



宋丽丽,霍姍浩,胡冉冉,等.复合乳酸菌固态发酵对脱脂米糠理化性质、生物活性和功能特性的影响[J].轻工学报,2024,39(3):21-28.  
SONG L L, HUO S H, HU R R, et al. Effect of solid-state fermentation with compound lactic acid bacteria on the physicochemical properties, biological activities and functional characteristics of defatted rice bran[J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(3): 21-28. DOI: 10.12187/2024.03.003

# 复合乳酸菌固态发酵对脱脂米糠理化性质、生物活性和功能特性的影响

宋丽丽,霍姍浩,胡冉冉,赵鑫淼,朱钰琪,杨旭,张志平,魏涛

郑州轻工业大学 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001

**摘要:**采用由粪肠球菌(*Enterococcus faecalis*)、凝结芽孢杆菌(*Bacillus coagulans*)和发酵粘液乳杆菌(*Limosilactobacillus fermentum*)组成的复合乳酸菌固态发酵脱脂米糠,研究发酵前后脱脂米糠理化性质、结构性质、生物活性和功能特性的变化规律。结果表明:复合乳酸菌固态发酵可增加脱脂米糠中蛋白质和膳食纤维的含量,提高脱脂米糠的溶解性、持水性、持油性和膨胀力,破坏脱脂米糠大分子结构,使其疏松度、孔隙度增大,热解反应更加彻底;相较于发酵前,经复合乳酸菌固态发酵后的脱脂米糠中总酚和总黄酮含量分别提高了43.32%和70.40%,DPPH自由基清除率、ABTS<sup>+</sup>自由基清除率和·OH自由基清除率分别提高了268.27%、62.18%和22.18%,且对胆固醇的吸收能力提高,具有较好的抗糖性能。综上,复合乳酸菌固态发酵可有效提高脱脂米糠的综合利用价值,提升其在功能食品方面的应用潜力。

**关键词:**脱脂米糠;复合乳酸菌;固态发酵;理化性质;生物活性;功能特性

**中图分类号:**TS210.9 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2024)03-0021-08

## 0 引言

米糠是稻谷深加工过程中的高附加值副产物,占稻谷总质量的8%<sup>[1]</sup>。我国米糠资源丰富,年产量约 $1.5 \times 10^7$  t<sup>[2]</sup>。米糠中含有丰富的蛋白质、脂肪、糖类、膳食纤维和矿物质,以及不饱和脂肪酸、生育酚、生育三烯酚、谷维素、植酸等生物活性物质<sup>[3-4]</sup>,但现阶段多被用作饲料或被遗弃,有效利用率及产品附加值极低<sup>[5]</sup>。近年来,对米糠资源的开发利用逐渐受到重视,米糠油、米糠多肽、米糠多糖等产品陆续出现<sup>[2]</sup>。

米糠中的酚类物质多具有抗氧化活性,但谷物

基质的阻碍及酚类物质与不可消化多糖的共价结合,导致其生物利用度较低<sup>[6-7]</sup>。机械粉碎、热处理、挤压膨化等加工技术可将酚类物质从谷物基质中释放出来并提高其生物可及性<sup>[8]</sup>,但也可能导致不耐热酚类物质分解,进而对米糠生物活性物质的释放产生不利影响<sup>[9-10]</sup>。微生物发酵作为一种传统而又新颖的加工方式,成本低廉、操作简单、代谢产物得率高、绿色环保,可提高米糠中对人体健康有益的生物活性物质的含量,改善米糠的生物活性,已成为新的研究热点<sup>[11]</sup>。相较于液态发酵,微生物固态发酵具有低含水量、高基质浓度、高发酵得率等特点,其优势菌种可提高发酵生产的效率和目标产品

收稿日期:2023-07-28;修回日期:2023-10-04;出版日期:2024-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(21706244);河南省科技攻关项目(232102321144,232102110150,242102110118)

作者简介:宋丽丽(1987—),女,河南省信阳市人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要研究方向为食品生物技术。E-mail: sll@zzuli.edu.cn

的产量,在谷物副产物生物活性的增效过程中作用显著<sup>[12]</sup>。C. G. Schmidt等<sup>[13]</sup>研究发现,经米曲霉固态发酵后,米糠中的游离酚含量提高了100%以上,其中,没食子酸和阿魏酸的含量分别达到170 mg/g和765 mg/g。刘磊等<sup>[14]</sup>研究发现,经乳酸菌固态发酵后,米糠中的必需氨基酸含量提高了20%,膳食纤维、碳水化合物、可溶性固形物的含量也大幅提升。K. M. Kim等<sup>[15]</sup>利用酵母菌固态发酵米糠,发现米糠发酵样品对小鼠的抗压和抗疲劳特性均有明显的改善作用。

