

# 乳酸菌固态发酵过程中麦麸组分的动态变化

陈蒙慧, 江迪, 关二旗, 李萌萌, 刘远晓, 张凯歌, 卞科\*

(河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 麦麸是小麦加工的主要副产物, 营养丰富且产量大, 采用乳酸菌处理麦麸可提高其附加值。为明确乳酸菌发酵对麦麸各组分的影响, 作者采用植物乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、戊糖片球菌和布氏乳杆菌分别对麦麸进行固态发酵, 在 48 h 内每隔 8 h 取样, 分析可溶性膳食纤维、粗蛋白、淀粉、总酚、植酸等成分的质量分数及 DPPH 自由基清除能力的动态变化。结果表明, 在麦麸基质中, 4 株乳酸菌在 24 h 内生长较为迅速; 麦麸经乳酸菌发酵后可溶性膳食纤维质量分数显著提高, 其中布氏乳杆菌发酵 48 h 后可溶性膳食纤维质量分数由 4.72% 增加至 6.58%; 随着发酵时间的增加, 麦麸中淀粉质量分数逐渐降低, 粗蛋白质量分数先增加后降低最后趋于稳定; 植物乳杆菌在提高麦麸多酚质量分数方面有更好的效果, 多酚质量分数由 1.34 mg/g 增加至 3.86 mg/g, 麦麸抗氧化活性显著增加; 此外, 乳酸菌发酵麦麸可显著降低其植酸质量分数。综合而言, 植物乳杆菌和布氏乳杆菌在提高麦麸的营养特性方面具有较好的效果, 可有效改善麦麸的综合利用价值。

**关键词:** 麦麸; 乳酸菌; 固态发酵; 可溶性膳食纤维; 抗氧化活性

中图分类号: TS 210.9; TS 213 文章编号: 1673-1689(2024)02-0030-08 DOI: 10.12441/spyswjs.20221025002

## Dynamic Changes of Wheat Bran Components During Lactic Acid Bacteria Solid-State Fermentation

CHEN Menghui, JIANG Di, GUAN Erqi, LI Mengmeng, LIU Yuanxiao, ZHANG Kaige, BIAN Ke\*

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** As a by-product in wheat processing, wheat bran is high in output and rich in nutrition, lactic acid bacteria treatment can increase its added value. To clarify the effects of lactic acid bacteria fermentation on the components of wheat bran, solid fermentation of wheat bran was performed using *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus rhamnosus*, *Pediococcus pentosaceus*, and *Lactobacillus buchneri*, respectively. Wheat bran was sampled at an interval of 8 h, the dynamic changes of soluble dietary fiber, crude protein, starch, total phenol, phytic acid and DPPH free radical scavenging capacity during wheat bran fermentation were studied. The results showed that four lactic acid bacteria grew rapidly in wheat bran substrate within 24 h. The content of soluble dietary fiber in wheat bran increased significantly during the lactic acid bacteria fermentation, the content of soluble dietary fiber increased from 4.72% to 6.58% after 48 h fermentation by *L. buchneri*. With the

收稿日期: 2022-10-25 修回日期: 2022-11-15

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目(2021YFD2100903); 河南省小麦产业技术体系构建项目(S2017-01-G06)。

\* 通信作者: 卞科(1960—), 男, 硕士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事谷物科学及粮食产后质量安全与高效利用等研究。

E-mail: kebian@163.com

increase of fermentation time, the content of starch in wheat bran gradually decreased. While, the content of crude protein increased firstly, then decreased slightly, and finally went to constant. *L. plantarum* was more efficient in increasing polyphenol content than the other strains; the polyphenol content could be increased from 1.34 mg/g to 3.86 mg/g, and the antioxidant activity of wheat bran increased significantly. Furthermore, the phytic acid content in wheat bran can be significantly reduced. In conclusion, *L. plantarum* and *L. buchneri* used in this study are effective in improving the nutritional attributes of wheat bran. As a result, the utilization of wheat bran can be improved.

**Keywords:** wheat bran, lactic acid bacteria, solid-state fermentation, soluble dietary fiber, antioxidant activity

小麦是我国的传统粮食之一,我国小麦产量居世界前列。据国家统计局数据显示,2021年小麦总产量高达13 694.45万t。麦麸是小麦制粉过程中的主要副产物,产量约占小麦加工量的20%,年产量超2 000万t<sup>[1]</sup>。麦麸中含有丰富的膳食纤维、蛋白质、B族维生素及多酚类物质,其中膳食纤维作为“第七类营养素”,具有调节血糖水平、预防高血压、促进肠道蠕动、防治便秘、预防结肠癌等功能<sup>[2-3]</sup>,因此在全麦食品及功能性食品开发方面具有很好的应用潜力。然而,麦麸中的纤维成分占麦麸的40%~50%,其中90%以上为不溶性膳食纤维,这类纤维既不能很好与淀粉和蛋白质结合,也不易被人体吸收利用,直接添加会导致制品口感粗糙,降低消费者的接受度。同时,麦麸中的抗营养因子植酸能够螯合金属离子,易与钙、镁、锌、铁、钾等离子形成植酸盐<sup>[4]</sup>,导致矿物质的生物利用度显著降低<sup>[5]</sup>;且麦麸表面易附着真菌毒素、农药残留、重金属等有毒有害物质,对食品安全也存在潜在威胁<sup>[6]</sup>。过去麦麸常应用于酿造行业及饲料业中,在食品中应用较少。近年来,随着膳食结构日益多样化,全谷物类粗纤维制品开始受到人们的关注,成为目前研究的热点。不少研究人员通过对麦麸进行改性处理以提高麦麸的食用性及加工适应性,进而扩大其在食品中的应用范围。

