

米糠油加工过程中组成及品质变化的研究

祝振杰^{1,2}, 陈小军³, 高艳昌⁴, 陈竞男¹, 张林尚¹, 毕艳兰^{1,2}

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 中原食品实验室, 河南 漯河 462300; 3. 河南启亿粮油工程技术有限公司, 郑州 450001; 4. 山东香驰粮油有限公司, 山东 滨州 256500)

摘要:旨在为米糠油适度加工提供数据支撑,对来自国内3个工厂的不同加工阶段米糠油的理化指标、组成、色泽和微量成分进行了测定。结果表明:A、B、C 3个工厂的米糠油在精炼后酸值(KOH)分别由24.22、18.95、17.21 mg/g降至0.15 mg/g以下,脂肪酸脱除率高达99%以上,过氧化值分别降至0.99、1.54、0.71 mmol/kg,精炼后米糠油酸值、过氧化值均达到GB/T 19112—2003中一级油标准;3个工厂的米糠油在加工过程中其游离脂肪酸含量变化趋势与酸值的变化趋势一致;精炼后米糠油甘一酯含量降低了58.9%~84.9%,主要在物理脱酸和脱臭时脱除,甘二酯含量变化不大,甘三酯含量增加了12.8%~23.9%;3个工厂米糠油脂肪酸组成在加工过程中没有明显变化;精炼后米糠油中叶绿素被有效脱除,色泽均达到国标一级油标准;米糠油的微量成分在加工过程中变化极大,其中谷维素出现明显的损失,损失率高达80.8%~94.1%,主要在化学脱酸时损失,甾醇损失率为21.2%~42.6%,主要在化学脱酸时损失,维生素E含量变化趋势存在差异,A工厂维生素E含量增加30.2%,B、C工厂维生素E损失率分别为31.7%、55.6%;角鲨烯损失率为65.9%~96.3%,主要发生在脱臭工序。综上,企业应根据自己的定位,合理调整精炼工序,优化精炼工艺参数,生产出符合企业追求的米糠油产品。

关键词:米糠油;精炼加工过程;理化指标;组成成分;微量成分

中图分类号:TS224.6;TS222+.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)08-0027-09

Composition and quality change of rice bran oil during processing

ZHU Zhenjie^{1,2}, CHEN Xiaojun³, GAO Yanchang⁴, CHEN Jingnan¹,
ZHANG Linshang¹, BI Yanlan^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, Henan, China; 3. Henan Qiyi Grain and Oil Machinery Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 4. Shangdong Xiangchi Grain and Oil Co., Ltd., Binzhou 256500, Shandong, China)

Abstract: Aiming to provide data support for the moderate processing of rice bran oil, the physicochemical indexes, composition, colour and trace components of rice bran oil at different processing stages from three different plants in China were determined. The results showed that the acid value of rice bran oil from three plants A, B and C after refining reduced from 24.22, 18.95 mgKOH/g and 17.21 mgKOH/g to less than 0.15 mgKOH/g respectively, and the fatty acid removal rate is more than 99%. The peroxide value was reduced to 0.99, 1.54 mmol/kg and 0.71 mmol/kg respectively. The acid value and the peroxide value of the refined rice bran oil reached the standard of first-grade oil in the GB/T 19112-2003. The change trend of free fatty acid content in rice bran oil in

three plants was consistent with that of acid value. The monoglyceride content in rice bran oil decreased by 58.9% - 84.9%, mainly removed in the physical deacidification and deodorization, the diglyceride content did not change much, and the triglyceride content increased by 12.8% -

收稿日期:2023-03-08;修回日期:2024-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(32172131)

作者简介:祝振杰(1998),男,硕士研究生,研究方向为油脂化学(E-mail)1364063661@qq.com。

通信作者:毕艳兰,教授(E-mail)bylzy@126.com。

23.9%。The fatty acid composition of rice bran oil in the three plants did not change significantly during processing. After refining, chlorophyll in rice bran oil was effectively removed, and the colour reached the national standard of first - grade oil. The trace components of rice bran oil changed greatly during processing, among which oryzanol appeared obvious loss, with the loss rate 80.8% - 94.1%, mainly loss in chemical deacidification; sterol loss rate was 21.2% - 42.6%, mainly loss in chemical deacidification; vitamin E changed differently, vitamin E content increased by 30.2% in plant A, but reduced by 31.7% and 55.6% in plant B and plant C respectively. The loss rate of squalene was 65.9% - 96.3%, mainly occurred in the deodorization. To sum up, the enterprise should adjust the refining process reasonably according to its own position, optimize the refining parameters, and produce the rice bran oil products in line with the enterprise's pursuit.

Key words: rice bran oil; refining processing process; physicochemical index; constituent component; trace component

2021 年我国稻谷总产量 21 284.3 万 t, 占全年粮食总产量的 31.2%^[1]。米糠是稻谷加工的主要副产物, 含油率与大豆相当^[2], 是制备米糠油的原料。米糠油被世界卫生组织、美国心脏协会(AHA)认为是一种“健康油”^[3]。米糠油中不饱和脂肪酸含量超过 80%, 其中油酸 40% ~ 50%, 亚油酸 29% ~ 42%^[4]。此外, 米糠油还富含甾醇、谷维素、角鲨烯、生育酚及生育三烯酚等活性成分, 具有抗癌^[5]、抗氧化^[6]、降血脂^[7]、降胆固醇^[7]等功效, 还能用作药物载体, 如新冠疫苗的载体^[8]。米糠及米糠油所具有的巨大开发潜力受到了国家的关注, 2023 年 1 月 19 日国家卫生健康委员会回复人大代表提出的《关于促进米糠回归人类食用提升国民营养的建议》中明确提出, 国家卫生健康委员会将会联合各相关部门开展米糠及其副产品营养价值研究和有关标准制修订, 加强米糠制品安全监管, 加大米糠利用推广宣传, 推动将无害化米糠列入“药食两用名单”和《药典》。随着米糠及其制品逐渐进军食品和药品保健领域, 在国家政策的推动下, 米糠油的产业规模、市场规模势必将持续扩大, 其市场前景良好。

在国内外关于米糠油加工过程中理化指标、组成和微量成分的变化方面, 曹健等^[9]研究了 3 个工厂的米糠油在加工过程中 2 种有害成分[苯并(a)芘, 3-氯-1,2-丙二醇]和 3 种营养物质(谷维素、甾醇、维生素 E)的变化趋势, 结果发现, 精炼后米糠油中苯并(a)芘含量降低了 97.61%, 3-氯-1,2-丙二醇含量降低了 80.47%, 谷维素损失率为 6.57% ~ 15.78%, 甾醇损失率为 21.86% ~ 25.54%, 维生素 E 损失率为 33.12% ~ 45.45%。此外, Pestana 等^[10]通过对一家工厂的米糠原油、脱胶油、化学脱酸油、脱色油、脱蜡油和脱臭油样品进行分析

