

# 不同粒径米糠对面团特性及饼干品质的影响

杨翠梅<sup>1,2</sup>, 邓媛元<sup>2</sup>, 魏振承<sup>2</sup>, 张雁<sup>2</sup>, 唐小俊<sup>2</sup>, 周鹏飞<sup>2</sup>, 李萍<sup>2</sup>, 赵志浩<sup>2</sup>, 张名位<sup>2,3</sup>, 刘光<sup>2\*</sup>

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225)

(2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (3. 中原食品实验室, 河南漯河 462300)

**摘要:** 富含营养的米糠添加到饼干中成为营养饼干开发的重要方向。为评价不同粒径米糠对面团特性及饼干品质的影响, 该研究制备了4种不同粒径(50、100、150、200目)米糠原料, 探究了其对面粉质特性、面团流变特性、饼干质构特性和感官品质影响, 并从面筋蛋白巯基含量、谷蛋白大分子聚合物(Glutenin Macropolymer, GMP)含量和面团微观结构变化等角度初步分析了其影响机制。结果表明, 随着米糠粒径的减小, 面团的稳定时间、形成时间降低, 粘弹性模量增大; 减小米糠粒径后可提高饼干质构特性, 表现为硬度和咀嚼性降低; 200目米糠饼干的模糊数学感官评分最高, 达77.02分。添加米糠后, 面筋蛋白巯基含量随米糠粒径减小而逐渐增大, GMP含量则逐渐降低, 面筋网络结构逐渐弱化, 表明降低米糠粒径促进了面筋蛋白二硫键的断裂, GMP的解聚, 以及面筋网络强度的降低, 从而改善了米糠饼干品质。研究结果为推动米糠在饼干等焙烤食品中的应用提供了理论指导。

**关键词:** 米糠粒径; 饼干品质; 流变特性; 面筋蛋白大聚集体; 面筋网络

文章编号: 1673-9078(2023)12-11-19

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.12.0441

## Effect of Different Particle Sizes of Rice Bran on Dough Characteristics and Biscuit Quality

YANG Cuimei<sup>1,2</sup>, DENG Yuanyuan<sup>2</sup>, WEI Zhencheng<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, TANG Xiaojun<sup>2</sup>, ZHOU Pengfei<sup>2</sup>, LI Ping<sup>2</sup>, ZHAO Zhihao<sup>2</sup>, ZHANG Mingwei<sup>2,3</sup>, LIU Guang<sup>2\*</sup>

(1.College of Light Industry and Food Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China) (2.Sericultura & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (3.Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, China)

**Abstract:** The addition of rice bran to biscuits has become an important direction in the development of nutritious biscuits. In order to evaluate the effects of different particle sizes of rice bran on dough properties and biscuit quality, four different particle sizes (50 mesh, 100 mesh, 150 mesh, and 200 mesh) of rice bran were prepared in this study. The effects on farinograph properties, dough rheology, biscuit texture properties, and sensory quality were investigated. Moreover, the mechanisms of their effects on the sulfhydryl content of gluten, glutenin macropolymer (GMP) content, and microstructure of dough were also preliminarily analyzed. With the decrease in rice bran particle size, the stability and development time of dough decreased and the viscoelastic modulus increased. Reducing the particle size of rice bran improved the

引文格式:

杨翠梅, 邓媛元, 魏振承, 等. 不同粒径米糠对面团特性及饼干品质的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 11-19

YANG Cuimei, DENG Yuanyuan, WEI Zhencheng, et al. Effect of different particle sizes of rice bran on dough characteristics and biscuit quality [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 11-19

收稿日期: 2023-04-12

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2022B0202020003); 广东省财政厅专项(粤财农[2022]167号); 广东省现代农业产业技术体系水稻创新团队项目(2023KJ105); 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目(2022KJ117); 广州市民生科技计划项目(202002020066); 广东省农业科学院农业优势学科团队建设项目(202108TD); 广东特支计划项目(2019BT02N112); 广东省农业科学院创新基金(202229); 广东省农业科学院科技创新战略专项资金(高水平农科院建设)(R2020PY-JX009)

作者简介: 杨翠梅(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 19872738473@163.com

通讯作者: 刘光(1988-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 谷物加工, E-mail: liuguang@gdass.cn

textural characteristics of the biscuits, which had a decrease in hardness and chewiness. The fuzzy mathematics sensory score of rice bran biscuits with 200 mesh reached the highest score of 77.02. After adding rice bran, the sulfhydryl contents of gluten gradually increased with the decrease in rice bran particle size, whereas the GMP content gradually decreased and the gluten network structure gradually weakened. This indicated that a smaller rice bran particle size promoted the breakage of gluten disulfide bonds, the depolymerization of GMP, and the decrease in gluten network strength, thus improving the quality of rice bran biscuits. The results of the study provide theoretical guidance to promote the application of rice bran in bakery products such as biscuits.

**Key words:** rice bran particle size; biscuit quality; rheological properties; gluten protein macromolecules; gluten network

米糠 (Rice Bran) 是稻谷加工过程中的重要副产品, 据统计, 2021 年我国稻谷产量达 2.1 亿 t, 加工产生的米糠超过 1 400 万 t<sup>[1]</sup>。米糠约占稻谷总质量的 7%, 包含了 64% 的稻谷总营养成分, 不仅含有丰富的膳食纤维、脂肪、蛋白质等营养成分, 还含有生育三烯酚、多糖、肌醇、阿魏酸、 $\gamma$ -谷维素等具有抗肿瘤、提高机体免疫以及抗氧化等生理功能的生物活性物质<sup>[2]</sup>。然而, 目前我国米糠大部分被用于畜禽饲料, 高值化利用率低, 造成极大的资源浪费<sup>[3]</sup>。

饼干是以小麦粉为主要原料, 通过焙烤制成的休闲食品。随着健康理念加深, 饼干也从传统粮油食品逐渐向功能化营养食品方向转变。将富含膳食纤维、蛋白质等营养成分的米糠应用到饼干中能够有效提升饼干的营养价值和健康功效, 但米糠的添加也不可避免地影响了饼干感官品质<sup>[4]</sup>。刘雪澜等<sup>[5]</sup>评价了米糠添加量对饼干品质影响, 发现随着米糠添加量的增加, 米糠饼干硬度增大, 比容减小, 口感酥松度变差。郑洋洋等<sup>[6]</sup>的研究也发现随米糠添加量增加, 饼干色度加深, 硬度则先升高后降低, 而感官品质总体呈下降趋势。这些研究表明, 米糠的添加会降低米糠饼干的质构品质和感官品质, 并且这种负面影响随着米糠添加量的增加而增大。

