

高温高压蒸汽处理对米糠理化和营养特性的影响

潘碧晖^{1,2}, 魏振承², 邓媛元², 张雁², 唐小俊², 廖娜², 刘光^{2*}, 张名位^{1,2*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村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)

摘要: 为考察高温高压蒸汽对米糠理化特性和营养品质的影响, 该研究评价了 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠脂肪酶活性、物理特性 (粘度、色度和微观结构)、营养成分 (可溶性蛋白质含量、粗脂肪含量及其组成) 和植物化学成分 (植酸、 γ -谷维素、酚类物质及其活性) 的影响规律。结果表明, 处理 1 min 脂肪酶活性损失率达 81.86%, 进一步延长处理时间对脂肪酶活性损失率并无显著提高。随处理时间的延长, 米糠的粘度由 14.67 cP 降低至 7.00 cP, 颜色则明显加深, 结构上表现更加致密。高温高压蒸汽处理 1 min 后, 米糠可溶性蛋白含量降低 71.89%, 粗脂肪提取率提高 5.94%; 植酸、 γ -谷维素和结合酚不受处理的影响, 但米糠游离酚含量由 0.51% 下降至 0.46%, 其 ORAC (oxygen radical absorbance capacity) 抗氧化活性由 183.20 降低至 149.22 $\mu\text{mol TE/g DW}$ 。上述结果表明, 121 °C 高温高压蒸汽处理 1 min 为最佳米糠处理时间。研究结果为高温高压蒸汽在米糠加工中的应用提供了理论指导。

关键词: 米糠; 高温高压蒸汽; 理化特性; 营养特性

文章编号: 1673-9078(2022)09-143-152

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.9.1224

Effects of High-temperature and High-pressure Steam on Physicochemical and Nutritional Properties of Rice Bran

PAN Bihui^{1,2}, WEI Zhencheng², DENG Yuanyuan², ZHANG yan², TANG Xiaojun², LIAO Na², LIU Guang^{2*}, ZHANG Mingwei^{1,2*}

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. Sericultura & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In order to investigate the effects of high-temperature and high-pressure steam on the properties of rice bran, different high-temperature (121 °C) and high-pressure steaming treatment durations were investigated. Lipase activity, physical properties (viscosity, chromaticity and microstructure), nutritional composition (soluble protein content, crude fat content and composition) and phytochemical composition (contents and activities of phytic acid, γ -oryzanol, phenolics) were determined. The results showed that the loss rate of lipase activity reached 81.86% after 1 min of steaming, and longer treatment did not significantly increase the lipase activity loss rate. The viscosity of the rice bran decreased from 14.67 cP to 7.00 cP, and the color deepened as the treatment time increased. Meanwhile, the micro-structure of rice bran became denser after treatment. The soluble protein content of rice bran decreased by 71.89%, while the extraction rate of crude fat

引文格式:

潘碧晖, 魏振承, 邓媛元, 等. 高温高压蒸汽处理对米糠理化和营养特性的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(9): 143-152

PAN Bihui, WEI Zhencheng, DENG Yuanyuan, et al. Effects of high-temperature and high-pressure steam on physicochemical and nutritional properties of rice bran [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(9): 143-152

收稿日期: 2021-11-04

基金项目: 广东省重点研发计划项目(2019B020213002; 2020B020225004); 广州市民生科技计划项目(201903010033); 广东省国际科技合作领域(2018A050506047); 科技创新战略专项资金(高水平农科院建设)(R2017YJ-YB1005; R2018PY-QF002; R2020PY-JX009); 广东特支计划项目(2019BT02N112); 广东省农业科学院农业优势产业学科团队建设项目(202108TD)

作者简介: 潘碧晖(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: panpanbihui@163.com

通讯作者: 刘光(1988-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 谷物加工, E-mail: liuguang@gdaas.cn; 共同通讯作者: 张名位(1966-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 粮油加工与功能食品, E-mail: mwzhh@vip.tom.com

increased by 5.94% after 1 min of steaming. The contents of phytic acid, γ -oryzanol and bound phenolics are not affected by steaming. However, the content of free phenols in rice bran reduces from 0.51% to 0.46%, and its ORAC (oxygen radical absorbance capacity) antioxidant activity decreases from 183.20 $\mu\text{mol TE/g DW}$ to 149.22 $\mu\text{mol TE/g DW}$. The results revealed that 1 min high-temperature and high-pressure steaming at 121 $^{\circ}\text{C}$ is the optimal treatment for rice bran. These findings provide a theoretical guidance for the application of high-temperature and high-pressure steam in rice bran processing.

Key words: rice bran; high-temperature and high-pressure steam; physicochemical properties; nutritional properties

稻谷是世界上最主要的粮食作物之一^[1], 而我国稻谷产量居世界首位, 据统计, 2020 年我国稻谷年产量为 2.12×10^8 t, 占世界稻谷总产量的 30%。米糠是稻谷加工过程中主要的副产物, 约占糙米质量的 6%~8%, 主要由果皮、种皮、糊粉层、胚芽等部分组成^[2]。米糠营养成分丰富, 含有大量的不饱和脂肪酸和低敏性蛋白质^[3-5], 同时富含酚类物质^[6]、 γ -谷维素^[7]、植酸等生物活性成分, 其在抗氧化^[8]、预防癌症^[9]、心脑血管疾病^[10]、糖尿病^[10,11]等方面具有重要作用。然而, 我国米糠主要用于畜禽饲料, 高值化利用率不足 15%, 影响了米糠副产物的资源化开发。

限制米糠高值化利用的产业瓶颈主要是米糠极易发生酸败变质。米糠中含有的内源脂肪酶能够与油脂发生水解反应, 产生脂肪酸, 导致米糠酸价升高; 生成的脂肪酸在内源脂肪氧合酶作用下迅速氧化成醛、酮、酸等小分子物质, 使米糠产生“哈喇”味, 品质劣变。Wu 等^[12]报道米糠研磨后, 常温贮藏 1 d 其酸价可提高 3 倍以上。因此, 钝化米糠内源活性酶是解决米糠酸败变质, 保证其贮藏稳定性的关键。

一系列的方法被应用于米糠的稳定化, 包括过热蒸汽法、微波加热法、红外加热法、挤压膨化法等物理方法, 盐酸处理法、乙酸处理法、二氧化硫处理法等化学方法, 植物蛋白酶法、微生物蛋白酶法、动物原生物酶法等生物方法。其中, 物理方法因其稳定化效果好, 操作简便, 且不引入新物质而成为最常用的方法。微波加热法因其工艺简单、处理时间短、灭酶效果好, 营养成分损失较少, 逐渐被人们关注, 但该方法不易控制温度, 容易将米糠烤焦而影响米糠的品质; 红外加热法具有热惯性小、升温快、加热时间短等特点, 且产品热损伤低, 能有效抑制米糠中脂肪酶活性, 但其灭酶效果也有待进一步提高; 挤压膨化法能够有效钝化米糠脂肪酶, 但会改变米糠原有的营养特性。Yu 等^[13]对比了 11 种处理方式对米糠稳定化效果影响, 发现使用 121 $^{\circ}\text{C}$ 高温高压蒸汽处理 20 min 米糠的脂肪酶钝化效果最佳, Kim 等^[14]的研究也获得了类似的研究结果。因此, 高温高压蒸汽在米糠的稳定化方面具有应用前景。然而, 目前研究使用的高温高压蒸汽处理时间均为 20 min, 未探讨处理时间对米糠稳

