

## 微波/常压蒸汽联合木聚糖酶酶解预处理对小麦麸胚内源酶活性及抗氧化活性的影响

陈 鹏, 韩 静, 孙冰华, 郑学玲, 李 力, 马 森

### Effects of Combined Microwaving/Atmospheric Steaming with Xylanase Enzymolysis on Endogenous Enzyme Activity and Antioxidant Activity in Wheat Bran-Germ

CHEN Peng, HAN Jing, SUN Binghua, ZHENG Xueling, LI Li, and MA Sen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060397>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

超声-微波预处理协同复合酶法制备壳寡糖的工艺优化及其抗氧化活性

Preparation of Chitosan Oligosaccharide by Pre-ultrasound-microwave Assisted Composite Enzymatic Method and Its Antioxidant

食品工业科技. 2024, 45(17): 190-199 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090318>

微波联合酶法对小麦麸皮品质改良及结构特性影响

Quality Improvement and Structural Characteristics of Wheat Bran by Microwave Enzymatic Method

食品工业科技. 2020, 41(21): 21-28 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020310>

培育条件对麦胚中蛋白酶活力及蛋白质性质的影响

Effect of Incubation Conditions on the Protease Activity and Protein Property of Wheat Germ

食品工业科技. 2022, 43(11): 192-199 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090168>

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

Effect of Microbial Fermentation on Content, Composition and Antioxidant Activity of Water-soluble Polyphenols in Wheat Bran

食品工业科技. 2020, 41(3): 104-109 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.03.019>

超声-微波辅助酶法提取糜子麸皮可溶性膳食纤维及其抗氧化活性分析

Analysis of Ultrasonic-Microwave Synergistic Enzyme Extraction of Soluble Dietary Fiber from Millet Bran and Its Antioxidant Activity

食品工业科技. 2022, 43(12): 163-172 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080297>

河套麦胚多肽的制备工艺优化及其体外降血脂活性

Preparation Optimization of Hetao Wheat Germ Polypeptide and Its *in Vitro* Hypolipidemic Activity

食品工业科技. 2024, 45(17): 174-180 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090197>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈鹏, 韩静, 孙冰华, 等. 微波/常压蒸汽联合木聚糖酶酶解预处理对小麦麸胚内源酶活性及抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 144–152. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060397

CHEN Peng, HAN Jing, SUN Binghua, et al. Effects of Combined Microwaving/Atmospheric Steaming with Xylanase Enzymolysis on Endogenous Enzyme Activity and Antioxidant Activity in Wheat Bran-Germ[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 144–152. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060397

· 研究与探讨 ·

# 微波/常压蒸汽联合木聚糖酶酶解预处理对小麦麸胚内源酶活性及抗氧化活性的影响

陈 鹏, 韩 静, 孙冰华, 郑学玲, 李 力, 马 森\*

(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

**摘 要:** 氧化酸败对小麦加工副产品——小麦麸胚的质量起着至关重要的作用, 为了减轻氧化酸败对小麦麸胚产品的不利影响。本文采用微波 (700 W, 60、90、120、150 s)、常压蒸汽 (100 ℃, 6、8、10、12 min)、酶解 (木聚糖酶, 0.4%、0.6%、0.8%、1%) 三种单一处理以及三者两两组合的联合处理, 旨在分析不同预处理技术对麸胚内源酶活性 (脂肪酶、脂肪氧化酶、过氧化物酶)、色泽、总酚含量及抗氧化活性的影响。结果表明: 在最优条件下, 3 种单一处理技术均能对麸胚中的脂肪酶、脂肪氧化酶、过氧化物酶起到钝化作用。其中常压蒸汽与酶解处理对三种内源酶的灭活效果优于微波处理。常压蒸汽处理组均可使脂肪酶灭活率达 95% 以上, 使过氧化物酶完全失活; 酶解处理组均可使脂肪酶灭活率达 97% 以上。与单一处理相比, 联合处理后麸胚三种内源酶灭活率达 90% 以上, 灭活效果更好。在总酚含量方面, 与未处理麸胚相比, 微波联合酶解使总酚含量达到最大, 增加了 1.40 倍, 常压蒸汽联合酶解次之, 总酚含量增加了 1.05 倍。微波联合酶解处理麸胚, 其 ABTS<sup>+</sup> 与 DPPH 自由基的清除率均高于其他处理组, 分别达到 91.13% 和 91.79%。此外, 微波联合酶解处理技术具有环保和高效的特点, 设备成熟且操作规范, 虽初始成本高但长期经济效益显著。综上所述, 推荐采用微波联合酶解作为麸胚预处理技术, 可为麸胚稳定化贮藏提供理论依据。

**关键词:** 小麦麸胚, 预处理, 内源酶活性, 总酚, 抗氧化活性

中图分类号: TS210.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)09-0144-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060397



本文网刊:

## Effects of Combined Microwaving/Atmospheric Steaming with Xylanase Enzymolysis on Endogenous Enzyme Activity and Antioxidant Activity in Wheat Bran-Germ

CHEN Peng, HAN Jing, SUN Binghua, ZHENG Xueling, LI Li, MA Sen\*

(College of Grain, Oil and Food, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Oxidative rancidity plays a crucial role on the quality of wheat processing by-products—wheat bran-germ, and in order to attenuate its adverse effects on wheat bran-germ products. This study aimed to investigate the effect of six wheat bran-germ modification treatments (microwaving, atmospheric steaming, enzymolysis, atmospheric steaming combined microwaving, microwaving combined enzymolysis, atmospheric steaming combined enzymolysis) on endogenous enzyme activity, color, total phenolic contents, and antioxidant activity of wheat bran-germ. The results showed that all the single treatment techniques significantly reduced the activities of lipase, lipoxidase and peroxidase in wheat bran-germ under optimal conditions, especially atmospheric steam and enzymatic hydrolysis inactivated the three endogenous enzymes better

收稿日期: 2024-06-27

基金项目: 河南省杰出青年科学基金资助项目 (252300421032); 河南工业大学博士基金项目 (2023BS059); 国家自然科学基金-面上项目 (32272249);

河南省高校科技创新人才项目 (23HASTIT033); 中国博士后科学基金项目 (2023M741513)。

作者简介: 陈鹏 (1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 谷物资源开发与利用, E-mail: cp1349135733@163.com。

\* 通信作者: 马森 (1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 谷物资源开发与利用, E-mail: masen@haut.edu.cn。

than microwave. Atmospheric steaming treatment group achieved over 95% inactivation of lipase and completely inactivated peroxidase. Meanwhile, enzymolysis treatment group resulted in a lipase inactivation rate of over 97%. Compared with the single treatm, the combined treatment exhibited enhanced efficacy, resulting in inactivation rates exceeding 90% for the three endogenous enzymes in wheat bran-germ. In terms of total phenolic content, microwave combined enzymatic digestion resulted in a maximum increase of 1.40-fold in total phenolic content compared to untreated wheat bran-germ. This was followed by the atmospheric steam combined enzymatic hydrolysis group, showing a 1.05-fold elevation in total phenolic contents. Furthermore, microwaving combined enzymolysis resulted in the highest free-radical-scavenging rate towards ABTS<sup>+</sup> and DPPH radicals in wheat bran-germ, reaching 91.13% and 91.79%, respectively. Given the eco-friendliness, high efficiency, mature equipment, standardized operation, and significant long-term economic benefits of microwaving combined enzymolysis technology, this approach could be a potential approach to deactivate endogenous enzyme activity and enhance the antioxidant properties of wheat bran-germ. These findings will aid future optimization of industrial wheat bran-germ modification.

