

# 两级分子蒸馏深度脱除油脂中3-氯丙醇酯和缩水甘油酯

刘玉兰<sup>1</sup>, 黄会娜<sup>1</sup>, 马宇翔<sup>1</sup>, 张振山<sup>1</sup>, 王戩东<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 河北五星食品有限公司, 河北 宁晋 055550)

**摘要:**对3-氯丙醇(3-MCPD)酯和缩水甘油酯(GEs)含量超标幅度大的1个玉米油和2个稻米油样品分别进行两级分子蒸馏,研究两级分子蒸馏对油脂中3-MCPD酯和GEs的脱除效果,同时测定其对油脂中 $V_E$ 、甾醇和谷维素含量的影响。结果表明:3个油脂样品中3-MCPD酯含量为6.169~16.008 mg/kg,超出欧盟建议限量(1.25 mg/kg)的3.94~11.81倍,GEs含量为7.004~56.399 mg/kg,超出欧盟限量(1.00 mg/kg)的6.00~55.40倍;经一级分子蒸馏,油脂中3-MCPD酯的脱除率为49%~68%,GEs脱除率为42%~90%;经二级分子蒸馏,油脂中3-MCPD酯和GEs的脱除率分别达到93%~96%和91%~98%,含量分别降低至0.368~0.932 mg/kg和0.545~0.900 mg/kg,均明显低于欧盟限量;经二级分子蒸馏,3个油脂样品 $V_E$ 保留率为11%~14%,甾醇保留率为59%~75%,稻米油中谷维素保留率为88%~89%。采用两级分子蒸馏能实现油脂中高含量3-MCPD酯和GEs的深度脱除,但同时也会造成油脂中 $V_E$ 、甾醇等活性成分的较严重损失。因此,可根据油脂中3-MCPD酯和GEs的超标程度合理选用一级分子蒸馏或两级分子蒸馏。

**关键词:**食用植物油;3-氯丙醇酯;缩水甘油酯;分子蒸馏;深度脱除

中图分类号:TS224.6;TQ644.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2021)06-0089-05

## Deep removal of 3-monochloro-1,2-propanediol esters and glycidyl esters in oils by two-stage molecular distillation

LIU Yulan<sup>1</sup>, HUANG Huina<sup>1</sup>, MA Yuxiang<sup>1</sup>, ZHANG Zhenshan<sup>1</sup>, WANG Jiandong<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Hebei Yuxing Food Co., Ltd., Ningjin 055550, Hebei, China)

**Abstract:** Two-stage molecular distillation was performed on one corn oil and two rice bran oil samples with excessive contents of 3-monochloro-1,2-propanediol esters (3-MCPD esters) and glycidyl esters (GEs), and the deep removal effects of two-stage molecular distillation on 3-MCPD esters and GEs in oil were studied, the effects on the contents of  $V_E$ , sterol and oryzanol were also studied. The results showed that the 3-MCPD esters content in the three oil samples (6.169–16.008 mg/kg) exceeded the EU recommended limit (1.25 mg/kg) by 3.94–11.81 times, and the GEs content (7.004–56.399 mg/kg) exceeded the EU limit (1.00 mg/kg) by 6.00–55.40 times. After one-

stage molecular distillation, the removal rate of 3-MCPD esters was 49%–68%, and the removal rate of GEs was 42%–90%. After two-stage molecular distillation, the removal rates of 3-MCPD esters and GEs were 93%–96% and 91%–98%, respectively, with the contents 0.368–0.932 mg/kg and 0.545–0.900 mg/kg, which were lower than the EU

收稿日期:2021-01-28;修回日期:2021-04-13

基金项目:“十三五”国家重点研发计划子课题(2016YFD0401405)

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;黄会娜(1993),女,硕士研究生,研究方向为油脂中3-氯丙醇酯和缩水甘油酯控制与脱除(E-mail) 24697668496@qq.com。刘玉兰与黄会娜同为第一作者。

limit. After two-stage molecular distillation, among the three oil samples, the sterol retention rate was 59% - 75%, the  $V_E$  retention rate was 11% - 14%, and the oryzanol retention rate in rice bran oil was 88% - 89%. The use of two-stage molecular distillation could achieve efficient and deep removal of high content of 3-MCPD esters and GEs in oil, but it could also cause serious losses of active ingredients such as  $V_E$  and sterols in oils. One-stage molecular distillation or two-stage molecular distillation could be reasonably selected according to the degree of excess of 3-MCPD esters and GEs in oil.

