

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80288

热处理及高压脱脂工艺对米糠品质及功能特性的影响

陈 芸¹ 韩小苗¹ 吴苏喜^{1,2,3} 蔡勇建¹ 苗永军²

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙昊瑞生物科技有限公司, 湖南 长沙 410006;
3. 湖南生平米业股份有限公司, 湖南 郴州 423615)

摘要: [目的] 探讨热处理方式(干热、微波、高温高压蒸汽)与高压脱脂工艺(超临界 CO₂ 萃取、超声辅助亚临界正丁烷萃取)对米糠品质的影响, 提升米糠稳定性及其高值化利用潜力。[方法] 采用干热、微波、高温高压蒸汽处理对米糠进行预处理, 并结合两种高压脱脂工艺, 系统分析不同处理对米糠脂肪酶活性、贮藏稳定性及理化性质的影响。[结果] 高温高压蒸汽处理(121 °C, 20 min)显著降低了脂肪酶活性(降至 19.87 mg/g), 有效抑制了 30 d 贮藏期间游离脂肪酸的积累, 稳定化效果优于干热与微波处理。超临界 CO₂ 萃取的出油效率达到 97.73%, 优于超声辅助亚临界正丁烷萃取, 并显著提升了米糠的持水性(3.08 g/g)、膨胀势(5.82 g/g)和水溶性指数。[结论] 高温高压蒸汽处理联合超临界 CO₂ 萃取可显著改善米糠的贮藏稳定性和功能特性。

关键词: 米糠; 干热; 微波; 高温高压蒸汽; 超临界萃取; 亚临界萃取; 功能特性

Effects of thermal treatments and high-pressure defatting processes on the quality and functional characteristics of rice bran

CHEN Yun¹ HAN Xiaomiao¹ WU Suxi^{1,2,3} CAI Yongjian¹ MIAO Yongjun²

(1. College of Food and Bio-Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Changsha Haorui Bio-technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410006, China; 3. Hunan Shengping Rice Industry Co., Ltd., Chenzhou, Hunan 423615, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of thermal treatments (dry heat, microwave, and high-temperature high-pressure steam) and high-pressure defatting processes (supercritical CO₂ extraction and ultrasound-assisted subcritical n-butane extraction) on the quality of rice bran, aiming to improve its stability and potential for high-value utilization. [Methods] Rice bran was pretreated by dry heat, microwave, and high-temperature high-pressure steam, combined with two high-pressure defatting techniques. The effects on lipase activity, storage stability, and physicochemical properties of rice bran were systematically analyzed. [Results] High-temperature high-pressure steam treatment (121 °C, 20 min) significantly reduced lipase activity to 19.87 mg/g and effectively inhibited the accumulation of free fatty acids during 30 days of storage, demonstrating superior stabilization compared to dry heat and microwave treatments. Supercritical CO₂ extraction achieved an oil yield of 97.73%, outperforming ultrasound-assisted subcritical n-butane extraction, and significantly improved the water-holding capacity (3.08 g/g), swelling capacity (5.82 g/g), and water solubility index of rice bran. [Conclusion] The combination of high-temperature high-pressure steam treatment and supercritical CO₂ extraction markedly enhanced the storage stability and functional properties of rice bran.

Keywords: rice bran; dry heat; microwave; high-temperature high-pressure steam; supercritical extraction; subcritical extraction; functional properties

基金项目: 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设专项(编号: 2022sfq49)

通信作者: 吴苏喜(1965—), 男, 长沙理工大学教授, 博士。E-mail: wusuxi@126.com

收稿日期: 2025-03-29 改回日期: 2025-07-03

引用格式: 陈芸, 韩小苗, 吴苏喜, 等. 热处理及高压脱脂工艺对米糠品质及功能特性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(8): 23-31.

Citation: CHEN Yun, HAN Xiaomiao, WU Suxi, et al. Effects of thermal treatments and high-pressure defatting processes on the quality and functional characteristics of rice bran[J]. Food & Machinery, 2025, 41(8): 23-31.

米糠是稻米加工过程中的重要副产物,富含油脂、蛋白质、膳食纤维及多种维生素,兼具较高的营养价值与功能活性^[1-3]。然而,米糠中内源性脂肪酶活性极高,极易在加工或贮藏过程中催化油脂水解、引起酸败,导致其品质迅速劣变,从而严重限制了米糠在食品、饲料等领域的高值化开发与规模化应用^[4-5]。

近年来国内外学者在脂肪酶活性抑制以及米糠稳定化方面开展了大量研究,尤其是在热处理技术的应用上取得了显著进展。传统热处理方法,如干热^[6]、微波^[7]、高温高压蒸汽^[8]等,主要通过热效应破坏脂肪酶的空间结构以降低其活性,能够在短时间内有效延缓米糠油脂的水解进程,减少游离脂肪酸生成,从而提高贮藏稳定性。但处理条件若控制不当,则可能导致米糠中蛋白质、膳食纤维及其他功能成分的破坏,影响其后续加工特性如水合特性等。因此,在实现脂肪酶高效钝化的同时,最大限度保留米糠的营养组分与功能特性,仍是当前热处理技术亟需解决的问题。

超临界 CO₂ 萃取技术 (supercritical fluid extraction, SFE) 作为一种绿色、高效的油脂提取手段,也受到愈来愈多的关注^[9]。该技术利用超临界状态下的 CO₂ 良好的溶解性与调控性,能在相对低温的条件下高效提取米糠中的油脂成分,避免高温对热敏营养物质的不利影响,且无残留风险^[10]。然而实际应用中发现,未经稳定化预处理的米糠原料中的脂肪酶活性可能在萃取前诱导油脂水解,影响最终产品品质。

值得关注的是,协同整合热处理与超临界 CO₂ 萃取技术的新型工艺策略逐渐崭露头角,通过优化热处理条件对米糠进行稳定化处理,既可有效钝化脂肪酶延长货架期,又能通过改变物料微观结构(如细胞壁孔隙率增大、脂质体分散度提升等)增强萃取过程中 CO₂ 的传质效率^[11]。这种协同作用机制不仅能提升油脂得率与品质,还可降低萃取过程中的能耗强度^[12]。然而,目前关于不同热处理条件下米糠稳定化效果及其对后续超临界 CO₂ 萃取过程协同影响的系统研究仍相对匮乏。