除了添加量, 米糠的颗粒粒径也是影响饼干品质的重要因素<sup>[7]</sup>。Yadav 等<sup>[8]</sup>研究不同粒径的脱脂米糠对薄饼质量的影响, 结果表明, 大粒径米糠的可接受度最低, 而添加 6% ( $m/m$ ) 的小粒径脱脂米糠 (0.157 mm) 可以显著提高薄饼中膳食纤维的含量及其可接受度。Majzoobi 等<sup>[9]</sup>研究结果表明, 发现添加 10% 粒径为 125  $\mu\text{m}$  的米糠可获得最理想的蛋糕质量, 而使用粒径较大的米糠会增加蛋糕密度和焙烤后的蛋糕重量, 同时减少蛋糕的体积。近期, 谭属琼等<sup>[10]</sup>探究了超微粉碎米糠对面粉加工特性影响, 结果表明, 随着米糠粒径减小, 其对面团的拉伸特性和面筋网络结构影响也减小。以上的研究表明, 米糠粒径对面粉加工品质影响显著, 随着米糠粒径降低, 其对面粉加工品质的负面影响逐渐减弱, 但目前有关米糠粒径对面粉加工品质的影响及相关机制并未见系统报道<sup>[11]</sup>。

综上, 本研究旨在探究不同粒径米糠对面粉、面团以及饼干品质影响, 并从面筋蛋白次级键和微观结构变化角度初步阐明不同粒径米糠影响饼干加工品质机制, 研究结果为米糠在饼干等焙烤食品中的应用奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

软华优金丝 (丝苗皇) 稻谷, 广东华星农业科技有限公司; 美玫牌低筋小麦粉, 南顺 (香港) 有限公司; 太古 (TaiKoo) 一级糖霜, 太古股份有限公司; 乐荷 (Vecozuivel) 有机无盐动物黄油, 渤海国际实业 (香港) 有限公司; 十二烷基硫酸钠 (Sodium Dodecyl Sulfate, SDS), 赛国生物科技有限公司; 5,5'-二硫代双 (2-硝基苯甲酸) (5,5'-Dithiobis-(2-Nitrobenzoic Acid), DTNB), 美国 Sigma 公司; 其余试剂均为分析纯, 购于天津市大茂化学试剂厂。

### 1.2 仪器与设备

脉动真空压力蒸汽灭菌器, 广州市豪尔生医疗设备有限公司联合研制; JLGJ 45 型砵谷机, 浙江台州市粮仪厂; LG-500 A 高速中药粉碎机, 瑞安市百信制药机械有限公司; Micro-Dough LAB 微量粉质仪, 波通瑞华科学仪器有限公司; MRO-A 5000 C 多功能过热水蒸汽烤箱, 日本 Hitachi 公司; UltraScan VIS 型色度仪, 美国 HunterLab 公司; TA-XT-Plus 质构仪, 英国 Stable Micro System 公司; FDU-210 冷冻干燥机, 上海爱朗仪器有限公司; AR1500EX 流变仪, 美国 TA 公司; S-3400 N-II 扫描电子显微镜, 日本 Hitachi 公司; TECAN infinite 200 酶标仪, 瑞士 TECAN 公司。

### 1.3 主要研究方法

#### 1.3.1 米糠的制备

稻谷经砵谷、碾磨得到米糠, 过 40 目标标准筛以去除碎米, 再将新鲜米糠进行脉动真空蒸汽稳定化处理 (121  $^{\circ}\text{C}$ , 5 min), 将稳定化米糠粉碎至可通过不同

规格的标准试验筛(50、100、150、200目)以获得4种粒径的米糠。

### 1.3.2 粉质特性的测定

参照刘光<sup>[12]</sup>的方法并稍作修改。使用Micro-Dough LAB微量粉质仪测定米糠与小麦粉混合后的粉质参数。按照15% (m/m)的米糠添加量分别准确称取米糠粉-小麦粉混合样品4 g,将其全部倒入混合槽中,启动程序,先以63 r/min进行1 min的预混合,待预混结束后仪器自动加水,继续以63 r/min搅拌20 min,待搅拌停止后,记录面团的吸水率、形成时间、稳定时间、弱化度等面粉粉质特性参数。不同粒径的米糠与小麦粉混合后的最适加水量不同,以面团最大平均稠度处于500 FU时所需的加水量为最适添加水量,即吸水率。

### 1.3.3 流变特性的测定

参考Liu等<sup>[13]</sup>的方法,使用AR1500EX流变仪对面团的流变特性进行测定。使用直径为40 mm的平行板,将1.3.4.2制备的用于流变测定的面团置于载物台上,调整上下平行板距离至1.5 mm,静置松弛5 min后启动频率扫描程序,在线性粘弹性区域内测定面团的弹性模量( $G'$ )、粘性模量( $G''$ ),设置频率扫描范围为0.1~10 Hz,应变为1.5%,温度为25℃。

### 1.3.4 饼干的制备

#### 1.3.4.1 饼干的基础配方

按米糠-小麦粉混粉100 g为基准,米糠添加量为15% (m/m),小麦粉添加量为85% (m/m),在100 g混粉基础上添加40 g黄油和20 g糖霜,为了防止烘烤过程的干裂,水的添加量为粉质仪测定的最大吸水率。

#### 1.3.4.2 饼干的制作方法

黄油室温软化后快速打发5 min,加入糖粉继续打发1 min,加入不同粒径的米糠-小麦粉混粉和水,低速混合1 min后制得饼干面团。将面团置于两块4 mm厚度尺中间,使用擀面杖轻轻将面团擀压成4 mm的厚度,再使用直径为4.4 cm的圆形模具压制成型。将制好的饼干面团放入已预热至170℃的烤箱,选择过热水蒸气-烘烤程序,先170℃烘烤20 min,取出饼干后将烤箱预热至180℃,再次将饼干放入烤箱烘烤5 min上色。烘焙结束后,将饼干放在25℃、45%相对湿度条件下冷却1 h,即制得饼干样品。

