

# 不同加工方式对米糠粉食品配物理化特性的影响

刘磊<sup>1</sup>, 冉玉兵<sup>1</sup>, 韩素云<sup>1</sup>, 张名位<sup>1</sup>, 张瑞芬<sup>1</sup>, 魏振承<sup>1,2</sup>, 马永轩<sup>1</sup>

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (2. 广东江茂源粮油有限公司, 广东韶关 512000)

**摘要:** 为了改善米糠的理化特性, 开发新型米糠食品配料, 本文研究了挤压膨化、微波蒸煮和高温焙炒三种整体加工方式对脱脂米糠理化特性的影响。结果表明, 脱脂米糠经过三种整体加工方式处理后, 理化特性均得到改善, 其中挤压膨化米糠具有最高的水溶性指数、吸水性指数、糊化度及分散稳定性。与未处理组相比, 挤压膨化米糠水溶性指数、吸水性指数和糊化度分别提高了 4.82%、18.92%和 96.04%。同时, 三种整体加工方式显著减少了米糠中还原糖和植酸的含量, 而分析米糠的酚类物质和抗氧化活性时, 发现高温焙炒显著增加了脱脂米糠中总酚含量及抗氧化能力, 但挤压膨化降低了脱脂米糠中总酚含量和抗氧化能力。本研究可以为脱脂米糠作为糊粉类营养代餐食品配料的加工提供指导。

**关键词:** 脱脂米糠; 加工方式; 理化特性; 挤压膨化

文章编号: 1673-9078(2017)3-222-228

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.3.034

## Effects of Different Processing Methods on the Physicochemical Properties of Defatted Rice Bran as Food Ingredients

LIU Lei<sup>1</sup>, RAN Yu-bing<sup>1</sup>, HAN Su-yun<sup>1</sup>, ZHANG Ming-wei<sup>1</sup>, ZHANG Rui-fen<sup>1</sup>, WEI Zhen-cheng<sup>1,2</sup>,  
MA Yong-xuan<sup>1</sup>

(1. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (2. Guangdong Jiang Mao Yuan Grains and Oils Co., Ltd, Shaoguan 512000, China)

**Abstract:** In order to improve the physicochemical properties of rice bran and develop new rice bran-based food ingredients, the effects of three kinds of processing methods, extrusion, microwave cooking, and high temperature roasting, on the physicochemical properties of defatted rice bran were investigated. The results showed that after the defatted rice bran was processed by the three integrated processing methods, the physicochemical properties of samples were improved. Among them, the rice bran with extrusion treatment demonstrated the highest water solubility index (WSI), water absorption index (WAI), degree of gelatinization, and dispersion stability. Compared to those of the control group, the WSI, WAI, and gelatinization degree of extruded rice bran were increased by 4.82%, 18.92%, and 96.04% respectively. However, the three kinds of integrated processing methods reduced the reducing sugar and phytic acid contents of rice bran significantly. This investigation of phenolics and antioxidant capacity showed that high temperature roasting treatment increased the total phenolic content and antioxidant capacity of defatted rice bran significantly, but extrusion treatment reduced the total phenolic content and antioxidant capacity. This study provides guidance for the processing of defatted rice bran as ingredients in powder nutritional meal replacements.

**Key words:** defatted rice bran; integrated processing techniques; physicochemical properties; extrusion

我国的米糠年产量巨大, 资源丰富, 并且富含蛋白质、膳食纤维以及维生素等营养成分<sup>[1]</sup>。目前米糠

收稿日期: 2016-06-05

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303071, 201403063); 广东省科技计划项目(2016B070701012, 2016B020203004, 2015A020209072); 广州市珠江科技新星专项(201506010028); 广东省科技型中小企业技术创新专项资金项目(2016A010120021)

作者简介: 刘磊(1982-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 粮油加工

通讯作者: 张名位(1967-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 粮油加工

主要作为动物饲料或肥料, 只有10%~15%的米糠用来生产价值较高的产品<sup>[2]</sup>, 开发利用的水平较低。这主要是由于米糠在加工过程中存在易酸败、风味差、溶解性低及口感粗糙等问题, 严重制约了其在食品中的应用, 所以如何改善米糠的理化特性成为米糠加工利用亟待解决的问题。

国内外已有众多关于米糠加工利用的研究报道。王长远<sup>[3]</sup>等研究发现延长超声时间可以改善米糠蛋白的溶解性及乳化性。李伦<sup>[4]</sup>等报道了超微粉碎工艺改