研究拟以高温高压蒸汽等热处理方式为基础,协同超临界 CO₂ 萃取技术,系统探讨不同热处理条件下米糠稳定化效果及其对米糠油提取效率的影响,重点评估处理过程对脂肪酶活性、游离脂肪酸含量、基本营养成分、水分保持能力、膨胀性等指标的综合作用机制。通过构建热处理与脱脂一体化工艺,以期实现对米糠资源的高效稳定利用,为其在功能食品和油脂工业中的深度开发提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料与主要试剂

米糠:生产当日过 40 目筛,收集入密封袋,存于 -20 °C 冰箱,湖南生平米业有限公司;

可溶性淀粉:分析纯,成都市科隆化学品有限公司;
正丁烷:纯度 ≥95%,河南亚临界机械装备有限公司;
食品级 CO₂:纯度 ≥99.9%,金宏气体股份有限公司;
糖化酶:酶活性 ≥80 U/mg,合肥博美生物科技有限责任公司;

3,5-二硝基水杨酸、乙酸镁、硫代硫酸钠等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器与设备

立式压力蒸汽灭菌锅:01J2003-04 型,上海东亚压力容器制造有限公司;

电子分析天平:AUY120 型,日本岛津公司;

凯氏定氮仪:K9840 型,海能未来技术集团股份有限公司;

超临界 CO₂ 萃取设备:HA-220-50-06-C 型,南通市华安超临界萃取有限公司;

亚临界萃取设备:CBE-20L 型,河南亚临界机械装备有限公司;

超声波振动系统装置:HI-TOO220B 型,邯郸市海拓机械科技有限公司;

扫描电子显微镜:JSM-IT500A 型,日本电子株式会社(JEOL)。

1.2 试验方法

1.2.1 热处理对米糠基本成分及贮藏稳定性的影响

(1) 干热处理(Gr):参照吴坤龙等^[13]的方法并稍作修改。将米糠置于白瓷盘中放入烘箱,设置干热温度 140 °C,干热时间 60 min。

(2) 微波处理(Wb):参照崔国庭等^[14]的方法并稍作修改。将米糠置于微波炉专用瓷盘,设置微波时间 60 s,微波功率 800 W。

(3) 高温高压蒸汽处理(Zq):参照景孝男等^[15]的方法并稍作修改。将米糠置于 150 mL 锥形瓶中,瓶口用两层纱布封口,置入立式压力蒸汽灭菌锅于 121 °C 处理 20 min。

(4) 贮藏稳定性研究:参照 Li 等^[16]的方法,研究未处理米糠(Ct 米糠)、干热处理米糠(Gr 米糠)、高温高压蒸汽处理米糠(Zq 米糠)、微波处理米糠(Wb 米糠)在 35 °C 条件下贮藏(30 d)过程中游离脂肪酸值和脂肪酶活力的变化情况。

1.2.2 超临界 CO₂ 萃取与超声波辅助亚临界正丁烷萃取对 Zq 米糠出油效率及功能特性的影响

(1) 超临界 CO₂ 萃取(SFE)工艺:参照李悦等^[17]的方法并稍作修改。称取 Zq 米糠 200 g 装入 1 L 萃取釜中,打开 CO₂ 钢瓶和制冷机,设置制冷机温度 4 °C,固定分离釜条件:分离釜 I、分离釜 II 温度为 45 °C,分离釜 I、分离釜 II 压力为 10 MPa。设定以下变量:萃取温度(35, 40, 45, 50, 55 °C),萃取压力(15, 20, 25, 30, 35 MPa),萃取时间(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 h)。萃取完成后,在分离釜 I 和分

离釜Ⅱ处收集萃取物。

(2) 超声波辅助亚临界正丁烷萃取(UA-SBE)工艺:参照薛晴等^[18]的方法并稍作修改。称取Zq米糠200 g装入滤袋密封后,置于亚临界萃取釜中,关闭进料口后启动真空泵,将釜内压力降至0.5 MPa。随后通入正丁烷至完全浸没滤袋。开启超声波装置,设定超声频率为20 kHz,并设定以下变量:超声时间1,2,3,4,5 min;萃取温度25,35,45,55,65 °C;萃取时间10,20,30,40,50 min;间歇萃取1,2,3,4,5次。萃取完成后,混合液进入分离罐,正丁烷经减压气化、压缩液化后循环使用,米糠油经脱溶后排出。

1.2.3 检测指标及方法

(1) 米糠饼粕基本成分测定:水分含量按GB 5009.3—2016执行;粗脂肪含量按GB 5009.6—2016(索氏提取法)执行;粗蛋白含量按GB 5009.5—2016(凯氏定氮法)执行;灰分含量按GB 5009.4—2016执行;膳食纤维含量按GB 5009.88—2023执行;淀粉含量按AACC 76—13.01执行。

(2) 脂肪酶活动度测定:按GB/T 5523—2008执行。

(3) 游离脂肪酸值测定:参照梁兰兰等^[19]的方法并稍加改动。取4.00~5.00 g样品于带塞锥形瓶中,加入50 mL石油醚—乙醇混合液,加塞振荡。放气,盖紧瓶塞在60 r/min的气浴恒温振荡器中振荡30 min,静置并过滤,取25 mL滤液加入25 mL石油醚—乙醇混合液,加入2~3滴酚酞,用氢氧化钾标准溶液滴定至微红色保持30 s不消失,记录消耗体积,按式(1)计算游离脂肪酸值。

$$F = \frac{(V - V_0) \times C}{m \times X} \times 28.2 \times \frac{50}{25}, \quad (1)$$

式中:

F ——游离脂肪酸值,%;

V ——消耗KOH溶液的体积,mL;

