

# 生物改性对脱脂米糠营养特性及功能特性的影响

张慧娟<sup>1,2</sup>, 冯雪佳<sup>1</sup>, 曹欣然<sup>3</sup>, 张运艳<sup>4</sup>, 王静<sup>1,2</sup>

(1. 中国-加拿大食品营养与健康联合实验室(北京), 北京 100048; 2. 北京工商大学, 北京 100048;

3. 知识产权出版社, 北京 100081; 4. 上海良友(集团)有限公司技术中心, 上海 200333)

**摘要:**为提高米糠的利用率,改善米糠膳食纤维的组成及酚类物质的释放,通过木聚糖酶酶解、纤维素酶酶解、木聚糖酶和纤维素酶复合酶解、乳酸菌和酵母菌发酵处理及发酵酶解5种方法对脱脂米糠进行生物改性,探究脱脂米糠营养成分及功能特性的变化。结果表明:发酵酶解显著改善了脱脂米糠膳食纤维的组成,可溶性膳食纤维含量提高19.7%,不溶性膳食纤维含量降低8.5%;发酵处理使脱脂米糠中游离子态多酚含量提高19.3%,结合态多酚含量提高31.2%,总酚含量提高29.0%,游离态黄酮含量提高66.9%,结合态黄酮含量提高175.7%,总黄酮含量提高128.7%,并且改变了脱脂米糠中酚酸的组成。复合酶解改性显著提高了脱脂米糠的比表面积,降低了粒径。与未处理组相比,发酵酶解处理降低了米糠的持水性和持油性。经发酵改性的脱脂米糠对牛磺胆酸钠的吸附能力增加4.27倍。生物改性能够有效改善脱脂米糠的营养特性和功能特性,进一步为其在食品领域的开发利用提供可能。

**关键词:**米糠;脱脂;生物改性;营养特性;功能特性

中图分类号:TS201.4;Q819

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2021)05-0109-08

## Effects of biological modification on nutritional and functional properties of defatted rice bran

ZHANG Huijuan<sup>1,2</sup>, FENG Xuejia<sup>1</sup>, CAO Xinran<sup>3</sup>,  
ZHANG Yunyan<sup>4</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>

(1. China - Canada Joint Lab of Food Nutrition and Health (Beijing), Beijing 100048, China;

2. Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 3. Intellectual

Property Publishing House Co., Ltd., Beijing 100081, China; 4. Technology Center

of Shanghai Liangyou (Group) Co., Ltd., Shanghai 200333, China)

**Abstract:** In order to improve the utilization rate of rice bran, and improve the composition of rice bran dietary fiber and the release of phenolic substances, the biological modification of defatted rice bran was carried out by xylanase hydrolysis, cellulase hydrolysis, xylanase and cellulase composite hydrolysis, lactic acid bacteria and yeast fermentation and fermentation - enzyme hydrolysis. The changes of nutritional components and functional properties of rice bran were studied. The results showed that the composition of dietary fiber in defatted rice bran was significantly improved by fermentation - enzyme hydrolysis, and the content of soluble dietary fiber in defatted rice bran increased by 19.7%, and the

content of insoluble dietary fiber decreased by 8.5%. After fermentation, the content of free polyphenols, bound polyphenols, total phenols, free flavonoids, bound flavonoids and total flavonoids in rice bran increased by 19.3%, 31.2%, 29.0%, 66.9%, 175.7% and 128.7%, respectively, and the composition of phenolic acids in rice bran was changed. The specific surface area of rice bran

收稿日期:2020-12-23;修回日期:2021-03-03

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0401105);

国家自然科学基金项目(31871839);北京市属高校高水平教师队伍支持计划——青年拔尖人才(CIT&TCD201904038)

作者简介:张慧娟(1983),女,教授,博士,研究方向为谷物功能性配料(E-mail)zhanghuijuan@th.btbu.edu.cn。

通信作者:王静,教授,博士(E-mail)wangjing@th.btbu.edu.cn。

increased and the particle size decreased significantly by the composite enzymatic hydrolysis. Compared with the untreated group, the water holding capacity and oil holding capacity of rice bran decreased significantly by fermentation - enzyme hydrolysis. The adsorption capacity of sodium taurocholate on fermented rice bran increased by 4.27 times. Biological modification could effectively improve the nutritional and functional properties of defatted rice bran, and further provide the possibility for the development and utilization of defatted rice bran in food field.

**Key words:** rice bran; defatting; biological modification; nutritional property; functional property

米糠是稻米加工的副产物,富含膳食纤维、蛋白质、谷维素、维生素和矿物质,具有很大的开发潜力,在商业上呈现出越来越重要的地位。2014年我国规模以上的大米加工企业9 830家,年产米糠1 461万t(超过我国的大豆产量),米糠含油率平均为18%左右(与大豆相当)。如米糠能全部加以利用,按实际出油率15%计算,每年可生产米糠油220万t。米糠油中富含维生素E、谷维素、植物甾醇等多种活性物质,其中维生素E的含量为0.10%~0.15%,谷维素的含量为1.0%~1.5%,具有抗氧化、调节脂质代谢等生物活性<sup>[1]</sup>。发达国家的米糠深加工量可达米糠总产量的40%~80%,在我国有效开发利用的米糠仅占年产量的10%~20%,大多数的米糠被直接用作饲料,造成这一资源的极大浪费<sup>[2]</sup>。