定化影响, 处理时间过长一方面对米糠中营养活性成分的损失存在不良影响, 另一方面也造成了能源浪费。

基于此, 本研究采用 121 $^{\circ}\text{C}$ 高温高压蒸汽对米糠进行处理, 探究处理时间对米糠脂肪酶活性、理化特性、微观结构、营养活性成分等的影响规律, 以期获得最适米糠稳定化工艺条件, 为米糠的产业化利用提供理论支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

美香粘 2 号稻谷, 购于广东海纳农业有限公司; 质量分数为 14% 的三氯化硼甲醇溶液, 购于罗恩试剂公司; 考马斯亮蓝 (G250) 溶液, 购于 Biosharp 公司; 对硝基苯酚月桂酸酯 (PNPL)、十七酸、福林酚试剂、Trolox 试剂、荧光素、2,2'-偶氮(2-甲基丙脒)盐酸盐 (AAPH)、植酸钠标品等, 购于美国 Sigma 公司; 其余试剂均为分析纯, 购于天津市大茂化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

YZM-M60X70BI 脉动真空压力蒸汽灭菌器, 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/广州市豪尔生医疗设备有限公司联合研制; Tecan GENios 酶标仪, 瑞士 Tecan 有限公司; SOX416 脂肪测定仪, 德国 Gerhardt 公司; 6890N/5975B 气相色谱-质谱联用仪, 美国 Agilent 公司; IKA T25 高速均质机, 德国 IKA 公司; UltraScan VIS 型色度仪, 美国 HunterLab 公司; S-3400N-II 扫描电子显微镜, 日本日立公司; JLGJ45 型砬谷机, 浙江台州市粮仪厂; Starch Master2 型 RVA 快速粘度仪, Perten 公司。

1.3 方法

1.3.1 米糠的制备

新鲜米糠: 稻谷经砬谷、除杂、碾磨得到碾磨率为 7% 的米糠, 储存于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱备用。

1.3.2 米糠稳定化

将新鲜米糠粉碎后过 40 目筛, 121 $^{\circ}\text{C}$ 高温高压蒸汽分别处理 0、1、3、5、7、10、15 min, 得到 7 个

不同组别的米糠,随后经粉碎机粉碎过 40 目筛,混匀,后储存于-80 °C 备用。

1.3.3 脂肪酶活性测定

参照 Thunnop 等^[15]的方法,采用硝基苯基月桂酸酯法测定米糠中脂肪酶活性,并稍作修改。

米糠脂肪酶液的制备:准确称量 2.000 g 米糠,加入 0.1 mol/L pH 值 7.0 的磷酸钠缓冲液 10 mL,置于磁力搅拌器中搅拌提取,120 r/min 下提取 40 min。随后,置于 8 000 r/min 的离心机中离心 10 min,取上清粗酶液置于 4 °C 冰箱备用。

脂肪酶活性的测定:分别配制 A 液(0.1 g PNPL 溶于 30 mL 异丙醇)和 B 液(0.4 g 曲拉通 X-100、0.1 g 阿拉伯树胶溶于 90 mL pH 7.0 磷酸盐缓冲液),取 0.4 mL A 液与 6.0 mL B 液混合均匀,然后加入 0.4 mL 粗酶液,35 °C 水浴反应 40 min,冰浴 2 min,随后,4 °C 下 8 000 r/min 离心 5 min,取上清液于 410 nm 测定吸光值。另取一份米糠脂肪酶提取液先于沸水浴中,灭酶 20 min 后进行如上操作作为空白。

采用对硝基苯酚制作标准曲线,一个脂肪酶活性单位被定义为每克样品每小时水解 PNPL 生成对硝基苯酚的量。脂肪酶活力由公式(1)求得:

$$H = \frac{A_{410} \times n \times V}{k \times t \times m \times (1 - M) \times 139.11} \quad (1)$$

式中:

H —脂肪酶活性, U/g;

A_{410} —样品吸光值;

n —稀释倍数;

V —反应体系的总体积, mL;

k —对硝基苯酚标准曲线斜率;

139.11—对硝基苯酚相对分子质量;

t —反应时间, h;

m —样品质量, g;

M —样品水分含量, %。

$$F = \frac{H_{前} - H_{后}}{H_{前}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

F —灭活率, %;

$H_{前}$ —灭菌前脂肪酶活性, U/g;

$H_{后}$ —灭菌后脂肪酶活性, U/g。

1.3.4 物理特性的测定

1.3.4.1 粘度测定

使用快速粘度仪法对米糠粘度进行测定。量取 25.0 mL 水,移入干燥洁净的样品筒中。准确称取 3.00 g 试样于样品筒中,将搅拌器置于样品筒中并上下快速搅动 10 次,使试样分散。将搅拌器置于样品筒

中并可靠地插接到搅拌器的连接器上,使搅拌器恰好居中。当仪器提示允许测试时,将仪器的搅拌器电动机塔帽压下,驱动测试程序。根据计算机屏幕显示的粘度变化曲线,记录样品的最终粘度。

1.3.4.2 色度测定

使用 UltraScan VIS 色度仪测量不同处理组米糠的颜色。将足量的样品置于石英比色皿中,放入样品架上测定,其中,光圈的直径为 19 mm,得到 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值, L^* 值表示黑白亮度, L^* 值越大则表示越白亮; a^* 值表示绿红色,值越大则表示样品越红; b^* 值表示蓝黄色,值越大则表示样品越黄。

1.3.5 微观结构观察

参考周素梅等^[16]的方法测定不同处理米糠的微观形貌,并稍作修改。使用正己烷对米糠样品进行脱脂,过滤除去溶剂后将米糠置于通风橱风干,随后置于干燥器内脱水一周,经离子溅射喷金后置于扫描电子显微镜观察,使用 5 kV 电压和 1 000× 的条件进行拍照。