发现, 在精炼过程中, 米糠油的水分、酸值和过氧化值显著降低, 而不皂化物和脂肪酸含量无显著变化, 生育酚含量增加 12.9%, 但是谷维素的 8 种单体均以相似的比例大幅下降, 其损失主要发生在化学脱酸过程中, 此阶段米糠油中的谷维素总含量降至其初始值的 4%, 而脱色和脱臭过程使谷维素总含量降至其初始值的 2.3%, 这与 Liu 等^[11]的研究结果一致。目前关于米糠油的研究多聚焦于某一工厂来源的米糠油微量成分和理化指标的变化, 而对于其组成变化以及不同加工工艺对其品质影响的研究尚未见报道。

本研究选取了 3 个工厂不同精炼阶段的米糠油, 对其理化指标(酸值、过氧化值)、组成(游离脂肪酸、甘一酯、甘二酯、甘三酯相对含量以及脂肪酸组成)、色泽和微量成分(谷维素、甾醇、生育酚及生育三烯酚、角鲨烯)的变化趋势进行了分析, 以期米糠油工业化生产时的工序选择和适度加工提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

米糠油, 来自 3 个不同加工工艺与工序的工厂。其中: 来自 A 工厂的样品分别是米糠原油依次经脱胶、脱蜡、物理脱酸、化学脱酸、脱色、脱臭、冬化处理而得到的各工序的阶段产品(共 8 个样品); 来自 B 工厂的样品是米糠原油依次经脱胶、脱蜡、一次脱色、物理脱酸、化学脱酸、二次脱色、脱臭、冬化处理而得到的各工序的阶段产品(共 9 个样品); 来自 C 工厂的样品是米糠原油依次经脱胶和化学脱酸、脱蜡、脱色、脱臭、冬化处理而得到的各工序的阶段产品(共 6 个样品)。

正己烷、甲醇,均为色谱纯;乙醚、异丙醇、正庚烷、三氯甲烷、冰乙酸、淀粉、碘化钾、三氯化硼-乙醚、无水硫酸钠、硫代硫酸钠、氢氧化钾,均为分析纯;薄层层析硅胶,化学纯;猪胰脂酶,实验室自制;37种脂肪酸甲酯混标、谷维素标准品(纯度 $\geq 99\%$)、角鲨烯标准品(纯度 $\geq 98\%$)、角鲨烷标准品(纯度 $\geq 98\%$)、胆甾烷醇标准品(纯度 $\geq 95\%$),上海麦克林生化科技有限公司; α -、 β -、 γ -、 δ -生育酚和 α -、 β -、 γ -、 δ -生育三烯酚标准品(纯度 $\geq 98\%$),北京三区生物技术有限公司。

1.1.2 仪器与设备

BSA224S分析天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;Agilent 7890B、8860气相色谱仪,美国安捷伦科技有限公司;Nexis GC-2030气相色谱仪,日本岛津公司;2695-2475高效液相色谱仪,美国Waters公司;IKA RV8旋转蒸发仪,艾卡(广州)仪器设备有限公司;TU-1810紫外分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;CenLee 16K离心机,湖南湘立科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 米糠油理化指标的测定

酸值的测定参考GB 5009.229—2016中第二法冷溶剂自动电位滴定法;过氧化值的测定参考GB 5009.227—2016中第一法滴定法。

1.2.2 米糠油甘油酯及游离脂肪酸(FFA)的测定

将30 mg米糠油样品溶解在3 mL正己烷中,加入适量无水硫酸钠,充分振荡除去水分,过0.22 μm 滤膜后进气相色谱仪分析。

气相色谱条件:DB-1ht色谱柱(30 m \times 250 μm \times 0.10 μm);进样口温度350 $^{\circ}\text{C}$;分流比20:1;氢气流量60 mL/min;空气流量400 mL/min;FID检测器温度360 $^{\circ}\text{C}$;升温程序为初始温度100 $^{\circ}\text{C}$,以50 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至220 $^{\circ}\text{C}$,以15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至290 $^{\circ}\text{C}$,以40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至320 $^{\circ}\text{C}$,保持8 min,再以20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至360 $^{\circ}\text{C}$,保持10 min;载气为氮气,流速4 mL/min;进样量1 μL 。

采用面积归一化法计算样品中甘油三酯(TG)、甘油一酯(MG)、甘油二酯(DG)及FFA的相对含量。

1.2.3 米糠油脂肪酸组成的测定

参考GB 5009.168—2016采用气相色谱仪对米糠油脂肪酸组成进行分析。

气相色谱条件:SGE HP-88色谱柱(100 m \times 250 μm \times 0.20 μm);升温程序为初始温度140 $^{\circ}\text{C}$,保持5 min,以4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至240 $^{\circ}\text{C}$,保持25 min;进

样口温度260 $^{\circ}\text{C}$;载气为氮气,总流量54.0 mL/min;FID检测器温度260 $^{\circ}\text{C}$;氢气流量32.0 mL/min;空气流量200 mL/min;进样量1 μL ;分流比1:20。

通过脂肪酸甲酯混标对各脂肪酸进行定性,采用面积归一化法计算样品中各脂肪酸的相对含量。

1.2.4 米糠油色泽及叶绿素的测定

色泽的测定参考GB/T 22460—2008,因3个工厂的原油、脱胶油加热后仍不透明,因此依据GB/T 15687—2008在试样中加入约15%的无水硫酸钠,摇匀后过滤分离出待测样,再进行色泽测定。叶绿素的测定参考AOCS Official Method Cc 13i-96。

1.2.5 米糠油微量成分的测定

谷维素含量的测定参考LS/T 6121.1—2017;甾醇含量的测定参考GB/T 25223—2010;生育酚及生育三烯酚含量的测定参考GB/T 26635—2011;角鲨烯含量的测定参考NY/T 3673—2020中第二法气相色谱法。

1.2.6 数据处理

每个样品至少进行2次平行实验,结果用“平均值 \pm 标准偏差”表示。采用SPSS 27软件对实验数据进行显著性分析, $p < 0.05$ 表示有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 3个工厂不同加工阶段米糠油的理化指标

