

油莎豆的制油工艺研究

刘佳杰^{1,2,3}, 万楚筠^{2,3}, 郑 畅^{2,3}, 沈汪洋^{1,4}, 杨国燕^{1,4}

(1. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 中国农业科学院油料作物研究所, 武汉 430062; 3. 油料油脂加工技术国家地方联合工程实验室, 武汉 430062; 4. 农产品加工与转化湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要:旨在为油莎豆油的高效提取及其粕深加工利用提供数据参考, 采用螺旋压榨-浸出工艺制备油莎豆油。首先, 考察脱皮和压榨温度对油莎豆螺旋压榨饼残油率和褐变度的影响, 对油莎豆预处理(微波、炒籽、真空烘箱)工艺条件进行优化, 然后通过超临界 CO₂ 萃取和溶剂浸提提取油莎豆压榨饼中的油脂, 并比较不同制油工艺油莎豆油和饼粕的品质。结果表明: 将未脱皮油莎豆在 85 °C 下真空烘箱处理 180 min 后在 80~90 °C 进行螺旋压榨, 所得压榨饼的残油率(11.17%)和褐变度(4.30)较低; 将此油莎豆压榨饼进一步采用超临界 CO₂ 萃取后所得油莎豆粕的粗脂肪含量为 1.05%, 比溶剂浸提法的低, 且其粗蛋白质含量(6.49%)和氮溶解指数(0.89%)较高, 所得油莎豆油的甾醇、生育酚和总酚含量分别为 436.31、26.55、15.13 mg/100 g。综上, 未脱皮油莎豆在 85 °C 真空烘箱处理 180 min 后在 80~90 °C 进行螺旋压榨, 再进行超临界 CO₂ 萃取是一种既能高效提取油莎豆油又能保证粕品质的方法。

关键词:油莎豆; 预处理; 螺旋压榨; 超临界 CO₂ 萃取

中图分类号: TS214.9; TS224 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2025)04-0015-08

Oil extraction process of tiger nut

LIU Jiajie^{1,2,3}, WAN Chuyun^{2,3}, ZHENG Chang^{2,3},
SHEN Wangyang^{1,4}, YANG Guoyan^{1,4}

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China; 3. Oil Crops and Lipids Process Technology National & Local Joint Engineering Laboratory, Wuhan 430062, China; 4. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to provide data reference for efficient extraction of tiger nut oil and deep processing and utilization of its meal, the tiger nut oil was extracted by screw pressing-leaching process. First, the effects of decortication and pressing temperature on the residual oil rate and browning degree of screw-pressed tiger nut cakes were investigated, and the process conditions of pretreatment methods (microwave, roasting, and vacuum oven) were optimized. Then, the tiger nut oil was extracted by supercritical CO₂ and solvent, respectively, and the quality of tiger nut oil and its meal was compared. The results showed that the residual oil rate (11.17%) and browning degree (4.30) of the pressed cake were low after

being screw pressing at 80-90 °C after unpeeled tiger nut being treated in a vacuum oven at 85 °C for 180 min. The crude fat content of tiger nut meal obtained by supercritical CO₂ extraction was 1.05%, which was lower than that of solvent extraction, and its crude protein content (6.49%) and nitrogen solubility index (0.89%) were higher;

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2025-01-11

基金项目: “十四五”国家重点研发计划重点专项(2021YFD2100301)

作者简介: 刘佳杰(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮油加工与利用(E-mail) liujiajie1221@163.com。

通信作者: 杨国燕, 高级实验师(E-mail) yang-guo-yan@163.com。

the sterol, tocopherol and total phenol contents in the obtained tiger nut oil were 436.31, 26.55 mg/100 g and 15.13 mg/100 g, respectively. In conclusion, after 180 min of vacuum oven treatment of unpeeled tiger nut at 85 °C, screw pressing at 80 – 90 °C, and then supercritical CO₂ extraction is a method that can not only efficiently extract tiger nut oil, but also ensure the quality of meal.

Key words: tiger nut; pretreatment; screw pressing; supercritical CO₂ extraction

油莎豆 (*Cyperus esculentus* L.) 又称虎坚果, 原产于非洲及地中海沿岸国家, 于 20 世纪 60 年代初引入中国, 其耐旱性极强, 可在沙化耕地等边际土地种植^[1-2]。油莎豆干豆(块茎)富含油脂(20% ~ 30%)、淀粉(25% ~ 40%)、可溶性糖(15% ~ 20%)、蛋白质、膳食纤维、维生素 E 和矿物质等营养成分, 产量可达 5 250 ~ 6 000 kg/hm², 产油量达 900 kg/hm²^[3]。油莎豆油的脂肪酸组成与橄榄油类似, 油酸含量高达 70% 以上, 是一种新兴的优质食用植物油资源^[3-4]。

