

不同油脂精炼过程中氯离子、3-氯丙醇酯和缩水甘油酯含量的变化

刘玉兰¹, 王璐阳¹, 马宇翔¹, 黄会娜¹, 刘昌树², 王月华³

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 佳格投资(中国)有限公司, 江苏 太仓 215400;

3. 山东三星玉米产业科技有限公司, 山东 邹平 256209)

摘要:从6个油脂加工企业的精炼生产线采集各工序油脂样品,对其中氯离子、3-氯丙醇酯(3-MCPD酯)和缩水甘油酯(GEs)含量进行检测分析,研究不同油脂精炼过程这三种成分的变化规律和差异。结果表明:所有毛油样品中均含有不同程度的氯离子、3-MCPD酯和GEs,氯离子含量为0.412~1.087 mg/kg,3-MCPD酯含量为0.084~0.863 mg/kg,GEs含量为0.028~0.721 mg/kg;经精炼过程的脱胶、脱酸和吸附脱色工序,油脂中氯离子含量基本呈下降趋势,经水蒸气蒸馏脱臭后含量或升高或降低,没有明确的规律性,脱臭油中仍含有0.088~0.310 mg/kg氯离子;在油脂脱臭之前的各工序,3-MCPD酯和GEs含量均保持在较低水平波动,经脱臭后油脂中3-MCPD酯和GEs含量均大幅升高,其含量分别达到1.306~10.021 mg/kg和0.978~4.774 mg/kg,分别为待脱臭油的2.48~25.89倍和2.26~24.30倍,待脱臭油中氯离子含量最高的花生油也是经脱臭过程3-MCPD酯和GEs含量升幅最大的油脂品种(分别从0.060、0.053 mg/kg增加至1.543、1.288 mg/kg)。脱臭是导致成品油中3-MCPD酯和GEs含量大幅升高的最关键工序,脱臭过程中待脱臭油中氯离子含量会影响3-MCPD酯和GEs的形成量,此外脱臭用直接蒸汽中氯离子含量、待脱臭油的甘油酯组成(甘一酯和甘二酯含量)及脱臭工艺条件等因素也对3-MCPD酯和GEs形成量产生影响,为了有效防范和控制油脂脱臭过程3-MCPD酯和GEs的形成、减少脱臭油中3-MCPD酯和GEs含量,必须对上述各因素及各因素之间的相互作用进行持续系统研究,这是基于食用植物油质量安全提升的油脂精炼工艺技术发展的重要内容。

关键词:食用植物油;油脂精炼;氯离子;3-氯丙醇酯;缩水甘油酯;变化规律

中图分类号:TS224.6;TS201.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)10-0010-06

Changes of chloride ion, 3-MCPD esters and GEs content in different oil refining processes

LIU Yulan¹, WANG Luyang¹, MA Yuxiang¹, HUANG Huina¹,
LIU Changshu², WANG Yuehua³

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Standard Investment(China)Co.,Ltd., Taicang 215400, Jiangsu, China;

3. Maize Technology of Shandong Three-Star Co., Ltd., Zouping 256209, Shandong, China)

Abstract: Oils samples of each refining process from six different vegetable oil production enterprises were collected, and their chloride ions, 3-chloropropanol esters (3-MCPD esters) and glycidyl esters (GEs) contents were determined so as to study the changes and differences of the three components in

收稿日期:2020-07-15;修回日期:2020-07-20

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项(2016YFD0401405)

作者简介:刘玉兰(1957),女,教授,硕士,研究方向为油料油脂加工技术与产品质量安全(E-mail)liuy17446@163.com。

different refining processes. The results showed that all crude oil samples contained different levels of chloride ions, 3-MCPD esters and GEs, with chloride ion content of 0.412-1.087 mg/kg, 3-MCPD esters content of 0.084-0.863 mg/kg,

