合水的可移动性减弱,水分可能从麸皮迁移至蛋白、淀粉中。动态流变学试验表明,酵母和酒曲发酵麸皮降低了全麦面团的弹性模量 $G'$ 和黏性模量 $G''$ 。蒸煮和质构特性试验结果表明,酒曲酵母发酵组的全麦半干面吸水率增加,硬度降低,黏附性降低,提高了全麦半干面的适口性和爽滑性,符合现代餐饮业对面条快熟、易吸汤汁的需求。另外,全麦半干面的表面形态照片和激光共聚焦显微镜观察结果表明,经酵母和酒曲发酵过后的全麦半干面内部出现类似空心手工面的孔隙结构,内部结构疏松,蛋白更为均匀且连续分布,改善了麸皮对全麦半干面的负面影响,改善了食用品质。最后,经过酒曲酵母发酵后,全麦半干面的植酸含量显著降低,多酚含量显著上升,提高了其营养价值。因此,将酒曲酵母发酵麸皮这一工艺创新应用于全麦半干面的制作,有利于改善其食用品质、营养价值和抗氧化特性,符合现代食品健康理念。

### 参 考 文 献

- [1] HUBNER F, ARENDT E K. Germination of cereal grains as a way to improve the nutritional value: A Review[J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 2013, 53(8): 853-861.
- [2] ZHU K X, LI J, LI M, et al. Functional properties of chitosan-xylose Maillard reaction products and their application to semi-dried noodle[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92(2): 1972-1977.
- [3] 乔菊园, 郭晓娜, 朱科学. 麸皮粒径对全麦面粉水分分布及挂面品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(9): 15-20.  
QIAO J Y, GUO X N, ZHU K X. Effects of bran whole wheat particle size on the dough sheets and water distribution of qualities of noodles[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(9): 15-20.
- [4] 刘丽娅, 岳颖, 蔺艳君, 等. 麸皮粒径对全麦面团流变特性和馒头品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(12): 82-88, 210.  
LIU L Y, YUE Y, LIN Y J, et al. Effects of wheat bran particle size on the rheological property of whole wheat dough and buns quality[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(12): 82-88, 210.
- [5] 安兆鹏, 王然, 赵文哲, 等. 小麦麸皮对面团及面筋蛋白特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(9): 11-17.  
AN Z P, WANG R, ZHAO W Z, et al. Effects of wheat bran on dough and gluten characteristics[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(9): 11-17.
- [6] 毕宁宁, 谢岩黎, 赵文红. 麸皮的添加量对面团流变学特性和馒头品质的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2014(2): 28-30, 51.  
BI N N, XIE Y L, ZHAO W H. Effect of wheat bran addition on rheological properties of dough and steamed bread quality[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2014(2): 28-30, 51.
- [7] NIU M, HOU G G, WANG L, et al. Effects of superfine grinding on the quality characteristics of whole-wheat flour and its raw noodle product[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(2): 382-388.
- [8] XU X Y, XU Y, WANG N F, et al. Effects of su-



- perfine grinding of bran on the properties of dough and qualities of steamed bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 81: 76–82.
- [9] ANDERSSON A A M, ANDERSSON R, JONSALL A, et al. Effect of different extrusion parameters on dietary fiber in wheat bran and rye bran[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(6): 1344–1350.
- [10] 李治, 吴涛, 刘锐, 等. 挤压与汽爆麦麸添加对小麦粉糊化特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(6): 41–47.
- LI Z, WU T, LIU R, et al. Effect of extruded and steam exploded wheat bran on pasting properties of wheat flour[J]. *Food Science*, 2019, 40(6): 41–47.
- [11] HU Y M, WANG L J, LI Z G. Superheated steam treatment on wheat bran: Enzymes inactivation and nutritional attributes retention[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2018, 91: 446–452.
- [12] 崔晨晓. 麸皮的发酵改性及其在馒头中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 17–40.
- CUI C X. Fermented modification of wheat bran and its application in steamed bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 17–40.
- [13] SALMENKALLIO–MARTTILA M, KATINA K, AUTIO K. Effects of bran fermentation on quality and microstructure of high–fiber wheat bread[J]. *Cereal Chemistry*, 2001, 78(4): 429–435.
- [14] GHOSHAL G, SHIVHARE U S, BANERJEE U C. Rheological properties and microstructure of xylanase containing whole wheat bread dough[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(7): 1928–1937.
- [15] 刘锐, 武亮, 张影全, 等. 基于低场核磁和差示量热扫描的面条面团水分状态研究[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 288–294.
- LIU R, WU L, ZHANG Y Q, et al. Water state and distribution in noodle dough using low–field nuclear magnetic resonance and differential scanning calorimetric[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9): 288–294.
- [16] GUO X N, GAO F, ZHU K X. Effect of fresh egg white addition on the quality characteristics and protein aggregation of oat noodles[J]. *Food Chemistry*, 2020, 330: 127319.
- [17] 陶海腾, 李倩, 刘丽娜, 等. 不同淀粉挤压面条的品质研究[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(2): 86–89.
- TAO H T, LI Q, LIU L N, et al. Researches on quality of different starch extruded noodles[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(2): 86–89.
- [18] SILVA E, BIRKENHAKKE M, SCHOLTEN E, et al. Controlling rheology and structure of sweet potato starch noodles with high broccoli powder content by hydrocolloids[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(1): 42–52.
- [19] HAUG W, LANTZSCH H J. Sensitive method for the rapid determination of phytate in cereals and cereal products[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 34(12): 1423–1426.
- [20] KIM K H, TSAO R, YANG R, et al. Phenolic acid profiles and antioxidant activities of wheat bran extracts and the effect of hydrolysis conditions[J]. *Food Chemistry*, 2006, 95(3): 466–473, 10.
- [21] 李娟. 全麦苏打饼干烘焙品质改良以及水分迁移机制的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 66–74.
- LI J. Improvement of baking qualities of whole wheat saltine crackers and determination of the mechanism of water migration[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013: 66–74.
- [22] 熊礼橙, 牛猛, 张宾佳, 等. 麦麸粒径对全麦面团流变学特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(2): 98–103, 110.
- XIONG L C, NIU M, ZHANG B J, et al. Effects of wheat bran particle size on rheological properties of whole–wheat dough[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(2): 98–103, 110.
- [23] 杨文丹. 马克斯克鲁维酵母发酵麦麸面包烘焙与营养特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 28–30.
- YANG W D. Studies on baking and nutritional properties of *Kluyveromyces Marxianus* fermented wheat bran bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 28–30.
- [24] WANG J R, GUO X N, XING J J, et al. Revealing the effect mechanism of NaCl on the rheological properties of dough of Chinese traditional hand–stretched dried noodles[J]. *Food Chemistry*, 2020, 320: 126606.
- [25] 晁慧梅. 小麦麸皮特性与全麦面条品质关系研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019: 28–30.
- ZHAO H M. Study on the relationship between characteristics of wheat bran and whole wheat noodle quality characteristics[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019: 28–30.