3个工厂不同加工阶段米糠油的酸值、过氧化值如图1所示。

由图1可知,在精炼过程中,A、B、C 3个工厂米糠油酸值(KOH)整体呈现下降的趋势,分别从米糠原油的24.22、18.95、17.21 mg/g降至冬化油的0.15、0.11、0.03 mg/g,分别降低了99.4%、99.4%、99.8%。脱酸工序米糠油酸值降低最为明显,A、B工厂的米糠油在物理脱酸后酸值(KOH)分别降至0.80、0.62 mg/g,该工序酸值分别降低了96.2%、97.1%,A、B、C工厂在化学脱酸后酸值(KOH)分别降至0.14、0.14、0.60 mg/g,脱酸效果显著。在物理脱酸工序,工厂可以收集到大量高质量副产物脂肪酸,但是米糠油精炼工艺中一般还需要化学脱酸处理,化学脱酸不仅可以进一步降低酸值,而且中和反应生成的皂还可以吸附部分有色物质,降低后续脱色的难度。脱色阶段的米糠油酸值有所回升,这是因为米糠原油颜色远比一般植物油深,脱色时往往会使用较多的酸性白土,造成脱色油的酸值上升。相比于脱色工序,脱臭阶段的米糠油酸值有所下降,这是因为脱臭过程中游离脂肪酸会从油中逸出,进入脱臭馏出物中,从而导致油脂酸值下降。虽然3

个工厂的米糠原油酸值存在显著性差异,但是经过不同的精炼工艺加工后,均达到了 GB 19112—2003 中规定的一级米糠油酸值(KOH)标准(≤ 0.20 mg/g)。

由图 1 还可知:在精炼过程中 A、B 工厂米糠油的过氧化值波动变化,但是在脱臭工序均发生明显下降,脱臭后均降至 1.2 mmol/kg,在该工序分别降低了 29.4%、20.0%,在脱色工序分别降低了 10.5%、6.3%;与 A、B 工厂略有不同,C 工厂米糠油的过氧化值在精炼过程中总体呈现下降的趋势,

且脱臭工序过氧化值下降明显,降低了 41.7%,而脱色工序下降了 20.0%。3 个工厂的米糠油在脱色、脱臭时过氧化值都出现了明显下降,这与吴雪辉等^[12]的油茶籽油精炼过程中过氧化值在脱色、脱臭工序下降最显著的研究结果类似,原因是脱色时活性白土可以吸附氧化产物以及分解氢过氧化物,而脱臭时的高温、真空条件会使氢过氧化物分解并从油中逸出,进入脱臭馏出物中。经过不同的精炼工艺加工后,3 个工厂米糠油的过氧化值均达到了 GB 19112—2003 中一级米糠油的要求(≤ 5.0 mmol/kg)。

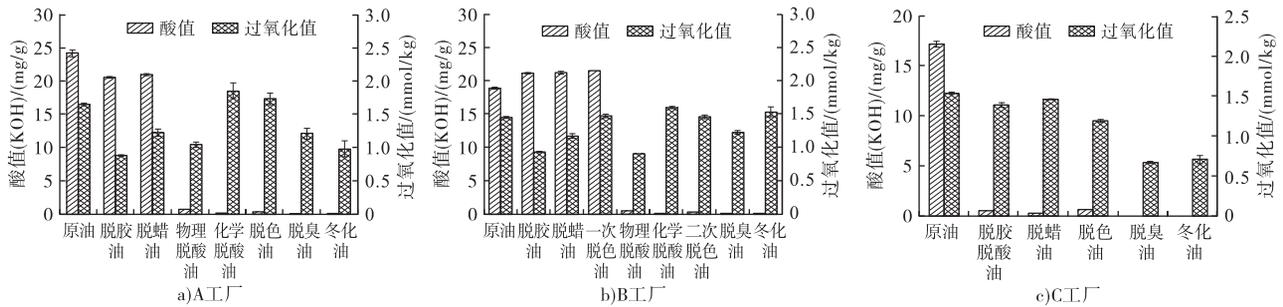


图 1 3 个工厂不同加工阶段米糠油的酸值、过氧化值

2.2 3 个工厂不同加工阶段米糠油甘油酯及游离脂肪酸组成

3 个工厂不同加工阶段米糠油甘油酯及游离脂肪酸的相对含量见表 1。

表 1 3 个工厂不同加工阶段米糠油甘油酯及游离脂肪酸的相对含量 %

样品	游离脂肪酸	甘一酯	甘二酯	甘三酯
A 工厂				
原油	14.00 ± 0.24 ^a	2.53 ± 0.04 ^a	10.40 ± 0.02 ^a	73.06 ± 0.18 ^e
脱胶油	11.71 ± 0.01 ^b	2.35 ± 0.00 ^b	8.68 ± 0.05 ^c	77.25 ± 0.06 ^d
脱蜡油	11.46 ± 0.39 ^b	2.29 ± 0.04 ^b	8.76 ± 0.07 ^c	77.49 ± 0.50 ^d
物理脱酸油	0.39 ± 0.00 ^c	1.29 ± 0.02 ^c	9.20 ± 0.10 ^b	89.11 ± 0.09 ^c
化学脱酸油	0.36 ± 0.01 ^c	1.17 ± 0.02 ^d	8.44 ± 0.04 ^d	90.03 ± 0.01 ^b
脱色油	0.48 ± 0.02 ^c	1.00 ± 0.06 ^e	8.28 ± 0.04 ^{de}	90.25 ± 0.03 ^{ab}
脱臭油	0.33 ± 0.04 ^c	0.85 ± 0.01 ^f	8.26 ± 0.01 ^{ef}	90.56 ± 0.06 ^a
冬化油	0.36 ± 0.01 ^c	1.04 ± 0.00 ^e	8.00 ± 0.15 ^f	90.50 ± 0.14 ^a
B 工厂				
原油	10.31 ± 0.27 ^c	2.38 ± 0.03 ^a	8.18 ± 0.16 ^d	79.13 ± 0.46 ^d
脱胶油	11.74 ± 0.12 ^b	2.25 ± 0.04 ^b	7.39 ± 0.07 ^e	78.64 ± 0.23 ^{de}
脱蜡油	11.59 ± 0.27 ^b	2.22 ± 0.06 ^b	8.21 ± 0.17 ^d	77.98 ± 0.51 ^f
一次脱色油	12.06 ± 0.03 ^a	1.64 ± 0.04 ^c	8.23 ± 0.03 ^d	78.08 ± 0.03 ^{ef}
物理脱酸油	0.35 ± 0.01 ^d	0.89 ± 0.08 ^d	8.96 ± 0.00 ^{ab}	89.80 ± 0.08 ^c
化学脱酸油	0.19 ± 0.00 ^d	0.59 ± 0.00 ^e	9.12 ± 0.08 ^a	90.09 ± 0.09 ^c
二次脱色油	0.34 ± 0.02 ^d	0.58 ± 0.06 ^e	8.73 ± 0.01 ^{bc}	90.35 ± 0.07 ^{bc}
脱臭油	0.20 ± 0.03 ^d	0.34 ± 0.03 ^f	8.58 ± 0.24 ^c	90.88 ± 0.24 ^{ab}
冬化油	0.20 ± 0.05 ^d	0.36 ± 0.03 ^f	8.11 ± 0.34 ^d	91.33 ± 0.26 ^a