### 1.3.5 饼干质构特性的测定

参考王杰<sup>[14]</sup>的方法测定米糠饼干的质构并稍作修改。采用TA-XT-Plus质构仪TPA程序,测定参数为:探头型号P36R,测前、测中及测后速度分别为

2.0、1.0和2.0 mm/s,压缩比30%,触发力0.05 N。

### 1.3.6 饼干感官评价

参考GB/T 16291.1-2012进行感官评定,组织10名食品专业评定人员。在评价前2 h内,禁止吸烟、喝酒、吃东西,每评价一个样品间隔15 min以上,且使用清水漱口,评价过程中禁止人员之间进行讨论。以米糠饼干的形态、色泽、风味、口感、组织作为感官评价的指标,参加评定人员按照表1的评分标准从优质、良好、一般、较差4个等级,按照十分制进行评分。

参考崔立柱等<sup>[15]</sup>运用模糊数学感官评价法,以感官得分为评价指标,研究不同粒径的米糠对米糠饼干感官指标的影响。传统的食品感官分析中对食品进行综合评定时常采用总分法,主观性较强,试验结果的精确性较低,因此,将模糊数学理论应用于食品的感官评定中将会使试验结果更加科学和客观。

#### 1.3.6.1 模糊数学模型的建立

参考崔立柱等<sup>[15]</sup>建立感官评价模型,建立5个单因素的评价矩阵,采用模糊数学法对其进行分析。因素集 $U=(U_1, U_2, U_3, U_4, U_5)$ ,  $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5$ 分别表示形态、色泽、风味、口感、组织;评语集 $V=(V_1, V_2, V_3, V_4)$ ;  $V_1, V_2, V_3, V_4$ 分别表示优质、良好、一般、较差;模糊关系综合评判集 $Y=X \times R$ ,其中 $X$ 为权重集, $R$ 为模糊矩阵<sup>[15]</sup>。

#### 1.3.6.2 确定权重

本研究采用调查法确定各质量因素的权重,根据调查结果,各因素权重分别为形态(1.9)、色泽(1.7)、风味(2.7)、口感(2.7)、组织(1.0),即权重集 $X=(1.9, 1.7, 2.7, 2.7, 1.0)$ 。

#### 1.3.6.3 模糊综合评判总分

参考裴璞花等<sup>[16]</sup>设定感官特殊性:优质为9分、良好为7分、一般为4分、较差为1分,可建立评价级 $K=(9, 7, 4, 1)$ ,则样品的模糊综合评判总分为 $T=Y \times K$ 。另外,模糊关系综合评判集 $Y=X \times R$ ,其中 $X$ 为权重集, $R$ 为模糊矩阵, $R$ 为各因素、各等级票数除以总评价人数计算所得<sup>[17]</sup>。

### 1.3.7 面团及面筋蛋白的制备

将1.3.4.2制备获得的饼干面团分成4份,第一部分直接擀压成型后烘烤制备饼干;第二部分将新鲜制备的面团进行面团流变特性的测定;第三部分面团压成薄片进行冷冻干燥,用于面团微观结构观察、研磨成粉过150目筛后用于SDS-不可溶面筋蛋白含量的测定;第四部分面团用于制备面筋蛋白。

表1 米糠饼干的感官评价指标及其评分标准

Table 1 Sensory evaluation index and scoring standard of rice bran biscuits

项目	评分标准	得分范围
形态	厚薄合适, 均匀, 无裂痕, 无鼓起气泡与凹底	优质 8~10
	较厚或较薄, 较均匀, 基本无裂痕, 无鼓起气泡与凹底	良好 6~8
	较厚或较薄, 不均匀, 裂痕较轻, 气泡与凹底较轻	一般 3~5
	过厚或过薄, 且不一致, 裂痕严重, 气泡与凹底严重	较差 0~2
色泽	金黄色, 有光泽, 色泽均匀, 无过白或过焦现象	优质 8~10
	棕黄色, 略有光泽, 色泽基本均匀, 基本无过白过焦现象	良好 6~8
	颜色偏褐, 色泽不均匀, 光泽较差, 有轻微过白过焦现象	一般 3~5
	颜色偏黑, 色泽差异大, 无光泽, 过白过焦现象	较差 0~2
风味	黄油与米糠的香味浓郁, 无异味, 无苦味, 甜而不腻	优质 8~10
	黄油与米糠的香味较显, 基本无异味与苦味, 甜度适中	良好 6~8
	黄油与米糠的香味较弱, 略有异味与苦味, 口味偏甜	一般 3~5
	无黄油与米糠的香味, 有异味与苦味, 寡淡无味	较差 0~2
口感	口感酥脆, 细腻无颗粒感, 不粘牙	优质 8~10
	口感较为酥脆, 略有颗粒感, 不粘牙	良好 6~8
	口感不够酥脆, 颗粒感较强, 粘牙	一般 3~5
	口感僵硬或松软, 颗粒感强, 粘牙	较差 0~2
组织	组织结构均匀, 断面层次丰富	优质 8~10
	组织结构较均匀, 断面层次较清晰	良好 6~8
	组织结构不均匀, 断面层次感一般	一般 3~5
	组织结构, 无断面层次或不清晰	较差 0~2
总分		

参考 Wang 等<sup>[18]</sup>的方法制备面筋蛋白并稍作修改。按照 1.3.4.2 的方式制备面团样品, 用水将面团中的淀粉充分去除, 取少量清洗废液加入碘液中, 以碘液不变蓝色为标准检验淀粉是否去除干净, 剩余部分即为面筋蛋白, 将其进行冷冻干燥后研磨成粉末, 过 150 目标准筛, 收集过筛组分, 用于游离巯基含量指标的分析。

### 1.3.8 面筋蛋白中游离巯基含量的测定

参考刘光<sup>[12]</sup>的方法, 采用 DTNB 法测面筋蛋白中游离巯基的含量。将 15 mg 面筋蛋白粉末加入到 0.5 mL Tris-甘氨酸蛋白质变性缓冲液中, 涡旋分散 10 min 后以 15 000 r/min 转速离心 5 min 后, 取上清液。将 100  $\mu$ L 上清液和 150  $\mu$ L Tris-甘氨酸蛋白质变性缓冲液混合, 再加入 50  $\mu$ L 新鲜配制的 4 mg/mL DTNB 溶液, 混合均匀后加入 96 孔板中, 30  $^{\circ}$ C 孵育 30 min, 用酶标仪测定样品在 412 nm 处的吸光值。

