

谭斌研究员主持“全谷物科技创新与产业发展”特约专栏文章之六

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.01.006

张笃芹, 慎珠江, 谭斌. 固态发酵对麦麸物理化学性质的影响研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(1): 44-49.

ZHANG D Q, SHEN Z J, TAN B. Effect of solid-state fermentation on the physico-chemical properties of wheat bran[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(1): 44-49.

# 固态发酵对麦麸物理化学性质的影响研究

张笃芹<sup>1</sup>, 慎珠江<sup>1</sup>, 谭斌<sup>1,2</sup>✉

(1. 国家粮食与物资储备局科学研究院, 粮油加工研究所, 北京 100037;

2. 中原食品实验室, 河南 漯河 462300)

**摘要:** 利用酿酒酵母和植物乳杆菌对麦麸进行了单菌和混菌固态发酵, 通过分析测定固态发酵对麦麸物理化学性质、膳食纤维含量和组成的影响及各指标之间的相关性, 初步阐述了固态发酵改善麦麸营养及加工品质的可能原因, 有利于拓展发酵麦麸在全谷物食品加工产业的应用。结果显示, 固态发酵麦麸的可溶性膳食纤维 (SDF) 和阿拉伯木聚糖含量分别提高了 40.6% 和 15.2%; 酿酒酵母和植物乳杆菌混菌固态发酵麦麸的持水能力和持油能力最高; 固态发酵使麦麸的峰值变性温度 ( $T_p$ )、焓变和结晶度分别由 195.35 °C、3 869.50 J/g 和 15.86% 显著降低至 178.30 °C、3 276.67 J/g 和 15.24% ( $P < 0.05$ )。麦麸中 SDF 含量与结晶度、 $T_p$  显著负相关, 相关系数分别为 -0.959 47、-0.950 7。固态发酵使麦麸由结构完整和紧凑转变为疏松和分散, 植物细胞的清晰度和均匀性也明显下降。综上所述, 固态发酵在微生物的代谢作用下降低了麦麸内部组织结构的致密性, 不仅有利于功能活性成分的释放, 还可显著改善其加工品质。

**关键词:** 麦麸; 固态发酵; 膳食纤维; 物理化学性质; 相关性分析

中图分类号: TS201.4; S-1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)01-0044-06

网络首发时间: 2024-01-02 13:16:41

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20231229.1455.002>

## Effect of Solid-state Fermentation on the Physico-chemical Properties of Wheat Bran

ZHANG Du-qin<sup>1</sup>, SHEN Zhu-jiang<sup>1</sup>, TAN Bin<sup>1,2</sup>✉

(1. Institute of Cereal and Oil Science and Technology, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe, Henan 462300, China)

**Abstract:** *Saccharomyces cerevisiae* (*S. cerevisiae*) and *Lactobacillus plantarum* (*L. plantarum*) were used in

收稿日期: 2023-05-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1100502); 国家自然科学基金青年项目 (32001621)

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No. 2022YFF1100502); National Natural Science Foundation Youth Project of China (No. 32001621)

作者简介: 张笃芹, 女, 1990 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为谷物生物加工与品质调控。E-mail: zdq@ags.ac.cn

通讯作者: 谭斌, 男, 1972 年出生, 博士, 首席研究员, 研究方向为健康谷物 (全谷物) 食品的营养与加工。E-mail: tb@ags.ac.cn.

