

不同酸值花生油精炼过程中甘油酯组成及 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯含量变化

刘玉兰¹, 孙钦彩², 马宇翔¹, 张家枫¹, 宋立里²

(1. 河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 山东金胜粮油食品有限公司, 山东 临沂 276600)

摘要:旨在为花生油精炼过程及 3-氯丙醇酯(3-MCPDE)和缩水甘油酯(GEs)防控提供理论支持,对 2 个不同酸值花生原油进行水化脱胶、碱炼脱酸、吸附脱色、蒸馏脱臭,探究花生油精炼过程中质量指标、甘油酯组成、3-MCPDE 和 GEs 含量、甾醇和维生素 E 含量的变化情况。结果表明:酸值(KOH)分别为 2.98、16.53 mg/g 的 2 个花生原油,脱臭后酸值和过氧化值均符合 GB/T 1534—2017 中一级油要求;低酸值和高酸值花生原油的甘油酯组成差异较大,其中高酸值花生油甘油一酯和甘油二酯含量更高,水化脱胶和碱炼脱酸对花生油中甘油三酯含量影响较大,低酸值和高酸值花生原油中甘油三酯含量经水化脱胶后分别降低 0.82、3.26 百分点,经碱炼脱酸分别升高 4.20、7.62 百分点,吸附脱色和蒸馏脱臭对甘油酯含量的影响不大;低酸值和高酸值花生原油中 3-MCPDE 含量经碱炼脱酸分别降低 35.00% 和 33.33%,GEs 含量分别降低 7.87% 和 55.27%,经蒸馏脱臭后 3-MCPDE 含量分别升高 2.21 倍和 2.81 倍,GEs 含量分别升高 1.24 倍和 1.68 倍。此外,低酸值和高酸值花生原油在精炼过程中甾醇损失率分别为 36.63% 和 24.72%,维生素 E 的损失率分别为 30.57% 和 21.01%。综上,精炼过程中,高酸值花生原油的甘油三酯含量更低,在油脂脱臭过程中形成 3-MCPDE 和 GEs 的风险也更大。

关键词:花生油;油脂精炼;甘油酯组成;3-氯丙醇酯;缩水甘油酯;甾醇;维生素 E

中图分类号:TS225.1;TS224.6 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)07-0054-06

Changes of glyceride composition, 3-monochloro-1,2-propanediol ester and glycidyl ester contents in crude peanut oil with different acid values during refining process

LIU Yulan¹, SUN Qincan², MA Yuxiang¹, ZHANG Jiafeng¹, SONG Lili²

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

2. Shandong Jinsheng Grain and Edible Oil Foods Co., Ltd., Linyi 276600, Shandong, China)

Abstract: To provide theoretical support for the prevention and control of 3-monochloro-1,2-propanediol ester (3-MCPDE) and glycidyl ester (GEs), hydrated degumming, alkali refining deacidification, adsorption bleaching, steaming deodorization were carried out on two crude peanut oils with different acid values to explore the changes of quality indexes, glyceride composition, 3-MCPDE and GEs contents, sterol and vitamin E contents in peanut oil during refining process. The results showed that the

acid value and peroxide value of both crude peanut oils (initial acid value 2.98, 16.53 mgKOH/g) after deodorization met the requirements of GB/T 1534-2017 grade 1 peanut oil. The glyceride composition of crude peanut oil with low acid value and high acid value was significantly different, among which the contents of monoglyceride and diglyceride of peanut oil with

收稿日期:2024-01-12;修回日期:2025-04-03

基金项目:山东省重点扶持区域引进急需紧缺人才项目计划(鲁发改动能办[2024]658号);“十四五”重点研发计划课题“大宗粮油食品适度加工全过程安全防护技术集成与示范(2023YFF1104605)”

