

超声 - 酶耦合体系提取米糠油工艺优化的研究

刘 隽, 魏毅铤, 杨 静, 张 震, 蔡施涵, 张维林, 饶玉春
(浙江师范大学生命科学学院, 金华 321004)

摘要:超声耦合酶法不仅可以通过酶水解细胞壁促进细胞的内容物释放,且超声产生的空化气泡破裂具有剪切力,可破坏细胞壁结构,增强传质效果,二者结合能显著提高米糠的出油率。本研究采用超声波耦合酶法提取米糠油,通过单因素、响应面分析优化关键工艺参数,通过扫描电子显微镜(SEM)探究反应机制,并对产物进行脂肪酸组成分析。结果表明: $m(\text{料}):V(\text{液})$ 为1:6(g/mL)、酶质量分数2%、超声功率175 W、温度45 °C条件下反应4 h,超声耦合酶提取米糠油的出油率达10.21%,优于常规最佳条件下酶解5 h的9.70%。SEM结果显示超声耦合酶解技术不仅增加米糠物料表面空洞结构,且裂纹明显。气相色谱分析显示,超声耦合酶提取法所得米糠油中不饱和脂肪酸占比65.84%,与常规酶解提取的米糠油脂肪酸组成及含量无显著差异。因此,超声波耦合酶法可显著提高了米糠油的提取效率。

关键词:米糠油;超声耦合酶法;提取工艺;提取率

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001277

中图分类号:TS224.6 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0109-06

网络首发时间:2025-11-26 14:13:13

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251126.1244.002>

Optimization of ultrasonic - enzyme coupling system for rice bran oil extraction

Liu Jun, Wei Yiting, Yang Jing, Zhang Zhen, Cai Shihan, Zhang Weilin, Rao Yuchun
(College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004)

Abstract:The ultrasonic - enzyme coupling system not only promotes the release of cell contents by enzymatic hydrolysis of cell walls, but also utilizes the shear force generated by cavitation bubbles from ultrasound to disrupt the cell wall structure and enhance mass transfer. The combination of these two factors can significantly improve the oil yield from rice bran. In this study, the ultrasonic - enzyme coupling system was employed to extract rice bran oil. Key process parameters were optimized through single - factor experiments and response surface methodology, the reaction mechanism was investigated via scanning electron microscopy (SEM), and the fatty acid composition of the product was analyzed. The results showed that under the conditions of a solid - liquid ratio of 1:6 (g/mL), enzyme dosage of 2%, ultrasonic power of 175 W, temperature of 45 °C, and reaction time of 4 h, the oil yield of rice bran extracted by the ultrasonic - enzyme coupling system reached 10.21%, which was superior to the 9.70% yield obtained by enzymatic hydrolysis for 5 h under optimal conventional conditions. The SEM results revealed that the ultrasonic - enzyme coupling system not only increased the cavity structure on the surface of rice bran materials but also induced obvious cracks. Gas chromatography analysis indicated that the proportion of unsaturated fatty acids in rice bran oil extracted by the ultrasonic - enzyme coupling method was 65.84%, which

基金项目:浙江省自然科学基金重点项目(LZ23C130003)

收稿日期:2025-07-17

第一作者:刘隽,男,2002年出生,硕士,水稻功能基因挖掘,945638687@qq.com

通信作者:饶玉春,男,1984年出生,教授,水稻功能基因挖掘,ryc@zjnu.cn

张维林,男,1980年出生,副教授,种质资源综合利用,wlzhangwhu@163.com

was not markedly different from the fatty acid composition and content of rice bran oil extracted by conventional enzymatic hydrolysis. Therefore, the ultrasonic - enzyme coupling method significantly improved the extraction efficiency of rice bran oil.

