

江梦影, 赵一鸣, 荆旻歌, 等. 黑米酒糟添加量对馒头品质及生理活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 116–123. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080213

JIANG Mengying, ZHAO Yiming, JING Mingge, et al. Effect of Black Rice Spent Grain Addition on Quality and Physiological Activity of Steamed Bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 116–123. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080213

· 研究与探讨 ·

# 黑米酒糟添加量对馒头品质及生理活性的影响

江梦影<sup>1</sup>, 赵一鸣<sup>1,\*</sup>, 荆旻歌<sup>1</sup>, 程雨<sup>1</sup>, 赵若男<sup>1</sup>, 杭华<sup>1,\*</sup>, 孙浩浩<sup>2</sup>  
(1.安徽师范大学生命科学学院, 安徽芜湖 241000;  
2.芜湖职业技术学院食品与生物工程学院, 安徽芜湖 241003)

**摘要:** 以小麦馒头为对照, 本文拟探究添加不同比例黑米酒糟馒头的品质 (色差、结构、质构、感官评价等) 及生理活性 (抗氧化性能、体外消化特性及血糖生成指标)。结果表明, 黑米酒糟对馒头比容、色差、结构及质构等影响显著 ( $P < 0.05$ ); 在添加量为 5% 时, 黑米酒糟馒头形态、气味、口感较好, 比小麦馒头更受欢迎。随着黑米酒糟添加量增加, 黑米酒糟馒头的多酚含量 (0.066~0.088 mg/g)、黄酮含量 (0.266~0.379 mg/g)、DPPH 自由基清除率 (25.1%~70.4%) 和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率 (37.4%~71.6%) 显著提高 ( $P < 0.05$ ); 同时, 黑米酒糟能提高馒头中的抗性淀粉含量, 当添加量为 15% 时, 抗性淀粉含量提高了 1.49 倍, 其适用于制备抗性淀粉制品。此外, 黑米酒糟能够降低血糖生成指标, 适用于制备辅助降血糖制品。

**关键词:** 黑米酒糟, 馒头, 抗氧化, 抗性淀粉, 血糖指标

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)13-0116-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080213

本文网刊:



## Effect of Black Rice Spent Grain Addition on Quality and Physiological Activity of Steamed Bread

JIANG Mengying<sup>1</sup>, ZHAO Yiming<sup>1,\*</sup>, JING Mingge<sup>1</sup>, CHENG Yu<sup>1</sup>, ZHAO Ruonan<sup>1</sup>,  
HANG Hua<sup>1,\*</sup>, SUN Haohao<sup>2</sup>

(1.College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;

2.College of Food and Biological Engineering, Wuhu Vocational and Technical College, Wuhu 241003, China)

**Abstract:** Compared with the wheat steamed bread, this article was to explore the quality (color difference, structure, texture, sensory evaluation, etc.) and physiological activity (antioxidant properties, *in vitro* digestive characteristics and glucose production index) of the steamed breads with different ratios of black rice spent grains (BRSB). The results showed that BRSB had significant effects on the specific volume, color difference, structure and texture of steamed bread ( $P < 0.05$ ). When the BRSB addition amount was 5%, the BRSB steamed bread had better morphology and odor and taste and more popular than those of wheat steamed bread. The polyphenol content (0.066~0.088 mg/g), flavonoid content (0.266~0.379 mg/g), DPPH radical scavenging rate (25.1%~70.4%) and ABTS<sup>+</sup> radical scavenging rate (37.4%~71.6%) of BRSB steamed bread increased significantly ( $P < 0.05$ ) with the increase of BRSB addition. Meanwhile, BRSB could improve the content of resistant starch in steamed bread, when the addition amount was 15%, the content of resistant starch increased by 1.49 times, which could be suitable for the preparation of resistant starch products. In addition, it could lower the glycemic index and apply to the preparation of auxiliary hypoglycemic products.

收稿日期: 2023-08-21 +并列第一作者

基金项目: 安徽省自然科学基金 (1908085MC99)。

作者简介: 江梦影 (1999-), 女, 大学本科, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 2330241847@qq.com。

赵一鸣 (2002-), 男, 大学本科, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 3112889733@qq.com。

\* 通信作者: 杭华 (1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品酶技术与食品加工, E-mail: 2006hanghua@163.com。

**Key words:** black rice spent grain; steamed bread; antioxidant; resistant starch; glycemic index

馒头作为我国国民的日常重要食品之一,通过小麦粉、水和适量酵母混合蒸制而成,其内含人体所需的糖类、蛋白质、维生素等。随着社会的发展和人类对健康食品的强烈需求,普通馒头的饱腹作用已无法满足国民的需求。在馒头创新性方面,为改善馒头的口味和理化性质,国内外有研究者将功能性物质添加至馒头配方中,如金花茶<sup>[1]</sup>、山药多糖<sup>[2]</sup>、茶多酚<sup>[3]</sup>、秋葵藜麦<sup>[4]</sup>、甘薯<sup>[5]</sup>和班巴拉花生<sup>[6]</sup>等。

黑米自古以来是一种很珍贵的水稻品种,中国的黑米资源最为丰富,有着“药米”“长寿米”的美称<sup>[7]</sup>。黑米酒是以黑米为原料酿制而成的,而酒糟具有酸性高、不易贮存、极易霉变的特点,如果不能及时处理及利用,会造成环境污染<sup>[8]</sup>。黑米酒糟(black rice spent grain, BRSG)作为黑米酒生产过程的副产物,富含各种有价值的营养成分,如粗蛋白、粗脂肪、B族维生素、钾、钙等多种元素;其次,酒糟中的活性多肽在抗氧化、降血脂、降血压、调节免疫等方面颇具研究意义和开发价值。目前将酒糟用于蛋白饲料、生产有机肥、食用菌和食醋等的研究较多,但将其全部转化为酒糟再利用资源依旧存在困难<sup>[9]</sup>。

研究表明,在馒头中添加酒糟,可以改善其品质<sup>[10]</sup>。本文将 BRSG 按照不同比例(0%、5%、10%、15%)添加量与小麦粉混合制备黑米酒糟馒头,探究黑米酒糟对馒头的品质(色泽、感官评价、质构等)和生理活性(抗氧化活性、体外消化特性等)的影响,为酒糟副产物在面制品中的应用提供一定参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