本专栏背景及作者详细介绍见 PC13-16

separate and mixed for solid-state fermentation (SSF) of wheat bran (WB). Effects of SSF on the physicochemical properties of WB and dietary fiber content and composition were determined, and the correlation between various indicators was analyzed. Accordingly, the possible reasons of SSF improving nutrition and processing qualities of WB were preliminary explained, which is to the benefit of expanding the utilization of SSF in whole grain processing. Results showed that soluble dietary fiber (SDF) and arabinoxylan content of the fermented WB increased by 40.6% and 15.2%, respectively. WB fermented with a mixture of *S. cerevisiae* and *L. plantarum* had the highest water- and oil-holding capacity. SSF significantly decreased the peak denaturation temperature ( $T_p$ ), enthalpy, and crystallinity of WB from 195.35 °C, 3 869.50 J/g, and 15.86% to 178.30 °C, 3 276.67 J/g, and 15.24%, respectively ( $P < 0.05$ ). Correlation analysis results showed that SDF content in WB had a remarkable negative correlation with crystallinity and  $T_p$ , with the correlation coefficients of  $-0.959\ 47$  and  $-0.950\ 7$ , respectively. After SSF, structure of WB changed from intact and compact to loose and dispersed one, and the clarity and uniformity of plant cells were significantly reduced. In conclusion, SSF reduces the density of the internal tissue structure of WB due to the metabolism of the microorganisms, which was not only beneficial to the release of bioactive components, but also significantly improved its processing qualities.

**Key words:** wheat bran; solid-state fermentation; dietary fiber; physico-chemical property; correlation analysis

麦麸由内外果皮、种皮、糊粉层和小部分淀粉胚乳构成, 含有丰富的膳食纤维、植物生理活性物质、矿物元素等营养物质, 然而, 麦麸本身致密、结构坚硬, 具有较高的不溶性多糖和蛋白质水平, 导致全麦产品的口感粗糙且质地坚硬<sup>[1]</sup>。

为解决麦麸引起的全麦产品品质不佳问题, 国内外学者致力于麦麸的改性研究。麦麸的生物改性主要包括酶法和发酵法, 其效率高、成本低, 对麦麸的营养和加工品质均有明显的改善效果<sup>[2]</sup>。生物发酵法可以在有效降低麸皮中的抗营养因子含量的同时显著提高生物活性物质含量及有效性<sup>[3]</sup>。我们先前的研究显示<sup>[4]</sup>, 酵母菌和乳酸菌的混合固态发酵显著提高了麦麸的抗氧化活性和必需氨基酸评分; 相比于未发酵麦麸, 固态发酵麦麸回添至小麦粉所制备的全麦面包, 具有更高的比体积、均匀的孔隙结构、柔软的质地和丰富的挥发性香味物质。

目前国内外的研究主要聚焦于发酵对麦麸营养和感官品质的影响, 而引起麦麸一系列变化的根本原因尚不清晰。因此, 本研究选择酿酒酵母和植物乳杆菌两种常用的食品发酵菌种对麦麸进行单菌和混菌固态发酵, 对比发酵前后麦麸中膳食纤维含量及组成、水合性质和持油能力、热力学特性和外观结构的变化, 分析各性质之间

的相关性, 系统阐明固态发酵提高麦麸营养和感官品质的可能原因, 此期为改善全麦食品营养和加工品质提供新思路和新方案, 为发酵技术在麦麸等全谷物食品中的应用提供基础数据和理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

食用小麦麸: 2022 年购于山西古磨面业有限公司; 酿酒酵母 *Saccharomyces cerevisiae* (CICC 1223) 和植物乳杆菌 *Lactobacillus plantarum* (CICC 22696) 活性菌粉: 中国工业微生物菌种保藏管理中心; 酵母浸出粉胨葡萄糖肉汤 (YPD) 培养基和 MRS 培养基: 北京奥博星生物公司。

麦麸的基本成分为 10.41% 水分、3.67% 粗脂肪、15.43% 粗蛋白、46.78% 膳食纤维、17.61% 淀粉和 5.97% 灰分。

DH-420 电热恒温培养箱: 北京科伟永兴仪器有限公司; HVA-110 高压灭菌锅: 上海四美生物科技有限公司; FD-1A-50 冷冻干燥机: 上海贺帆仪器有限公司; Q200 差示量热扫描仪: 美国 TA 公司; D8 Advance X 射线衍射仪: 德国 Bruker 公司; CKX31 型倒置光学显微镜: 日本 Olympus 仪器公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 固态发酵