Key words: rice bran oil; ultrasonic - enzyme coupling method; extraction process; extraction yield

2024 年我国稻谷年产量 20 753.5 万 t, 同比增长 0.5%, 占全国粮食总量的 29.4%^[1]。随着稻米产业的规模化发展, 大量副产物随之产生, 其中米糠作为精米生产过程的主要副产物, 占稻米质量的 5% ~ 8%, 其来源广泛、生产成本低廉。米糠富含多种营养物质, 蛋白质质量分数 14% ~ 16%、脂肪质量分数 12% ~ 23%、粗纤维质量分数 8% ~ 10%, 还含有类黄酮、生育酚、谷维素等功能性成分^[2]。通过对米糠中的脂质进行提取, 可获得米糠油 (RBO)。RBO 既可以作为食用油, 也能作为生产生物柴油的原料。因其不饱和脂肪酸含量高, 且富含 γ -谷维素、植物甾醇、角鲨烯、维生素等成分, 被认为是具有营养保健功能的食用油, 因丰富的营养成分和优良的抗氧化性能, 米糠油日益受到研究人员和产业界的关注^[3,4]。

RBO 的提取工艺主要包括传统的压榨法、浸出法、超临界流体萃取法、亚临界水提取法等^[5]。压榨法是一种常规的提取技术, 其设备简单、操作方便, 但出油率相对较低, 且易产生较多的残油; 浸出法虽然出油率较高, 却存在使用大量有机溶剂、反应条件苛刻、能耗大、会产生有毒有害物质、环境污染严重等问题^[6]。随着绿色环保生产理念的普及, 超临界流体萃取法作为绿色提取技术应用于油脂提取, 其低温提取能较好保留活性成分, 但设备投资大, 需耐高温高压装置, 运行消耗大量超临界流体, 成本高, 操作条件苛刻, 难以大规模工业化生产^[7]; 亚临界水提法存在选择性差的问题, 易溶出非目标成分, 增加分离纯化难度与成本, 且高温高压环境可能导致热敏性成分降解, 影响产品品质^[8]。相较之下, 超声提取作为绿色提取方法优势显著, 其无需耐高温高压设备, 设备成本与能耗低, 且操作简便, 对操作人员技术要求不高^[9]。在 RBO 提取中, 超声波可有效破坏米糠细胞壁结构, 增强溶剂渗透与传质效率, 显著缩短提取时间并降低溶剂用量。肖信锦等^[10]以异丙醇为溶剂, 通过单因素实验与响应面法优化超声辅助提取 RBO 工艺, 确定最佳参数为 $m(\text{料}):V(\text{液}) = 1:25$ (g/mL)、超声功率 150 W、超声时间 14 min, 此条件下提取率达 87.33%。而超声协同复合酶 (纤维素酶、蛋白酶、淀粉酶) 的水酶法, 通过酶解细胞壁多

糖与脂蛋白复合体, 结合超声空化强化酶解效率, 有助于提高 RBO 的提取效率。仇梓冰等^[11]使用先酶解后超声方法提取 RBO, 通过单因素实验与响应面法优化确定最佳参数为酶质量分数 1.38% [$m(\text{碱性蛋白酶}):m(\text{纤维素酶}):m(\text{果胶酶}) = 1:2:1$], $m(\text{米糠粉}):V(\text{无菌水}) = 1:6$, 酶解温度 51 °C, 酶解时间 5 h, 再 230 W 超声 20 min, 米糠的出油率达 90.53%。因此, 超声提取及其耦合技术凭借高效、绿色、经济的特性, 有望在 RBO 工业化生产中发挥更大作用。

本研究采用单因素实验和响应面法分析提取米糠油的最佳工艺, 借助扫描电子显微镜对超声与酶协同作用下的米糠细胞结构变化进行微观层面的可视化分析, 揭示其作用机制; 利用气相色谱分析最佳工艺条件下米糠油的脂肪酸成分, 以期构建一种绿色高效的米糠油制备工艺, 为米糠油提取工艺的创新提供发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

水稻品种为武运梗 21 号、香溢久、钰石、钰林, 植物提取用酶, 正己烷、乙酸钠、乙酸溶液、氢氧化钾、异辛烷、硫酸氢钠等试剂均为分析纯。

1.2 仪器与软件

KQ - 250DB 型数控超声波清洗器、扫描电子显微镜、6890A 气相色谱仪; Design Expert 13、IBM SPSS Statistics 27、Origin 2021。

