

分子蒸馏脱除美藤果油游离脂肪酸及其对 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的影响

闫亚鹏¹, 马传国^{1,2*}, 李加辛¹, 黄伟锋¹, 景璐璐¹, 司天雷^{1,2}

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 小麦和玉米深加工国家工程实验室, 郑州 450001)

摘要: **目的** 研究采用分子蒸馏技术脱酸处理后对美藤果油中 3-氯丙醇酯(3-chloropropanol esters, 3-MCPDE)和缩水甘油酯(glycidyl esters, GEs)的影响。**方法** 在蒸馏温度、进料速率、刮膜转速等单因素实验的基础上, 对美藤果油分子蒸馏脱酸工艺进行正交实验优化。**结果** 最佳工艺条件为: 蒸馏温度 270 °C, 刮膜转速 120 r/min, 进料速率 10 mL/min。在最优条件下美藤果油的酸价由 4.7 mg/g 降至 1.1 mg/g, 脱酸效果明显。**结论** 分子蒸馏脱酸工艺在脱酸的同时还可以有效的脱除油中的 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯, 可以为特色小品种油脂脱酸以及脱除油脂中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的工艺提供参考。

关键词: 美藤果油; 分子蒸馏; 脱酸; 3-氯丙醇酯; 缩水甘油酯

Study on the removal of free fatty acids from *Sacha inchi* oil by molecular distillation and its effect on 3-chloropropanol ester and glycidyl ester

YAN Ya-Peng¹, MA Chuan-Guo^{1,2*}, LI Jia-Xin¹, HUANG Wei-Feng¹, JING Lu-Lu¹, SI Tian-Lei^{1,2}

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2. National Engineering Laboratory for Wheat, Corn Further Processing, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: Objective To study the effect of deacidification on 3-chloropropanol esters (3-MCPDE) and glycidyl esters (GEs) in *Sacha inchi* oil by molecular distillation. **Methods** On the basis of single factor experiments, such as distillation temperature, feed rate, film scraping speed and other single factor experiments, the orthogonal experiment was carried out to optimize the deacidification process of *Sacha inchi* oil by molecular distillation. **Results** The optimum conditions were as follows: distillation temperature 270 °C, film scraping speed 120 r/min, feed rate 10 mL/min. Under these conditions, the acid value of *Sacha inchi* oil decreased from 4.7 mg/g to 1.1 mg/g, and the deacidification effect was obvious. **Conclusion** Molecular distillation deacidification process can effectively remove 3-chloropropanol esters and glycidyl esters in the oil. Therefore, this experiment provides a reference for the process of deacidification and removal of 3-chloropropanol esters (3-mcpde) and glycidyl esters (GES) from special oils and fats.

KEY WORDS: *Sacha inchi* oil; molecular distillation; deacidification; 3-chloropropanol esters; glycidyl esters

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题项目(2016YFD0401404、2018YFD0401102)

Fund: Supported by the National Key R&D Projects in the 13th Five Year Plan Program (2016YFD0401404, 2018YFD0401102)

*通信作者: 马传国, 教授, 主要研究方向为食品专用油脂以及植物油脂合成绿色工业品的研究与开发。E-mail: mcg@haut.edu.cn

*Corresponding author: MA Chuan-Guo, Professor, Henan University of Technology, No.100, Lianhua Road, Gaoxin District, Zhengzhou 450001, China. E-mail: mcg@haut.edu.cn

0 引言

美藤果又称南美油藤属于大戟科多年生木质藤本油料植物,原产于南美洲的热带雨林中,拥有悠久的食用历史^[1-2]。美藤果油是由美藤果制成的淡黄色透明油状液体,除了作为优质食用油外,还具有降血脂、增强免疫力、改善记忆力、预防心血管疾病和保养肌肤等作用,目前已在食品、化妆品及制药等行业应用^[3-5]。研究发现,3-氯丙醇酯(3-chloropropanol esters, 3-MCPDE)和缩水甘油酯(glycidyl esters, GEs)是最近几年比较热门的在食用植物油中发现的一类食品安全风险成分^[6-8]。最新研究^[9-12]发现,毛油品质和油脂精炼条件可能对3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的形成产生重要影响,毛油中的游离脂肪酸、甘一酯、甘二酯及氯离子均可能是形成3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的前体物质,这些物质在油脂高温精炼过程(比如脱臭过程)中能促使3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的形成。若在油脂高温精炼过程之前将这些前体物质脱除将有助于减少成品油中的3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的形成^[13-14]。本研究探究在分子蒸馏条件下美藤果油脱酸的最优工艺,以及对分子蒸馏脱酸美藤果油中3-氯丙醇酯和缩水甘油酯含量进行检测,分析研究分子蒸馏脱酸对3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的影响,以期对一些特色小品种的油脂脱酸以及脱除油脂中3-MCPDE和GEs的工艺提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