**Key words:** edible vegetable oil; 3-monochloro-1,2-propanediol esters; glycidyl esters; molecular distillation; deep removal

植物油中的3-氯丙醇(3-MCPD)酯和缩水甘油酯(GEs)主要在油脂长时间高温脱臭过程中生成<sup>[1-3]</sup>。3-MCPD酯和GEs及其水解产物3-MCPD和缩水甘油(GE)具有致癌毒性<sup>[4-5]</sup>、肾脏毒性<sup>[6]</sup>及肝脏和睾丸毒性<sup>[7-8]</sup>。世界粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(JECFA)建议3-MCPD每日容许摄入量(TDI)为4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[9]</sup>。欧洲食品安全局(EFSA)建议3-MCPD的TDI为2.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[10]</sup>。2019年7月,OFI杂志披露,欧盟委员会(EC)考虑将一般食用植物油中3-MCPD酯限量定为1.25 mg/kg,婴幼儿食品用植物油中限量定为0.75 mg/kg<sup>[11]</sup>。欧盟委员会 No1881/2006号法规对食用植物油中GEs的限量为1.00 mg/kg<sup>[12]</sup>。据文献报道<sup>[13]</sup>,很多食用植物油中3-MCPD酯和GEs含量可能远高于上述机构的限量规定。为了防范和控制油脂精炼过程中3-MCPD酯和GEs的形成,通过减少待脱臭油脂中甘一酯和甘二酯含量、减少脱臭系统中氯离子含量及优化脱臭条件能起到一定的作用<sup>[14-16]</sup>,但脱臭成品油中3-MCPD酯和GEs含量仍处于较高水平<sup>[17]</sup>,有些甚至处于很高的污染水平。研究发现,利用固体吸附可以较好地脱除油脂中的GEs<sup>[18-19]</sup>,但对3-MCPD酯的脱除效果很差,而利用分子蒸馏对3-MCPD酯和GEs均有较好的脱除效果<sup>[20-21]</sup>,但分子蒸馏对于高污染水平油脂中3-MCPD酯和GEs是否也能达到理想的脱除效果未见报道。本研究选取3-MCPD酯和GEs含量超标幅度大的3个油脂样品,设计两级分子蒸馏工艺,对其中3-MCPD酯和GEs进行脱除,以期将高污染水平油脂中的3-MCPD酯和GEs深度脱除至欧盟限量以下,确保植物油的品质安全,同时考察两级分子蒸馏对油脂中维生素E、甾醇和谷维素等活性成分的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

一级玉米油,采样于油脂加工企业;一级稻米油(两个样品),购于当地超市。

油酸缩水甘油酯(纯度 $\geq 98\%$ )、油酸缩水甘油酯-D5(纯度 $\geq 98\%$ )、1,2-二油酸-3-氯丙醇酯(纯度 $\geq 98\%$ )、1,2-二油酸-3-氯丙醇酯-D5(纯度 $\geq 98\%$ ), Toronto Research Chemicals公司; $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ - $\delta$ -生育酚和 $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ - $\delta$ -生育三烯酚标准品(纯度 $\geq 99\%$ ),北京三区生物技术有限公司;胆甾烷醇(纯度 $\geq 95\%$ ),美国Sigma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;硫酸(质量分数为98%)、乙醚、溴化钠、硫酸钠、碳酸氢钠、无水硫酸镁,均为分析纯。

KDL-5分子蒸馏仪,德国UIC GmbH公司;Trace1310-ISQ气相色谱-质谱联用仪,美国Thermo Fisher公司;MTN-2800W氮吹浓缩仪,天津奥得赛恩斯仪器有限公司;2695高效液相色谱仪,美国Waters公司;7890B气相色谱仪,美国Agilent公司;UV-1100紫外可见分光光度计,上海美普达仪器有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 油脂中3-MCPD酯和GEs的分子蒸馏脱除

向分子蒸馏仪的进料器中加入原料油(RO),旋紧进料阀,依次打开旋片泵、扩散泵,使系统真空度达到0.1 Pa,抽真空过程中冷阱内装入液氮保持冷阱的强制冷。打开加热器升温到设定蒸馏温度(220 $^{\circ}\text{C}$ ),调节刮膜转速为230 r/min,进料速率为50滴/min,对油脂进行分子蒸馏,经一级蒸馏得到的油脂记为MD1。对MD1进行二级蒸馏(蒸馏条件同一级蒸馏),得到经两级蒸馏的油脂(记为MD2)。检测分子蒸馏前后油脂中3-MCPD酯、GEs、甾醇、 $V_E$ 、谷维素含量,计算3-MCPD酯和GEs脱除率及活性成分保留率。