作者简介:刘玉兰(1957),女,教授,硕士生导师,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。

high acid value were higher than those of peanut oil with low acid value. Hydrated degumming and alkali refining deacidification had a great effect on triglyceride content in peanut oil. The triglyceride content in crude peanut oil with low acid value and high acid value decreased by 0.82 and 3.26 percentage points after hydrated degumming, and increased by 4.20 and 7.62 percentage points after alkali refining deacidification, respectively. Adsorption bleaching and steaming deodorization had little effect on glyceride content. The contents of 3-MCPDE in the crude peanut oils with low acid value and high acid value decreased by 35.00% and 33.33% respectively, and the contents of GEs decreased by 7.87% and 55.27% respectively after alkali refining deacidification. After steaming deodorization, the contents of 3-MCPDE increased by 2.21 times and 2.81 times respectively, and the contents of GEs increased by 1.24 times and 1.68 times respectively. In addition, the loss rates of vitamin E in the crude peanut oils with low acid value and high acid value during the refining process were 30.57% and 21.01% respectively, and the loss rates of sterols were 36.63% and 24.72% respectively. In summary, crude peanut oil with high acid value has lower triglyceride content during refining and has a greater risk of 3-MCPDE and GEs formation during deodorization.

Key words: peanut oil; oil refining; glyceride composition; 3-monochloro-1,2-propanediol ester; glycidyl ester; sterol; vitamin E

3-氯丙醇酯(3-Monochloro-1,2-propanediol ester, 3-MCPDE)和缩水甘油酯(Glycidyl ester, GEs)类食品安全风险成分在食用植物油中的检出率较高,且其不同植物油中的含量差异较大^[1-3],含量差异大的原因与油脂精炼体系中氯离子含量^[4]、脱臭条件^[5]以及原油酸值尤其是待脱臭油中甘油二酯和甘油一酯含量有关^[6-7],因为甘油二酯和甘油一酯是油脂在高温作用下形成 3-MCPDE 和 GEs 的前体物质^[8],而原油酸值会对其甘油酯组成即甘油一酯、甘油二酯和甘油三酯相对含量产生影响。

花生油是我国居民喜爱的食用植物油,2019/2020 年度国内花生消费总量达 1 700 万 t,在过去的 20 年间,花生榨油消费量占花生消费总量的比例在 44%~50%^[9],花生油在我国食用植物油消费市场中占有重要地位。花生原油的酸值(KOH)一般不超过 4 mg/g,但受不良条件影响,如不良天气造成花生成熟度不好,收获后不能及时干燥造成后熟度不好,储存条件不良等,可能会造成花生仁所制取的原油酸值较高^[10-11],甚至超出 GB 2716—2017《食品安全国家标准 食用植物油》限量要求。刘玉兰等^[6,12]对不同酸值的玉米原油和米糠原油进行碱炼脱酸后发现,原油酸值与甘油二酯和甘油一酯总量表现出一定的正相关,碱炼脱酸过程虽然可以脱除游离脂肪酸,但对降低甘油二酯和甘油一酯含量的作用有限,对 3-MCPDE 有一定的脱除作用,但对 GEs 影响很小。目前尚未有关于花生原油酸值

升高是否会影响其甘油酯组成及其对精炼过程 3-MCPDE 和 GEs 含量影响的报道。

本文通过对酸值相差较大的 2 个花生原油样品进行水化脱胶、碱炼脱酸、吸附脱色、蒸馏脱臭等精炼处理,探究不同酸值花生油精炼过程中甘油酯组成以及 3-MCPDE、GEs、甾醇、维生素 E 含量变化,明确花生原油酸值对精炼过程中 3-MCPDE 和 GEs 形成的影响,以期对花生油精炼过程中 3-MCPDE 和 GEs 防范控制提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

低酸值花生原油,取自花生油加工厂压榨原油,酸值(KOH)为 2.98 mg/g。高酸值花生原油,选取酸败的花生仁在实验室压榨制取,酸值(KOH)为 16.53 mg/g。

1,2-二亚油酸-3-氯丙醇酯(纯度≥97%)、1,2-二月桂酸-3-氯丙醇酯-d5(纯度≥97%)、3-油酸-氯丙醇酯(纯度≥97%)、氘代油酸缩水甘油酯(纯度≥97%)、油酸缩水甘油酯(纯度≥97%),上海安普实验科技股份有限公司;胆甾烷醇(纯度≥95%),美国 Sigma 公司; α -、 γ -、 β -、 δ -生育酚(纯度≥98%),北京三区生物技术有限公司。

1.1.2 仪器与设备

Tacel310-ISQ 气相色谱-质谱联用仪、HP-5MS 气相毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μ m),美国 Thermo Fisher 公司;e2695 高效液相色谱