黑米酒糟 黄山七约米酒公司提供(经蒸熟、拌曲、发酵和过滤等工艺),经干燥粉碎,过 80 目筛;面粉 金龙鱼多用途麦芯小麦粉;酵母 安琪酵母股份有限公司;白面包 成都市桃李食品有限公司;福林酚、DPPH、ABTS、3,5-二硝基水杨酸、 $K_2S_2O_8$ 、 $Na_2CO_3$ 、甲醇 安徽柠风生物科技有限公司;没食子酸、芦丁、 $\alpha$ -淀粉酶(20000 U/g)、葡萄糖 南京迈克沃德生物科技有限公司;淀粉葡萄糖苷酶(amylglucosidase, AMG, 100000 U/g)、胃蛋白酶(12000 U/g)、冰乙酸、 $AINO_3$  太湖思米奥销售服务中心,均为分析纯试剂。

752 紫外可见分光光度计 上海佑科仪器仪表有限公司;TA.TOUCH 质构仪 上海保圣实业发展有限公司;SH-Lab-10 真空冷冻干燥机 北京松源华兴科技发展有限公司;SHZ-82 水浴恒温振荡器 江苏金坛市金城国盛实验仪器厂;XM-P06H 无级调功超声波清洗机 小美超声仪器(昆山)有限公司;ALLEGRA X-15R 离心机 贝克曼库尔特商贸(中国)有限公司;FTIR-650 傅里叶变换红外光谱仪(高配) 天津港东科技股份有限公司;HP-C220 精密色

差仪 上海仪电物理光学仪器有限公司;JSM-6390LV 扫描电子显微镜 日本电子株式会社;DW-HL398 超低温冷冻储存箱 中科美菱低温科技股份有限公司;CE846A 激光传真、打印、复印、扫描一体机 中国惠普有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 馒头制作 将黑米酒糟按照混合粉总质量比例(0%、5%、10%、15%)与小麦粉混合,按照如下配方(g):混合粉 300、安琪酵母 3、水 150,制成面团。发酵(35 °C, 2 h),将面团揉至光滑并醒面 30 min,冷水上锅蒸 15 min 后取出,冷却备用,以不添加黑米酒糟的馒头为对照组。取馒头内芯,切片,置于-80 °C 超低温冰箱预冷 24 h,再真空冷冻干燥,经粉碎制得馒头粉。

1.2.2 感官评价 选 24 名经过专业训练的人员组建感官评价小组,其中男女各 12 人,年龄区间为 20~45 岁,在饭前 2 h 内,按照表 1 的标准,分别从形态、色泽、气味、组织、口感五个方面对黑米酒糟馒头进行评价<sup>[11]</sup>。

表 1 黑米酒糟馒头感官评分  
Table 1 Sensory scoring of BRSG steamed bread

指标	评判标准
形态 (15分)	15.0~11.1分:馒头挺立度好,形态完整,表皮光滑有亮泽,无皱缩塌陷
	11.0~7.6分:挺立度一般,表皮有少量孔隙、气泡
	7.5~4.1分:较完整,表面有轻微扁平现象
	4.0~0分:形态差,扁平,不对称,表面有硬块
色泽 (15分)	15.0~11.1分:均匀一致,光泽度好
	11.0~7.6分:均匀一致,光泽度较好
	7.5~4.1分:色泽较均匀,光泽度较好
	4.0~0分:颜色不均匀,光泽度差
气味 (20分)	20.0~16.1分:能闻到浓郁的酒糟发酵香味,无异味
	16.0~12.1分:能闻到较浓的酒糟发酵香味,无异味
	12.0~8.1分:能闻到较淡的酒糟发酵香味,有异味
	8.0~0分:没有明显的酒糟发酵香味,有异味
组织 (20分)	20.0~16.1分:表皮光滑,气孔均匀,切片后不断裂、无掉渣
	16.0~12.1分:表皮较光滑,气孔较均匀,切片后不断裂,掉渣不明显
	12.0~8.1分:表皮有小气泡,局部过硬,皮心分离,切片后断裂和掉渣
	8.0~0分:表皮起泡大,多处僵硬,无弹性,纹理不均匀,皮心分离,切片后有断裂掉渣现象
口感 (30分)	30.0~22.6分:手指按压复原性好,有较好的咬劲,咀嚼爽口不黏牙
	22.5~15.1分:手指按压复原性较慢,咬劲一般,咀嚼略有黏牙
	15.0~7.6分:手指按压不复原,咀嚼不爽口、馒头在口中散开
	7.5~0分:手指按压感觉较硬,复原性、咬劲均差

### 1.2.3 基本指标测定

1.2.3.1 比容测定 利用菜籽测定馒头的体积,并称量馒头的质量,体积与质量之比即为馒头的比容( $cm^3/g$ )。

1.2.3.2 色差测定 使用精密色差仪测定馒头粉色差, 色差仪先用标准白板进行校正, 测定  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ,  $L^*$ 表示明暗,  $a^*$ 表示红绿,  $b^*$ 表示黄蓝。

1.2.3.3 宏观结构分析 先切除两端的馒头边料, 再竖切中间 12.5 mm 厚的馒头片, 使用激光传真、打印、复印、扫描一体机进行扫描处理, 在 Image J 软件中处理图片, 根据 10 mm 标准直线设置图片标尺为 10, 单位 mm, 通过测量 Area、Perimeter、Length 3 个参数, 对馒头孔的面积、孔的周长和孔的直径 3 个指标进行分析。

1.2.3.4 微观结构测定 将馒头粉置于扫描电镜的样品台上, 用洗耳球吹去余粉, 后进行喷金处理, 再置于扫描电镜下, 在 100、500、1000、2000 倍的放大倍数下观察。

1.2.3.5 质构测定 将蒸制放凉的馒头按照标准切片法<sup>[12]</sup>, 取中间 25 mm 厚的片, 放置测试探头下, 设置测试下压位移为 10 mm; 测试探头为 TA/36 柱形探头; 测试前速率 3.0 mm/s; 测试中速度 1.0 mm/s; 测试后速度 1.0 mm/s; 时间间隔为 5.0 s。

## 1.2.4 抗氧化性能测定

1.2.4.1 甲醇提取液的制备 称取 10.0 g 馒头粉加入到 100 mL 80% 甲醇溶液中, 水浴振荡(37 °C, 2 h), 再进行超声提取(37 °C, 15 min), 离心(2500 r/min, 10 min), 上清液即为样品提取液。

