

棉籽油硬脂和全氢化棉籽油硬脂的组成、 热性质和微观结构分析

殷晓琳, 杨国龙, 刘 伟, 梁少华, 孟鹏程, 孙 聪

(河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001)

摘要:为扩大棉籽油用途,提高其附加值,采用气相色谱、高效液相色谱、低场脉冲核磁共振分析仪、差示扫描量热仪、X-射线衍射仪和偏光显微镜分析了棉籽油改性后的产物棉籽油硬脂(COS)和全氢化棉籽油硬脂(FHCOS)的脂肪酸组成、甘三酯组成、SFC含量、热性质和微观结构。结果表明: COS主要由不饱和脂肪酸和非三饱和的甘三酯组成, FHCOS几乎全部由饱和脂肪酸和三饱和甘三酯组成; 随温度升高, COS的SFC不断降低, FHCOS的SFC在温度高于35℃时开始降低, 相同温度下FHCOS的固体脂肪含量(SFC)均高于COS的, COS在结晶和融化过程中均有2个峰, FHCOS有1个峰, FHCOS的融化和结晶温度均高于COS的; COS在15℃时无明确的晶型及稳定的结构, FHCOS为二倍链长堆积的 β' 晶型, 结晶体为针状或棒状, 结晶聚集体为类似玫瑰花状。因此, 以COS和FHCOS代替棕榈油作为生产起酥油、人造奶油、黄油等的基料油具有一定的开发和应用前景。

关键词:棉籽油硬脂; 全氢化棉籽油硬脂; 组成; 热性质; 微观结构

中图分类号: TS222; TQ645.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)03-0012-06

Analysis of compositions, thermal properties and microstructure of cottonseed oil stearin and fully hydrogenated cottonseed oil stearin

YIN Xiaolin, YANG Guolong, LIU Wei, LIANG Shaohua,
MENG Pengcheng, SUN Cong

(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To expand the use of cottonseed oil and increase its added value, the fatty acid compositions, triglyceride compositions, solid fat content (SFC), thermal properties and microstructure of cottonseed oil stearin (COS) and fully hydrogenated cottonseed oil stearin (FHCOS) as modified products of cottonseed oil, were analyzed by gas chromatography, high performance liquid chromatography, low field pulsed nuclear magnetism, differential scanning calorimeter, X-ray diffractometer and polarizing microscope, respectively. The results showed that COS mainly consisted of unsaturated fatty acids and non-trisaturated triglycerides, and FHCOS almost entirely consisted of saturated fatty acids and trisaturated triglycerides. The SFC of COS decreased with the increase of temperature, while the SFC of FHCOS decreased as the temperature was higher than 35℃, and the SFC of FHCOS was higher than that of COS at the same temperature, COS had two peaks in both melting and crystallization, while FHCOS had one peak, and the melting and crystallization temperatures of FHCOS were higher than those of COS. COS had no definite crystal form or stable structure at 15℃, while the crystal of FHCOS was double chain

length- β' type. The crystal cluster of FHCOS was needle-like or rod-like, the morphology of the aggregates of these clusters was rosette-like. The study indicated that COS and FHCOS, as a base oil replaced palm oil for the production of

收稿日期: 2022-02-13; 修回日期: 2022-10-27

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD2100300)

作者简介: 殷晓琳(1996), 女, 硕士研究生, 研究方向脂质高
值化利用(E-mail)979842123@qq.com。

通信作者: 杨国龙, 教授(E-mail)ysl88888@haut.edu.cn。

shortening, margarine, butter has a certain prospect for development and application.