目前, 油莎豆高效制油工艺研究广受关注, 主要包括溶剂浸出法^[5]、液压压榨法^[6]、水酶法和亚临界萃取法^[7]等。其中, 溶剂浸出法出油率高, 油料处理量较大, 但提取过程中有机溶剂的使用会影响植物油和饼粕的安全性^[8-9], 且其高温脱溶等过程可能会导致油脂和饼粕品质发生劣变, 热敏性功效成分损失^[10]; 水酶法具有提取条件温和, 可同时提取油脂和蛋白等优势, 但油脂乳化问题难以有效解决, 导致提取率较低, 工业化应用困难^[11]; 亚临界丁烷萃取法是一种高效的油脂提取方法, 但由于丁烷在常温常压下呈气态, 具有易燃易爆的特性, 限制了其规模化应用。目前, 在油莎豆制油工艺中应用最广泛的是压榨法, 压榨法又分为液压压榨和螺旋压榨, 液压压榨法虽然在常温下可将压榨饼残油率降至 3.72%^[12], 但在榨油前需人工包饼, 且不能连续进出料, 存在劳动强度大、生产效率低和出油率不高等问题, 而螺旋压榨法具有生产过程连续、效率高、成本低等优势, 非常适合大规模工业化应用。然而, 油莎豆中淀粉和可溶性糖含量高, 常规的螺旋压榨法的前处理及压榨过程中存在高温条件, 易发生淀粉糊化和糖分焦化, 从而堵塞油路, 导致出油不畅, 饼不易成形, 最终导致饼的残油率较高。因此, 需要探索适用于螺旋压榨油莎豆制油的新型预处理方法, 优化螺旋压榨工艺, 以降低饼残油率。目前, 该方面的研究报道较少。

本研究以压榨饼的残油率和褐变度为指标, 考察油莎豆脱皮、预处理方式(微波、炒籽、真空烘箱)和压榨温度对螺旋压榨油莎豆制油过程的影响, 以

此筛选出适宜的螺旋压榨预处理工艺条件, 并进一步探索以压榨饼为原料, 采用超临界 CO₂ 萃取和溶剂浸提所得油莎豆油和粕的品质, 以期油莎豆油高效提取及其粕深加工利用提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

新鲜油莎豆, 采集于河南洛阳。将新鲜油莎豆于 50 °C 下干燥 24 h 后, 从中挑选出大小合适、圆润饱满的油莎豆干豆(水分 5.73%, 含油量 31.04%), 放入自封袋中, 避光储存, 备用。

石油醚、无水乙醇、甲醇钠、冰醋酸、正己烷、异丙醇、冰醋酸、氢氧化钠、浓硫酸等均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 甲醇为色谱纯, 德国默克公司; 福林酚(≥99%)、5 α -胆甾醇(≥98%), Sigma-Aldrich 公司; 0.002 01 mol/mL 硫代硫酸钠标准溶液、0.100 mol/mL 氢氧化钾标准溶液、油酸标准品(≥99.0%)、37 种混合脂肪酸甲酯标准品(≥99%), 上海安谱实验科技股份有限公司; α -生育酚(≥98%)、 γ -生育酚(≥96%)、豆甾醇(≥98%)、菜油甾醇(≥98%)、 β -谷甾醇(≥98%), 上海源叶生物科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备

6FT-B7 新型豆类整粒脱皮机, 菏泽工科机械制造有限公司; PM20M1 型微波炉, 广东美的厨房电器制造有限公司; MS-5 型炒籽机, 迈斯机械有限公司; DZF-6050 型真空烘箱, 上海索谱仪器有限公司; CA59G 冷榨机, 德国 Komet 公司; XB 螺旋压榨机, 香聚有限公司; HA221-50-06 超临界 CO₂ 萃取装置, 南通市华安超临界萃取有限公司; PFXi 自动色度计, 德国罗威邦公司; FossKjeltec 2300 型自动凯氏定氮仪, 丹麦 FOSS 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油莎豆脱皮

称取 5 kg 油莎豆干豆, 放入整粒脱皮机中, 在转速 50 r/min 下脱皮 10 min, 脱皮率达 54.21%。

1.2.2 油莎豆预处理

炒籽组: 称取 320 g 油莎豆, 置于炒籽机中, 在

一定温度下焙炒一定时间。焙炒完成后将油莎豆冷却至室温,封装于PE袋中,放置4℃冰箱保存备用。

真空烘箱组:称取400 g油莎豆,置于真空烘箱中,在85℃下烘烤一定时间。焙烤完成后将油莎豆冷却至室温,封装于PE袋中,放置4℃冰箱保存备用。

微波组:称取300 g油莎豆,将其均匀平铺于直径为200 mm的高温培养皿中,然后置于微波装置中,于一定微波功率下处理一定时间。微波处理完成后将油莎豆冷却至室温,封装于PE袋中,放置4℃冰箱保存备用。

1.2.3 螺旋压榨制取油莎豆油

将预处理后的油莎豆在一定的压榨温度下压榨制油,所得油脂于5 000 r/min下离心15 min,取上层清油,得油莎豆油,装瓶后置于4℃冰箱保存待测,油莎豆压榨饼袋密封,置于4℃冰箱保存。

1.2.4 油莎豆压榨饼中油脂的提取

参考文献[13]采用超临界CO₂萃取法从油莎豆压榨饼中提取油脂。将压榨饼粉碎,过0.425 mm(40目)筛。称取150 g压榨饼粉置于超临界CO₂萃取装置的萃取筒中,设定分离罐I压力为8 MPa,温度为50℃,分离罐II压力为CO₂储罐压力(5 MPa),温度为35℃,在萃取温度35.7℃、萃取压力21 MPa下萃取110 min。萃取结束后,收集分离罐中油脂,离心取上层油脂放入4℃冰箱保存待测,卸压后将粕粉装入自封袋中,密封保存备用。

参考文献[5]采用溶剂浸提法从油莎豆压榨饼中提取油脂。称取150 g压榨饼,粉碎过0.425 mm(40目)筛,向其中加入200.0 mL正己烷,于60℃恒温水浴锅中搅拌浸提3 h,抽滤得到油脂萃取液及固形物,萃取液经旋蒸脱除溶剂后得油莎豆油,固形物于室温脱溶得粕,装入自封袋中密封保存备用。