以一系列浓度的 GSH 为标准样品, 绘制标准曲线。面筋蛋白游离巯基含量计算公式 (1):

$$y_1 = (424.07x_1 + 1.1155) \times N_1 \quad (1)$$

式中:

$y_1$ ——面筋蛋白游离巯基含量,  $\mu$ mol/g;

$x_1$ ——实验组吸光值减去对照组吸光值的差值;

$N_1$ ——稀释倍数。

### 1.3.9 SDS-不可溶面筋蛋白含量的测定

参照 Liu 等<sup>[19]</sup>的方法制备 SDS-不可溶面筋蛋白, 并稍作修改, 具体步骤如下: 准确称取 50 mg 过 150 目筛的冻干面团, 加入 0.5 mL 2% ( $m/V$ ) 的 NaCl 溶液涡旋分散均匀后再将样品置于 30  $^{\circ}$ C、200 r/min 条件下振荡 15 min, 结束振荡后将样品以 8 000 r/min 转速离心 15 min, 去除上清液, 重复上述操作一次。将沉淀样品中加入 0.5 mL 1.5% ( $m/V$ ) 的 SDS 溶液, 按照上述提取方法收集上清液, 即为 SDS-可溶面筋蛋白组分。再向沉淀中加入 0.5 mL 1.5% ( $m/V$ ) 的 SDS 溶液, 超声 10 s (30 W 超声功率, 占空比 4/6), 随后在 8 000 r/min 离心 10 min, 收集所得上清液即为 SDS-不可溶面筋蛋白。

参考刘光<sup>[12]</sup>的方法, 使用 BCA 蛋白质浓度检测试剂盒测定各提取组分的蛋白浓度。将 10  $\mu$ L 稀释 10 倍后的样品与 100  $\mu$ L BCA 工作液混合均匀后加样至 96 孔板中, 37  $^{\circ}$ C 孵育 30 min 后测定样品在 562 nm 处的吸光值。以牛血清白蛋白作为标准蛋白质, 绘制蛋白质浓度测定标准曲线 (2):

$$y_2 = (1.0709x_2 + 0.0034) \times N_2 \quad (2)$$

式中:

$y_2$ —SDS-不可溶面筋蛋白含量,  $\mu\text{mol/g}$ ;

$x_2$ —实验组吸光值减去对照组吸光值的差值;

$N_2$ —稀释倍数。

### 1.3.10 面团微观结构的测定

将 1.3.7 制备所得冻干面团样品切割至合适大小后固定在含有导电胶的载物台上,用离子溅射仪在真空环境下镀上一层钼和金的混合物粉末,然后将样品转移至电子扫描显微镜下观察并拍照,电镜放大倍数为 500 倍,电压和真空度分别为 10.0 kV 和  $9 \times 10^{-5}$  MPa。

### 1.3.11 数据统计与分析

数据处理方面,采用 SPSS 19.0 软件进行平均值、标准差和方差分析等处理,并使用 Origin 2021 软件绘制图表,实验结果的表示方式为平均值 $\pm$ 标准差。每个实验重复操作三次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同粒径米糠对面粉粉质特性影响

不同粒径米糠对面粉粉质特性影响结果如表 2 所示,由表 2 可见,随着米糠粒径的减小,面粉吸水率逐渐增大,面团稳定时间逐渐降低,形成时间与弱化度虽有变化但组间并无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。吸水

率增加主要是因为米糠粒径减小,比表面积增大,促进了面团的吸水,这与熊礼橙等<sup>[20]</sup>的研究结果相一致。此外,米糠中的淀粉颗粒会在高强度碾磨下受到破坏,破损淀粉的含量有所增加,从而导致小麦面粉吸水率增加<sup>[21,22]</sup>。稳定时间和弱化度是反映面团形成过程中面筋网络强度大小的两个重要指标,其中稳定时间越长,弱化度越低,则面筋网络强度越大<sup>[23]</sup>。面团的稳定时间降低,表明随着米糠粒径的减小,面团的强度逐渐降低<sup>[24]</sup>。Zhang 等<sup>[25]</sup>的研究结果表明,含有细麸皮的面团稳定性低于含有粗麸皮的面团,细麸皮对面团中的面筋网络形成了更多的干扰。另外,面团的形成时间虽然随着米糠粒径减小而降低,但其组间并无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。因此,现在研究结果表明,随着米糠粒径的减小,其对面粉粉质特性的负面影响逐渐增大,面团强度逐渐降低。而对于饼干而言,在一定条件下,面团强度降低对于饼干品质有积极影响<sup>[26,27]</sup>。

### 2.2 不同粒径米糠对面团流变特性影响

面团的流变性能可在一定程度上决定产品的终端品质,其包含弹性模量 ( $G'$ ) 和粘性模量 ( $G''$ ),其中  $G'$  反映由麦谷蛋白赋予面团的弹性强度,其值越大代表弹性越强;而  $G''$  则反映麦醇溶蛋白赋予面团的粘性强度,其值越大,代表粘性越强<sup>[28,29]</sup>。

表 2 不同粒径米糠对面粉粉质特性的影响

米糠粒径/目	吸水率(m/m)%	形成时间/min	稳定时间/min	弱化度/FU
50	57.65 $\pm$ 0.21 <sup>c</sup>	1.20 $\pm$ 0.28 <sup>a</sup>	4.25 $\pm$ 0.64 <sup>a</sup>	157.40 $\pm$ 10.61 <sup>a</sup>
100	57.85 $\pm$ 0.07 <sup>bc</sup>	1.00 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	3.55 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>	164.90 $\pm$ 7.07 <sup>a</sup>
150	58.20 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	0.95 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>	1.05 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	169.90 $\pm$ 7.07 <sup>a</sup>
200	58.80 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	0.85 $\pm$ 0.85 <sup>a</sup>	1.00 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	182.40 $\pm$ 17.68 <sup>a</sup>