1.3.6 营养组分测定

1.3.6.1 可溶性蛋白含量测定

采用考马斯亮蓝法测定米糠中可溶性蛋白含量,方法参照方勇等^[17]的报道并稍作调整。准确称取样品 1.00 g,加入 9 mL 的生理盐水,冰浴条件下机械均质,悬浊液 5 000 r/min 离心 5 min,取上清定容至 25 mL。取定容后的上清液 50 μ L,加入 3.0 mL 考马斯亮蓝(G250)显色剂,混匀并静置 10 min,595 nm 波长下测定吸光值 A_1 。50 μ L 去离子水代替样液做空白对照,测得吸光值为 A_0 ,50 μ L 蛋白标准品(质量浓度为 0.521 g/L 的 BSA, Bovine Serum Albumin)做标准对照,测得吸光值为 A_2 。样液可溶性蛋白质含量(记为 P , g/100 g)计算公式如下:

$$P = \frac{A_1 - A_0}{A_2 - A_0} \times 0.521 \times 25 \div 1000 \times 100 \quad (3)$$

1.3.6.2 脂肪含量测定

脂肪的测定参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准食品中脂肪的测定索式抽提法》。

1.3.6.3 脂肪酸组成测定

米糠粗脂肪的脂肪酸组成参照杨春英等^[18]方法进行分析,具体操作如下:称取 0.02 g 油样,加入 2% (m/V) 氢氧化钠甲醇溶液 2 mL,60 °C 水浴 30 min,每隔 10 min 震荡一次,然后加入 2 mL 三氟化硼甲醇溶液,60 °C 水浴 2 min,迅速冷却至室温。加入色谱纯正己烷 2 mL,再加入饱和氯化钠溶液 5 mL,颠倒混匀,6 730 g 离心 5 min 分层。吸取上层正己烷溶液到离心管(管内加入 1 g 无水硫酸钠)摇匀,离心 3 min,吸取上清液过滤膜后在 GC-MS (Gas Chromatography

and Mass Spectrometry)上进行测定。气相条件为: J&W DB-WAX 毛细管色谱柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度: 250 °C; 进样量: 1.0 μL, 分流比为 20:1; 初始温度 180 °C, 保持 5 min, 以 3 °C/min 升温速率升至 230 °C, 保持 15 min。质谱条件为: 电子电离(electron ionization, EI) 离子源, 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 °C; 四极杆温度 150 °C; 传输线温度 280 °C; 质量范围 30~450 u, 全扫描方式; 溶剂延迟 3 min。

1.3.7 植物化学活性成分测定

1.3.7.1 植酸测定

参照时侠青等^[19]的方法使用硫酸铁铵-双吡啶分光光度法测定植酸含量, 具体操作如下: 准确称取样品 25 mg 于 10 mL 具塞试管中, 依次加入 2.5 mL 质量分数为 3% 的三氯乙酸和 5 mL 质量分数为 0.02% 的硫酸铁铵溶液摇匀。将密封试管沸水浴 30 min, 取出后流水冷却 2 min, 并转移到 10 mL 离心管中, 4 000 r/min 离心 10 min。然后取上清液 2.0 mL 放入另一试管中, 加入 3.0 mL 双吡啶溶液, 摇匀, 在 10 min 内于 519 nm 测定吸光度, 参比为 2.0 mL 蒸馏水加 3.0 mL 双吡啶溶液。根据吸光值计算米糠的植酸含量。

$$Z = \frac{c \times 100}{1000 \times m} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

Z—植酸含量, %;

c—由工作曲线计算得到植酸的质量, μg;

m—样品质量, mg。

1.3.7.2 γ-谷维素测定

参考 LS/T 6121.1-2017《粮油检验植物油中谷维素含量的测定分光光度法》测定 γ-谷维素含量, 具体操作如下: 准确称取米糠样品 0.100 g, 加入正庚烷溶解并定容至 50 mL, 混匀后转移离心管中, 室温下 200 r/min 磁力搅拌 1 h, 随后, 6 000 r/min 离心 5 min, 上清液过 0.22 μm 有机相微孔滤膜后, 即得到谷维素提取液, 于 315 nm 波长处测定其吸光值。以 γ-谷维素质量浓度 (mg/mL) 为横坐标, 吸光值为纵坐标, 进行线性回归, 得到标准标准曲线方程, 按下式计算 γ-谷维素含量。

$$G = \frac{c \times V \times n}{m} \quad (5)$$

式中:

G—γ-谷维素含量, mg/g;

c—待测样品浓度, mg/mL;

V—待测液体积, mL;

n—稀释倍数;

m—试样质量, g。

1.3.7.3 酚类物质测定

米糠酚类物质包含游离态和结合态。其中游离酚的提取采用 Paiva 等^[20]的方法并略作修改, 具体步骤为: 准确称取 1.00 g 米糠样品, 加入 50 mL 4 °C 预冷处理的体积分数为 80% 丙酮, 混匀, 在冰浴中搅拌 (10 000 r/min) 提取 5 min, 随后, 4 °C、8 500 r/min 离心 10 min, 取上清液。采用同样的方法对残渣重复提取一次, 合并上清液, 45 °C 真空浓缩后加入 4 °C 预冷处理的甲醇进行复溶, 并定容至 10 mL, 贮存于 -20 °C 冰箱备用。

米糠结合酚的提取参照 Finocchiaro 等^[21]的方法。将上述游离酚提取后剩余的物料残渣与 40 mL、2.0 mol/L NaOH 混匀, 充入氮气, 密封容器, 室温下振荡 1 h。随后, 用浓盐酸中和料液, 调节溶液 pH 值至 1.0, 加入 100 mL 的正己烷萃取脱脂, 再加入等体积乙酸乙酯萃取 5 次, 合并萃取液, 45 °C 真空浓缩后加入 4 °C 预冷处理的甲醇进行复溶, 定容至 10 mL, 贮存于 -20 °C 冰箱备用。

米糠游离酚和结合酚含量测定采用 Dewanto 等^[22]的方法。取 0.125 mL 上述酚提取液, 依次加入 0.5 mL 双蒸水, 0.125 mL 福林酚试剂, 混匀, 室温下避光反应 6 min; 随后加入 1.25 mL Na₂CO₃ (7%, m/V) 和 1.0 mL 双蒸水, 混匀, 室温下避光反应 90 min; 最后在 760 nm 波长下测定吸光度。利用没食子酸作为标准物质建立标准曲线。酚含量的最终结果表示为 mg GAE/100 g DW, 即 mg 没食子酸当量每 100 g 样品干重。

1.3.7.4 酚类物质抗氧化活性测定

采用氧自由基吸收能力 (ORAC) 评价米糠游离酚和结合酚抗氧化活性, 具体方法参考 Zhang 等^[23]的报道。20 μL 酚稀释液或 Trolox 标准液 (浓度为 6.25~50 μmol/L) 与 200 μL 荧光素钠工作液 (浓度为 0.96 μmol/L) 混合, 37 °C 孵育 20 min 后加入 20 μL AAPH (浓度为 119 μmol/L), 用酶标仪每隔 4.5 min 记录一次荧光强度, 激发波长 485 nm, 发射波长 538 nm。ORAC 测定结果表示为 μmol Trolox 当量每 g 样品干重, 即 μmol TE/g DW。