1.3 实验方法

1.3.1 米糠油提取

将新鲜稻谷进行脱粒, 去除米粒, 收集谷皮。将谷皮粉碎后过 40 目筛, 随后 95 °C 水浴 10 min, 待冷却后于 -20 °C 低温保存备用。准确称取 5 g 预处理后的米糠粉末, 置于 50 mL 离心管中, 按 $m(\text{米糠粉}):m(\text{无菌水})1:6$ 的比例加入无菌水, 利用乙酸 - 乙酸钠缓冲溶液调节体系 pH 至 5.0。按照实验设计, 加入定量的植物提取酶, 将离心管置于超声仪器中, 设定特定的温度、超声功率和反应时间进行酶解提取。反应结束后, 迅速置于 95 °C 水浴中加热 10

min 以终止反应。向反应体系中加入 5 mL 正己烷,充分振荡混匀后,6 000 r/min 离心 10 min,重复 2 次,合并上清液。氮吹脱除溶剂,准确称量油脂质量,按式(1)计算出油率(X)。

$$X = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%$$

式中: X 为米糠油出油率/%; m_1 为米糠油体质量/g; m_2 为米糠质量/g。

1.3.2 单因素实验

按照 1.3.1 方法制备米糠油,通过稻米品种、酶质量分数、温度、超声功率、反应时间的单因素实验对超声耦合酶法工艺进行优化。设定单因素条件为:稻米品种(钰林、钰石、香溢久、武运梗 21 号)、酶质量分数(0%、1%、2%、3%、4%、5%)、温度(40、45、50、55、60 °C)、超声功率(125、150、175、200、225、250 W)和反应时间(1、2、3、4、5、6、7、8 h),分别考察各因素对米糠油出油率的影响,重复 3 次实验。

1.3.3 响应面设计

在单因素实验的基础上,挑选酶质量分数、温度、超声功率、反应时间 4 个单因素,取 3 个水平,运用 Box - Behnken 模型设计实验,对制备工艺进行了优化。

1.4 扫描电镜分析

将米糠粉末均匀地覆盖在导电胶布上,然后施加金-钼的溅射涂层以增强导电性,使用扫描电镜观察其表面结构,设定加速电压 5 kV,放大倍数为 250 倍。

1.5 脂肪酸组成分析

称取 60.0 mg 最佳工艺条件下制备得到的米糠油样品,溶于 4.0 mL 异辛烷,加入 200 μ L 2 mol/L 氢氧化钾-甲醇溶液,反应 10 min,继续加入 1.0 g 硫酸氢钠,振荡混匀,静置分层后,取上层溶剂层,过膜后待测。样品经甲酯化后采用气相色谱分析脂肪酸组成,气相色谱条件为,毛细管色谱柱 HP - 5 (30.00 m \times 0.32 mm, 0.25 μ m),载气 N_2 (纯度 > 99.99%),流速 1 mL/min。样品进样量为 1 μ L,分流比 1:100,进样口和检测器温度分别设定为 270 °C 和 280 °C。升温程序:初始柱温为 100 °C,保持 10 min;以 10 °C/min 升温至 180 °C,保持 6 min;继续以 1 °C/min 升温至 200 °C,保持 20 min;再以 4 °C/min 升温至 230 °C,保持 10.5 min。将样品的色谱图与脂肪酸甲酯混标的色谱图对比进行定性,并通过峰面积归一法计算米糠中各脂肪酸的相对质量分数。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果与分析

通过单因素实验探究不同稻谷品种、酶质量分数、温度、超声功率、时间对超声耦合酶提取米糠油的影响。不同工艺参数对米糠油出油率的影响如图 1 所示,钰林品种的出油率高于其余 3 个品种,可达 8.37%,因此后续实验使用钰林开展。随着酶质量分数的增加,出油率先上升后下降,当酶质量分数为 2% 时,超声耦合酶提取米糠油的出油率为 8.37%,高于常规酶解所得 6.54%,这可能是因为过量的酶使得油脂表面吸附了较多的酶蛋白,影响了油脂分子的聚集和分离^[12]。温度为 45 °C 时,出油率达到最大,而 50 ~ 60 °C 时,出油率开始下降,且超声耦合酶提取在 60 °C 时出油率低于常规条件,这可能是因为高温使酶变性出油率降低,同时超声振动能量不断被反应体系吸收转化为热能,使得其温度上升,从而导致酶快速失活,出油率明显降低^[13]。出油率随超声功率升高而增加,但 175 W 后开始逐渐下降,这可能是因为高功率超声波产生的空化效应强烈,使得酶分子结构破坏,导致酶失活^[14]。同时,超声提取过程中通过添加植物提取酶使得出油率增加。常规酶解条件下,5 h 时出油率达到 9.70%;而超声耦合酶解条件下,出油率在 4 h 达到最大值 10.21%。因此,酶质量分数 2%、温度 45 °C、超声功率 175 W、反应时间 4 h 为超声耦合酶解提取米糠油的最佳条件。