1.2.5 油莎豆饼粕残油率和褐变度的计算

油莎豆饼粕残油率以油莎豆饼粕中油脂的质量与油莎豆饼粕的质量比值表示。采用色差仪测定油莎豆饼粕的 L^* 、 a^* 、 b^* ,按照式(1)计算褐变度(B_1)。

$$B_1 = [(a^* + 1.75 \times L^*) / (5.645 \times L^* + a^* - 3.012 \times b^*) - 0.31] \times 100 \quad (1)$$

1.2.6 油莎豆饼粕理化指标的测定

粗脂肪含量按照GB 5009.6—2016中索氏抽提法测定;水分按照GB/T 14489.1—2008测定;粗纤维含量按照GB/T 5009.10—2003测定;可溶性糖含量按照GB/T 37493—2019测定;粗蛋白质含量按照GB/T 5511—2008测定;氮溶解指数(NSI)按照NY/T 1205—2006测定;灰分按照GB/T 5505—2008测定;淀粉含量按照GB 5009.9—2016测定。

1.2.7 油莎豆油理化指标的测定

水分按照GB 5009.236—2016测定;酸值按照GB 5009.229—2016测定;过氧化值按照GB 5009.227—2016测定;色度采用PFXi自动色度计测定。

1.2.8 油莎豆油脂肪酸组成的测定

参考文献[4]测定油莎豆油脂肪酸组成。取2滴油样置于10 mL离心管中,用0.5 mL 20 mg/mL甲醇钠溶液甲酯化后,加入2.5 mL正己烷,离心后取上清液,待气相色谱测定。气相色谱条件:FID检测器;DB-FFAP色谱柱(30 m × 250 μm × 0.25 μm);氮气流速1.5 mL/min;分流比80:1;进样量1 μL;进样器和检测器温度均为300℃;柱升温程序为在210℃保持9 min后,以20℃/min升温至250℃,保持10 min。对比样品与混合脂肪酸甲酯标准品保留时间进行定性,峰面积归一法定量。

1.2.9 油莎豆油脂质伴随物的测定

1.2.9.1 生育酚

参考文献[5]测定生育酚含量。称取0.80 g油样用正己烷定容于10 mL棕色容量瓶,混匀。取1.5 mL样品溶液过0.22 μm滤膜,待液相色谱测定。色谱条件:荧光检测器;SIL100A色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm);流动相为正己烷-异丙醇(体积比99.5:0.5);进样量20 μL;流速1.0 mL/min。将紫外校准的α-生育酚、γ-生育酚标准品上机分析绘制标准曲线,得到标准曲线方程分别为 $y = 9\ 862.2x - 15\ 127$ 、 $y = 9\ 110.7x - 9\ 703.6$ (y 为峰面积, x 为生育酚质量浓度)。对比标准品与样品保留时间、对称性和峰高确定生育酚种类,根据标准曲线计算生育酚含量。

1.2.9.2 总酚

称取1.25 g油样,加入1.5 mL正己烷和1.5 mL 80%甲醇,涡旋5 min后离心(5 000 r/min, 10 min),弃上层溶液,用1.5 mL 80%甲醇重复提取2次,合并提取液。吸取0.5 mL提取液于10 mL比色管中,依次加入5 mL蒸馏水和0.5 mL福林酚试剂,混匀反应3 min后加入1 mL澄清饱和碳酸钠溶液,用蒸馏水定容后于暗处反应1 h,用紫外分光光度计在765 nm处测定其吸光度。用甲醇代替油样作对照组。以没食子酸为标准品绘制的标准曲线计算总酚含量。

1.2.9.3 甾醇

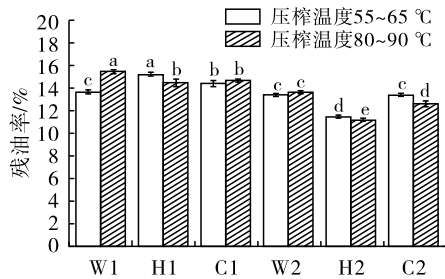
称取0.20 g油样,加入0.5 mL 0.5 mg/mL 5α-胆甾醇(内标)和10 mL 2 mol/L KOH-乙醇溶液,60℃水浴振荡1 h后冷却,加入4 mL超纯水和10 mL正己烷,涡旋3 min,提取上清液,重复提取3次,合并上清液,用无水硫酸钠除水。取15 mL提取液于

试管中,于 85℃ 烘干,加入 100 μL 衍生化试剂 MSHFBA-1-甲基咪唑(体积比 95:5),于 105℃ 烘箱中衍生 15 min 后冷却至室温,加入 1 mL 正己烷,待气相色谱测定。气相色谱条件:FID 检测器;检测器和注射器温度均为 320℃;DB-5ht 硅胶毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.10 μm);氮气流速 1.0 mL/min;进样量 1 μL;分流比 25:1;柱温 310℃ 保持 10 min。通过与标准品保留时间比较进行定性,并根据内标相对峰面积进行定量。

2 结果与分析

2.1 螺旋压榨温度和脱皮对油莎豆压榨饼残油率与褐变度的影响

压榨饼残油率是评价油莎豆螺旋压榨出油效率的重要指标。褐变度可以反映美拉德反应进行的程度,美拉德反应过度会导致饼粕颜色变深,对后续饼粕综合利用带来较大负面影响。在微波功率 400 W 和微波时间 5 min、85℃ 烘箱烘烤 180 min、125℃ 炒籽 20 min 条件下,脱皮与未脱皮油莎豆在螺旋压榨温度 55~65℃ 和 80~90℃ 下所得压榨饼的残油率与褐变度分别如图 1、图 2 所示。