Key words: cottonseed oil stearin; fully hydrogenated cottonseed oil stearin; composition; thermal property; microstructure

棉籽是棉花加工的副产物,由棉籽加工得到的棉籽油中含有50%以上的亚油酸^[1-2],亚油酸是人体必需脂肪酸,因此精炼后的棉籽油是一种有较高营养价值的食用油^[3]。棉籽油中还含有较多的饱和脂肪酸,其中棕榈酸含量为21.6%~24.8%,硬脂酸含量为1.9%~2.4%,因此在温度较低时,会出现絮凝、沉淀等现象,从而影响棉籽油的感官品质、运输和贸易^[4]。对棉籽油进行改性可以扩大其用途,提高其利用价值。棉籽油常用的改性方法有分提和氢化,分提可得到液油和固脂^[5],氢化可改善其色泽、气味和口感^[6]。

油脂的组成会对其热性质和微观结构产生影响^[7],而油脂的热性质和微观结构又会对食品的加工品质造成影响^[8]。食品加工中常用的起酥油、人造奶油等专用油脂的基料油,一般要求其具有稳定的晶型、良好的涂抹性和一定的塑性范围。研究发现,优良的基料油一般为 β' 晶型,油脂中合适的固液比有助于形成晶体网络结构^[9-10]。棉籽油具有形成 β' 晶型的倾向^[11-12]。由棉籽油分提得到的棉籽油硬脂(Cottonseed oil stearin, COS)具有一定的固体脂肪含量(SFC),与棉籽油相比稳定性更好。氢化后的棉籽油硬脂即全氢化棉籽油硬脂(Fully hydrogenated cottonseed oil stearin, FHCOS)的SFC更高,在夏季也能够维持良好的晶体网络结构,并且将油脂全氢化可避免引入反式脂肪酸。本研究对COS和FHCOS的组成、热性质和微观结构进行分析,以期COS和FHCOS代替棕榈油,成为生产起酥油、人造奶油、黄油等油脂产品的基料油提供科学依据,同时为促进我国棉花产业的发展、棉籽油硬脂的开发与应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

COS(分提温度5℃),石河子天润祥油脂公司;FHCOS,由COS氢化得到(氢化条件为钨碳催化剂添加量0.5%、温度150℃、压力0.1 MPa、时间8 h),实验室自制;氢氧化钠、甲醇、三氟化硼,分析纯;正己烷、三氯甲烷、异丙醇、乙腈,色谱纯。

1.1.2 仪器与设备

Agilent 6890N气相色谱仪, Waters E2695 高效

液相色谱仪, Bruker minispec mq20 低场脉冲核磁共振分析仪, Netzsch 204 F1 差示扫描量热仪, Bruker D8 Advance X-射线衍射仪, Zeiss Axioscope 5 偏光显微镜。

1.2 试验方法

1.2.1 脂肪酸组成测定

参照 AOCs Official Method Ce 2-66 对样品进行甲酯化后,采用气相色谱仪测定样品的脂肪酸组成。气相色谱条件:SGE BPX-70 色谱柱(30 m × 250 μm × 0.25 μm);氢火焰离子化检测器;进样口温度和检测器温度分别为250℃和300℃;柱箱升温程序为初始温度170℃,以2℃/min升温至210℃;载气为氮气,流速1 mL/min;氢气流速和空气流速分别为40 mL/min和400 mL/min;进样量1 μL。

1.2.2 甘三酯组成测定

参照孙聪^[13]的方法采用高效液相色谱法测定样品的甘三酯组成。高效液相色谱条件:Symmetry C18 色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm);乙腈和异丙醇作为流动相梯度洗脱,洗脱程序为0~40 min 异丙醇40%,40~45 min 异丙醇升至45%,45~115 min 异丙醇维持45%,115~120 min 异丙醇降至40%;流动相流速0.8 mL/min;样品质量浓度为10 mg/mL(溶剂为三氯甲烷);进样量10 μL;蒸发光检测器温度55℃;空气流速1.8 mL/min。

1.2.3 SFC测定

参照 GB/T 31743—2015 测定样品的 SFC。先将样品放置在80℃水浴中0.5 h以消除结晶记忆,之后转移至0℃维持1 h,再分别将样品在不同温度(0~65℃)下放置0.5 h,并用低场脉冲核磁共振分析仪测定其 SFC。

1.2.4 热性质分析

使用差示扫描量热仪测定样品的熔化与结晶性质。称取10 mg样品于铝制坩埚中密封待测。COS的测定条件为起始温度-40℃,以5℃/min升至80℃,再以5℃/min降至-40℃;FHCOS的测定条件为起始温度0℃,以5℃/min升至80℃,再以5℃/min降至0℃。