#### 1.2.2 油脂中3-MCPD酯和GEs含量的测定

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》中第三法

及任我行<sup>[22]</sup>的方法,采用酸水解法间接测定,同位素内标法进行定量。

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

质谱条件:传输线温度 280 °C,离子源温度 250 °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 油脂中 V<sub>E</sub> 组分及含量的测定

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》和温运启等<sup>[23]</sup>的方法测定。取 0.50 g 油样于 10 mL 棕色容量瓶中,用正己烷定容,经 0.22 μm 有机滤膜过滤后,进高效液相色谱测定。

高效液相色谱条件:Waters NH<sub>2</sub>色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm);流动相为正己烷-异丙醇(体积比

99:1),流速 0.8 mL/min;柱温 40 °C;Waters 2475 荧光检测器,激发波长 298 nm,发射波长 325 nm。

### 1.2.4 油脂中甾醇组分及含量的测定

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》及魏佳丽等<sup>[24]</sup>的方法测定。

### 1.2.5 稻米油中谷维素含量的测定

谷维素含量测定参照 LS/T 6121.1—2017《粮油检验 植物油中谷维素含量的测定 分光光度法》进行测定。

### 1.2.6 数据处理

3-MCPD 酯和 GEs 标准曲线的绘制及油样中 3-MCPD 酯和 GEs 含量的计算由 GC-MS 系统自带软件 Xcalibur 完成,数据计算用 Excel 2013 进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 分子蒸馏对油脂中 3-MCPD 酯和 GEs 的脱除效果

分子蒸馏前后油脂中 3-MCPD 酯和 GEs 的含量测定结果如表 1 所示。

表 1 分子蒸馏前后油脂中 3-MCPD 酯和 GEs 含量变化

风险成分	样品	RO 中含量/ (mg/kg)	MD1		MD2	
			含量/(mg/kg)	脱除率/%	含量/(mg/kg)	脱除率/%
3-MCPD 酯	玉米油	6.169	3.125	49	0.410	93
	稻米油 1	16.008	5.082	68	0.932	94
	稻米油 2	10.060	4.499	55	0.368	96
GEs	玉米油	7.004	4.073	42	0.665	91
	稻米油 1	15.782	4.880	69	0.545	97
	稻米油 2	56.399	5.861	90	0.900	98

由表 1 可见:玉米油中 3-MCPD 酯和 GEs 含量分别为 6.169、7.004 mg/kg,参照欧盟 3-MCPD 酯限量 1.25 mg/kg、GEs 限量 1.00 mg/kg 规定<sup>[11-12]</sup>,分别超出限量 3.94、6.00 倍;稻米油 1 中 3-MCPD 酯和 GEs 含量分别为 16.008、15.782 mg/kg,分别超出限量 11.81、14.78 倍;稻米油 2 中 3-MCPD 酯和 GEs 含量分别为 10.060、56.399 mg/kg,分别超出限量 7.05、55.40 倍。经一级分子蒸馏,油脂中 3-MCPD 酯和 GEs 含量明显降低,玉米油中 3-MCPD 酯和 GEs 含量分别降低至 3.125、4.073 mg/kg,脱除率分别为 49%、42%;稻米油 1 中 3-MCPD 酯和 GEs 含量分别降低至 5.082、4.880 mg/kg,脱除率分别为 68%、69%;稻米油 2 中 3-MCPD 酯和 GEs 含量分别降低至 4.499、5.861 mg/kg,脱除率分别为 55%、90%。由于原料油中 3-MCPD 酯和 GEs 超标幅度高,一级分子蒸馏未能

将两种风险成分脱除至欧盟限量以下。经二级分子蒸馏,玉米油、稻米油 1、稻米油 2 中 3-MCPD 酯含量分别为 0.410、0.932、0.368 mg/kg,GEs 含量分别为 0.665、0.545、0.900 mg/kg,均低于欧盟限量标准。经二级分子蒸馏,油脂中 3-MCPD 酯的脱除率为 93%~96%,GEs 的脱除率为 91%~98%。因此,两级分子蒸馏能实现高污染水平油脂中 3-MCPD 酯和 GEs 的深度脱除。

### 2.2 分子蒸馏对油脂中活性成分的影响

对分子蒸馏前后油脂中 V<sub>E</sub>、甾醇和谷维素含量进行检测,结果如表 2 和表 3 所示。

由表 2 可见,玉米油中 V<sub>E</sub> 总量为 662.97 mg/kg,除含有 α-生育酚、γ-生育酚、δ-生育酚之外,还含有一定量的(β+γ)-生育三烯酚。稻米油 1、稻米油 2 中 V<sub>E</sub> 总量分别为 867.97、772.94 mg/kg,4 种生育酚和 4 种生育三烯酚组分均有检