脱脂米糠富含膳食纤维、蛋白质等营养物质,但是由于其口感粗糙,可食性较差,因此米糠的改性成为米糠利用过程中的重要方法。生物改性是一种条件温和的改性方法,主要包括发酵法和酶解法,可以改善膳食纤维的营养特性和功能特性。发酵法改性效果较好的菌种是酵母菌和乳酸菌。研究发现,酵母菌和乳酸菌可以提高麸皮中可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)、水溶性阿拉伯木聚糖和酚类化合物的含量,提高麸皮抗氧化性<sup>[3]</sup>。因此,研究生物改性对米糠的影响应从营养方面进行探究,并且应考虑米糠结构方面的变化以及功能特性的变化,以便应用到食品配料中。

本文通过使用纤维素酶、木聚糖酶、酵母菌、乳酸菌对脱脂米糠进行生物改性,对米糠中的总膳食纤维(Total dietary fiber, TDF)、不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)、SDF的含量,游离态多酚、结合态多酚、游离态黄酮、结合态黄酮含量,酚酸的种类和含量,粒径分布,持水性(Water holding capacity, WHC),持油性(Oil holding capacity, OHC),以及米糠对牛磺胆酸钠吸附能力进行测定,研究生物改性对脱脂米糠营养特性及功能特性的影响,为改性米糠在食品中的应用提供可靠依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

米糠,新乡原阳大米有限公司;高活性干酵母、乳酸菌,安琪酵母股份有限公司;食品级木聚糖酶(10万U/g)、食品级纤维素酶(2万U/g),陆安生物科技有限公司;正己烷(分析纯),北京化工厂;没食子酸、牛磺胆酸钠标准品,美国Sigma公司;芦丁、阿魏酸、儿茶素、原儿茶酸、芥子酸、对香豆酸、咖啡酸、没食子酸标准品,上海源叶生物科技有限公司;福林酚(分析纯),北京半夏生物科技有限公司;盐酸、冰乙酸、2-(N-吗啉代)乙烷磺酸、三羟甲基氨基甲烷、碳酸钠、氢氧化钠、三氯化铝、亚硝酸钠、乙酸乙酯,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;乙醇、硅藻土,均为分析纯,西陇化工股份有限公司;甲醇(分析纯),迈瑞达科技有限公司;耐高温 $\alpha$ -淀粉酶、碱性蛋白酶、淀粉葡萄糖苷酶液,美国Sigma公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

FW-100高速万能粉碎机,北京中兴伟业仪器有限公司;SHB-III循环水真空泵,郑州长城科工贸有限公司;Interface I-300旋转蒸发仪,Buchi公司;SX-700高压灭菌锅,北京昭天伟业科技有限公司;SPX-250B-Z生化培养箱,上海博讯实业有限公司;THZ-82A水浴恒温振荡器,上海江星仪器有限公司;79600-70真空冷冻干燥机,美国LABCONCO公司;STARTER2100 pH计,美国奥豪斯公司;C-MAG HS 7磁力搅拌器,德国艾卡公司;BioTek Synergy H1MDG酶标仪,美国伯腾仪器有限公司;1260 infinityHPLC-MS,安捷伦科技(中国)有限公司;CR22N高速离心机,日本日立公司;Mastersizer 3000激光粒度仪,英国马尔文仪器有限公司;DGU-20A HPLC,岛津公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 脱脂米糠的制备

将新鲜的米糠用粉碎机粉碎,过0.250 mm孔径(60目)的筛网,得到粒径不超过0.3 mm的米糠

粉。按液料比 3:1 加入正己烷,在 25℃ 脱脂 30 min,干燥后装于密封袋, -20℃ 贮藏备用<sup>[4]</sup>。

### 1.2.2 脱脂米糠的生物改性

发酵前将脱脂米糠置于密封的烧瓶中,在高压蒸汽灭菌锅中 121℃ 灭菌 20 min,冷却后备用。所有的发酵过程均在生化培养箱中静置发酵。

(1) 发酵组:将 0.1 g 乳酸菌接种到 50 mL 液体 MRS 培养基中,在 37℃ 恒温培养箱中培养 16 h。将培养基摇匀,在 4℃ 条件下以 4 000 r/min 离心 10 min,沉淀用生理盐水洗涤 2 次,最后溶解在 50 mL 无菌水中,备用。100 g 脱脂米糠、100 mL 乳酸菌悬浊液、1.25 g 高活性干酵母及 50 mL 无菌水搅拌均匀,在 37℃ 恒温培养箱中培养 24 h。

(2) 酶解组:纤维素酶按照 5 万 U/100 g (以脱脂米糠质量计) 添加,木聚糖酶按照 10 万 U/100 g (以脱脂米糠质量计) 添加。100 g 脱脂米糠与 1 g 木聚糖酶或 2.5 g 纤维素酶及 150 mL 蒸馏水搅拌均匀,在 60℃ 恒温水浴条件下搅拌酶解 2 h。

(3) 复合酶解组:100 g 脱脂米糠与 1 g 木聚糖酶、2.5 g 纤维素酶及 150 mL 蒸馏水搅拌均匀,在 60℃ 恒温水浴条件下搅拌酶解 2 h。

(4) 发酵酶解组:继步骤(1)后加入 1 g 木聚糖酶、2.5 g 纤维素酶,在 60℃ 恒温水浴条件下搅拌酶解 2 h。

改性后的脱脂米糠于 100℃ 灭菌 10 min,冷却后置于 -80℃ 冰箱中冷冻 24 h,样品完全冻结后,置于真空冷冻干燥机中干燥 48 h,然后用高速万能粉碎机粉碎 1 min,过 0.250 mm 孔径(60 目)筛,在 -20℃ 下冷冻保存。