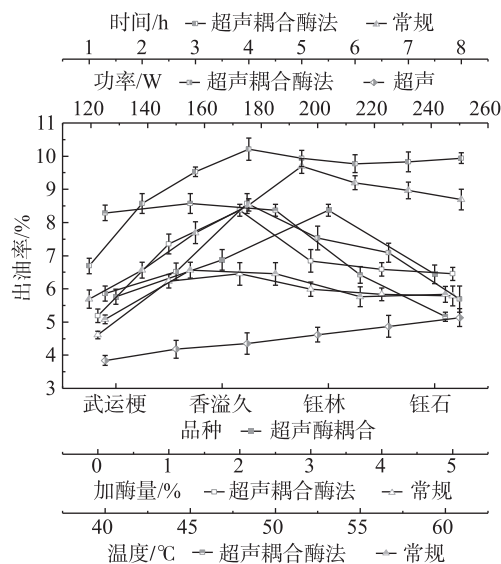


图1 不同工艺参数对米糠油出油率的影响

2.2 响应面优化制备工艺

在单因素实验结果的基础上,运用 Box - Behnken 模型,设计 4 个因素 3 水平的响应面优化工

艺,4个影响因素包括酶质量分数(A)、温度(B)、超声功率(C)和超声酶解时间(D),Behnken设计因素水平见表1。实验方差分析结果见表2。通过Design Expert 13软件进行Box-Behnken实验优化,响应面设计和实验结果见表3。模型回归方程为: $Y = -326.553 + 16.454 2A + 7.626 83B + 1.335 43C + 14.304 2D + 0.036 5AB + -0.053AC - 0.152 5AD - 0.003 86BC - 0.017BD + 0.001 3CD - 2.042 5A^2 - 0.075 8 B^2 - 0.002 98C^2 - 1.77D^2$ 。

表1 Behnken设计的因素水平

| 因素 | 水平 | | |
|------------|-----|-----|-----|
| | -1 | 0 | 1 |
| A 酶质量分数/% | 2 | 3 | 4 |
| B 温度/℃ | 40 | 45 | 50 |
| C 超声功率/W | 150 | 175 | 200 |
| D 超声酶解时间/h | 3 | 4 | 5 |

由表2可见,实验回归模型 $F = 44.81, P < 0.000 1$,失拟项 $P > 0.05$,说明该模型具有显著性特性,且差异不显著;决定系数 $R^2 = 0.981 2$,证明设计的响应曲面模型相关性较好,实验误差小。经拟合检验后校正系数 $R^2 = 0.959 3$,两者接近程度高,说明超声耦合酶解提取米糠油工艺响应面二次回归拟合程度较高,信噪比为 $24.729 0 > 4$,说明该实验模型的设计准确可靠。一次项 A^2, B^2, C^2, D^2 和二次项 AC 和 BC 对米糠油的出油率的影响极显著,由 F 值可知,各因素对米糠油出油率的影响高低依次是 $D > B > C > A$,即超声酶解时间 $>$ 温度 $>$ 超声功率 $>$ 酶质量分数。