1.2.4.2 多酚含量测定 采用 Folin-Ciocalteu 法测定<sup>[13]</sup>。准确称取样品提取液 0.5 mL, 在试管中依次加入 5.9 mL 80% 甲醇溶液、1 mL 福林酚试剂、3 mL 质量浓度为 20% 的碳酸钠溶液, 充分混匀, 避光静置 1 h, 于 760 nm 下测定吸光度。以吸光度为横坐标、没食子酸含量(mg/mL)为纵坐标绘制标准曲线, 得到回归方程为  $y=121.63x+0.0574$  ( $R^2=0.9948$ )。结果用没食子酸当量(mg 没食子酸/100 g 干物质)表示。

1.2.4.3 黄酮含量测定 采用  $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3$  方法测定<sup>[14]</sup>。准确量取样品提取液 2 mL, 在试管中加入 0.4 mL 质量浓度为 5% 的亚硝酸钠, 混匀静置 6 min 后, 加入 0.4 mL 质量浓度为 10% 的硝酸铝, 摇匀, 静置 6 min, 再加入 4 mL 质量浓度为 40% 的氢氧化钠, 加水定容, 摇匀, 放置 15 min, 于 510 nm 处测定吸光度值。以吸光度为横坐标、芦丁含量(mg/mL)为纵坐标绘制标准曲线, 得到回归方程为  $y=13.5x-0.002$  ( $R^2=0.9944$ )。结果用芦丁当量(mg 芦丁/100 g 干物质)表示。

1.2.4.4 DPPH 自由基清除能力测定 参考 Xiao 等<sup>[15]</sup>的方法并做略微修改。准确配制 0.125 mmol/L DPPH 自由基甲醇溶液, 取 2 mL 样品提取液与 2 mL DPPH 自由基甲醇溶液迅速混合, 避光放置 30 min, 以甲醇代替 DPPH 自由基甲醇溶液作对照组, 以 2 mL 蒸馏水作空白组, 在 517 nm 波长处测定吸光值。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中:  $A_0$  为蒸馏水与 DPPH 试剂的吸光度;  $A_1$  为样品提取液与 DPPH 试剂的吸光度;  $A_2$  为样品提取液与甲醇的吸光度。

1.2.4.5 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力测定 参考 Xiao 等<sup>[15]</sup>的方法并做略微修改。配制一定浓度的 ABTS 溶液和  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  溶液等体积混合, 在室温、避光条件下静置 12 h。测定时, 用蒸馏水稀释, 在 734 nm 波长处吸光度为  $0.7 \pm 0.02$ 。取 0.4 mL 样品提取液与 3 mL ABTS 试剂在暗处混合, 充分振荡摇匀后, 在室温条件下避光静置反应 6 min, 以甲醇代替提取液作对照组, 在 734 nm 波长处测定吸光值。

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中:  $A_0$  为甲醇与 ABTS 试剂的吸光度;  $A$  为样品提取液与 ABTS 试剂的吸光度。

## 1.2.5 体外消化性能测定

1.2.5.1 葡萄糖标准曲线的制备 采用 3,5-二硝基水杨酸法制备葡萄糖标准曲线。将不同葡萄糖含量的试剂与 1 mL 蒸馏水、3 mL DNS 试剂混合, 沸水浴 5 min, 立即用流动的冷水冷却, 每个试管加蒸馏水至 25 mL, 充分混匀, 用空白试剂调零, 在 540 nm 处测定吸光度, 以葡萄糖含量(mg/mL)为横坐标, 吸光度为纵坐标, 绘制葡萄糖标准曲线。得到回归方程为  $y=2.3476x-0.0033$  ( $R^2=0.9970$ )。

1.2.5.2 总淀粉含量测定 参考酶水解法<sup>[16]</sup>并做略微修改, 取 3 g 馒头粉样品, 置于 250 mL 锥形瓶中, 沸水浴 15 min, 冷却至 60 °C, 加入 20 mL 淀粉酶溶液, 水浴振荡(55 °C, 1 h), 离心过滤, 制得还原糖提取液, 还原糖含量测定采用 3,5-二硝基水杨酸法。

$$\text{总淀粉含量}(\%) = \text{葡萄糖当量} \times 0.9 \quad \text{式(3)}$$

1.2.5.3 抗性淀粉含量测定 参照 Du 等<sup>[17]</sup>的方法并加以调整, 将 1 g/L 胰酶液、1 g/L 淀粉葡萄糖苷酶按照 1:3 的比例混合, 离心(3000 r/min, 10 min), 可制得混合酶液。称取 0.5 g 馒头粉, 加入 10 mL pH5.2 的醋酸钠缓冲液, 均质, 加入 3 mL 混合酶液, 水浴振荡(37 °C), 在 20、120 min 处分别取 0.5 mL 水解液, 立即加入 10 mL 75% 的乙醇, 离心(3000 r/min, 10 min)。上清液淀粉含量测定方法与总淀粉含量测定方法相同。

$$\text{RDS}(\%) = \frac{(G_{20} - F_G) \times 0.9}{\text{TS}} \times 100 \quad \text{式(4)}$$

$$\text{SDS}(\%) = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{\text{TS}} \times 100 \quad \text{式(5)}$$

$$\text{RS}(\%) = 1 - \text{RDS} - \text{SDS} \quad \text{式(6)}$$

式中: RDS 为快速消化淀粉; SDS 为慢速消化淀

粉;RS 为抗性淀粉;TS 为总淀粉含量,mg;F<sub>G</sub> 为酶解前葡萄糖质量,可视为 0 mg;G<sub>20</sub> 为 20 min 处葡萄糖含量,mg;G<sub>120</sub> 为 120 min 处葡萄糖含量,mg。

1.2.5.4 预测血糖生成指标 参照 Goni 等<sup>[18]</sup>的方法并加以调整。称取 1 g 馒头粉,加入 20 mL pH5.2 的醋酸钠缓冲液,均质,加入 3 mL 混合酶液,水浴振荡(37 ℃)。分别在 0、30、60、90、120、180 min 处取 1 mL 水解液,立即加入 4 mL 无水乙醇、3 mL 蒸馏水,离心(3000 r/min, 10 min),上清液淀粉含量测定方法与总淀粉含量测定方法相同。预测血糖生成指数的计算:

$$\text{淀粉水解率}(\%) = \frac{\text{取样点提取液中葡萄糖当量} \times 0.9}{\text{总淀粉含量}} \times 100 \quad \text{式(7)}$$