1.2.5 微观结构分析

使用X-射线衍射仪分析样品的晶型。分析条

件:放射源 Cu-K α ;波长 1.540 6 Å;电压40 kV;电流 40 mA;小角 2 θ 范围为 1°~10°,扫描速度 1 (°)/min,步长 0.02°;广角 2 θ 范围为 10°~40°,扫描速度 4 (°)/min,步长 0.02°;环境温度 15 °C。

1.2.6 微观形貌观察

将样品在 80 °C 完全熔化后,使用毛细管吸取适量的样品滴至已预热到 80 °C 的载玻片上,加盖已预热的盖玻片,转移至 15 °C 放置 48 h,使用偏光显微镜对放大倍数为 200 倍的样品进行拍摄。

1.2.7 数据处理

本试验所有数据进行 3 次重复测量,使用 SPSS 软件对数据进行处理分析,并使用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 脂肪酸组成

COS 和 FHCOS 的脂肪酸组成如表 1 所示。从表 1 可以看出,COS 主要由亚油酸(43.21%)、棕榈酸(41.67%)和油酸(12.34%)组成,还含有少量的硬脂酸(1.80%)、肉豆蔻酸(0.56%)和棕榈油酸(0.42%)。FHCOS 的脂肪酸组成主要为硬脂酸(56.30%)和棕榈酸(42.28%),其余组分含量均小于 1.00%。从 COS 和 FHCOS 两者的脂肪酸组成可以看出,COS 氢化后肉豆蔻酸含量基本无变化,棕榈酸含量有微量增加,可能是棕榈油酸转变为棕榈酸所致,硬脂酸含量由原来的 1.80% 增加到 56.30%,而油酸含量大幅减少,亚油酸含量未检出,可知硬脂酸含量的增加源于油酸和亚油酸的氢化。全氢化棉籽油的棕榈酸和硬脂酸含量分别为 23.22% 和 73.83%^[14],本研究中 FHCOS 的棕榈酸含量高于全氢化棉籽油,而硬脂酸含量则低于全氢化棉籽油,这可能是 COS 与棉籽油的脂肪酸含量存在差异所致。

表 1 COS 和 FHCOS 的脂肪酸组成和含量 %

脂肪酸	COS	FHCOS
C14:0	0.56 ± 0.00	0.57 ± 0.00
C16:0	41.67 ± 0.05	42.28 ± 0.02
C16:1	0.42 ± 0.00	-
C18:0	1.80 ± 0.00	56.30 ± 0.06
<i>t</i> C18:1	-	0.49 ± 0.01
C18:1	12.34 ± 0.01	0.36 ± 0.05
C18:2	43.21 ± 0.03	-

注: - 表示未检出。下同

2.2 甘油酯组成

甘油酯作为组成脂肪结构的基本单元,其组成影响油脂的晶型和熔化特性^[7]。COS 和 FHCOS 的

甘油酯组成如表 2 所示。

表 2 COS 和 FHCOS 的甘油酯组成和含量 %

甘油酯	COS	FHCOS
LLL	7.94 ± 0.34	-
LOL	3.77 ± 0.30	-
PLL	11.67 ± 0.57	-
OOL	0.20 ± 0.00	-
OPL	2.74 ± 0.13	-
PPL	66.58 ± 1.52	-
StOL	7.11 ± 0.17	-
StOP	-	0.80 ± 0.05
PPSt	-	66.35 ± 0.03
PStSt	-	15.53 ± 0.61
StStSt	-	17.31 ± 0.59
UUU	11.91	-
UUS	21.52	-
USS	66.58	0.80
SSS	-	99.19

注:P. 棕榈酸;St. 硬脂酸;O. 油酸;L. 亚油酸;U. 不饱和脂肪酸;S. 饱和脂肪酸。下同

由表 2 可知:COS 主要由 PPL(66.58%)、PLL(11.67%)、LLL(7.94%)、StOL(7.11%)、LOL(3.77%)和 OPL(2.74%)组成,还含有少量的 OOL(0.20%);FHCOS 主要由 PPSt(66.35%)、StStSt(17.31%)和 PStSt(15.53%)组成,还有少量的 StOP(0.80%)。COS 的甘油酯组成为二饱和单不饱和甘油酯(USS,66.58%)、二不饱和单饱和甘油酯(UUS,21.52%)和三不饱和甘油酯(UUU,11.91%);FHCOS 的甘油酯组成主要为三饱和甘油酯(SSS,99.19%)和少量的 USS(0.80%)。