1.2.1.1 原料预处理 麦麸过 40 目筛网, 利用高压灭菌锅在 121 °C 下处理 20 min 后冷却至室温备用。

1.2.1.2 菌种活化 参考 Zhang 等<sup>[5]</sup>的方法稍作改动, 酿酒酵母和植物乳杆菌活性菌粉分别于 YPD 和 MRS 培养基中活化并培养 18 h。菌悬液在 1 510 g 下离心 10 min, 所得菌泥溶解于无菌蒸馏水中备用。对菌悬液进行稀释并计数, 两种菌悬液最终稀释浓度为 10<sup>7</sup> cfu/mL。

1.2.1.3 接种与发酵 通过控制不同酿酒酵母和植物乳杆菌悬液的添加量, 考察不同菌种配比固态发酵对麦麸的影响: (1) CK: 60 g 麦麸与 60 mL 无菌水混合作为实验对照组; (2) WB<sub>1-0</sub>: 60 g 麦麸与 60 mL 酿酒酵母菌悬液混合; (3) WB<sub>1-1</sub>: 60 g 麦麸与 30 mL 酿酒酵母菌悬液和 30 mL 植物乳杆菌悬液混合; (4) WB<sub>0-1</sub>: 60 g 麦麸与 60 mL 植物乳杆菌悬液混合。所有样品在 28 °C 的无菌三角瓶中静态培养 18 h, 真空冷冻干燥 72 h 后备用。

### 1.2.2 麦麸中膳食纤维含量及组成的测定

膳食纤维含量及组成, 包括可溶性 (Soluble dietary fiber, SDF) 和不可溶性膳食纤维 (Insoluble dietary fiber, IDF) 组分含量的测定参照 AOAC 991.43 的方法进行。

阿拉伯木聚糖和 β-葡聚糖含量根据 Zhang 等<sup>[6]</sup>描述的方法进行测定。

### 1.2.3 麦麸水合性质和持油能力的测定

参照 Ye 等<sup>[7]</sup>方法测定麦麸的水合性质和持油能力。

(1) 持水能力: 精确称取 1.000 0 g 麸皮, 加入 30 mL 蒸馏水, 室温条件下搅拌 12 h 后于 3 000 g 离心 25 min, 去除上清液, 称量吸水前 ( $m_d$ ) 和吸水后 ( $m_f$ ) 样品的重量 (式 1)。

$$\text{持水能力}(\text{g/g}) = (m_f - m_d) / m_d \quad \text{式 (1)}$$

(2) 吸水膨胀性: 精确称取 1.000 0 g 麸皮 (质量记为  $W_0$ , g), 加入 10 mL 蒸馏水, 室温下静置 12 h, 记录吸水前 ( $V_0$ , mL) 和吸水膨胀后 ( $V_1$ , mL) 样品的体积 (式 2)。

$$\text{吸水膨胀性}(\text{mL/g}) = (V_1 - V_0) / W_0 \quad \text{式 (2)}$$

(3) 持油能力: 精确称取 1.000 0 g 麸皮, 加

入 30 mL 玉米油, 室温静置 12 h 后于 3 000 g 离心 25 min, 去除上清液, 称量吸油前 ( $m_d$ , g) 和吸油后 ( $m_r$ , g) 样品的质量 (式 3)。

$$\text{持油能力}(\text{g/g}) = (m_r - m_d) \times 100 / m_d \quad \text{式 (3)}$$

### 1.2.4 麦麸热力学特性的测定

利用差式量热扫描仪测定固态发酵麦麸的热力学特性。3.0 mg 麦麸与 9.0 μL 蒸馏水混合于差示量热扫描仪专用铝锅中, 以 10 °C/min 的速度从 30 °C 升温至 300 °C, 密封空铝锅作为参照, 通过吸热曲线分析获得样品的起始温度 ( $T_0$ )、峰值温度 ( $T_p$ ) 和焓值 ( $\Delta H$ )。