续表 1

样品	游离脂肪酸	甘一酯	甘二酯	甘三酯
C 工厂				
原油	9.69 ± 0.18 ^a	2.34 ± 0.00 ^a	8.94 ± 0.05 ^c	79.04 ± 0.12 ^e
脱胶脱酸油	0.80 ± 0.05 ^b	2.22 ± 0.02 ^b	8.99 ± 0.03 ^c	87.99 ± 0.10 ^c
脱蜡油	0.58 ± 0.03 ^c	2.25 ± 0.01 ^b	9.36 ± 0.05 ^c	87.81 ± 0.00 ^d
脱色油	0.67 ± 0.01 ^{bc}	1.97 ± 0.01 ^c	9.55 ± 0.03 ^b	87.81 ± 0.05 ^d
脱臭油	0.26 ± 0.01 ^d	0.83 ± 0.00 ^d	9.25 ± 0.03 ^d	89.66 ± 0.03 ^a
冬化油	0.26 ± 0.03 ^d	0.77 ± 0.02 ^e	9.79 ± 0.05 ^a	89.18 ± 0.04 ^b

注:同一工厂同一列不同字母代表具有显著性差异($p < 0.05$)。下同

由表 1 可知,在精炼过程中,A、B、C 3 个工厂米糠油的游离脂肪酸、甘一酯相对含量整体均呈现下降的趋势,其中游离脂肪酸相对含量分别降低了 97.4%、98.1%、97.3%,取得了较好的脱酸效果,且变化趋势与酸值一致。精炼后 A、B、C 3 个工厂米糠油的甘一酯相对含量分别降低了 58.9%、84.9%、67.1%,主要是在物理脱酸和脱臭工序被脱除,这是因为相同脂肪酸组成的甘一酯沸点低于甘二酯、甘三酯,高于游离脂肪酸,因此甘一酯更容易在物理脱酸和脱臭过程中逸出。精炼后 A、B、C 3 个工厂米糠油的甘二酯相对含量变化较小,分别为 8.00%、8.11%、9.79%,普遍高于菜籽油(2.95% ~ 7.59%)、核桃油等中的甘二酯相对含量^[13]。甘一酯、甘二酯是风险因子三氯丙醇酯和缩水甘油酯的主要前体物质,研究发现甘一酯、甘二酯的存在会使油脂脱臭时 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯含量显著上升^[14]。但也有研究表明甘二酯能降低血脂^[15]、血

糖^[16]。因此,为了保持油脂营养价值、精炼得率,以及避免风险因子的增长,应严格控制米糠油脱臭的时间和温度。A、B、C 3个工厂米糠油的甘三酯相对含量整体呈现增加的趋势,分别增加了23.9%、15.4%、12.8%,这是主要因为游离脂肪酸、甘一酯、甘二酯均在加工过程中被不同程度地脱除,而甘三

酯得以保留,因此甘三酯的相对含量才会显著升高,其中游离脂肪酸的脱除对此贡献最大。

2.3 3个工厂不同加工阶段米糠油的脂肪酸组成及相对含量

3个工厂不同加工阶段米糠油的脂肪酸组成及相对含量见表2。

表2 3个工厂不同加工阶段米糠油的脂肪酸组成及相对含量

样品	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)	亚麻酸 (C18:3)	其他	SFA	UFA
A工厂										
原油	0.24 ^a	17.54 ^a	1.45 ^a	38.52 ^e	39.03 ^a	0.60 ^a	2.13 ^a	0.48 ^a	19.84 ^a	79.68 ^e
脱胶油	0.26 ^a	17.46 ^a	1.25 ^a	39.40 ^d	39.02 ^a	0.50 ^b	1.63 ^a	0.48 ^a	19.47 ^{ab}	80.05 ^{de}
脱蜡油	0.27 ^a	17.35 ^a	1.23 ^a	39.36 ^d	38.69 ^{ab}	0.47 ^b	2.15 ^a	0.49 ^a	19.31 ^{bc}	80.20 ^{ede}
物理脱酸油	0.26 ^a	17.15 ^{ab}	1.36 ^a	40.12 ^c	38.26 ^c	0.55 ^{ab}	1.85 ^a	0.44 ^a	19.32 ^{bc}	80.24 ^{bed}
化学脱酸油	0.26 ^a	16.71 ^d	1.35 ^a	40.21 ^{bc}	38.59 ^{ab}	0.51 ^{ab}	1.84 ^a	0.52 ^a	18.84 ^{cd}	80.64 ^{abc}
脱色油	0.25 ^a	16.79 ^{bc}	1.33 ^a	40.39 ^{abc}	38.66 ^{ab}	0.52 ^{ab}	1.78 ^a	0.29 ^b	18.89 ^{cd}	80.82 ^a
脱臭油	0.25 ^a	16.83 ^{bc}	1.35 ^a	40.57 ^{ab}	38.51 ^{ab}	0.52 ^{ab}	1.70 ^a	0.27 ^b	18.96 ^{bed}	80.77 ^{ab}
冬化油	0.25 ^a	16.57 ^d	1.31 ^a	40.77 ^a	38.53 ^{ab}	0.53 ^{ab}	1.79 ^a	0.26 ^b	18.65 ^d	81.09 ^a
B工厂										
原油	0.30 ^{ab}	17.25 ^{ab}	1.55 ^a	40.10 ^d	37.20 ^b	0.57 ^a	2.22 ^a	0.82 ^a	19.67 ^a	79.52 ^{cd}
脱胶油	0.28 ^{ab}	17.26 ^{ab}	1.56 ^a	40.14 ^d	37.29 ^{ab}	0.58 ^a	2.25 ^a	0.63 ^a	19.68 ^a	79.69 ^c
脱蜡油	0.31 ^a	17.24 ^b	1.49 ^c	40.09 ^d	37.24 ^b	0.57 ^a	2.19 ^a	0.86 ^a	19.61 ^a	79.53 ^{cd}
一次脱色油	0.30 ^{ab}	17.36 ^a	1.49 ^c	40.28 ^d	36.93 ^c	0.58 ^a	2.18 ^a	0.88 ^a	19.73 ^a	79.39 ^d
物理脱酸油	0.28 ^{ab}	16.63 ^f	1.49 ^c	41.06 ^c	37.17 ^b	0.60 ^a	1.93 ^b	0.86 ^a	18.99 ^d	80.15 ^b
化学脱酸油	0.28 ^{ab}	16.66 ^{ef}	1.50 ^{bc}	41.11 ^c	37.44 ^a	0.58 ^a	1.90 ^b	0.52 ^a	19.02 ^{cd}	80.46 ^a
二次脱色油	0.28 ^{ab}	16.73 ^{ef}	1.51 ^b	41.11 ^c	37.24 ^b	0.58 ^a	1.89 ^{bc}	0.66 ^a	19.10 ^{bed}	80.24 ^{ab}
脱臭油	0.28 ^{ab}	16.77 ^{cd}	1.51 ^b	41.39 ^b	37.14 ^b	0.59 ^a	1.67 ^c	0.66 ^a	19.15 ^{bc}	80.20 ^b
冬化油	0.27 ^b	16.87 ^c	1.47 ^d	41.78 ^a	36.87 ^c	0.60 ^a	1.43 ^d	0.72 ^a	19.19 ^b	80.08 ^b
C工厂										
原油	0.30 ^a	17.64 ^a	1.57 ^a	39.67 ^e	37.30 ^c	0.61 ^b	2.14 ^a	0.77 ^a	20.12 ^a	79.11 ^c
脱胶脱酸油	0.28 ^{ab}	16.87 ^c	1.51 ^b	40.20 ^d	37.72 ^a	0.60 ^{bc}	2.15 ^a	0.66 ^{ab}	19.26 ^c	80.07 ^a
脱蜡油	0.29 ^{ab}	16.82 ^c	1.49 ^b	40.21 ^{cd}	37.81 ^a	0.59 ^c	2.16 ^a	0.64 ^{ab}	19.18 ^d	80.18 ^a
脱色油	0.29 ^{ab}	16.84 ^c	1.49 ^b	40.41 ^c	37.58 ^b	0.60 ^c	2.13 ^a	0.67 ^{ab}	19.22 ^{cd}	80.12 ^a
脱臭油	0.28 ^{ab}	17.15 ^b	1.52 ^b	41.15 ^b	37.22 ^{cd}	0.58 ^d	1.42 ^b	0.69 ^{ab}	19.52 ^b	79.79 ^b
冬化油	0.28 ^b	16.82 ^c	1.48 ^b	41.47 ^a	37.10 ^d	0.64 ^a	1.61 ^b	0.59 ^b	19.22 ^{cd}	80.19 ^a