注:结果为平均值 $\pm$ 标准偏差 ( $n=3$ ),不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ),下同。

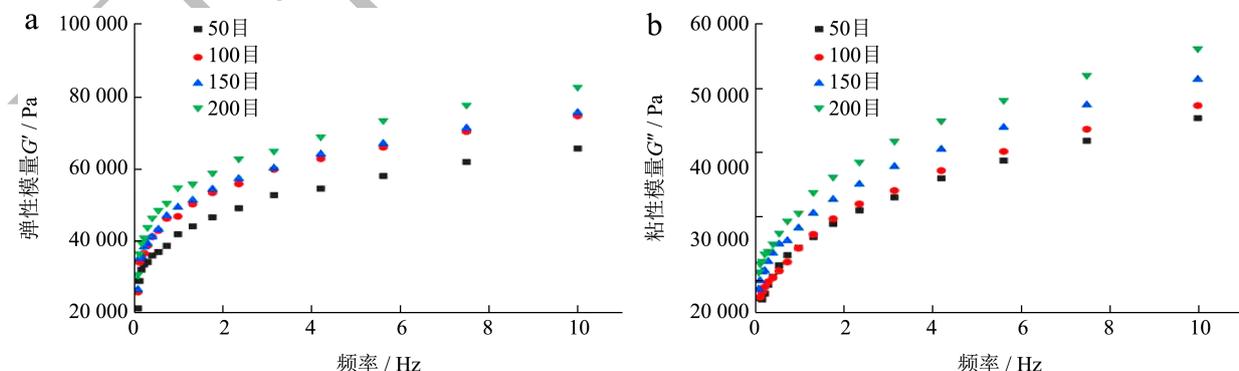


图 1 不同粒径米糠对面团弹性模量 (a) 和粘性模量 (b) 影响

Fig.1 Effect of rice bran particle size on elastic modulus (a) and viscous modulus (b) of dough

图 1 为不同粒径米糠对面团流变特性影响结果,由图可知,各组面团  $G'$  值均高于  $G''$  值,说明面团流

变学特性中弹性模量占主导作用,更多表现出弹性行为<sup>[30]</sup>。随着米糠粒径的降低,面团的  $G'$  和  $G''$  明显增

大 ( $P < 0.05$ ), 说明面团的粘弹性增强, 其中, 200 目米糠组面团  $G'$  和  $G''$  值最大。面粉的粉质特性与面团流变特性一般呈正相关关系, 但本研究发现了相反的规律, 其原因可能是小粒径米糠与面粉混合更充分, 能更好地嵌入到面筋网络中, 增强了面团在小应力流变作用下的抗形变能力, 而无法抵抗大应力作用下(粉质仪搅拌)的形变, 从而导致面团的粘弹模量增加但稳定时间降低的结果<sup>[31]</sup>。Sozer 等<sup>[32]</sup>的研究发现了相似的结果, 即降低小麦麸皮粒径后可提高饼干面团的弹性模量。

### 2.3 不同粒径米糠对饼干质构特性

质构特性是食品重要的品质因素, 物性质构仪能够较好的反映出饼干品质<sup>[34]</sup>。表 3 为不同粒径米糠饼干的质构特性结果, 由表可得, 饼干硬度和咀嚼性随

米糠粒径减小而逐渐降低, 而脆度则逐渐增加 ( $P < 0.05$ )。米糠粒径大小对饼干的弹性和内聚性两个指标无明显影响 ( $P > 0.05$ )。当米糠粒径 200 目时, 其对应的米糠饼干具有最小的硬度和咀嚼性, 以及最高的脆度值。硬度作为饼干最直接的感官特征, 反映饼干品质, 与饼干的品质一般呈负相关关系, 同时硬度也会影响饼干的咀嚼性, 在一定范围内, 硬度和咀嚼性数值越小, 表示饼干品质越高<sup>[35]</sup>。因此, 饼干质构特性结果表明, 添加粒径 200 目的米糠制备得到的饼干品质最佳。

饼干的硬度与面筋网络强度呈正相关关系, 即面筋网络强度越低, 则饼干硬度越低<sup>[36]</sup>。根据粉质特性结果, 当米糠粒径降低后, 面团的稳定时间减小, 也即反映出面筋网络强度降低。面筋网络强度的降低减小了米糠饼干的硬度, 改善了其质构特性<sup>[37]</sup>。

表 3 不同粒径米糠对饼干质构的影响

Table 3 Effect of different particle sizes of rice bran on the texture of biscuits

米糠粒径/目	硬度/g	脆度/g	弹性/g	内聚性/g
50	49 700.99±396.29 <sup>a</sup>	5 550.98±548.71 <sup>b</sup>	0.56±0.04 <sup>a</sup>	0.65±0.05 <sup>a</sup>
100	45 446.38±721.18 <sup>b</sup>	7 806.54±680.19 <sup>ab</sup>	0.51±0.02 <sup>a</sup>	0.61±0.03 <sup>a</sup>
150	42 135.20±1 008.62 <sup>c</sup>	6 288.79±289.75 <sup>b</sup>	0.52±0.03 <sup>a</sup>	0.63±0.01 <sup>a</sup>
200	40 544.63±897.51 <sup>c</sup>	13 279.3±1 741.30 <sup>a</sup>	0.50±0.01 <sup>a</sup>	0.60±0.00 <sup>a</sup>

表 4 不同粒径米糠饼干感官评价结果

Table 4 Sensory evaluation results of rice bran biscuits with different particle sizes

米糠粒径/目	形态 (1.9)				色泽 (1.7)				风味 (2.7)				口感 (2.7)				组织 (1.0)			
	V1	V2	V3	V4																
50	5	2	3	0	4	3	3	0	4	2	4	0	4	2	4	0	4	4	2	0
100	6	2	2	0	4	6	0	0	2	5	3	0	4	5	1	0	5	4	1	0
150	3	7	0	0	5	3	2	0	4	5	1	0	5	5	0	0	2	6	2	0
200	6	2	2	0	4	5	1	0	5	4	1	0	6	4	0	0	4	3	3	0