### 1.2.3 改性脱脂米糠膳食纤维含量测定

膳食纤维含量参照 GB 5009.88—2014 进行测定。

### 1.2.4 改性脱脂米糠营养特性的测定

#### 1.2.4.1 改性脱脂米糠游离态酚酸的提取

游离态酚酸的提取按照文献[5-6]的方法并加以修改。取 0.5 g 改性脱脂米糠,用 10 mL 丙酮-水-醋酸(体积比 70:29.5:0.5)在室温下磁力搅拌 2 h,将提取液在 4℃、5 000 r/min 的条件下离心 10 min,复提 1 次。收集上清液,于 50℃ 旋蒸,残留物用甲醇定容到 10 mL,在 -20℃ 贮存待用。

#### 1.2.4.2 改性脱脂米糠结合态酚酸的提取

结合态酚酸的提取按照文献[5-6]的方法稍加修改。提取完游离态多酚后,残渣用 2 mol/L 的 NaOH(料液比 1:20)在室温下磁力搅拌消化 2 h,之后用 6 mol/L 的 HCl 调节 pH 至 1。用 50 mL 乙酸

乙酯提取 5 次,将提取液在 4℃、5 000 r/min 的条件下离心 10 min 后收集上清液,于 50℃ 旋蒸,残留物用甲醇定容到 10 mL,在 -20℃ 贮存待用。

#### 1.2.4.3 改性脱脂米糠多酚含量的测定

多酚含量的测定按照文献[6-7]的方法并加以修改。分别取 100 μL 结合态酚酸和游离态酚酸提取液,各加入 100 μL 蒸馏水至离心管中,加入 1 mL 福林酚试剂和 0.8 mL 7.5% 碳酸钠溶液混合均匀。混合液在避光条件下孵育 1 h 后测定 765 nm 处的吸光度。以没食子酸含量( $x$ , mg/100 g)为横坐标,以吸光度( $y$ )为纵坐标,绘制标准曲线,得到标准曲线方程( $y = 1.6853x - 0.0023, R^2 = 0.9968$ )。根据样品的吸光度和标准曲线方程计算样品中的多酚含量,结果以没食子酸当量表示,单位为 mg/g(干基)。总酚含量为游离态多酚含量和结合态多酚含量之和。所有样品进行 3 次重复。

#### 1.2.4.4 改性脱脂米糠黄酮含量的测定

黄酮含量的测定按照文献[6,8]的方法并加以修改。分别取 100 μL 结合态酚酸和游离态酚酸提取液与 1.5 mL 的蒸馏水混合,加入 90 μL 5% 亚硝酸钠溶液反应 6 min。然后加入 180 μL 的 10% 三氯化铝溶液,振荡均匀后孵育 5 min。再加入 0.6 mL 1 mol/L 的 NaOH 溶液和 330 μL 的蒸馏水,振荡均匀后在 510 nm 处测定吸光度。以芦丁含量( $x$ , mg/100 g)为横坐标,以吸光度( $y$ )为纵坐标,绘制标准曲线,得到芦丁标准曲线方程( $y = 0.6053x + 0.0536, R^2 = 0.9978$ )。根据样品的吸光度和标准曲线方程计算样品中的黄酮含量,结果以芦丁当量表示,单位为 mg/g(干基)。总黄酮含量为游离态黄酮含量和结合态黄酮含量之和。所有样品进行 3 次重复。

#### 1.2.4.5 改性脱脂米糠酚酸组成的测定

酚酸组成用 HPLC-MS 进行测定。根据 1.2.4.1 和 1.2.4.2 的方法提取脱脂米糠的游离态酚酸和结合态酚酸,用色谱级甲醇复溶并定容至 10 mL,过 0.45 μm 有机膜备用。

HPLC 条件:Thermo scientific Hypersil GOLD 色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm);流动相 A 为 0.1% 甲酸水溶液,流动相 B 为 100% 甲醇;梯度洗脱程序为 0~5 min 10%~18% B, 5~10 min 18%~22% B, 10~60 min 22%~100% B, 60~75 min 100%~10% B, 75~85 min 10%~10% B;流速 1 mL/min;进样量 20 μL;运行时间 30 min;VWD 紫外检测器信号 A 320 nm,信号 B 289 nm。MS 条件:多反应(MRM)扫描模式,离子源温度 300℃,Dwell 22,5 个循环,分

析物的母离子、子离子及碰撞能量详见表 1。

表 1 多反应离子检测质谱条件

分析物	母离子( $m/z$ )	子离子( $m/z$ )	碰撞能量/V
儿茶素	291	139	20
芥子酸	225	207	20
阿魏酸	195	134	20
咖啡酸	181	135	10
没食子酸	171	125	15
对香豆酸	165	119	20
原儿茶酸	155	109	15

酚酸的定量采用外标法,选取 10 mg 儿茶素、芥子酸、阿魏酸、咖啡酸、没食子酸、对香豆酸、原儿茶酸等标准品,溶于 10 mL 甲醇中作为混标并稀释成不同的倍数,进行 HPLC-MS 分析,绘制标准曲线。

### 1.2.5 改性脱脂米糠粒径分布的测定

改性脱脂米糠的粒径分布按照 Chen 等<sup>[9]</sup>的方法稍作修改。将样品溶于超纯水,超声 30 s 后使用激光粒度仪进行测定。所有样品进行 3 次重复。

### 1.2.6 改性脱脂米糠功能特性的测定

#### 1.2.6.1 改性脱脂米糠持水性和持油性的测定

持水性、持油性参照文献[6,10]方法稍作修改进行测定。

#### 1.2.6.2 改性脱脂米糠牛磺胆酸钠吸附能力测定

改性脱脂米糠的牛磺胆酸钠吸附能力测定按照

Wen 等<sup>[11]</sup>的方法稍作修改。40 mg 的样品与 5 mL 2 mmol/L pH 6.5 的牛磺胆酸钠溶液混合,在 37 °C 下孵育 1 h。将孵育后的上清液用 0.45  $\mu$ m 的无机膜进行过滤,待液相色谱测定。