注:W、H、C 分别代表在微波、烘箱、炒籽预处理后螺旋压榨油莎豆压榨饼;字母右侧数字 1 代表脱皮油莎豆,2 代表未脱皮油莎豆。不同字母表示具有显著差异($p < 0.05$)。下同

Note:W, H, and C represent the tiger nut cake obtained by pressing the tiger nut after microwave, oven, and roasted pretreatment, respectively. 1 means peeled tiger nut, 2 means the unpeeled tiger nut. Different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). The same below

图 1 不同螺旋压榨温度下脱皮与未脱皮油莎豆压榨饼残油率

Fig. 1 Residual oil rate of peeled and unpeeled tiger nut cake at different screw press temperatures

由图 1 可知,不同预处理后的脱皮油莎豆压榨饼的残油率在 13.56%~15.52% 之间,平均残油率为 14.68%,而未脱皮油莎豆压榨饼的残油率在 11.12%~13.77% 之间,平均残油率为 12.64%,脱皮油莎豆的出油率显著低于未脱皮油莎豆。这可能是因为脱皮后物料与榨油机榨膛和榨螺表面产生的摩擦作用以及物料之间的相互作用较未脱皮的小,使得物料在螺旋压榨时易滑膛,建立挤压力困难,导致出油率低^[14]。对于未脱皮油莎豆,当压榨温度为

55~65℃ 时,不同预处理油莎豆压榨饼的残油率在 11.39%~13.44% 间波动,平均残油率为 12.75%;当压榨温度为 80~90℃ 时,其残油率为 11.12%~13.77%,平均残油率为 12.49%,比 55~65℃ 时低 0.26 个百分点。因此,压榨温度为 80~90℃ 时油莎豆的出油率稍显优势。这可能是因为温度升高使油脂黏度降低,更容易释放^[15]。

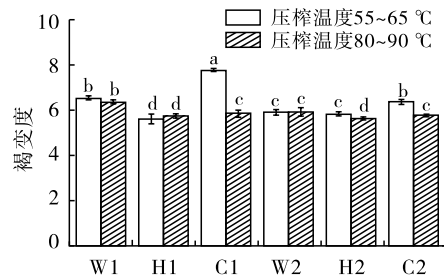


图 2 不同螺旋压榨温度下脱皮与未脱皮油莎豆压榨饼褐变度

Fig. 2 Browning degree of peeled and unpeeled tiger nut cake at different screw press temperatures

由图 2 可知,除烘箱预处理外,同种预处理条件下脱皮油莎豆压榨饼的褐变度普遍高于未脱皮压榨饼。这可能是因为油莎豆原料表皮质地坚硬,脱皮后仁更易在微波、炒籽中发生美拉德反应。与压榨温度 55~65℃ 相比,在压榨温度 80~90℃ 下油莎豆压榨饼的褐变度总体更低。

综上,未脱皮油莎豆在压榨温度 80~90℃ 下的出油率较高且油莎豆压榨饼褐变度总体更低,后续将在此基础上继续探讨不同预处理工艺条件对油莎豆压榨饼残油率和褐变度的影响。

2.2 预处理方式对油莎豆压榨饼残油率与褐变度的影响

2.2.1 炒籽预处理

在压榨温度 80~90℃ 条件下,未脱皮油莎豆在不同炒籽温度和炒籽时间下所得压榨饼的残油率和褐变度如图 3 所示。

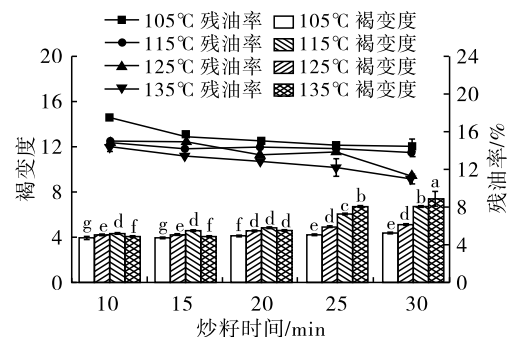


图 3 炒籽预处理对未脱皮油莎豆压榨饼的残油率和褐变度的影响

Fig. 3 Effects of roasting pretreatment on the residual oil rate and browning degree of unpeeled tiger nut cake

从图3可以看出:在相同炒籽温度下,随着炒籽时间的延长,油莎豆压榨饼的残油率总体呈下降趋势;炒籽时间相同时,残油率随着炒籽温度的升高总体呈降低趋势。在105℃炒籽10 min时残油率为17.41%,炒籽30 min后降低到14.28%;在135℃炒籽30 min时残油率为11.02%,仅为105℃炒籽10 min的63%。这是因为经过高温焙炒以后,油莎豆细胞结构被严重破坏,促进了油脂释放,且温度升高也降低了油脂黏度和表面张力,进而促进胞内细小油滴的聚集,最终提高出油率。

从图3还可以看出:炒籽时间不超过20 min时,随着炒籽温度的升高,油莎豆压榨饼褐变度增长较为缓慢,在135℃炒籽20 min时褐变度为4.8,仅比105℃炒籽10 min增长了0.94;然而,当炒籽时间延长到25 min以后,随着炒籽温度的升高褐变度显著上升($p < 0.05$),在105℃炒籽25 min时褐变度为4.21,温度升高到135℃后,褐变度达6.64,增长了0.58倍,135℃炒籽30 min后褐变度更是达到7.80,说明高温下长时间炒籽,油莎豆中美拉德反应剧烈,产生更多的类黑精物质,使压榨饼颜色加深。