and GEs content of 0.028 – 0.721 mg/kg. After the refining process of degumming, deacidification and bleaching with adsorbent, the chloride ion content in oils showed a downward trend, and there was no clear rule in the change of chloride ion content after steam deodorization. The deodorized oils still contained 0.088 – 0.310 mg/kg chloride ion. Before the deodorization process, the contents of 3 – MCPD esters and GEs kept at low level. After deodorization, the contents of 3 – MCPD esters and GEs in the oil increased significantly, reaching 1.306 – 10.021 mg/kg and 0.978 – 4.774 mg/kg, respectively, which was 2.48 – 25.89 times and 2.26 – 24.30 times as high as that in the oils to be deodorized. The peanut oil with the highest chloride ion content in the oils to be deodorized was also the oil variety with the largest increase in 3 – MCPD esters and GEs contents (from 0.060, 0.053 mg/kg to 1.543, 1.288 mg/kg, respectively) after deodorization. Deodorization was the most critical process leading to a significant increase in the contents of 3 – MCPD esters and GEs. During deodorization, the chloride ion content in the oil to be deodorized was closely related to the formation of 3 – MCPD esters and GEs. In addition, factors such as the chloride ion content in the direct steam for deodorization, the glyceride composition of the oil to be deodorized (monoglyceride and diglyceride contents), and the deodorization process conditions could also affect the formation of 3 – MCPD esters and GEs. In order to effectively prevent and control the formation of 3 – MCPD esters and GEs in the deodorization process of oils and reduce the contents of 3 – MCPD esters and GEs in deodorized oils, continuous and systematic research must be conducted on the above factors and their interactions, which was an important part of the development of oil refining technology based on the improvement of edible vegetable oil quality and safety.

Key words: edible vegetable oil; oil refining; chloride ion; 3 – chloropropanol esters; glycidyl esters; change rule

油脂即甘油三脂肪酸酯,在一定条件下持续高温受热会形成少量的3 – 氯丙醇酯(3 – MCPD酯)和缩水甘油酯(GEs)^[1]。3 – MCPD酯和GEs是近年来人们高度关注的食用油及含油食品中的安全风险成分^[2]。3 – MCPD酯是氯丙醇酯类物质(即三酰甘油的酰基被1个或2个氯取代形成的化合物)中含量占居绝对高比例的一种成分,因此常以3 – MCPD酯含量作为评价氯丙醇类物质风险的指标^[3]。GEs即甘油中1,2位羟基脱水缩合形成环氧基而另一个羟基与脂肪酸发生酯化反应所生成的酯化产物,是一类末端环氧酯,可代谢生成缩水甘油和脂肪酸,并且在一定条件下转变成3 – MCPD^[4]。因此,通常将3 – MCPD酯和GEs并做同一类食品安全风险成分进行研究。3 – MCPD酯自身带有毒性,其分解产物3 – MCPD更是一种致癌性污染物,具有肾脏、生殖和遗传毒性^[5-6]。GEs本身不具有致癌性,但在体内通过脂质代谢分解产生的缩水甘油是具有基因毒性的致癌物(人类2A级致癌物)^[7]。为此,国际上已有多个国家及地区对食用油中3 – MCPD酯和GEs的限量进行评估,2018年欧盟委员会(EC)发布了修订后的(EU)1881/2006号法规,

规定食用植物油中GEs的限量为1 mg/kg,婴儿食品用油中GEs限量为0.5 mg/kg。2019年7月23日,著名的OFI(Oils & Fats International)杂志披露,欧盟委员会建议将食用植物油中3 – MCPD酯的限量设定为1.25 mg/kg,婴幼儿食品及配方食品的限量设定为0.75 mg/kg^[8]。目前,我国虽然还尚未对食用植物油中3 – MCPD酯和GEs含量做出明确限定,但业界已高度关注^[9-10]。

近年的研究表明,不同食用植物油产品中3 – MCPD酯和GEs含量有很大差异^[11-12],并且其中的3 – MCPD酯和GEs主要是在油脂精炼过程的高温脱臭工序形成^[13-14]。油脂脱臭工艺条件(主要是温度和时间)及脱臭过程氯离子的存在是影响3 – MCPD酯和GEs形成的最主要因素^[15],油脂脱臭用直接蒸汽可能会将氯离子带入脱臭系统^[16],但待脱臭油中是否也含有氯离子并将其带入脱臭系统、不同植物油中氯离子含量差异以及在精炼过程其含量的变化规律如何等,均未见报道。不同品种油脂的毛油中是否含有3 – MCPD酯和GEs及在精炼过程其含量如何变化等,也均未见报道。因此,本试验从不同的植物油加工企业采集油脂精炼生产线的毛