### 1.2.5 麦麸结晶特性的测定

利用 X 射线衍射仪对麦麸的结晶特性进行考察。操作条件为: 扫描电压和电流分别为 40 kV 和 40 mA, 衍射角 2θ 扫描范围为 3°~60°。

### 1.2.6 麦麸外观形态的观测

麦麸外观形态的变化通过光学显微镜测定。仔细取几片麦麸于载玻片中央, 吸取少量浓度为 50% (v/v) 的甘油水溶液滴于麦麸片上, 调整合适的光圈强度及视野, 在 400× 的放大倍数下观察麦麸的外观形态并拍照。

## 1.3 数据处理

所有实验数据使用 9.4 版本的 SAS 软件进行方差和相关性分析, 使用 2022 版本 Origin 软件进行绘图。所有实验至少重复 3 次, 数据结果均以“平均值 ± 标准差”表示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 固态发酵对麦麸中膳食纤维含量及组成的影响

表 1 为固态发酵对麦麸中膳食纤维含量及组成的影响。CK 的总膳食纤维 (total dietary fiber, TDF) 含量为 46.78%, IDF 含量为 41.89%, 明显高于 SDF。固态发酵后, 麦麸中 TDF 含量在 46.01%~47.26% 范围内波动, 受发酵处理影响不显著, IDF 含量有所下降, 而 SDF 含量则明显升高 ( $P < 0.05$ )。发酵麦麸中, WB<sub>1-1</sub> 的 SDF 含量最高, 比 CK 提高了 40.6%。CK 中阿拉伯木聚糖水平高于 β-葡聚糖, 含量分别为 26.19% 和 2.28%。固态发酵后, 阿拉伯木聚糖含量明显升高, WB<sub>0-1</sub>

含量最高,比 CK 提高了 15.2%; $\beta$ -葡聚糖的含量变化不一,在 WB<sub>1-0</sub> 中升高, W<sub>0-1</sub> 中下降。

发酵后 SDF 含量的升高是因为酿酒酵母和植物乳杆菌代谢分泌的酶,包括纤维素酶、半纤维素酶,使部分 IDF 降解转化为 SDF<sup>[8]</sup>。阿拉伯木聚糖含量的升高可能是因为:(1) 发酵过程中纤维素酶类对麦麸细胞壁的水解作用,促使麦麸皮质暴露而释放出阿拉伯木聚糖<sup>[9]</sup>;(2) 酿酒酵母和植物乳杆菌代谢产生的有机酸类等物质,促使

小分子的阿拉伯木聚糖溶出而使其检测含量升高<sup>[10]</sup>。发酵麦麸中 $\beta$ -葡聚糖含量的变化不明显,主要是因为麦麸中 $\beta$ -葡聚糖含量不高,受微生物代谢的影响不显著。