善了米糠膳食纤维的持水力及持油力等物理特性。Wang<sup>[5]</sup>等人发现植酸酶处理米糠后能显著提高米糠中 Fe、Ca 和 Zn 等矿物质的体外吸收率。Kim<sup>[6]</sup>等人利用超高压与复合糖苷酶结合的方式显著提高了发酵米糠中营养物质如阿魏酸, 游离氨基酸的提取得率。以上研究主要集中在加工工艺对米糠单一营养素理化特性的改善和利用, 然而对米糠的整体利用缺少研究。Sairam<sup>[7]</sup>等人研究发现在面包中加入脱脂米糠时, 其膳食纤维、蛋白质、维生素以及矿物质含量均有提高, 同时抑制了过氧化物的生成, 提高了抗氧化能力。Chotimarkorn<sup>[8]</sup>等人研究发现大米粉油炸面团中加入 15% 米糠时能够有效防止氧化。文伟<sup>[9]</sup>等研究了脱脂米糠的复合酶解工艺, 然而其利用率不高。以上研究虽然针对米糠的整体利用, 然而均缺少对米糠水和性质及糊化度等理化特性的研究。目前, 挤压膨化、微波蒸煮和高温焙炒加工方式在食品及米糠加工中已有应用。Jennifer 等人研究发现挤压膨化能提高麦麸中水溶性非淀粉多糖含量, 并且更利于粪便微生物的发酵利用<sup>[10]</sup>, 但是可能会引起挤出物酚类物质和抗氧化能力的降低<sup>[11]</sup>。Ti 等人报道了挤压膨化对黑米糠中酚类物质和抗氧化能力的影响, 为黑米糠的加工利用提供了理论指导<sup>[12]</sup>。Garcia 等人发现微波处理可使米糠产生浓郁的甜香味, 同时降低其植酸含量, 改善其食用品质<sup>[13]</sup>, 并且微波加热可以提高米糠的稳定性<sup>[14]</sup>。Nicoli 等人<sup>[15]</sup>研究了不同焙炒时间对咖啡抗氧化能力的影响, 但是缺乏对酚类物质的测定。涂清荣等人<sup>[16]</sup>研究发现糙米经过焙炒后糊化程度得到显著提高, 风味物质比未焙炒糙米明显增加, 同时, 焙炒处理也可以提高米糠的稳定性<sup>[17]</sup>。虽然米糠已作为配料整体应用于食品加工中, 但比较挤压膨化、微波蒸煮和高温焙炒加工方式对米糠理化特性影响的研究鲜有报道。本文比较研究了挤压膨化、微波蒸煮和高温焙炒 3 种加工方式对米糠粉理化特性的影响, 以期对米糠整体作为配料在糊粉类营养代餐食品中的应用提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

新鲜全脂米糠由广东省农业科学院水稻研究所提供; 盐酸、无水硫酸钠、氢氧化钠、酒石酸钾钠、葡萄糖、3,5-二硝基水杨酸、碳酸钠、甲醇和硫代硫酸钠, 以上试剂均为分析纯; 没食子酸和儿茶素标准品, 上海 Aladdin 公司; 抗氧化标准物质 (Trolox)、荧光素 (FL) 和自由基产生剂 (AAPH), 美国 Sigma 公司。

### 1.2 主要仪器设备

UltraScan Pro 色差仪: 美国 HunterLab 公司; CBE-5L 亚临界流体萃取实验室成套装置: 河南省亚临界生物技术有限公司; DS32 型双螺杆挤压膨化机: 济南赛信膨化机械有限公司; 电热恒温鼓风干燥箱: 上海博讯实业有限公司; 格兰仕 G90W25MSP-WB 微波炉: 格兰仕电器有限公司; 标准筛; 紫外-可见分光光度计: 日本岛津有限公司; Eylan-1100 旋转蒸发器: 东京理化器械株式会社; Tecan Infinite M200 多功能酶标仪: 瑞士 Tecan 科技有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 脱脂米糠的制备

采用亚临界萃取米糠中油脂, 萃取溶剂丁烷, 萃取温度 40 °C, 脱脂后米糠脂肪含量为 1.0±0.2%。

#### 1.3.2 不同加工方式对脱脂米糠粉的处理

(1) 挤压膨化: 调整脱脂米糠水分含量至 20%, 挤压温度 165 °C, 进行挤压膨化。之后, 放入鼓风干燥箱中, 55 °C 干燥后冷却, 再经过多次粉碎直至通过 80 目筛后, 装入密封袋中, 于 -4 °C 冰箱中保存待用。

(2) 微波蒸煮: 取 30 g 脱脂米糠放入 650 mL 圆形耐热玻璃碗中, 调节水分至 40%, 440 W 微波功率下加热 90 s, 55 °C 干燥后冷却, 再经过多次粉碎直至通过 80 目筛后, 装入密封袋中, 于 -4 °C 冰箱中保存待用。

(3) 高温焙炒: 取 100 g 脱脂米糠, 放入直径为 26 cm 的平底锅中, 以米糠表面温度达到 90 °C 时开始计时, 不断翻炒 9 min (维持米糠表面温度 90~110 °C), 直到米糠产生浓郁的焙烤香味, 冷却后, 再经过多次粉碎直至通过 80 目筛后, 装入密封袋中, 于 -4 °C 冰箱中保存待用。