### 2.4 不同粒径米糠饼干感官评价

采用模糊数学矩阵模型, 使用公式计算饼干综合感官评分, 可有效避免取大取小算法带来的误差<sup>[38]</sup>。不同粒径米糠饼干感官评价结果如表 4 所示, 已知米糠饼干的 5 个权重集为  $X = (1.9, 1.7, 2.7, 2.7, 1.0)$ , 按照模糊原理  $Y = X \times R$ , 得到不同粒径米糠饼干的评价结果。

根据  $Y = X \times R$ ,  $X = (1.9, 1.7, 2.7, 2.7, 1.0)$ , 以 50 目米糠饼干为例,  $R_{形态} = (0.5, 0.2, 0.3, 0)$ ,  $R_{色泽} = (0.4, 0.3, 0.3, 0)$ ,  $R_{风味} = (0.4, 0.2, 0.4, 0)$ ,  $R_{口感} = (0.4, 0.2, 0.4, 0)$ ,  $R_{组织} = (0.4, 0.4, 0.2, 0)$ ,  $Y_{50目} = (4.19, 2.37, 3.44, 0)$ , 根据模糊综合评价总分  $T = Y \times K$ , 评价级  $K = (9, 7, 4, 1)$ , 因此得出 50 目米糠饼干的模糊感官综合评分为 68.06, 其他样品的总分依此类推。

以 50 目米糠饼干为例, 将 5 项指标的评分结果代

入模糊数学矩阵模型, 则 5 组评价矩阵为:

$$R_{50目} = \begin{vmatrix} 0.5 & 0.2 & 0.3 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{vmatrix} \dots R_{200目} = \begin{vmatrix} 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0.0 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \end{vmatrix}$$

按照模糊原理  $Y = X \times R$ ,  $X = (1.9, 1.7, 2.7, 2.7, 1.0)$ ,

$$Y_{50目} = X \times R_{50目}$$

$$= (1.9, 1.7, 2.7, 2.7, 1.0) \times \begin{vmatrix} 0.5 & 0.2 & 0.3 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= (4.19, 2.37, 3.44, 0)$$

$$Y_{50目} = (4.19, 2.37, 3.44, 0), \text{同理}, Y_{100目} = (3.94, 4.50,$$

1.56, 0),  $Y_{150目}=(4.05, 5.14, 0.81, 0)$ ,  $Y_{200目}=(5.19, 3.69, 1.12, 0)$ 。

模糊综合评价得分  $T=Y \times K$ , 评价集  $K=(9, 7, 4, 1)$ , 以 50 目米糠饼干为例, 因此, 得出 50 目米糠饼干的模糊综合评分为:

$$T_{50目} = Y_{50目} \times K = (4.19, 2.37, 3.44, 0) \times \begin{pmatrix} 9 \\ 7 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} = 68.06$$

$T_{50目}=68.06$ , 同理,  $T_{100目}=73.02$ ,  $T_{150目}=75.67$ ,  $T_{200目}=77.02$ 。

综上, 200 目粒径的米糠饼干感官模糊综合评分最高, 该结果与质构分析结果相一致。

## 2.5 不同粒径米糠对饼干品质影响机制探究

饼干的加工品质与面筋蛋白结构相关, 为进一步探究不同粒径米糠对饼干品质影响机制, 对面筋蛋白巯基含量、SDS-不可溶面筋蛋白含量以及面团微观形貌等进行了探究。

### 2.5.1 面筋蛋白巯基含量

二硫键交联是支撑面筋网络结构的主要共价键, 通过测定面筋蛋白中自由巯基含量变化可表征二硫键变化<sup>[39]</sup>。采用 DTNB 法测定面筋蛋白中游离巯基的含量, 结果如图 2 所示, 面筋蛋白中游离巯基的含量随米糠粒径的减小而显著升高 ( $P<0.05$ ), 粒径为 200 目组的游离巯基含量最大, 从  $81.83 \mu\text{mol/g}$  (50 目组) 显著增加到  $109.93 \mu\text{mol/g}$ , 涨幅达 34.34%, 游离巯基含量的升高从侧面反映了二硫键含量的减少, 即随米糠粒径的减小, 面筋蛋白的二硫键数量显著降低, 二硫键的破坏会导致面筋网络强度被弱化, 这与面粉粉质特性结果相符。

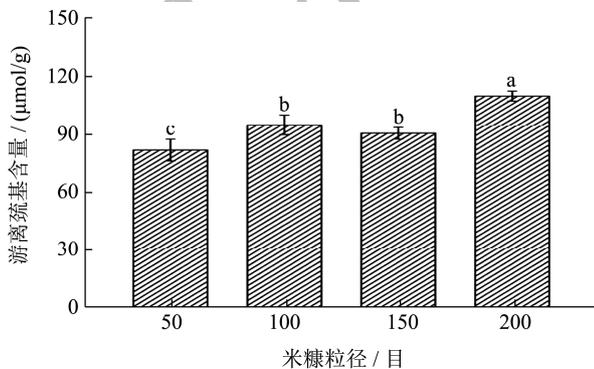


图 2 不同粒径米糠对面筋蛋白游离巯基含量的影响

Fig.2 Effect of different particle sizes of rice bran on the free sulfhydryl content of gluten protein

添加米糠提高面筋蛋白巯基含量的原因可能与米糠中存在能够破坏面筋蛋白二硫键的多酚有关。Wang

等<sup>[18]</sup>研究发现, 经过米糠改性的面筋蛋白中巯基含量和多酚含量都显著增加, 这些米糠多酚可通过氧化还原反应导致面筋蛋白二硫键的还原, 同时, 米糠粒径的减小增加了酚类化合物的释放, 且小粒径米糠可以更均匀、充分地嵌入在面筋网络中, 在较大范围内干扰面筋蛋白的相互交联<sup>[20]</sup>。Wang 等<sup>[40]</sup>的研究也证明, 添加单宁类多酚可提高面筋蛋白游离巯基含量。本研究结果显示, 面筋蛋白游离巯基含量随米糠粒径减小而显著增加, 可能是由于米糠粒径减小后, 促进了米糠中的多酚与面筋蛋白发生相互作用, 从而提高了其破坏面筋蛋白二硫键作用<sup>[36]</sup>。