V_0 ——空白消耗KOH溶液的体积,mL;

C ——KOH溶液的浓度,mol/L;

28.2——油酸毫克当量100倍;

m ——样品的质量,g;

X ——米糠的粗脂肪含量,%。

(4) 米糠保质期计算:为了预测不同处理方法对米糠保质期的影响,采用线性回归模型对每种处理方法下米糠游离脂肪酸值随贮藏时间变化的数据进行拟合,得式(2)所示的数学表达式。假设游离脂肪酸值70%时为保质期的临界点,则达到此临界点所需的时间可按式(3)计算。

$$y = mx + b, \quad (2)$$

$$x = \frac{70 - b}{m}, \quad (3)$$

式中:

y ——游离脂肪酸值,%;

m ——回归系数;

x ——贮藏时间,d;

b ——初始游离脂肪酸值,%。

(5) 米糠出油效率测定:准确称取萃取得到的米糠油的质量和投入米糠的质量,按式(4)计算米糠出油率和出油效率。

$$Y_e = \frac{m_1}{X_0 \times m_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

Y_e ——出油效率,%;

m_1 ——米糠油的质量,g;

m_0 ——米糠总质量,g;

X_0 ——米糠脂肪含量,%。

(6) 扫描电镜(SEM)观察:参照Zhao等^[20]的方法。

(7) 持水性测定:参照Qiao等^[21]的方法并稍加修改,称取1 g米糠,放入已经称重的50 mL离心管中并加入25 mL蒸馏水,混匀后室温振荡1 h,4 000 r/min离心20 min,弃上清液,准确称量沉淀质量,按式(5)计算持水性。

$$W_{RC} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

W_{RC} ——持水性,%;

m_1 ——沉淀质量,g;

m_0 ——样品质量,g。

(8) 持油性测定:参照Liu等^[22]的方法并稍加修改。将0.20 g米糠样品放入已称重的5 mL标准离心管中,加入2 mL大豆油,在室温条件下振荡1 h,4 000 r/min离心15 min,弃上清液,并准确称取沉淀的质量,按式(6)计算持油性。

$$O_{RC} = \frac{m_2 - m_0}{m_0} \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

O_{RC} ——持油性,%;

m_2 ——沉淀质量,g;

m_0 ——样品质量,g。

(9) 水溶性指数测定:参照Wu等^[23]的方法并稍加修改。称取米糠2.50 g,置于50 mL离心管中,加入30 mL蒸馏水于室温下搅拌30 min,4 000 r/min离心30 min,收集上清液倒入培养皿中,于105 °C烘箱中烘至恒重,按式(7)计算水溶性指数。

$$W_s = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100\%, \quad (7)$$

式中:

W_s ——水溶性指数,%;

m_1 ——烘至恒重的样品质量,g;

m_0 ——培养皿质量,g;

m ——米糠样品质量,g。

(10) 膨胀势测定:参照Chi等^[24]的方法并稍加修改。取米糠(1.000±0.005) g置于已恒重的离心管中,加入10 mL蒸馏水,混匀后,在室温下静置30 min,放入95 °C

水浴锅中加热 15 min 使淀粉糊化。待冷却过后,4 000 r/min 离心 20 min,弃上清液,并准确称取沉淀的质量,按式(8)计算膨胀势。

$$S_p = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%, \quad (8)$$

式中:

- S_p ——膨胀势, %;
- m_1 ——沉淀质量, g;
- m_0 ——样品质量, g。

1.2.4 数据处理与统计分析 所有试验均进行3次以上重复,数据用平均值±标准差表示。采用Origin 2018C和Excel 2019软件进行数据分析和绘图,利用IBM SPSS Statistics 26软件进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 热处理对米糠基本成分及贮藏稳定性的影响

2.1.1 基本成分 表1展示了热处理对米糠基本成分的影响。其中:干热处理组的水分含量最低,为(4.65±0.17) g/100 g,表明其脱水效果最强,可能是因为高温促使水分挥发^[25];高温高压蒸汽处理组的灰分最低,为(8.53±0.21) g/100 g,可能是因为矿物质在高湿热条件下溶出^[26];各热处理组蛋白质含量均低于未处理组,说明热处理可能导致蛋白质变性或降解;各热处理组膳食纤维含量均有所降低,微波处理组的膳食纤维含量最低,为(41.06±0.27) g/100 g,可能因纤维受热断裂、溶出。综上,不同热处理通过改变米糠结构和成分,影响其营养保

持效果。其中干热处理利于脱水保存,高温高压蒸汽处理和微波处理则对矿物质与纤维影响较大,这可为后续工艺选择提供依据。

2.1.2 贮藏稳定性 脂肪酶可催化甘油三酯水解生成游离脂肪酸,进而影响米糠的贮藏稳定性,因此脂肪酶活性和游离脂肪酸值是衡量米糠品质的重要指标^[27]。图1展示了米糠在30 d贮藏期内脂肪酶活性与游离脂肪酸(FFA)值的变化趋势。如图1所示,未处理米糠初始脂肪酶活性高达79.71 mg/g,在30 d的贮藏期内虽呈下降趋势,但整体仍维持在较高的水平,导致FFA值急剧上升,反映出显著的酶促水解作用^[28-29]。通过热处理干预可显著改善此现象,其中高温高压蒸汽处理组表现出最优抑制效果:脂肪酶活性被抑制至19.87 mg/g的低稳态水平[图1(a)],同时FFA积累速率[图1(b)]显著降低[线性斜率最低,图2(d)],货架期延长至102 d,较未处理组(19 d)提升5.4倍(表2)。这种显著的品质改善效应源于热处理对酶蛋白结构的双重破坏机制:① 高温环境通过破坏酶分子维持空间构象的氢键网络和疏水相互作用,导致其三级结构发生不可逆变性;② 饱和水蒸气的高渗透性可深入米糠基质内部,促进脂肪酶分子发生聚集变性^[30]。因此,高温高压蒸汽处理在延长农产品货架期方面展现出重要应用价值。