目前国内外对麦麸的改性处理分为物理法、化学法和生物技术法<sup>[7]</sup>。其中生物技术法是利用酵母菌、乳酸菌、霉菌等微生物的发酵作用或添加纤维素酶、木聚糖酶等酶制剂处理麦麸<sup>[8]</sup>,使麦麸的内部结构发生改变,是目前常用的一种方法,因其安全、高效的特点而受到了广泛关注。其中,乳酸菌是一类可利用碳水化合物产乳酸的益生菌,具有调节肠道菌群平衡、调节免疫力的功能特性<sup>[9]</sup>。乳酸菌发酵

过程分泌的酶可以破坏麦麸的细胞壁结构,打破分子间的化学键,从而使各种物质游离出来<sup>[10]</sup>。Zhao等采用乳酸菌发酵麦麸后,麦麸可溶性膳食纤维及水溶性阿拉伯木聚糖(SAX)质量分数显著增加,同时抗营养因子植酸降解率显著提高<sup>[11]</sup>。王太军的研究表明,植物乳杆菌发酵麦麸后SAX、可溶性膳食纤维及总酚质量分数显著增加,此外,麦麸的持水力和保水性指数增加可改善其加工适应性<sup>[12]</sup>。Spaggiari等利用鼠李糖乳杆菌固态发酵麦麸,发酵后植酸质量分数显著降低、SAX质量分数增加近3倍,且游离酚酸质量分数显著增加、抗氧化活性增强<sup>[13]</sup>。由此可见,乳酸菌发酵麦麸是一种极具潜力的麦麸改性方法。但目前多针对单一乳酸菌的发酵效果进行研究,且对发酵过程中麦麸组分的影响尚不明确。因此,作者选用植物乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、戊糖片球菌及布氏乳杆菌4株常见乳酸菌对麦麸进行固态发酵处理,探究发酵过程中不同乳酸菌对麦麸组分的影响,为提高麦麸的利用率提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

麦麸:益海嘉里集团;植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, KM005155)、戊糖片球菌(*Pediococcus pentosaceus*, KM005149)、布氏乳杆菌(*Lactobacillus buchneri*, KY828224):由中国农业大学工学院饲料调制与加工实验室分离纯化保藏;鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*, CGMCC 1.8882):中国普通微生物种保藏管理中心。

热稳定 $\alpha$ -淀粉酶、蛋白酶、淀粉葡萄糖苷酶、福林酚、没食子酸标准品、植酸标准品:北京索莱宝科技有限公司;碳酸钠、三氯乙酸、磺基水杨酸、三氯化

铁;阿拉丁试剂有限公司;DPPH 试剂;TCI 试剂公司。

## 1.2 仪器与设备

LRH-800 生化培养箱:韶关泰宏公司;5810R 高速离心机:德国 Eppendorf 仪器有限公司;UV-2000 紫外分光光度计:尤尼柯(上海)仪器有限公司;WZZ-2S 旋光仪:上海申光仪器仪表有限公司。

## 1.3 方法

**1.3.1 乳酸菌培养** 将菌株冻存液接种至 5 mL MRS 液体培养基中,37 ℃培养 24 h,培养 2 代后转入 50 mL MRS 液体培养基中,37 ℃下培养 24 h,梯度稀释确定乳酸菌浓度,进而确定添加量。

**1.3.2 麦麸发酵** 取 50 g 麦麸,调节水分质量分数至 60%,分别设置植物乳杆菌(T1)、鼠李糖乳杆菌(T2)、戊糖片球菌(T3)、布氏乳杆菌(T4)处理组以及添加等量无菌水的对照组(CK),菌种接种量为  $1 \times 10^8$  CFU/g。将混匀后的麦麸装入 10 cm×15 cm 聚乙烯袋中,每袋 60 g,用真空包装机抽成真空并封口,于 37 ℃生化培养箱中进行厌氧发酵,分别于 8、16、24、32、40、48 h 开封取样分析。发酵后的麦麸于 45 ℃恒温干燥箱中干燥至质量恒定,粉碎后过 80 目筛备用。

**1.3.3 麦麸发酵过程中乳酸菌菌落总数的测定** 发酵麦麸开封后取 1 g 样品于玻璃试管中,加入 9 mL 无菌水混匀并进行梯度稀释。选取合适的稀释样品液 0.06 mL 于 MRS 平板上,用涂布棒涂匀,每个梯度设置 3 个平行。

**1.3.4 发酵麦麸可溶性膳食纤维质量分数的测定** 称取 5.0 g 干燥后麦麸,加入 50 mL 去离子水,混匀后加入质量分数 1%的热稳定  $\alpha$ -淀粉酶,90 ℃恒温水浴 30 min 后加入质量分数 2%蛋白酶,混合均匀后于 60 ℃恒温水浴 30 min;调节 pH 至 4.5,加入质量分数 2%的淀粉葡萄糖苷酶于 60 ℃恒温水浴 30 min。冷却至室温,5 000 g 离心 10 min,上清液中加入 4 倍体积预热至 60 ℃的体积分数 95%乙醇溶液,沉淀 2 h 后过滤,并分别用体积分数 78%的乙醇溶液、体积分数 95%乙醇溶液冲洗沉淀 2 次,沉淀于 105 ℃烘干至质量恒定。

$$F_s = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $F_s$  为可溶性膳食纤维质量分数,%; $m$  为恒定质量后的沉淀质量,g; $M$  为质量恒定后的麦麸质量,g。