**Key words:** wheat bran-germ; pretreatment; endogenous enzyme activity; total phenols; antioxidant activity

小麦麸胚作为小麦制粉过程中的副产物,主要包括麦麸和胚芽。它富含维生素、矿物质、膳食纤维、酚类等生物活性物质,具有降糖降脂、调节肠道菌群、抗氧化等多种健康效益<sup>[1-2]</sup>。然而麸胚中含有的高活性脂肪酶和脂肪氧化酶,会导致脂质的氧化酸败。同时,内源性过氧化物酶会催化氢过氧化物的分解,生成具有异味的醛、酮等挥发性物质,影响麸胚制品的安全性、营养品质和食用品质<sup>[3]</sup>。因此,对麸胚中的关键内源酶类进行有效的灭活处理,是进一步开发利用的重要前提。目前,许多技术已被用于小麦麸胚稳定性及抗氧化性的改进,主要包括物理处理(挤压膨化、微波、常压蒸汽等)和生物处理(发酵和酶解)等<sup>[4-7]</sup>。微波处理操作简便,可直接穿透物料内部,改变物料中蛋白和淀粉性质,对酶的灭活效果较好<sup>[8-9]</sup>。常压蒸汽作为一种经济且高效的加热处理方式,通常在高水分条件下对麦麸进行加热,是维持麦麸形态与色泽、降低微生物含量及酶活性的重要手段之一<sup>[10]</sup>。木聚糖酶是一种专门用于纤维水解的细胞壁水解酶,能特异性水解麦麸细胞壁中的糖苷键,从而将不溶性膳食纤维转化为可溶性膳食纤维,同时释放出包裹于其中的天然抗氧化剂成分,因其高效、易操作的优点受到了广泛关注<sup>[11]</sup>。

诸多研究已证实,采用上述的预处理技术对麦麸制品品质改善有显著效果。例如麦麸在微波处理(700 W, 20 s)和常压蒸汽处理后脂肪酶和脂肪氧化酶活性显著降低,可显著延长其贮藏时间<sup>[12]</sup>。酶解处理不仅增加可溶性膳食纤维含量,还促进细胞内酚类物质的释放<sup>[13]</sup>。然而在当前的研究中,预处理技术在麸胚预处理领域的应用相对匮乏,如 Zhuang 等<sup>[14]</sup>研究了麸胚低温挤压(非膨化)、高温挤压(膨化)、爆炸膨化和高温射流粉碎对麸胚改性的影响,研究仅集中在单一处理技术上。且其他单一预处理技术多应用于麦麸预处理,在麸胚领域仍有较大的研究空间。此外,与单一预处理相比,联合处理能结合不同预处理技术各自优势,通常要比使用单一的预处理方法效果更为显著。近年来,有关微波-酶法、蒸汽-微波、蒸汽-酶解等协同提取技术日趋成熟,但多应用于多糖

提取及抗性淀粉工艺优化<sup>[15-16]</sup>,在麸胚品质改良鲜有报道。基于此,本研究采用三种不同的单一处理技术(微波、常压蒸汽、酶解)及其两两组合的联合处理技术处理麸胚,通过比较分析各处理组中麸胚的脂肪酶、脂肪氧化酶、过氧化物酶活性以及总酚含量、ABTS<sup>+</sup>与 DPPH 自由基清除率等指标的变化,探讨对麸胚稳定性及抗氧化活性的影响,为麸胚的稳定化贮藏及其在食品工业中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜麦麸 山东鲁花(延津)面粉有限公司;新鲜胚芽 山东顺鑫(枣庄)面粉有限公司;乙腈 成都市科隆化学品有限公司;甲醇、氢氧化钠 天津市天力化学试剂有限公司;乙醇、无水碳酸钠、氢氧化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠 郑州派尼化学试剂厂;2,2-联氨基双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、吐温-20、三羟甲基氨基甲烷盐酸盐、没食子酸 北京索莱宝科技有限公司;亚油酸、愈创木酚、对硝基苯酚辛酸酯、过硫酸钾、福林酚、木聚糖酶(50000 U/g,最适 pH 为 5,最适温度 50 ℃)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH) 上海麦克林生化科技有限公司;以上试剂均为分析纯。

101A-3E 鼓风干燥箱 上海实验仪器厂有限公司;5804R 高速离心机 艾本德上海国际贸易有限公司;CR-410 色彩色差计 日本柯尼卡美能达公司;JX-2000 液氮低温粉碎机 上海净信实业发展有限公司;C22-IH91 电磁炉 浙江苏泊尔电器有限公司;P70D20TL-D4 微波炉 广东格兰仕微波炉电器制造有限公司;UV2400 紫外可见分光光度计 上海舜宇恒平科学仪器有限公司;HWS-250F 恒温恒湿培养箱 上海丙林电子科技有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 麸胚的制备 参照 Wu 等<sup>[17]</sup>的方法并改动,将新鲜麦麸(粒径>1.7 mm)、胚芽按比例 25:1 混合制备麸胚,放入自封袋于 4 ℃ 条件下备用。麸胚基本组分(干基计):水分含量 6.4%、蛋白质含量



17.73%、淀粉含量 8.70%、脂肪含量 5.74%、总膳食纤维含量 55.92%。

### 1.2.2 麸胚单一预处理及处理条件

1.2.2.1 微波处理 参考 Li 等<sup>[18]</sup> 方法, 取 50 g 麸胚平铺成 1 cm 厚放入微波炉, 固定微波功率 700 W, 处理时间 0、60、90、120、150 s, 冷却至室温后, 贮藏于 4 ℃ 备用。

1.2.2.2 常压蒸汽处理 参考杨磊<sup>[19]</sup> 的方法, 取 50 g 麸胚铺在不锈钢蒸笼托盘上, 厚度约为 1 cm, 在常压下用电磁炉蒸 0、6、8、10、12 min(100 ℃), 然后在室温下风干, 贮藏于 4 ℃ 备用。

1.2.2.3 酶解处理 参考张书静<sup>[20]</sup> 的方法, 称取 300 g 麸胚, 分别添加以麸胚质量为参照的木聚糖酶(0%、0.4%、0.6%、0.8%、1%)混合均匀, 按料液比 1:1.5(g/mL)添加蒸馏水 450 mL, 固定酶解 pH5, 于 50 ℃ 恒温培养箱中酶解 12 h。酶解结束后在 120 ℃ 鼓风干燥箱灭活 20 min, 50 ℃ 鼓风干燥 24 h<sup>[21-22]</sup>, 贮藏于 4 ℃ 备用。

将以上各单一预处理组与未处理组(不做任何处理)的麸胚经液氮低温粉碎机粉碎后, 过 100 目筛, 于 4 ℃ 贮藏备用。

1.2.3 脂肪酶活性测定 参考贾婉婷<sup>[3]</sup> 的方法, 称量 2.0 g 麸胚于试管中, 加入 10 mL Tris-HCl(pH8.0, 50 mmol/L)缓冲液, 振荡混匀, 置于 4 ℃ 冰箱内, 冰浴 30 min 后离心 10 min(4 ℃, 10000 r/min), 上清液经 0.45 μm 水系滤膜过滤得到粗酶液。