注:SFA为饱和脂肪酸;UFA为不饱和脂肪酸

由表2可知,3个工厂的米糠原油中,油酸相对含量最高,为38.52%~40.10%,其次是亚油酸(37.20%~39.03%)和棕榈酸(17.25%~17.64%),豆蔻酸、硬脂酸、亚麻酸、花生酸相对含量较低,总相对含量不足5%。不同工厂米糠原油的脂肪酸相对含量有所差异,如:A工厂米糠原油的油酸相对含量比B工厂低3.9%,B工厂米糠原油的亚油酸相对含量比A工厂低4.7%,B工厂米糠原油的棕榈酸相对含量则比C工厂低2.2%,其余脂肪酸相对含量太低且差别不大。另外,3个工厂米糠油精炼后亚麻酸相对含量很低,分别是

1.79%、1.43%、1.61%,推测精炼后的米糠油具有较好的热稳定性,适合作为煎炸用油。同一工厂的米糠油在加工过程中主要脂肪酸相对含量总体变化不大,说明加工过程中各个脂肪酸的脱除几乎是同步进行的,没有选择性脱除。Mezouari等^[17]的研究也表明精炼前后米糠油主要脂肪酸的含量变化很小。

2.4 3个工厂不同加工阶段米糠油的色泽和叶绿素含量

3个工厂不同加工阶段米糠油的色泽及叶绿素含量见表3。

表3 3个工厂不同加工阶段米糠油的色泽及叶绿素含量

样品	色泽			叶绿素含量/(mg/kg)		
	A工厂	B工厂	C工厂	A工厂	B工厂	C工厂
原油	Y70 R7.5 B3.0	Y70 R8.0 B3.0	Y70 R10.0 B4.0	35.33 ^a	57.41 ^c	57.81 ^a
脱胶(脱胶脱酸)油	Y70 R5.5 B2.3	Y70 R6.0 B2.0	Y70 R4.0 B1.0	34.28 ^b	59.16 ^b	55.21 ^b
脱蜡油	Y60 R4.0	Y50 R5.5	Y55 R4.0	35.14 ^a	60.03 ^a	55.07 ^b
一次脱色油		Y50 R8.5			nd	
物理脱酸油	Y50 R8.0	Y50 R8.0		nd	nd	
化学脱酸油	Y40 R5.0	Y40 R6.0		nd	nd	
脱色(二次脱色)油	Y30 R4.5	Y35 R4.0	Y40 R6.0	nd	nd	nd
脱臭油	Y30 R4.0	Y30 R3.7	Y30 R4.0	nd	nd	nd
冬化油	Y30 R3.5	Y30 R3.5	Y30 R3.3	nd	nd	nd

注:色泽测定时原油、脱胶(脱胶脱酸)油和脱蜡油用25.4 mm槽,其余油样用133.4 mm槽;nd表示未检出。下同

由表3可知,3个工厂的米糠原油颜色极深,常温下透光度差,脱色难度大。米糠油色泽均呈现经化学脱酸变浅,再经脱色、脱臭持续变浅的规律,与刘玉兰等^[18]的研究结果一致。精炼后3个工厂的米糠油色泽均达到了GB 19112—2003中规定的一级米糠油的要求(Y值 \leq 35、R值 \leq 3.5)。

由表3还可知,3个工厂的米糠原油中叶绿素含量均处于较高水平,分别为35.33、57.41、57.81 mg/kg,倪江枫等^[19]测定未成熟大豆油脂的叶绿素含量为41.25 mg/kg,可见米糠油中叶绿素含量远高于一般植物油。经脱胶、脱蜡工序后,3个工厂的米糠油中叶绿素含量总体无明显变化,而脱色工序则能有效降低米糠油中叶绿素含量。

米糠油较深的颜色以及较高的叶绿素含量无疑会加大脱色难度,增加脱色剂的用量以及中性油的损失,且由2.1可知,脱色剂的使用还会导致酸值升高,不仅增加生产成本还与适度加工的理念相悖,因此改善米糠油色泽需要从整个精炼工艺出发,利用好碱炼工序的吸附作用、物理脱酸和脱臭工序的热脱色作用,从而减少脱色剂以及能源的消耗,提高产品品质和企业效益。

2.5 3个工厂不同加工阶段米糠油微量成分含量

2.5.1 谷维素含量

3个工厂不同加工阶段米糠油的谷维素含量见表4。

由表4可知,3个工厂米糠油中谷维素在加工过程中均出现明显的损失,损失率分别为81.4%、80.8%、94.1%,谷维素损失主要发生在化学脱酸工序,3个工厂米糠油中谷维素在该工序的损失率分别为80.4%、81.0%、95.0%。这与Gopala Krishna等^[20]的研究结果一致,原因是含有酚羟基的谷维素

具有弱酸性,在化学脱酸时可与碱液发生中和反应。化学脱酸后,A、B工厂米糠油中谷维素含量分别为0.42%、0.43%,但C工厂仅剩0.11%,不同的加工条件造成了谷维素保留率的差异,因此需要对米糠油化学脱酸工艺参数进行控制,在能达到脱酸目标的前提下,尽可能提高谷维素的保留率。