出,组分齐全,这与温运启等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。经一级分子蒸馏,玉米油、稻米油 1、稻米油 2 中的  $V_E$  损失严重,保留率分别为 40%、35% 和 38%;经二级分子蒸馏,与原料油相比,三者的  $V_E$  保留率分别为 14%、11% 和 13%。可见分子蒸馏会造成油脂

中  $V_E$  的严重损失,这与刘玉兰等<sup>[25]</sup>所得结论一致,原因是在分子蒸馏条件下, $V_E$  因具有和 3-MCPD 酯与 GEs 相近或更小的分子自由程而被蒸馏进入到轻相馏分中。

表 2 分子蒸馏前后油脂中  $V_E$  组分含量

项目	玉米油			稻米油 1			稻米油 2		
	RO	MD1	MD2	RO	MD1	MD2	RO	MD1	MD2
$\alpha$ -TP/(mg/kg)	202.43	88.27	32.44	350.61	129.59	37.82	300.26	104.26	35.53
$\beta$ -TP/(mg/kg)	ND	ND	ND	18.15	16.38	8.35	16.66	15.58	3.38
$\gamma$ -TP/(mg/kg)	435.97	160.56	53.53	58.02	25.34	10.09	43.24	12.96	7.24
$\delta$ -TP/(mg/kg)	16.80	11.49	0.72	1.13	0.32	ND	0.37	ND	ND
$\alpha$ -TT/(mg/kg)	ND	ND	ND	274.26	77.33	20.99	260.72	98.06	28.17
$(\beta + \gamma)$ -TT/(mg/kg)	7.77	5.69	4.60	159.44	57.21	19.17	150.13	57.89	23.68
$\delta$ -TT/(mg/kg)	ND	ND	ND	6.36	0.90	ND	1.56	1.28	0.59
总量/(mg/kg)	662.97	266.01	91.29	867.97	307.07	96.42	772.94	290.03	98.59
保留率/%		40	14		35	11		38	13

注:TP,生育酚;TT,生育三烯酚;ND,未检出。

表 3 分子蒸馏前后油脂中甾醇组分和谷维素含量

项目	玉米油			稻米油 1			稻米油 2		
	RO	MD1	MD2	RO	MD1	MD2	RO	MD1	MD2
菜油甾醇/(mg/100 g)	171.00	121.73	84.61	406.80	330.14	285.28	391.90	349.59	292.59
豆甾醇/(mg/100 g)	49.51	31.49	20.36	169.40	119.96	107.94	195.54	133.64	107.65
$\beta$ -谷甾醇/(mg/100 g)	445.13	353.36	271.84	774.39	600.52	595.24	728.50	647.73	563.33
谷甾醇/(mg/100 g)	70.67	72.37	55.92	112.06	109.95	108.60	89.92	110.30	92.95
甾醇总量/(mg/100 g)	736.31	578.95	432.73	1 462.65	1 160.57	1 097.06	1 405.86	1 241.26	1 056.52
甾醇保留率/%		79	59		79	75		88	75
谷维素/(mg/100 g)	-	-	-	1 909.05	1 874.02	1 672.94	2 164.13	2 079.78	1 929.07
谷维素保留率/%	-	-	-		98	88		96	89

注:“-”代表未检测。

由表 3 可见:玉米油中甾醇总量为 736.31 mg/100 g,主要组分为  $\beta$ -谷甾醇;稻米油 1 和稻米油 2 中甾醇总量分别为 1 462.65、1 405.86 mg/100 g,主要组分为  $\beta$ -谷甾醇和菜油甾醇,谷维素含量分别为 1 909.05、2 164.13 mg/100 g。经一级分子蒸馏,玉米油、稻米油 1、稻米油 2 中甾醇保留率分别为 79%、79%、88%;经二级分子蒸馏,甾醇保留率分别降低至 59%、75%、75%。稻米油中谷维素经二级分子蒸馏保留率仍有 88%~89%,可见,相比  $V_E$  和甾醇,分子蒸馏对油脂中谷维素含量的影响较小。

### 3 结论

采用真空度 0.1 Pa、蒸馏温度 220 °C、刮膜转速 230 r/min、进料速率 50 滴/min 的分子蒸馏条件对 3-MCPD 酯和 GEs 超标幅度大的 3 个油脂样品进行两级分子蒸馏,研究分子蒸馏对其中的 3-MCPD