研究<sup>[16]</sup>发现,乳酸菌固态发酵既能提高米糠中总酚和总黄酮的含量,还能改善米糠结构性质、提高米糠利用价值等。目前,乳酸菌固态发酵米糠的研究多集中于单一菌种,有关复合菌种固态发酵米糠的研究较少,而复合菌种发酵具有功能优势互补、产物更丰富等特点,在谷物基质固态发酵中更具优势<sup>[14]</sup>。笔者团队的前期研究<sup>[17]</sup>还发现,由粪肠球菌、凝结芽孢杆菌和发酵粘液乳杆菌组成的复合乳酸菌,具有功能优势互补、产酶活力高、降解转化能力强等优势,有望将其应用于米糠固态发酵中。基于此,本研究拟采用该复合乳酸菌固态发酵脱脂米糠,通过比较发酵前后脱脂米糠的理化性质、结构性质、生物活性、功能特性等,以期实现米糠的高值化利用,为提升米糠生物利用度及经济价值提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

**1.1.1 主要材料** 脱脂米糠,来源于河南郑州,于干燥阴凉处保存;粪肠球菌(*Enterococcus faecalis*)、凝结芽孢杆菌(*Bacillus coagulans*)、发酵粘液乳杆菌(*Limosilactobacillus fermentum*),购自中国工业微生物菌种保藏中心,编号分别为CICC10396、CICC10069和CICC21800,于甘油管中-80℃保存。

**1.1.2 主要试剂** 1,1-二苯基-2-苦肼基(DP-PH)、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS),美国Sigma-Aldrich试剂公司;福林酚试剂、 $\alpha$ -淀粉酶(50 000 U/g),阿拉丁试剂(上海)有限公司;无水乙醇、葡萄糖、蛋白胨、牛肉膏、酵母粉、柠檬酸二胺、乙酸钠、吐温80、 $K_2HPO_4$ 、 $MgSO_4 \cdot$

$7H_2O$ 、 $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ 、邻苯甲醛、DNS试剂等,国药集团化学试剂有限公司。以上试剂均为分析纯。KBr(光谱纯),阿拉丁试剂(上海)有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

S20145927型电热恒温鼓风干燥箱、LRH-150型生化培养箱、TY2014003876型超净工作台,上海一恒科学仪器有限公司;YX280 D型高压蒸汽灭菌锅,合肥华泰医疗设备有限公司;Agilent-1290型高效液相色谱仪,美国安捷伦公司;752 N型紫外-可见分光光度计,上海美普达仪器有限公司;Vertex 70型傅里叶变换红外光谱仪,德国布鲁克公司;Diamond TG/DTA型综合热分析仪,美国Perkin Elmer公司;Regulus8100型超高分辨场发射扫描电子显微镜,日本日立公司。

### 1.3 培养基

乳酸菌厌氧培养基(MRS培养基)(1 L):蛋白胨10 g,牛肉膏10 g,酵母粉5 g, $K_2HPO_4$  2 g,柠檬酸二胺2 g,乙酸钠5 g,葡萄糖20 g,吐温80 1 mL, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  0.58 g, $MnSO_4 \cdot 4H_2O$  0.25 g,调节pH值为6.2~6.4,于121℃条件下高压灭菌20 min。

米糠培养基:称取40 g脱脂米糠于100 mL螺口瓶中,加入40 mL蒸馏水,于121℃条件下高压灭菌15 min。

### 1.4 实验方法

**1.4.1 发酵菌种活化培养** 从-80℃冰箱中取出3种乳酸菌甘油管,分别接入MRS培养基中,于37℃静置培养16 h后,将培养液梯度稀释并涂布于MRS培养基平板上,于37℃静置培养24 h;挑取长势良好的单菌落接种于MRS培养基中,于37℃静置培养13~16 h,即得活化种子液。

**1.4.2 复合乳酸菌固态发酵脱脂米糠** 将3种活化种子液按体积比1:1:1混合后,按接种量为1%接入米糠培养基中,搅拌混匀后,于37℃静置发酵48 h。其中,脱脂米糠记为DRB(Defatted Rice Bran),复合乳酸菌固态发酵脱脂米糠记为FRB(Fermentation Rice Bran)。

**1.4.3 脱脂米糠理化性质测定** 1)营养成分测定。脱脂米糠中淀粉、蛋白质、膳食纤维及灰分含量的测定分别依照《食品安全国家标准 食品中淀粉

的测定》(GB/T 5009.9—2016)、《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》(GB 5009.5—2016)、《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》(GB/T 5009.88—2014)和《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》(GB/T 5009.4—2016)<sup>[18-21]</sup>进行。

2)持水力(WHC)和持油力(OHC)测定。参考 V. Benítez<sup>[22]</sup> 的方法,称取 0.2 g 样品分别溶解在 2 mL 蒸馏水和花生油中,混合均匀,于 37 °C 浸泡 12 h 后,在 8000 r/min 条件下离心 10 min,弃去上清液,收集沉淀并称量,记为  $W_1$ ,将沉淀干燥至恒重,质量记为  $W_2$ 。WHC 和 OHC 计算公式均如下:

$$WHC \text{ 或 } OHC = (W_1 - W_2) / W_2$$

3)膨胀力(WSC)测定。参考 Y. Chen<sup>[23]</sup> 的方法,称取 0.5 g 样品与 10 mL 蒸馏水充分混匀,于刻度试管中静置 24 h,样品吸水前后的体积分别记为  $V_1$  和  $V_2$ 。WSC 计算公式如下:

$$WSC = (V_2 - V_1) / 0.5$$

4)溶解性测定。参考 C. F. Chau<sup>[24]</sup> 的方法,称取 0.1 g 样品溶解于 10 mL 蒸馏水中,100 °C 水浴搅拌 30 min,于 5000 r/min 条件下离心 10 min,收集上清液并干燥至恒重,质量记为  $m_1$ 。溶解性计算公式如下:

$$\text{溶解性} = m_1 / 0.1$$

**1.4.4 脱脂米糠结构性质测定** 1)红外光谱分析(FTIR)。将样品与高纯 KBr 按质量比 1:200 混合均匀,压制成可透光的圆形薄片,于傅里叶变换红外光谱仪中进行测试。测试条件:扫描波数为 4000~400  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为 64 次<sup>[16]</sup>。

2)热失重分析(TG/DTG)。称取样品 5 mg,用高纯  $\text{N}_2$  作载气,以 10 °C/min 的升温速率从室温加热至 600 °C,记录质量损失<sup>[25]</sup>。

3)微观结构表征。将样品喷金后放入扫描电子显微镜样品室中并抽真空,观察样品微观结构<sup>[26]</sup>。

**1.4.5 脱脂米糠生物活性测定** 1)总酚和总黄酮含量测定。将样品按照样品( $m/g$ ):95%乙醇( $V/mL$ )=1:10 的比例混合后,置于 50 °C 水浴锅中萃取 4 h,于 3000 r/min 条件下离心 15 min,重复提取两次,合并上清液,得到脱脂米糠醇提物。分别采用

Folin-iocalteu 法<sup>[27]</sup>和氧化铝-亚硝酸钠比色法<sup>[28]</sup>测定米糠醇提物中总酚和总黄酮的含量。

2)自由基清除率测定。DPPH 自由基清除率、ABTS<sup>+</sup>自由基清除率和·OH 自由基清除率的测定参考笔者实验室已有方法<sup>[29]</sup>进行。

**1.4.6 脱脂米糠功能特性测定** 1)胆固醇吸收能力测定。参考 C. Daou 等<sup>[30]</sup>的方法,将新鲜蛋黄以质量分数 10%加入蒸馏水中稀释,并搅打至完全乳化。称取 2.0 g 样品加入 50 g 稀释的蛋黄液中,分别调节 pH 值至 2.0(模拟胃环境)和 7.0(模拟肠道环境);37 °C 振荡孵育 2 h 后,于 2000 r/min 条件下离心 15 min;加入 0.1 mL 邻苯甲醛作为显色试剂,于 550 nm 波长处测定吸光度。

2) $\alpha$ -淀粉酶抑制率测定。取 1 mL 脱脂米糠醇提物与 2 mL  $\alpha$ -淀粉酶、1 mL 磷酸缓冲液(2 mol/L, pH 值为 6.9)充分混匀,25 °C 孵育 20 min 后,加入 1 mL 质量分数为 1%的淀粉溶液,酶解反应 5 min;加入 DNS 试剂并沸水浴 5 min,于 540 nm 波长处测定吸光度,并以磷酸缓冲液替代脱脂米糠醇提物为全酶管,以磷酸缓冲液替代酶液为对照管。按照下式计算脱脂米糠对  $\alpha$ -淀粉酶的抑制率<sup>[1]</sup>。

$$\text{抑制率} = \frac{\text{全酶管吸光度} - \text{实验管吸光度}}{\text{全酶管吸光度} - \text{对照管吸光度}} \times 100\%$$

## 1.5 数据处理

所有实验均重复 3 次,结果表示为(平均值±标准差);采用 Microsoft Excel 进行数据整理,SPSS 22.0 进行方差分析, $P < 0.05$  表示差异显著;利用 Origin 2023 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 发酵前后脱脂米糠理化性质分析

**2.1.1 营养成分分析** 发酵前后脱脂米糠的营养成分见表 1。由表 1 可知,经复合乳酸菌固态发酵后,脱脂米糠中蛋白质含量增加,这可能是因为乳酸菌发酵过程中产生的乳酸导致脱脂米糠致密结构被破坏,释放出大分子蛋白质,促进可溶性蛋白的析出,而乳酸菌自身含有的菌体蛋白也是蛋白质含量增加的原因之一<sup>[14]</sup>。本研究使用的凝结芽孢杆菌具有产淀粉酶的优势<sup>[31]</sup>,可利用淀粉作为碳源,同时降解淀粉生成可溶性的糖,因此淀粉含量会降

低<sup>[32]</sup>。采用复合乳酸菌固态发酵脱脂米糠,菌种间的功能优势互补<sup>[17]</sup>不仅可降解蛋白质、淀粉等大分子物质,增加膳食纤维的含量,且其产生的乳酸会降低环境 pH 值,对脱脂米糠中糖苷键的断裂及基团结构的破坏均有一定的促进作用<sup>[16]</sup>。