仪、ELSD 2424 蒸发光检测器、2475 荧光检测器,美国 Waters 公司;7890B 气相色谱仪,美国 Agilent 公司;Ultimate SiO₂ 色谱柱(4.6 mm × 250 mm × 5 μm),月旭科技(上海)股份有限公司;MTN-2800W 氮吹浓缩仪,天津奥特赛恩斯仪器有限公司;LD5-10 台式大容量离心机,北京京立离心机有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 花生油样品制备

脱胶花生油:将花生原油搅拌加热至 85 ~ 95 ℃,加入与油温相同的热水(根据原油中磷脂含量计算热水添加量),搅拌反应 25 min,离心分离去除油脚后,将油温升至 125 ℃并恒温 20 min 以干燥脱水,即得脱胶花生油。

脱酸花生油:根据原油酸值计算理论加碱量,再取 0.2% (以花生油质量计)超量碱,分别配制质量分数为 2.50%、8.07% 的碱液,在搅拌条件下缓慢加入 70 ℃左右的脱胶花生油中,中和反应 20 min 左右,将油温升至 90 ℃离心分离去除皂脚,用同温蒸馏水将分离出的油脂洗涤至中性后减压干燥脱除水分,即得脱酸花生油。

脱色花生油:向脱酸花生油中加入 2% (以花生油质量计)的活性白土,在 110 ℃下搅拌反应 25 min 后,离心分离后再过滤去除废白土,得到脱色花生油。

脱臭成品油:将脱色花生油在真空条件(残压约 300 Pa)下加热至 230 ℃,通入水蒸气蒸馏脱臭约 2 h 后,将油温降至 70 ℃以下,去真空,得脱臭成品油。

1.2.2 基本质量指标检测

酸值测定参照 GB 5009.229—2016《食品安全标准 食品中酸价的测定》;过氧化值测定参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》。

1.2.3 甘油酯组成检测

参照张家枫等^[7]的方法,采用高效液相色谱-蒸发光检测器对甘油一酯、甘油二酯含量进行检测,并计算甘油一酯、甘油二酯和甘油三酯相对含量。

1.2.4 3-MCPDE 和 GEs 含量测定

参照 GB/T 44621—2024《粮油检验 GC/MS 法测定 3-氯丙醇脂肪酸酯和缩水甘油脂肪酸酯》中酸法酯交换法测定 3-MCPDE、GEs 含量。

1.2.5 营养伴随物含量测定

甾醇测定参照 GB/T 25223—2010《动植物油脂甾醇组成和甾醇总量的测定 气相色谱法》;维生素 E 测定参照 GB/T 26635—2011《动植物油脂生育酚及生育三烯酚含量测定 高效液相色谱法》。

2 结果与分析

2.1 花生油精炼过程中基本质量指标的变化

不同酸值花生原油在精炼过程中基本质量指标的变化见表 1。

表 1 不同酸值花生原油在精炼过程中的酸值和过氧化值
Table 1 Acid value and peroxide value of crude peanut oils with different acid value during refining process

花生油	酸值(KOH)/(mg/g)	过氧化值/(mmol/kg)
低酸值		
原油	2.98 ± 0.10	0.46 ± 0.01
脱胶油	—	0.43 ± 0.01
脱酸油	1.72 ± 0.05	0.38 ± 0.01
脱色油	—	0.10 ± 0.01
脱臭油	0.50 ± 0.02	0.09 ± 0.02
高酸值		
原油	16.53 ± 0.20	0.12 ± 0.01
脱胶油	—	0.09 ± 0.01
脱酸油	2.53 ± 0.10	0.08 ± 0.01
脱色油	—	0.08 ± 0.02
脱臭油	0.43 ± 0.02	0.04 ± 0.01

注:—表示未检测
Note:—, Not tested

由表 1 可知,虽然 2 个花生原油样品的酸值差异很大,但精炼脱臭油的酸值和过氧化值均达到了 GB/T 1534—2017《花生油》中一级油指标〔酸值(KOH) ≤ 1.5 mg/g,过氧化值 ≤ 6.0 mmol/kg〕。

2.2 花生油精炼过程中甘油酯组成的变化

不同酸值花生原油在精炼过程中甘油酯组成及相对含量变化见表 2。

表 2 不同酸值花生原油在精炼过程中甘油酯组成及相对含量
Table 2 Composition and relative content of glycerides of crude peanut oils with different acid value during refining process