**1.3.5 发酵麦麸淀粉质量分数的测定** 发酵麦麸淀粉质量分数按照 GB/T 20378—2006 测定。

**1.3.6 发酵麦麸粗蛋白质质量分数的测定** 发酵麦麸蛋白质质量分数按照 GB 5009.5—2016 测定。

## 1.3.7 发酵麦麸总酚质量分数的测定

1)提取 准确称取 2.0 g 干燥麦麸于 100 mL 离心管中,加入 50 mL 体积分数为 80%的甲醇溶液后于 45 ℃恒温磁力搅拌器中提取 1 h。冷却至室温后 4 000 g 离心 10 min,收集上清液并于 4 ℃冰箱保存待测。

2)测定 采用福林酚比色法。将提取液稀释 3 倍后吸取 1 mL 于 10 mL 容量瓶中,加入 0.5 mL 福林酚试剂,混匀后加入 1.5 mL 质量分数 15%的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液,用蒸馏水定容后摇匀,避光静置 1 h,在 765 nm 处测定反应液的吸光度,以体积分数 80%的甲醇溶液作为空白对照。以没食子酸作为标品,绘制没食子酸质量分数和吸光度的标准曲线,根据标准曲线进行计算。总酚质量分数(mg/g)以每克麦麸干质量含没食子酸质量计。

**1.3.8 发酵麦麸 DPPH 自由基清除能力的测定** 准确称取 19.716 mg DPPH 溶于无水乙醇,定容至 250 mL 配成浓度为 0.2 mmol/L 的 DPPH 溶液。吸取 2 mL 稀释 3 倍后的多酚提取液于 5 mL 离心管中,加入 2 mL DPPH 溶液混匀,避光静置 30 min 后通过 0.22  $\mu\text{m}$  的滤膜,在 517 nm 处测定吸光度。同时,测定对照组(2.0 mL 样品溶液+2.0 mL 无水乙醇)及空白组(2.0 mL DPPH 溶液+2.0 mL 无水乙醇)的吸光度,并根据下式计算样品 DPPH 自由基清除率:

$$K = \left( 1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $K$  为 DPPH 自由基清除率,%; $A_1$  为 2 mL 样品溶液与 2 mL DPPH 溶液混合液的吸光度; $A_2$  为 2 mL 样品溶液与 2 mL 无水乙醇混合溶液的吸光度; $A_0$  为 2 mL 无水乙醇与 2 mL DPPH 溶液的混合溶液的吸光度。

## 1.3.9 发酵麦麸植酸质量分数的测定

1)提取 准确称取 0.5 g 干燥麦麸于 100 mL 离心管中,加入 50 mL 含有体积分数 1.3% 的 HCl、质量分数为 10%的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液,磁力搅拌提取 1 h,提取液在 5 000 g 离心 10 min,上清液于 4 ℃冰箱保存待测。

2)测定 参照严静等的方法<sup>[14]</sup>。



## 1.4 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics for Windows (Version 16.0) 软件进行单因素方差分析,并做 Duncan 多重比较,显著水平设置为  $P<0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 麦麸发酵过程中乳酸菌菌落总数

由图 1 可知,乳酸菌数量随着发酵时间的延长显著增加,4 株乳酸菌在麦麸基质中生长趋势基本一致。在厌氧条件下,乳酸菌能够利用麦麸中的淀粉等碳水化合物生成乳酸降低基质的 pH 进而抑制杂菌的生长。麦麸初始乳酸菌数量达到  $1\times 10^6$  以上,对照组与处理组菌落总数在 24 h 内显著增加 ( $P<0.05$ ),24 h 后菌落总数无显著差异 ( $P>0.05$ ),其中对照组乳酸菌菌落总数在整个发酵期间略低于处理组。

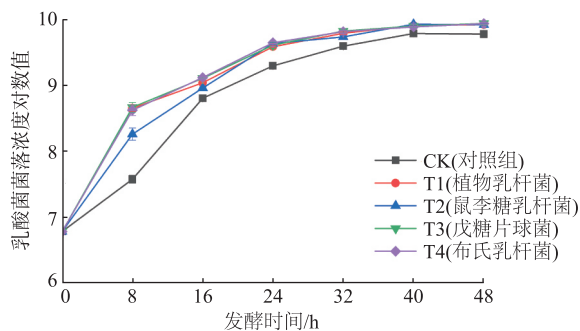


图 1 发酵过程中乳酸菌菌落总数

Fig. 1 Dynamic changes of lactic acid bacteria count during anaerobic fermentation of wheat bran

### 2.2 发酵过程中可溶性膳食纤维质量分数的变化

由图 2 可知,麦麸膳食纤维的质量分数随着发酵时间的延长而显著增加,乳酸菌发酵可显著增加麦麸可溶性膳食纤维的质量分数 ( $P<0.05$ )。Zhao 等用保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌复合菌发酵麦麸,发现麦麸中可溶性膳食纤维质量分数由 4.43% 增加至 8.36%<sup>[11]</sup>,认为可溶性膳食纤维质量分数增加可能是因为乳酸菌发酵可产生降解大分子纤维的水解酶。乳酸菌在生长过程中产生的纤维素水解酶如  $\beta$ -葡聚糖酶和木聚糖酶可以水解麦麸纤维素成分的  $\beta$ -糖苷键,破坏麦麸的细胞壁<sup>[15]</sup>,从而增加麦麸可溶性膳食纤维的质量分数;其次,麦麸自身的微生物体系较为复杂,发酵过程中麦麸基质的变化也可激活麦麸中存在的酶,促进麦麸的降解<sup>[16]</sup>。此外,乳酸菌产乳酸后基质 pH 降低,在酸性环境下糖苷键可断裂产生新的还原性末端,降低了纤维类大分