2.2 高压脱脂工艺对高温高压蒸汽处理米糠出油效率、基本成分及功能特性的影响

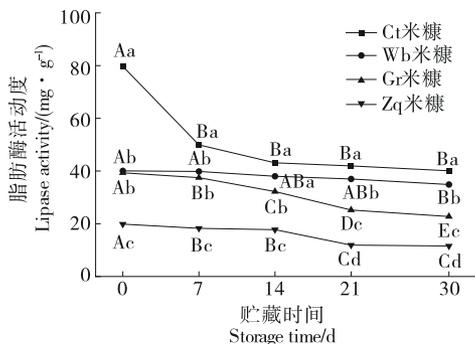
2.2.1 超临界CO₂萃取工艺对高温高压蒸汽处理米糠出油效率的影响 图3展示了超临界CO₂萃取工艺对米糠

表1 不同热处理米糠的基本成分[†]

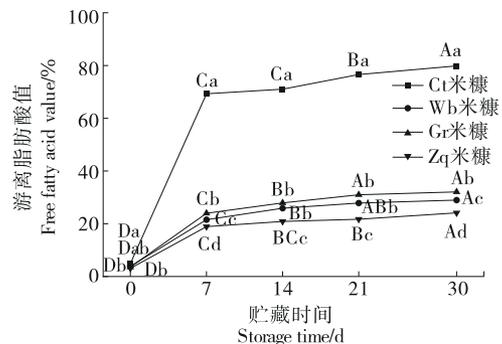
Table 1 Basic composition of rice bran under different heat treatments g/100 g

样品	水分	脂肪	灰分	淀粉	蛋白质	膳食纤维
Ct米糠	9.91±0.14 ^a	19.15±0.09 ^a	9.97±0.03 ^a	9.98±0.01 ^a	14.20±0.52 ^a	48.44±0.16 ^a
Zq米糠	9.62±0.29 ^a	19.00±0.11 ^b	8.53±0.01 ^b	9.14±0.00 ^c	13.91±0.11 ^c	41.45±0.15 ^b
Gr米糠	4.65±0.17 ^b	18.79±0.07 ^c	8.79±0.07 ^b	9.11±0.01 ^c	14.03±0.29 ^b	47.37±0.09 ^a
Wb米糠	9.43±0.22 ^a	19.20±0.14 ^a	8.82±0.02 ^b	9.51±0.01 ^b	13.73±0.43 ^c	41.06±0.27 ^b

† 同列小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。



(a) 脂肪酶活性



(b) 游离脂肪酸值

大写字母不同表示贮藏时间之间差异显著($P < 0.05$);小写字母不同表示处理方法之间差异显著($P < 0.05$)

图1 热处理对米糠贮藏期间脂肪酶活性、游离脂肪酸值的影响

Figure 1 Effect of thermal treatment on lipase activity and free fatty acid value in rice bran during storage

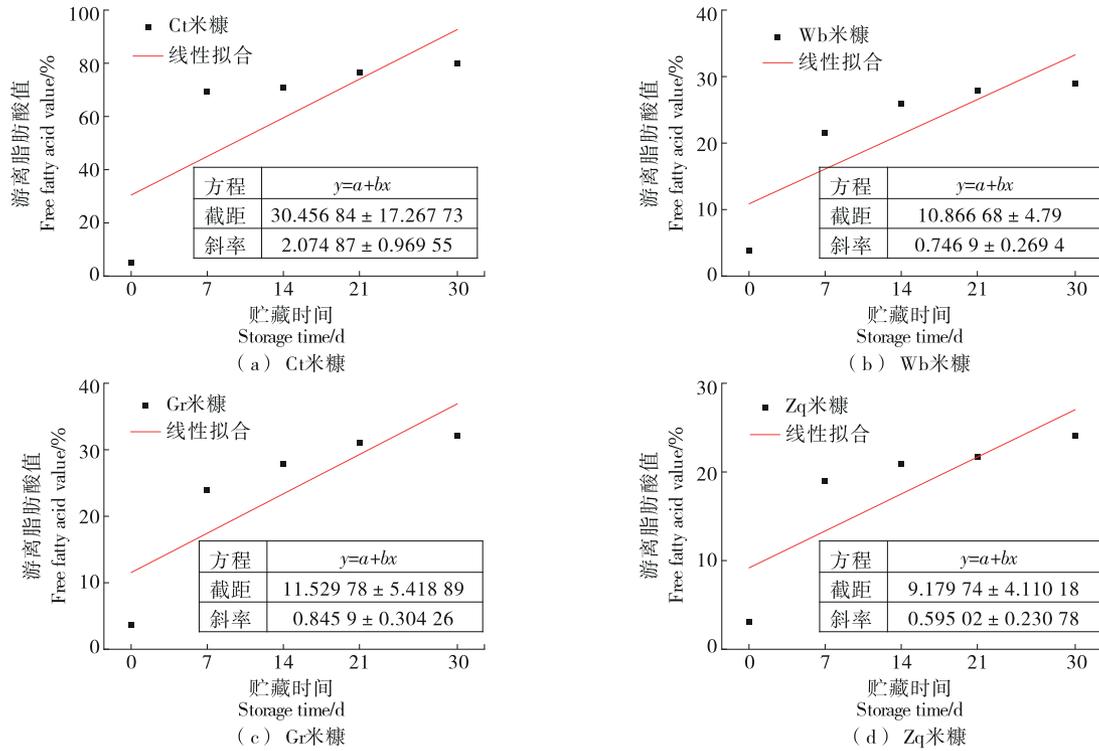


图2 不同样品贮藏期间游离脂肪酸值线性拟合分析

Figure 2 Linear fitting analysis of free fatty acid values in different samples during storage