测定步骤: 1.78 mL Tris-HCl 缓冲液、20 μL 10 mmol/L 对硝基苯酚辛酸酯-乙腈底物和 200 μL 粗酶液的体系混合, 3 min 内每隔 30 s 记录 405 nm 下的吸光度值。用线性范围内的吸光度差 $\Delta A_{405}$  计算脂肪酶活性, 如公式(1)所示:

$$\text{脂肪酶活性(U/g} \cdot \text{min}^{-1}) = \frac{\Delta A_{405} \times V_A}{W \times V_B \times 0.01 \times \Delta t} \quad \text{式(1)}$$

式中:  $V_A$  表示粗酶液体积, mL;  $W$  表示样品质量, g;  $V_B$  表示反应体系中粗酶液的体积, mL;  $\Delta t$  表示吸光度线性区域的时间差, min。

1.2.4 脂肪氧化酶活性测定 脂肪氧化酶活性测定参考杜昱蒙等<sup>[10]</sup> 的方法, 称 2 g 样品和 10 mL 磷酸缓冲液(pH7.5, 0.1 mol/L)混合, 置于冰水中, 冰浴提取 30 min 后离心 20 min(4 ℃, 3000 r/min), 上清液经 0.45 μm 水系滤膜过滤得到粗酶液。

底物配制: 移取 0.125 mL 吐温-20 分散于 2.5 mL 硼酸缓冲液(pH9.0, 50 mmol/L)中, 摇动下逐滴加入 0.150 mL 的亚油酸, 充分混匀使亚油酸的微细状体分散于液体中, 加入 0.325 mL 氢氧化钠溶液(1 mol/L)后摇动使体系成为清澈透明的溶液, 随即加入 22.5 mL 硼酸缓冲液, 用盐酸(1 mol/L)调节 pH 至 7.0, 用蒸馏水定容至 50 mL。

测定步骤: 分别加 3.86 mL 乙酸盐缓冲液(pH5.5, 0.5 mol/L)、20 μL 粗酶液、底物 120 μL 于试管中, 混合均匀, 3 min 内每隔 30 s 记录 234 nm 下的吸光度值。用线性范围内的吸光度差 $\Delta A_{234}$  计算脂肪氧化酶活性, 如公式(2)所示:

$$\text{脂肪氧化酶活性(U/g} \cdot \text{min}^{-1}) = \frac{\Delta A_{234} \times V_A}{W \times V_B \times 0.01 \times \Delta t} \quad \text{式(2)}$$

式中:  $V_A$  表示粗酶液体积, mL;  $W$  表示样品质量, g;  $V_B$  表示反应体系中粗酶液的体积, mL;  $\Delta t$  表示吸光度线性区域的时间差, min。

1.2.5 过氧化物酶活性测定 参考周颖等<sup>[23]</sup> 的方法并改动, 称取 0.2 g 样品, 加入 10 mL 去离子水, 室温静置提取 30 min, 期间间歇摇动, 然后离心 10 min(室温, 10000 r/min), 上清液即为酶的提取液。 $H_2O_2$  溶液(1% 溶于水)和愈创木酚溶液(1% 溶于 96% 的乙醇)1:1 混合制备混合液, 600 μL 混合液和 1200 μL 酶提取液混合均匀, 记录 470 nm 处 3 min 内每隔 30 s 的吸光值变化。采用线性范围内的吸光度差值 $\Delta A_{470}$  计算过氧化物酶活性, 如公式(3)所示:

$$\text{过氧化物酶活性(U/g} \cdot \text{min}^{-1}) = \frac{\Delta A_{470} \times V_A}{W \times V_B \times 0.01 \times \Delta t} \quad \text{式(3)}$$

式中:  $V_A$  表示粗酶液体积, mL;  $W$  表示样品质量, g;  $V_B$  反应体系中粗酶液的体积, mL;  $\Delta t$  表示吸光度线性区域的时间差, min。

1.2.6 麸胚联合预处理及处理条件 根据麸胚粉残留的脂肪酶、脂肪氧化酶、过氧化物酶活性, 筛选单一预处理最佳条件进行联合预处理。

1.2.6.1 常压蒸汽联合微波处理 常压蒸汽处理 10 min 后的麸胚平铺于微波炉中, 微波 150 s 后, 冷却至室温后收集, 贮藏于 4 ℃ 备用。

1.2.6.2 常压蒸汽联合酶解处理 200 g 麸胚经常压蒸汽处理 10 min 后, 与 1% 木聚糖酶(2 g)混合均匀, 按料液比 1:1.5(g/mL)添加蒸馏水, 调节 pH 后于 50 ℃ 恒温培养箱中酶解 12 h。酶解结束后于 120 ℃ 鼓风干燥箱灭活 20 min 后 50 ℃ 鼓风干燥 24 h, 贮藏于 4 ℃ 备用。

1.2.6.3 微波联合酶解处理 200 g 麸胚经微波处理 150 s 后与 1% 木聚糖酶(2 g)混合均匀, 按料液比 1:1.5(g/mL)添加蒸馏水 300 mL, 调节 pH 后于 50 ℃ 恒温培养箱中酶解 12 h。酶解结束后于 120 ℃ 鼓风干燥箱灭活 20 min, 然后 50 ℃ 鼓风干燥 24 h, 贮藏于 4 ℃ 备用。

将以上各联合预处理组的麸胚经液氮低温粉碎机粉碎后, 过 100 目筛, 于 4 ℃ 贮藏备用。联合预处理组的麸胚脂肪酶、脂肪氧化酶、过氧化物酶活性测定参照 1.2.3~1.2.5。

1.2.7 不同预处理对麸胚色泽的影响 使用 CR-410 型色差计测定麸胚色值,每个样品测定 5 次, $L^*$ 代表亮度值(0~100 表示黑色~白色), $a^*$ 代表红绿值, $b^*$ 代表黄蓝值。

## 1.2.8 不同预处理对麸胚的抗氧化活性影响

1.2.8.1 总酚的提取与测定 总酚提取液的制备与总酚标曲、样品提取液总酚含量的测定参考先兆君<sup>[24]</sup>的方法,在 765 nm 处测定吸光值。根据没食子酸浓度(x)与吸光度(y)关系制作标曲,得线性回归方程  $y=0.0383x+0.0186$ ,  $R^2=0.999$ 。根据回归方程计算提取液总酚浓度,麸胚样品中总酚含量如公式(4)所示:

$$Y = \frac{X \times V \times N}{m \times (1 - w)} \quad \text{式 (4)}$$

式中:Y 表示麸胚样品总酚含量,mg GAE/g; X 表示样品提取液总酚浓度, $\mu\text{g/mL}$ ; m 表示样品质量,mg; w 表示样品水分含量,%; V 表示样品待测液总体积,mL; N 表示定容体积与反应样液体积之比。

1.2.8.2 DPPH 自由基清除能力的测定 参考侯珺瑶<sup>[25]</sup>的方法,准确称取 4 mg DPPH 试剂,用 80% 甲醇混合液定容至 50 mL 容量瓶。准确吸取 0.2 mL 样品提取液和 1 mL DPPH 溶液混合均匀,室温避光反应 1 h,测定其在 517 nm 处吸光度  $A_S$ ;并在相同条件下测定 0.2 mL 80% 甲醇溶液与 1 mL DPPH 溶液的吸光度  $A_0$ 、0.2 mL 样品提取液与 1 mL 80% 甲醇溶液吸光度  $A_R$ 。DPPH 自由基清除率计算如公式(5)所示:

$$E_{\text{DPPH}}(\%) = \frac{A_0 - (A_S - A_R)}{A_0} \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

式中:  $E_{\text{DPPH}}$  表示试样 DPPH 自由基清除率,%;  $A_0$  表示样品提取液溶剂与 DPPH 溶液的吸光度;  $A_S$  表示样品提取液与 DPPH 溶液的吸光度;  $A_R$  表示样品提取液与 80% 甲醇(DPPH 溶液的溶剂)的吸光度。