组成 COS 和 FHCOS 的甘油酯熔点如表 3 所示。

表 3 组成 COS 和 FHCOS 的甘油酯熔点 °C

甘油酯	β' 晶型	β 晶型
LLL	-25.3	-12.3
LOL	-39.0	-13.2
PLL	-4.2	-5.3
OOL	-34.4	-10.1
OPL	-4.7	-0.3
PPL	26.5	21.9
StOL	-3.5	8.2
StOP	21.4	23.5
PPSt	58.7	62.6
PStSt	61.8	64.4
StStSt	64.3	72.5

注:甘油酯熔点使用 Triglyceride Property Calculator; R Shiny 软件(Marangoni Research Lab 实验室,圭尔夫,安大略,加拿大, <http://www.crcfoodandhealth.com/services.php>) 计算得出

由表3可以看出,总体上饱和度高的甘三酯熔点高于饱和度低的甘三酯熔点,COS氢化后,不饱和的甘三酯被氢化为饱和甘三酯,这会导致FHCOS的熔点升高。

2.3 SFC

COS和FHCOS的SFC随温度的变化如图1所示。由图1可知:在0℃时,COS的SFC为46.24%;在35℃时,COS的SFC为0,说明COS在该温度下已经全部熔化。在0℃时,FHCOS的SFC为97.30%,说明在该温度下FHCOS主要由固脂组成,只含有少量的液油;在60℃时,FHCOS的SFC为0,说明在该温度下FHCOS完全以液油形式存在。随着温度的升高,COS的SFC不断降低,在15~25℃之间SFC变化速率最大。FHCOS在0~35℃之间,SFC变化微小,基本呈一条水平线;在35~45℃之间,SFC开始缓慢降低;在45~60℃之间,SFC急速降低,变化速率最大。随着温度的升高,COS和FHCOS的SFC呈现不同的变化趋势,可能是因为两者的甘三酯组成不同。由表2和表3可知,COS的主要组成为含有不饱和脂肪酸的低熔点甘三酯,其中约有26%的甘三酯熔点低于0℃,导致COS在较低的温度下就开始熔化;FHCOS的主要组成为高熔点的三饱和甘三酯,熔点在60℃左右,所以FHCOS在较高的温度下才开始熔化,且组成FHCOS的主要甘三酯熔点接近,这可能导致在45~60℃之间其SFC变化迅速。

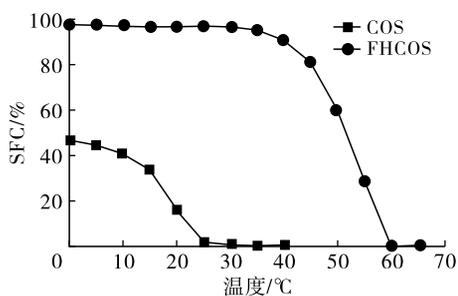


图1 COS和FHCOS的SFC

全氢化棉籽油在0~40℃之间SFC基本无变化,都在95.0%以上,50℃时降至9.7%,60℃时达到0^[14]。与全氢化棉籽油相比,FHCOS在40℃时SFC降至90.31%,低于全氢化棉籽油,50℃时SFC为59.97%,高于全氢化棉籽油,60℃时达到0,与全氢化棉籽油相同。全氢化棉籽油与FHCOS在35~60℃之间SFC不同,这是由于FHCOS与全氢化棉籽油的脂肪酸组成不同,导致两者的甘三酯组成不同,进而造成了两者在不同温度下SFC的差异。施参等^[15]测定市售起酥油的SFC时发现,0℃时SFC

为50%左右,40℃时SFC接近0;Lumor等^[16]研究发现,10℃时SFC为12.5%、30℃时能够完全熔化的油脂可带来良好的口感和涂抹性。COS在30℃时SFC接近0,但与市售起酥油相比熔化过程不够平缓;FHCOS在30℃时SFC过高,可能会产生蜡质口感。为达到市售涂抹类食品专用油脂的SFC,还需要对COS和FHCOS进行调配。