表2 不同样品保质期的预测结果

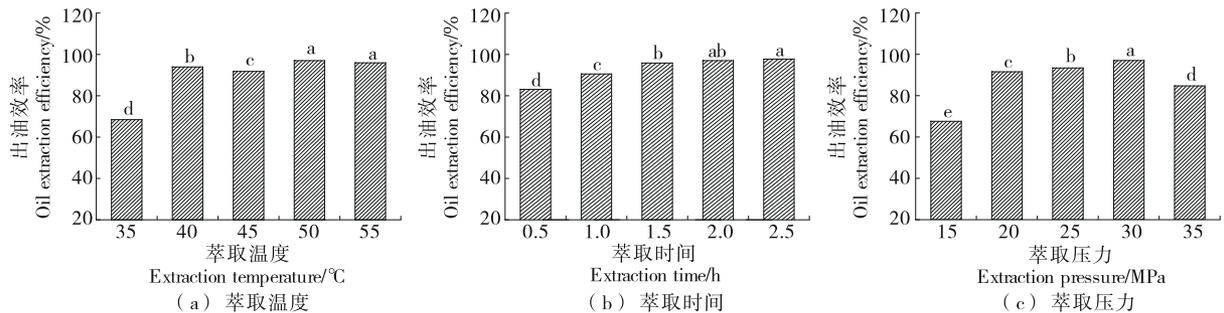
Table 2 Prediction results of shelf life for different samples

样品	线性公式	相关系数	保质期/d
Ct米糠	$y=2.07x+30.46$	0.60	19
Wb米糠	$y=0.76x+10.87$	0.72	80
Gr米糠	$y=0.85x+11.53$	0.72	69
Zq米糠	$y=0.60x+9.18$	0.69	102

出油效率的影响。图3(a)显示,出油效率在萃取温度为50℃时达到最高,表明此温度下CO₂的密度与扩散性达到较佳平衡,促进油脂释放。萃取温度继续升高至55℃后出油效率略降,可能是因为CO₂密度降低抑制萃取效果。

图3(b)显示,萃取时间延长至2 h后出油效率升高不显著,说明体系已基本达到萃取平衡。图3(c)中,随着萃取压力上升出油效率显著提高,当萃取压力达到35 MPa后下降,可能与CO₂黏度增加、传质受限有关。综上,萃取温度、萃取时间与萃取压力在适当范围内对SFE出油效率均有正向作用,过高则反而抑制效率。最优的超临界CO₂萃取条件为萃取温度50℃、萃取时间2 h、萃取压力30 MPa。

2.2.2 超声波辅助亚临界正丁烷萃取工艺对米糠出油效率的影响 图4展示了超声辅助亚临界正丁烷萃取工艺对米糠出油效率的影响。图4(a)显示,出油效率随超声时间增加略有提升,在超声时间为3 min时达到峰值,之后趋于平稳,说明短时超声已足以增强油脂释放,过长可



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

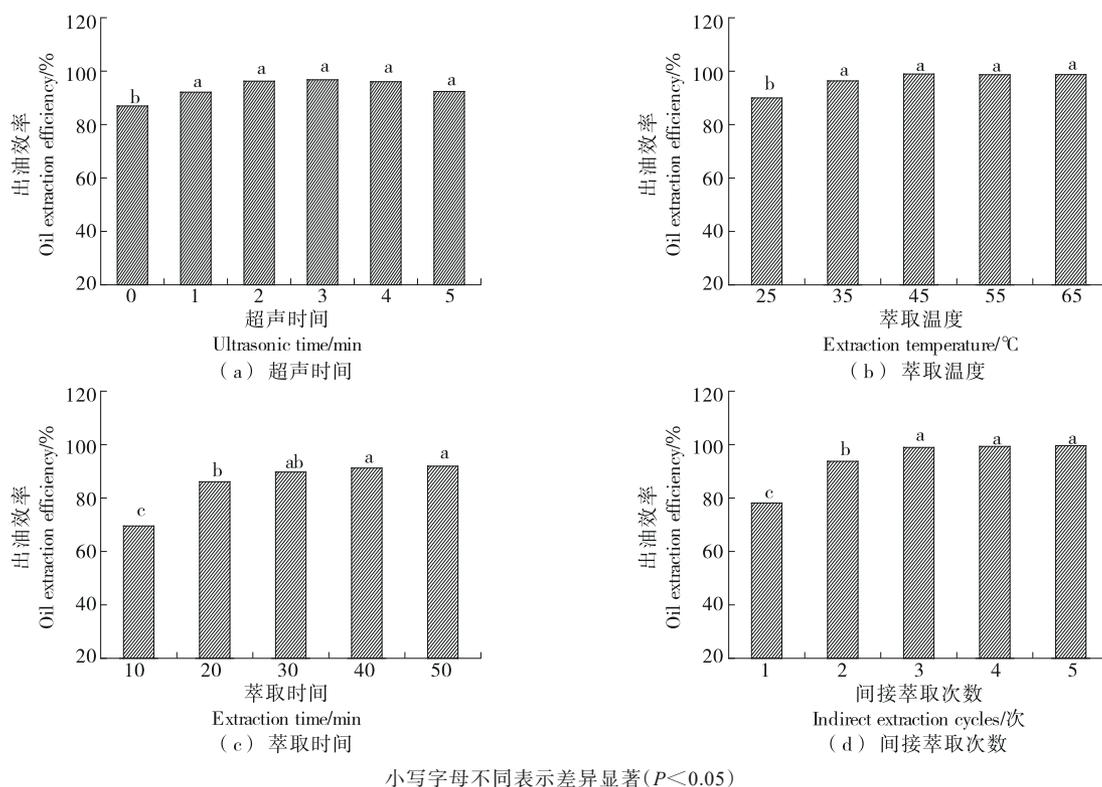
图3 超临界CO₂萃取工艺对米糠出油效率的影响

Figure 3 Effect of supercritical CO₂ extraction technology on rice bran oil yield

能引起空化效应衰减或脂质氧化。图 4(b)中,萃取温度升高至 45 °C 时出油效率显著提高,随后变化不大,表明适度升温可促进传质,但高温对出油效率增益有限。图 4(c)显示,出油效率随萃取时间延长显著上升,30 min 后增长趋缓,表明此时萃取接近平衡。图 4(d)中,3 次萃取后效果趋于稳定,说明合理重复萃取有助于提高效率,但次数过多无明显提升。综上,超声辅助亚临界正丁烷萃取的最优工艺参数为:超声时间 3 min、萃取温度 45 °C、萃取时间 30 min、间歇萃取 3 次。