1.2.8.3 ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力的测定 ABTS 工作液的制备:溶液 1:称取 0.384 g ABTS 于 100 mL 超纯水中混匀备用;溶液 2:称取 0.066 g 过硫酸钾于 100 mL 容量瓶中,用超纯水定容备用;将溶液 1 和溶液 2 混合摇匀(1:1, v:v),室温避光反应 12~16 h,然后用 50% 乙醇稀释至其在波长 734 nm 处吸光度在  $0.70 \pm 0.02$  之间,得到 ABTS 工作液。

参考侯珺瑶<sup>[25]</sup>的方法,取样品提取液 0.1 mL 与 5 mL 的 ABTS 溶液轻轻混匀,室温孵育 5 min 后在 734 nm 处测定吸光度  $A_S$ ;同时测定 0.1 mL 80% 甲醇溶液和 5 mL ABTS 溶液的吸光度  $A_0$ ,以及 0.1 mL 样品提取液和 5 mL 50% 无水乙醇吸光度  $A_R$ ,ABTS<sup>+</sup>自由基清除率计算如公式(6)所示:

$$E_{\text{ABTS}}(\%) = \frac{A_0 - (A_S - A_R)}{A_0} \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

式中:  $E_{\text{ABTS}}$  表示试样 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率,%;  $A_0$  表示样品提取液溶剂与 ABTS 溶液的吸光度;  $A_S$  表示样品提取液与 ABTS 溶液的吸光度;  $A_R$  表示样品提取液与 50% 无水乙醇(ABTS 溶液的溶剂)的吸光度。

## 1.3 数据处理

实验至少重复 3 次,数据以平均值 $\pm$ 标准差表示,采用 Microsoft Excel 2018 和 SPSS 软件进行数据处理和分析,采用 Origin 2023 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同单一处理技术对麸胚内源酶活性的影响

2.1.1 微波处理对内源酶活性的影响 经不同条件的微波处理后,麸胚的脂肪酶、脂肪氧化酶、过氧化物酶活性分别为 15.38~56.59、275.31~835.4、689.65~2574.60( $\text{U/g} \cdot \text{min}^{-1}$ )(图 1)。与未处理组相比,各微波处理组脂肪酶、过氧化物酶活性均显著下降( $P<0.05$ )。由于脂肪酶热稳定性差,在高温下易失活,热效应在微波处理的脂肪酶失活过程中发挥了关键作用<sup>[26-27]</sup>。当微波处理 60 s 时,脂肪氧化酶活性为 829.82( $\text{U/g} \cdot \text{min}^{-1}$ ),与未处理组相比变化不显著( $P>0.05$ ),可能是微波处理时间较短,灭活效果较差;当微波处理为 90 s 时,脂肪氧化酶活性显著下降( $P<0.05$ )。脂肪酶和过氧化物酶活性在微波 60 s、脂肪氧化酶活性在微波 90 s 后下降速率减缓,这可能是随微波时间的延长,麸胚中自由水含量降低,使其吸收微波能力下降<sup>[28]</sup>。这与张楠等<sup>[29]</sup>研究相一致,微波功率 700 W 时,随处理时间的延长,胚芽中脂肪酶、脂肪氧化酶活性先急剧下降(1 min)后下降减缓(2~5 min),微波 2 min 时胚芽脂肪酶、脂肪氧化酶活性分别降至 50%、10% 以下。基于麸胚微波稳定化的研究,可知在不使原料焦糊的情况下,处理时间越长,灭活效果越好。在本研究中,微波处理 150 s 的麸胚中三种酶活性最低,灭活效果最好,分别达到 72.82%、67.05%、73.21%,此方法可用于后续的联合处理研究。

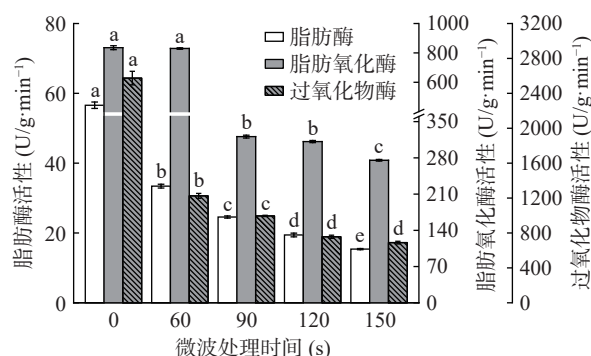


图 1 微波处理对内源酶活性的影响  
Fig.1 Effects of microwaving treatment on endogenous enzyme activity

注:同一指标不同小写字母表示各处理组间差异性显著,  $P<0.05$ ,图 2~图 4、图 6~图 7 同。

**2.1.2 常压蒸汽处理对内源酶活性的影响** 与未处理组相比,常压蒸汽处理可以对麸胚的脂肪酶、脂肪氧化酶、过氧化物酶表现出很好的灭活效果(图2)。当处理时间>6 min,未检出其过氧化物酶活性。此外,随处理时间延长,脂肪酶活性逐渐降低,10 min时脂肪酶低至未检出水平。这与孟续<sup>[13]</sup>的研究相一致,常压蒸汽处理15 min后脂肪酶和过氧化物酶的活性低至未检出水平。常压蒸汽处理使麸胚中的脂肪酶和脂肪氧化酶失活的能力源于热致变性、活性位点的破坏、水分效应和由此产生的蛋白质聚集的综合作用,共同使酶失去功能活性<sup>[30]</sup>。杜昱蒙等<sup>[10]</sup>研究发现,脂肪氧化酶在常压蒸汽处理10 min后失活率可达80%以上,这与本研究相一致。常压蒸汽处理10 min和12 min后,麸胚中残余脂肪氧化酶活性分别为152.34和152.33(U/g·min<sup>-1</sup>),脂肪氧化酶活性无明显变化。为了节约能源,减少常压蒸汽处理后物料的水分,加快后期干燥的过程,优选常压蒸汽10 min的处理方式,可用于后续联合处理研究。

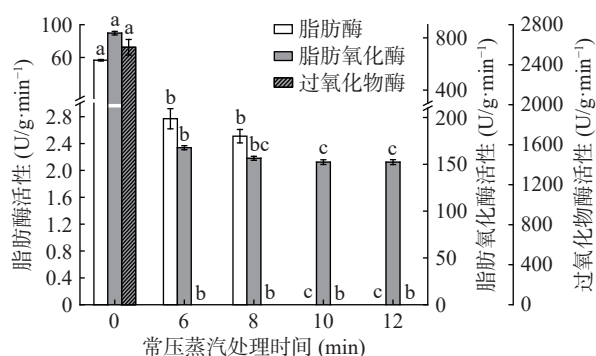


图2 常压蒸汽处理对内源酶活性的影响  
Fig.2 Effects of atmospheric steaming treatment on endogenous enzyme activity

**2.1.3 酶解处理对内源酶活性的影响** 与未处理组相比,酶解处理显著降低了麸胚脂肪酶、脂肪氧化酶、过氧化物酶活性( $P<0.05$ )(图3)。对于这种影响,本研究提出以下几种可能的机制。首先,木聚糖酶的酶解温度(50℃)在一定程度上抑制了脂肪酶和脂肪氧化酶的活性,且其酶解酸性体系破坏了脂肪酶