2.4 熔化与结晶性质

用差示扫描量热仪研究升温 and 降温过程中油脂的熔化和结晶行为。COS和FHCOS在连续升温 and 降温过程中的熔化和结晶曲线如图2所示。

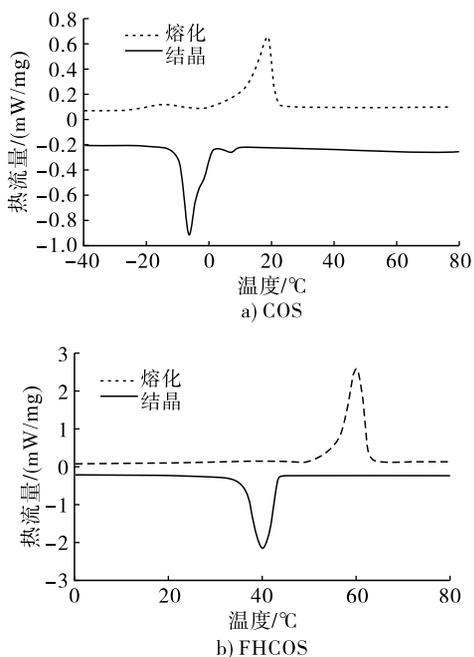


图2 COS和FHCOS熔化和结晶曲线

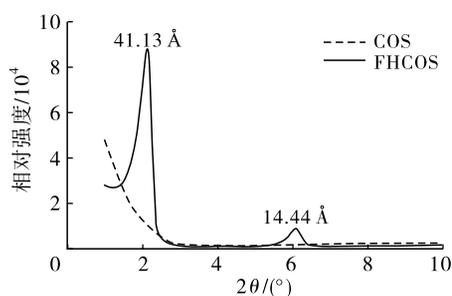
从图2可以看出,COS在熔化和结晶过程中均有2个峰。在熔化过程中,第1个熔化峰的峰值温度为-13.6℃,第2个熔化峰的峰值温度为18.5℃。第1个熔化峰的出现可能是因为低熔点的甘三酯(LLI、LOL、PLL和OOL)吸收热量,发生了熔化。第2个熔化峰的出现可能是由COS组成中占比较大的PPL熔化形成的。在结晶过程中,COS的第1个结晶峰的峰值温度为6.8℃,第2个结晶峰的峰值温度为-6.2℃,说明COS在6℃左右就开始结晶,这与该COS的分提温度(5℃)基本相符。

从图2可以看出,FHCOS在熔化和结晶过程中均只出现了1个峰,这可能与FHCOS的甘三酯组成单一、主要甘三酯熔点接近有关。FHCOS的熔化峰峰值温度为60.2℃,与组成FHCOS的主要甘三酯熔点基本一致;结晶峰峰值温度为40.1℃。COS和

FHCOS 结晶峰的峰值温度(COS 指的是第 2 个峰)均低于熔化峰的峰值温度可能是因为油脂在结晶过程中存在结晶滞后现象^[17]。全氢化棉籽油的熔化峰和结晶峰分别出现在 64 °C 和 47 °C^[14],均高于 FHCOS,与全氢化棉籽油开始降低温度时 SFC 高于 FHCOS 的相对应。对比 COS 和 FHCOS 的熔化与结晶过程发现,氢化后 COS 的熔化温度升高,熔化后再结晶也不需要过低的温度即可达到结晶所需的过冷度,结晶峰窄且高,说明结晶迅速。可见 COS 氢化后可以提高油脂的熔化温度,结晶过程中加速油脂结晶。