子的聚合度,同时也提高了水溶性膳食纤维的质量分数<sup>[17]</sup>。与对照相比,T1、T2 处理组对膳食纤维质量分数提高效果较为显著 ( $P<0.01$ ),发酵 48 h 后分别达到 6.53% 和 6.58%。张书庆等分别采用短乳杆菌及植物乳杆菌发酵麦麸,发酵麦麸中可溶性膳食纤维的质量分数随着发酵时间的增加而增加<sup>[18]</sup>,与本研究结果一致。

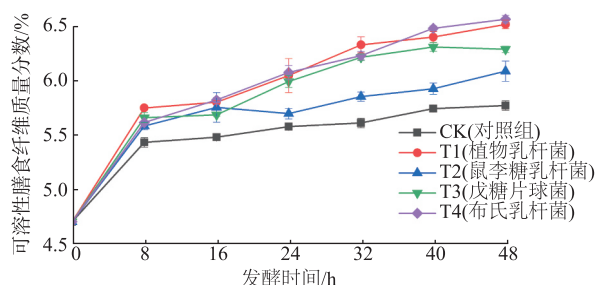


图 2 麦麸发酵过程中可溶性膳食纤维质量分数的变化

Fig. 2 Dynamic changes of soluble dietary fiber mass concentration during anaerobic fermentation of wheat bran

### 2.3 发酵过程中淀粉质量分数的变化

由图 3 可知,随着发酵时间的延长,麦麸淀粉质量分数显著降低 ( $P<0.05$ )。与对照组相比,发酵 8 h 后,乳酸菌处理组中淀粉质量分数显著降低 ( $P<0.05$ )。发酵 40 h 后各组中的淀粉质量分数变化无显著差异,其变化趋势与乳酸菌菌落总数变化趋势保持一致。乳酸菌在厌氧的条件下迅速增殖成为麦麸发酵过程中的优势菌群<sup>[19]</sup>,在生长过程中消耗麦麸中的碳水化合物,将碳水化合物转化为乳酸、乙酸等有机酸。在整个发酵组中,对照组的淀粉质量分数始终高于其他乳酸菌处理组,附生的乳酸菌是麦麸自然厌氧发酵过程中的重要微生物种群,其效果受到乳酸菌多样性、数量以及发酵活性的影响。本研究中,随着发酵时间的延长,最终对照组乳酸菌浓度达到  $1\times 10^9$  CFU/g 以上,但其发酵活性较差,对淀粉的利用较低,其淀粉质量分数高于处理组。

### 2.4 发酵过程中粗蛋白质量分数的变化

由表 1 可知,各组麦麸经发酵后蛋白质质量分数显著增加 ( $P<0.05$ ),这与 Coda 等的研究结果一致<sup>[20]</sup>。随着发酵时间的延长,发酵麦麸的粗蛋白质量分数在 8 h 内显著增加,8~16 h 呈下降趋势,16~24 h 呈上升趋势,24 h 后麦麸粗蛋白质量分数无显著变化 ( $P>0.05$ )。麦麸发酵过程中粗蛋白质量分数的变化

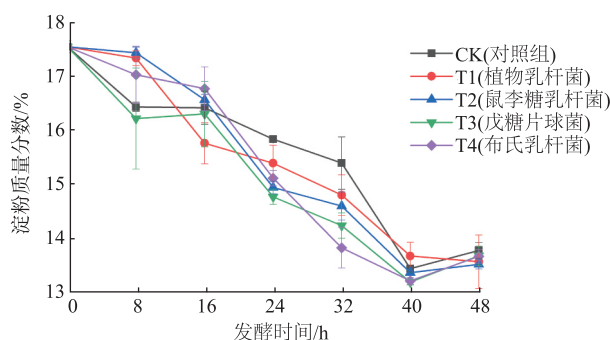


图3 麦麸发酵过程中淀粉质量分数的变化

Fig. 3 Dynamic changes of starch mass concentration during anaerobic fermentation of wheat bran

是微生物消耗蛋白质和菌体蛋白质的共同作用结果,在最初的8 h,乳酸菌处于生长初期,代谢较为旺盛,可消耗麦麸中的蛋白质,因此麦麸中的蛋白

质质量分数显著降低;发酵中期乳酸菌生长进入对数期,乳酸菌大量增殖,同时也可产生较多的菌体蛋白质<sup>[21]</sup>,从而增加了基质中蛋白质的质量分数;发酵后期乳酸菌生长进入稳定期,乳酸菌的生长及衰亡基本持平,因此蛋白质质量分数无显著差异。岳碧娥等在利用植物乳杆菌、乳酸片球菌和布氏乳杆菌进行全株玉米青贮时发现全株玉米中的粗蛋白质量分数出现小幅度下降,这是因为基质中存在的霉菌将蛋白质类物质转化为了无机氨态氮<sup>[22]</sup>。有研究者用自然发酵和细菌发酵麦麸,发现麦麸的蛋白质质量分数增加,但随着发酵时间的增加,发酵麦麸的蛋白质质量分数呈降低趋势<sup>[23]</sup>。因此,发酵麦麸蛋白质质量分数的变化可能与菌株的发酵类型有关,其具体机制有待进一步研究。