2.2.3 基本成分 表 3 显示了不同米糠种类及其经过不同处理方式后主要成分的变化。水分含量方面,Zq 米糠经 UA-SBE 处理后的水分含量最高,为(12.98±0.43) g/100 g,可能是因为正丁烷的极性较低,萃取过程中难以完全脱离结合水,且超声空化可能破坏细胞壁,释放更多的亲水

基团。米糠经过 SFE 和 UA-SBE 萃取后,脂肪含量显著下降,其中 SFE 对脂肪去除效果最佳。灰分和淀粉含量随处理方式的改变呈下降趋势,尤其以 Zq-UA-SBE 后的灰分和淀粉最低。蛋白质含量方面,Ct 米糠的蛋白质含量在经 SFE 和 UA-SBE 处理后略有下降,而 Zq 米糠经 UA-SBE 处理后略有上升,表明不同米糠种类对处理方式的影响存在差异。膳食纤维含量则表现出不同趋势,Zq 米糠经 SFE 处理后增加膳食纤维含量,表明 SFE 可有效保留膳食纤维成分。结果表明,SFE 和 UA-SBE 处理显著影响了米糠的水分、脂肪、灰分、淀粉、蛋白质及膳食纤维含量。从应用角度看,SFE 作为绿色、安全的技术,出油效率高、对热敏成分保护好。UA-SBE 在较低温度下高效萃取,能耗低、工艺简单,适合工业化生产。但因正丁烷易燃且有毒害,需严格安全控制。



小写字母不同表示差异显著(P<0.05)
图 4 超声波辅助亚临界正丁烷萃取对米糠出油效率的影响
Figure 4 Effect of ultrasound-assisted subcritical n-butane extraction on rice bran oil yield

表 3 不同高压脱脂处理米糠的基本成分†
Table 3 Basic composition of rice bran under different treatments

处理	水分	脂肪	灰分	淀粉	蛋白质	膳食纤维
Ct-SFE	8.87±0.34 ^b	1.12±0.12	8.45±0.06	9.34±0.01 ^a	14.97±0.64 ^a	48.80±0.21 ^a
Ct-UA-SBE	12.37±0.73 ^a	1.15±0.03	8.49±0.03	9.01±0.00 ^b	14.43±0.22 ^a	49.68±0.17 ^a
Zq-SFE	11.21±0.48 ^a	1.14±0.13	8.77±0.03	8.43±0.00 ^c	11.08±0.42 ^b	45.98±0.09 ^b
Zq-UA-SBE	12.98±0.43 ^a	1.20±0.07	8.03±0.02	8.19±0.01 ^c	11.19±0.34 ^b	48.21±0.21 ^a

† 同列小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

2.2.4 米糠微观结构表征 图5展示了不同热处理(Ct、Zq)及其经SFE与UA-SBE处理后的米糠表面微观结构。未经脱脂的Ct和Zq样品结构完整,表面致密,具有典型蜡质层覆盖^[31],脂质未显著迁移,内部结构未明显暴露。经SFE处理后,米糠表面出现明显裂纹与孔隙,颗粒状结构破碎,表明脂质及蜡质成分被有效去除,暴露出更多纤维结构,为后续物质迁移提供了通道^[32]。这一结构破坏与SFE脱脂率高的结果相吻合。进一步的UA-SBE处理使米糠结构更为疏松,纤维网络显著松解,孔隙数量和深度增加,说明亚临界正丁烷和超声作用共同促进了非纤维成分(如淀粉、蛋白质)溶解与迁移,增强了基质解构效果^[33]。综上,SFE和UA-SBE均对米糠微观结构产生显著影响。

2.2.5 米糠水合性质 由图6可知,SFE处理组(特别是Zq-SFE)在持水性、膨胀势和水溶性指数方面表现最优,说明超临界萃取不仅脱脂彻底,还改善了米糠的结构孔隙性,增强其吸水、膨胀与溶解能力^[34]。持油性方面,Zq-UA-SBE组表现最佳,可能与亚临界正丁烷处理形成的多孔结构及非极性成分残留有关,有利于油脂吸附。但是,持油性过低可能会限制样品在吸附脂溶性物质中的应