由表4还可知,A、B 2个工厂米糠油中谷维素含量在物理脱酸后分别增加了2.4%、4.1%。物理脱酸时米糠油中的脂肪酸被大量脱除,而谷维素沸点高,损失极小。相较于化学脱酸,物理脱酸除了更有利于谷维素的保留,还可以收集副产物脂肪酸,但是物理脱酸时生育酚和角鲨烯同样会发生损失,并且高温会导致米糠油中色素被固化,增加后续脱色的难度。相反,化学脱酸生成的皂具有吸附作用,可以减少脱色工序中脱色剂的使用。因此,米糠油脱酸需要综合考虑以上因素,选择合适的脱酸工艺,优化脱酸工艺参数,适度加工。

表4 3个工厂不同加工阶段米糠油的谷维素含量 %

样品	A工厂	B工厂	C工厂
原油	2.21 \pm 0.07 ^a	2.24 \pm 0.02 ^a	2.19 \pm 0.05 ^a
脱胶(脱胶脱酸)油	2.17 \pm 0.00 ^{ab}	2.18 \pm 0.03 ^b	0.11 \pm 0.00 ^c
脱蜡油	2.09 \pm 0.00 ^c	2.13 \pm 0.01 ^c	0.13 \pm 0.00 ^c
一次脱色油		2.17 \pm 0.00 ^{bc}	
物理脱酸油	2.14 \pm 0.00 ^{bc}	2.26 \pm 0.05 ^a	
化学脱酸油	0.42 \pm 0.00 ^d	0.43 \pm 0.00 ^d	
脱色(二次脱色)油	0.44 \pm 0.00 ^d	0.42 \pm 0.00 ^d	0.21 \pm 0.00 ^b
脱臭油	0.42 \pm 0.00 ^d	0.40 \pm 0.00 ^d	0.14 \pm 0.00 ^c
冬化油	0.41 \pm 0.00 ^d	0.43 \pm 0.01 ^d	0.13 \pm 0.00 ^c

2.5.2 甾醇含量

3个工厂不同加工阶段米糠油的甾醇含量见表5。

表5 3个工厂不同加工阶段米糠油的

样品	甾醇含量 mg/100 g		
	A工厂	B工厂	C工厂
原油	1 471.32 ± 37.63 ^a	1 302.57 ± 25.81 ^a	1 669.89 ± 32.79 ^a
脱胶(脱胶脱酸)油	1 486.08 ± 15.27 ^a	1 222.92 ± 22.11 ^{ab}	1 378.54 ± 13.99 ^b
脱蜡油	1 389.55 ± 27.78 ^b	1 157.86 ± 47.63 ^{bc}	1 330.26 ± 1.11 ^c
一次脱色油		1 115.58 ± 3.71 ^{cd}	
物理脱酸油	1 338.95 ± 12.20 ^b	1 171.06 ± 50.48 ^{bc}	
化学脱酸油	1 253.10 ± 35.48 ^c	1 051.34 ± 33.51 ^{de}	
脱色(二次脱色)油	1 205.66 ± 13.15 ^c	1 018.12 ± 12.68 ^e	1 267.08 ± 7.11 ^d
脱臭油	1 071.72 ± 37.21 ^d	1 044.14 ± 10.20 ^{de}	1 079.76 ± 10.46 ^e
冬化油	1 105.88 ± 2.18 ^d	1 025.98 ± 75.00 ^e	958.69 ± 12.42 ^f

由表5可知,3个工厂米糠油的甾醇含量在加工过程中呈现下降趋势,分别从1 471.32、1 302.57、1 669.89 mg/100 g降至1 105.88、1 025.98、958.69 mg/100 g,损失率分别为24.8%、

21.2%、42.6%,其中化学脱酸工序损失较大。这是因为化学脱酸时游离甾醇转移到皂脚中,离心后随着皂脚从油中脱除,使部分甾醇酯在碱炼时因水解而损失。有研究表明碱炼时碱液浓度越高,甾醇损失率越低^[21],但是碱液浓度过高易引起中性油皂化,导致油脂精炼得率降低,因此化学脱酸工序需要选择合适的碱液浓度,平衡好精炼得率和甾醇保留率之间的关系。正如2.5.1中所分析的,相比于化学脱酸,物理脱酸更有利于甾醇的保留,但是物理脱酸会造成生育酚、角鲨烯的损失,增大脱色难度,工业化生产时应选择合适的脱酸工艺,尽可能使营养成分保留率最大化。

2.5.3 生育酚及生育三烯酚含量

3个工厂不同加工阶段米糠油的生育酚及生育三烯酚含量见表6。

表6 3个工厂不同加工阶段米糠油的生育酚及生育三烯酚含量

样品	mg/kg						总量
	α -生育酚	α -生育三烯酚	β -生育酚	γ -生育酚	$(\beta + \gamma)$ -生育三烯酚	δ -生育三烯酚	
A工厂							
原油	474.10 ^d	152.51 ^e	nd	58.21 ^e	317.16 ^{ab}	nd	1 001.98 ^d
脱胶油	473.86 ^d	162.69 ^{de}	nd	34.85 ^e	323.90 ^a	nd	995.29 ^d
脱蜡油	470.29 ^d	156.43 ^{de}	nd	43.54 ^d	317.68 ^a	nd	987.94 ^d
物理脱酸油	417.01 ^e	175.20 ^d	nd	72.58 ^{ab}	298.26 ^{bc}	nd	963.04 ^d
化学脱酸油	537.19 ^{bc}	313.81 ^{bc}	nd	75.40 ^a	288.41 ^c	nd	1 214.81 ^b
脱色油	559.47 ^{ab}	321.10 ^b	nd	76.53 ^a	285.80 ^c	nd	1 242.90 ^{ab}
脱臭油	509.62 ^c	299.99 ^c	nd	67.03 ^b	262.10 ^d	nd	1 138.74 ^c
冬化油	574.63 ^a	345.90 ^a	nd	76.64 ^a	307.70 ^{ab}	nd	1 304.86 ^a
B工厂							
原油	332.38 ^a	139.58 ^{de}	nd	71.48 ^b	354.83 ^a	nd	898.27 ^{ab}
脱胶油	333.51 ^a	144.07 ^d	nd	71.11 ^b	362.58 ^a	nd	911.28 ^a
脱蜡油	325.54 ^a	124.90 ^f	nd	75.64 ^a	356.56 ^a	nd	882.64 ^{bc}
一次脱色油	283.62 ^e	135.00 ^e	nd	63.82 ^{cd}	363.04 ^a	nd	845.49 ^d
物理脱酸油	228.66 ^d	91.89 ^e	nd	61.45 ^d	271.10 ^b	nd	653.10 ^e
化学脱酸油	307.11 ^b	221.49 ^b	nd	64.15 ^{cd}	274.99 ^b	nd	867.74 ^c
二次脱色油	325.49 ^a	231.79 ^a	nd	66.71 ^c	268.29 ^b	nd	892.28 ^{ab}
脱臭油	224.55 ^{de}	179.80 ^c	nd	41.02 ^e	197.62 ^c	nd	642.99 ^e
冬化油	210.45 ^e	180.24 ^c	nd	36.06 ^f	186.56 ^c	nd	613.31 ^f
C工厂							
原油	346.27 ^b	186.88 ^b	nd	112.24 ^b	454.49 ^c	nd	1 099.88 ^c
脱胶脱酸油	459.16 ^a	318.41 ^a	nd	128.43 ^a	505.23 ^a	25.11 ^{ab}	1 436.34 ^b
脱蜡油	455.61 ^a	326.32 ^a	14.15 ^a	132.68 ^a	493.36 ^{ab}	32.36 ^a	1 454.48 ^a
脱色油	428.09 ^a	263.75 ^a	nd	126.19 ^a	473.49 ^{bc}	17.27 ^b	1 308.80 ^b
脱臭油	171.14 ^c	117.71 ^{bc}	nd	40.16 ^e	216.30 ^d	nd	545.31 ^d
冬化油	137.09 ^e	93.80 ^e	nd	43.03 ^e	214.70 ^d	nd	488.63 ^d