## 2.2 固态发酵对麦麸水合性质和持油能力的影响

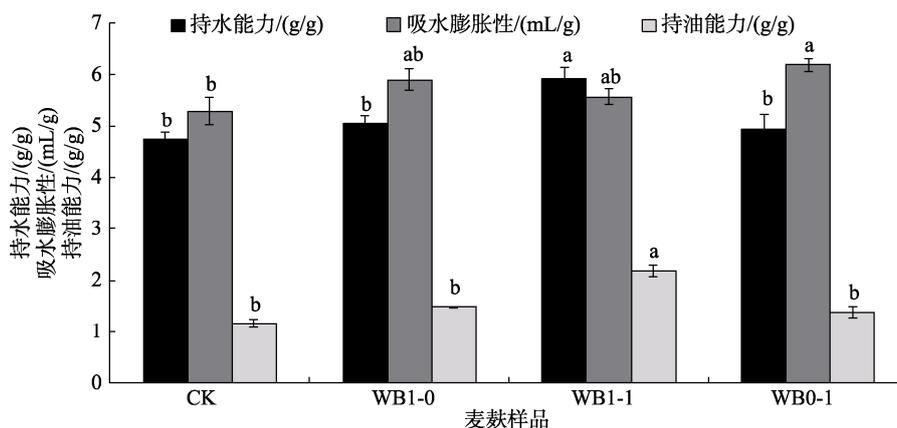
固态发酵对麦麸水合性质和持油能力的影响如图 1 所示。酿酒酵母和植物乳杆菌混合发酵的 WB<sub>1-1</sub> 麦麸中,持水能力和持油能力最高,植物乳杆菌单菌发酵的 WB<sub>0-1</sub> 样品中,吸水膨胀性最高。

表 1 固态发酵对麦麸膳食纤维含量及组成的影响

样品	TDF	SDF	IDF	阿拉伯木聚糖含量	$\beta$ -葡聚糖含量
CK	46.78±1.14	4.89±0.44 <sup>b</sup>	41.89±1.49	26.19±1.51 <sup>b</sup>	2.28±0.03 <sup>ab</sup>
WB <sub>1-0</sub>	47.26±1.22	6.01±0.53 <sup>ab</sup>	41.25±0.52	29.17±2.01 <sup>ab</sup>	2.46±0.07 <sup>a</sup>
WB <sub>1-1</sub>	46.01±0.56	6.88±0.18 <sup>a</sup>	39.13±0.21	29.49±0.98 <sup>ab</sup>	2.29±0.04 <sup>ab</sup>
WB <sub>0-1</sub>	46.99±0.98	5.50±0.11 <sup>ab</sup>	41.49±0.56	30.18±1.07 <sup>a</sup>	2.13±0.13 <sup>b</sup>

注:同列不同字母表示数据存在显著差异性( $P<0.05$ )。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences in data ( $P<0.05$ ).



注:不同字母表示数据存在显著差异性( $P<0.05$ )。

Note: Different letters indicate significant differences in data ( $P<0.05$ ).

图 1 固态发酵对麦麸水合性质和持油能力的影响

Fig.1 Effect of solid-state fermentation on the hydration properties and oil-holding capacity of wheat bran

细胞壁结构的降解使其变得疏松多孔,明显的孔隙增加了与水和油的作用面积<sup>[11]</sup>; IDF 含量的增大可以使麦麸吸附更多的水分。另一方面,发酵后,交联的蛋白质大分子的降解有利于亲水基团等功能性官能团的暴露,提高了蛋白质的溶胀程度和截留水分子的能力<sup>[12]</sup>。此外,固态发酵麦麸持油性的增加与膳食纤维中阿拉伯木聚糖、果胶等成分的释出有关,它们对脂类物质具有很强的亲和力<sup>[13]</sup>。相比于单菌发酵,混菌发酵更加有利于麦麸水合性质和持油能力的提升。

## 2.3 固态发酵对麦麸热力学特性的影响

固态发酵对麦麸热力学特性的影响见表 2。CK 的  $T_0$ 、 $T_p$  和  $\Delta H$  分别为 176.60 °C、195.35 °C 和 3 869.50 J/g。固态发酵后,麦麸的  $T_0$  未发生明显变化,  $T_p$  和  $\Delta H$  则有所下降。其中, WB<sub>1-1</sub> 的  $T_p$  下降最为明显(178.30 °C), W<sub>0-1</sub> 的  $\Delta H$  最小,为 3 276.67 J/g。

对于主要成分为膳食纤维的麦麸,136~200 °C 温度范围内的吸热峰是由膳食纤维的熔融形成的。膳食纤维的 IDF 组分分子量较高且结构更加

表 2 固态发酵对麦麸热力学特性的影响

Table 2 Effect of solid-state fermentation on the thermal properties of wheat bran