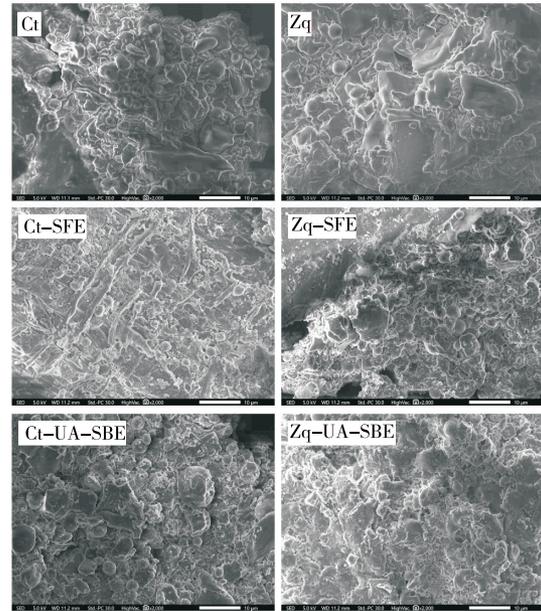
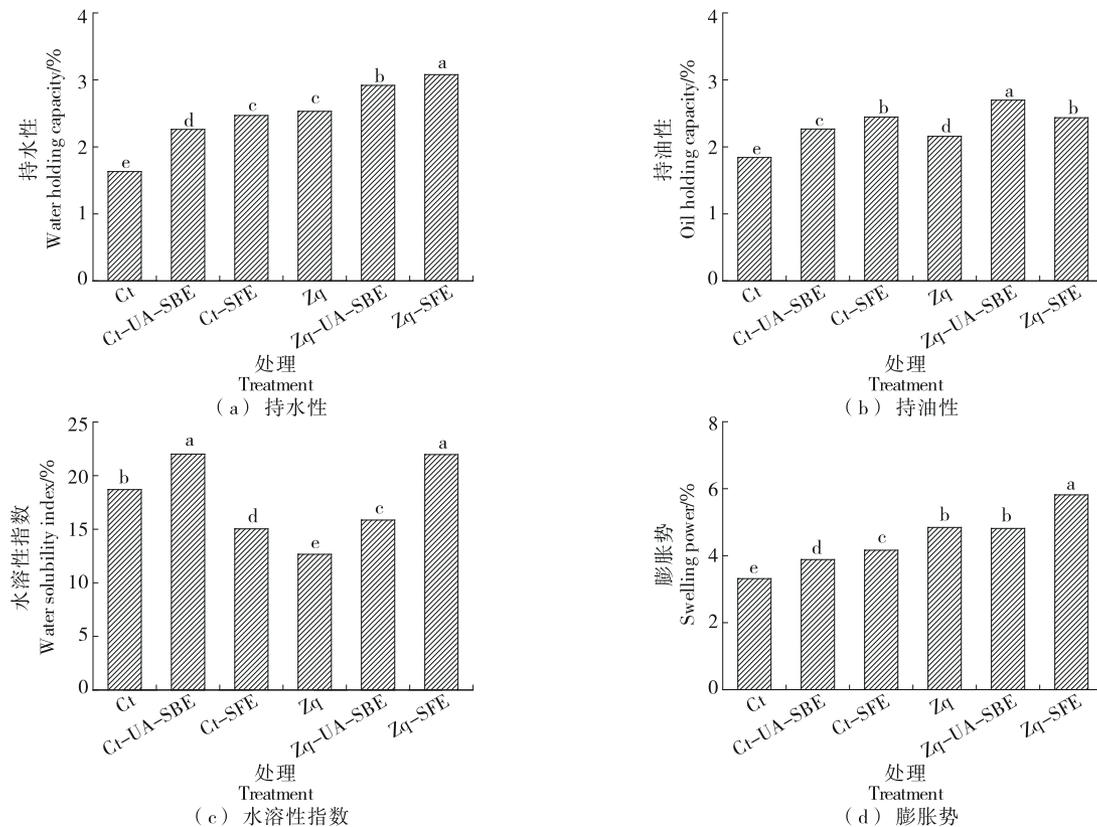


图5 不同处理米糠的扫描电子显微镜(SEM)图
Figure 5 Scanning electron microscopy (SEM) images of rice bran under different treatments



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)
图6 热处理对米糠持水性、持油性、水溶性指数、膨胀势的影响

Figure 6 Effect of heat treatments on the water-holding capacity, oil-holding capacity, water solubility index, and swelling power of rice bran

用,而过高则可能导致质地油腻或应用局限性。整体来看,Zq-SFE处理在提升米糠功能特性方面更具优势,其处理后的米糠表现出更强的吸湿性与可膨胀性,适合应用于高纤维、保水型食品配方中。这些变化与前述SEM结构分析结果相吻合,进一步说明微观结构改性是功能改善的关键机制。

3 结论

该研究系统探讨了热处理及高压脱脂工艺对米糠贮藏稳定性及功能特性的影响。结果表明,高温高压蒸汽处理(121 °C, 20 min)显著降低了米糠的脂肪酶活性(19.87 mg/g),并有效抑制了贮藏期间游离脂肪酸的积累,稳定化效果明显优于干热和微波处理。此外,超临界CO₂萃取工艺在最佳提取条件下(50 °C, 30 MPa, 2 h),米糠的出油效率达到97.73%,并显著提高了米糠的持水性(3.08 g/g)、膨胀势(5.82 g/g)和水溶性指数,表明该工艺对米糠的功能性提升具有显著效果。综合分析,高温高压蒸汽与超临界CO₂萃取工艺的协同应用不仅有效抑制了脂肪酶活性,延缓了米糠酸败,还显著提升了米糠的水合特性和油脂结合能力。未来的研究可进一步优化这些工艺条件,以实现其在工业化生产中的广泛应用,并探索米糠在健康食品和生物材料领域的潜力。