油、各工序半成品、脱臭油等样品,对其中氯离子、3-MCPD 酯和 GE_s 含量进行检测,分析研究不同油脂精炼过程这 3 种成分的变化及之间的相关性,以期油脂精炼过程 3-MCPD 酯和 GE_s 的风险防范和控制提供支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大豆油、菜籽油、花生油、葵花籽油、玉米油、米糠油,分别取自相应油脂加工企业的精炼生产线。其中毛油为采用溶剂浸出或预榨浸出方法提取的,脱胶脱酸油为采用碱炼脱酸兼带脱除胶体杂质后的油脂,脱色油为采用固体吸附剂吸附脱色后的油脂,脱臭油为采用高温、高真空、水蒸气蒸馏脱除臭味组分后的油脂。

氘代油酸缩水甘油酯(纯度 $\geq 97\%$)、油酸缩水甘油酯(纯度 $\geq 97\%$)、3-油酸-氯丙醇酯(纯度 $\geq 97\%$)、1,2-二亚油酸-3-氯丙醇酯(纯度 $\geq 97\%$)、1,2-二月桂酸-3-氯丙醇酯-D5(纯度 $\geq 97\%$)标准品,上海安普实验科技股份有限公司。苯基硼酸(纯度 $\geq 97\%$)、正己烷、甲醇、异丙醇、甲基叔丁基醚、乙酸乙酯,均为色谱纯。乙醚、溴化钠、硫酸(质量分数为 98%)、硫酸钠、碳酸氢钠、无水硫酸镁,均为分析纯。氯化钠为优级纯。

Trace1310-ISQ 气相色谱-质谱联用仪、HP-5MS 气相毛细管色谱柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm)、ICS-2100 离子色谱仪,美国 Thermo Fisher 公司;KQ3200DE 数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;Moiresearch 摩尔分析型超纯水器,重庆摩尔水处理设备有限公司;MTN-2800W 氮吹浓缩仪,美国奥特赛恩斯仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 油脂中氯离子含量的测定

(1)样品前处理。称取 5 g 油样于 30 mL 螺纹试管中,用 10 mL 正己烷溶解,再加 5 mL 超纯水,拧紧试管盖,涡旋 30 s 使水与有机相充分接触。超声 30 min 以辅助萃取(超声功率 100%,温度 20 $^{\circ}\text{C}$),然后 4 500 r/min 离心 4 min。将试管中的下层水相过 0.22 μm 有机滤膜至 10 mL 容量瓶中,定容。测定时过 0.22 μm 水相滤膜和 C18 柱(C18 柱依序用 5 mL 色谱纯甲醇、10 mL 超纯水活化)后进离子色谱仪检测。

(2)氯离子含量检测。参照 GB/T 5750.5—2006《生活饮用水标准检验方法 无机非金属指标》中离子色谱法检测氯离子含量。

(3)氯离子标准曲线的绘制。将优级纯氯化钠

在 120 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 4 h,称取 0.164 8 g,用超纯水定容至 1 000 mL 容量瓶中,配制成质量浓度为 100 mg/L 的氯离子标准溶液。用超纯水将质量浓度为 100 mg/L 的氯离子标准溶液分别逐级稀释至质量浓度为 5、2、0.8、0.4、0.1、0.06、0.03、0.01 mg/L,由低到高依次进样用离子色谱仪检测,以氯离子质量浓度为横坐标,离子强度为纵坐标绘制标准工作曲线。对标准曲线进行拟合,得线性回归方程 $Y = 0.306 3X + 0.038$,标准曲线的相关系数(r^2)为 0.999 7。

1.2.2 油脂中 3-MCPD 酯和 GE_s 的测定

参照 GB 5009.191—2016《食品安全国家标准 食品中氯丙醇及其脂肪酸酯含量的测定》及王璐阳等^[16]的方法,油样经酸水解、衍生化后用 GC-MS 测定,通过保留时间(3-MCPD 酯及其内标物的出峰时间分别为 18.12 min 和 18.06 min,GE_s 及其内标物的出峰时间分别为 19.69 min 和 19.62 min)定性,采用同位素内标法进行定量。