**2.1.2 物化特性分析** 米糠的物化特性与其成分、表面性质密切相关,同时也会影响米糠的口感和流变特性<sup>[33]</sup>。发酵前后脱脂米糠的物化特性见表 2。由表 2 可知,经复合乳酸菌固态发酵后,脱脂米糠的溶解性提高了 23.53%,表明脱脂米糠中不溶性大分子物质被降解,可溶物析出;持水性和膨胀力分别提高了 17.70% 和 142.22%,表明复合乳酸菌固态发酵在将不溶性大分子物质降解为可溶性小分子底物的同时,能够增加脱脂米糠的比表面积和疏松度,使其多孔结构增加,进而暴露更多的氢键和亲水基团;持油性提高了 34.65%,这是由于脱脂米糠致密结构被破坏,暴露出较多的亲油基团,增加了脱脂米糠与油脂的接触面积。复合乳酸菌固态发酵后,脱脂米糠中极性和非极性基团的增加可使水分子和油更易渗透到其内部并与之紧密结合,显著改变其物化特性<sup>[34]</sup>。

## 2.2 发酵前后脱脂米糠结构性性质分析

**2.2.1 化学结构** 发酵前后脱脂米糠的 FTIR 谱图如图 1 所示。由图 1 可知,经复合乳酸菌固态发酵后,脱脂米糠的特征吸收峰峰形、位置均未发生明显变化,表明复合乳酸菌固态发酵未改变脱脂米糠的化学结构特征。3500  $\text{cm}^{-1}$  附近为—OH 键的伸缩

表 1 发酵前后脱脂米糠的营养成分

样品	蛋白质含量	淀粉含量	膳食纤维含量	灰分含量
DRB	13.16±0.52 <sup>b</sup>	36.47±1.23 <sup>a</sup>	32.56±1.68 <sup>b</sup>	12.03±1.54 <sup>a</sup>
FRB	15.26±0.71 <sup>a</sup>	32.61±2.14 <sup>b</sup>	37.58±1.89 <sup>a</sup>	10.15±1.64 <sup>a</sup>

注:同列不同小写字母表示组间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

表 2 发酵前后脱脂米糠的物化特性

样品	持水性/ ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	持油性/ ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	溶解性/ ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	膨胀力/ ( $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ )
DRB	2.26±0.12 <sup>b</sup>	1.01±0.05 <sup>b</sup>	0.17±0.01 <sup>b</sup>	1.35±0.11 <sup>b</sup>
FRB	2.66±0.17 <sup>a</sup>	1.36±0.04 <sup>a</sup>	0.21±0.02 <sup>a</sup>	3.27±0.28 <sup>a</sup>

振动峰,2930  $\text{cm}^{-1}$  附近为糖类甲基的伸缩振动峰,表明脱脂米糠具有典型的糖类特征吸收峰<sup>[35]</sup>。1630  $\text{cm}^{-1}$  处代表醛酸的 C—O 结构<sup>[36]</sup>和 1510  $\text{cm}^{-1}$  处表示木质素苯环的伸缩振动峰,经复合乳酸菌固态发酵后,脱脂米糠在这两处的吸收峰强度均增强,表明复合乳酸菌固态发酵可降解多糖类物质产生糖醛酸,同时,纤维素、半纤维素等多糖类物质的降解造成木质素含量相对提升。1200~1000  $\text{cm}^{-1}$  对应纤维素和半纤维素糖环的 C—O—C 和 C—O—H 结构<sup>[16]</sup>,经复合乳酸菌固态发酵后,脱脂米糠此区域的峰强度减弱,表明复合乳酸菌固态发酵破坏了纤维素和半纤维素的大分子结构。

**2.2.2 热稳定性** 发酵前后脱脂米糠的 TG/DTG 曲线及热解动力学参数分别见图 2 和表 3。由图 2 和表 3 可知,脱脂米糠的失重过程分为 3 个阶段。第 1 阶段为室温~210  $^{\circ}\text{C}$ ,主要表现为样品中水分及小分子物质的蒸发。第 2 阶段的热解温度为 210~400  $^{\circ}\text{C}$ ,此阶段样品失重速率增大,主要与多糖类物质的热分解有关,发酵前后脱脂米糠均在 286  $^{\circ}\text{C}$  和 335  $^{\circ}\text{C}$  附近出现两个热解失重峰,结合脱脂米糠结构特征,推测其分别对应半纤维素和纤维素的热解失重峰。其中,脱脂米糠发酵后的最大热解失重速率为 0.7225  $\%/^{\circ}\text{C}$ ,较发酵前提高了 23.21%,表明复合乳酸菌固态发酵降解了脱脂米糠中的多糖类大分子物质,这有利于提高脱脂米糠热解失重速率。第 3 阶段为慢速热解阶段(400~600  $^{\circ}\text{C}$ ),该阶段主要是生物质炭化过程<sup>[25]</sup>,脱脂米糠发酵后的热解反应活化能较发酵前降低了 15.81%,表明复合乳酸