2.2.2 微波预处理

在压榨温度80~90℃条件下,未脱皮油莎豆在不同微波功率和微波时间下所得压榨饼的残油率和褐变度如图4所示。

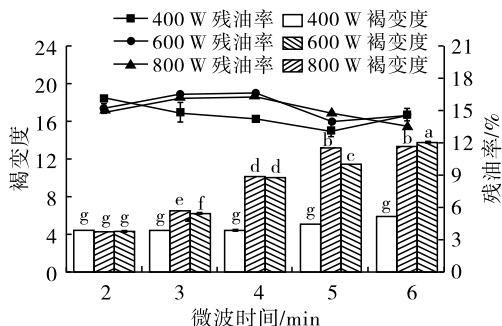


图4 微波预处理对未脱皮油莎豆压榨饼的残油率和褐变度的影响

Fig. 4 Effects of microwave pretreatment on residual oil rate and browning degree of unpeeled tiger nut cake

由图4可知:当微波功率为400 W时,随着微波时间的延长,油莎豆压榨饼的残油率先降低后升高,微波5 min时最低,为12.97%,微波6 min时又增至14.40%;当微波功率增至600 W和800 W时,随着微波时间的延长,残油率总体呈先增加后降低的趋势,均在微波4 min时达到最高。当微波功率为400 W时,微波时间对油莎豆压榨饼褐变度的影响不显著;当微波功率为600 W和800 W时,微波4 min后褐变度急剧增加。微波可穿透到油莎豆内

部,引起胞内水分子高频振动产生内摩擦热,使水迅速蒸发冲破细胞壁产生膨爆作用,增加了油脂溢出的通路,提高出油率。当微波功率为400 W时振动作用较弱,随着微波时间的延长,饼残油率缓慢降低,在微波时间达到5 min后微波处理会导致油莎豆水分急剧蒸发和温度大幅度升高,油莎豆中大量存在的可溶性糖、淀粉等发生剧烈的焦糖化或糊化反应,使其弹性、塑性变差和饼颜色过深,在压榨时容易被挤压为粉末状进而堵塞油路,导致残油率增加,出油率下降^[16]。当微波功率为600、800 W时,单位时间内传递给油莎豆的能量比400 W时更多,加热速度更快,淀粉的糊化等作用更强,微波2 min后残油率提前进入上升阶段,但4 min后油莎豆压榨饼褐变度急剧增加,残油率反而下降,可能是快速糊化引起弹性、塑性有所改善。

2.2.3 真空烘箱预处理

在压榨温度80~90℃条件下,未脱皮油莎豆在不同真空烘箱烘烤时间下所得压榨饼的残油率和褐变度如图5所示。

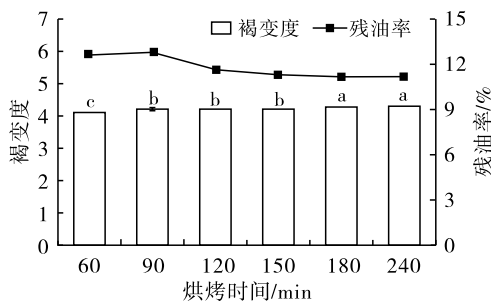


图5 真空烘箱预处理对未脱皮油莎豆压榨饼的残油率和褐变度的影响

Fig. 5 Effects of vacuum oven pretreatment on residual oil rate and browning degree of unpeeled tiger nut cake

由图5可知:在烘箱温度为85℃条件下,随着烘烤时间的延长,油莎豆压榨饼残油率下降,从60 min的12.69%降低至180 min的11.17%;烘烤时间超过180 min后,残油率下降不明显。从图5还可以看出,烘烤时间对压榨饼褐变度影响较小,烘烤时间由60 min延长至240 min时褐变度仅增加0.18。烘烤180 min时,褐变度为4.30。随着烘烤时间的延长,油莎豆水分逐渐降低,油料弹性和塑性被调整到适宜压榨的程度,而且淀粉和糖分没有发生糊化和焦糖化,因此出油率较高;同时由于烘烤温度(85℃)较低,使得油莎豆美拉德反应速率低,饼褐变度较小。

通过对3种预处理方式对比分析可知,采用真空烘箱预处理可以在油莎豆压榨饼褐变度较低的情

况下提高出油率。因此,对油莎豆进行螺旋压榨前,采用 85 °C 真空烘箱烘烤 180 min 是一种较为适宜的油莎豆预处理方式,后续将在此基础上分别采用超临界 CO₂ 萃取法和溶剂浸提法提取油莎豆压榨饼中的油脂。

2.3 不同制油工艺对油莎豆饼粕理化指标的影响

在 2.1 和 2.2 得到的最佳螺旋压榨温度和最佳预处理工艺下对未脱皮油莎豆进行压榨,探究螺旋压榨 (SP)、螺旋压榨-超临界 CO₂ 萃取 (SP-SCO₂)、螺旋压榨-溶剂浸提 (SP-SE) 3 种制油工艺所得油莎豆饼粕的理化指标,结果见表 1。

表 1 不同制油工艺下油莎豆饼粕的理化指标

项目	SP	SP-SCO ₂	SP-SE
水分	4.66 ± 0.01 ^b	4.62 ± 0.08 ^c	5.61 ± 0.66 ^a
粗脂肪	11.19 ± 0.10 ^a	1.05 ± 0.01 ^c	4.64 ± 1.03 ^b
灰分	4.08 ± 0.01 ^c	4.85 ± 0.15 ^b	5.09 ± 0.04 ^a
粗蛋白质	5.43 ± 0.00 ^c	6.49 ± 0.08 ^a	6.31 ± 0.06 ^b
氮溶解指数 (NSI)	0.86 ± 0.15 ^b	0.89 ± 0.09 ^a	0.67 ± 0.01 ^c
淀粉	42.20 ± 0.01 ^a	36.50 ± 0.01 ^c	39.50 ± 0.00 ^b
可溶性糖	41.75 ± 0.03 ^b	39.58 ± 0.56 ^c	43.49 ± 0.92 ^a
粗纤维	24.40 ± 0.02 ^a	16.30 ± 0.01 ^c	16.80 ± 0.01 ^b