2.5 微观结构

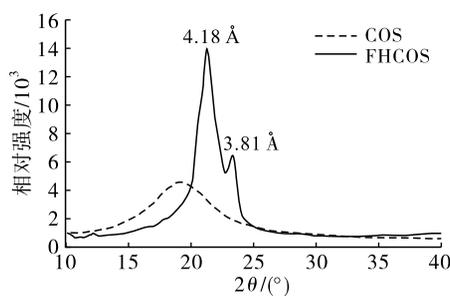
使用 X-射线衍射仪对晶体进行扫描可以得到晶体空间分布信息^[18]。图 3 是 COS 和 FHCOS 的 X-射线衍射谱图。由图 3 可知,COS 没有出现明显的衍射峰,可能是因为 15 °C 时 COS 没有形成稳定的晶体网络结构。FHCOS 在小角衍射区域出现了 2 个衍射峰,短间距分别为 41.13 Å 和 14.44 Å,



a) 小角X-射线衍射谱图

说明 FHCOS 的甘三酯堆积方式为二倍链长方式排列^[19]。FHCOS 在广角衍射区域也出现了 2 个衍射峰,短间距分别为 4.18 Å 和 3.81 Å,表明 FHCOS 为 β' 晶型^[20-21]。与 COS 相比,FHCOS 出现了稳定的晶体结构,这可能是因为 FHCOS 的三饱和甘三酯含量增加,SFC 升高,可用来构建脂肪网络结构,所以相比而言氢化油脂具有更稳定的晶体结构。

全氢化棉籽油在广角衍射区域出现了 3 个衍射峰,对应的晶胞间距分别为 4.61、4.23、3.85 Å,其中 4.61 Å 为 β 晶型的短间距^[14]。与全氢化棉籽油相比,FHCOS 不存在 4.61 Å 的晶胞间距,即不存在 β 晶型。全氢化棉籽油中含有约 74% 的硬脂酸^[14],FHCOS 中含有 56.30% 的硬脂酸,一般含有 C16 和 C18 酰基甘三酯比含有 3 个 C18 酰基的甘三酯更倾向于形成 β' 晶型,说明 FHCOS 更容易以 β' 形式稳定,因此 FHCOS 可以用来制备塑性脂肪如起酥油、人造奶油和黄油等的基料油^[12]。



b) 广角X-射线衍射谱图

图 3 COS 和 FHCOS 小角和广角 X-射线衍射谱图

2.6 微观形貌

图 4 为 COS 和 FHCOS 的微观形貌。从图 4 可以看出,COS 晶体轮廓不明显,表现为模糊的云雾状,其中夹杂着许多细小的颗粒,可能是 COS 的 SFC 较低,没有形成稳定的晶体结构。FHCOS 晶体轮廓清晰,主要为细长的针状或棒状结构,这些针状或棒状结构聚集在一起形成了类似玫瑰花状的形态,晶体结构紧密。FHCOS 的晶体形态与全氢化棉籽油^[14]的相似。这些针状的晶体组成的晶体网络结构有利于包裹液油,并且有利于缓解油脂在储藏过程中由于油脂迁移而产生的起霜现象^[22]。

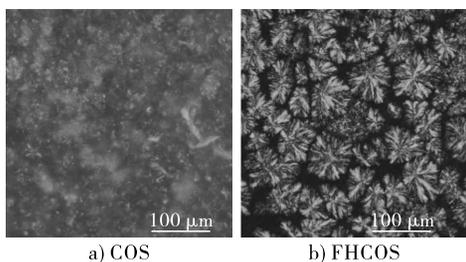


图 4 COS 和 FHCOS 的微观形貌

3 结论

本研究对 COS 和 FHCOS 的组成、热性质和微观结构进行分析。在组成上,COS 和 FHCOS 均含有 40% 以上的棕榈酸,COS 含有 55% 以上的不饱和脂肪酸,FHCOS 的不饱和脂肪酸含量小于 1%;COS 含有多种不饱和甘三酯,FHCOS 主要由 3 种三饱和甘三酯组成,FHCOS 的组成相对单一,这使其在储存过程中可能有良好的氧化稳定性。在热性质方面,随着温度的升高,COS 的 SFC 不断降低,FHCOS 在温度高于 35 °C 时 SFC 开始降低;FHCOS 的熔化和结晶温度都大于 COS,但是其熔化和结晶范围小于 COS,说明 FHCOS 有良好的热稳定性。在微观结构上,COS 在 15 °C 无明确的晶型和稳定的晶体网络结构,FHCOS 为二倍链长堆积的 β' 晶型,晶体为针状或棒状,结晶聚集体为类似玫瑰花状,能够良好地包裹液油。因此,可以 COS 和 FHCOS 为原料进一步与其他油脂进行混合或酯交换,对油脂的理化性质进行改善,研制出受消费者喜爱的油脂产品。