注:未检出 δ -生育酚

由表6可知,A、B、C 3个工厂米糠冬化油中总生育三烯酚在维生素E中占比很大,分别为50.1%、59.8%、63.1%,生育三烯酚的抗氧化能力优于相应的生育酚^[22],因此米糠油有着较好的氧化

稳定性。3个工厂米糠原油中维生素E总量较高,分别为1 001.98、898.27、1 099.88 mg/kg,主要以 α -生育酚、 α -生育三烯酚、 γ -生育酚、 $(\beta + \gamma)$ -生育三烯酚为主。精炼后维生素E总量分别为

1 304.86、613.31、488.63 mg/kg,其中 A 工厂维生素 E 总量增加了 30.2%,B、C 工厂则分别减少了 31.7%、55.6%,这种变化差异主要是脱臭工艺不同所导致的,尤其是在 C 工厂中,其在脱臭工序维生素 E 总量损失 58.3%,A、B 工厂在该工序的损失率分别为 8.4%、27.9%,A 工厂米糠油脱臭损失最少,并且冬化过程中固脂的脱除使得其维生素 E 占比上升,因此 A 工厂精炼后维生素 E 总量反而有所升高。

由表 6 还可知:3 个工厂米糠油在脱臭工序中 γ -生育酚损失最严重,损失率分别为 12.4%、38.5%、68.2%,其次是 α -生育酚,损失率分别为 8.9%、31.0%、60.0%;A、B 工厂米糠油在物理脱酸工序中维生素 E 总量的损失率分别为 2.5%、22.8%。这与刘玉兰等^[23]的研究结果一致,其研究认为葵花籽油中维生素 E 的大量损失可能是高温下长时间的蒸馏使得部分维生素 E 结构被破坏或随脱臭馏出物逸出所致。

综上,加工过程中物理脱酸、脱臭工艺条件的不同都会对米糠油中维生素 E 总量、单体含量造成显著影响,而优化加工工艺可以起到提高维生素 E 保留率的作用。因此,米糠油工业化生产时应合理选择物理脱酸、脱臭工艺,适度加工,减少维生素 E 的损失。

2.5.4 角鲨烯含量

3 个工厂不同加工阶段米糠油的角鲨烯含量见表 7。

表 7 3 个工厂不同加工阶段米糠油的

样品	角鲨烯含量		
	mg/kg		
	A 工厂	B 工厂	C 工厂
原油	2 287.09 ± 63.22 ^a	1 373.90 ± 0.25 ^b	1 363.34 ± 11.10 ^c
脱胶(脱胶脱酸)油	2 363.83 ± 122.25 ^a	1 342.05 ± 39.96 ^b	1 769.46 ± 8.39 ^a
脱蜡油	2 376.83 ± 87.18 ^a	1 468.04 ± 65.67 ^a	1 829.17 ± 93.48 ^a
一次脱色油		1 334.57 ± 11.29 ^b	
物理脱酸油	1 783.11 ± 5.98 ^b	223.83 ± 15.22 ^c	
化学脱酸油	1 601.74 ± 17.23 ^c	227.13 ± 8.25 ^c	
脱色(二次脱色)油	1 317.78 ± 138.90 ^d	174.64 ± 1.99 ^c	1 664.65 ± 22.95 ^b
脱臭油	776.38 ± 21.07 ^c	69.02 ± 6.08 ^d	50.54 ± 1.01 ^d
冬化油	779.66 ± 24.83 ^c	53.04 ± 2.04 ^d	49.85 ± 1.03 ^d

由表 7 可知,3 个工厂米糠油的角鲨烯在精炼过程中损失严重,分别从米糠原油中的 2 287.09、1 373.90、1 363.34 mg/kg 降至 779.66、53.04、49.85 mg/kg,保留率仅为 34.1%、3.9%、3.7%。A、B 工厂米糠油在物理脱酸工序角鲨烯损失率分别为 25.0%、83.2%,而 A、B、C 3 个工厂米糠油在

脱臭工序角鲨烯损失率分别高达 41.1%、60.5%、97.0%,角鲨烯的损失主要发生在物理脱酸和脱臭工序。这是因为物理脱酸和脱臭工序具有较高的温度(一般在 200℃ 以上)和真空环境,促使角鲨烯,低相对分子质量的醛类、酮类和脂肪酸从油脂中逸出。对比 3 个工厂米糠油样品不难发现:A 工厂在物理脱酸、脱臭时角鲨烯损失远低于 B、C 工厂,因此最终其角鲨烯保留率也最高;B 工厂角鲨烯大部分在物理脱酸时损失;而 C 工厂角鲨烯则是在脱臭时几乎全部进入脱臭馏出物中。因此,米糠油精炼过程中要控制物理脱酸、脱臭工艺条件,避免过度加工,同时结合其他工序以降低物理脱酸、脱臭的难度,如合理运用化学脱酸,降低物理脱酸难度,并且还可以改善色泽,减少脱色剂的使用量,从而减轻油脂的白土味,降低脱臭工序的难度。