注:同行不同字母表示具有显著差异 ($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters in the same row indicate significant difference ($p < 0.05$). The same below

由表 1 可知,不同制油工艺下油莎豆饼粕的水分、粗脂肪、灰分、粗蛋白质、淀粉、可溶性糖、粗纤维含量以及 NSI 均有显著差异 ($p < 0.05$)。SP-SCO₂ 油莎豆粕的粗蛋白质含量和 NSI 均显著高于 SP-SE 油莎豆粕的 ($p < 0.05$),而其余指标均显著低于 SP-SE 油莎豆粕的 ($p < 0.05$)。

2.4 不同制油工艺对油莎豆油品质的影响

2.4.1 对油莎豆油理化指标的影响

3 种制油工艺所得油莎豆油的理化指标如表 2 所示。

表 2 不同工艺提取油莎豆油的理化指标

项目	SP	SP-SCO ₂	SP-SE
酸值 (KOH)/(mg/g)	2.04 ± 0.22 ^b	2.64 ± 0.13 ^a	2.35 ± 0.03 ^a
过氧化值/(mmol/kg)	1.95 ± 0.17 ^a	1.38 ± 0.19 ^b	1.51 ± 0.03 ^b
水分/%	0.30 ± 0.01 ^c	0.34 ± 0.03 ^b	0.48 ± 0.05 ^a
色度			
红值 (R)	7.1 ± 0.0 ^a	4.8 ± 0.0 ^b	4.1 ± 0.0 ^b
黄值 (Y)	70.0 ± 0.0 ^a	70.0 ± 0.0 ^a	70.0 ± 0.0 ^a

由表 2 可知,SP-SCO₂ 和 SP-SE 油莎豆油酸值无显著差异 ($p > 0.05$),但显著高于 SP 油莎豆油的 ($p < 0.05$)。这可能是由于 SP-SCO₂ 油莎豆油中存在 CO₂ 残留,导致酸值测定结果偏高^[16];而 SP-SE 油莎豆油在浸提过程中暴露在空气中的时间较长,易发生氧化酸败,从而导致酸值升高^[17]。SP-SCO₂ 和 SP-SE 油莎豆油的过氧化值无显著差异 ($p > 0.05$),但均显著低于 SP 油莎豆油的 ($p < 0.05$)。SP-SCO₂ 和 SP-SE 油莎豆油的水分含量偏高,可能是因为油中残留的少量 CO₂ 或正己烷等成分在水分测定过程中挥发,导致结果偏高^[18]。3 种制油工艺所得油莎豆油的黄值无显著差异 ($p > 0.05$),但 SP 油莎豆油的红值显著高于 SP-SCO₂ 和 SP-SE 油莎豆油的 ($p < 0.05$)。

2.4.2 对油莎豆油脂肪酸组成的影响

3 种制油工艺所得油莎豆油的脂肪酸组成如表 3 所示。

表 3 不同工艺提取油莎豆油的脂肪酸组成

脂肪酸	SP	SP-SCO ₂	SP-SE
C16:0	14.14 ± 0.10 ^a	14.20 ± 0.08 ^a	13.99 ± 0.24 ^b
C16:1	0.44 ± 0.01 ^b	0.47 ± 0.05 ^a	0.44 ± 0.01 ^b
C17:0	0.01 ± 0.00 ^c	0.02 ± 0.01 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^b
C18:1	74.36 ± 0.17 ^a	74.19 ± 0.25 ^b	74.54 ± 0.40 ^a
C18:2	10.24 ± 0.06 ^b	10.31 ± 0.10 ^a	10.14 ± 0.15 ^c
C18:3	0.19 ± 0.00 ^a	0.19 ± 0.00 ^a	0.17 ± 0.00 ^b
C20:0	0.40 ± 0.00 ^b	0.41 ± 0.02 ^b	0.46 ± 0.01 ^a
C20:1	0.22 ± 0.00 ^{ab}	0.22 ± 0.01 ^a	0.24 ± 0.00 ^c
SFA	14.56 ± 0.11 ^a	14.63 ± 0.10 ^a	14.48 ± 0.25 ^a
MUFA	75.01 ± 0.18 ^a	74.88 ± 0.31 ^b	75.22 ± 0.42 ^b
UFA	85.44 ± 0.24 ^a	85.38 ± 0.41 ^a	85.52 ± 0.57 ^a

由表 3 可知,3 种工艺所得油莎豆油的脂肪酸组成无显著差异,主要包括棕榈酸 (C16:0)、棕榈油酸 (C16:1)、十七烷酸 (C17:0)、油酸 (C18:1)、亚油酸 (C18:2)、亚麻酸 (C18:3)、花生酸 (C20:0)、二十碳烯酸 (C20:1),不饱和脂肪酸含量高达 85% 以上,其中油酸含量在 74.19% ~ 74.54%。油酸是一种重要的单不饱和脂肪酸,其稳定性强,具有预防和治疗心血管疾病等功效^[19]。