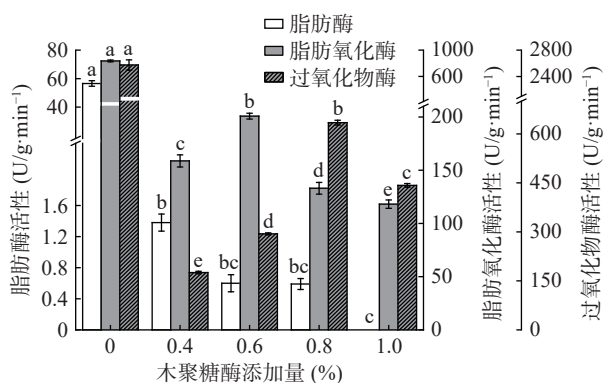


图3 木聚糖酶酶解处理对内源酶活性的影响  
Fig.3 Effects of xylanase enzymolysis on endogenous enzyme activity

和脂肪氧化酶的稳定性,使二者活性降低<sup>[13]</sup>。尽管过氧化物酶具有较强的耐热性,但低pH条件下,该酶易于发生从可逆至不可逆的变性转变<sup>[31]</sup>。因此,在低pH和50℃的酶解温度的条件下,过氧化物酶的热稳定性降低,导致其活性显著降低。其次,脂肪氧化酶的催化反应核心在于Fe<sup>2+</sup>与Fe<sup>3+</sup>之间的相互转化循环过程。在这一过程中,脂肪氧化酶中的铁离子由无活性的Fe<sup>2+</sup>转化为具有催化活性的Fe<sup>3+</sup>形态。然而,由于酶解处理显著增强了麸胚组分的抗氧化活性( $P<0.05$ ),可使铁离子的还原能力增强,从而推动使Fe<sup>3+</sup>向Fe<sup>2+</sup>转化,故脂肪氧化酶活性显著降低<sup>[31]</sup>。此外,酶解后的高温处理对于保持产品的稳定性和安全性具有至关重要的作用。使用120℃鼓风干燥箱灭活处理20 min,可有效灭活内源酶活性。Rose等<sup>[32]</sup>研究发现,在175℃空气烘箱加热麦麸25 min,脂肪酶活性降低74%。然而进一步的加热不会显著降低脂肪酶活性,这表明在干燥环境中,脂肪酶的部分活性得以保留,这可能与麦麸蛋白在干燥环境中的部分稳定性有关,不易发生变性。此发现与本研究微波和常压蒸汽处理对内源酶活性的影响结果相符,进一步证实了湿热处理在抑制内源酶活性方面的有效性。综合考虑,当木聚糖酶添加量为1%时,脂肪酶与脂肪氧化酶活性最低,因此1.0%为最佳木聚糖酶添加量,可用于后续联合处理研究。

## 2.2 不同预处理技术对麸胚内源酶灭活率的影响

由图4可以看出,常压蒸汽处理后的麸胚脂肪酶灭活率>95%,脂肪氧化酶灭活率为79.92%~81.77%,过氧化物酶灭活率为100%;酶解处理后脂肪酶灭活率>97%,脂肪氧化酶灭活率75.96%~85.86%,过氧化物酶灭活率为75.35%~93.18%;然而微波处理对三种酶灭活效果相对较低,分别为40.94%~72.82%、0.68%~67.05%、52.42%~73.21%。综合比较,酶解处理对脂肪酶与脂肪氧化酶的灭活效果优于常压蒸汽处理与微波处理;而过氧化物酶的最佳灭活效果则通过常压蒸汽处理实现的,其次是酶解处理,而微波处理效果最弱。基于这些单一处理的

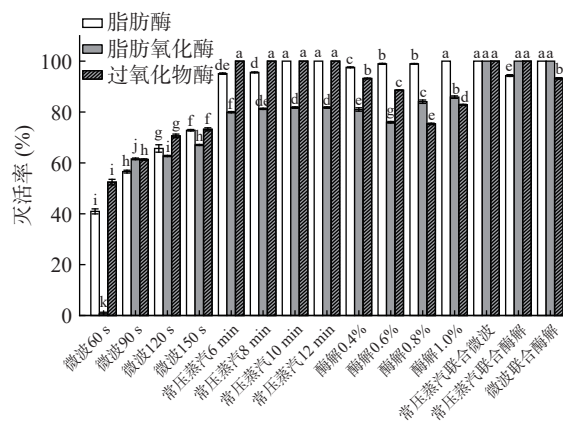


图4 不同预处理技术对麸胚内源酶灭活率的对比  
Fig.4 Comparison of inactivation rates of endogenous enzymes in wheat bran-germ using different pretreatment techniques



佳条件,本研究进一步采用两两组合的联合处理方法应用于麸胚预处理。在常压蒸汽联合微波处理组中,三种酶活性均未被检出,灭活率达到 100%;在常压蒸汽联合酶解处理组中,仅检测出少量脂肪酶活性,其灭活率达到 94.34%,而脂肪氧化酶和过氧化物酶的灭活率均达到 100%;在微波联合酶解处理组中,仅检测出少量过氧化物酶活性,其灭活率达到 93.22%,其余两种酶的灭活率均达到 100%。综上可知,联合处理技术对内源酶的灭活效果优于单一处理。

2.3 不同预处理技术对麸胚色泽的影响

经过不同预处理后的麸胚色泽不仅对产品外观有着直接影响,还与产品的感官属性、营养成分、加

工品质、食用品质以及市场接受度息息相关,因此色泽是评价产品特性的关键指标。图 5 展示了不同预处理条件下的麸胚外观,表 1 为不同处理条件下麸胚的色度值。

结合图 5 和表 1 可知,新鲜未处理的麸胚呈现出浅黄色。与未处理组相比,微波处理对麸胚  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 影响较小,这一发现与杨磊<sup>[19]</sup>和 Rose 等<sup>[32]</sup>的研究结果一致。经常压蒸汽处理的麸胚呈深黄色,这可能是在高温环境下,麸胚中蛋白质和还原糖发生了美拉德反应,使得麸胚颜色加深<sup>[33]</sup>。常压蒸汽联合微波处理的麸胚  $L^*$ 显著小于未处理组, $a^*$ 和  $b^*$ 显著大于未处理组( $P<0.05$ ),可能是在热处理条件下,麸胚中黄酮类化合物的羟基被氧化成羰基,导致麸胚的颜色加深<sup>[34]</sup>。酶解处理、常压蒸汽联合酶解、微波联合酶解处理的麸胚  $L^*$ 显著小于未处理组,而  $a^*$ 显著大于未处理组( $P<0.05$ ),这可能是由于酶解作用后酚类物质含量增加,这些酚类物质具有较强的氧化性,在酶(多酚氧化酶)的作用下发生酶促褐变,导致麸胚的颜色变暗<sup>[35]</sup>。

2.4 不同预处理技术对麸胚总酚含量的影响

酚类化合物作为麸胚中主要的抗氧化成分,具有良好的抗氧化性和自由基清除能力<sup>[36]</sup>。由图 6 可知,未处理麸胚中总酚含量较高,为 7.54 mg GAE/g。这是因为小麦籽粒中的酚酸类抗氧化物质主要存在于麸胚部分<sup>[37]</sup>。在对麸胚采取的几种预处理中,微波处理组与未处理组的麸胚总酚含量相近,这可能是因为使用的微波功率偏低,未能有效破坏细胞壁结构,导致与细胞壁结合的不溶性酚酸未能充分释放<sup>[37]</sup>。而常压蒸汽处理显著降低了总酚含量( $P<0.05$ ),这可能是因为随着处理时间的增加,热蒸汽会使热不稳定的营养素及酚类等抗氧化物质降解,降低所加工产品的营养价值<sup>[38]</sup>。酶解处理则显著提高了总酚含量( $P<0.05$ ),原因可能是木聚糖酶的酶解作用,导致细胞膜和细胞壁被破坏,促进细胞内酚酸的释放<sup>[39]</sup>。麸胚经联合处理后,微波联合酶解处理组总酚含量最高,为 18.1 mg GAE/g,与未处理麸胚总酚含量相比,