- [26] 刘豪, 王岸娜, 吴立根. 发酵麸皮对面团品质的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(10): 160–164.  
LIU H, WANG A N, WU L G. Effect of fermented bran on dough quality[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(10): 160–164.
- [27] 张翠翠, 郭波, 陈雅轩, 等. 高质量酒曲的制备工艺及酒曲活力评价[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(6): 166–169.  
ZHANG C C, GUO B, CHEN Y X, et al. Preparation process of high-quality Jiuqu and vigor evaluation of Jiuqu[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(6): 166–169.
- [28] GREENWOOD A J, LEWIS D H. Phosphatases and the utilisation of inositol hexaphosphate by soil yeasts of the genus *Cryptococcus*[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1977, 9(3): 161–166.
- [29] ZHAO H M, GUO X N, ZHU K X. Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 28–36.
- [30] MANINI F, BRASCA M, PLUMED-FERRER C, et al. Study of the chemical changes and evolution of microbiota during sour dough like fermentation of wheat bran[J]. Cereal Chemistry, 2014, 91(4): 342–349.
- [31] KUWAKI S, NAKAJIMA N, TANAKA H, et al. Plant-based paste fermented by lactic acid bacteria and yeast: functional analysis and possibility of application to functional foods[J]. Biochemistry Insights, 2012, 5(5): 21–29.
- [32] BUDDRICK O, JONES O A H, CORNELL H J, et al. The influence of fermentation processes and cereal grains in wholegrain bread on reducing phytate content[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 59(1): 3–8.
- [33] KATINA K, LAITILA A, JUVONEN R, et al. Bran fermentation as a means to enhance technological properties and bioactivity of rye[J]. Food Microbiology, 2007, 24(2): 175–186.
- [34] 任雪荣, 齐景伟, 刘娜, 等. 微生物发酵对麦麸水溶性多酚含量, 组成及抗氧化活性的影响研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 104–109.  
REN X R, QI J W, LIU N, et al. Effect of microbial fermentation on content, composition and antioxidant activity of water-soluble polyphenols in wheat bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 104–109.

### Effect of Bran Pre-fermentation on Qualities of Whole Wheat Dough and Whole Wheat Semi-dried Noodles

Xu Chenya, Guo Xiaona\*, Zhu Kexue

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu)

**Abstract** Wheat bran had negative effects on the quality of whole wheat dough and semi-dried noodles. In order to improve the quality of whole wheat dough and semi-dried whole wheat noodles (SWWN), fermentation of bran was applied in this study. The effects of different bran pre-fermentation methods (including unfermented, nature fermented, liquor koji fermented, yeast fermented, and liquor koji and yeast fermented methods) on the moisture distribution and dynamic rheological properties of whole wheat dough, and the eating quality of SWWN were studied in this paper. In the analysis of low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), the  $T_{21}$  value increased and the  $T_{22}$  value decreased in the whole wheat dough made with pre-fermented bran. It was possible that the water in the whole wheat dough migrated from the bran to the protein and starch. In the dynamic rheology experiment, the elastic modulus  $G'$  and viscosity modulus  $G''$  of the whole wheat dough decreased in the liquor koji and yeast fermentation groups. In the liquor koji and yeast fermentation group, the water absorption of SWWN increased during cooking, and the hardness and gumminess decreased. The external appearance and microstructure observation showed that the internal structure of SWWN became loose in liquor koji and yeast group. The irregular pores were observed in the cross-section of SWWN, which improved the eating quality of SWWN. At the same time, after fermentation by liquor koji and yeast, the content of phytic acid reduced, and the content of polyphenols increased, which improved the nutritional value of SWWN.

**Keywords** wheat bran; fermentation; moisture mobility; eating quality; semi-dried noodles