以淀粉水解率(%)为纵坐标,时间(min)为横坐标绘制曲线。计算样品和参照品(白面包)在 0~180 min 内淀粉水解曲线围成的面积,得出样品淀粉水解指数(HI)、样品的预测血糖生成指数(EGI)。

$$\text{HI} = \frac{\text{样品淀粉水解曲线围成的面积}}{\text{参照品淀粉水解曲线围成的面积}} \quad \text{式(8)}$$

$$\text{EGI} = 0.549 \times \text{HI} + 39.71 \quad \text{式(9)}$$

### 1.3 数据处理

各组实验数据进行 3 次重复,实验数据采用平均值±标准偏差的形式来表示。使用 Origin 软件作图,使用 Image J 软件进行切面宏观结构分析,使用 SPSS 25.0 软件进行差异显著性分析, $P < 0.05$  表示有显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 黑米酒糟馒头感官评价分析

采用雷达图分析黑米酒糟馒头的感官特性,分别对不同添加量黑米酒糟馒头的形态、色泽、气味、口感以及组织进行综合评分,结果如图 1 所示。当黑米酒糟添加量为 5% 时,馒头形态、气味、口感均为最佳,形状更加饱满,在雷达图中面积占比最大,综

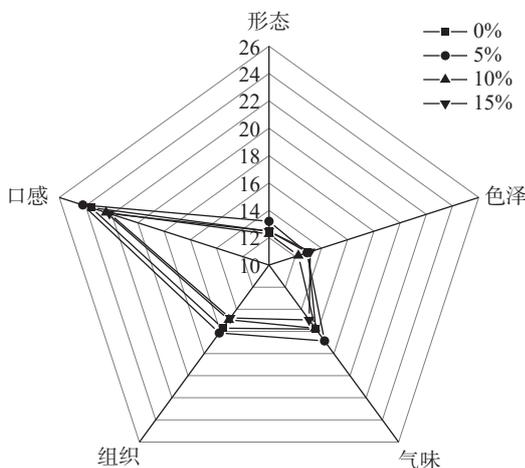


图 1 黑米酒糟馒头的感官评价

Fig.1 Sensory evaluation of BRSBG steamed bread

合评分最高,更易被大众接受。当黑米酒糟添加量大于 5% 时,多方面评分均下降,具体表现为口感粗糙、颜色较深、发酵后的酒糟气味较重等。原因可能是黑米酒糟的添加可改善馒头风味,但添加量过多,会破坏面筋蛋白结构,色素含量较多,使得风味下降。

### 2.2 黑米酒糟馒头比容分析

面团中添加膳食纤维,会减少蛋白质间形成的  $\alpha$ -螺旋结构,从而弱化面团面筋网络结构<sup>[19]</sup>。由图 2 可知,随着黑米酒糟添加量的增大,馒头比容呈现显著下降的趋势( $P < 0.05$ )。当添加量为 15% 时,馒头比容最小,为 2.038 cm<sup>3</sup>/g。其原因可能是黑米酒糟中膳食纤维增加,降低了面粉中面筋含量,不能形成强网络结构,馒头的持气性降低<sup>[20]</sup>。本实验结果与苏珊等<sup>[21]</sup> 研究结果一致。

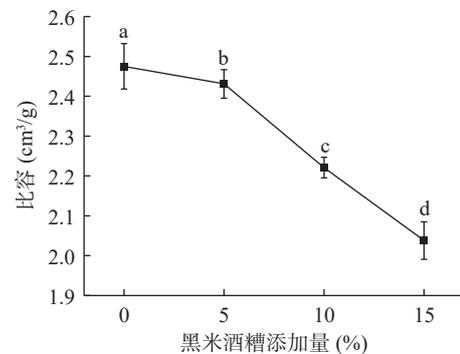


图 2 黑米酒糟馒头的比容

Fig.2 Specific volume of BRSBG steamed bread

注:同一指标不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ );图 5 同。

### 2.3 黑米酒糟馒头色差分析

如表 2 所示,以黑米酒糟添加量为 0% 的馒头作对照,添加黑米酒糟的馒头颜色更深,更偏红、偏黄,馒头色差值呈现出显著性差异( $P < 0.05$ )。这可能与黑米酒糟中含有的黑米色素有关,这种色素的光、热稳定性好,有很强的着色能力<sup>[22]</sup>,也可能与黑米酒糟中含有的糖类有关,在高温的过程中,糖类物质发生焦糖化反应<sup>[23]</sup>,使得馒头颜色加深。

表 2 黑米酒糟馒头的色差

Table 2 Color difference of BRSBG steamed bread

黑米酒糟添加量 (%)	0	5	10	15
$L^*$	70.72±1.42 <sup>a</sup>	64.21±0.84 <sup>bc</sup>	65.18±1.26 <sup>b</sup>	63.16±0.30 <sup>c</sup>
$a^*$	-1.70±0.36 <sup>b</sup>	-0.26±0.74 <sup>a</sup>	-0.23±0.75 <sup>a</sup>	-0.46±1.38 <sup>a</sup>
$b^*$	3.76±0.86 <sup>b</sup>	6.44±1.05 <sup>a</sup>	5.89±1.10 <sup>a</sup>	5.78±1.22 <sup>a</sup>

注:同一行不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ );表 5 同。

### 2.4 黑米酒糟馒头宏观结构分析

黑米酒糟馒头宏观结构的扫描图分析,如图 3 所示。随着黑米酒糟添加量的增加,馒头内部孔的面积、孔的周长和孔径均增大。如表 3 所示,当添加量为 15% 时,馒头宏观结构中的 3 个指标均为实验组中的最大值,结合黑米酒糟馒头的感官评价分析,此时馒头表面有大气泡,皮芯分离,切片有断裂,导致其