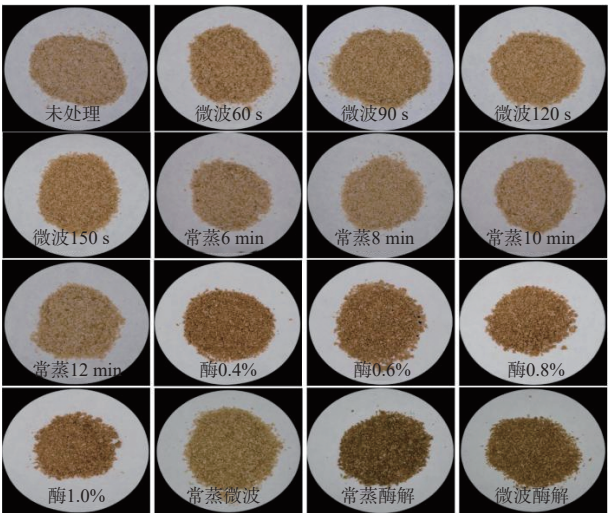


图 5 不同预处理后麸胚的外观

Fig.5 Appearance of wheat bran-germ after different pretreatments

表 1 不同预处理后麸胚的色度值

Table 1 Chromaticity value of wheat bran-germ after different pretreatments

处理方式	$L^*$	$a^*$	$b^*$
未处理	69.78±0.39 <sup>a</sup>	6.02±0.21 <sup>g</sup>	18.97±0.51 <sup>de</sup>
微波60 s	70.22±0.38 <sup>a</sup>	5.81±0.13 <sup>g</sup>	18.84±0.70 <sup>e</sup>
微波90 s	69.75±0.59 <sup>a</sup>	5.84±0.21 <sup>g</sup>	19.36±0.17 <sup>cde</sup>
微波120 s	69.11±0.46 <sup>b</sup>	5.95±0.21 <sup>g</sup>	19.31±0.39 <sup>cde</sup>
微波150 s	69.07±0.23 <sup>b</sup>	6.01±0.11 <sup>g</sup>	19.61±0.53 <sup>cd</sup>
常压蒸汽6 min	65.81±0.37 <sup>c</sup>	6.82±0.12 <sup>de</sup>	21.62±0.55 <sup>b</sup>
常压蒸汽8 min	65.98±0.3 <sup>c</sup>	6.85±0.21 <sup>de</sup>	22.20±0.5 <sup>ab</sup>
常压蒸汽10 min	65.63±0.29 <sup>c</sup>	7.00±0.18 <sup>cd</sup>	22.49±0.49 <sup>a</sup>
常压蒸汽12 min	64.46±0.17 <sup>d</sup>	6.97±0.18 <sup>cd</sup>	21.78±0.36 <sup>b</sup>
酶解0.4%	53.66±0.71 <sup>i</sup>	7.37±0.22 <sup>b</sup>	16.74±0.67 <sup>f</sup>
酶解0.6%	54.36±0.22 <sup>h</sup>	6.65±0.14 <sup>ef</sup>	16.23±0.48 <sup>fg</sup>
酶解0.8%	54.57±0.74 <sup>h</sup>	6.52±0.16 <sup>f</sup>	15.87±0.54 <sup>g</sup>
酶解1%	55.25±0.63 <sup>g</sup>	6.39±0.18 <sup>f</sup>	16.04±0.33 <sup>fg</sup>
常压蒸汽联合微波	63.53±0.54 <sup>e</sup>	7.11±0.15 <sup>c</sup>	22.15±0.17 <sup>ab</sup>
常压蒸汽联合酶解	52.60±0.34 <sup>j</sup>	6.50±0.24 <sup>f</sup>	16.46±0.47 <sup>fg</sup>
微波联合酶解	56.87±0.70 <sup>f</sup>	7.92±0.19 <sup>a</sup>	19.74±0.08 <sup>c</sup>

注: 同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

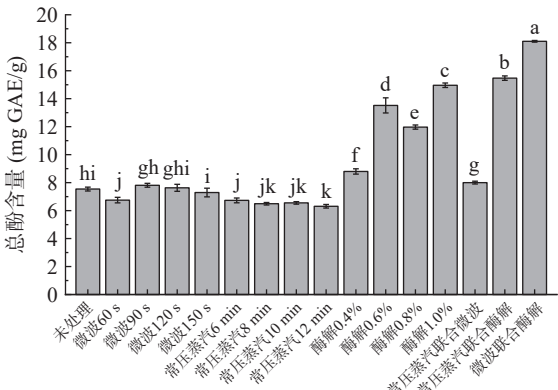


图 6 不同预处理技术对麸胚总酚含量的影响

Fig.6 Effect of different pretreatment techniques on the total phenolic content of wheat bran-germ

增加了 1.40 倍,这可能是微波与木聚糖酶联合作用,更有效地破坏了细胞膜和细胞壁,使酚酸得到充分释放。常压蒸汽联合酶解处理组总酚含量次之,为 15.47 mg GAE/g,比未处理麸胚总酚含量增加 1.05 倍。常压蒸汽联合微波处理组总酚含量与未处理组、微波处理组总酚含量相近。这与杨磊<sup>[19]</sup>研究结果相一致,热处理一方面会使细胞组分分解释放产生酚类物质,但另一方面也会使总酚(酚酸)中的酯键和糖苷键发生断裂,导致酚类物质变化不大。相比常压蒸汽联合微波处理,常压蒸汽联合酶解处理与微波联合酶解处理在提升麸胚总酚含量上展现出更显著的效果。

## 2.5 不同预处理技术对麸胚抗氧化活性的影响

ABTS<sup>+</sup>与 DPPH 自由基的清除率变化能直观反映出抗氧化活性强弱,自由基清除率越高,其抗氧化活性越强。由图 7 可知,经不同预处理技术处理后的麸胚,其 ABTS<sup>+</sup>与 DPPH 自由基清除率表现出显著的差异。与未处理组相比,酶解处理组表现出最强的抗氧化活性,微波处理组次之,而常压蒸汽处理组的效果较弱。对于样品总酚含量与抗氧化活性是否成正相关,目前说法不一。连彩霞<sup>[40]</sup>认为脱脂麦胚提取物的总酚含量和抗氧化性之间无相关性,而 Beta 等<sup>[41]</sup>则认为小麦及小麦的各组分所含的总酚含量和抗氧化活性之间具有较高的正相关。从本实验结果可知,不同预处理方式所得的麸胚的抗氧化性和总酚含量关系较为复杂。在微波处理过程中, DPPH 自由基清除率随时间延长呈现先增后减的变化趋势,与总酚含量变化一致,这可以通过总酚含量与抗氧化能力之间的强相关性来解释<sup>[42]</sup>。然而,在酶解处理过程中,随着木聚糖酶添加量的增加,ABTS<sup>+</sup>与 DPPH 自由基清除率随木聚糖酶添加量增加而持续上升,这与其总酚含量的波动变化趋势并不完全一致。这表明麸胚中还含有其它非酚类抗氧化剂(如美拉德反应产物),也可能有助于麸胚的抗氧化活性<sup>[43]</sup>。当木聚糖酶添加量为 1% 时,ABTS<sup>+</sup>与 DPPH 自由基清除率达到最高,为 83.31% 和 92.50%,分别比对