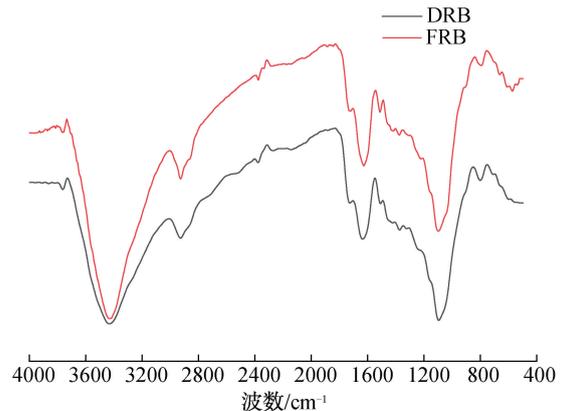


图 1 发酵前后脱脂米糠的 FTIR 谱图

Fig. 1 FTIR spectra of defatted rice bran before and after fermentation

菌固态发酵破坏了脱脂米糠的大分子结构,使热解反应更易进行。脱脂米糠发酵后的热解残重进一步降低,热解反应更加彻底。

**2.2.3 微观结构** 发酵前后脱脂米糠的 SEM 图如图 3 所示。由图 3 可知,发酵前,脱脂米糠的表面较为致密,覆盖有淀粉和蛋白质的块状颗粒物<sup>[37]</sup>;发酵后,脱脂米糠的表面刚性结构被破坏,粗糙度增加,孔径增大,出现较大的孔洞及空腔骨架结构,比表面积增加,这有利于释放生物活性物质及提升脱脂米糠的吸附性能<sup>[26]</sup>。

## 2.3 发酵前后脱脂米糠生物活性分析

**2.3.1 总酚和总黄酮含量** 酚类物质具有较强的

抗氧化活性,是米糠抗氧化活性物质的关键来源之一。黄酮是一类广泛存在于植物中的多酚类物质,由于其自身易被氧化而具有抗氧化作用<sup>[10]</sup>。总酚和总黄酮含量被业界广泛用于评价米糠的抗氧化能力。发酵前后脱脂米糠的总酚和总黄酮含量见表 4。由表 4 可知,经复合乳酸菌固态发酵后,脱脂米糠的总酚和总黄酮的含量分别为 5.26 mg GAE/g 和 2.13 mg RE/g,较发酵前升高了 43.32% 和 70.40%。天然状态下,谷物基质的阻碍及酚类物质与不可消化多糖的共价结合限制了酚类物质的释放,导致其利用率较低<sup>[6]</sup>,而经复合乳酸菌固态发酵后,脱脂米糠的疏松度和孔隙度增大,使结合状态下的酚类物质被释放,总酚和总黄酮的含量得以升高。

**2.3.2 自由基清除率** 自由基是在机体代谢过程中产生的,过度累积会引发细胞损伤,进而导致组织损伤和机体衰老<sup>[1]</sup>。发酵前后脱脂米糠的自由基清除率如图 4 所示,其中不同小写字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。由图 4 可知,经复合乳酸菌固态发酵后,脱脂米糠的 DPPH 自由基清除率、ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率和·OH 自由基清除率较发酵前

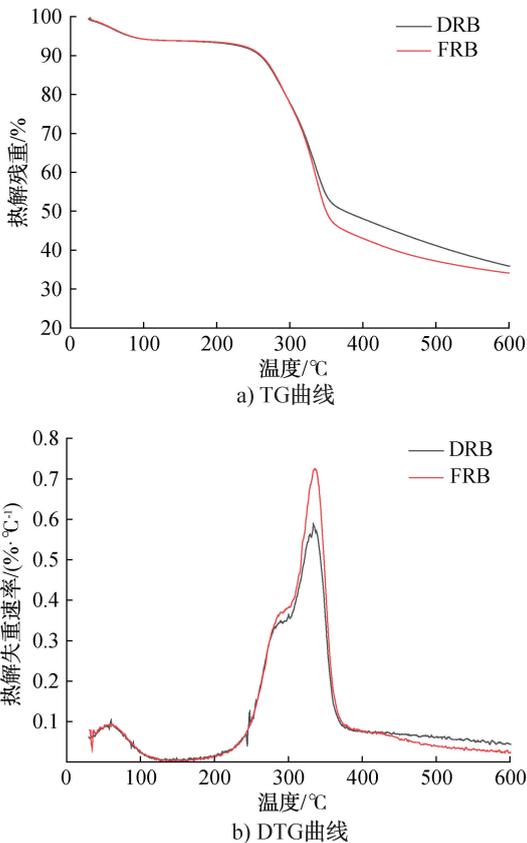


图 2 发酵前后脱脂米糠的 TG/DTG 曲线  
Fig. 2 TG/DTG curves of defatted rice bran before and after fermentation

表 3 发酵前后脱脂米糠的热解动力学参数

Table 3 The thermogravimetric kinetics parameters of defatted rice bran before and after fermentation

样品	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	最大热解失重速率/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\%^{-1})$	总热解残重/%	活化能/ $(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
DRB	334.8	0.586 4	35.86	27.50
FRB	335.6	0.722 5	34.02	23.15