#### 1.3.3 脱脂米糠粉理化特性指标的测定

##### (1) 水溶性指数 (WSI)

参照 Jeong Eun Lee 等<sup>[18]</sup>的方法并略做修改。称取米糠干基 1.50 g, 置于 50 mL 塑料离心管中, 加入 20 mL 蒸馏水室温震荡 30 min, 7232 g 离心 20 min。将上清液过滤后倒入已恒重的培养皿中, 105 °C 烘至恒重。

$$\text{水溶性指数 (WSI)} = (W_2 - W_1) / W_0 \times 100\%$$

式中,  $W_0$  为样品干基重 (g);  $W_1$  为培养皿恒重 (g);  $W_2$  为培养皿+干物质重 (g)。

##### (2) 吸水性指数 (WAI)

参照 Jeong Eun Lee 等<sup>[18]</sup>的方法并略做修改。称取米糠干基 2.50 g, 放入 100 mL 已知重量的塑料离心管

中, 加入 30 mL 蒸馏水搅拌均匀, 室温震荡 30 min, 7232 g 离心 20 min, 倾去上清液, 称量离心管重。

$$\text{吸水性指数(WAI)}=(W_4-W_3)/W_0$$

式中,  $W_0$  为样品干基重(g);  $W_3$  为离心管恒重(g);  $W_4$  为离心管+胶体重量(g)。

### (3)糊化度

采用糖化酶法, 参照庄海宁等<sup>[19]</sup>的方法并略做修改;

称取米糠干基 1.00 g, 分别放入 2 个 100 mL 的锥形瓶中, 分别标记为  $V_1$  和  $V_2$ , 另取一个 100 mL 的锥形瓶做空白, 标记为  $V_0$ , 各加入蒸馏水 50 mL, 摇匀。

把  $V_1$  置于电炉上小火煮沸 20 min, 并不断摇动。 $V_1$  冷却至室温后, 向  $V_0$ 、 $V_1$  和  $V_2$  中各加入 1 mL 现配 1% 糖化酶液, 于 50 °C 恒温水浴震荡 1 h 后立即向 3 个锥形瓶中加入 1 mol/L 盐酸 2 mL 终止反应, 并用蒸馏水定容至 100 mL, 过滤后备用;

各取滤液 10 mL, 分别置于 3 个 250 mL 的碘量瓶中, 准确加入 0.05 mol/L 碘液 10 mL, 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液 18 mL, 密封置于暗处, 静置 15 min 后各加 10% 硫酸 2 mL, 再用 0.05 mol/L 硫代硫酸钠滴定, 滴至淡黄色时加入 1 mL 1% 淀粉溶液作为指示剂, 继续滴定至蓝色消失, 记录各瓶消耗的硫代硫酸钠的体积。

$$\text{糊化度}=[(V_0-V_2)/(V_0-V_1)]\times 100\%$$

式中,  $V_0$  为滴定空白消耗硫代硫酸钠的体积;  $V_1$  为滴定完全糊化样品消耗硫代硫酸钠的体积;  $V_2$  为滴定样品消耗硫代硫酸钠的体积。

### (4)分散稳定性

参照马涛等<sup>[20]</sup>的方法并略作修改。称取米糠干基 2.00 g 于 50 mL 玻璃杯中, 加入 20 mL 蒸馏水, 搅拌 2 min 后, 边搅拌边倒入 25 mL 量筒中, 静置, 观察溶液的分层情况。

$$\text{上清液析出率}=h/H\times 100\%$$

式中,  $h$  为上清液高度;  $H$  为冲调溶液总高度。

### (5)还原糖含量

称取 1.00 g 米糠干基于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 去离子水, 于 60 °C 恒温水浴振荡 30 min, 冷却至室温, 6000 r/min 离心 15 min, 上清液过滤定容至 50 mL。将提取液稀释至一定浓度, 采用 DNS 法测定米糠中还原糖含量。

### (6)植酸含量

植酸的提取: 参照傅启高等<sup>[21]</sup>的方法并略作修改。称取 1.00 g 米糠干基, 加入 40 mL 的 1.2% HCl-10%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液, 于室温下振荡 2 h, 5000 r/min 离心 30 min, 上清液于 4 °C 冰箱中备用待测。

植酸含量的测定: 参照任传英等<sup>[22]</sup>的方法并略作修改。取稀释到一定浓度的米糠提取液 5 mL, 加入 4 mL 的 0.3% 磺基水杨酸-0.03%  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  溶液并摇匀, 5000 r/min 离心 10 min, 上清液放置 10 min 后, 于 500 nm 处测定吸光度。

### (7)色泽

取适量米糠于测样盒中, 以 UitraScan-VIS 自动色差仪测定米糠的  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值。

### (8)酚类物质含量及抗氧化能力的测定

酚类物质的提取: 参照 Ondo Serge Edou 等<sup>[23]</sup>的方法并略作修改。精确称取各处理米糠 0.500 g (干基), 加入 50 mL、80% 甲醇, 超声提取 15 min, 之后 4000 r/min 离心 20 min, 倒出上清液, 沉淀再按上面的步骤重复提取一次, 合并两次离心的上清液, 在 45 °C 条件下旋转蒸发至无水状态, 残余物用甲醇定容至 10 mL, 于 4 °C 冰箱中贮存待用;