GC 条件:HP-5MS 毛细管色谱柱(30 m \times 0.25 mm,0.25 μm);载气为高纯氦气(纯度 $\geq 99.999\%$),流速 1 mL/min;升温程序为 85 $^{\circ}\text{C}$ 保持 12 min,以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 165 $^{\circ}\text{C}$,保持 10 min,再以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 300 $^{\circ}\text{C}$,并保持 8 min;进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$;不分流进样,进样量 1 μL 。

MS 条件:传输线温度 280 $^{\circ}\text{C}$,离子源温度 250 $^{\circ}\text{C}$;电子轰击离子源,电离能量 70 eV;扫描方式为离子监测模式。

1.2.3 数据处理

采用 Excel 2010、Origin 2018 软件进行数据统计分析,采用 Duncan 法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同油脂精炼过程氯离子含量的变化

对大豆油、菜籽油、花生油、葵花籽油、玉米油、米糠油 6 个不同品种油脂精炼过程中氯离子含量进行检测,结果如图 1 所示。

从图 1 可见,6 个不同品种毛油样品中均含有氯离子,其含量为 0.412 ~ 1.087 mg/kg,氯离子含量排序为米糠毛油 > 菜籽毛油 > 大豆毛油 > 玉米毛油 > 花生毛油 > 葵花籽毛油。毛油中氯离子的来源可能有两个方面:一是油料自身含有金属离子^[17],在制油过程中迁移进入毛油中,而油料中的氯离子可能缘于其母体植物生长过程的土壤、水肥及农药等^[18];二是油料在浸出制油过程中所接触的加工助剂如浸出溶剂、直接蒸汽等带入的氯离子,甚至在浸出混合油的沉降除粕末过程中加入盐水,使氯离子

大量进入浸出毛油中^[16]。毛油经脱胶脱酸后,其中氯离子含量均有不同程度的降低,降幅的差别可能与不同毛油脱胶脱酸采用工艺条件的差异有关。通常,根据毛油中胶体杂质含量和酸价的不同,水化脱胶和碱炼脱酸时的加水量和加碱量是不同的,因此形成的油脚和皂脚数量及性状也不同,导致油脚和皂脚对氯离子的吸附脱除程度不同,此外在碱炼脱酸后的水洗过程中,水洗加水量及水洗次数的不同也会影响氯离子的脱除程度。油脂经吸附脱色后,除花生油外其他油脂中氯离子含量均有较大幅度的降低,这归因于固体吸附剂如活性白土、凹凸棒土、活性炭等对氯离子的吸附作用,但不同吸附剂对氯离子的吸附脱除作用是不同的。刘玉兰等^[19]的研究表明,常用的油脂脱色吸附剂自身含有氯离子(10个吸附剂样品中氯离子含量为8.950~187.881

mg/kg),采用不同种类和不同用量的吸附剂对油脂进行吸附脱色,结果会造成脱色油中氯离子含量升高或降低(当吸附剂自身氯离子含量高和用量大时,吸附脱色过程氯离子向油脂中的迁移量大于吸附脱除量,反之则吸附脱除量大于迁移量),采用活性炭YS-900对油脂进行吸附脱色能使油脂中氯离子含量降低83.2%。脱色油再经水蒸气蒸馏脱臭后,脱臭油中仍含有0.088~0.310 mg/kg氯离子,但脱臭油中氯离子含量或升高或降低,没有明确的规律性,其差异可能与脱臭用直接蒸汽中氯离子含量有关,当直接蒸汽中氯离子含量较高时,脱臭油中氯离子含量也随之升高,同时也受脱臭过程形成3-MCPD酯的多少有关,因为3-MCPD酯的生成必然伴随油脂中氯离子的消减。