### 2.5.2 SDS-不可溶面筋蛋白含量

SDS-不可溶面筋蛋白又称之为谷蛋白大分子聚合物 (Glutenin Macropolymer, GMP), 其对面团的流变学特性以及终端面制品质量起决定性作用, 面筋蛋白二硫键的断裂会对 GMP 含量产生影响<sup>[30]</sup>。因此, 研究进一步测定了 GMP 含量, 结果如图 3 所示。

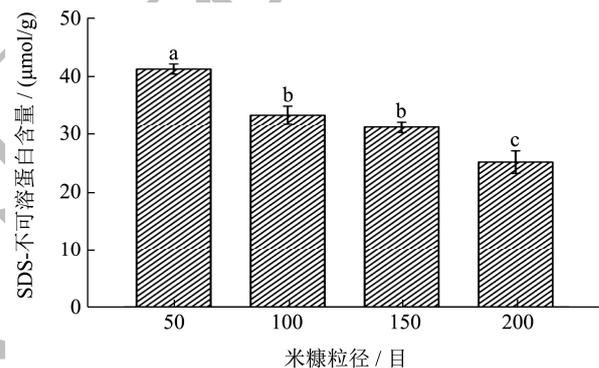


图 3 不同粒径米糠对 SDS-不可溶面筋蛋白含量的影响

Fig.3 Effect of different particle sizes of rice bran on the content of SDS-insoluble gluten protein

由图 3 可见, 随着米糠粒径的降低, GMP 含量呈显著下降趋势 ( $P<0.05$ ), 含量从  $41.17 \mu\text{mol/g}$  (50 目) 降低到  $25 \mu\text{mol/g}$  (200 目), 降幅接近 40%。GMP 是由麦谷蛋白亚基通过二硫键相互交联形成的蛋白聚集体, GMP 含量的降低意味着其内部发生了解聚, 结合面筋蛋白巯基含量的增加可以推断出, 这种解聚主要归因于二硫键交联的破坏, 从而影响了 GMP 含量。此外, 有研究表明, 疏水相互作用和膳食纤维与蛋白质之间的物理屏障作用也会影响面筋网络, 从而影响 GMP 含量降低<sup>[37]</sup>。GMP 的解聚直接弱化了面筋网络强度, 由于面筋网络强度与饼干加工品质呈负相关关系, 因此, 面筋强度的弱化反而促进了饼干品质的改良<sup>[37]</sup>。

### 2.5.3 面团微观结构

为了进一步评估面筋网络结构变化, 使用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 对面团的微观形貌进行了分析, 结构如图 4 所示。由图可

见, 各组面团都呈现了淀粉颗粒镶嵌在由醇溶蛋白和麦谷蛋白通过分子间二硫键相互作用形成的三维面筋网络结构内外的典型结构, 但随着米糠粒径的减小, 面团表面的淀粉颗粒逐渐增多, 其中 200 目面团表面有大量的淀粉颗粒暴露, 表明该处理组面筋网络结构受米糠添加后的影响较大, 面筋网络被破坏后导致淀粉颗粒未被有效包裹, 而暴露在外。因此, SEM 结果也同样证明了, 随着米糠粒径的降低, 面团表面的面筋网络结构逐渐被破坏, 这与前文所述面筋蛋白疏基含量增加和 GMP 解聚导致的含量降低相符。

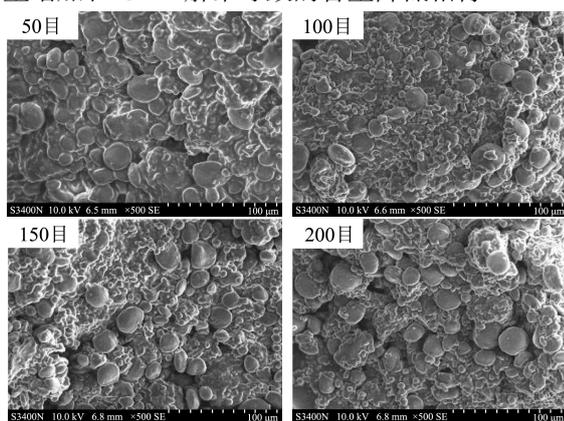


图 4 不同粒径米糠对面团微观结构的影响

Fig.4 Effect of different particle sizes of rice bran on SEM micrographs of dough

综上所述, 米糠对面粉加工品质的影响主要归因于其能够破坏面筋蛋白二硫键, 引起面筋蛋白大聚集体解聚, 导致面筋网络结构被破坏, 进而影响了面粉的加工品质, 且随着米糠粒径的减小, 这种对面粉和面筋蛋白的负面影响加剧, 这与米糠粒径减小后, 促进了米糠内源多酚与面筋蛋白中二硫键的相互作用<sup>[36]</sup>。而由于饼干的品质与面筋网络强度在一定范围内呈负相关关系<sup>[37]</sup>, 因此, 随着米糠粒径的减小, 饼干的品质呈现改良的趋势。

### 3 结论

本研究评价了不同粒径米糠对面粉、面团以及饼干加工品质影响, 并从面筋蛋白二硫键变化、GMP 含量和面团微观结构等角度初步探明了米糠粒径影响面粉加工品质机制。结果表明, 随着米糠粒径的减小, 其对面粉粉质特性负面影响降低, 面团的粘弹特性增大, 米糠饼干品质得到改善, 200 目粒径米糠制备得到的米糠饼干其具有最小的硬度和咀嚼性值, 感官模糊综合评分最高, 达 77.02 分。不同粒径米糠对面粉加工品质影响主要归因于其添加能够打断面筋蛋白二硫键交联, 降低 GMP 含量, 破坏面筋网络结构, 且随着米糠粒径的减小, 其对面筋网络的负面影响增加。