液相色谱条件:Inertsil ODS-SP 色谱柱(150 mm  $\times$  4.6 mm, 4.6  $\mu$ m),柱温 35 °C,流动相 A 为乙腈,流动相 B 为 0.4 g/kg  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液;洗脱程序为 30% A, 70% B;流速 1.0 mL/min;洗脱时间 20 min;紫外检测波长 205 nm;进样量 10  $\mu$ L。

将 2 mmol/L pH 6.5 的牛磺胆酸钠溶液稀释成不同倍数,进行液相色谱分析,以牛磺胆酸钠溶液浓度( $x$ , mmol/L)为横坐标,峰面积( $y$ )为纵坐标,绘制标准曲线,得到标准曲线方程( $y = 0.0029x + 0.0675$ ,  $R^2 = 0.9922$ )。根据标准曲线方程和样品的峰面积计算改性脱脂米糠对牛磺胆酸钠的吸附能力。

### 1.2.7 数据处理

实验结果采用 Excel 2013 和 SPSS Statistics 22 软件进行数据处理和分析,采用单因素方差分析法检验,显著性水平为  $p < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物改性对脱脂米糠膳食纤维组成的影响 (见表 2)

表 2 改性脱脂米糠的膳食纤维组成

膳食纤维	未处理	纤维素酶	木聚糖酶	复合酶解	发酵	发酵酶解
SDF	2.95 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>	3.25 $\pm$ 0.54 <sup>c</sup>	3.44 $\pm$ 0.23 <sup>d</sup>	3.45 $\pm$ 0.11 <sup>e</sup>	3.20 $\pm$ 0.23 <sup>b</sup>	3.53 $\pm$ 0.73 <sup>f</sup>
IDF	27.77 $\pm$ 0.37 <sup>b</sup>	25.22 $\pm$ 0.90 <sup>a</sup>	24.26 $\pm$ 0.53 <sup>a</sup>	25.80 $\pm$ 0.65 <sup>a</sup>	32.26 $\pm$ 0.18 <sup>b</sup>	25.40 $\pm$ 0.44 <sup>a</sup>
TDF	30.72 $\pm$ 0.19 <sup>c</sup>	28.47 $\pm$ 1.15 <sup>ab</sup>	27.70 $\pm$ 0.30 <sup>a</sup>	29.25 $\pm$ 0.55 <sup>b</sup>	35.46 $\pm$ 0.41 <sup>d</sup>	28.93 $\pm$ 1.05 <sup>b</sup>

注:同行不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

由表 2 可以看出,发酵和酶解均可以提高 SDF 的含量。与未处理组相比,复合酶解和发酵酶解 SDF 分别提高了 16.9% 和 19.7%, IDF 分别降低 7.1% 和 8.5%。纤维素酶的作用主要是随机水解纤维素链中的糖苷键,将纤维素长链水解成纤维素短链,使得纤维素的整体聚合度降低,最终将纤维素转化为可被人体消化利用的葡萄糖<sup>[12-13]</sup>。木聚糖酶的水解过程是  $\beta$ -1,4-木聚糖内切酶作用于木聚糖的 1,4- $\beta$ -D-木聚糖主链, $\alpha$ -L-阿拉伯呋喃糖苷酶、乙酰木聚糖酯酶和  $\beta$ -葡糖醛酸糖苷酶作用在侧链,这些酶的协同水解作用将木聚糖水解为单糖<sup>[14]</sup>。从结构角度分析,木聚糖是一种复合多糖,是通过  $\beta$ -1,4-糖苷键连接木糖而成。与木质素共价连接及与纤维素非共价相互作用的木聚糖层,其重要意义是维持纤维素的完整性和帮助保护纤维素免于纤维素酶的

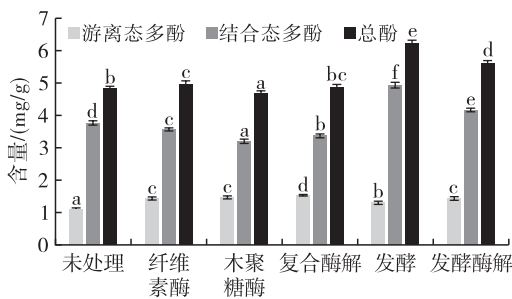
降解<sup>[15]</sup>。因此,将木聚糖酶和纤维素酶复合使用对膳食纤维的水解程度更高,膳食纤维的结构变化更加明显。Zhao 等<sup>[16]</sup>研究发现经过酵母菌和乳酸菌发酵的麸皮 SDF 含量提高,与本文研究结果相似。微生物在生长繁殖的过程中会分泌多种酶,这些酶能够水解原料中的蛋白质和淀粉,因此膳食纤维的相对含量增加;而木聚糖酶和纤维素酶可使纤维素糖苷键分解断裂,从而进一步增加 SDF 含量。

### 2.2 生物改性对脱脂米糠营养特性的影响

#### 2.2.1 改性脱脂米糠游离态多酚、结合态多酚和总酚含量(见图 1)

由图 1 可以看出,经过酶解处理后,脱脂米糠的游离态多酚含量提高,结合态多酚含量降低。当纤维素酶和木聚糖酶复合使用时,游离态多酚含量与未处理组相比显著提高了 40.2% ( $p < 0.05$ ),结合