综上,A 工厂米糠油中角鲨烯、维生素 E 保留率都明显优于另外两个工厂,说明 A 工厂物理脱酸、脱臭工序的温度和真空度更低,时间更短。而 C 工厂化学脱酸时谷维素、甾醇损失率远高于其他两个工厂,尤其是谷维素损失率高达 95.0%,其脱臭时维生素 E、角鲨烯的损失率也是 3 个工厂中最高的,因而 C 工厂米糠油精炼工艺对营养成分的保留效果最差,但 C 工厂在化学脱酸副产物中可以收集到大量谷维素钠盐,这是制备谷维素的主要原料^[24],且其脱臭馏出物中收集到维生素 E 和角鲨烯等副产物的量高于 A、B 工厂,而这些活性成分的价格远高于米糠油,因此 C 工厂可通过副产物加工取得较好的经济效益。另外,由于化学脱酸、脱色、脱臭比较彻底,C 工厂精炼米糠油中非甘油酯成分最少,色泽也明显最佳,对于消费者来说,C 工厂的产品观感上或许更具竞争力。A、B 工厂精炼米糠油的营养价值更高,更符合大众对于健康油脂的追求。

3 结论

精炼过程会对米糠油的理化指标、组成及微量成分造成不同程度的影响。A、B、C 3 个工厂米糠原油精炼后其酸值、过氧化值均达到 GB/T 19112—2003 中一级米糠油的标准。精炼过程中 3 个工厂的米糠油脂肪酸组成无明显变化,游离脂肪酸含量的变化趋势和酸值的变化趋势一致,甘一酯含量降低了 58.9%~84.9%(主要是在物理脱酸和脱臭工序脱除),甘二酯含量变化不大,甘三酯含量增加了 12.8%~23.9%(主要是因为油脂中其他成分减少所引起)。精炼后米糠油中叶绿素被有效脱除,色泽均达到国标一级油标准。米糠油中微量成分变化极大,其中:谷维素损失率高达 80.8%~94.1%,主

要在化学脱酸时损失;甾醇主要在化学脱酸时损失,损失率为21.2%~42.6%;生育酚和生育三烯酚的含量变化有所不同,A工厂维生素E含量增加了30.2%,B、C工厂维生素E损失率分别为31.7%、55.6%;角鲨烯损失率为65.9%~96.3%,主要在脱臭时损失。综上,企业应根据自己的定位,合理调整精炼工序,优化精炼工艺参数,生产出符合企业追求的米糠油产品。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2021.
- [2] 王瑞元. 充分利用米糠、玉米胚芽资源,为国家增产油脂[J]. 中国油脂, 2009,34(6): 3-5.
- [3] PUNIA S, KUMAR M, SANDHU K S, et al. Rice-bran oil: An emerging source of functional oil[J/OL]. J Food Process Preserv, 2021, 45(4): 318 [2023-03-08]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15318>.
- [4] 霍建聪,杨坚,欧丽兰. 米糠油的特性及其精炼技术的研究进展[J]. 粮油加工与食品机械,2005(3):45-47,50.
- [5] CHOI Y, KONG K, KIM Y A, et al. Induction of Bax and activation of caspases during β -sitosterol-mediated apoptosis in human colon cancer cells[J]. Int J Oncol, 2004, 23(6):1657-1662.
- [6] OKOLI C O, AKAH P A. Mechanisms of the anti-inflammatory activity of the leaf extracts of *Culcasia scandens* P. Beauv (Araceae) [J]. Pharmacol Biochem Behav, 2004, 79(3): 473-481.
- [7] CHANDRASHEKAR P, PRASANTH KUMAR P K, RAMESH H P, et al. Hypolipidemic effect of oryzanol concentrate and low temperature extracted crude rice bran oil in experimental male wistar rats [J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(7): 1278-1285.
- [8] REDDY L H, COUVREUR P. Squalene: A natural triterpene for use in disease management and therapy[J]. Adv Drug Deliv Rev, 2009, 61(15): 1412-1426.
- [9] 曹健,赵菁,雷芬芬,等. 稻米油加工过程营养成分及有害物质变化趋势研究[J]. 粮油食品科技, 2020,28(1): 11-16.
- [10] PESTANA V R, ZAMBIAZI R C, MENDONÇA C R B, et al. Quality changes and tocopherols and γ -oryzanol concentrations in rice bran oil during the refining process [J]. J Am Oil Chem Soc, 2008, 85(11): 1013-1019.
- [11] LIU R J, LIU R R, SHI L K, et al. Effect of refining process on physicochemical parameters, chemical compositions and *in vitro* antioxidant activities of rice bran oil[J]. LWT - Food Sci Technol, 2019,109: 26-32.
- [12] 吴雪辉,何俊华,翁依洵,等. 油茶籽油精炼过程中品质指标的变化规律研究[J]. 中国粮油学报, 2022,37(4): 135-140.
- [13] 张家枫,刘玉兰,孙国昊,等. 不同食用油的甘油酯组成、3-MCPD酯和GEs含量研究[J]. 中国油脂,2020, 45(12):38-43.
- [14] WEIBHAAR R, PERZ R. Fatty acid esters of glycidol in refined fats and oils[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2010, 112(2): 158-165.
- [15] SAITO S, YAMAGUCHI T, SHOJI K, et al. Effect of low concentration of diacylglycerol on mildly postprandial hypertriglyceridemia[J]. Atherosclerosis, 2010,213(2): 539-544.
- [16] XU T C, JIA M, LI XIA, et al. Intake of diacylglycerols and the fasting insulin and glucose concentrations: A meta-analysis of 5 randomized controlled studies[J]. J Am Coll Nutr, 2018, 37(7): 598-604.
- [17] MEZOUARI S, EICHNER K. Trans fatty acid content and positional distribution in refined and heated rice bran oil [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2008,110(11): 1058-1061.
- [18] 刘玉兰,宋二立,朱文学,等. 原油品质和精炼过程对油莎豆油综合品质的影响[J]. 中国油脂, 2022,47(7): 9-14, 21.
- [19] 倪江枫,姜碧若,杨静媚,等. 未成熟与成熟大豆油的成分及低温结晶特性分析[J]. 中国油脂,2023,48(6): 32-38, 66.
- [20] GOPALA KRISHNA A G, HEMAKUMAR K H, KHATOON S. Acidity of oryzanol and its contribution to free fatty acids value in vegetable oils[J]. J Am Oil Chem Soc, 2006, 83(12): 999-1005.
- [21] 郑淑敏,马传国,仝莹莹,等. 玉米胚芽油碱炼脱酸过程中保留两态植物甾醇的研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(3): 4-7.
- [22] 毕艳兰. 油脂化学[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [23] 刘玉兰,陈莉,胡爱鹏,等. 脱臭工艺条件对葵花籽油综合品质影响的研究[J]. 中国油脂, 2018,43(10): 1-7.
- [24] PESTANA -BAUER V R, ZAMBIAZI R C, MENDONÇA C R B, et al. γ -Oryzanol and tocopherol contents in residues of rice bran oil refining[J]. Food Chem, 2012, 134(3): 1479-1483.