1.4 数据处理

所有指标测定均重复 3 次, 数据用平均值±标准差表示, 采用 SPSS 24.0 统计软件中单因素方差分析进行组间差异比较, 采用 Duncan 检验, 显著性水平为 $p < 0.05$, 图表中不同字母表示该水平下差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 高温高压蒸汽处理时间对米糠脂肪酶活性影响

性影响

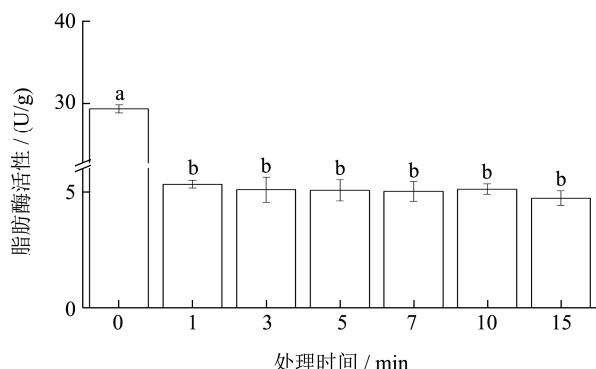


图 1 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠脂肪酶活的影响

Fig.1 Effects of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on lipase activity of rice bran

注：不同字母表示具有显著性差异， $p < 0.05$ 。图 2、图 4~图 9 同。

探究 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠脂肪酶活性影响，结果如图 1 所示，高温高压蒸汽对米糠脂肪酶活性影响显著 ($p < 0.05$)，处理 1 min 后，米糠脂肪酶灭活率达 81.86%，继续延长处理时间至 15 min，其脂肪酶灭活率提高至 83.87%，但与 1 min 组数据并无显著差异。Yu 等^[13]和 Kim 等^[14]的研究评价了多种处理方式对米糠稳定化影响，发现相比于挤压膨化、微波、红外等米糠稳定化方式，121 °C 高温高压蒸汽处理 20 min 具有较好的灭活米糠脂肪酶效果。本研所得米糠最适处理时间为 1 min，较 Yu 等^[13]和 Kim 等^[14]研究结果短，其原因主要是本研所用高温高压蒸汽发生器为夹层式，可实现蒸汽的预热，在达到所需温度条件后再放置样品，这样就能较准确的评价高温高压蒸汽处理时间对米糠的影响。同样的，罗舜菁等^[24]研究也发现过热蒸汽可以在 1 min 内使米糠脂肪酶活性显著降低，进一步延长处理时间，脂肪酶活性下降速率减缓，当时间大于 4 min 后脂肪

酶活性不再随时间增加而发生显著性变化。相较于众多米糠稳定化方法，高温高压蒸汽处理对米糠脂肪酶的灭活效果最佳，这可能是由于高温和高压的共同作用下更有利于破坏脂肪酶结构，从而使其丧失油脂水解活性。然而，无论哪种处理方法都不能完全钝化米糠脂肪酶，这可能与米糠中存在部分耐热脂肪酶有关。

2.2 高温高压蒸汽处理时间对米糠物理特性影响

影响

2.2.1 粘度

高温高压蒸汽处理时间对米糠粘度的影响结果如图 2 所示，随处理时间的增加，米糠粘度显著下降 ($p < 0.05$)，处理 7 min 后，米糠粘度由 14.67 cP 下降至 7.00 cP，继续延长处理时间，米糠粘度虽有下降，但与处理 7 min 时的米糠粘度并无显著差异 ($p > 0.05$)。米糠粘度降低的原因主要是由于高温高压蒸汽处理后，米糠淀粉发生糊化，处理结束后温度降低，导致淀粉老化，从而影响了物料粘度。胡月明等^[25]研究过热蒸汽处理对重组全麦粉（麦麸与面粉干基质量比为 2:8）粘度的影响发现，过热蒸汽处理后重组全麦粉的最终粘度由 3604 cP 下降至 3202 cP ($p < 0.05$)。经高温高压蒸汽处理后的米糠粘度值降低，这有利于促进米糠在冲调、焙烤等食品中的应用^[26]。

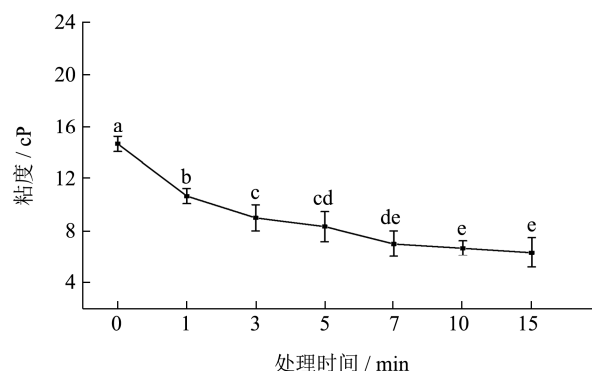


图 2 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠粘度的影响

Fig.2 Effect of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on viscosity of rice bran

2.2.2 色度

表 1 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠色度的影响

Table 1 Effect of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on chroma of rice bran

色度	处理时间/min						
	0	1	3	5	7	10	15
L^*	71.53±0.07 ^a	71.34±0.30 ^a	69.71±0.22 ^b	69.91±0.19 ^b	69.16±0.46 ^c	68.74±0.14 ^c	67.37±0.34 ^d
a^*	2.24±0.05 ^e	3.19±0.14 ^f	3.57±0.07 ^e	3.97±0.01 ^d	4.27±0.13 ^c	4.66±0.19 ^b	5.06±0.24 ^a
b^*	20.67±0.03 ^d	23.33±0.36 ^c	24.72±0.30 ^a	24.66±0.12 ^a	24.63±0.16 ^a	24.17±0.05 ^b	24.15±0.22 ^b

注：不同字母表示具有显著性差异， $p < 0.05$ 。表 2 同。

不同处理时间的米糠色度变化情况如表 1 所示, 随处理时间的延长, 米糠 L^* 值由 71.53 逐渐下降至 67.37, 表明米糠的颜色逐渐变暗; 米糠 a^* 值由 2.24 显著增加至 5.06 ($p < 0.05$), 这说明米糠的颜色逐渐变红; 米糠 b^* 值呈先增大后减小的趋势, 但处理后米糠的 b^* 值显著大于对照组 ($p < 0.05$), 处理时间 3 min 时, b^* 值由 20.67 增加至 24.72, 进一步延长处理时间至 15 min 时, b^* 值下降至 24.15, 说明米糠的色泽逐渐变黄。米糠色度发生变化的原因是米糠中含有蛋白质和糖类, 高温条件下发生了美拉德反应, 引起了米糠的色泽加深; 尽管美拉德反应会改变米糠的色泽, 但同时也能增加米糠的香气物质^[27,28], 从而提高其风味。