通过Design Expert 13软件分析评价A、B、C、D这4个因素两两作用对米糠油出油率的影响,曲面越陡且等高线越密集表示因素对响应值的影响越显著^[15]。通过分析可知出油率对酶质量分数与功率的响应面最陡,等高线最密集,与温度和酶质量分数的响应面次之,其余实验差异较小。分析可知酶质量分数与功率两者交互作用对米糠油的出油率的影响最大,其次是温度与酶质量分数,其余实验指标影响较小。同时分析出米糠油出油率的最佳参数是酶质量分数为1.99%、温度为45.02℃、功率为177.47W、时间为3.80h,出油率可达10.35%。为方便实际实验操作,将最终理论值调整为酶质量分数为2%、温度为45℃、功率为175W、时间为4h,使用此条件实验米糠油出油率可达 $(10.21 \pm 0.34)\%$,说明实验响应面设计模型可信度高,能实现超声耦合植物提取酶提取米糠油。

表2 实验方差分析结果

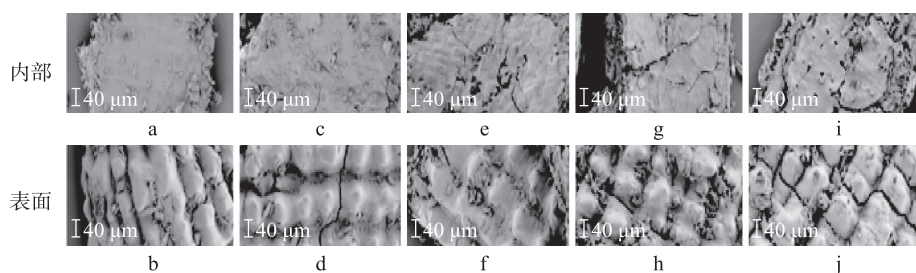
| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F值 | P值 | 显著性 |
|---------|---------|-----|---------|---------|----------|-----|
| 模型 | 60.42 | 14 | 4.32 | 44.81 | <0.000 1 | ** |
| A-酶质量分数 | 0.020 8 | 1 | 0.020 8 | 0.216 3 | 0.650 2 | |
| B-温度 | 5.41 | 1 | 5.41 | 56.21 | <0.000 1 | ** |
| C-功率 | 2.41 | 1 | 2.41 | 25.05 | 0.000 3 | ** |
| D-时间 | 5.85 | 1 | 5.85 | 60.77 | <0.000 1 | ** |
| AB | 0.133 2 | 1 | 0.133 2 | 1.38 | 0.262 3 | |
| AC | 7.02 | 1 | 7.02 | 72.92 | <0.000 1 | ** |
| AD | 0.093 0 | 1 | 0.093 0 | 0.965 9 | 0.345 1 | |
| BC | 0.931 2 | 1 | 0.931 2 | 9.67 | 0.009 0 | ** |
| BD | 0.028 9 | 1 | 0.028 9 | 0.300 1 | 0.593 9 | |
| CD | 0.004 2 | 1 | 0.004 2 | 0.043 9 | 0.837 6 | |
| A^2 | 22.25 | 1 | 22.25 | 231.03 | <0.000 1 | ** |
| B^2 | 19.15 | 1 | 19.15 | 198.87 | <0.000 1 | ** |
| C^2 | 18.50 | 1 | 18.50 | 192.11 | <0.000 1 | ** |
| D^2 | 16.71 | 1 | 16.71 | 173.50 | <0.000 1 | ** |
| 残差 | 1.16 | 12 | 0.096 3 | | | |
| 失拟 | 1.09 | 10 | 0.109 2 | 3.46 | 0.245 1 | ※ |
| 净误差 | 0.063 2 | 2 | 0.031 6 | | | |
| 总和 | 61.58 | 26 | | | | |