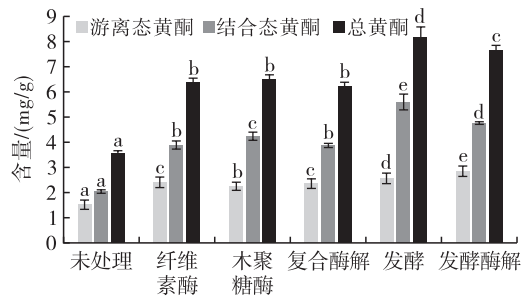
态多酚由未处理组的 3.75 mg/g 降低到 3.36 mg/g, 降低了 10.4%。经过发酵和发酵酶解处理的脱脂米糠, 与未处理组相比, 游离态多酚含量提高, 结合态多酚含量提高, 总酚含量也随之提高。与未处理组相比, 发酵组脱脂米糠游离态多酚含量提高了 19.3%, 结合态多酚含量提高了 31.2%, 总酚含量由未处理组的 4.83 mg/g 提高到 6.23 mg/g, 显著提高了 29.0% ( $p < 0.05$ )。当发酵和酶解复合使用时, 与未处理组相比, 游离态多酚含量提高了 31.6%, 结合态多酚含量提高了 10.9%, 总酚含量显著提高了 15.6% ( $p < 0.05$ )。Liu 等<sup>[17]</sup>使用淀粉酶、纤维素酶等对米糠进行水解, 经过酶解后的米糠游离态多酚含量提高。Liu 等<sup>[18]</sup>研究发现, 乳酸菌发酵和复合酶水解可以显著增加米糠提取物中的游离态多酚、结合态多酚和总酚含量 ( $p < 0.05$ )。这些研究结果与本研究结果一致。



注:同一物质不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图1 不同改性方法对脱脂米糠游离态多酚、结合态多酚、总酚含量的影响

2.2.2 改性脱脂米糠游离态黄酮、结合态黄酮和总黄酮含量(见图2)



注:同一物质不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图2 不同改性方法对脱脂米糠游离态黄酮、结合态黄酮、总黄酮含量的影响

由图2可知, 经过改性处理后脱脂米糠的黄酮含量都呈现不同程度的提高。与未处理组相比, 发酵组和发酵酶解组的结合态黄酮含量及总黄酮含量显著提高 ( $p < 0.05$ )。与未处理组相比, 经过发酵处理的脱脂米糠结合态黄酮含量提高了 175.7%, 游离态黄酮提高了 66.9%, 总黄酮含量提高了 128.7%, 而经过发酵酶解处理的脱脂米糠结合态黄酮含量提高 135.6%, 总黄酮含量提高了 114.3%。Liu 等<sup>[18]</sup>研究发现乳酸菌发酵和复合酶解均可使游离态黄酮、结合态黄酮和总黄酮含量增加, 与本研究结果一致。

2.2.3 改性脱脂米糠酚酸组成(见表3)

表3 改性脱脂米糠的酚酸组成

		µg/g		
酚酸	组别	游离态酚酸	结合态酚酸	总酚酸
儿茶素	未处理	0.85 ± 0.02 <sup>b</sup>	4.70 ± 0.05 <sup>c</sup>	5.55 ± 0.07 <sup>c</sup>
	纤维素酶	1.27 ± 0.02 <sup>d</sup>	1.27 ± 0.00 <sup>a</sup>	2.54 ± 0.02 <sup>d</sup>
	木聚糖酶	nd	2.02 ± 0.02 <sup>b</sup>	2.02 ± 0.02 <sup>c</sup>
	复合酶解	0.26 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.27 ± 0.00 <sup>a</sup>	1.53 ± 0.00 <sup>b</sup>
	发酵	0.96 ± 0.06 <sup>c</sup>	nd	0.96 ± 0.06 <sup>a</sup>
	发酵酶解	0.97 ± 0.01 <sup>c</sup>	5.34 ± 0.00 <sup>d</sup>	6.32 ± 0.01 <sup>f</sup>
	芥子酸	未处理	nd	nd
纤维素酶		65.50 ± 3.63 <sup>b</sup>	11.40 ± 0.60 <sup>c</sup>	76.90 ± 4.23 <sup>c</sup>
木聚糖酶		nd	6.22 ± 0.15 <sup>a</sup>	6.22 ± 0.15 <sup>a</sup>
复合酶解		nd	9.73 ± 0.45 <sup>b</sup>	9.73 ± 0.45 <sup>b</sup>
发酵		nd	43.16 ± 0.45 <sup>e</sup>	43.16 ± 0.45 <sup>d</sup>
发酵酶解		6.90 ± 0.38 <sup>a</sup>	30.59 ± 0.45 <sup>d</sup>	37.49 ± 0.83 <sup>c</sup>
阿魏酸		未处理	7.65 ± 0.83 <sup>a</sup>	2 465.19 ± 23.06 <sup>d</sup>
	纤维素酶	1 630.90 ± 2.25 <sup>f</sup>	2 662.10 ± 3.37 <sup>e</sup>	4 292.89 ± 1.12 <sup>f</sup>
	木聚糖酶	334.00 ± 1.26 <sup>d</sup>	1 193.71 ± 8.26 <sup>a</sup>	1 527.70 ± 9.52 <sup>a</sup>
	复合酶解	699.31 ± 5.74 <sup>e</sup>	1 648.85 ± 4.48 <sup>c</sup>	2 348.16 ± 10.22 <sup>c</sup>
	发酵	101.10 ± 1.67 <sup>b</sup>	2 708.59 ± 52.58 <sup>f</sup>	2 809.69 ± 54.25 <sup>e</sup>
	发酵酶解	137.08 ± 0.28 <sup>c</sup>	1 490.09 ± 10.63 <sup>b</sup>	1 627.17 ± 10.91 <sup>b</sup>