表1 发酵过程中粗蛋白质质量分数的变化

Table 1 Dynamic changes of crude protein mass concentration during anaerobic fermentation of wheat bran

发酵时间/h	粗蛋白质质量分数/%				
	CK(对照)	T1(植物乳杆菌)	T2(鼠李糖乳杆菌)	T3(戊糖片球菌)	T4(布氏乳杆菌)
0	16.32±0.01 <sup>BC</sup>	16.32±0.01 <sup>AB</sup>	16.32±0.01 <sup>B</sup>	16.32±0.01 <sup>CD</sup>	16.32±0.01 <sup>C</sup>
8	16.18±0.22 <sup>Ca</sup>	16.1±0.07 <sup>Ba</sup>	16.28±0.11 <sup>Ba</sup>	16.4±0.08 <sup>BCa</sup>	16.34±0.26 <sup>BCa</sup>
16	16.46±0.22 <sup>ABCa</sup>	16.34±0.07 <sup>ABa</sup>	16.28±0.04 <sup>Ba</sup>	16.27±0.05 <sup>Da</sup>	16.46±0.14 <sup>ABCa</sup>
24	16.60±0.04 <sup>ABa</sup>	16.54±0.17 <sup>Aa</sup>	16.52±0.09 <sup>Aa</sup>	16.45±0.08 <sup>BCa</sup>	16.59±0.01 <sup>ABCa</sup>
32	16.65±0.11 <sup>Aa</sup>	16.48±0.17 <sup>Aab</sup>	16.56±0.06 <sup>Aab</sup>	16.42±0.00 <sup>BCb</sup>	16.62±0.03 <sup>Aab</sup>
40	16.75±0.03 <sup>Aa</sup>	16.45±0.06 <sup>Aa</sup>	16.53±0.04 <sup>Aa</sup>	16.46±0.09 <sup>Ba</sup>	16.62±0.06 <sup>Aa</sup>
48	16.71±0.26 <sup>Aa</sup>	16.45±0.08 <sup>Aa</sup>	16.53±0.04 <sup>Aa</sup>	16.59±0.02 <sup>Aa</sup>	16.6±0.00 <sup>ABa</sup>

注:同列不同大写字母间差异显著( $P<0.05$ ),同行不同小写字母间差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.5 发酵过程中总酚质量分数及其抗氧化活性的变化

不少研究表明,麦麸发酵后可显著增加其酚类物质质量分数<sup>[24-25]</sup>。由图4可知,随着发酵时间的延长,麦麸总酚质量分数显著增加( $P<0.05$ )。发酵前麦麸中多酚质量分数为1.34 mg/g,在发酵的0~24 h内乳酸菌生长较为迅速,更多的乳酸菌分泌酶作用于麦麸细胞壁结构,打破分子间的连接键,从而增加酚类物质的质量分数<sup>[26]</sup>,多酚质量分数增加速度较快;发酵48 h后,麦麸中多酚类物质的质量分数增加约2倍;其中处理组中T1、T3、T4组发酵麦麸中多酚质量分数略高于对照组及T2组,分别为3.86 mg/g、3.67 mg/g及3.68 mg/g。此外,麦麸中的酚类化合物更多以结合态形式存在<sup>[27]</sup>,主要以共价键形式存在于膳食纤维基质中<sup>[28]</sup>,通过微生物的发酵作用可以有效地降解纤维素,并打破酚类物质与细胞壁多糖之间的联系,从而增加酚类化合物的质量

分数<sup>[29]</sup>。也有研究表明,采用乳酸菌发酵全麦面团时,结合态酚类化合物转化为游离态<sup>[30]</sup>,酚类物质的生物可利用度显著增加<sup>[31]</sup>。由此可见,总酚或游离酚质量分数增加都可表明乳酸菌发酵对于改善麦麸酚类化合物的积极作用。

样品DPPH·清除率可以反映其抗氧化能力大小,样品液可将DPPH·清除,降低紫色DPPH溶液的吸光度,吸光度越低,表明其抗氧化能力越强<sup>[32]</sup>。由图5可知,麦麸经发酵后DPPH·清除率显著增加( $P<0.05$ ),且清除率随着发酵时间的延长显著增加。其中,处理组DPPH·清除率在16~32 h内迅速增加,这与多酚质量分数增加趋势一致;0~16 h内,T3组较其他组表现出较高的DPPH·清除能力,整体来讲,T1、T3、T4组比T2组和对照组DPPH·清除能力高,发酵48 h后麦麸DPPH·清除率分别可达65.44%、61.91%及65.82%。多酚类物质是麦麸中的具有抗氧化功能的生物活性物质,通过各种糖苷键

及化学键链接在一起<sup>[33]</sup>,麦麸经过乳酸菌发酵后分子间的部分链接键断裂,提高了酚类物质的质量分数,从而提高了麦麸的 DPPH·清除率。马健通过复合乳酸菌发酵麦麸,酚酸质量分数、DPPH·清除率显著提高<sup>[34]</sup>。这些结果表明,乳酸菌发酵对提高麦麸多酚质量分数效果良好,与前人的结果一致,同时此结果也与发酵麦麸可溶性膳食纤维质量分数趋势一致。