美藤果油:对美藤果进行去壳,粉碎机粉碎后,石油醚浸泡48 h,对浸出液进行离心处理,撇去下层沉渣,对上层清液进行旋蒸处理,旋蒸出石油醚即得美藤果油。

正己烷、异丙醇、甲醇(色谱纯,韩国德山药品工业);四氢呋喃、碳酸氢钠、氯化钠、无水硫酸钠、无水硫酸镁、溴化钠(色谱纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);正庚烷(分析纯,上海麦克林生化科技有限公司);苯基硼酸(纯度 $\geq 97\%$,西格玛奥德里奇贸易有限公司);硫酸(质量分数为98%),乙酰(洛阳市化学试剂厂);三氟化硼-乙醚络合物(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);油酸缩水甘油酯标准品(纯度 $\geq 97\%$)、油酸缩水甘油酯-D₅(纯度 $\geq 97\%$)、1,2-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 $\geq 97\%$)(上海安普实验科技股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

VKL-70分子蒸馏仪(德国瑞达有限公司);7890A气相色谱-质谱联用仪、7890B气相色谱仪(美国Agilent公司);ICS-600离子色谱仪(戴安分析仪器有限公司);MTN-2800W氮吹浓缩仪(天津奥得赛恩斯仪器有限公司);

SHA-C水浴恒温振荡器(天津市塞得利斯实验分析仪器制造厂)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

将美藤果油在水浴锅上加热至65℃后提高搅拌速率,加入适量的水,水温高于油温10℃,缓慢滴加并搅拌30 min,除去上层泡沫降低搅拌速率,待胶体絮凝后离心分离,然后取离心后的美藤果油30 g置于50 mL烧杯中在10 min内加热至280℃,烧杯壁上无粘附物,即脱胶处理满足分子蒸馏实验的要求,美藤果油样品备用。

1.3.2 美藤果油指标检测

酸价测定参照GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》;磷脂含量测定参照GB/T 5537—2008《粮油检验 磷脂含量的测定》;脂肪酸组成测定参照GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》。

1.3.3 美藤果油分子蒸馏脱酸

向分子蒸馏仪的进料器中加入美藤果油,旋紧进料阀,依次打开旋片泵、扩散泵,使真空表度数下降至不显示,抽真空过程中冷阱中装入液氮保持冷阱的强制冷。打开加热器升温至设定的蒸馏温度,调节刮膜转速和进料速率,对美藤果油进行分子蒸馏。检测分子蒸馏前后油脂中酸价以及3-MCPD酯和GEs含量,分析脱除效果。

1.3.4 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯含量的测定

采用酸水解间接测定的方法,同位素内标法进行定量。参照GB 5009.191—2016《食品中氯丙醇及其脂肪酸酯含量的测定》采用酸水解间接测定的方法,同位素内标法进行定量。仪器条件见1.3.7(1)、(2)。

1.3.5 油脂中氯离子含量的检测

采用离子色谱检测油脂中氯离子含量。前处理方法采用王璐阳等^[11]关于油脂中氯离子的检测方法。将油样用正己烷溶解后,加入超纯水,用超声辅助提取,离心后用注射器吸取下层水相过0.22 μm有机滤膜至10 mL容量瓶中,定容。用离子色谱仪测定,选择手动进样,进样时过C₁₈柱和0.22 μm水系滤膜。

1.3.6 美藤果油中甘一酯、甘二酯、甘三酯含量检测

样品前处理:15 μL美藤果油,溶于4500 μL正己烷,涡旋混匀,过0.45 μm有机滤膜,注入气相小瓶备用。仪器条件见1.3.7(3)。

1.3.7 仪器条件

(1)色谱条件:色谱柱为HP-5MS毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm);载气为高纯氮气(纯度99.999%),流速1 mL/min;升温程序为60℃保持1 min;以6℃/min的速率升温至150℃,保持2 min;然后以30℃/min的速率升温至300℃,保持10 min。进样口温度250℃;不分流进样,进样量1 μL。