总酚含量的测定: 参照 Singleton 等<sup>[24]</sup>的方法并略做修改。取米糠提取液 0.125 mL, 加入 0.5 mL 蒸馏水和 0.125 mL 福林酚试剂, 混匀后在 25 °C 下静置 6 min, 之后加入 1 mL 去离子水和 1.25 mL、7% ( $m/V$ )  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液, 混匀后于 25 °C 下避光静置 90 min, 于 760 nm 波长下测其吸光值。同时以 0.125 mL 甲醇代替米糠提取液作空白对照, 配置不同浓度梯度没食子酸标准品制作标准曲线。总酚含量以每 100 g 米糠干基中所含没食子酸当量表示, 简写为  $\times 10^{-2}$  mg GAE/g DW。

总黄酮含量的测定: 参照 Zhishen 等<sup>[25]</sup>的方法并略做修改。取米糠提取液 0.3 mL, 加入 1.5 mL 蒸馏水和 0.09 mL、5% ( $m/V$ )  $\text{NaNO}_2$  溶液, 摇匀后 25 °C 下反应 6 min 后加入 0.18 mL、10% ( $m/V$ )  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  溶液, 静置 5 min 后再加入 0.6 mL、1 mol/L NaOH 溶液, 最后用蒸馏水补足至 3 mL, 于 510 nm 波长下测定其吸光值。同时以 0.3 mL 甲醇代替米糠提取液作空白对照, 配置不同浓度梯度儿茶素标准品制作标准曲线。总黄酮含量以每 100 g 米糠干基中所含的儿茶素当量表示, 简写为  $\times 10^{-2}$  mg CE/g DW。

总抗氧化能力的测定: 参考 Huang 等人<sup>[26]</sup>的方法并略作修改。用 pH=7.4 磷酸钾缓冲液 (75 mmol/L) 将米糠提取液稀释至一定浓度, 在 96 孔的黑色荧光酶标板各微孔中分别加入 20  $\mu\text{L}$  稀释米糠提取液、20  $\mu\text{L}$  不同浓度梯度 (6.25  $\mu\text{mol/L}$ 、12.50  $\mu\text{mol/L}$ 、25.00  $\mu\text{mol/L}$  和 50.00  $\mu\text{mol/L}$ ) Trolox 标准溶液, 于 37 °C 孵育 10 min, 再向各微孔中加入 200  $\mu\text{L}$  荧光素工作液 (FL), 37 °C 孵育 20 min 后, 用多道移液器迅速向各微孔加入 20  $\mu\text{L}$  新鲜配置的 119 mmol/L ABAP 溶液,

启动多功能酶标仪, 设定激发波长 485 nm, 发射波长 538 nm, 在 37 °C 下连续测定各孔的荧光强度, 每 4.5 min 测定一次, 总共测定 35 个循环。除定量描述分析外, 所有实验均重复 3 次。将米糠提取液自由基作用下荧光衰退曲线的延缓部分面积 (Net AUC) 带入不同浓度 Trolox 标准溶液的 Net AUC 与浓度所做的标准曲线中, 得到不同前处理米糠提取液的总抗氧化能力指数 ORAC 值并以  $\mu\text{mol TE/g}$  米糠干基表示。

### 1.4 数据的分析

利用 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析, 数据以均值 $\pm$ 标准误差 (Means $\pm$ SD) 表示, 数据统计显著差异水平为  $p < 0.05$ 。

## 2 结果及讨论

### 2.1 水合性质

水溶性指数反映了原料中糖类、纤维素以及蛋白质的降解程度, 水溶性指数增大, 表明原料中的高分子物质含量逐渐减少, 食用时更容易被人体消化吸收<sup>[27]</sup>。吸水性指数反映了产品在水中保持形状不马上变成糊状的时间, 吸水指数大, 产品在水中变成糊状的相对时间短, 它与原料中的淀粉糊化和膳食纤维的变化密切相关<sup>[28,29]</sup>。冲调食品要求产品具有较高的水溶性指数和吸水性指数。

表 1 不同加工方式对脱脂米糠粉水合性质的影响

Table 1 Effects of different processing methods on the hydration properties of defatted rice bran

加工方式	水溶性指数/%	吸水性指数/(g/g DW)
未处理	18.91 $\pm$ 0.27 <sup>b</sup>	2.22 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>
挤压膨化	23.73 $\pm$ 0.41 <sup>d</sup>	2.64 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>
微波蒸煮	21.29 $\pm$ 0.30 <sup>e</sup>	2.57 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>
高温焙炒	15.87 $\pm$ 0.27 <sup>a</sup>	2.52 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>