决定系数 $R^2 = 0.981 2$ 校正系数 $R^2 = 0.959 3$ 信噪比 $= 24.729 0$

注:*为影响显著($P < 0.05$);**为影响极显著($P < 0.01$);※为差异不显著($P > 0.05$)。

表3 响应面设计和实验结果

| 编号 | A 酶质量分数/% | B 温度/℃ | C 功率/W | D 时间/h | X/% |
|----|-----------|--------|--------|--------|-------|
| 1 | 2 | 45 | 150 | 3 | 7.26 |
| 2 | 3 | 45 | 200 | 4 | 5.26 |
| 3 | 3 | 45 | 150 | 4 | 6.90 |
| 4 | 2 | 50 | 200 | 4 | 7.06 |
| 5 | 2 | 45 | 150 | 5 | 5.23 |
| 6 | 1 | 40 | 175 | 4 | 5.64 |
| 7 | 2 | 40 | 200 | 4 | 6.99 |
| 8 | 2 | 45 | 175 | 4 | 10.40 |
| 9 | 2 | 40 | 175 | 3 | 6.11 |
| 10 | 3 | 40 | 175 | 4 | 5.39 |
| 11 | 2 | 40 | 150 | 4 | 5.09 |
| 12 | 3 | 50 | 175 | 4 | 7.35 |
| 13 | 1 | 45 | 150 | 4 | 4.35 |
| 14 | 1 | 45 | 175 | 3 | 6.82 |
| 15 | 2 | 45 | 175 | 4 | 10.14 |
| 16 | 1 | 50 | 175 | 4 | 6.87 |
| 17 | 2 | 50 | 175 | 3 | 7.68 |
| 18 | 2 | 45 | 175 | 4 | 10.06 |
| 19 | 2 | 40 | 175 | 5 | 5.23 |
| 20 | 1 | 45 | 175 | 5 | 5.95 |
| 21 | 2 | 50 | 175 | 5 | 6.46 |
| 22 | 1 | 45 | 200 | 4 | 8.01 |
| 23 | 3 | 45 | 175 | 3 | 7.36 |
| 24 | 2 | 50 | 150 | 4 | 7.09 |
| 25 | 2 | 45 | 200 | 3 | 7.94 |
| 26 | 3 | 45 | 175 | 5 | 5.88 |
| 27 | 2 | 45 | 200 | 5 | 6.04 |



注:a、b为未处理下米糠内部和表面表型(bar=40 μm);c、d为前处理后米糠内部和表面表型(bar=40 μm);e、f为最佳常规酶解下米糠内部和表面表型(bar=40 μm);g、h为最佳超声条件下米糠内部和表面表型(bar=40 μm);i、j为最佳超声耦合酶解条件下米糠内部和表面表型(bar=40 μm)。

图2 不同条件处理下米糠物料的SEM显影

2.3 扫描电子显微镜(SEM)显微结构分析

通过SEM对未处理、前处理后、常规酶解、超声处理、超声耦合酶处理的米糠的微观结构进行显影分析结果,不同条件处理下米糠物料的SEM显影见图2。酶解处理可以增加米糠物料表面的空洞结构,超声处理可以增加表面裂纹,而两者协同作用可进一步破坏物料结构,促使油脂释放。

2.4 脂肪酸组成分析

米糠油脂肪酸组成分析见表4,米糠油主要由棕榈酸(C16:0)、油酸(C18:1)、亚油酸(C18:2)组成,还含有肉豆蔻酸(C14:0)、硬脂酸(C18:0)、花生酸(C20:0)、 α -亚麻酸(C18:3n3)等脂肪酸。超声耦合酶提取得到的米糠油中不饱和脂肪酸占总脂肪酸质量分数的65.84%,其中油酸、亚油酸和 α -亚油酸相对质量分数分别为31.45%、28.99%和5.40%。对比常规酶解提取的米糠油脂肪酸组成可知,二者在各脂肪酸的构成及含量上未呈现显著差异。因此,超声耦合酶提取法不会对米糠油的脂肪酸组成与含量产生影响。

表4 米糠油脂肪酸相对质量分数/%

| 组别 | 肉豆蔻酸 C14:0 | 棕榈酸 C16:0 | 硬脂酸 C18:0 | 油酸 C18:1 | 亚油酸 C18:2 | 花生酸 C20:0 | α -亚麻酸 C18:3n3 |
|----------|---------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 常规条件 | 2.04 | 28.44 | 1.56 | 30.65 | 30.41 | 1.89 | 5.01 |
| 超声耦合酶提取法 | 2.06 | 29.08 | 1.22 | 31.45 | 28.99 | 1.79 | 5.40 |