2.4.3 对油莎豆油脂质伴随物的影响

3 种制油工艺所得油莎豆油的脂质伴随物含量如图 6 所示。

由图 6a 可知,油莎豆油中甾醇以 β -谷甾醇为主,含量为 252.40 ~ 343.65 mg/100 g,占总甾醇含量的 66.08% ~ 67.11%,其次是菜油甾醇和豆甾醇,含量分别为 65.35 ~ 91.69 mg/100 g 和 58.30 ~

84.67 mg/100 g。油莎豆油中生育酚含量为 26.38 ~ 27.06 mg/100 g, 主要是 α -生育酚, 含量为 17.63 ~ 17.77 mg/100 g, 占总生育酚含量的 65.15% ~ 67.36%, Yeboah 等^[20]也得出类似的结论。3 种油莎豆油中, SP-SE 油莎豆油甾醇含量最高, 生育酚含量差别不大。SP-SCO₂ 油莎豆油中甾醇和生育酚含量分别为 436.31、26.55 mg/100 g。

由图 6b 可知, 不同工艺所得油莎豆油的总酚含量具有显著差异 ($p < 0.05$), 含量在 3.21 ~ 15.13 mg/100 g 之间, 其中 SP-SCO₂ 油莎豆油总酚含量最高, 远高于 SP、SP-SE 油莎豆油的。Khattab 等^[9]报道超临界 CO₂ 萃取亚麻籽油中的酚类物质总量达 47.58 $\mu\text{g/g}$, 是传统溶剂浸出亚麻籽油的 3.03 倍, 表明超临界 CO₂ 萃取有利于富集酚类物质; Koubaa 等^[21]也发现气体辅助压榨油莎豆油中的酚类物质含量高于压榨油莎豆油的。

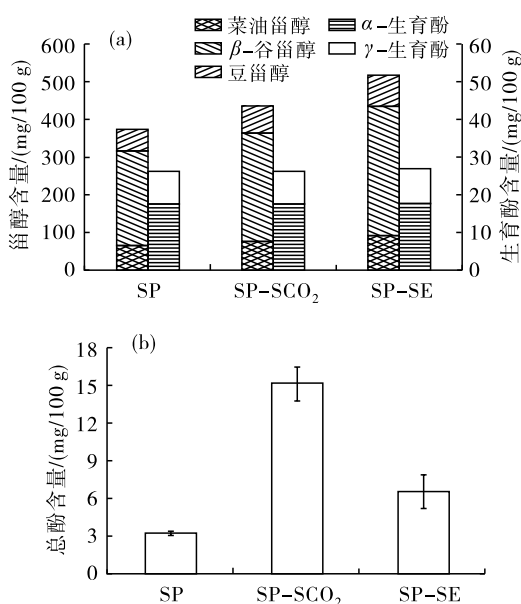


图 6 不同工艺提取油莎豆油的脂质伴随物含量

Fig. 6 Lipid concomitant content of tiger nut oil extracted by different processes

3 结论

通过比较不同预处理方式和螺旋压榨温度对油莎豆饼残油率和褐变度的影响, 探明油莎豆螺旋压榨最佳工艺条件, 并在此条件下, 探究不同制油工艺 (螺旋压榨、螺旋压榨-超临界 CO₂ 萃取、螺旋压榨-溶剂浸提) 对油莎豆油和饼粕品质的影响。结果显示, 采用真空烘箱于 85 $^{\circ}\text{C}$ 处理未脱皮油莎豆 180 min 后, 在 80 ~ 90 $^{\circ}\text{C}$ 下进行螺旋压榨所得油莎豆压榨饼的残油率和褐变度较低, 分别为 11.17% 和 4.30。螺旋压榨-超临界 CO₂ 萃取法的出油率较高, 其所得油莎豆粕的粗脂肪含量为 1.05%, 显著低于其余

2 种制油工艺, 且其粗蛋白质含量和氮溶解指数最高; 其所得油莎豆油的过氧化值最低, 总酚含量最高, 甾醇和生育酚含量分别为 436.31、26.55 mg/100 g。综上, 未脱皮油莎豆在 85 $^{\circ}\text{C}$ 真空烘箱预处理 180 min 后在 80 ~ 90 $^{\circ}\text{C}$ 下进行螺旋压榨, 所得压榨饼再进行超临界 CO₂ 萃取是一种既能高效提取油莎豆油又能保证粕品质的方法。

参考文献:

- [1] 王盈希, 吴苏喜, 周利平, 等. 油莎豆品质分析及加工利用研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(10): 273-276.
- [2] 杨帆, 朱文学. 油莎豆研究现状及展望[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(7): 4-6.
- [3] 李志军, 王绛, 刘和, 等. 油莎豆产业发展现状及建议[J]. 现代农业科技, 2022(8): 225-231.
- [4] 邓淑君, 郝琴, 万楚筠, 等. 微波预处理对油莎豆贮藏稳定性及其油脂脂质伴随物含量的影响[J]. 中国油脂, 2024, 49(2): 1-9, 41.
- [5] 刘玉兰, 田瑜, 王璐阳, 等. 不同制油工艺对油莎豆油品质影响的研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(7): 1-5.
- [6] 王亚萍, 费学谦, 陈焱, 等. 制油工艺对油茶籽油质量安全的影响分析[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(9): 60-66.
- [7] XU B, HAN J, ZHOU S, et al. Quality characteristics of wheat germ oil obtained by innovative subcritical butane experimental equipment[J]. J Food Process Eng, 2016, 39(1): 79-87.
- [8] 吴雪辉, 龙婷. 不同压榨方式对油茶籽油品质的影响研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(3): 36-40.
- [9] KHATTAB R Y, ZEITOUN M A. Quality evaluation of flaxseed oil obtained by different extraction techniques[J]. LWT - Food Sci Technol, 2013, 53(1): 338-345.
- [10] 万楚筠, 胡双喜, 钮琰星, 等. 超临界 CO₂ 萃取双低油菜籽中油脂及其品质研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(7): 32-36.
- [11] 甘晓露, 章绍兵, 陆启玉, 等. 烘烤温度对水酶法提取花生油质量的影响[J]. 中国油脂, 2012, 37(8): 12-15.
- [12] 连四超. 不同制油工艺对油莎豆制油效果和产品品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- [13] 张志刚, 王捷, 姚玉军, 等. 超临界 CO₂ 萃取油莎豆油的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2021(5): 37-40, 49.
- [14] 姚占斌. 油莎豆低温螺旋压榨设备与榨膛压力研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2020.
- [15] 王兴瑞, 韩玉泽, 王淑珍, 等. 不同制取方法对亚麻籽油和亚麻籽粕品质影响研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(11): 174-183.