照组提高了 0.85 倍和 0.67 倍,这与孟续<sup>[13]</sup>的研究结果相一致,显示出酶解处理显著提高了 ABTS<sup>+</sup>与 DPPH 自由基清除率。在常压蒸汽处理时,ABTS<sup>+</sup>与 DPPH 自由基清除率均随处理时间延长有所上升。当处理时间为 10~12 min,ABTS<sup>+</sup>与 DPPH 自由基清除率变化不明显,分别为 51%~53% 和 57%~58%。在联合处理方面,微波联合酶解处理组的总酚含量最高,为 18.1 mg GAE/g,且抗氧化性最强,ABTS<sup>+</sup>与 DPPH 自由基清除率分别为 91.13% 和 91.79%。而常压蒸汽联合微波处理组总酚含量最低(8 mg GAE/g),且抗氧化活性也最低,ABTS<sup>+</sup>与 DPPH 自由基清除率分别为 53.15% 和 50.28%。由此可知,联合处理麸胚的总酚含量和抗氧化活性之间具有正相关性。

## 3 结论

本研究发现不同麸胚预处理技术在酶活性、总酚含量及抗氧化活性方面呈现出显著差异( $P < 0.05$ )。在内源酶灭活效果上,常压蒸汽处理组与酶解处理组表现优于微波处理组,相较于单一预处理,联合处理对麸胚中三种内源酶的灭活效果更突出。在色泽方面,微波处理后的麸胚色泽与原料最接近,其次是常压蒸汽处理;而酶解处理、微波联合酶解处理以及常压蒸汽联合酶解处理均导致麸胚色泽不同程度的加深。在总酚含量及抗氧化活性方面,只有酶解处理的麸胚得到显著提升,其它两种单一预处理技术对麸胚的总酚含量和抗氧化活性没有明显改善。此外,常压蒸汽联合酶解或微波联合酶解处理技术能显著提升麸胚总酚含量及抗氧化活性,尤其是微波联合酶解处理的效果最为显著。微波酶解联合处理技术不仅具有显著的协同效应,并且更加环保。在可行性方面,该技术设备成熟、操作流程标准化,并有一定的优化空间。在经济性方面,尽管初始投资较高,但长期运行成本较低且经济效益显著。因此本研究将微波联合酶解预处理技术被视为优选方案,在未来的研究中应进一步完善工艺优化和过程控制,从而推动该技术的广泛应用和市场接受度。

© The Author(s) 2025. 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] BHAT N A, WANI I A, HAMDANI A M, et al. Effect of extrusion on the physicochemical and antioxidant properties of value added snacks from whole wheat (*Triticum aestivum* L.) flour[J]. *Food Chemistry*, 2019, 276: 22–32.
- [2] HU Q, CHEN Y Y, JIAO Q Y, et al. Polyphenolic compounds from *Malus hupehensis* and their free radical scavenging effects[J]. *Natural Product Research*, 2018, 32(18): 2152–2158.
- [3] 贾婉婷. 全麦挂面脂质酸败的抑制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [JIA W T. Study on inhibition of lipid rancidity in dried whole wheat noodles[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

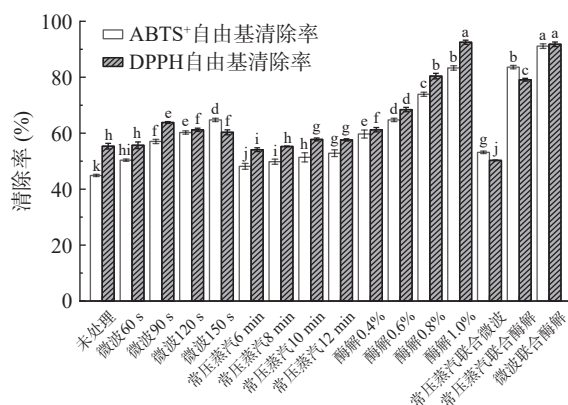


图 7 不同预处理技术对麸胚抗氧化活性的影响

Fig.7 Effect of different pretreatment techniques on the antioxidant activity of wheat bran-germ