注: 同一列中字母不同表示数值存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。

由表 1 可知, 挤压膨化和微波蒸煮处理显著提高了米糠的水溶性指数, 其中挤压膨化处理对米糠的水溶性指数的改善作用最为明显, 其水溶性指数较未处理米糠提高了 4.82%, 这可能是因为物料在机筒中同时受到高温、高压和高剪切力的综合作用, 淀粉糊化降解程度更大, 此外研究表明挤压膨化还可以使米糠中不溶性膳食纤维转变为可溶性膳食纤维<sup>[30]</sup>; 高温焙炒显著降低米糠的水溶性指数, 主要可能是因为焙炒过程中一方面蛋白质发生热变性, 氨基酸发生美拉德反应, 另一方面焙炒对淀粉糊化降解影响较小。另外, 从表 1 可以看出, 三种加工方式均显著提高了米糠的

吸水性指数, 挤压膨化米糠具有最高的吸水性指数。研究证明, 淀粉糊化和降解后, 吸水性指数显著提高<sup>[31]</sup>, 此外报道焙炒工艺可使蛋白的吸水性增大<sup>[32]</sup>。

### 2.2 分散稳定性

表 2 不同加工方式对脱脂米糠粉冲调分散稳定性的影响

Table 2 Effects of different processing methods on the dispersion stability of defatted rice bran

加工方式	5 min	10 min	15 min
未处理	分层不明显	分层不明显	略微分层
挤压膨化	几乎不分层	分层不明显	分层不明显
微波蒸煮	几乎不分层	分层不明显	分层不明显
高温焙炒	分层不明显	61.03 $\pm$ 0.28*	61.67 $\pm$ 0.56*

注: \*上清液析出率。

由表 2 可知, 高温焙炒降低了米糠的冲调分散性, 冲调米糠在静置 10 min 时即出现明显的分层, 挤压膨化和微波蒸煮略微提高了米糠的冲调分散稳定性, 冲调米糠在静置 15 min 时分层仍不明显, 但其原因有待于进一步研究分析。

### 2.3 色泽

表 3 不同加工方式对脱脂米糠粉色泽的影响

Table 3 Effects of different processing methods on the color of defatted rice bran

加工方式	L*	a*	b*
未处理	82.9 $\pm$ 0.14 <sup>d</sup>	0.09 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	12.24 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>
挤压膨化	72.28 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	1.18 $\pm$ 0.01 <sup>d</sup>	17.00 $\pm$ 0.03 <sup>d</sup>
微波蒸煮	80.44 $\pm$ 0.14 <sup>b</sup>	0.78 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	16.28 $\pm$ 0.17 <sup>c</sup>
高温焙炒	81.25 $\pm$ 0.26 <sup>c</sup>	0.36 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	14.10 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>

注: 同一列中字母不同表示数值存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。

由表 3 可知, 经过三种加工方式处理后米糠的 L\* 值都有所降低, 说明加工处理过程中米糠发生了褐变, 颜色变暗。挤压膨化组米糠 L\* 值低于其它两种前处理米糠, 表明挤压膨化过程中, 米糠发生了更深程度的褐变。另外, 挤压膨化米糠具有较高的 a\* 和 b\* 也说明挤压膨化更大程度的加深了米糠的色泽。原因可能是热处理过程中米糠中的还原性糖与氨基酸受热发生美拉德反应, 消耗米糠中的还原糖, 使米糠色泽加深, L\* 值变小。

### 2.4 糊化度

糊化度反映了原料的熟化程度, 原料中的淀粉熟化后, 可消化性会得到大大的提高。从图 1 可知, 经过三种不同加工方式处理后米糠中淀粉糊化度都得到了明显的提高 ( $p < 0.05$ ), 其趋势与水溶性指数、吸水

性指数的变化相一致。脱脂米糠经过挤压膨化、微波蒸煮后糊化度分别达到了 96.04%和 85.08%，而经过高温焙炒后糊化度仅达到 68.65%，挤压膨化，微波蒸煮相对于高温焙炒更能提高米糠中淀粉的糊化度。焙炒是在常压非密封的器皿中进行的，在加热的同时米糠中水分迅速蒸发，当达到淀粉糊化的温度时，米糠中的水分含量已经极低，生淀粉在水分较低的情况下难以糊化<sup>[16]</sup>，因而焙炒对米糠糊化度的影响非常有限。挤压加工过程中原料由于同时受到高温、高压和高剪切力的综合作用，较传统食品加热方式更能提高原料的糊化度。

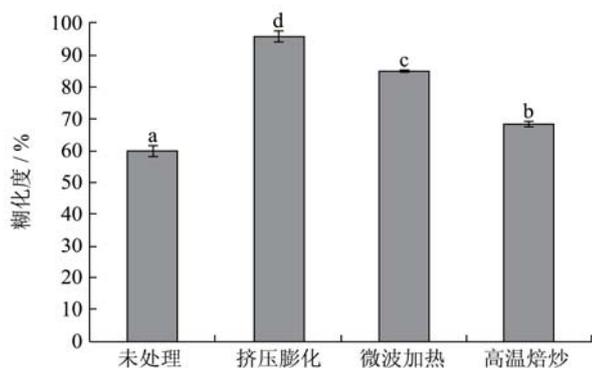


图1 不同加工方式对脱脂米糠粉糊化度的影响

Fig.1 Effects of different processing methods on the degree of gelatinization of defatted rice bran