3 结论

本研究采用超声耦合酶法提取米糠油,该方法通过酶解与超声空化协同作用破坏细胞壁、增强传质,显著提升出油率。在 $m(\text{料}):V(\text{液})$ 为1:6、酶质量分数2%、超声功率175 W、45℃条件下反应4 h,出油率达10.21%,优于常规酶解5 h的9.70%。SEM结果显示,经该方法处理的米糠表面空洞和裂纹增多,证明对细胞壁的破坏作用。同时,所得米糠

油中不饱和脂肪酸质量分数为65.84%,与常规酶解法产物的脂肪酸组成及含量无显著差异。

致谢:感谢中国水稻研究所公共实验室提供的技术支持。

参考文献

- [1]国家统计局. 国家统计局关于2024年粮食产量数据的公告[EB/OL]. (2024-12-13) [2025-07-16]. https://www.stats.gov.cn/zwfwck/sjfb/202412/t20241213_1957744.html
- [2]樊振江,孟楠,栗亚琼,等. 米糠油的提取工艺与营养价值研究进展[J]. 食品科技, 2023, 48(11):171-177
Fan Z, Meng N, Li Y, et al. Research progress on the extraction process and nutritional value of rice bran oil[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(11):171-177
- [3]Abbas H, Shahein N, Abd-Rabou N S, et al. Probiotic-fermented milk supplemented with rice bran oil[J]. International Journal of Dairy Science, 2017, 12(3):204-210
- [4]Capellini M C, Giacomini V, Cuevas M S, et al. Rice bran oil extraction using alcoholic solvents: physicochemical characterization of oil and protein fraction functionality[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 104:133-143
- [5]Ribas F B T, Gasparetto H, Salau N P G. Sustainable extraction of rice bran oil: assessing renewable solvents, kinetics, and thermodynamics[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2023, 197:342-354
- [6]Saini R K, Prasad P, Shang X M, et al. Advances in lipid extraction methods - a review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(24):13643
- [7]Uddin M S, Sarker M Z I, Ferdosh S, et al. Phytosterols and their extraction from various plant matrices using supercritical carbon dioxide: a review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(7):1385-1394
- [8]Moreira B P, Draszewski C P, Rosa N C, et al. Integrated rice bran processing by supercritical CO₂ extraction and sub-

- critical water hydrolysis to obtain oil, fermentable sugars, and platform chemicals[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2023, 192:105786
- [9] Khoei M, Chekin F. The ultrasound – assisted aqueous extraction of rice bran oil[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194:503 – 507
- [10] 肖信锦, 李阳洋, 钟盛华. 响应面法优化超声辅助提取米糠油的工艺研究[J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(7):26 – 29
Xiao X, Li Y, Zhong S. Optimization of ultrasound – assisted extraction of the bran oil from rice bran by response surface methodology[J]. *Cereals & Oils*, 2016, 29(7):26 – 29
- [11] 仇梓冰, 刘法显, 付磊, 等. 超声波辅助水酶法提取米糠油的工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(9):250 – 255
Qiu Z, Liu F, Fu L, et al. Research of technology of extraction oil from rice bran with ultrasonic assisted aqueous enzymatic[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(9):250 – 255
- [12] 张敏, 许朵霞, 王振华, 等. 水酶法提取米糠油的试验研究[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(5):1 – 10
Zhang M, Xu D X, Wang Z H, et al. Research on the enzyme assisted extraction of rice bran oil[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(5):1 – 10
- [13] 冯飞, 葛永杰, 代容, 等. 超声波辅助提取技术研究进展[J]. *食品工业*, 2022, 43(4):239 – 243
Feng F, Ge Y, Dai R, et al. Research progress of ultrasonic assisted extraction technology[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(4):239 – 243
- [14] 李冰, 王文宗, 林鸿佳, 等. 超声波对过氧化氢酶酶活影响的机理[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(12):129 – 134
Li B, Wang W, Lin H, et al. Mechanism of enzyme activity variation of catalase with ultrasonic treatment[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(12):129 – 134
- [15] 徐彩虹, 马丽鑫, 李桂杰, 等. 响应面法优化米糠多酚的醇提工艺[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(16):194 – 198
Xu C, Ma L, Li G, et al. Optimization of ethanol extraction technique of polyphenols from rice bran by response surface methodology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(16):194 – 198.