参考文献:

- [1] 王美霞, 马磊, 徐双娇, 等. 我国主栽棉花品种的棉籽油资源评价与分析[J]. 棉花学报, 2017, 29(2): 204-212.
- [2] 印南日, 李培武, 周海燕, 等. 我国食用棉籽油质量安全[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(4): 20-24.
- [3] 商连光, 李军会, 王玉美, 等. 棉籽油分含量近红外无损检测分析模型与应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(3): 609-612.
- [4] 胡永生, 付慧彦, 刘元法. 棉籽油分提新工艺研究[J]. 粮油加工: 电子版, 2015(6): 29-33.
- [5] 左青, 李普选, 左晖. 棉籽油的深度分提工艺[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 150-152.
- [6] 郭霞, 王晓辉, 葛赞. 氢化油的稳定性研究[J]. 广州化工, 2018, 46(24): 75-76, 79.
- [7] NARINE S S, MARANGONI A G. Relating structure of fat crystal networks to mechanical properties: a review [J]. Food Res Int, 1999, 32(4): 227-248.
- [8] DEVI A, KHATKAR B S. Physicochemical, rheological and functional properties of fats and oils in relation to cookie quality: a review [J]. J Food Sci Technol, 2016, 53(10): 3633-3641.
- [9] TORO - VAZQUEZ J F, BRICEÑO - MONTELONGO M, DIBILDOX - ALVARADO E, et al. Crystallization kinetics of palm stearin in blends with sesame seed oil[J]. J Am Oil Chem Soc, 2000, 77(3): 297-310.
- [10] 李琳, 万力婷, 李冰. 塑性脂肪起砂及其控制[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(2): 1-11.
- [11] RIBEIRO A P B, BASSO R C, GRIMALDI R, et al. Influence of chemical interesterification on thermal behavior, microstructure, polymorphism and crystallization properties of canola oil and fully hydrogenated cottonseed oil blends [J]. Food Res Int, 2009, 42(8): 1153-1162.
- [12] GHOTRA B S, DYAL S D, NARINE S S. Lipid shortenings: a review [J]. Food Res Int, 2002, 35(10): 1015-1048.
- [13] 孙聪. 人乳替代脂的组成、相似性评价及制备研究 [D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2018.
- [14] 郭姝婧, 宋振佳, 郑淑敏, 等. 全氢化棉籽油的理化性质、脂肪酸组成及微观结构分析[J]. 中国油脂, 2022, 47(4): 41-45.
- [15] 施参, 常明, 刘睿杰, 等. 米糠固脂与棕榈硬脂混合应用于起酥油的研究 [J]. 中国油脂, 2016, 41(9): 55-58.
- [16] LUMOR S E, KIM B H, AKOH C C. Optimization of solid fat content and crystal properties of a *trans*-free structured lipid by blending with palm midfraction [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(19): 9294-9298.
- [17] 马传国, 苗海卿, 刘会娟, 等. 氢化棉籽油等温结晶动力学研究[J]. 中国油脂, 2012, 37(5): 22-26.
- [18] 胡林彦, 张庆军, 沈毅. X射线衍射分析的实验方法及其应用[J]. 河北理工学院学报, 2004, 26(3): 83-86, 93.
- [19] 何红娟. 超声场中油脂结晶行为及物化性质变化研究 [D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2017.
- [20] DE MAN J M. X-ray diffraction spectroscopy in the study of fat polymorphism [J]. Food Res Int, 1992, 25(6): 471-476.
- [21] BASSO R C, RIBEIRO A P B, MASUCHI M H, et al. Tripalmitin and monoacylglycerols as modifiers in the crystallisation of palm oil [J]. Food Chem, 2010, 122(4): 1185-1192.
- [22] 魏茂林, 徐学兵, 张虹, 等. 蜡烛用氢化棉籽油的特性及应用研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 37-42.

欢迎投稿 <http://tg.chinaoils.cn>

欢迎关注中国油脂微信公众号

扫一扫