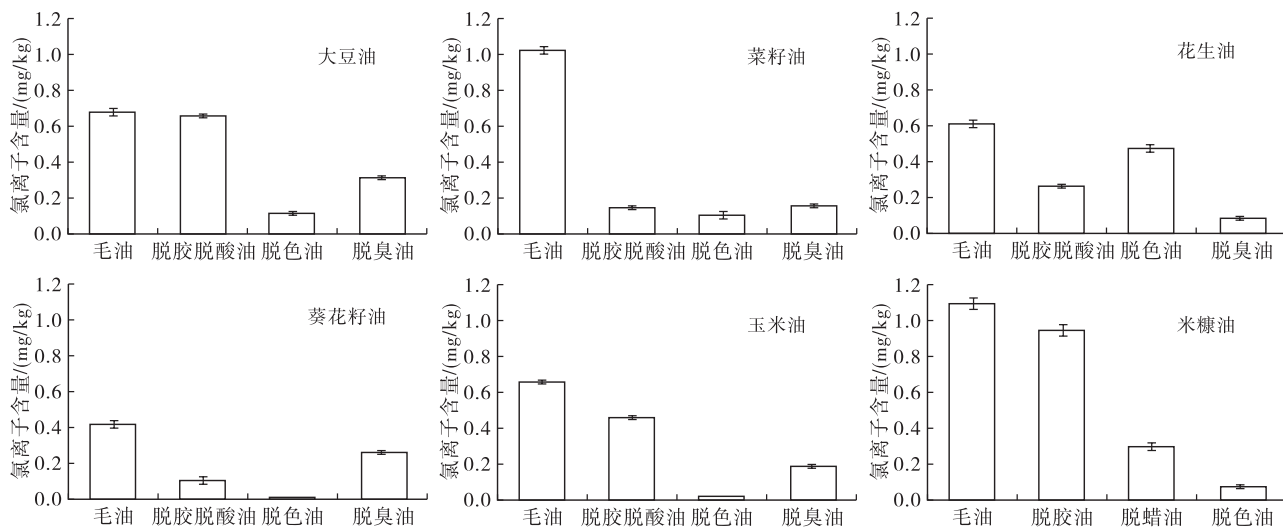


图1 不同油脂精炼过程氯离子含量变化

2.2 不同油脂精炼过程3-MCPD酯和GEs含量的变化

对大豆油、菜籽油、花生油、葵花籽油、玉米油、米糠油6个不同品种油脂精炼过程中3-MCPD酯和GEs含量进行检测,结果如图2所示。

从图2可见,6个不同品种的毛油样品中均含有3-MCPD酯和GEs,3-MCPD酯含量为0.084~0.863 mg/kg,GEs含量为0.028~0.721 mg/kg。3-MCPD酯含量排序为玉米毛油>米糠毛油>菜籽毛油>大豆毛油>花生毛油>葵花籽毛油;GEs含量排序为玉米毛油>米糠毛油>菜籽毛油>大豆毛油>葵花籽毛油>花生毛油。一般认为,在油脂高温脱臭过程中伴随3-MCPD酯和GEs的形成导致了成品油脂中含有这两种风险成分,对于毛油中是否含有3-MCPD酯和GEs却少有报道。但本试验结果显示,毛油中已经存在了不同程度的3-

MCPD酯和GEs。毛油中存在3-MCPD酯和GEs的原因可能是在制油过程中或高温炒籽(如浓香花生油生产中160~180℃高温炒籽过程)或高温湿润蒸炒(料坯在压榨取油前的湿润蒸炒温度为120~130℃)或浸出毛油的蒸发和汽提脱溶(温度可达130℃)所致^[20]。但毛油中3-MCPD酯和GEs含量均处于很低水平。

随油脂精炼过程的进行,至油脂脱臭之前,3-MCPD酯和GEs含量虽然有所波动,但均保持在较低水平。所有油脂经脱臭后,3-MCPD酯和GEs含量均大幅升高,其中:脱臭玉米油中3-MCPD酯和GEs含量达到3.523 mg/kg和2.637 mg/kg,分别是待脱臭油的2.48倍和8.37倍;脱臭葵花籽油中其含量分别达到1.306 mg/kg和0.978 mg/kg,是待脱臭油的11.26倍和12.07倍;脱臭大豆油中其含量分别达到1.435 mg/kg和1.823 mg/kg,是待脱臭油