(下转第 39 页)

- foods10030600.
- [30] 张金闯. 高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [31] BI C, GAO F, ZHU Y, et al. Effects of xanthan gum on the rheological properties of soy protein dispersion[J]. *Int J Agric Biol Eng*, 2018, 11(2): 208–213.
- [32] 熊拯, 郭兴凤, 谈天. 蛋白质-阴离子多糖相互作用研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2006, 19(10): 15–17.
- [33] RODRÍGUEZ PATINO J M, PILOSO F A M R. Protein-polysaccharide interactions at fluid interfaces[J]. *Food Hydrocolloid*, 2011, 25(8): 1925–1937.
- [34] ZHANG J, LIU L, JIANG Y, et al. High-moisture extrusion of peanut protein-/carrageenan/sodium alginate/wheat starch mixtures: Effect of different exogenous polysaccharides on the process forming a fibrous structure[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 99: 105311 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105311>.
- [35] 窦薇, 张鑫, 赵煜, 等. 海藻酸钠添加对大豆浓缩蛋白植物肉特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(12): 147–152.
- [36] DOU W, ZHANG X, ZHAO Y, et al. High moisture extrusion cooking on soy proteins: Importance influence of gums on promoting the fiber formation[J/OL]. *Food Res Int*, 2022, 156: 111189 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111189>.
- [37] TAGHIAN DINANI S, CHARLES CARRILLO M F, BOOM R, et al. Quality improvement of plant-based meat alternatives by addition of *iota* carrageenan to pea protein-wheat gluten blend[J]. *Eur Food Res Technol*, 2023, 249(6): 1637–1654.
- [38] FU J L, ZHENG Y X, GAO Y X, et al. Effect of different polysaccharides on the texture and fibrous structure of high-moisture extruded pea protein isolate[J]. *Food Biophys*, 2023, 18(4): 606–618.
- [39] 刘莹. 亲水胶体和挤压工艺用水对高水分组织化植物蛋白品质影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [40] 肖志刚, 王海观, 江睿生, 等. 羧甲基纤维素钠对挤压豌豆蛋白素肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(8): 118–123.
- [41] YU X, WANG H, YUAN Y, et al. Changes in physicochemical and structural properties of pea protein during the high moisture extrusion process: Effects of carboxymethylcellulose sodium and different extrusion zones[J/OL]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 251: 126350 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126350>.
- [42] 刘艳香, 谭斌, 刘明, 等. 添加剂对高水分挤压组织化复合蛋白理化性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 294–302.
- [43] ZHENG Y, SUN W, YANG W, et al. The influence of xanthan gum on rheological properties and *in vitro* digestibility of kudzu (*Pueraria lobata*) starch[J/OL]. *Starch Stärke*, 2020, 72(3/4): 00139 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1002/star.201900139>.
- [44] YU J, WANG X Y, LI D, et al. Development of soy protein isolate emulsion gels as extrusion-based 3D food printing inks: Effect of polysaccharides incorporation[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 131: 107824 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107824>.
- [45] NANTA P, SKOLPAP W, KASEMWONG K. Influence of hydrocolloids on the rheological and textural attributes of a gluten-free meat analog based on soy protein isolate[J/OL]. *J Food Process Preserv*, 2021, 45(3): 15244 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15244>.
- 报, 2012, 33(6): 154–158.
- [20] YEBOAH S O, MITEI Y C, NGILA J C, et al. Compositional and structural studies of the oils from two edible seeds: Tiger nut, *Cyperus esculentum*, and asiato, *Pachira insignis*, from Ghana[J]. *Food Res Int*, 2012, 47(2): 259–266.
- [21] KOU BAA M, BARBA F J, MHEMDI H, et al. Gas assisted mechanical expression (GAME) as a promising technology for oil and phenolic compound recovery from tiger nuts[J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2015, 32: 172–180.

(上接第 21 页)

- [16] 赵丹, 汪学德, 张润阳, 等. 制油工艺对油脂品质的影响研究[J]. *中国油脂*, 2018, 43(6): 11–15.
- [17] WIJESUNDERA C, CECCATO C, FAGAN P, et al. Seed roasting improves the oxidative stability of canola (*B. napus*) and mustard (*B. juncea*) seed oils[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2008, 110(4): 360–367.
- [18] RAI A, MOHANTY B, BHARGAVA R. Supercritical extraction of sunflower oil: A central composite design for extraction variables[J]. *Food Chem*, 2016, 192: 647–659.
- [19] 王心昕, 杨茜, 李媛, 等. 膳食脂肪酸摄入及构成与心脑血管疾病相关性的研究进展[J]. *昆明医科大学学*