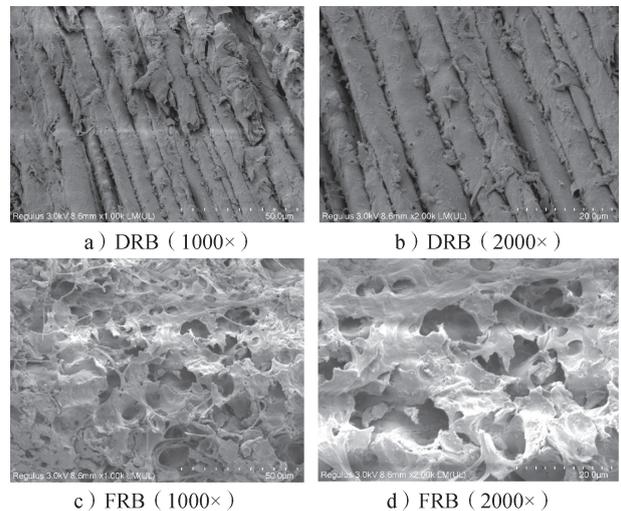


图 3 发酵前后脱脂米糠的 SEM 图  
Fig. 3 SEM images of defatted rice bran before and after fermentation

表 4 发酵前后脱脂米糠的总酚和总黄酮含量  
Table 4 Content of total phenols and flavonoids in defatted rice bran before and after fermentation

样品	总酚/ $(\text{mg GAE}\cdot\text{g}^{-1})$	总黄酮/ $(\text{mg RE}\cdot\text{g}^{-1})$
DRB	$3.67 \pm 0.13^b$	$1.25 \pm 0.08^b$
FRB	$5.26 \pm 0.36^a$	$2.13 \pm 0.13^a$

分别提高了 268.27%、62.18% 和 22.18%，这表明经复合乳酸菌固态发酵后的脱脂米糠具有更好的自由基清除能力。脱脂米糠中的酚类物质是其抗氧化活性物质的重要来源之一，其中黄酮和酚酸能保护活体植物免受光合作用过程中所产生的自由基侵害<sup>[13]</sup>。因此，脱脂米糠自由基清除率的提高与其总酚和总黄酮含量的升高密切相关。

## 2.4 发酵前后脱脂米糠功能特性分析

### 2.4.1 胆固醇吸收能力

血清胆固醇过高会引起高血脂、动脉粥样硬化等疾病，而植物源食品具有改善脂质代谢、调节机体功能等功效<sup>[38]</sup>。米糠与胆固醇的结合能力与其表面结构特征和物理性质密切相关。发酵前后脱脂米糠的胆固醇吸收能力如图 5 所示。由图 5 可知，脱脂米糠发酵后的胆固醇吸收能力分别为 0.22 mg/g (pH 值为 2.0) 和 0.18 mg/g

(pH 值为 7.0)，较发酵前分别提高了 69.23% 和 20.00%，且在酸性条件下的胆固醇吸收能力更强，与曾锐等<sup>[25]</sup>的研究结果较一致。同持油性结果相对应，经复合乳酸菌固态发酵后，脱脂米糠的致密结构被破坏，孔隙度增大，暴露出更多亲油基团，对胆固醇的吸收能力提升<sup>[28]</sup>，具有降低胆固醇的潜在功效。

### 2.4.2 α-淀粉酶抑制率

α-淀粉酶可水解淀粉，当抑制其活性时，可减缓淀粉水解速度，降低葡萄糖产生量，进而达到控制血糖、减少糖尿病和肥胖发生的目的<sup>[1]</sup>。发酵前后脱脂米糠的 α-淀粉酶抑制率如图 6 所示。由图 6 可知，经复合乳酸菌固态发酵后，脱脂米糠的 α-淀粉酶抑制率与发酵前无显著性差异 ( $P>0.05$ )，表明脱脂米糠自身具有一定的 α-淀粉酶抑制性，而复合乳酸菌固态发酵并未改变这一特性，即脱脂米糠发酵后也具有较好的抗糖性能。

## 3 结论

本文以粪肠球菌、凝结芽孢杆菌和发酵粘液乳杆菌组成的复合乳酸菌固态发酵脱脂米糠，并研究了发酵前后脱脂米糠的理化性质、结构性质、生物活性和功能特性，得到如下结论：复合乳酸菌固态发酵可增加脱脂米糠中蛋白质和膳食纤维含量，提升脱脂米糠的溶解性、持水性、持油性和膨胀力，降解脱脂米糠中的不溶性大分子结构，增加脱脂米糠的疏松度和孔隙度，有助于生物活性物质的释放；经脱脂米糠发酵后的总酚和总黄酮含量均增加，DPPH 自由基、ABTS<sup>+</sup> 自由基和·OH 自由基清除率均提升，且具有较好的胆固