注：图中字母不同表示数值存在显著差异( $p < 0.05$ )。

## 2.5 还原糖和植酸含量

由图 2 可知，三种加工方式均显著降低了米糠还

原糖含量 ( $p < 0.05$ )，其中挤压膨化对米糠还原糖含量影响最为显著，较未处理降低了 50.81 mg/g DW。还原糖含量降低可能是因为加工过程中，米糠中的还原性糖与氨基酸发生美拉德反应，使米糠色泽加深并产生一些风味物质。另外，三种加工方式与未处理相比较，米糠中的植酸含量均显著降低 ( $p < 0.05$ )，但三者间无显著差异。植酸可结合蛋白质的碱性残基，抑制胃蛋白酶和胰蛋白酶的活性，导致蛋白质的利用率下降。还可与米糠中的矿物质形成植酸盐，而不易被肠道吸收<sup>[33]</sup>。因此，植酸的降解有利于提高米糠中蛋白质和矿物质元素的利用率，从而提高米糠的营养价值。

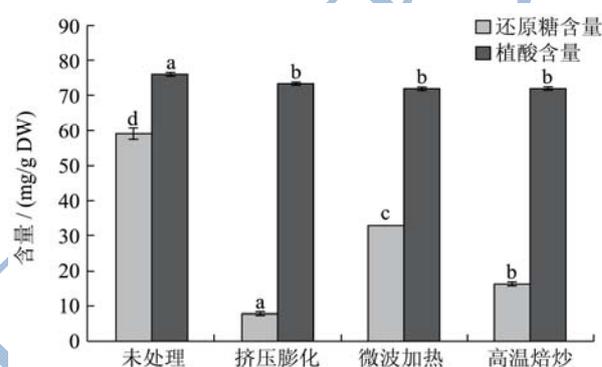


图2 不同加工方式对脱脂米糠粉还原糖和植酸含量的影响

Fig.2 Effects of different processing methods on the reducing sugar and phytic acid contents of defatted rice bran

注：图中字母不同表示数值存在显著差异( $p < 0.05$ )。

## 2.6 酚类物质含量及抗氧化能力

表4 不同加工方式对脱脂米糠粉中总酚、总黄酮含量及抗氧化能力的影响

Table 4 Effects of different processing methods on the contents of total phenols and flavonoids and antioxidant capacity of defatted rice bran

加工方式	总酚含量/( $\times 10^2$ mg GAE/g DW)	总黄酮含量/( $\times 10^2$ mg CE/g DW)	ORAC 抗氧化能力/( $\mu$ mol TE/g DW)
未处理	257.9 $\pm$ 11.85 <sup>b</sup>	85.55 $\pm$ 0.87 <sup>b</sup>	94.62 $\pm$ 4.81 <sup>b</sup>
挤压膨化	251.6 $\pm$ 5.32 <sup>ab</sup>	74.55 $\pm$ 2.78 <sup>a</sup>	86.82 $\pm$ 4.07 <sup>a</sup>
微波蒸煮	239.26 $\pm$ 6.55 <sup>a</sup>	73.55 $\pm$ 4.50 <sup>a</sup>	93.83 $\pm$ 2.06 <sup>b</sup>
高温焙炒	276.05 $\pm$ 8.07 <sup>c</sup>	87.72 $\pm$ 1.26 <sup>b</sup>	106.60 $\pm$ 2.96 <sup>c</sup>

注：同一列中字母不同表示数值存在显著差异( $p < 0.05$ )。

酚类物质是米糠中最主要的抗氧化物质。由表 4 可知脱脂米糠经过挤压膨化、微波蒸煮后总酚含量分别下降了 2.44%和 7.23%，总黄酮含量分别下降了 12.86%和 14.03%，这主要可能是因为在这两种加工处理过程中多酚被热降解，被氧化或是发生了聚合<sup>[34]</sup>；相对于其它两种处理，高温焙炒则显著提高了脱脂米糠中的总酚含量 ( $p < 0.05$ )，其总酚含量较未处理米糠提高了 7.04%，这可能是因为高温焙炒破坏了脱脂米糠细胞壁结构，释放出了部分结合酚<sup>[35]</sup>，也可能是焙

炒中形成的美拉德反应产物与福林酚发生了反应，致使测定的吸光值偏大<sup>[36,37]</sup>。另外，由表 5 可知，挤压膨化处理使脱脂米糠 ORAC 值显著降低了 8.24%，而高温焙炒使脱脂米糠 ORAC 值显著升高了 12.66%，这与总酚含量的变化趋势相一致。