花生油	甘油一酯	甘油二酯	甘油三酯
低酸值			
原油	1.14 ± 0.02	5.92 ± 0.01	92.94 ± 0.12
脱胶油	2.30 ± 0.04	5.58 ± 0.08	92.12 ± 0.16
脱酸油	1.20 ± 0.01	2.48 ± 0.01	96.32 ± 0.02
脱色油	1.93 ± 0.02	3.40 ± 0.01	94.67 ± 0.03
脱臭油	1.94 ± 0.04	4.00 ± 0.01	94.06 ± 0.04
高酸值			
原油	4.60 ± 0.01	7.06 ± 0.02	88.34 ± 0.10
脱胶油	6.33 ± 0.01	8.59 ± 0.05	85.08 ± 0.06
脱酸油	3.31 ± 0.04	3.99 ± 0.03	92.70 ± 0.12
脱色油	3.08 ± 0.01	4.03 ± 0.03	92.89 ± 0.17
脱臭油	2.79 ± 0.01	4.07 ± 0.06	93.14 ± 0.22

由表 2 可知,不同酸值花生原油的甘油酯含量有很大差异,低酸值花生原油中甘油三酯含量达

92.94%,而高酸值花生原油中甘油三酯含量仅为88.34%,高酸值花生原油中甘油一酯和甘油二酯含量明显高于低酸值花生原油。可见,随酸值升高,花生原油中甘油三酯含量降低,而甘油一酯、甘油二酯含量升高。

相比原油,低酸值脱胶油中甘油三酯、甘油二酯含量有少许降低,分别降低0.82、0.34百分点,甘油一酯含量则明显升高(1.16百分点),显示脱胶过程伴随甘油三酯和甘油二酯的逐级水解;高酸值脱胶油中甘油三酯含量明显降低(3.26百分点),甘油二酯和甘油一酯含量明显升高,分别升高1.53百分点和1.73百分点。可见,对于高酸值花生油,水化脱胶对甘油三酯水解为甘油二酯的作用更强,同时伴随着甘油二酯水解为甘油一酯的较强作用。

与脱胶油相比,低酸值、高酸值脱酸油中甘油三酯含量均明显升高,分别升高4.20、7.62百分点,而甘油二酯和甘油一酯含量均降低,分别降低3.10、1.10百分点和4.60、3.02百分点。考虑碱炼脱酸过程不会合成新的甘油酯,因此甘油三酯含量的升

高实际是由甘油二酯和甘油一酯含量降低所致,减少的甘油二酯和甘油一酯可能转移至皂脚和水洗废水中,被计入碱炼脱酸过程的油脂精炼损耗。由此可见,随酸值升高,碱炼脱酸过程花生油中甘油二酯和甘油一酯相对含量的降幅增大,意味着高酸值油脂在碱炼脱酸过程中油脂损耗高的原因不仅是脱除了较多的游离脂肪酸,同时还与部分甘油二酯和甘油一酯的去除有关。

与脱酸油相比,低酸值脱色油中甘油三酯含量降低1.65百分点,高酸值脱色油中甘油三酯含量无明显变化(仅升高0.19百分点)。相比于脱色油,低酸值脱臭油中甘油三酯含量降低0.61百分点,高酸值脱臭油中甘油三酯含量升高0.25百分点。可见,吸附脱色和蒸馏脱臭过程对花生油甘油酯含量的影响相对较小。