孔面积、孔周长、孔径的增大。原因可能是黑米酒糟馒头持气性下降,内部气体聚集到皮层表面,形成大气泡。

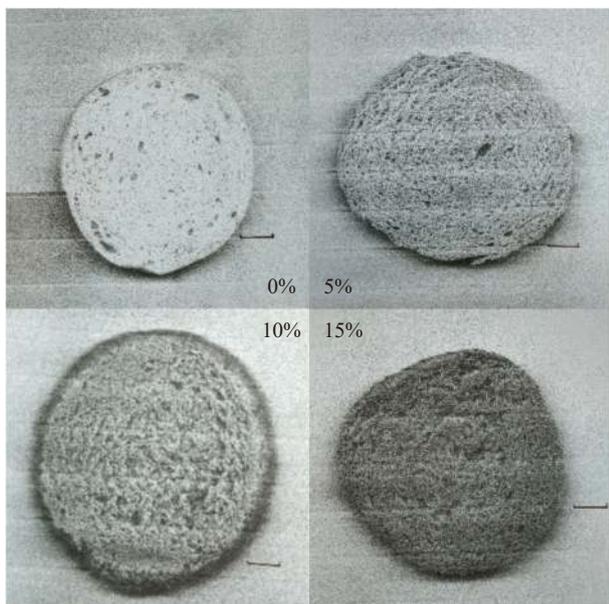


图3 黑米酒糟馒头的激光扫描图  
Fig.3 Laser scanning picture of BRSG steamed bread

### 2.5 黑米酒糟馒头微观结构分析

黑米酒糟馒头的微观结构,如图4所示。随着黑米酒糟添加量的增加,馒头的微观结构发生了差异性变化。由高倍电镜图可以看出,馒头粉粒径大,淀

表3 黑米酒糟对馒头宏观结构的影响

Table 3 Effect of BRSG on the macro structure of steamed bread

黑米酒糟添加量(%)	孔面积(mm <sup>2</sup> )	孔周长(mm)	孔直径(mm)
0	0.947±0.694 <sup>b</sup>	3.476±0.946 <sup>b</sup>	1.170±0.339 <sup>a</sup>
5	1.808±1.020 <sup>b</sup>	3.781±1.077 <sup>ab</sup>	1.259±0.495 <sup>a</sup>
10	2.068±1.414 <sup>ab</sup>	4.402±2.008 <sup>ab</sup>	1.279±0.403 <sup>a</sup>
15	3.067±2.018 <sup>a</sup>	5.562±4.326 <sup>a</sup>	1.471±0.516 <sup>a</sup>

注: 同一列不同字母表示差异显著(P<0.05); 表4同。

粉结合紧密,表面较为光滑;随着黑米酒糟添加量的增大,馒头粉粒径变小,结合松散,表面粗糙。原因可能是黑米酒糟中所含有的膳食纤维,破坏了馒头的面筋网络结构,孔洞变多,使其无法包裹淀粉形成均匀稳定结构,从而导致面团品质变差<sup>[24]</sup>。

### 2.6 黑米酒糟馒头质构分析

馒头质构指标有硬度、弹性、咀嚼性、回复性和内聚性。馒头的硬度与咀嚼性与馒头品质呈负相关,弹性、回复性和内聚性与馒头品质呈正相关<sup>[25]</sup>。如表4所示,随着黑米酒糟添加量的增加,馒头的硬度从(1041.036±35.718)g增加到(2012.682±47.642)g,咀嚼性从764.641±6.249增加到1650.171±55.788,弹性从0.856±0.005降低到0.752±0.004,回复性从0.650±0.01降低到0.593±0.022,内聚性从0.951±0.013降低到0.861±0.019。这可能是黑米酒糟中膳食纤维含量较多,纤维是一种结构较为坚硬且耐嚼的

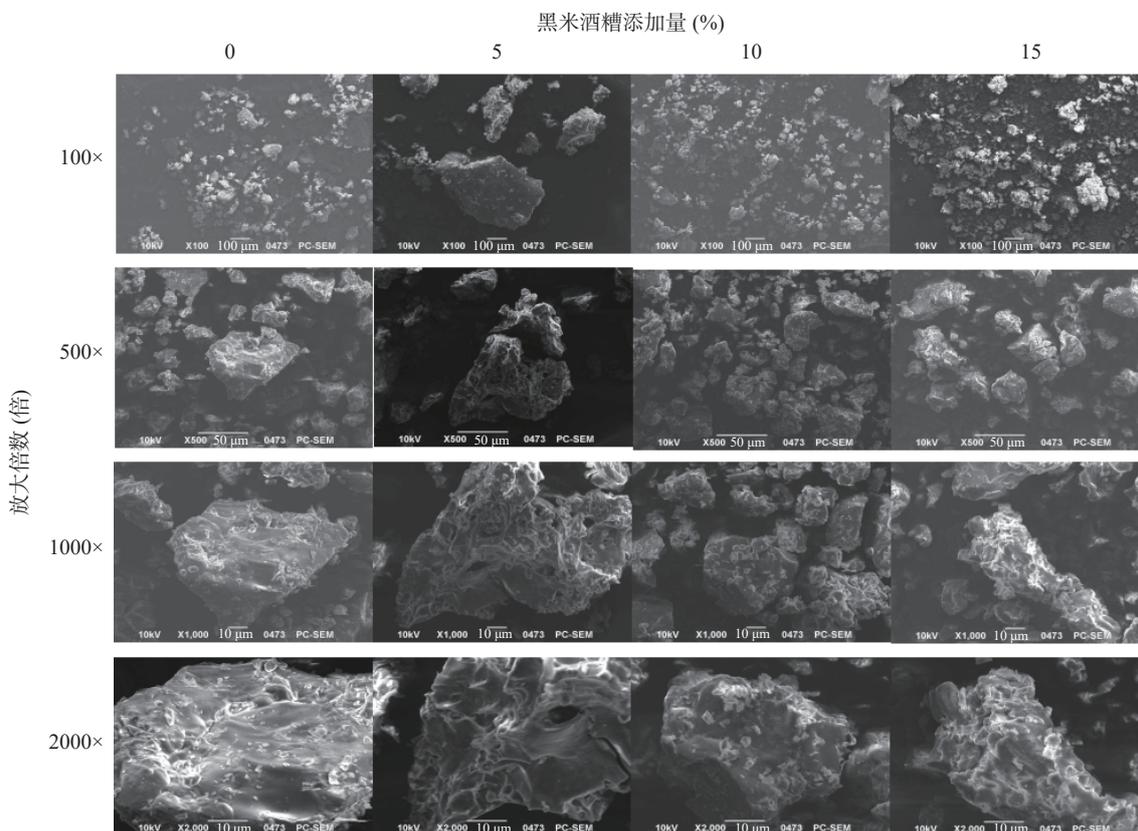


图4 黑米酒糟馒头的扫描电镜图  
Fig.4 SEM diagram of BRSG steamed bread

表 4 黑米酒糟对馒头质构的影响

Table 4 Effect of BRSG on the texture of steamed bread

黑米酒糟添加量(%)	硬度(g)	弹性(mm)	咀嚼性	回复性	内聚性
0	1041.036±35.718 <sup>c</sup>	0.856±0.005 <sup>a</sup>	764.641±6.249 <sup>c</sup>	0.650±0.01 <sup>a</sup>	0.951±0.013 <sup>a</sup>
5	1133.685±18.507 <sup>b</sup>	0.834±0.01 <sup>b</sup>	798.642±19.268 <sup>bc</sup>	0.628±0.005 <sup>b</sup>	0.925±0.006 <sup>b</sup>
10	1168.404±8.266 <sup>b</sup>	0.803±0.017 <sup>c</sup>	855.635±29.228 <sup>b</sup>	0.614±0.005 <sup>bc</sup>	0.912±0.005 <sup>b</sup>
15	2012.682±47.642 <sup>a</sup>	0.752±0.004 <sup>d</sup>	1650.171±55.788 <sup>a</sup>	0.593±0.022 <sup>c</sup>	0.861±0.019 <sup>c</sup>