参考文献

- [1] 欧文华, 曹天翔, 张冬梅, 等. 米糠蛋白乳化性能及其改性方法研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 204-211, 240.
OU W H, CAO T X, ZHANG D M, et al. Research progress on emulsifying properties and modification methods of rice bran protein[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 204-211, 240.
- [2] 董丽红, 陈甜妹, 曾荣, 等. 米糠固态发酵工艺优化及其对酚类物质和抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 333-343.
DONG L H, CHEN T M, ZENG R, et al. Optimization of solid-state fermentation technology and effect on phenolic profiles and antioxidant activities of rice bran[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(9): 333-343.
- [3] 郭道, 罗诗焯, 林炎鑫, 等. 提取方法对米糠纤维素理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(7): 43-51.
GUO X, LUO S Y, LIN Y X, et al. Effects of extraction methods on physicochemical properties of rice bran cellulose[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(7): 43-51.
- [4] HUANG S Y, HUANG G L. Extraction, structural analysis, and activities of rice bran polysaccharide[J]. Chemical Biology & Drug Design, 2021, 98(4): 631-638.
- [5] 龙肇, 薛婧, 王芝晓, 等. NaCl浓度对米糠不溶性纤维/大豆分离蛋白高内相乳液稳定性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(12): 9-15.
LONG Z, XUE J, WANG Z X, et al. Effect of NaCl concentration on stability of high internal phase emulsions of insoluble fiber from rice bran/soybean protein isolate[J]. Food & Machinery, 2024, 40(12): 9-15.
- [6] DAS P P, GUL M Z, WEBER A M, et al. Rice bran extraction and stabilization methods for nutrient and phytochemical biofortification, nutraceutical development, and dietary supplementation[J]. Nutrition Reviews, 2025, 83(4): 692-712.
- [7] HUANG W G, LIU B H, SHI D M, et al. Research progress on the quality, extraction technology, food application, and physiological function of rice bran oil[J]. Foods, 2024, 13(20): 3 262.
- [8] CAO X H, ISLAM M N, NING X, et al. Effects of superheated steam processing on the physicochemical properties of sea rice bran[J]. Food Science and Technology International, 2023, 29(2): 115-125.
- [9] 韩露, 项丹丹, 谢丹, 等. 甲壳类水产及其加工副产物中虾青素提取方法研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 197-204.
HAN L, XIANG D D, XIE D, et al. Advances in extraction methods of astaxanthin from crustacean aquatic products and their processing by-products[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 197-204.
- [10] TUFAIL T, AIN H B U, CHEN J, et al. Contemporary views of the extraction, health benefits, and industrial integration of rice bran oil: a prominent ingredient for holistic human health[J]. Foods, 2024, 13(9): 1 305.
- [11] 钟秋, 孔凡, 周力, 等. 不同加工方式的南瓜籽油的储藏稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(11): 89-97.
ZHONG Q, KONG F, ZHOU L, et al. Storage stability of pumpkin seed oil processed with different methods[J]. Food Research and Development, 2024, 45(11): 89-97.
- [12] 华金丹. 牡丹籽油微波预处理—压榨法制备工艺优化及品质分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 181-188.
HUA J D. Optimization of microwave pretreatment-pressing methods for preparing peony seed oil and its quality analysis [J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 181-188.
- [13] 吴坤龙, 李彦坡, 刘标, 等. 干燥方式对大球盖菇品质及挥发性风味成分的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 168-176.
WU K L, LI Y P, LIU B, et al. Effects of different drying methods on the quality and volatile flavor components of *Stropharia rugosoannulata*[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 168-176.
- [14] 崔国庭, 王缙, 郭金英, 等. 加工方式对面筋蛋白结构及性质影响的研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 225-232.
CUI G T, WANG D, GUO J Y, et al. Research progress on the effects of processing methods on gluten protein structure and properties[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 225-232.
- [15] 景孝男, 党斌, 杨希娟, 等. 热处理对不同品种青稞全粉结构及理化特性的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 44-52.
JING X N, DANG B, YANG X J, et al. Effect of heat treatment on the structure and physicochemical properties of the whole barley powder of different varieties[J]. Food & Machinery, 2021, 37(9): 44-52.

- [16] LI Y, GAO C, WANG Y, et al. Analysis of the aroma volatile compounds in different stabilized rice bran during storage[J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134753.
- [17] 李悦, 薛敬林, 张健, 等. 超临界 CO₂ 萃取对海带粉脂质、岩藻黄素及挥发性风味物质的影响[J]. *食品与机械*, 2025, 41(2): 166-172.
- LI Y, XUE J L, ZHANG J, et al. Effect of supercritical CO₂ extraction on lipids, fucoxanthin, and volatile flavor compounds in *Saccharina japonica* powder[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(2): 166-172.
- [18] 薛晴, 赵红金, 代龙, 等. 提取方式对接骨木籽油品质的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(4): 189-194.
- XUE Q, ZHAO H J, DAI L, et al. Effects of extraction methods on the quality of elderberry seed oil[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(4): 189-194.
- [19] 梁兰兰, 卓训文. 米糠游离脂肪酸值快速测定方法[J]. *粮食与油脂*, 2001(12): 44.
- LIANG L L, ZHUO X W. Rapid determination method for free fatty acid value in rice bran[J]. *Cereals & Oils*, 2001(12): 44.
- [20] ZHAO G H, HU M Q, LU X W, et al. Soaking, heating and high hydrostatic pressure treatment degrade the flavonoids in rice bran[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112732.
- [21] QIAO C C, ZENG F K, WU N N, et al. Functional, physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking treatment[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 121: 107057.
- [22] 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.
- [23] WU S H, ZHANG Y, CHEN B J, et al. Combined treatment of rice bran by solid-state fermentation and extrusion: effect of processing sequence and microbial strains[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 23: 101549.
- [24] CHI C D, XU K, WANG H W, et al. Deciphering multi-scale structures and pasting properties of wheat starch in frozen dough following different freezing rates[J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134836.
- [25] PARK J, OH S K, CHUNG H J, et al. Effect of steaming and roasting on the quality and resistant starch of brown rice flour with high amylose content[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 167: 113801.
- [26] 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): 2 458-2 466.
- [27] LAVANYA M N, SAIKIRAN K C S, VENKATACHALAPATHY N. Stabilization of rice bran milling fractions using microwave heating and its effect on storage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(2): 889-895.
- [28] IRAKLI M, KLEISIARIS F, MYGDALIA A, et al. Stabilization of rice bran and its effect on bioactive compounds content, antioxidant activity and storage stability during infrared radiation heating[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 80: 135-142.
- [29] RASHID M T, LIU K L, HAN S M, et al. The effects of thermal treatment on lipid oxidation, protein changes, and storage stabilization of rice bran[J]. *Foods*, 2022, 11(24): 4 001.
- [30] RASHID M T, LIU K L, HAN S M, et al. Optimization of extrusion treatments, quality assessments, and kinetics degradation of enzyme activities during storage of rice bran[J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1 236.
- [31] MODUPALLI N, THANGARAJU S, NAIK G M, et al. Assessment of physicochemical, functional, thermal, and phytochemical characteristics of refined rice bran wax[J]. *Food Chemistry*, 2022, 396: 133737.
- [32] XU D X, GAO Q R, MA N N, et al. Structures and physicochemical characterization of enzyme extracted oil bodies from rice bran[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 135: 109982.
- [33] 宋丽丽, 霍姗浩, 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.
- [34] 胡中原, 曹杨, 王月慧. 酵母菌发酵对脱脂米糠理化特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(12): 49-55.
- HU Z Y, CAO Y, WANG Y J. Effect of yeast fermentation on physicochemical properties of defatted rice bran[J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(12): 49-55.