续表 3

		μg/g		
酚酸	组别	游离态酚酸	结合态酚酸	总酚酸
咖啡酸	未处理	nd	nd	nd
	纤维素酶	881.53 ± 9.57 <sup>c</sup>	nd	881.53 ± 9.57 <sup>c</sup>
	木聚糖酶	nd	nd	nd
	复合酶解	409.54 ± 1.10 <sup>a</sup>	nd	409.54 ± 1.10 <sup>a</sup>
	发酵	1 021.80 ± 32.80 <sup>d</sup>	nd	1 021.80 ± 32.80 <sup>d</sup>
	发酵酶解	792.21 ± 0.61 <sup>b</sup>	nd	792.21 ± 0.61 <sup>b</sup>
没食子酸	未处理	157.13 ± 2.07 <sup>e</sup>	15.24 ± 1.22 <sup>a</sup>	172.37 ± 3.29 <sup>d</sup>
	纤维素酶	142.04 ± 1.32 <sup>c</sup>	nd	142.04 ± 1.32 <sup>b</sup>
	木聚糖酶	62.63 ± 0.50 <sup>a</sup>	44.71 ± 0.46 <sup>c</sup>	107.34 ± 0.04 <sup>a</sup>
	复合酶解	96.84 ± 0.66 <sup>b</sup>	71.08 ± 0.46 <sup>c</sup>	167.91 ± 1.12 <sup>c</sup>
	发酵	153.88 ± 1.00 <sup>d</sup>	29.62 ± 0.08 <sup>b</sup>	183.50 ± 1.07 <sup>e</sup>
	发酵酶解	356.74 ± 0.19 <sup>f</sup>	59.88 ± 0.81 <sup>d</sup>	416.63 ± 0.62 <sup>f</sup>
对香豆酸	未处理	7.79 ± 0.16 <sup>a</sup>	869.95 ± 3.11 <sup>d</sup>	877.74 ± 3.27 <sup>c</sup>
	纤维素酶	173.75 ± 1.38 <sup>e</sup>	947.30 ± 7.20 <sup>f</sup>	1 121.06 ± 8.58 <sup>e</sup>
	木聚糖酶	39.67 ± 0.27 <sup>b</sup>	385.13 ± 3.85 <sup>a</sup>	424.80 ± 4.12 <sup>a</sup>
	复合酶解	979.92 ± 2.34 <sup>f</sup>	642.61 ± 0.03 <sup>c</sup>	1 622.53 ± 2.37 <sup>f</sup>
	发酵	74.31 ± 0.16 <sup>d</sup>	922.61 ± 12.95 <sup>c</sup>	996.92 ± 13.11 <sup>d</sup>
	发酵酶解	62.78 ± 0.70 <sup>c</sup>	528.20 ± 1.31 <sup>b</sup>	590.97 ± 0.61 <sup>b</sup>
原儿茶酸	未处理	604.87 ± 2.77 <sup>b</sup>	765.28 ± 2.00 <sup>b</sup>	1 370.14 ± 4.77 <sup>b</sup>
	纤维素酶	1 142.58 ± 1.56 <sup>e</sup>	1 051.19 ± 13.70 <sup>f</sup>	2 193.77 ± 12.15 <sup>c</sup>
	木聚糖酶	285.30 ± 1.16 <sup>a</sup>	793.94 ± 13.74 <sup>c</sup>	1 079.24 ± 14.91 <sup>a</sup>
	复合酶解	795.32 ± 2.02 <sup>c</sup>	734.87 ± 4.58 <sup>a</sup>	1 530.20 ± 2.56 <sup>c</sup>
	发酵	1 128.71 ± 2.16 <sup>d</sup>	865.46 ± 9.56 <sup>e</sup>	1 994.17 ± 7.40 <sup>d</sup>
	发酵酶解	1 685.87 ± 11.48 <sup>f</sup>	831.21 ± 1.09 <sup>d</sup>	2 517.07 ± 10.39 <sup>f</sup>

注:同一物质不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ );nd 表示未检出。

由表 3 可知,在不同改性条件下提取液中游离态和结合态酚酸含量具有显著差异( $p < 0.05$ ),但是在酚酸组成上是相似的。芥子酸和咖啡酸在未处理的脱脂米糠中未检出,而经过纤维素酶和发酵酶解改性后,游离态酚酸中芥子酸含量分别为 65.50 μg/g 和 6.90 μg/g,5 种改性方法均可以提高结合态酚酸中的芥子酸含量;经过改性后,除木聚糖酶酶解对咖啡酸的释放无影响,其他改性方法均可以提高游离态酚酸中的咖啡酸含量。复合酶解处理可以显著提高脱脂米糠游离态酚酸中的阿魏酸、对香豆酸、原儿茶酸的含量( $p < 0.05$ ),分别提高了 90.4%、124.8 倍和 31.5%;儿茶素和没食子酸含量分别降

低 69.4% 和 38.4%。与复合酶解组相比,除阿魏酸和对香豆酸的含量降低外,发酵组和发酵酶解组进一步提高了游离态酚酸的含量。经过发酵酶解的脱脂米糠,结合态酚酸中儿茶素、没食子酸、原儿茶酸含量显著提高( $p < 0.05$ ),对香豆酸、阿魏酸的含量显著降低( $p < 0.05$ )。Liu 等<sup>[18]</sup>研究发现,与经过液化处理的米糠相比,发酵后米糠的游离态原儿茶酸、绿原酸、没食子酸、儿茶素、表儿茶素和山奈酚的含量显著增加( $p < 0.05$ ),游离态阿魏酸、异阿魏酸、香豆酸、丁香酸和香草酸的含量显著降低( $p < 0.05$ )。