物质, 导致馒头的硬度和咀嚼性增加; 同时其又会影  
响面筋网络的形成, 导致面团无法充分膨胀<sup>[26]</sup>, 馒头  
体积减小, 内部结构粗糙, 导致馒头弹性、回复性和  
内聚性均下降。

### 2.7 黑米酒糟馒头抗氧化性能分析

黄酮含量和多酚含量随黑米酒糟添加量的变  
化, 如图 5a 所示。由图可知, 随着黑米酒糟添加量  
的增加, 馒头中的黄酮含量和多酚含量呈现递增趋势,  
原因可能是黑米在发酵过程中, 一些物质如黑米中的  
花青素及醇类会分解转变成黄酮类和酚类物质; 当添  
加量为 15% 时, 黄酮含量为 0.379 mg/g, 多酚含量为  
0.088 mg/g, 分别是小麦馒头的 1.42 和 1.33 倍, 显著  
高于小麦馒头中的黄酮含量和多酚含量 ( $P < 0.05$ )。

自由基清除能力之间具有良好的正相关性<sup>[27]</sup>。故向  
馒头中添加黑米酒糟能够提高其抗氧化能力。

### 2.8 黑米酒糟馒头体外消化性能分析

2.8.1 抗性淀粉含量(RS)、水解指数(HI)及预测血  
糖生成指数(EGI) 由表 5 可知, 随着黑米酒糟添加  
量的增加, RS 含量也在增加。小麦粉中 RS 含量在  
2.45%~3.15%<sup>[28]</sup>, 小麦馒头中 RS 约为 6.35 g/100 g<sup>[29]</sup>,  
本实验中黑米酒糟馒头 RS 含量在 7.58%~14.00%,  
显著高于小麦馒头 RS 含量 ( $P < 0.05$ )。糙米中的膳食  
纤维含量在 3.8%~4.5%, 而黑米的皮层较厚, 其膳食  
纤维含量可高达 5.0%<sup>[30]</sup>。膳食纤维在淀粉水解和糖  
类吸收过程中起到一定的辅助抑制作用, 可以延缓淀  
粉消化和血糖升高<sup>[31]</sup>。因此, 向馒头中添加黑米酒糟  
可以抑制淀粉的水解消化, 提高馒头的抗消化能力。

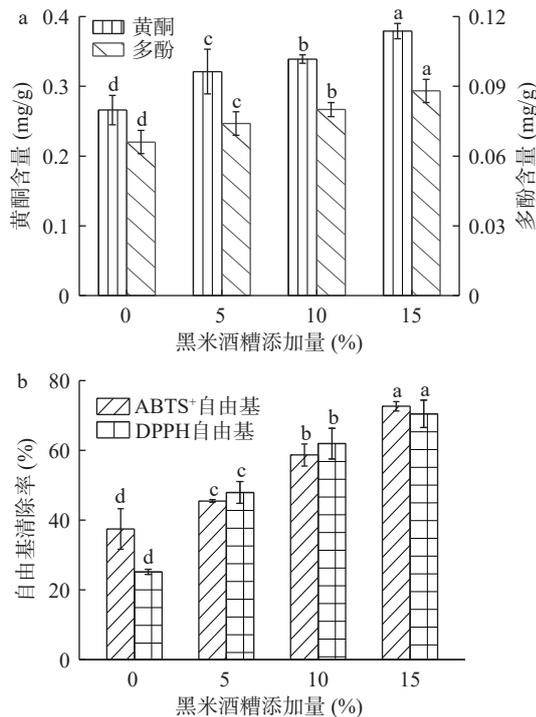


图 5 黑米酒糟馒头的抗氧化活性

Fig.5 Antioxidant activity of BRSG steamed bread

ABTS<sup>+</sup>自由基清除率和 DPPH 自由基清除率随  
黑米酒糟添加量的变化, 如图 5b 所示。从图中可以  
看出, 黑米酒糟能提高馒头的 DPPH 和 ABTS<sup>+</sup>自由  
基清除能力; 当添加量为 15% 时, DPPH 自由基清除  
率为 70.4%, ABTS<sup>+</sup>自由基清除率为 71.6%, 分别是  
小麦馒头的 2.80 和 1.91 倍。由此可知, 黑米酒糟添  
加量增加, 自由基清除率也在增加, 这与黄酮和多酚  
实验结果一致。黄酮、多酚含量与 DPPH 和 ABTS<sup>+</sup>

表 5 黑米酒糟馒头的淀粉性质表

Table 5 Starch property table of BRSG steamed bread

黑米酒糟 添加量(%)	0	5	10	15
RS	5.61±0.27 <sup>c</sup>	7.58±0.38 <sup>b</sup>	8.73±0.65 <sup>b</sup>	14.00±1.18 <sup>a</sup>
HI	67.85±0.49 <sup>a</sup>	59.98±2.64 <sup>b</sup>	54.45±2.59 <sup>b</sup>	45.73±2.86 <sup>c</sup>
EGI	76.96±0.29 <sup>a</sup>	72.64±0.57 <sup>b</sup>	69.60±0.64 <sup>c</sup>	64.82±1.30 <sup>d</sup>

体外血糖生成指数 EGI 能够反映样品体外淀粉  
消化速率, 并且与体内淀粉消化实验结果具有很好的  
相关性<sup>[32]</sup>。本实验通过测定黑米酒糟馒头的 EGI 来  
预测其体外血糖生成指数。由表 5 可知, 添加黑米  
酒糟能够显著降低馒头的 HI、EGI ( $P < 0.05$ )。当  
黑米酒糟添加量为 15% 时, 馒头的 EGI 由 76.96 降  
低至 64.82。当 EGI  $\geq 75.00$  时, 为高 EGI 食物, 所以  
小麦馒头为高 EGI 食物, 而添加黑米酒糟的馒头均  
为中等 EGI 食物。故向馒头中添加黑米酒糟能够降  
低其体外血糖升高指数。