样品	T <sub>0</sub> /°C	T <sub>p</sub> /°C	ΔH/(J/g)
CK	176.60±8.06	195.35±2.70 <sup>a</sup>	3 869.50±102.53 <sup>a</sup>
WB <sub>1-0</sub>	171.77±1.33	183.47±5.10 <sup>ab</sup>	3 641.67±210.50 <sup>ab</sup>
WB <sub>1-1</sub>	172.93±2.61	178.30±3.42 <sup>b</sup>	3 520.00±69.51 <sup>ab</sup>
WB <sub>0-1</sub>	174.97±3.47	185.40±1.78 <sup>ab</sup>	3 276.67±133.98 <sup>b</sup>

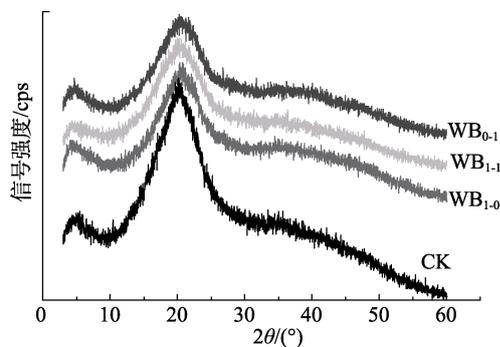
注：同列不同字母表示数据存在显著差异性 (P<0.05)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences in data (P<0.05).

稳定, 变性所需温度更高; SDF 的分子量低且结构更易于变化, 变性温度较低<sup>[14]</sup>。麦麸中 SDF 含量的增加会伴随麦麸变性温度及吸热焓值的降低。

### 2.4 固态发酵对麦麸结晶特性的影响

图 2 是固态发酵前后麦麸的 X 衍射(XRD)衍射图谱。所有麦麸样品的 XRD 衍射图均在 10°~30°的衍射范围内显示出一个宽峰, 峰值位于 20°~22°衍射角范围内, 是由膳食纤维、淀粉及其他多糖分子的晶体结构混合在一起形成的<sup>[14]</sup>。CK 的结晶度为 15.86%, 固态发酵麦麸的结晶度由 15.86%减小至 14.42%, 降低了 9.08%。



样品	CK	WB <sub>1-0</sub>	WB <sub>1-1</sub>	WB <sub>0-1</sub>
结晶度/%	15.86±0.15 <sup>a</sup>	14.67±0.09 <sup>b</sup>	14.42±0.12 <sup>b</sup>	15.24±0.24 <sup>b</sup>

图 2 固态发酵对麦麸结晶特性的影响

Fig.2 Effect of solid-state fermentation on crystallization characteristic of wheat bran

膳食纤维中, 木质素、纤维素等相比于半纤维素更易形成规则的结晶结构, IDF 比 SDF 的结晶度更高。因此, 发酵过程中木质素等在微生物代谢产生的木质素酶、纤维素酶等作用下由 IDF 降解转化为 SDF, 使麦麸的结晶度下降。

在本研究数据的基础上, 分析了固态发酵麦麸膳食纤维含量、热力学特性参数及结晶度之间的相关性, 结果见表 3。麦麸 SDF 与结晶度和 T<sub>p</sub> 的相关系数分别为-0.959 47 和-0.950 7, 说明麦

麸的结晶度和变性温度都与 SDF 存在一定程度的负相关, 即 SDF 含量越高, 麦麸结晶度和变性温度越低。T<sub>p</sub> 与结晶度间明显的正相关证实了麦麸发生热变性的焓值与纤维素中规则晶体结构的构象变化有关, 说明麦麸中结晶结构的损耗使麦麸熔融吸收的热量减少。

表 3 固态发酵麦麸膳食纤维含量、热力学特性及结晶度之间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of dietary fiber contents, thermal properties and crystallinity of solid-state fermented wheat bran