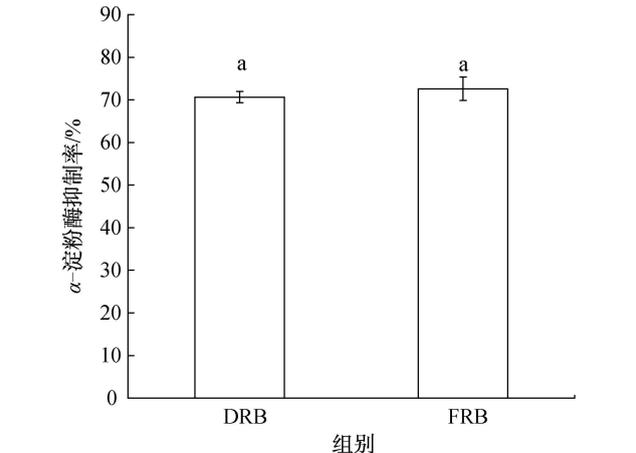


图 4 发酵前后脱脂米糠的自由基清除率

Fig. 4 Free radical scavenging ability of defatted rice bran before and after fermentation

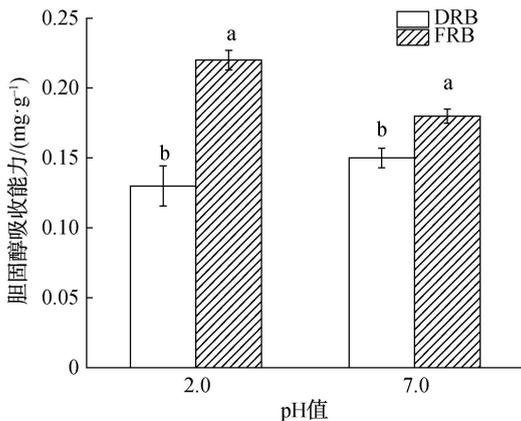


图 5 发酵前后脱脂米糠的胆固醇吸收能力

Fig. 5 Adsorption capacity for cholesterol of defatted rice bran before and after fermentation

图 6 发酵前后脱脂米糠的 α-淀粉酶抑制率

Fig. 6 The inhibition of α-amylase activity of defatted rice bran before and after fermentation

醇吸收能力和抗糖性能。综上,复合乳酸菌固态发酵可提升脱脂米糠的功能特性,为米糠的深度综合利用提供了参考,后续可深入研究发酵脱脂米糠在动物饲料及功能食品方面的应用。

## 参考文献:

- [1] JANARNY G, GUNATHILAKE K D P P. Changes in rice bran bioactives, their bioactivity, bioaccessibility and bioavailability with solid-state fermentation by *Rhizopus oryzae* [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, 23: 101510.
- [2] 魏林. 米糠综合应用研究进展[J]. *粮食加工*, 2022, 47(3): 37-39.
- [3] RITTHIBUT N, OH S J, LIM S T. Enhancement of bioactivity of rice bran by solid-state fermentation with *Aspergillus strains* [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 135: 110273.
- [4] PUNIA S, SANDHU K S, GRASSO S, et al. *Aspergillus oryzae* fermented rice bran: A byproduct with enhanced bioactive compounds and antioxidant potential [J]. *Foods*, 2020, 10(1): 70.
- [5] 张慧娟, 曹欣然, 柳天戈, 等. 米根霉对脱脂米糠酚类物质释放的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(14): 108-111, 126.
- [6] XIE J Y, LIU S, DONG R H, et al. Bound polyphenols from insoluble dietary fiber of defatted rice bran by solid-state fermentation with *Trichoderma viride*: Profile, activity, and release mechanism [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(17): 5026-5039.
- [7] DZAH C S, DUAN Y Q, ZHANG H H, et al. Latest developments in polyphenol recovery and purification from plant by-products: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 375-388.
- [8] 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.
- [9] CHIREMBA C, ROONEY L W, BETA T. Microwave-assisted extraction of bound phenolic acids in bran and flour fractions from sorghum and maize cultivars varying in hardness [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(18): 4735-4742.
- [10] WANG T, HE F L, CHEN G B. Improving bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds in cereal grains through processing technologies: A concise review [J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 7: 101-111.
- [11] WU H, RUI X, LI W, et al. Whole-grain oats (*Avena sativa* L.) as a carrier of lactic acid bacteria and a supplement rich in angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptides through solid-state fermentation [J]. *Food & Function*, 2018, 9(4): 2270-2281.
- [12] 陈嘉序, 傅亚平, 高瑶, 等. 固态生物转化对植物性食品加工副产物生物活性影响的研究进展 [J]. *食品与机械*, 2020, 36(10): 219-227.
- [13] SCHMIDT C G, GONÇALVES L M, PRIETTO L, et al. Antioxidant activity and enzyme inhibition of phenolic acids from fermented rice bran with fungus *Rhizopus oryzae* [J]. *Food Chemistry*, 2014, 146: 371-377.
- [14] 刘磊, 冉玉兵, 张名位, 等. 乳酸菌发酵对脱脂米糠营养成分的影响 [J]. *中国食品学报*, 2020, 20(1): 118-126.
- [15] KIM K M, YU K W, KANG D H, et al. Anti-stress and anti-fatigue effect of fermented rice bran [J]. *Phytotherapy Research: PTR*, 2002, 16(7): 700-702.
- [16] LI Y X, NIU L, GUO Q Q, et al. Effects of fermentation with lactic bacteria on the structural characteristics and physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from prosomillet bran [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112609.
- [17] YANG X, SHI Z Y, WANG T Y, et al. Fermentative L-lactic acid production using *Bacillus coagulans* from corn stalk deconstructed by an anaerobic microbial community [J]. *Fermentation*, 2023, 9(7): 611.
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定: GB 5009.9—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定: GB 5009.88—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中灰分的测定: GB 5009.4—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] BENÍTEZ V, MOLLÁ E, MARTÍN-CABREJAS M A, et al. Physicochemical properties and *in vitro* antidiabetic potential of fibre concentrates from onion by-products [J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 36: 34-42.
- [23] CHEN Y, YE R, YIN L, et al. Novel blasting extrusion processing improved the physicochemical properties of soluble dietary fiber from soybean residue and *in vivo* evaluation [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 120: 1-8.
- [24] CHAU C F, WANG Y T, WEN Y L. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre [J]. *Food Chemistry*, 2007, 100(4): 1402-1408.
- [25] 曾锐, 汪卓, 陈菁, 等. 乳酸菌发酵对海红米糠的结构和功能特性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(11): 119-124.