2.3 生物改性对脱脂米糠粒径分布的影响(见表 4)

表 4 改性脱脂米糠的粒径分布

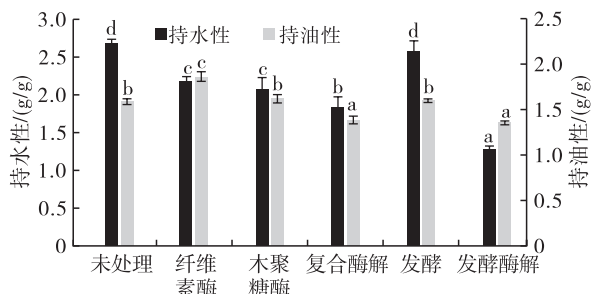
组别	比表面积/ (m <sup>2</sup> /kg)	表面积加权粒径/ μm	体积加权粒径/ μm	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
未处理	218.6	26.1	98.6	9.52	71.2	230
纤维素酶	318.5	17.9	83.6	5.83	56.9	205
木聚糖酶	354.9	16.1	69.6	5.29	44.7	185
复合酶解	453.5	12.6	57.1	4.03	50.7	124
发酵	236.7	24.1	87.0	8.31	64.9	200
发酵酶解	294.2	19.4	78.3	6.18	63.0	174



由表4可知,5种改性方法均可以降低脱脂米糠的粒径,增大脱脂米糠的比表面积,其中当纤维素酶和木聚糖酶复合使用时对脱脂米糠的比表面积和粒径影响最大,发酵对脱脂米糠的比表面积和粒径影响最小。当使用发酵酶解对脱脂米糠进行改性时,可能由于发酵后脱脂米糠的pH和黏度发生改变,纤维素酶和木聚糖酶并未处于最佳改性环境,从而使得改性脱脂米糠粒径大于复合酶解组。

## 2.4 生物改性对脱脂米糠功能特性的影响

### 2.4.1 改性脱脂米糠的持水性和持油性(见图3)

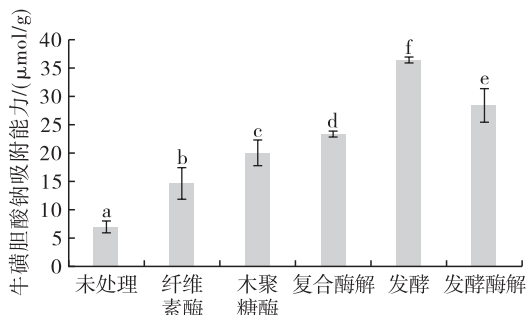


注:同一功能特性不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图3 不同改性方法对脱脂米糠持水性及持油性的影响

持水性通常是指以大分子构成的机体结构通过物理方式截留水从而阻止水渗出的能力<sup>[6]</sup>。由图3可知,与未处理组相比,经过酶解及发酵酶解改性的脱脂米糠持水性显著降低( $p < 0.05$ ),而发酵组持水性未发生显著变化,其原因可能是由于脱脂米糠中可溶性物质的析出导致的。与未处理组相比,纤维素酶酶解后的脱脂米糠持油性显著提高( $p < 0.05$ ),提高了16.95%,发酵组和木聚糖酶酶解组对持油性无显著影响,其余改性方法的持油性降低。其原因可能是随着酶解过程的进行,脱脂米糠中的淀粉和蛋白质等物质被分解消化,纤维素和木质素被水解,SDF含量增加,米糠的结构变得松散,比表面积增大,暴露了一些亲油基团,与油脂的接触面积增大,因此持油能力提高<sup>[6,11]</sup>。

### 2.4.2 改性脱脂米糠牛磺胆酸钠吸附能力(见图4)



注:不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图4 不同改性方法对脱脂米糠牛磺胆酸钠吸附能力的影响

牛磺胆酸钠吸附能力较高表示米糠与胆酸具有高结合能力。有研究表明多种膳食纤维可以与胆酸结合,从而降低胆酸的再吸收,为了补充失去的胆盐,体内的胆固醇会被代谢,并转化为胆汁酸,通过这种方式,体内胆固醇和脂质的水平将降低。在人体中,超过90%的胆酸以结合形式存在,尤其是以钠盐的形式存在,因此牛磺胆酸钠的含量会影响胆固醇的降解<sup>[19]</sup>。由图4可知,经过酶解和发酵处理后,脱脂米糠对牛磺胆酸钠的吸附能力有显著提升( $p < 0.05$ )。纤维素酶、木聚糖酶、复合酶解、发酵及发酵酶解与未处理组相比分别提高1.23、1.89、2.37、4.27倍及3.11倍。发酵组的脱脂米糠牛磺胆酸钠吸附能力最强,比未处理组提高了4.27倍。其原因可能是因为发酵后淀粉等糖类物质被菌体分解利用,转化为有机酸,如苹果酸、阿魏酸、乳酸等<sup>[6]</sup>,米糠的结构变得松散且暴露了更多的活性位点,从而使得米糠能与胆酸中的羟基进行结合,牛磺胆酸钠吸附能力提高。