2.8.2 淀粉水解曲线 由图 6 可知, 所有样品和参照  
品(白面包)的淀粉消化率均随着消化时间的增加而  
增大, 前 30 min 内淀粉水解速度最快, 后水解速度逐  
渐变慢, 在 120 min 后趋于平缓。在体外模拟淀粉  
消化中, 白面包淀粉水解率达到 72.52%, 黑米酒糟添  
加量为 0%、5%、10%、15% 的馒头淀粉水解率分  
别为 51.20%、46.58%、43.79%、40.46%。小麦馒头  
和黑米酒糟馒头淀粉水解率均低于白面包。原因可  
能是黑米酒糟含有大量的膳食纤维, 其网状结构可以  
阻碍淀粉与消化酶的有效结合, 从而降低淀粉的消  
化速率<sup>[33]</sup>。

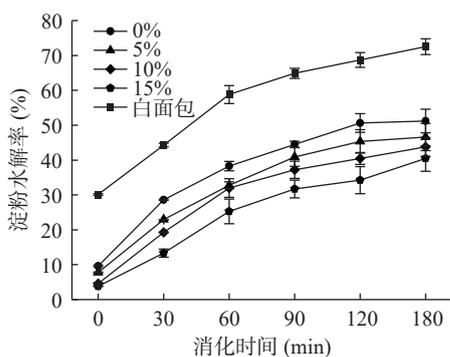


图6 黑米酒糟馒头的淀粉水解

Fig.6 Starch hydrolysis of BRSg steamed bread

### 3 结论

综上,馒头中添加一定量的黑米酒糟,对馒头的感官评价、基本指标、抗氧化性能以及体外淀粉消化等方面均有一定影响。实验结果表明,添加黑米酒糟可以显著提高馒头中的多酚和黄酮含量,同时与其相关的ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力和DPPH自由基清除能力也显著增强,表明黑米酒糟馒头相较于传统小麦馒头抗氧化能力显著提高( $P < 0.05$ )。黑米酒糟中的膳食纤维能够抑制淀粉的水解以及糖类的吸收,起到增加抗性淀粉含量和降低血糖指数的作用,但黑米酒糟影响馒头性质的作用机理有待进一步探究。黑米酒糟也使得馒头的弹性、回复性和内聚性指标下降。此外,实验发现黑米酒糟添加量在5%~10%时,馒头的抗氧化能力较为优异,口感适中,易于消费者接受,为今后酒糟副产品的开发及应用指出一定方向。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] 杜密英,戴瑞,李杰,等.金花茶粉添加量对馒头品质及抗氧化性的比较分析[J].现代食品科技,2023,39(8):156-164. [DU M Y, DAI R, LI J, et al. Effects of added *Camellia nitidissima* Chi powder on the quality and antioxidant activity of steamed bread[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(8): 156-164.]
- [2] 柳诚刚.山药多糖对馒头品质的影响[J].粮食与饲料工业,2023(1):16-19. [LIU C G. The effect of yam polysaccharides on the quality of steamed bread[J]. Grain and Feed Industry, 2023(1): 16-19.]
- [3] HE W J, CHEN N, YU Z L, et al. Effect of tea polyphenols on the quality of Chinese steamed bun and the action mechanism[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(4): 1500-1513.
- [4] 徐向波,庞敏,吴照莎,等.秋葵藜麦馒头的研制[J].粮食加工,2023,48(1):34-38. [XU X B, PANG M, WU Z S, et al. Development of okra and quinoa steamed bread[J]. *Grain Processing*, 2023, 48(1): 34-38.]
- [5] 张小村,孔凡美,姜小燕,等.不同品种甘薯与小麦配粉对粉质及馒头品质的影响[J].中国粮油学报,2020,35(5):23-29. [ZHANG X C, KONG F M, JIANG X Y, et al. Effects of different sweet potato flour on wheat flour quality and steamed bread quality [J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2020, 35(5): 23-29.]

[6] MASHAU M E, MUKWEVHO T A, RAMASHIA S E, et al. The influence of Bambara groundnut (*Vigna subterranean*) flour on the nutritional, physical and antioxidant properties of steamed bread[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2022, 20(1): 259-270.

[7] 贵永光,孔繁晟,钟红茂,等.双频超声协同强化提取黑米黑色素试验研究[J].农业工程学报,2012,28(S1):339-344.

[BEN Y G, KONG F S, ZHONG H M, et al. Experiment on dual-frequency ultrasound extraction of black rice melanin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(S1): 339-344.]

[8] 胡旭,吴耀领,李巧玉,等.酒糟堆肥化再利用研究进展[J].酿酒科技,2023,345(3):110-114. [HU X, WU Y L, LI Q Y, et al. Research progress in the production of organic fertilizer by distillers grains[J]. *Brewery Science and Technology*, 2023, 345(3): 110-114.]

[9] 张丽华,王小媛,李昌文,等.酒糟再利用的研究进展[J].食品与发酵工业,2017,43(11):250-256. [ZHANG L H, WANG X Y, LI C W, et al. Recent advances in comprehensive utilization of grain stillage[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(11): 250-256.]

[10] 曹宇锋,赵仁勇.酒精发酵处理对小麦非淀粉多糖的影响及酒糟在馒头中的应用[J].河南工业大学学报(自然科学版),2021,42(2):8-14,35. [CAO Y F, ZHAO R Y. Effect of ethanol fermentation on non-starch polysaccharides of wheat and application of DDGS in making steamed bread[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 42(2): 8-14, 35.]

[11] 许芳溢,李五霞,吕曼曼,等.苦荞馒头抗氧化品质、体外消化特性及感官评价的研究[J].食品科学,2014,35(11):42-47. [XU F Y, LI W X, LÜ M M, et al. Functional quality, *in vitro* starch digestibility and sensory evaluation of tartary buckwheat steamed bread[J]. *Food Science*, 2014, 35(11): 42-47.]

[12] 瑞端征,刘建伟,毛根武,等.馒头质构特性测定方法的研究(I)-馒头样品制作与质构测试方法探讨[J].粮食与饲料工业,2010(12):19-23. [YANG R Z, LIU J W, MAO G W, et al. A study on determination of texture characteristics of steamed bread (I): Production and determination of steamed bread[J]. *Grain and Feed Industry*, 2010(12): 19-23.]