2.2.3 微观结构

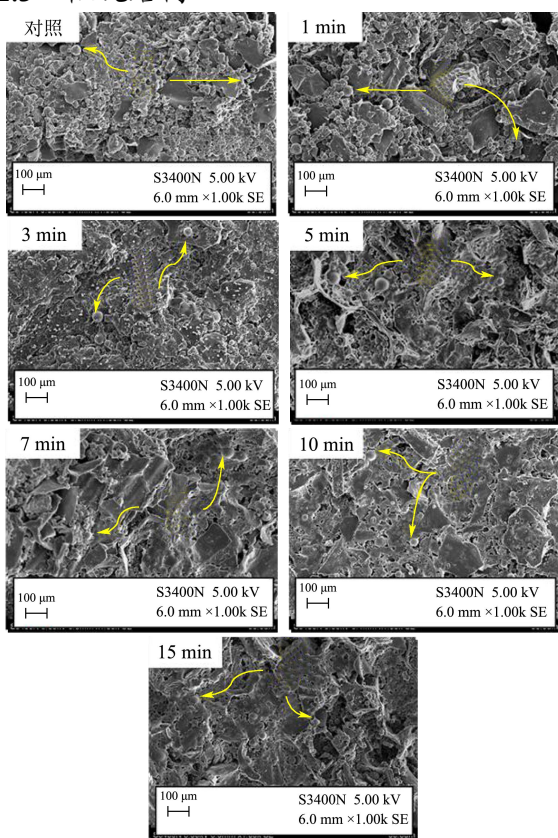


图 3 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠微观结构的影响

Fig.3 Effects of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on microstructure of rice bran

注: 图中箭头所指的球形或椭球形结构为米糠淀粉颗粒。

扫描电镜可用于观察样品的微观形貌结构, 不同处理时间米糠微观结构如图 3。由图可见, 未经处理的样品, 结构较为松散, 淀粉颗粒完整性较好, 呈立体球形或椭球形。随着高温高压蒸汽处理时间的增加, 淀粉颗粒的外观由球形或椭球形变为圆形片状形态, 并与其他组分融为一体形成致密的片状结构, 形貌完整的淀粉颗粒逐渐减少。这与徐芬等^[29]报道结果一

致, 即随着水热处理时间的延长, 淀粉颗粒原有的椭圆状形貌被破坏, 淀粉颗粒边缘逐渐模糊破裂。米糠微观结构的变化可能是由于高温高压蒸汽处理后淀粉发生不同程度的糊化进而使淀粉颗粒的外观形貌发生变化。Huang 等^[30]研究也表明, 当淀粉糊化进行到不可逆吸水膨胀阶段时, 水分不断进入淀粉微晶间隙, 淀粉颗粒体积膨胀到一定程度后出现破裂现象, 从而导致微观结构中的空隙形成。

2.3 处理时间对米糠主要营养成分影响

2.3.1 可溶性蛋白含量变化

米糠蛋白的氨基酸组成和比例符合人体需求, 具有生物效价高、消化率高和低致敏性等特点^[31]。图 4 为高温高压蒸汽处理时间对米糠可溶性蛋白含量的影响, 由图可知, 处理 1 min 后, 米糠可溶性蛋白含量显著下降了 71.89%, 且随时间延长无显著变化。周素梅等^[16]研究也发现, 挤压膨化稳定化后米糠的可溶性蛋白组分由 44.20% 下降至 14.30%; Runyon 等^[32]研究也发现, 热处理可使燕麦的可溶性蛋白含量下降近 50%。这些处理方式都含有热处理因素, 因此造成可溶性蛋白含量下降的主要原因可能是由于蛋白质受热变性, 导致疏水基团更多地暴露出来, 从而使可溶性蛋白含量显著下降^[33]。

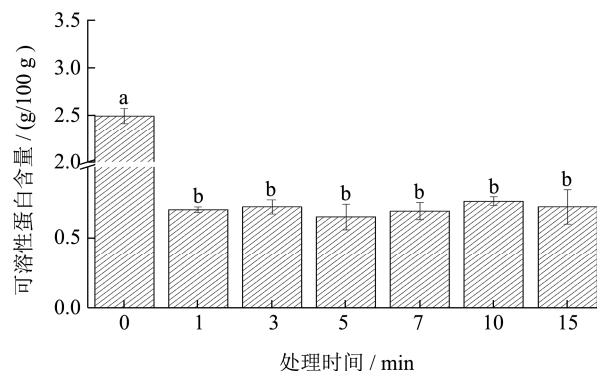


图 4 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠可溶性蛋白含量的影响

Fig.4 Effects of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on soluble protein content of rice bran

2.3.2 粗脂肪含量及脂肪酸组成变化

米糠脂肪酸主要以油酸和亚油酸等不饱和脂肪酸为主, 这些成分能有效促进人体生长发育, 具有抗炎、预防心脑血管疾病和降血脂等重要生理功能^[34]。因此, 评价了高温高压蒸汽处理时间对米糠脂肪含量及脂肪酸组成的影响 (图 5)。高温高压蒸汽处理 1 min 后, 米糠粗脂肪含量显著 ($p < 0.05$) 提高 5.94%, 而随着处理时间的延长, 米糠粗脂肪含量无明显变化。这可能是由于高温高压蒸汽破坏了米糠原有的微观结

构, 进而提升了粗脂肪的提取率。

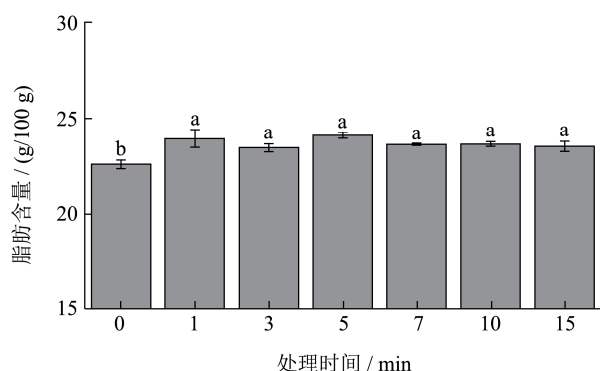


图5 121 °C高温高压蒸汽处理时间对米糠脂肪含量的影响

Fig.5 Effect of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on fat content of rice bran

表 2 是 121 °C 高温高压蒸汽处理对米糠脂肪酸组

表 2 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠脂肪酸组成的影响 (%)

Table 2 Effects of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on fatty acid composition of rice bran (%)