## 3 结论

生物改性后,脱脂米糠的膳食纤维含量发生了变化,发酵和酶解处理均可以提高SDF的含量,而发酵酶解改性对于膳食纤维成分变化的影响最大,与未处理组相比,SDF含量显著提高19.7%( $p < 0.05$ ),IDF含量显著降低8.5%( $p < 0.05$ )。脱脂米糠中的酚酸含量在改性后发生了变化,其中发酵组游离态多酚含量提高19.3%,结合态多酚含量提高31.2%,总酚含量提高29.0%,游离态黄酮含量提高66.9%,结合态黄酮含量提高175.7%,总黄酮含量提高128.7%。经过发酵酶解的脱脂米糠,结合态酚酸中儿茶素、没食子酸、原儿茶酸含量显著提高( $p < 0.05$ ),对香豆酸,阿魏酸的含量显著降低( $p < 0.05$ )。5种改性方法均可以降低脱脂米糠的粒径,增大脱脂米糠的比表面积,当纤维素酶和木聚糖酶复合使用时对脱脂米糠的比表面积和粒径影响最大。与未处理组相比,经过发酵酶解改性的脱脂米糠持水性和持油性显著降低( $p < 0.05$ )。改性后的脱脂米糠对牛磺胆酸钠的吸附能力显著提升( $p < 0.05$ ),纤维素酶酶解、木聚糖酶酶解、复合酶解、发酵及发酵酶解与未处理组相比分别提高1.23、1.89、2.37、4.27倍及3.11倍。

## 参考文献:

- [1] 曹国锋,龚任,王舒平,等. 米糠资源开发利用的研究[J]. 粮食与饲料工业,2000(7):42-44.
- [2] 张颖. 我国米糠资源的开发利用现状[J]. 农技服务,2016,33(1):16,91.

- [3] MESSIA M C, REALE A, MAIURO L, et al. Effects of pre-fermented wheat bran on dough and bread characteristics[J]. *J Cereal Sci*, 2016, 69: 138–144.
- [4] BLIGH E G, DYER W J. A rapid method of total lipid extraction and purification[J]. *Can J Bot Physiol*, 1959, 37(8):911–917.
- [5] MIN B, GU L, MCCLUNG A M, et al. Free and bound total phenolic concentrations, antioxidant capacities, and profiles of proanthocyanidins and anthocyanins in whole grain rice (*Oryza sativa* L.) of different bran colours[J]. *Food Chem*, 2012, 133(3): 715–722.
- [6] 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(14): 1–9.
- [7] ZHAO G H, ZHANG R F, DONG L H, et al. Particle size of insoluble dietary fiber from rice bran affects its phenolic profile, bioaccessibility and functional properties [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2017, 87: 450–456.
- [8] TI H H, LI Q, ZHANG R F, et al. Free and bound phenolic profiles and antioxidant activity of milled fractions of different indica rice varieties cultivated in southern China [J]. *Food Chem*, 2014, 159(13): 166–174.
- [9] CHEN M, YIN T, CHEN Y, et al. Preparation and characterization of octenyl succinic anhydride modified waxy rice starch by dry media milling [J]. *Starch – Stärke*, 2015, 66(11/12): 985–991.
- [10] RAGHAVENDRA S N, RASTOGI N K, RAGHAVARAO K S M S, et al. Dietary fiber from coconut residue: effects of different treatments and particle size on the hydration properties[J]. *Eur Food Res Technol*, 2004, 218(6): 563–567.
- [11] WEN Y, NIU M, ZHANG B J, et al. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments[J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2017, 75: 344–351.
- [12] 刘树立, 王华, 王春艳, 等. 纤维素酶分子结构及作用机理的研究进展[J]. *食品科技*, 2007(7): 12–15.
- [13] SÁNCHEZ C. Lignocellulosic residues: biodegradation and bioconversion by fungi[J]. *Biotechnol Adv*, 2009, 27(2): 185–194.
- [14] BEG Q K, KAPOOR M, MAHAJAN L, et al. Microbial xylanases and their industrial applications: a review[J]. *Appl Microbiol Biot*, 2001, 56(3/4): 326–338.
- [15] BIELY P. Microbial xylanolytic systems [J]. *Trends Biotechnol*, 1985, 3(11): 286–290.
- [16] 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 Chem*, 2017, 217: 28–36.
- [17] LIU L, WEN W, ZHANG R F, et al. Complex enzyme hydrolysis releases antioxidative phenolics from rice bran [J]. *Food Chem*, 2017, 214:1–8.
- [18] LIU L, ZHANG R F, DENG Y Y, et al. Fermentation and complex enzyme hydrolysis enhance total phenolics and antioxidant activity of aqueous solution from rice bran pretreated by steaming with  $\alpha$ -amylase[J]. *Food Chem*, 2017, 221: 636–643.
- [19] STORY J A, KRITCHEVSKY D. Comparison of the binding of various bile acids and bile salts in vitro by several types of fiber[J]. *J Nutr*, 1976, 106(9): 1292–1294.
- (上接第 92 页)
- [13] HWANG H S, WINKLER – MOSER J K, VERMILLION K, et al. Enhancing antioxidant activity of sesamol at frying temperature by addition of additives through reducing volatility[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2014, 79(11): 2164–2173.
- [14] 张清. 大豆油在不同煎炸体系中的特征理化性质的变化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [15] 尚亚靖. 酚类抗氧化剂的结构修饰及其细节性机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [16] MAURYA D K, DEVASAGAYAM T P A. Antioxidant and prooxidant nature of hydroxycinnamic acid derivatives ferulic and caffeic acids[J]. *Food Chem Toxicol*, 2010, 48(12): 3369–3373.
- [17] 马素敏. 食品体系中 2,6-二叔丁基对苯甲酚(BHT)抗氧化活性及挥发、迁移规律的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [18] ALADEDUNYE A F. Inhibiting thermo-oxidative degradation of oils during frying[D]. Lethbridge, Alta: University of Lethbridge, 2011.
- [19] 黄自知. 阿魏酸衍生物的分子设计、合成及其抗氧化活性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [20] CHANG S S, PETERSON R J, HO C T. Chemical reactions involved in the deep-fat frying of foods[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1978, 55(10): 718–727.