2.3 花生油精炼过程中 3-MCPDE 和 GE_s 含量变化

不同酸值花生原油在精炼过程中 3-MCPDE 和 GE_s 含量变化见图 1。

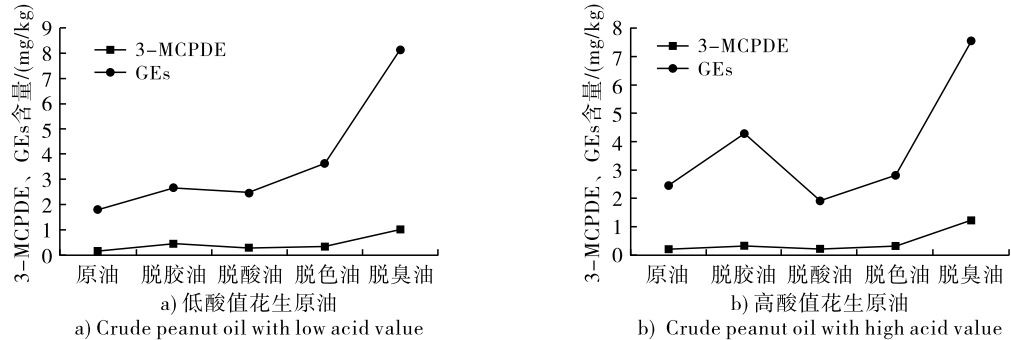


图 1 不同酸值花生原油精炼过程中 3-MCPDE 和 GE_s 含量变化

Fig. 1 Changes of 3-MCPDE and GE_s contents in crude peanut oils with different acid values during refining process

由图 1 可见,精炼过程中,2 个花生油样品中 GE_s 含量明显高于 3-MCPDE 含量,且 2 种成分均表现出在脱胶后小幅升高,脱酸后小幅降低,脱色后小幅升高,脱臭后明显升高的变化趋势,且高酸值花生原油中 GE_s 含量高于低酸值花生原油。

水化脱胶后,低酸值和高酸值花生油的 GE_s 含量分别由 1.79 mg/kg 上升至 2.67 mg/kg,由 2.44 mg/kg 上升至 4.27 mg/kg,分别升高 0.49 倍和 0.75 倍,高酸值花生油的 GE_s 含量在水化脱胶后增幅更大;3-MCPDE 含量则分别由 0.15 mg/kg 上升至 0.45 mg/kg,由 0.20 mg/kg 上升至 0.31 mg/kg,分别升高 2 倍和 0.55 倍,低酸值花生油的 3-MCPDE 含量在水化脱胶后增幅更大。

碱炼脱酸后,低酸值和高酸值花生油的 GE_s 含量均下降,分别降至 2.46 mg/kg 和 1.91 mg/kg,相

比脱胶油,降幅分别为 7.87% 和 55.27%;3-MCPDE 含量也均下降,降幅分别为 35.00% 和 33.33%。脱酸后 2 个花生油中 3-MCPDE 和 GE_s 含量均小幅下降的原因可能是,在碱炼脱酸过程形成的皂脚对 GE_s 和 3-MCPDE 的吸附脱除作用及碱炼脱酸油水洗过程的脱除作用所致。

吸附脱色后,相比脱酸油,低酸值和高酸值花生油的 GE_s 含量均上升,分别升至 3.63 mg/kg 和 2.81 mg/kg;3-MCPDE 含量也均增加,分别增至 0.34 mg/kg 和 0.32 mg/kg。其原因可能是吸附剂的添加导致的外源性氯离子的增加和较高的吸附反应温度造成 GE_s 和 3-MCPDE 含量升高。据王璐阳^[4]的研究报道,常用的油脂脱色吸附剂如白土、硅藻土、凹凸棒土和活性炭中氯离子含量为 8.950 ~ 187.881 mg/kg,若吸附剂本身含有较高浓度的氯离

子,在吸附脱色过程中有可能将氯离子引入油脂中,造成脱色油中氯离子含量升高,进而促使 GEs 和 3-MCPDE 的形成。

脱臭后,低酸值和高酸值花生油中 GEs 含量分别大幅增至 8.13 mg/kg 和 7.54 mg/kg,相比脱色油分别升高 1.24 倍和 1.68 倍;3-MCPDE 含量分别增至 1.09 mg/kg 和 1.22 mg/kg,分别升高了 2.21 倍和 2.81 倍。可见,高温脱臭过程是 GEs 和 3-MCPDE 形成的关键工序,这与国内外众多的文献报道^[13-14]一致,另外高酸值花生油风险更大。