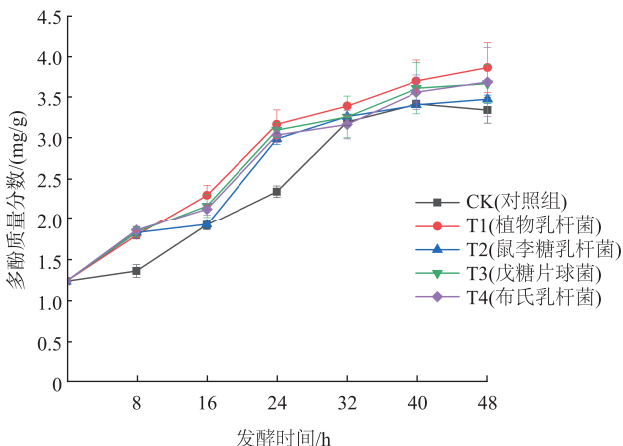


图4 麦麸发酵过程中多酚质量分数的变化

Fig. 4 Dynamic changes of polyphenol mass concentration during anaerobic fermentation of wheat bran

表2 发酵过程中植酸质量分数的变化

Table 2 Dynamic changes of phytic acid mass concentration during anaerobic fermentation of wheat bran

发酵时间/h	植酸质量分数(mg/g)				
	CK(对照)	T1(植物乳杆菌)	T2(鼠李糖乳杆菌)	T3(戊糖片球菌)	T4(布氏乳杆菌)
0	30.05±1.1 <sup>A</sup>	30.05±1.1 <sup>A</sup>	30.05±1.1 <sup>A</sup>	30.05±1.1 <sup>A</sup>	30.05±1.1 <sup>A</sup>
8	27.48±0.65 <sup>Ba</sup>	25.98±0.89 <sup>Bab</sup>	25.49±1.09 <sup>Bab</sup>	25.34±1.1 <sup>Bb</sup>	25.05±1.46 <sup>Bb</sup>
16	21.05±0.65 <sup>Ca</sup>	18.27±0.54 <sup>Cb</sup>	20.77±1.05 <sup>Ca</sup>	17.77±0.33 <sup>Cbc</sup>	16.84±0.43 <sup>Cc</sup>
24	19.48±0.44 <sup>Dh</sup>	15.77±0.21 <sup>De</sup>	17.91±0.78 <sup>Dh</sup>	15.56±0.43 <sup>De</sup>	14.98±0.66 <sup>De</sup>
32	17.7±0.43 <sup>Ea</sup>	14.34±0.32 <sup>Ec</sup>	16.06±0.33 <sup>Eb</sup>	13.91±0.33 <sup>Ec</sup>	14.26±0.21 <sup>DEc</sup>
40	15.48±0.12 <sup>Fa</sup>	13.34±0.33 <sup>EFc</sup>	14.48±0.21 <sup>Fb</sup>	13.41±0.22 <sup>Ec</sup>	13.05±0.12 <sup>EFc</sup>
48	13.62±0.21 <sup>Ga</sup>	12.48±0.13 <sup>Fb</sup>	13.62±0.22 <sup>Fa</sup>	12.13±0.22 <sup>Fc</sup>	12.2±0.12 <sup>Fbc</sup>

注:同列不同大写字母间差异显著( $P<0.05$ ),同行不同小写字母间差异显著( $P<0.05$ )。

显著差异( $P>0.05$ );发酵48 h后,T2组与对照组植酸质量分数无显著差异。麦麸中植酸质量分数降低有两个方面的原因,麦麸糊粉层中含有内源性植酸酶<sup>[36]</sup>,其最适 pH 为 4.8~5.5<sup>[37]</sup>,乳酸菌发酵产生的乳酸可使麦麸基质 pH 降低,此时麦麸内源性植酸酶被激活促进植酸降解;同时,乳酸菌发酵过程中还可产生其他降解植酸的酶。此外,乳酸菌细胞内含有低活性的植酸酶,但是细胞内的植酸酶可能不会参与到细胞外麦麸植酸的降解,因此麦麸中植酸可

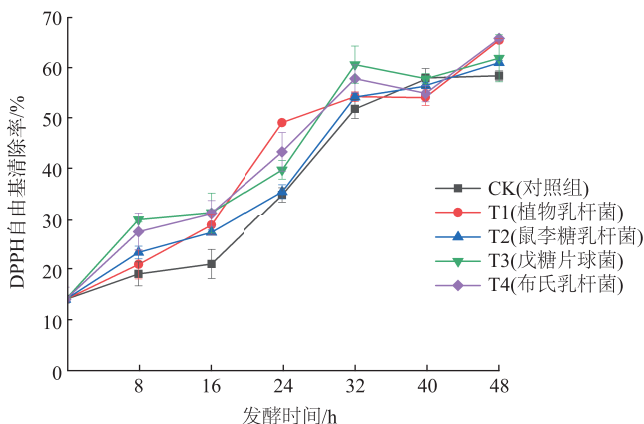


图5 发酵麦麸 DPPH 自由基清除率

Fig. 5 DPPH radical scavenging capacity of fermented wheat bran

## 2.6 发酵对麦麸植酸质量分数的影响

由表2可知,发酵后麦麸植酸质量分数显著降低( $P<0.05$ ),且随着发酵时间的增加而呈现降低趋势,曹伟超等也表明乳酸菌具有降解植酸的作用<sup>[35]</sup>。其中在发酵8~16 h内植酸质量分数降低速度最快,发酵24 h后乳酸菌处理组间植酸质量分数无显著差异,这也与乳酸菌的生长趋势基本一致。在整个发酵期间,T3组与T4组发酵麦麸植酸质量分数无