## 3 结论

3.1 挤压膨化和微波蒸煮显著提高了米糠的水溶性指数和分散稳定性，而高温焙炒则降低了米糠的水溶

性指数,分散稳定性;三种加工方式均提高了米糠的吸水性指数和糊化度,降低了米糠的还原糖含量和植酸含量,加深了米糠的色泽。

3.2 米糠经过三种整体加工后,理化特性得到一定程度的改善,挤压膨化米糠具有最高的水溶性指数、吸水性指数和糊化度,也具有较好的分散稳定性,因而相对于其它两种加工方式,挤压膨化更适合作为米糠应用于方便糊类食品中的整体加工方式。

## 参考文献

- [1] 毛金水,贺绪军,李翔,等.米糠营养素提取的研究与生产应用[J].粮食储藏,2005,34(6):45-47  
MAO Jin-shui, HE Xu-jun, LI Xiang, et al. Research and application of rice bran extraction [J]. Grain Storage, 2005, 34(6): 45-47
- [2] 杨锁华,刘伟民,杨小明,等.米糠应用研究进展[J].粮油加工与食品机械,2006,4:70-75  
YANG Suo-hua, LIU Wei-min, YANG Xiao-ming, et al. Research advance in rice bran [J]. Machinery for Cereals Oil and Food Processing, 2006, 4: 70-75
- [3] 王长远,许凤,张敏,等.超声时间对米糠蛋白理化和功能特性的影响[J].中国粮油学报,2014,29(12):43-47  
WANG Chang-yuan, XU Feng, ZHANG Min, et al. Effect of ultrasound time on physicochemical and functional properties of rice bran protein [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(12): 43-47
- [4] 李伦,张晖,王兴国,等.超微粉碎对脱脂米糠膳食纤维理化特性及组成成分的影响[J].中国油脂,2009,34(2):56-59  
LI Lun, ZHANG Hui, WANG Xing-guo, et al. Effect of super micro-milling on the physicochemical properties and composition of dietary fibre prepared from defatted rice bran [J]. China Oils and Fats, 2009, 34(2): 56-59
- [5] Wang Y Q, Cheng Y Q, Ou K Q, et al. *In vitro* solubility of calcium, iron, and zinc in rice bran treated with phytase, cellulase, and protease [J]. Food Chem., 2008, 56(24): 11868-11874
- [6] Kim D, Han G D. High hydrostatic pressure treatment combined with enzymes increases the extractability and bioactivity of fermented rice bran [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 16: 191-197
- [7] Sairam S, Copala K A G, Urooj A. Physico-chemical characteristics of defatted rice bran and its utilization in a bakery product [J]. Journal of Food Science and Technology, 2011, 48(4): 478-483
- [8] Chotimarkorn C, Silalai N. Oxidative stability of fried dough from rice flour containing rice bran powder during storage [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(4): 561-568
- [9] 文伟,刘磊,张名位,等.脱脂米糠复合酶解工艺条件优化及其营养特性评价[J].中国农业科学,2015,48(8):1597-1608  
WEN Wei, LIU Lei, ZHANG Ming-wei, et al. The optimal composite enzymatic hydrolysis process on defatted rice bran and its nutritional evaluation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(8): 1597-1608
- [10] Jennifer A Arcila, Steven A Weier, Devin J Rose. Changes in dietary fiber fractions and gut microbial fermentation properties of wheat bran after extrusion and bread making [J]. Food Research International, 2015, 74: 217-223
- [11] Charles B, Margaret B, Emma D, et al. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods [J]. Food Science & Technology, 2011, 22(10): 570-575
- [12] Ti H H, Zhang R F, Zhang M W, et al. Effect of extrusion on phytochemical profiles in milled fractions of black rice [J]. Food Chemistry, 2015, 178: 186-194
- [13] Garcia M C, Benassi M D T, Soares Júnior M S. Physicochemical and sensory profile of rice bran roasted in microwave [J]. Food Science and Technology (Campinas), 2012, 32(4): 754-761
- [14] 崔富贵,李安平,谢碧霞,等.不同处理方法对米糠品质稳定性的影响[J].食品工业科技,2012,33(5):141-144  
CUI Fu-gui, LI An-ping, XIE Bi-xia, et al. Effect of different treatment methods on the quality stability of rice bran [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(5): 141-144
- [15] Nicoli M C, Anese M, Manzocco L, et al. Antioxidant properties of coffee brews in relation to the roasting degree [J]. LWT-Food Science and Technology, 1997, 30(3): 292-297
- [16] 涂清荣,姚惠源.焙炒糙米理化性质的研究[J].食品科技, 2005,2:8-11  
TU Qing-rong, YAO Hui-yuan. Study on physical and chemical properties of the roasted brown rice [J]. Food Science and Technology, 2005, 2: 8-11
- [17] Ahmed F, Platel K, Vishwanatha S, et al. Improved shelf-life of rice bran by domestic heat processing and assessment of its dietary consumption in experimental rats [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2007, 87(1): 60-67
- [18] Jeong E L, Ji Y J, Wie-Soo K, et al. Effect of particle size on the solubility and dispersibility of endosperm, bran, and husk powders of rice [J]. Food Science and Biotechnology, 2008, 17(4): 833-838