2.4 花生油精炼过程中营养伴随物含量的变化

植物甾醇是植物油中一类重要的营养物质,它可以通过降低人体胆固醇含量来减少心血管疾病的风险。不同酸值花生原油在精炼过程中甾醇含量的变化见表 3。

表 3 不同酸值花生原油精炼过程中甾醇含量的变化
Table 3 Changes of sterol content in crude peanut oils with different acid values during

refining process						mg/100 g
花生油	菜油甾醇	豆甾醇	β -谷甾醇	谷甾烷醇	总甾醇	
低酸值						
原油	28.61	20.21	125.66	15.33	189.81	
脱胶油	27.42	18.90	113.60	14.82	174.74	
脱酸油	27.39	17.76	106.55	13.46	165.16	
脱色油	26.37	15.42	88.19	10.25	140.23	
脱臭油	20.67	12.25	82.96	4.41	120.29	
高酸值						
原油	41.08	30.82	171.02	21.59	264.51	
脱胶油	38.57	29.76	168.19	20.40	256.92	
脱酸油	36.48	21.44	136.70	17.10	211.72	
脱色油	30.38	19.40	135.34	17.26	202.38	
脱臭油	30.71	19.71	133.46	15.25	199.13	

由表 3 可知,不同酸值花生原油样品中总甾醇含量有较大差异,这可能与花生品种^[15]不同有关。随着油脂精炼的进行,花生油中总甾醇含量呈现持续下降趋势,低酸值和高酸值花生油在精炼过程中甾醇损失率分别为 36.63% 和 24.72%。

维生素 E 是一种天然抗氧化成分,对人体健康具有重要作用。不同酸值花生原油在精炼过程中维生素 E 含量的变化见表 4。

由表 4 可知,不同酸值花生原油样品中维生素 E 含量也有差异。低酸值和高酸值花生原油中维生素 E 均以 α -生育酚含量最高,分别占总含量的 51.70%、57.19%。低酸值和高酸值花生油中维生素 E 含量随精炼过程的进行均呈现下降趋势,维生

素 E 的损失率分别为 30.57% 和 21.01%,其中脱臭过程维生素 E 损失量最大,损失率分别为 20.79% 和 13.99%,其次为碱炼脱酸过程,损失率分别为 10.45% 和 6.70%。2 个花生原油精炼后的成品油中,维生素 E 含量均在温运启等^[16]所报道的花生油中维生素 E 含量范围(282.5~719.3 mg/kg)之内。

表 4 不同酸值花生原油精炼过程中维生素 E 含量的变化
Table 4 Changes of vitamin E content in crude peanut oils with different acid values during

refining process				mg/kg
花生油	α -生育酚	γ -生育酚	δ -生育酚	总含量
低酸值				
原油	390.71	355.62	9.34	755.67
脱胶油	390.41	352.77	9.01	752.19
脱酸油	360.55	305.77	7.22	673.54
脱色油	355.64	299.45	7.32	662.41
脱臭油	300.23	219.23	5.21	524.67
高酸值				
原油	401.56	288.31	12.22	702.09
脱胶油	399.35	284.75	10.28	694.38
脱酸油	377.94	262.32	7.63	647.89
脱色油	377.79	259.34	7.61	644.74
脱臭油	353.79	200.78	未检出	554.57

3 结 论

对不同酸值花生原油在水化脱胶、碱炼脱酸、吸附脱色、蒸馏脱臭全精炼过程中甘油酯组成,3-MCPDE 和 GEs 含量以及营养伴随物含量变化进行了研究。结果显示:油脂精炼过程,脱胶和脱酸对花生油中甘油酯含量影响较大,脱色和脱臭则影响较小,高酸值花生油的甘油三酯含量更低,甘油一酯、甘油二酯含量更高。脱臭后花生油的 GEs 和 3-MCPDE 含量大幅升高,表明高温脱臭过程是 GEs 和 3-MCPDE 形成的关键工序,且高酸值花生油风险更大。不同酸值花生油的维生素 E 和植物甾醇在精炼过程中均呈下降趋势。为减控花生油精炼生产中 GEs 和 3-MCPDE 的风险,应采用更加精准的精炼工艺条件分别对不同酸值花生油进行精炼,如:通过优化碱炼脱酸工艺条件降低待脱臭油中甘油二酯和甘油一酯含量、优选不含或少含氯离子的油脂脱色吸附剂减少待脱臭油中氯离子含量、采用适度脱臭尤其是双温脱臭工艺技术等,减少和控制脱臭过程 GEs 和 3-MCPDE 的形成,以期在保证花生油精炼工艺效果的同时提升花生油的安全品质和营养品质。

参考文献:

[1] 刘卿,周萍萍,杨大进. 2015—2017 年中国市售食用植物油中氯丙醇酯和缩水甘油酯的污染状况[J]. 卫生研

- [2] 侯靖, 卢跃鹏, 周晓婷, 等. 市售植物油中氯丙醇酯和缩水甘油酯污染水平研究[J]. 中国油脂, 2024, 49(9): 85–91.
 - [3] 华从伶, 张连军, 王海涛, 等. 进口食用植物油中3-氯丙醇酯的污染及监管研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(6): 52–56.
 - [4] 王璐阳. 油脂精炼过程氯离子含量变化对3-氯丙醇酯和缩水甘油酯形成影响的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018.
 - [5] 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.
 - [6] 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.
 - [7] 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.
 - [8] 朱梦云. 甘一酯甘二酯及油脂精炼过程对3-MCPDEs和GEs影响的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018.
 - [9] 张立伟, 王辽卫. 我国花生产业发展状况、存在问题及政策建议[J]. 中国油脂, 2020, 45(11): 116–122.
 - [10] 李尤好, 刘潇, 沈飞, 等. 高温储藏条件对花生油脂和蛋白质品质劣变的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 105–111.
 - [11] 王允, 李淑芳, 尹海燕, 等. 不同储藏条件对花生品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4544–4551.
 - [12] 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): 25–30.
 - [13] 王风艳, 周澍堃, 刘孟涛, 等. 食用油加工过程中3-氯丙醇酯脂肪酸酯生成的影响因素研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(10): 106–110.
 - [14] WEIBHAAR R, PERZ R. Fatty acid esters of glycidol in refined fats and oils[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2010, 112(2): 158–165.
 - [15] 张建树, 王强, 刘红芝, 等. 不同地区花生品种 V_E 、植物甾醇组成与含量的分析比较[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 191–195.
 - [16] 温运启, 刘玉兰, 王璐阳, 等. 不同食用植物油中维生素E组分及含量研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(3): 35–39.

(上接第45页)

 - [39] 肖志刚, 李航, 王哲, 等. 高水分组织化复合蛋白的挤压制备及品质特性研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(1): 72–80, 88.
 - [40] 吴国滢. 蛋白质共混体系对植物基人造肉肠品质特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
 - [41] 蒋华彬, 刘明, 刘艳香, 等. 不同来源蛋白对谷朊粉挤压组织化产品特性的影响[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(3): 17–22.
 - [42] 刘潇, 秦鉴新, 李江华, 等. 谷氨酰胺转氨酶对高水分豌豆蛋白挤出物结构及消化特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 1–8.
 - [43] ZHANG X, ZHAO Y, ZHANG T, et al. Potential of hydrolyzed wheat protein in soy-based meat analogues: Rheological, textural and functional properties [J/OL]. Food Chem X, 2023, 20: 100921 [2024-04-09]. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100921>.
 - [44] ZHANG J, CHEN Q, LIU L, et al. High-moisture extrusion process of transglutaminase-modified peanut protein: Effect of transglutaminase on the mechanics of the process forming a fibrous structure [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2021, 112: 106346 [2024-04-09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106346>.
 - [45] ZHANG J, LI T, CHEN Q, et al. Application of transglutaminase modifications for improving protein fibrous structures from different sources by high-moisture extruding [J/OL]. Food Res Int, 2023, 166: 112623 [2024-04-09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112623>.
 - [46] 孟雪艳. 谷蛋白和醇溶蛋白配比对高水分组织蛋白品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
 - [47] 李占方, 诸葛斌, 宗红, 等. 生物酶法改性提高植物组织化蛋白的产品特性[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(6): 66–71.
 - [48] WANG Z, JI Y, FU L, et al. Potential use of gluten hydrolysate as a plasticizer in high-moisture soy protein-gluten extrudates [J/OL]. J Food Eng, 2023, 354: 111565 [2024-04-09]. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111565>.
 - [49] PÖRI P, NISOV A, NORDLUND E. Enzymatic modification of oat protein concentrate with trans- and protein-glutaminase for increased fibrous structure formation during high-moisture extrusion processing [J/OL]. LWT – Food Sci Technol, 2022, 156: 113035 [2024-04-09]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113035>.
 - [50] 杨聪, 郭丽琼, 万华, 等. 谷氨酰胺转氨酶及其在食品工业上的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 370–377.