- [26] HUA M, LU J X, QU D, et al. Structure, physicochemical properties and adsorption function of insoluble dietary fiber from ginseng residue: A potential functional ingredient[J]. Food Chemistry, 2019, 286: 522–529.
- [27] HUNG P V, MORITA N. Distribution of phenolic compounds in the graded flours milled from whole buckwheat grains and their antioxidant capacities[J]. Food Chemistry, 2008, 109(2): 325–331.
- [28] GUNATHILAKE K D P P, RANAWEERA K K D S, RUPASINGHE H P V. Change of phenolics, carotenoids, and antioxidant capacity following simulated gastrointestinal digestion and dialysis of selected edible green leaves[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 371–379.
- [29] 宋丽丽, 闻格, 霍姍浩, 等. 小黄姜多糖的分离纯化及其结构特征及抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 73–79.
- [30] DAOU C, ZHANG H. Functional and physiological properties of total, soluble, and insoluble dietary fibres derived from defatted rice bran[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(12): 3878–3885.
- [31] KEATING L, KELLY C, FOGARTY W. Mechanism of action and the substrate-dependent pH maximum shift of the alpha-amylase of *Bacillus coagulans*[J]. Carbohydrate Research, 1998, 309(4): 311–318.
- [32] 文伟, 张名位, 刘磊, 等. 乳酸菌发酵对脱脂米糠中糖和酚类物质含量的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(2): 137–141.
- [33] 张慧娟, 冯雪佳, 曹欣然, 等. 生物改性对脱脂米糠营养特性及功能特性的影响[J]. 中国油脂, 2021, 46(5): 109–116.
- [34] GU M D, FANG H C, GAO Y H, et al. Characterization of enzymatic modified soluble dietary fiber from tomato peels with high release of lycopene[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105321.
- [35] CHEN J J, HUANG H R, CHEN Y, et al. Effects of fermentation on the structural characteristics and *in vitro* binding capacity of soluble dietary fiber from tea residues[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109818.
- [36] 曹龙奎, 康丽君, 寇芳, 等. 改性前后小米糠膳食纤维结构分析及体外抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 46–52.
- [37] LIU Y L, ZHANG H B, YI C P, et al. Chemical composition, structure, physicochemical and functional properties of rice bran dietary fiber modified by cellulase treatment[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128352.
- [38] 王吉力特, 雍雅萍, 苏靖, 等. 米糠蛋白改善大鼠脂质代谢作用及机制研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 363–368.

## Effect of solid-state fermentation with compound lactic acid bacteria on the physicochemical properties, biological activities and functional characteristics of defatted rice bran

SONG Lili, HUO Shan hao, HU Ran ran, ZHAO Xin miao, ZHU Yu qi, YANG Xu, ZHANG Zhi ping, WEI Tao  
College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** The defatted rice bran was fermented by compound lactic acid bacteria composed of *Enterococcus faecalis*, *Bacillus coagulans* and *Limosilactobacillus fermentum* in solid-state, and this study investigated the changes of physicochemical properties, structural properties, biological activities and functional properties of defatted rice bran before and after fermentation. The results showed that the solid-state fermentation of compound lactic acid bacteria could increase the content of protein and dietary fiber in defatted rice bran, improve the solubility, water holding capacity, oil holding capacity, and water swelling capacity of defatted rice bran, destroy the macromolecular structure of defatted rice bran, increase its porosity and facilitating a more through pyrolysis reaction. Compared with raw materials, the contents of total phenols and flavonoids of defatted rice bran after fermentation with compound lactic acid bacteria were increased by 43.32% and 70.40%, respectively. The DPPH free radical scavenging rate, ABTS<sup>+</sup> free radical scavenging rate and  $\cdot$ OH free radical scavenging rate were increased by 268.27%, 62.18% and 22.18%, respectively. The absorption rate of cholesterol was increased, and anti-sugar ability was also improved. In conclusion, solid-state fermentation with compound lactic acid bacteria can effectively improve the comprehensive utilization value of defatted rice bran and enhance its application potential in the field of functional food.

**Key words:** defatted rice bran; compound lactic acid bacteria; solid-state fermentation; physicochemical property; biological activity; functional property