能会被乳酸菌细胞吸收进入到细胞内部<sup>[38]</sup>。麦麸经乳酸菌发酵后植酸质量分数的降低对于麦麸中矿物质及蛋白质等营养物质的吸收具有积极作用。

## 3 结语

乳酸菌作为食品工业中常见的益生菌,发酵麦麸对麦麸组分有一定的影响,且在改善麦麸的营养特性方面起到积极的效果,其增加麦麸可溶性膳食纤维的功能为麦麸在食品中的应用提供了理论依



据,同时为提高麦麸的附加值提供了有效途径。作者以植物乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、戊糖片球菌及布氏乳杆菌为发酵菌种,设置不同的发酵时间,探究乳酸菌发酵作用对麦麸组分动态变化的影响。麦麸经乳酸菌发酵后其可溶性膳食纤维质量分数、蛋白质质量分数、总酚质量分数及 DPPH 自由基清除能力显著增加,淀粉质量分数及植酸质量分数显著降

低;此外,麦麸经乳酸菌处理后其质地蓬松、呈金黄色。在发酵期间,麦麸各项组分的变化在24 h内较为显著,这也与乳酸菌的生长趋势一致。就本实验使用的4株乳酸菌而言,植物乳杆菌与布氏乳杆菌在提高麦麸可溶性膳食纤维质量分数及总酚质量分数方面效果较好,在实际生产过程中可提高麦麸的利用率。

## 参考文献:

- [1] WU F, TIAN F L, JIN Z, et al. Antioxidant capacities of heat-treated wheat germ and extruded compounded bran[J]. **Cereal Chemistry**, 2022, 99(3):582-592.
- [2] 戴春. 麦麸膳食纤维对控制中老年糖尿病患者血糖效果研究[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(3):57-60.  
DAI C. Effect of wheat bran dietary fiber on blood sugar control in middle-aged and elderly diabetic patients[J]. **Food and Nutrition in China**, 2020, 26(3):57-60. (in Chinese)
- [3] 姚慧慧, 王燕, 赵传文. 小麦麸皮膳食纤维及其在食品中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(10):10-12.  
YAO H H, WANG Y, ZHAO C W. Research progress on wheat bran dietary fiber and its application in food[J]. **Cereals & Oils**, 2018, 31(10):10-12. (in Chinese)
- [4] MORRIS E R, HILL A D. Inositol phosphate content of selected dry beans, peas, and lentils, raw and cooked[J]. **Journal of Food Composition and Analysis**, 1996, 9(1):2-12.
- [5] MAJZOBI M, PASHANGHEH S, FARAHNAKY A. Effect of wheat bran of reduced phytic acid content on the quality of batter and sponge cake[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2014, 38(3):987-995.
- [6] 王威利, 殷秋妙, 丁晨红, 等. 小麦麸质量安全现状及主要风险因子的检测[J]. 饲料研究, 2018(5):32-38.  
WANG W L, YIN Q M, DING C H, et al. Quality and safety status of wheat bran and detection of main risk factors[J]. **Feed Research**, 2018(5):32-38. (in Chinese)
- [7] 李佳星, 赵林伟, 乔颖鑫. 小麦麸皮的改性方法及应用研究进展[J]. 现代食品, 2021(11):22-24.  
LI J X, ZHAO L W, QIAO Y X. Research process on modification of wheat bran[J]. **Modern Food**, 2021(11):22-24. (in Chinese)
- [8] 陈蒙慧, 刘远晓, 关二旗, 等. 生物处理对麦麸品质及全麦制品品质改善的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7):324-329.  
CHEN M H, LIU Y X, GUAN E Q, et al. Research progress of biological treatment on quality improvement of wheat bran and whole-wheat products[J]. **Food and Fermentation Industries**, 2023, 49(7):324-329. (in Chinese)
- [9] GAO J, LI Y B, WAN Y, et al. A novel postbiotic from *Lactobacillus rhamnosus* GG with a beneficial effect on intestinal barrier function[J]. **Frontiers in Microbiology**, 2019, 10:477.
- [10] CODA R, KATINA K, RIZZELLO C G. Bran bioprocessing for enhanced functional properties[J]. **Current Opinion in Food Science**, 2015, 1:50-55.
- [11] 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.
- [12] 王太军. 麸皮乳酸菌发酵改性及其在馒头中的应用[D]. 郑州:河南工业大学, 2017.
- [13] SPAGGIARI M, RICCI A, CALANI L, et al. Solid state lactic acid fermentation: a strategy to improve wheat bran functionality[J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2020, 118:108668.
- [14] 严静, 查园园, 钱家美, 等. 麦麸中植酸的脱除工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(13):5369-5374.  
YAN J, ZHA Y Y, QIAN J M, et al. Removal process of phytic acid from wheat bran[J]. **Journal of Food Safety & Quality**, 2021, 12(13):5369-5374. (in Chinese)
- [15] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution[J]. **Food Chemistry**, 2019, 297:124983.
- [16] HARTIKAINEN K, POUTANEN K, KATINA K. Influence of bioprocessed wheat bran on the physical and chemical properties of dough and on wheat bread texture[J]. **Cereal Chemistry**, 2014, 91(2):115-123.
- [17] 王岸娜, 朱海兰, 吴立根, 等. 膳食纤维的功能、改性及应用[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2009, 30(2):89-94.  
WANG A N, ZHU H L, WU L G, et al. The function, modification and application of dietary fiber[J]. **Journal of Henan**