- [19] 庄海宁,夏智,李军德,等.挤压方便米的径向膨胀率与其复水率、糊化度关系的研究[J].现代食品科技,2010,26(10):1057-1062  
ZHUANG Hai-ning, XIA Zhi, LI Jun-de, et al. Studies of relationship between radial expansion ratio and rehydration ratio/gelatinization degree of extruded instant rice [J]. Modern Food Science & Technology, 2010, 26(10): 1057-1062
- [20] 马涛,卢镜竹.提高挤压膨化糙米粉的冲调分散性[J].食品工业科技,2012,33(5):277-279  
MA Tao, LU Jing-zhu. Improving the dispersibility of extrusion brown rice bran [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(5): 277-279
- [21] 傅启高,李慧莹.三氯化铁比色法测定植酸含量的研究[J].营养学报,1997,2:78-82  
FU Qi-gao, LI Hui-quan. Study on ferric chloride colorimetric method for phytate determination in soybean and its products [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 1997, 2: 78-82
- [22] 任传英,赵永焕,崔洪斌,等.豆粕和米糠中植酸含量的测定方法研究[J].大豆通报,2007,3:43-46  
REN Chuan-ying, ZHAO Yong-huan, CUI Hong-bin, et al. Determination of phytic acid in the bean pulp and rice bran [J]. Soybean Bulletin, 2007, 3: 43-46
- [23] Ondo S E, Ryu G H. Physicochemical and antioxidant properties of extruded cornmeal with natural cocoa powder [J]. Food Science and Biotechnology, 2013, 22(1): 167-175
- [24] Singleton V L, Orthofer R, Lamuela-Raventos R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent [J]. Method Enzymol, 1999, 299(2): 152-178
- [25] Jia Z S, Tang M C, Wu J M. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals [J]. Food Chemistry, 1999, 64(4): 555-559
- [26] Huang D J, Ou B, Hampsch-Woodill M, et al. High-throughput assay of oxygen radical absorbance capacity (ORAC) using a multichannel liquid handling system coupled with a microplate fluorescence reader in 96-well format [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(16): 4437-4444
- [27] 王丽娟.杂粮粉的挤压膨化制备及贮藏稳定性研究[D].合肥:合肥工业大学,2012  
WANG Li-juan. Study on extruding preparation of cereals powder and its storage stabilization [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012
- [28] 杜江美.双螺杆挤压制备谷物早餐的研究[D].无锡:江南大学,2012  
DU Jiang-mei. Study on the preparation of cereal breakfast by twin-screw extrusion [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012
- [29] 马萌.菱角粉的理化性质及应用研究[D].无锡:江南大学,2013  
MA Meng. Study on the physicochemical properties and application of water caltrop [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013
- [30] 徐树来.挤压加工对米糠主要营养成分影响的研究[J].中国粮油学报,2007,22(3):12-16  
XU Shu-lai. Rice bran: extrusion processing and nutrition [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2007, 22(3): 12-16
- [31] 韩永斌,刘桂玲,史晓媛,等.挤压膨化对发芽糙米理化性质的影响[J].中国粮油学报,2010,25(12):1-5  
HAN Yong-bin, LIU Gui-ling, SHI Xiao-yuan, et al. Effects of extrusion on physicochemical property of germinated brown rice [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(12): 1-5
- [32] 任清,张晓,郭项雨,等.传统高温炒制工艺对裸燕麦醇溶蛋白和谷蛋白特性的影响[J].中国食品学报,2012,12(8):67-68  
REN Qing, ZHANG Xiao, GUO Xiang-yu, et al. Effect of traditional high-temperature dry roasting on properties of dry roasting naked oat prolamin and glutenin [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(8): 67-68
- [33] 吴澎,田纪春,王凤成.谷物中植酸及其应用的研究进展[J].中国粮油学报,2009,24(3):137-143  
WU Peng, TIAN Ji-chun, WANG Feng-cheng. Present situation and application of phytic acid in cereal [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(3): 137-143
- [34] Gong L X, Huang L L, Zhang Y. Effect of steam explosion treatment on barley bran phenolic compounds and antioxidant capacity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(29): 7177-7184
- [35] Xu G H, Ye X Q, Chen J C, et al. Effect of heat treatment on the phenolic compounds and antioxidant capacity of citrus peel extract [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(2): 330-335
- [36] Patras A, Brunton N P, Da P S, et al. Impact of high pressure processing on total antioxidant activity, phenolic, ascorbic acid, anthocyanin content and colour of strawberry and blackberry purées [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(3): 308-313
- [37] Zhang M, Chen H X, Li J L, et al. Antioxidant properties of

tartary buckwheat extracts as affected by different thermal processing methods [J]. LWT-Food Science and Technology,

2010, 43(1): 181-185

现代食品科技