酯和 GEs 脱除率及活性成分的影响。结果表明:经一级分子蒸馏,油脂中 3-MCPD 酯的脱除率为 49%~68%,GEs 脱除率为 42%~90%;经二级分子蒸馏,油脂中 3-MCPD 酯的脱除率为 93%~96%,GEs 脱除率为 91%~98%,3-MCPD 酯和 GEs 含量分别降低至 0.368~0.932 mg/kg 和 0.545~0.900 mg/kg,均显著低于欧盟限量。采用两级分子蒸馏能实现油脂中高含量 3-MCPD 酯和 GEs 的深度脱除。但两级分子蒸馏会造成油脂中  $V_E$ 、甾醇和谷维素的损失,其中  $V_E$  保留率为 11%~14%,甾醇保留率为 59%~75%,稻米油中谷维素保留率为 88%~89%。因此,应根据油脂中 3-MCPD 酯和 GEs 的超标程度合理选用一级分子蒸馏或两级分子蒸馏,在保证 3-MCPD 酯和 GEs 脱除达标的同时尽量减少活性成分的损失,以兼顾食用植物油的安全品质和营养品质。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] PUDEL F, BENECKE P, FEHLING P, et al. On the necessity of edible oil refining and possible sources of 3-MCPD and glycidyl esters[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2011, 113(3): 368-373.
- [4] BAKHIYA N, ABRAHAM K, GÜRTLER R, et al. Toxicological assessment of 3-chloropropane-1,2-diol and glycidol fatty acid esters in food[J]. Mol Nutr Food Res, 2011, 55(4): 509-521.
- [5] YANG P, HU J, LIU J, et al. Ninety-day nephrotoxicity evaluation of 3-MCPD 1-monooleate and 1-monostearate exposures in male sprague dawley rats using proteomic analysis[J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(9): 2765-2772.
- [6] BRAEUNING A, SAWADA S, OBEREMM A, et al. Analysis of 3-MCPD- and 3-MCPD dipalmitate-induced proteomic changes in rat liver[J]. Food Chem Toxicol, 2015, 86: 374-384.
- [7] BAROCELLI E, CORRADI A, MUTTI A, et al. Comparison between 3-MCPD and its palmitic esters in a 90-day toxicological study[J]. EFSA Support Publ, 2011, 8(9): 187E.
- [8] ONAMI S, CHO Y, TOYODA T, et al. A 13-week repeated dose study of three 3-monochloropropane-1,2-diol fatty acid esters in F344 rats[J]. Arch Toxicol, 2014, 88(4): 871-880.
- [9] Joint Food and Agriculture Organization (FAO)/World Health Organization (WHO) Expert Committee on Food Additives (JECFA). Summary report of the eighty-third meeting of JECFA: JECFA/83/SC [R]. Italy Rome: FAO/WHO, 2016:5-7.
- [10] EFSA. Update of the risk assessment on 3-monochloropropane diol and its fatty acid esters[J/OL]. EFSA J, 2018, 16(1):5083[2021-01-28]. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5083>.
- [11] Oils & Fats International. EU considers maximum limits for 3-MCPD and 3-MPDEs in oils and fats[EB/OL]. (2019-07-23) [2021-01-28]. <https://www.ofimagazine.com/news/eu-considers-maximum-limits-for-3-mcpd-and-3-mpdes-in-oils-and-fats>.
- [12] 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.
- [13] CUSTODIO-MENDOZA J A, CARRO A M, LAGE-YUSTY M A, et al. Occurrence and exposure of 3-monochloropropanediol diesters in edible oils and oil-based foodstuffs from the Spanish market[J]. Food Chem, 2019, 270: 214-222.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [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] 张家枫, 刘玉兰, 孙国昊, 等. 不同食用油的甘油酯组成及3-MCPD酯和GEs含量研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(12):38-43.
- [18] 王格平, 刘国琴, 林云伟, 等. 吸附法降低食用油脂中缩水甘油酯的含量及其动力学研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(2): 171-178.
- [19] 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.
- [20] 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, 41(20): 41-45.
- [21] 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.
- [22] 任我行. 油脂精炼过程3-MCPD酯和缩水甘油酯的控制与脱除研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2018.
- [23] 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.
- [24] 魏佳丽, 马传国, 柴小超, 等. 米糠毛油中去甲基甾醇检测方法的对比研究[J]. 中国油脂, 2014, 39(1): 61-64.
- [25] 刘玉兰, 陈莉, 张小龙, 等. 分子蒸馏对沙棘果油中8种塑化剂组分脱除及综合品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 87-93.