脂肪酸组成	处理时间/min						
	0	1	3	5	7	10	15
C14:0	0.27±0.01 ^d	0.28±0.00 ^{cd}	0.29±0.01 ^b	0.29±0.00 ^{ab}	0.31±0.00 ^a	0.30±0.00 ^a	0.31±0.00 ^a
C16:0	18.69±0.12 ^b	18.77±0.01 ^{ab}	18.79±0.01 ^{ab}	18.77±0.01 ^{ab}	18.80±0.03 ^a	18.84±0.09 ^a	18.79±0.01 ^{ab}
C16:1	0.24±0.01 ^b	0.24±0.00 ^b	0.24±0.00 ^{ab}	0.25±0.00 ^{ab}	0.25±0.01 ^{ab}	0.25±0.01 ^{ab}	0.25±0.00 ^a
C18:0	2.15±0.03 ^{bc}	2.11±0.01 ^d	2.13±0.03 ^{cd}	2.17±0.01 ^b	2.17±0.02 ^b	2.21±0.02 ^a	2.21±0.01 ^a
C18:1	46.43±0.09 ^a	46.30±0.05 ^{ab}	46.32±0.03 ^{ab}	46.26±0.05 ^b	46.21±0.13 ^{bc}	46.11±0.07 ^c	46.22±0.04 ^{bc}
C18:2	29.42±0.17 ^{ab}	29.52±0.04 ^a	29.42±0.05 ^{ab}	29.36±0.05 ^{bc}	29.26±0.07 ^{cd}	29.18±0.03 ^d	29.24±0.02 ^{cd}
C18:3	1.13±0.01 ^c	1.14±0.01 ^c	1.14±0.01 ^{bc}	1.17±0.00 ^{ab}	1.16±0.02 ^{ab}	1.18±0.02 ^a	1.18±0.01 ^a
C20:0	0.82±0.01 ^c	0.82±0.01 ^c	0.82±0.02 ^c	0.83±0.01 ^{bc}	0.85±0.01 ^{ab}	0.87±0.01 ^a	0.86±0.00 ^{ab}
C20:1	0.53±0.05 ^a	0.51±0.04 ^a	0.52±0.05 ^a	0.54±0.05 ^a	0.50±0.01 ^a	0.51±0.00 ^a	0.54±0.04 ^a
C22:0	0.32±0.03 ^c	0.32±0.01 ^c	0.34±0.01 ^{bc}	0.36±0.01 ^{bc}	0.37±0.10 ^b	0.43±0.01 ^a	0.41±0.02 ^a

2.4 处理时间对米糠植物化学成分的影响

2.4.1 γ-谷维素含量

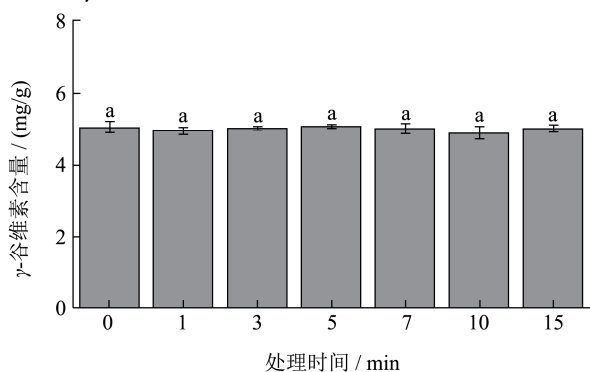


图 6 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠 γ-谷维素含量的影响

Fig.6 Effects of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on the content of γ-glutamine in rice bran

γ-谷维素是米糠中含量丰富的活性营养成分之

成的影响, 由表 2 可知, 通过 GC-MS 分析结果共检测出 10 种脂肪酸, 分别为肉豆蔻酸 (C14:0)、棕榈酸 (C16:0)、硬脂酸 (C18:0)、花生酸 (C20:0)、山嵛酸 (C22:0) 等饱和脂肪酸, 棕榈油酸 (C16:1)、油酸 (C18:1)、亚油酸 (C18:2)、亚麻酸 (C18:3) 和花生烯酸 (C20:1) 等不饱和脂肪酸。其中, 饱和脂肪酸含量占比 22.25%, 不饱和脂肪酸含量占比 77.75%, 脂肪酸组成结果与林丹等^[35]和梁盈等^[36]研究结果接近。高温高压蒸汽处理并不会改变米糠油脂脂肪酸的组成, 且对其含量影响也较小, 处理 15min 后, 饱和脂肪酸含量提高到 22.58%, 不饱和脂肪酸含量降低到 77.42%, 较未处理组分别变化 1.48% 和 0.42%。因此, 该结果表明, 高温高压蒸汽处理能够较好地保留米糠中不饱和脂肪酸, 从而不影响其营养价值。

一, 具有抗氧化、预防炎症、预防心脑血管疾病等功效^[37]。因此, 明确高温高压蒸汽对米糠谷维素含量影响具有重要意义。

如图 6 所示, 在所选的处理时间范围内, γ-谷维素含量随处理时间无显著变化 ($p>0.05$), 其含量维持在 4.90 至 5.08 mg/g 之间。罗舜菁等^[24]的研究也发现, 120 °C 过热蒸汽处理米糠 4 min 后, 米糠中的 γ-谷维素含量无显著性变化 ($p>0.05$)。本研究结果表明, 即便 121 °C 处理 15 min, γ-谷维素仍无明显损失, 这与 γ-谷维素具有较好的热稳定性有关^[38]。

2.4.2 植酸含量

植酸是一种在豆类和谷类中含量较高的天然化合物, 由于其具有降低食品中营养物质生物利用率的抗营养效应而引起了广泛关注^[39]。米糠中植酸含量较高, 因此, 本研究进一步探究了高温高压蒸汽处理对米糠植酸含量影响, 结果如图 7。由图可知, 高温高压蒸汽处理 15 min 对米糠植酸含量无明显影响 ($p>0.05$),

表明本研究处理手段并不能降低米糠中植酸含量。有研究报道, 120 °C 高压灭菌 30 min 可使扁豆中植酸含量下降 10%^[40]。因此, 通过延长处理时间或提高处理温度对降低米糠植酸含量可能有一定作用。

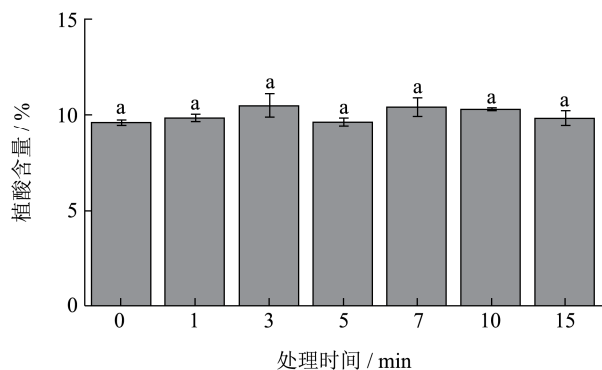


图 7 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠植酸含量的影响

Fig.7 Effect of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on phytic acid content in rice bran

2.4.3 酚类物质含量及其抗氧化活性

米糠中含有丰富的酚类物质, 分为游离态和结合态。一系列的研究已证明了米糠多酚具有很强的生物活性, 包括抗氧化、抗癌、抗炎等功效^[41]。因此, 本研究评价了高温高压蒸汽处理时间对米糠酚类物质含量及其抗氧化活性的影响。