由于饼干品质与面筋网络强度呈负相关关系, 因此, 200 目粒径米糠制备得到的饼干质构和感官品质最佳。研究结果为米糠在饼干等焙烤食品中的应用提供了理论基础。

### 参考文献

- [1] 余诚玮.米糠营养成分与酸败成因的分析与控制[D].南昌:南昌大学,2022.
- [2] Gul K, Yousuf B, Singh A, et al. Rice bran: nutritional values and its emerging potential for development of functional food - A review [J]. *Bioactive Carbohydrates & Dietary Fibre*, 2015, 6(1): 24-30.
- [3] 潘碧晖,魏振承,邓媛元,等.高温高压蒸汽处理对米糠理化和营养特性的影响[J].*现代食品科技*,2022,38(9):143-152.
- [4] Ayoub W, Zahoor I, Dar A, et al. Effect of incorporation of wheat bran, rice bran and banana peel powder on the mesostructured and physicochemical characteristics of biscuits [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1016717.
- [5] 刘雪澜,李凡姝,曹慧英,等.挤压稳定化米糠在酥性饼干中的应用研究[J].*粮食与油脂*,2017,30(4):72-75.
- [6] 郑洋洋,任传顺,付敏,等.干热稳定化米糠对大米曲奇饼干品质特性的影响[J].*河南工业大学学报*,2020,41(2):8-12.
- [7] Jia M, Yu Q, Chen J, et al. Physical quality and *in vitro* starch digestibility of biscuits as affected by addition of soluble dietary fiber from defatted rice bran [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105341-105349.
- [8] Yadav D, Singh K, Rehal J. Studies on fortification of wheat flour with defatted rice bran for chapati making [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, 49(1): 96-102.
- [9] Majzoobi M, Sharifi S, Imani B, et al. The effect of particle size and level of rice bran on the batter and sponge cake properties [J]. *Journal of Agricultural Science & Technology*, 2013, 15(6): 1175-1184.
- [10] 谭属琼,马森泉,李耀,等.米糠在超微粉碎下的粉体特性及其添加对小麦面粉加工特性的影响[J].*食品与发酵工业*,2023, 49(10):139-145.
- [11] Erinc H, Mert B, Tekin A. Different sized wheat bran fibers as fat mimetic in biscuits: Its effects on dough rheology and biscuit quality [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(10): 1-11.
- [12] 刘光.重组小麦内源酶 wPDI 和 wEroI 影响面粉加工品质机理的研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [13] Liu G, Wang J J, Hou Y, et al. Recombinant wheat endoplasmic reticulum oxidoreductin 1 improved wheat dough properties and bread quality [J]. *Journal of Agricultural and*

- Food Chemistry, 2017, 65(10): 2162-2171.
- [14] 王杰, 低 GI 马铃薯渣粉饼干加工工艺研究[D]. 呼伦贝尔: 内蒙古农业大学, 2022.
- [15] 崔立柱, 付依依, 刘士伟, 等. 基于模糊数学感官评价法沙棘饼干烘焙工艺优化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(15): 163-169.
- [16] 裴璞花, 安传相, 谢丹, 等. 响应面法优化核桃乳发酵工艺[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 162-169.
- [17] 凌云坤, 蒋方国, 刘达玉, 等. 基于模糊综合评定法及响应面优化松茸蔓越莓酥性饼干制作工艺[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12): 149-156.
- [18] Wang Z, Hao J, Deng Y, et al. Viscoelastic properties, antioxidant activities and structure of wheat gluten modified by rice bran [J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 150: 112003.
- [19] Liu G, Wang Z, Du N, et al. Recombinant rice quiescin sulfhydryl oxidase strengthens the gluten structure through thiol/disulfide exchange and hydrogen peroxide oxidation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(29): 9106-9116.
- [20] 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.
- [21] Barak S, Mudgil D, Khatkar B. Effect of flour particle size and damaged starch on the quality of cookies [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51: 1342-1348.
- [22] Liu N, Ma S, Li L, et al. Study on the effect of wheat bran dietary fiber on the rheological properties of dough [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2019, 2(1): 1-5.
- [23] Pla M, Rojas A, Gerschenson L. Effect of butternut (*Cucurbita moschata* Duchesne ex Poir) fibres on bread making, quality and staling [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 828-838.
- [24] 汤晓智, 扈战强, 周剑敏, 等. 糙米粉对小麦面团流变学及饼干品质特性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1567-1576.
- [25] Zhang D, Moore W. Effect of wheat bran particle size on dough rheological properties [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 74(4): 490-496.
- [26] 朱璠. 麸皮处理及和面工艺对全麦面团及面包的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [27] 赵悦琪. 低 GI 韧性饼干的生产工艺研究及其品质分析[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [28] 黎芳, 刘佳, 王冉冉, 等. 葡萄糖氧化酶对全麦面团及全麦馒头品质改良的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 78-82.
- [29] 徐小云. 麦麸超微粉碎对面团流变学特性及馒头品质影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
- [30] 杜念, 邓媛元, 魏振承, 等. 重组小麦静息巯基氧化酶的表达、酶学特性及其对面包品质的影响[J]. 生物工程学报, 2021, 37(2): 593-603.
- [31] Zhang A, Wang Y, Guan X, et al. Effects of adding quinoa flour on the composite wheat dough: a comprehensive analysis of the pasting, farinograph and rheological properties [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(11): 7099-7106.
- [32] Sozer N, Cicerelli L, Heiniö R, et al. Effect of wheat bran addition on *in vitro* starch digestibility, physico-mechanical and sensory properties of biscuits [J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(1): 105-113.
- [33] Martins R, Nunes M, Ferreira L, et al. Impact of acorn flour on gluten-free dough rheology properties [J]. Foods, 2020, 9(5): 560.
- [34] 宋佳宁. 不同粒径小米粉添加对馒头加工品质影响的研究[D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2021.
- [35] 王箬, 李梦琴, 林顺顺, 等. 鹰嘴豆全麦粉酥性饼干研制及品质分析表征[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3352-3358.
- [36] Kumari S, Gogoi S, Shamim M, et al. Physicochemical characterization, antioxidant activity and total phenolic content of value-added products from indigenous banana varieties of Assam, India [J]. Measurement: Food, 2022, 7: 100040.
- [37] Ma S, Wang Z, Liu N, et al. Effect of wheat bran dietary fibre on the rheological properties of dough during fermentation and Chinese steamed bread quality [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(4): 1623-1630.
- [38] 潘印卿. 电子舌技术在食品品质检测与评价中的应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015.
- [39] Zhan J, Ma S, Wang X, et al. Effect of baked wheat germ on gluten protein network in steamed bread dough [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(10): 2839-2846.
- [40] Wang L, Li C, Huang Q, et al. Biofunctionalization of selenium nanoparticles with a polysaccharide from *Rosa roxburghii* fruit and their protective effect against H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-induced apoptosis in INS-1 cells [J]. Food & Function, 2019, 10(2): 539-553.