的 4.77 倍和 2.26 倍;脱臭菜籽油中其含量分别达到 10.021 mg/kg 和 4.774 mg/kg,是待脱臭油的 18.94 倍和 19.10 倍;脱臭花生油中其含量分别为 1.543 mg/kg 和 1.288 mg/kg,是待脱臭油的 25.89 倍和 24.30 倍;脱臭米糠油中其含量分别为 4.029 mg/kg 和 4.258 mg/kg,是待脱臭油的 5.30 倍和

11.48 倍。参照欧盟 (EC) 修订后的 (EU) 1881/2006 号法规中 3-MCPD 酯不大于 1.25 mg/kg 和 GEs 不大于 1.0 mg/kg 的限量指标,6 个不同品种的脱臭油中这两种风险成分的含量基本均超出限量。

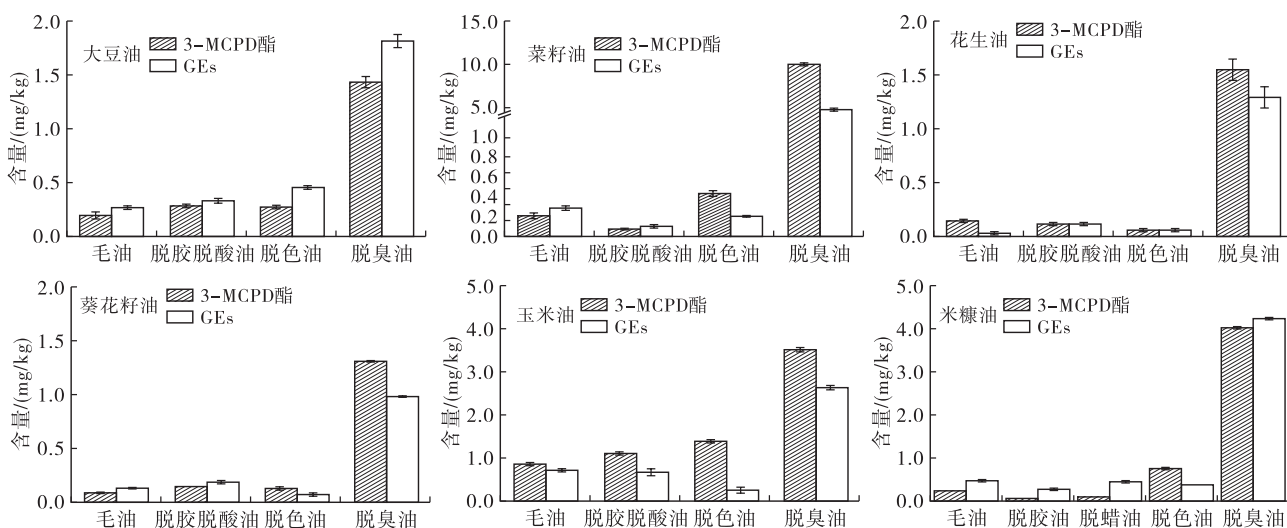


图 2 不同油脂精炼过程 3-MCPD 酯和 GEs 含量变化

分析不同油脂经脱臭过程 3-MCPD 酯和 GEs 含量升幅差异的原因:①可能与不同油脂加工厂所采用脱臭工艺条件的差别有关,不同的油脂加工厂会根据毛油质量及所期望的脱臭油质量指标(如酸价、过氧化值、烟点、色泽等)来调整油脂脱臭条件(如温度、时间、真空度和直接蒸汽用量等),脱臭条件的差异(如温度 230~260℃、时间 30~60 min)对脱臭过程 3-MCPD 酯和 GEs 形成的影响程度不同,即造成脱臭油中这两种风险成分含量的差异;②结合脱臭前后油脂中氯离子含量变化进行分析,发现脱臭阶段 3-MCPD 酯和 GEs 含量增幅最大的花生油在脱臭前后氯离子含量的降幅最大,这表明除脱臭工艺条件的影响之外,氯离子含量对 3-MCPD 酯和 GEs 的生成会产生重要影响;③不同毛油及其待脱臭油的甘油酯组成不同,如甘一酯、甘二酯含量不同,也会对脱臭过程 3-MCPD 酯和 GEs 的生成造成不同影响(甘一酯、甘二酯被认为是形成 3-MCPD 酯和 GEs 的前体物质),以致对脱臭油中这两种风险成分的含量造成影响^[21-22]。为此,若要有效防范和控制油脂脱臭过程 3-MCPD 酯和 GEs 形成、减少脱臭油中 3-MCPD 酯和 GEs 含量,必须从优化脱臭工艺条件(主要是降低脱臭温度和缩短脱臭时间)、减少脱臭系统氯离子含量(包括待脱臭油中氯离子含量和脱臭用直接蒸汽中氯离子含量)及减少待脱臭油中甘一酯、甘二酯含量等 3 个