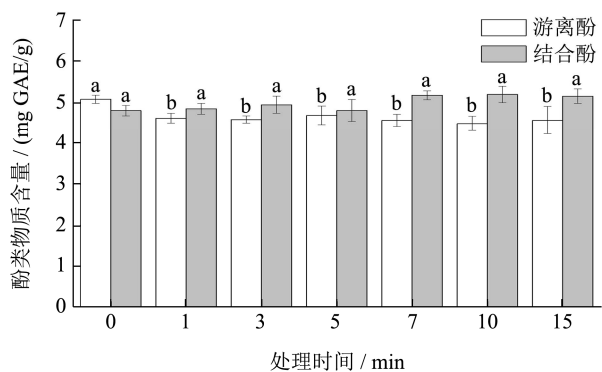


图 8 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠酚类物质含量的影响

Fig.8 Effects of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on the content of phenolic substances in rice bran

图 8 为不同处理时间米糠游离酚和结合酚含量的变化, 结果表明, 高温高压蒸汽处理对游离酚含量有负面影响, 处理 1 min 后, 米糠游离酚含量降低 9.07%, 进一步延长时间, 米糠游离酚含量无明显损失 ($p>0.05$)。游离酚减少的原因应与高温引起的米糠游离酚结构破坏有关, 但游离酚的含量并没有随处理时间的延长而持续降低, 说明游离酚中的大部分组分在 121 °C 热处理条件下的稳定性较好。而对于米糠结合酚, 高温高压蒸汽对其含量的影响并不明显, 尽管随着处理时间的延长, 米糠结合酚含量总体呈现上升

趋势, 但与对照组比并无显著差异 ($p>0.05$)。

进一步使用 ORAC 评价了米糠游离酚和结合酚的抗氧化活性, 其结果与米糠酚类含量具有相似的规律。结果如图 9 所示, 高温高压蒸汽处理 1 min 后米糠游离酚抗氧化活性降低 18.55%, 进一步延长处理时间, 其抗氧化活性无明显变化 ($p>0.05$)。此外, 在所选处理时间范围内, 米糠结合态多酚 ORAC 抗氧化活性随处理时间延长无明显变化 ($p>0.05$)。

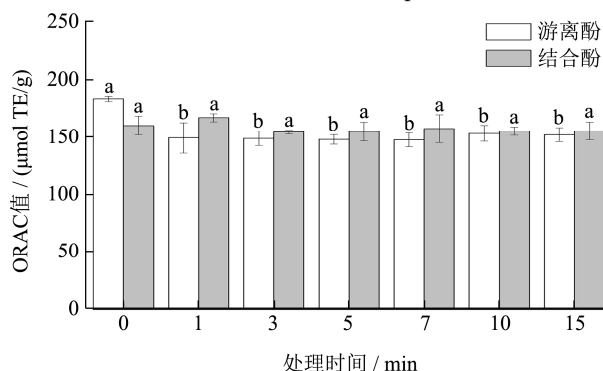


图 9 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠酚类物质 ORAC 值的影响

Fig.9 Effects of 121 °C high-temperature and high-pressure steam treatment time on the absorption capacity of phenolic compounds oxygen free radical in rice bran

3 结论

本研究系统探究了 121 °C 高温高压蒸汽处理时间对米糠理化特性和营养品质影响, 结果表明, 处理 1 min 后, 米糠脂肪酶活性降低了 81.86%, 可溶性蛋白、米糠游离酚含量及抗氧化活性显著降低, 而米糠粗脂肪含量提取率提高; 随处理时间延长, 米糠的粘度逐渐降低, 颜色加深, 结构变得更加致密; 而米糠脂肪酸组成及比例、 γ -谷维素、植酸、结合酚及抗氧化活性等指标不受处理时间影响。因此, 综合考虑各指标变化, 选择 121 °C 高温高压蒸汽处理 1 min 为最适米糠处理条件。研究结果为米糠的深加工利用提供了理论和技术支撑。

参考文献

- [1] Muthayya S, Sugimoto J D, Montgomery S, et al. An Overview of Global Rice Production, Supply, Trade, and Consumption [M]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2014: 1324, 7-14
- [2] Friedman, Mendel. Rice brans, rice bran oils, and rice hulls: composition, food and industrial uses, and bioactivities in humans, animals, and cells [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, 61(45): 10626-10641

- [3] Rafe A, Sadeghian A. Stabilization of Tarom and Domesiah cultivars rice bran: physicochemical, functional and nutritional properties [J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 74: 64-71
- [4] 肖竹钱,赵优萍,范煜,等.不同制备方法对米糠油品质影响及米糠蛋白的氨基酸组成分析[J].*中国油脂*,2018,43(11):39-44
XIAO Zhuqian, ZHAO Youping, FAN Yu, et al. Effect of different preparation methods on quality of rice bran oil and amino acid composition of rice bran protein [J].*China Oils and Fats*, 2018, 43(11): 39-44
- [5] 于殿宇,郝凯越,程杰,等.射频处理提高米糠稳定性及其对品质的影响[J].*食品科学*,2020,41(20):20-26
YU Dianyu, HAO Kaiyue, CHENG Jie, et al. Radio frequency improves the stability and quality of rice bran [J]. *Food Science*, 2020, 41(20): 20-26
- [6] Liu L, Wen W, Zhang R, et al. Complex enzyme hydrolysis releases antioxidative phenolics from rice bran [J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 1-8
- [7] 刘玉兰,李泽泽,陈文彦,等.不同酸价米糠毛油碱炼脱酸过程甘油酯组成及 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯含量的变化[J].*食品科学*,2020,41(6):25-30
LIU Yulan, LI Zeze, CHEN Wenyan, et al. Variations in the contents of glycerides, 3-chloropropanol esters and glycidyl esters in rice bran oil with different acid values during alkali refining [J]. *Food Science*, 2020, 41(6): 25-30
- [8] Chen Yenhui, Yen Yufen, Chen Suder. Effects of radio frequency heating on the stability and antioxidant properties of rice bran [J]. *Foods*, 2021, 10(4): 810
- [9] So W K W, Law B M H, Law P T W, et al. Current hypothesis for the relationship between dietary rice bran intake, the intestinal microbiota and colorectal cancer prevention [J]. *Nutrients*, 2016, 8(9): 569
- [10] Liu Y Q, Strappe P, Zhou Z K, et al. Impact on the nutritional attributes of rice bran following various stabilization procedures [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(15): 2458-2466
- [11] Amna T, Kashif A, Umar F, et al. Management of diabetic complications through fruit flavonoids as a natural remedy [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(7): 482
- [12] WU Xiaojuan, LI Fang, WU Wei. Effects of rice bran rancidity on the oxidation and structural characteristics of rice bran protein [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 120: 108943
- [13] YU Chengwei, HU Qirui, WANG haowei, et al. Comparison of 11 rice bran stabilization methods by analyzing lipase activities [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(4): 1-14
- [14] Kim S, Chung H, Lim S. Effect of various heat treatments on rancidity and some bioactive compounds of rice bran [J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(1): 1-6
- [15] Laokuldilok T, Rattanathanan Y. Protease treatment for the stabilization of rice bran: effects on lipase activity, antioxidants, and lipid stability [J]. *Cereal Chemistry*, 2014, 91(6): 560-565
- [16] 周素梅,金世合,姚惠源.挤压稳定化处理对米糠蛋白性质影响的研究[J].*食品科学*,2003,5:49-53
ZHOU Sumei, JIN Shihe, YAO Huiyuan, et al. Effects of extrude-stabilization on the protein properties in rice bran [J]. *Food Science*, 2003, 5: 49-53
- [17] 方勇,王红盼,杨文建,等.金针菇复配发芽糙米挤压膨化工艺及产品品质特性[J].*中国农业科学*,2016,49(4):727-738
FANG Yong, WANG Hongpan, YANG Wenjian, et al. Extrusion process of germinated brown rice compounded of *Flammulina velutipes* and extrudant quality properties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(4): 727-738
- [18] 杨春英,刘学铭,陈智毅.15 种食用植物油脂肪酸的气相色谱-质谱分析[J].*食品科学*,2013,34(6):211-214
YANG Chunying, LIU Xueming, CHEN Zhiyi. Determination of fatty acid profiles in fifteen kinds of edible vegetable oil by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Science*, 2013, 34(6): 211-214
- [19] 时侠清,沙超,姚维东,等.双吡啶分光光度法测定小麦植酸含量研究[J].*安徽科技学院学报*,2009,23(6):10-14
SHI Xiaqing, SHA Chao, YAO Weidong, et al. Study on bipyridine colorimetric method for determination of wheat phytic acid content [J]. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 2009, 23(6): 10-14
- [20] Paiva F F, Vanier N L, De Jesus Berrios J, et al. Physicochemical and nutritional properties of pigmented rice subjected to different degrees of milling [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2014, 35(1): 10-17
- [21] Finocchiaro F, Ferrari B, Gianinetti A, et al. Characterization of antioxidant compounds of red and white rice and changes in total antioxidant capacity during processing [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2010, 51(8): 1006-1019
- [22] Veronica D, Xianzhong W, K A K, et al. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(10): 3010-3014
- [23] ZHANG Mingwei, ZHANG Ruifeng, ZHANG Fangxuan, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran

- of different commercially available varieties [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(13): 7580-7587
- [24] 罗舜菁,胡迪,黄克愁,等.过热蒸汽处理对米糠营养性质和储藏稳定性的影响[J].中国食品学报,2020,20(5):213-221
LUO Shunjing, HU Di, HUANG Kechou, et al. Effects of superheated steam treatment on the nutritional properties and storage stability of rice bran [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(5): 213-221
- [25] 胡月明.过热蒸汽处理对小麦及小麦粉品质的影响研究[D].北京:中国农业大学,2018
HU Yueming. Effect of superheated steam treatment on qualities of wheat and wheat flour [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018
- [26] 汪志宇.动态高压微射流改性膳食纤维对大米淀粉理化性质的影响[D].南昌:南昌大学,2013
WANG Zhiyu. Effect of high pressure treatment on functional and structural properties of rice bran protein [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013
- [27] Arsa S, Puechkamutr Y. Pyrazine yield and functional properties of rice bran protein hydrolysate formed by the Maillard reaction at varying pH [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 59: 890-897
- [28] Supeeraya A, Chockchai T, R C K. Quantitation of three strecker aldehydes from enzymatic hydrolyzed rice bran protein concentrates as prepared by various conditions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(29): 1-31
- [29] 徐芬,刘伟,刘倩楠,等.不同糊化度马铃薯淀粉的黏度及凝胶特性分析[J].现代食品科技,2020,36(5):42-50
XU Fen, LIU Wei, LIU Qiannan, et al. Viscosity and gelling properties of potato starch with different degrees of gelatinization [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(5): 42-50
- [30] Ting-Ting Huang et al. Effect of repeated heat-moisture treatments on digestibility, physicochemical and structural properties of sweet potato starch [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 202-210
- [31] 林素丽.超高压处理对米糠蛋白功能及结构特性的影响研究[D].杭州:浙江大学,2017
LIN Suli. Effect of high pressure treatment on functional and structural properties of rice bran protein [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- [32] Runyon J R, Sunilkumar B A, Nilsson L, et al. The effect of heat treatment on the soluble protein content of oats [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 65: 119-124
- [33] 王长远,郝天舒,张敏.干热处理对米糠蛋白结构与功能特性的影响[J].食品科学,2015,36(7):13-18
WANG Changyuan, HAO Tianshu, ZHANG Min, et al. Effect of dry heat treatment on structural and functional properties of rice bran protein [J]. Food Science, 2015, 36(7): 13-18
- [34] 杨敏,魏冰,孟橘,等. ω -3 多不饱和脂肪酸的来源及生理功能研究进展[J].中国油脂,2019,44(10):110-115
YANG Min, WEI Bing, MENG Ju, et al. Progress in sources and physiological function of ω -3 polyunsaturated fatty acids [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(10): 110-115
- [35] 林丹,吴雪辉,杨公明,等.米糠油氧化稳定性研究及货架期预测[J].现代食品科技,2012,28(10):1323-1326
LIN Dan, WU Xuehui, YANG Gongming, et al. Oxidation stability and shelf-life of rice bran oil [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(10): 1323-1326
- [36] 梁盈,刘颖,鲁倩,等.米糠油不饱和脂肪酸对 HepG2 细胞增殖的影响[J].中国粮油学报,2016,31(6):98-102
LIANG Ying, LIU Ying, LU Qian, et al. Effect of unsaturated fatty acids from rice bran oil on HepG2 cell proliferation [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(6): 98-102
- [37] Yhc A, Syl A, Ar A, et al. Characterization and quantification of γ -oryzanol in Korean rice landraces [J]. Journal of Cereal Science, 2019, 88: 150-156
- [38] Nyström L, Achrenius T, Lampi A, et al. A comparison of the antioxidant properties of steryl ferulates with tocopherol at high temperatures [J]. Food Chemistry, 2006, 101(3): 947-954
- [39] 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
GUO Jia. Study on method and mechanism of reducing phytate content in wheat bran [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015
- [40] Porres J M, M López-Jurado, Aranda P, et al. Bioavailability of phytic acid-phosphorus and magnesium from lentils (*Lens culinaris* M.) in growing rats: influence of thermal treatment and vitamin-mineral supplementation [J]. Nutrition, 2004, 20(9): 794-799
- [41] 冯芝英,张名位,张瑞芬,等.糙米结合酚的分离纯化、结构表征及体外抗氧化活性[J].现代食品科技,2021,37(7):83-89
FENG Zhiying, ZHANG Mingwei, ZHANG Ruifeng, et al. Isolation, structural characterization and antioxidant activity of brown rice bound phenolics [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 83-89