- [4] 刘远晓,李萌萌,卞科,等.热处理在小麦储藏与加工中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(13): 326-333. [LIU Y X, LI M M, BIAN K, et al. Recent progress in the application of heat treatment in wheat storage and processing[J]. *Food Science*, 2019, 40(13): 326-333.]
- [5] 李合,蔡红燕,沈汪洋,等.挤压膨化技术在麦麸加工中应用及研究进展[J]. *食品工业*, 2020, 41(11): 271-274. [LI H, CAI H Y, SHEN W Y, et al. Application and research progress of extruding technology in wheat bran processing[J]. *Food Industry*, 2020, 41(11): 271-274.]
- [6] XUE Y, CUI X, ZHANG Z, et al. Effect of  $\beta$ -endoxylanase and  $\alpha$ -arabinofuranosidase enzymatic hydrolysis on nutritional and technological properties of wheat brans[J]. *Food Chemistry*, 2020, 302: 125332.
- [7] 叶文俊,汪丽萍,叶国栋,等.不同改性麸皮回填全麦粉馒头品质特性的比较[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(10): 20-26. [YE W J, WANG L P, YE G D, et al. Comparative study on the quality of whole wheat steamed bread backfilled with different modified bran[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(10): 20-26.]
- [8] 张岩岩,李雪杰,张剑,等.微波辐照对直接研磨法全麦粉的储藏稳定性与品质的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2020, 54(3): 506-512. [ZHANG Y Y, LI X J, ZHANG J, et al. The effect of microwave irradiation on the storage stability and quality of direct grinding whole wheat flour[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, 54(3): 506-512.]
- [9] 赵梅,韩传武,宋俊男,等.微波处理对全麦粉理化性质及全麦鲜湿面品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(1): 18-23. [ZHAO M, HAN C W, SONG J N, et al. Effect of microwave treatment on the physicochemical properties of whole wheat flour and qualities of fresh noodles[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(1): 18-23.]
- [10] 杜昱蒙,任国宝,任晨刚,等.常压蒸汽处理对全麦粉脂肪相关酶活性及微生物的影响[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(6): 156-162. [DU Y M, REN G B, REN C G, et al. Research on the effects of atmospheric steam treatment on lipase related enzyme activities and microorganisms of whole wheat flour[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(6): 156-162.]
- [11] 毛蓼兰.麦麸生物改性及其在全麦馒头中的应用[D].南京:南京农业大学, 2020. [MAO M L. Biological modification of wheat bran and its application in whole wheat steamed bread[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.]
- [12] QU C, WANG H, LIU S, et al. Effects of microwave heating of wheat on its functional properties and accelerated storage[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2017, 54(11): 3699-3706.
- [13] 孟续.预处理方式对黑小麦麸皮及其对面团品质的影响研究[D].无锡:江南大学, 2023. [MENG X. Study on the effect of pretreatment on triticale bran and its effect on the quality of dough[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
- [14] ZHUANG K, SUN Z, HUANG Y, et al. Influence of different pretreatments on the quality of wheat bran-germ powder, reconstituted whole wheat flour and Chinese steamed bread[J]. *LWT*, 2022, 161: 113357.
- [15] 汪文丽,朱晓明,刘小玲.多糖生物活性影响因素研究进展[J]. *化学与生物工程*, 2024, 41(8): 9-17. [WANG W L, ZHU X M, LIU X L. Research progress in factors influencing biological activity of polysaccharides[J]. *Chemistry Bioengineering*, 2024, 41(8): 9-17.]
- [16] 管晓,夏吉安,张好,等.抗性淀粉的性质、制备及其对慢性肾脏病的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2024, 43(1): 1-12. [GUAN X, XIA J A, ZHANG Y, et al. Properties, preparations and effects of resistant starch on chronic kidney disease[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2024, 43(1): 1-12.]
- [17] WU Y, YE G, LI X, et al. Comparison of quality characteristics of six reconstituted whole wheat flour with different modified bran[J]. *LWT*, 2022, 153: 112543.
- [18] LI M, SUN Q J, ZHU K X. Delineating the quality and component changes of whole-wheat flour and storage stability of fresh noodles induced by microwave treatment[J]. *LWT*, 2017, 84: 378-384.
- [19] 杨磊.重组全麦面粉的稳定化研究[D].无锡:江南大学, 2013. [YANG L. Study on the stability of reconstituted whole wheat flour[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.]
- [20] 张书静.改性麦麸对含麸馒头的影响及其机理探究[D].武汉:武汉轻工大学, 2022. [ZHANG S J. Effects of modified wheat bran on bran-containing steamed bread and its mechanism[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022.]
- [21] 王旭.菌酶协同发酵麦麸及其对鹅饲用价值的研究[D].扬州:扬州大学, 2023. [WANG X. Study on synergistic solid-state fermentation of wheatbran by bacteria and enzymes and its value for goose feeding[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.]
- [22] YE G, WU Y, WANG L, et al. Comparison of six modification methods on the chemical composition, functional properties and antioxidant capacity of wheat bran[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 149: 111996.
- [23] 周颖,杨震,郭晓娜,等.过热蒸汽对燕麦挂面储藏稳定性及风味的影响[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(2): 54-61. [ZHOU Y, YANG Z, GUO X N, et al. Effects of superheated steam treatment on storage stability and flavor of dried oat noodles[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(2): 54-61.]
- [24] 兆先君.超声辅助冷冻对预制调理红糖馒头面团品质的影响及作用机制研究[D].合肥:合肥工业大学, 2022. [XIAN Z J. Effect of ultrasound-assisted freezing on quality of prepared brown sugar steamed bread dough and its mechanism investigation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.]
- [25] 侯琚瑶.功能性麸皮发酵剂的研制及其在馒头中的应用[D].泰安:山东农业大学, 2023. [HOU J Y. Development of functional bran starter and its application in steamed[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023.]
- [26] SHARMA P, SHARMA N, PATHANIA S, et al. Purification and characterization of lipase by *Bacillus methylotrophicus* PS3 under submerged fermentation and its application in detergent industry[J]. *Journal, Genetic Engineering & Biotechnology*, 2017, 15(2): 369-377.
- [27] CHEN Z, LI Y, WANG L, et al. Evaluation of the possible non-thermal effect of microwave radiation on the inactivation of wheat germ lipase[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(4): e12506.
- [28] 朱松,宋善武,李进伟,等.胚芽米微波灭酶工艺[J]. *食品与生物技术学报*, 2018, 37(6): 603-609. [ZHU S, SONG S W, LI J W, et al. Study on the technology of inactivation enzyme in embryo-remaining rice by microwave[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2018, 37(6): 603-609.]
- [29] 张楠,石琳,孟继坤,等.不同处理技术对小麦胚芽钝酶效果及贮藏稳定性的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(8): 140-145. [ZHANG N, SHI L, MENG J K, et al. Effects of different technologies on enzyme deactivation and storage stability of wheat

- germs[J]. *Food Machinery*, 2021, 37(8): 140–145. ]
- [ 30 ] CHAKRABORTY S, PULIVARTHI M K, RAJ A S, et al. Inactivation of lipase and lipoxygenase in whole wheat flour using atmospheric cold plasma and steam treatments: Kinetics, mechanism, and impact on its compositional properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2024, 117: 103889.
- [ 31 ] 卞科, 郑学玲. 谷物化学[M]. 科学出版社, 2017. [ BIAN K, ZHENG X L. Cereal chemistry[M]. Science Press, 2017. ]
- [ 32 ] ROSE D J, OGDEN L V, DUNN M L, et al. Enhanced lipid stability in whole wheat flour by lipase inactivation and antioxidant retention[J]. *Cereal Chemistry*, 2008, 85(2): 218–223.
- [ 33 ] ZHANG X, TAO N, WANG X, et al. The colorants, antioxidants, and toxicants from nonenzymatic browning reactions and the impacts of dietary polyphenols on their thermal formation[J]. *Food Funct*, 2014, 6(2): 345–355.
- [ 34 ] 吴佳, 王燕, 陈星. 麦胚稳定化处理的研究[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(29): 134–142. [ WU J, WANG Y, CHEN X. Stabilization treatment of wheat germ[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(29): 134–142. ]
- [ 35 ] 白宇皓, 李超, 杨志国, 等. 梨多酚氧化酶特性与酶促褐变抑制研究进展[J]. *食品科技*, 2022, 47(2): 75–81. [ BAI Y H, LI C, YANG Z G, et al. Advances in polyphenol oxidase properties and enzymatic browning inhibition of pear[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(2): 75–81. ]
- [ 36 ] HU Y, WANG L, LI Z. Superheated steam treatment on wheat bran: Enzymes inactivation and nutritional attributes retention[J]. *LWT*, 2018, 91: 446–452.
- [ 37 ] 冯健超, 许倍铭, 江薛丽, 等. 小麦籽粒不同层次酚类物质与抗氧化活性差异及氮肥调控效应[J]. *作物学报*, 2022, 48(3): 704–715. [ FENG J C, XU B M, JIANG X L, et al. Distribution of phenolic compounds and antioxidant activities in layered grinding wheat flour and the regulation effect of nitrogen fertilizer application[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(3): 704–715. ]
- [ 38 ] 叶国栋, 汪丽萍, 沈汪洋, 等. 麸皮稳定化处理方式对全麦粉品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(6): 15–21. [ YE G D, WANG L P, SHEN W Y, et al. Effect of bran stabilization on the quality of whole wheat flour[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(6): 15–21. ]
- [ 39 ] 何若男, 刘思师, 陈雅欣, 等. 嗜热木聚糖酶的研究与优化进展[J]. *精细与专用化学品*, 2023, 31(8): 16–24. [ HE R N, LIU S S, CHEN Y X, et al. Progress in the research and optimization of thermophilic xylanase[J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2023, 31(8): 16–24. ]
- [ 40 ] 连彩霞. 脱脂麦胚提取物抗氧化、抗肿瘤活性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012. [ LIAN C X. Study on antioxidant and anticancer activity of extracts from defatted wheat germ[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012. ]
- [ 41 ] BETA T, NAM S, DEXTER J E, et al. Phenolic content and antioxidant activity of pearled wheat and roller-milled fractions[J]. *Cereal Chemistry*, 2005, 82(4): 390–393.
- [ 42 ] VERMA B, HUCL P, CHIBBAR R N. Phenolic acid composition and antioxidant capacity of acid and alkali hydrolysed wheat bran fractions[J]. *Food Chemistry*, 2009, 116(4): 947–954.
- [ 43 ] LIU L, ZHAO M, LIU X, et al. Effect of steam explosion-assisted extraction on phenolic acid profiles and antioxidant properties of wheat bran[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(10): 3484–3491.