方面采取措施。同时,还需要对油脂中 3-MCPD 酯和 GEs 的脱除技术进行研究。近期的研究表明^[12,23],采用优选的固体吸附剂可以有效吸附脱除油脂中 GEs(脱除率达 95%),但对 3-MCPD 酯的脱除效果很差;采用分子蒸馏能比较理想地脱除油脂中 3-MCPD 酯和 GEs^[24],两种成分的脱除率可分别达到 79% 和 85.0% 以上,但分子蒸馏过程会造成油脂中维生素 E 和甾醇的大量损失^[25],对食用植物油的营养品质造成不良影响。

3 结论

从不同油脂加工厂采集精炼生产中的大豆油、菜籽油、花生油、葵花籽油、玉米油、米糠油,对其中的氯离子、3-MCPD 酯和 GEs 含量进行检测,结果发现:所有毛油样品中均含有不同程度的氯离子、3-MCPD 酯和 GEs,氯离子含量为 0.412~1.087 mg/kg,3-MCPD 酯含量为 0.084~0.863 mg/kg,GEs 含量为 0.028~0.721 mg/kg;经精炼过程的脱胶、脱酸和吸附脱色工序,油脂中氯离子含量基本呈下降趋势(除花生油在吸附脱色后含量升高之外),经水蒸气蒸馏脱臭后氯离子含量或升高或降低,没有明确的规律性;在油脂脱臭之前的各工序,3-MCPD 酯和 GEs 含量均保持在较低水平波动,经水蒸气蒸馏脱臭后油脂中 3-MCPD 酯和 GEs 含量均大幅升高,脱臭油中这两种成分的含量分别达到 1.306~10.021 mg/kg 和 0.978~4.774 mg/kg,含

量分别为待脱臭油中含量的 2.48 ~ 25.89 倍和 2.26 ~ 24.30 倍,脱臭工序是导致成品油中 3-MCPD 酯和 GEs 大幅升高的最键工序,脱臭油中 3-MCPD 酯和 GEs 含量处于较高的食品安全风险程度。为了有效防范和控制油脂脱臭过程 3-MCPD 酯和 GEs 形成、减少脱臭油中 3-MCPD 酯和 GEs 含量,必须对油脂脱臭工艺条件进行优化和精准控制,并减少待脱臭油和脱臭用直接蒸汽中的氯离子含量,降低待脱臭油中甘一酯、甘二酯含量,同时还需要对上述各因素之间的相互作用进行持续系统研究,这是基于食用植物油质量安全提升的油脂精炼工艺技术发展的重要内容。

参考文献:

- [1] 刘京,王瑛瑶,段章群,等.食用植物油中氯丙醇酯的形成途径与检测方法[J].食品科学,2013,34(21):375-378.
- [2] 金青哲,王兴国.氯丙醇酯——油脂食品中新的潜在危害因子[J].中国粮油学报,2011,26(11):119-123.
- [3] SEEFELDER W, VARGA N, STUDER A, et al. Esters of 3-chloro-1,2-propanediol (3-MCPD) in vegetable oils; significance in the formation of 3-MCPD [J]. Food Addit Contam A, 2008, 25(4):391-400.
- [4] BUHRKR T, WEIBHAAR R, LAMPEN A. Absorption and metabolism of the food contaminant 3-chloro-1,2-propanediol (3-MCPD) and its fatty acid esters by human intestinal Caco-2 cells [J]. Arch Toxicol, 2011, 85(10):1201-1208.
- [5] KNUTSEN H K, ALEXANDER J, BARREGARD L, et al. Update of the risk assessment on 3-monochloropropane diol and its fatty acid esters [J]. EFSA J, 2018, 16(1):5083-5132.
- [6] ROSE M. Risks for human health related to the presence of 3- and 2-monochloropropanediol (MCPD), and their fatty acid esters, and glycidyl fatty acid esters in food [J/OL]. EFSA J, 2016, 14(5):4426 [2020-07-15]. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4426>.
- [7] HUANG G, XUE J, SUN X, et al. Suppression of T lymphocyte activation by 3-chloro-1,2-propanediol mono- and di-palmitate esters in vitro [J]. Toxicol In Vitro, 2018, 51:54-62.
- [8] EUROPEAN UNION. Amending regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of glycidyl fatty acid esters in vegetable oils and fats, infant formula, follow-on formula and foods for special medical purposes intended for infants and young children [J]. Off J Eur Union, 2018(55):27-29.
- [9] 宁柠.油脂工业中缩水甘油酯的产生规律及风险评估研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [10] 吴少明,傅武胜,杨贵芝.食用植物油中脂肪酸氯丙醇酯形成机制的研究进展[J].食品科学,2014,35(1):266-270.
- [11] 卢跃鹏,金绍明,江小明,等.部分省份食用植物油中脂肪酸氯丙醇酯含量水平调查分析[J].中国油脂,2015,40(11):79-84.
- [12] 尹诗琴.油脂加工过程中缩水甘油酯形成的影响因素及其脱除研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [13] 周红茹.油脂中3-氯-1,2-丙二醇及其酯的分布、检测与其在热加工和精炼过程中的变化规律[D].江苏无锡:江南大学,2015.
- [14] 欧阳剑,王维曼,胡志雄,等.油脂精炼工艺条件对3-MCPD形成的影响[J].中国油脂,2014,39(7):58-61.
- [15] 任我行,刘玉兰,马宇翔,等.玉米油脱臭条件对3-氯丙醇酯和缩水甘油酯影响的研究[J].中国油脂,2018,43(4):57-60.
- [16] 王璐阳,刘玉兰,马宇翔,等.油脂脱臭过程氯离子含量对3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的影响[J].食品科学,2018,39(20):320-325.
- [17] CRAFT B D, NAGY K, SANDOZ L, et al. Factors impacting the formation of monochloropropanediol (MCPD) fatty acid diesters during palm (*Elaeis guineensis*) oil production [J]. Food Addit Contam A, 2012, 29(3):354-361.
- [18] HARON K. Nutrient cycling in an oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantation: residues decomposition and implications for management [J]. Exon, 1997, 6(1):127-150.
- [19] 刘玉兰,黄会娜,王璐阳,等.油脂吸附脱色过程氯离子含量变化及其对脱臭油中3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的影响[J].中国油脂,2019,44(10):85-89.
- [20] 刘玉兰.油脂制取与加工工艺学[M].北京:科学出版社,2009:151-250.
- [21] 刘玉兰,张家枫,胡文娜,等.玉米毛油酸价及碱炼脱酸对其甘油酯组成及3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的影响[J].中国油脂,2020,45(2):81-85.
- [22] 刘玉兰,李泽泽,陈文彦,等.不同酸价米糠毛油碱炼脱酸过程甘油酯组成及3-氯丙醇酯和缩水甘油酯含量的变化[J].食品科学,2020,41(6):34-39.
- [23] 刘玉兰,任我行,马宇翔,等.吸附法脱除大豆油中3-氯丙醇酯及缩水甘油酯的研究[J].中国油脂,2018,43(11):57-62.
- [24] 程倩,王风艳,苗木,等.分子蒸馏脱除玉米油中3-氯丙醇酯和缩水甘油酯效果的研究[J].中国油脂,2019,44(7):107-111.
- [25] 黄会娜,刘玉兰,杨争光,等.分子蒸馏法脱除油脂中3-氯丙醇酯和缩水甘油酯[J].食品科学,2020,31(14):135-139.