指标	结晶度	T <sub>0</sub>	T <sub>p</sub>	ΔH
TDF				
SDF	-0.959 47 (0.040 5)		-0.9 507 (0.049 3)	
IDF				
结晶度			0.96 607 (0.033 9)	

注：括号外为相关系数；括号内为 p 值, p<0.05 代表相关性显著。

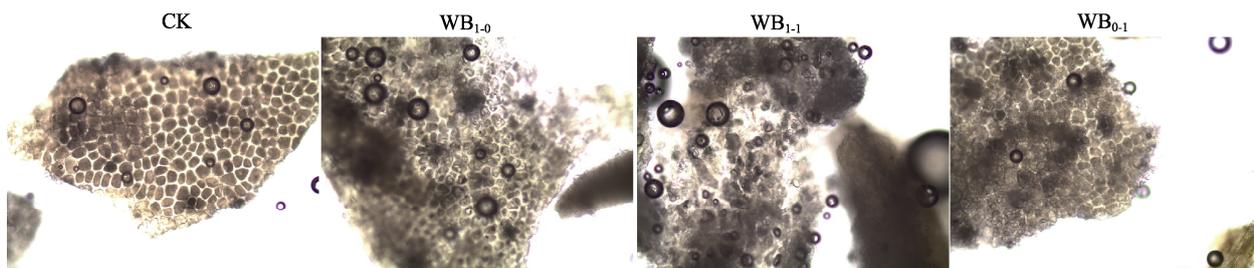
Note: Correlation coefficient outside parentheses; The P value in parentheses, and P<0.05 indicates a significant correlation.

### 2.5 固态发酵对麦麸外观形态的影响

利用显微镜观测了固态发酵前后麦麸外观形态的变化 (图 3)。CK 中麦麸片层结构清晰、完整且紧凑, 可观测到形状清晰和分布均匀的植物细胞。固态发酵麦麸片层结构变得疏松, 边缘模糊且不再完整, 细胞结构分布不均匀且清晰度下降, 可观测到细胞破裂的情况。

麦麸外观结构的变化可归因于固态发酵过程中两个主要变化: (1) 酿酒酵母和植物乳杆菌代谢产生的乳酸、醋酸等有机酸会促进麦麸皮层的软化和溶解, 使片层边缘变松散且模糊; (2) 发酵过程中产生的微生物淀粉水解酶、蛋白水解酶和纤维素水解酶等, 促使麦麸皮层中的结构聚合物以及组成细胞结构的主要成分发生降解, 在皮层中产生裂缝、孔隙和孔洞, 并使部分植物细胞发生溃散。

对于全麦的加工, 麦麸致密的皮层结构是引起全麦食品质地坚硬和不理想咀嚼性的最主要原因。而经过固态发酵处理后, 松散多孔和破碎的皮层结构不仅提高水合性质和持油能力, 还可以提高生物活性化合物 (包括膳食纤维、阿拉伯木聚糖、多酚类化合物等) 的溶解性和生物利用度, 改善全麦食品的功能特性。

图 3 固态发酵对麦麸外观形态的影响( $\times 100$ )Fig.3 Effect of solid-state fermentation on the appearance of wheat bran ( $\times 100$ )

### 3 结论

本研究利用酿酒酵母和植物乳杆菌对麦麸进行了 18 h 的单菌和混菌固态发酵, 结果发现, 麦麸中可溶性膳食纤维、阿拉伯木聚糖和  $\beta$ -葡聚糖含量显著升高, 持水能力、吸水膨胀性和持油能力明显提升。固态发酵显著降低了麦麸的结晶度、变性温度及焓值, 麦麸的外观形态由致密变得疏松。明确了固态发酵通过微生物代谢作用降低了麦麸的致密结构, 证实了固态发酵有利于麦麸中功能成分的释放以及水合性质等加工品质的改善。