(2)质谱条件: 传输线温度 300 °C, 离子源温度 230 °C; 电子轰击离子源; 扫描方式为离子监测模式。

(3)气相色谱条件: 氢火焰离子化检测器, DB-1ht 毛细管柱(30 m×250 μm, 0.1 μm); 柱初温 100 °C, 以 50 °C/min 升温到 220 °C, 再以 15 °C/min 升温到 290 °C, 以 40 °C/min 升温到 320 °C 保留 8 min, 再以 20 °C/min 升温到 360 °C 保留 8 min; 进样口温度 350 °C; 分流比 40:1(V:V); 检测器温度 400 °C; 高纯氮气流速 3.79 mL/min, 氢气流速 50 mL/min, 空气流速 300 mL/min。各种组分的计算采用面积归一法。

2 结果与分析

2.1 美藤果油理化指标

原料美藤果油酸价为 4.7 mg/g, 美藤果油中氯离子含量为 0.284 mg/L, 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯在美藤果油中未检出。美藤果油脂肪酸组成见表 1, 甘油酯组成见表 2。

表 1 美藤果油中各脂肪酸含量
Table 1 Contents of fatty acids in sachainchi oil

脂肪酸	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
含量/%	3.51	2.63	7.0	38.16	48.69

表 2 美藤果油中甘油酯含量
Table 2 Glyceride content insachainchi oil

甘油酯	甘油一酯	甘油二酯	甘油三酯
含量/%	0.36	1.81	95.96

2.2 蒸馏温度对美藤果油酸价、3-MCPDE、GEs 变化的影响

分子蒸馏实验选取刮膜转速 200 r/min, 进料速率 2 mL/min, 设置蒸馏温度分别为 150、180、210、240、270 °C。结果如图 1 所示, 发现蒸馏温度对美藤果油酸价脱除效果影响较明显。在分子蒸馏系统中, 蒸馏温度是影响脱酸效果的关键之一^[15]。蒸馏温度越高, 物质的分子平均自由程越大, 轻重组分越容易分离。酸价的脱除率随温度升高而升高, 但温度过高会导致其他组物质逸出^[16]。油脂中酸价经 150、180、210 °C 分子蒸馏, 酸价逐步降低, 之后酸价下降的趋势变缓。酸价在 210 °C 的脱酸效果显著, 在 240、270 °C 的酸价与 210 °C 的酸价几乎相同。但是较高温度会产生反式脂肪酸并引起维生素 E 和甾醇的损失^[17]。因此选取蒸馏温度为 210 °C, 此时酸价为 1.8 mg/g。另外, 脱酸后重相的美藤果油中未检出 3-MCPDE、GEs。