- University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 30(2):89-94. (in Chinese)
- [18] 张书庆, 郑学玲, 洪静. 乳酸菌协同外源酶对全麦粉营养品质及抗氧化活性的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(6):96-104.  
ZHANG S Q, ZHENG X L, HONG J. Effects of lactic acid bacteria combined with exogenous enzymes on nutritional quality and antioxidant activity of whole wheat flour[J]. **Modern Food Science and Technology**, 2022, 38(6):96-104, 144. (in Chinese)
- [19] 何铁群, 雷赵民, 吴润, 等. 青贮饲料中优良乳酸菌的分离鉴定及其生物学特性研究[J]. 生物技术通报, 2013(5):177-183.  
HE Y Q, LEI Z M, WU R, et al. Isolation and identification of excellent lactic acid bacteria from silage and its biological characteristics research[J]. **Biotechnology Bulletin**, 2013(5):177-183. (in Chinese)
- [20] CODA R, RIZZELLO C G, CUIEL J A, et al. Effect of bioprocessing and particle size on the nutritional properties of wheat bran fractions[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 2014, 25:19-27.
- [21] 鄂晓迪, 李家明, 张玉鹏, 等. 多菌联合发酵对辣木发酵品质和活性物质的影响[J]. 中国饲料, 2022(7):131-135.  
E X D, LI J M, ZHANG Y P, et al. Effects of multi-bacteria co-fermentation on fermentation quality and active substances of *Moringa oleifera*[J]. **China Feed**, 2022(7):131-135. (in Chinese)
- [22] 岳碧娥, 孙飞飞, 付东青, 等. 同 / 异型发酵乳酸菌对全株玉米青贮营养特征变化的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022(3):7-14.  
YUE B, SUN F F, FU D Q, et al. Effects of homo/heterotypic lactic acid bacteria on nutritional characteristics of whole plant corn silage[J]. **Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine**, 2022(3):7-14. (in Chinese)
- [23] 贺成虎. 自然发酵麦麸的菌群分析以及不同发酵方式对麦麸生物活性物质的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2019.
- [24] 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. (in Chinese)
- [25] 凌阿静, 李小平, 刘柳, 等. 真菌发酵对麦麸酚酸及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(4):136-142.  
LING A J, LI X P, LIU L, et al. Effect of fungal fermentation on wheat bran phenolic acids contents and antioxidant activity[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2019, 38(4):136-142. (in Chinese)
- [26] SERVI S, ÖZKAYA H, COLAKOGLU A S. Dephytinization of wheat bran by fermentation with bakers' yeast, incubation with barley malt flour and autoclaving at different pH levels[J]. **Journal of Cereal Science**, 2008, 48(2):471-476.
- [27] ANDERSSON A A M, DIMBERG L, ÅMAN P, et al. Recent findings on certain bioactive components in whole grain wheat and rye[J]. **Journal of Cereal Science**, 2014, 59(3):294-311.
- [28] NORDLUND E, AURA A M, MATTILA I, et al. Formation of phenolic microbial metabolites and short-chain fatty acids from rye, wheat, and oat bran and their fractions in the metabolical in vitro colon model[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2012, 60(33):8134-8145.
- [29] CODA R, KATINA K, RIZZELLO C G. Bran bioprocessing for enhanced functional properties[J]. **Current Opinion in Food Science**, 2015, 1:50-55.
- [30] RIPARI V, BAI Y P, GÄNZLE M G. Metabolism of phenolic acids in whole wheat and rye malt sourdoughs[J]. **Food Microbiology**, 2019, 77:43-51.
- [31] ADEBO O A, GABRIELA MEDINA-MEZA I. Impact of fermentation on the phenolic compounds and antioxidant activity of whole cereal grains: a mini review[J]. **Molecules**, 2020, 25(4):927.
- [32] SCHMIDT C G, GONÇALVES L M, PRIETTO L, et al. Antioxidant activity and enzyme inhibition of phenolic acids from fermented rice bran with fungus *Rizhopus oryzae*[J]. **Food Chemistry**, 2014, 146:371-377.
- [33] LIU R H. Whole grain phytochemicals and health[J]. **Journal of Cereal Science**, 2007, 46(3):207-219.
- [34] 马健. 乳酸菌发酵麸皮对仔猪生产性能的影响[D]. 邯郸:河北工程大学, 2021.
- [35] 曹伟超, 张宾乐, Omedi Jacob OJOBI, 等. 功能性乳酸菌发酵黑豆麦麸酸面团面包的营养及烘焙特性[J]. 食品科学, 2022, 43(2):142-150.  
CAO W C, ZHANG B L, OJOBI O, et al. Nutritional and baking characteristics of black bean-wheat bran sourdough bread fermented by functional lactic acid bacteria[J]. **Food Science**, 2022, 43(2):142-150. (in Chinese)
- [36] 郭嘉. 降低麦麸中植酸盐含量的途径及机理研究[D]. 无锡:江南大学, 2015.
- [37] LEENHARDT F, LEVRAT-VERNY M A, CHANLIAUD E, et al. Moderate decrease of pH by sourdough fermentation is sufficient to reduce phytate content of whole wheat flour through endogenous phytase activity[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2005, 53(1):98-102.
- [38] REALE A, KONIETZNY U, COPPOLA R, et al. The importance of lactic acid bacteria for phytate degradation during cereal dough fermentation[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2007, 55(8):2993-2997.