[13] GUO X D, WU C S, MA Y J, et al. Comparison of milling fractions of tartary buckwheat for their phenolics and antioxidant properties[J]. *Food Research International*, 2012, 49(1): 53-59.

[14] MA Y J, GUO X D, LIU H, et al. Cooking, textural, sensory, and antioxidant properties of common and tartary buckwheat noodles[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2013, 22(1): 153-159.

[15] XIAO Y, XING G L, RUI X, et al. Enhancement of the antioxidant capacity of chickpeas by solid state fermentation with *Cordyceps militaris* SN-18[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014 (10): 210-222.

[16] 郭冬生,彭小兰.蕈酮比色法和酶水解法两种淀粉测定方法的比较研究[J].湖南文理学院学报(自然科学版),2007(3):34-36,48. [GUO D S, PENG X L. Comparative study on antrone chromametry and enzymatic hydrolysis for assay starch method[J]. *Journal of Hunan College of Arts and Sciences (Natural Science Edition)*, 2007(3): 34-36,48.]

[17] DU S K, JIANG H, AI Y, et al. Physicochemical properties and digestibility of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) starches [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 108(1): 200-205.

[18] GONI I, GARCIA-DIZ L, SAURA-CALIXTO F. A starch

- hydrolysis procedure to estimate glycemic index[J]. *Nutrition Research*, 1997, 17(3): 427-437.
- [19] 谢凤英,赵玉莹,雷宇宸,等.超高压均质处理的米糠膳食纤维粉对面筋蛋白结构的影响[J].*中国食品学报*, 2020, 20(11): 115-121. [XIE F Y, ZHAO Y Y, LEI Y C, et al. Effect of dietary fiber powder by ultra-high pressure homogenized rice bran on the structure of gluten protein[J]. *Chinese Journal of Food*, 2020, 20(11): 115-121.]
- [20] DENG C L, MELNYK O, LUO Y H. Influence of substitution of wheat flour with modified potato starch on the quality of Chinese steamed bread[J]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 5(11): 12-19.
- [21] 苏珊,徐瑞霞,张顺,等.乳酸菌发酵豆渣酸面团对馒头面团特性和馒头品质的影响[J].*核农学报*, 2022, 36(11): 2218-2228. [SU S, XU R X, ZHANG S, et al. Effects of lactic acid bacteria fermented soybean dregs sourdough on steamed bread dough characteristics and steamed bread quality[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(11): 2218-2228.]
- [22] 李永菊.浅谈黑米中色素的提取与应用[J].*河北农业科技*, 2008(10): 51-52. [LI Y J. Discussion on the extraction and application of pigments in black rice[J]. *Hebei Agricultural Science and Technology*, 2008(10): 51-52.]
- [23] 孟凤华,孙凯,冯润芳,等.红枣粉添加量对面团特性及馒头品质的影响[J].*食品工业科技*, 2021, 42(5): 177-181,187. [MENG F H, SUN K, FENG R F, et al. Effect of jujube powder addition on dough characteristics and steamed bread quality[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(5): 177-181,187.]
- [24] 韩畅,林江涛,岳清华,等.苦荞麸皮粉添加量对面团性质及馒头品质的影响[J].*食品与发酵工业*, 2022, 48(7): 140-145. [HAN C, LIN J T, YUE Q H, et al. Effect of tartary buckwheat bran powder on dough characteristic and steamed bread quality[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2022, 48(7): 140-145.]
- [25] 武盟,曹伟超,程新,等.高产 $\alpha$ -半乳糖苷酶乳酸菌发酵对鹰嘴豆酸面团生化特性及其面包烘焙品质的影响[J].*食品科学*, 2021, 42(10): 146-153. [WU M, CAO W C, CHENG X, et al. Effect of fermentation with high-yield  $\alpha$ -galactosidase-producing lactic acid bacteria on biochemical properties and breadmaking characteristics of chickpea sourdough[J]. *Food Science*, 2021, 42(10): 146-153.]
- [26] 李晓宁,汪丽萍,田晓红,等.麦麸膳食纤维及原料麦麸对馒头品质的影响[J].*食品工业科技*, 2024, 45(3): 75-82. [LI X N, WANG L P, TIAN X H, et al. The effects of wheat bran dietary fiber and raw wheat bran on the quality of steamed bread[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(3): 75-82.]
- [27] 刘艳香,汪丽萍,蔡亭,等.馒头加工过程中苦荞生物活性稳定性研究[J].*中国食品学报*, 2019, 19(5): 149-154. [LIU Y X, WANG L P, CAI T, et al. Studies on stability of tartary buckwheat's bioactive during steamed bun processing[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2019, 19(5): 149-154.]
- [28] 金增辉.黑米素开发利用与加工技术的研究[J].*粮食加工*, 2016, 41(5): 24-25,40. [JIN Z H. Research on development and utilization and processing technology of melanomy[J]. *Grain Processing*, 2016, 41(5): 24-25,40.]
- [29] 赵时珊,蔡芳,隋勇,等.紫薯-中筋复配粉的理化特性及其馒头制品品质分析[J].*现代食品科技*, 2023, 39(7): 209-217. [ZHAO S S, CAI F, SUI Y, et al. Physicochemical characteristics of whole purple sweet potato flour-plain flour composites and the quality of obtained steamed buns[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2023, 39(7): 209-217.]
- [30] 马先红,许海侠,韩昕纯.黑米的营养保健价值及研究进展[J].*食品工业*, 2018, 39(3): 264-267. [MA X H, XU H X, HAN X C. Nutritional health value and research progress of black rice[J]. *Food Industry*, 2018, 39(3): 264-267.]
- [31] 邓婧,马小涵,赵天天,等.青稞 $\beta$ -葡聚糖对淀粉体外消化性的影响[J].*食品科学*, 2018, 39(10): 106-111. [DENG J, MA X H, ZHAO T T, et al. Effect of highland barley  $\beta$ -glucan on starch digestibility *in vitro*[J]. *Food Science*, 2018, 39(10): 106-111.]
- [32] 李华,马丹妮,吴莹晗,等.五种黑小麦的营养价值、抗氧化活性和淀粉消化性[J].*食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 80-86. [LI H, MA D N, WU Y H, et al. Nutritional value, antioxidant activity and starch digestibility of five triticale varieties[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(12): 80-86.]
- [33] IM H J, WHITE P J. *In vitro* digestion rate and estimated glycemic index of oat flours from typical and high  $\beta$ -glucan oat lines[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(20): 5237-5242.