然而本研究所采用的固态发酵工艺对于麦麸综合品质的改善效果不够显著, 此外, 酿酒酵母、植物乳杆菌以及其他常用的食品安全菌种固态发酵对麦麸品质产生影响的关键作用因素仍不明确。未来的研究将聚焦于麦麸加工品质明显改善的工艺参数优化和关键技术研发, 以及不同发酵菌种影响麦麸品质的关键生物因素和分子调控机制的探索。

#### 参考文献:

- [1] ZHAO A, SHI P, YANG R, et al. Isolation of novel wheat bran antifreeze polysaccharides and the cryoprotective effect on frozen dough quality[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 125: 107446.
- [2] 张慧娟, 张小爽, 黄莲燕, 等. 麸皮生物改性对面团和面筋蛋白性质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39: 1-7.  
ZHANG H U J, ZHANG X S, HUANG L Y, et al. Effects of biological modification of bran on dough and glutenin properties [J]. *Food Research and Development*, 2018, 39: 1-7.
- [3] 刘姣, 汪丽萍, 谭斌, 等. 小麦麸皮生物加工及其在面制品中应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2016, 37: 375-379.  
LIU J, WANG L P, TAN B, et al. Research progress on biological processing of wheat bran and its application in flour product[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37: 375-379.
- [4] ZHANG D, TAN B. Effects of different solid-state fermentation ratios of *S. cerevisiae* and *L. plantarum* on physico-chemical properties of wheat bran and the quality of whole wheat bread[J].

*Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101: 4551-4560.

- [5] ZHANG D, YE Y, TAN B. Comparative study of solid-state fermentation with different microbial strains on the bioactive compounds and microstructure of brown rice[J]. *Food Chemistry*, 2022, 397: 133735.
- [6] ZHANG D, YE Y, WANG L, et al. Nutrition and sensory evaluation of solid-state fermented brown rice based on cluster and principal component analysis[J]. *Foods*, 2022, 11: 1560.
- [7] YE G, WU Y, WANG L P, 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.
- [8] XUE P, LIAO W, CHEN Y, et al. Release characteristic and mechanism of bound polyphenols from insoluble dietary fiber of navel orange peel via mixed solid-state fermentation with *Trichoderma reesei* and *Aspergillus niger*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 161: 113387.
- [9] HU P, LI H, XIAO W, et al. Effect of *Rhodococcus* sp. pretreatment on cellulose hydrolysis of corn stalk[J]. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 2020, 51: 137-143.
- [10] SOUZA H, BORGES L, GONÇALVES V, et al. Recent advances in the application of xylanases in the food industry and production by actinobacteria: a review[J]. *Food Research International*, 2022, 162: 112103.
- [11] 许锡凯. 好食脉孢菌固态发酵麦麸制备可溶性膳食纤维及其功能性质[D]. 哈尔滨商业大学, 2021.  
XU X K. The preparation and functional properties of soluble dietary fiber (SDF) from wheat bran fermented by *Neurospora sitophila*[D]. Harbin University of Commerce, 2021.
- [12] 柳旺, 蒋肇祥, 贾冬英, 等. 米曲霉固态发酵程度对大豆拉丝蛋白特性的影响[J]. *中国油脂*, 2019, 44: 128-131.  
LIU W, JIANG Z Y, JIA D Y. Effect of solid-state fermentation degree by *Aspergillus oryzae* on the properties of drawing soy protein[J]. *China oils and fats*, 2019, 44: 128-131.
- [13] LI N, WANG S, WANG T, et al. Valorization of wheat bran by three fungi solid-state fermentation: physicochemical properties, antioxidant activity and flavor characteristics[J]. *Foods*, 2022, 11: 1722.
- [14] ZHANG D, WANG L, TAN B, et al. Dietary fibre extracted from different types of whole grains and beans: a comparative study[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2020, 55: 2188-2196. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。