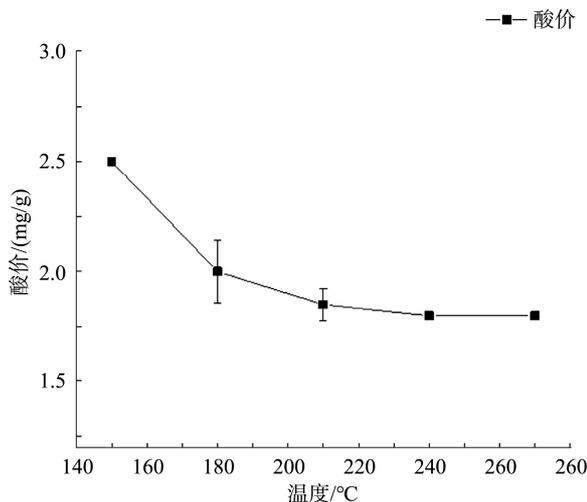


图 1 蒸馏温度对酸价的影响
Fig.1 Effect of distillation temperature on acid value

2.3 刮膜转速对美藤果油中酸价、3-MCPD 酯和 GEs 变化的影响

实验选取蒸馏温度 210 °C, 进料速率 2 mL/min, 刮膜转速分别为 120、160、200、240、280 r/min。结果如图 2 所示, 分子蒸馏主蒸发器内的刮膜辊轮旋转可以使油脂在筒壁上均匀分布形成薄的液膜, 如果转速过小, 物料无法在加热面形成均匀的液膜, 导致分离效率降低。提高转速能减小液膜厚度, 提高传热、传质效率, 进而提高分离效率^[18-19]。结果发现, 刮膜转速对酸价的脱除效果是有一定的影响。当刮膜转速为 120 r/min 时最低为 1.2 mg/g, 之后提高转速, 酸价也随之增高。这可能是因为当刮膜转速过高时会形成雾沫飞溅^[19], 刮膜转子高速旋转使得分子蒸馏蒸发面上油脂液膜非常薄, 游离脂肪酸等轻相组分能更快的从油料主体扩散至蒸发表面, 游离脂肪酸分子运动可能会使分子与雾沫液滴碰撞而返回到液面中, 从而导致分离效率降低, 这也与宋志华等^[17]的研究结果一致。因此刮膜转速最终选择 120 r/min。另外, 重相脱酸后的美藤果油中未检出 3-MCPDE、GEs。

2.4 进料速率对美藤果油中酸价、3-MCPDE、GEs 变化的影响

实验选取蒸馏温度 210 °C, 刮膜转速 120 r/min, 进料速率分别为 2、4、6、8、10 mL/min。结果如图 3 所示, 在进行分子蒸馏时当刮膜转速一定时, 当进料速率小时, 物料蒸馏的时间相对较长, 分离的效果也较明显^[20], 当进料速率增大时, 蒸发面上物料的量增加, 蒸发面上形成的液膜厚度增加。因此选择合适的进料速率对游离脂肪酸脱除效果有一定的影响。结果发现, 当进料速率为 6 mL/min 时, 酸价最低。游离脂肪酸的脱除率随着进料速率的增大呈现先升高后缓慢降低的变化, 主要原因可能是在进料速率较低时, 物料

在蒸发面上停留时间较长,受热充分,较小分子量的游离脂肪酸受热大量馏出,脱除率升高^[21]。随着进料速率的进一步增大,油脂在主蒸发器上的液膜厚度增大,增加了传热、传质阻力,不利于脂肪酸的脱除。这与MORAES等^[22]的研究结果相似。因此最佳进料速率为6 mL/min。另外,重相脱酸后的美藤果油中未检出3-MCPDE、GEs。

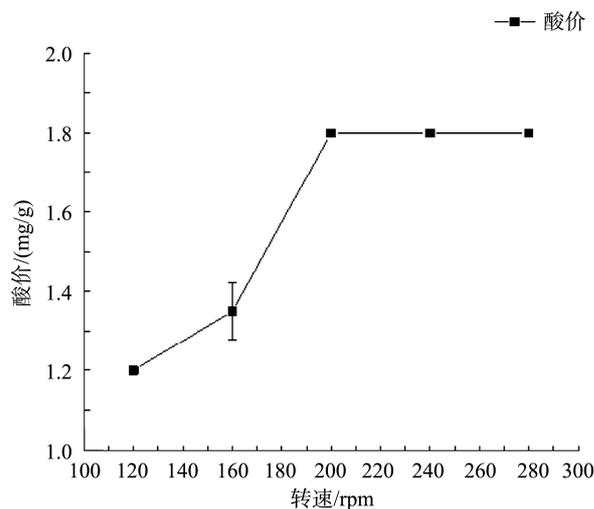


图2 刮膜转速对酸价的影响

Fig.2 Effect of film scraping speed on acid value

将各单因素实验过程中所得的轻相馏分集中收集,进行了3-MCPDE、GEs的检测。轻相中3-MCPDE的含量为3.64 mg/kg, GEs含量为0.84 mg/kg,说明由于原料美藤果油含有一定量的氯离子,在分子蒸馏过程中形成了3-MCPDE;在分子蒸馏过程中高温会使甘油酯形成缩水甘油酯,特别是甘油酯中存在甘油二酯和甘油一酯^[14]。在分子蒸馏过程中美藤果油中形成的3-MCPDE、GEs会从物料体系中分子蒸馏溢出进入轻相收集装置中,因此在分子蒸馏重相的脱酸美藤果油中未检测到3-MCPDE、GEs,表明分子蒸馏过程可以脱除原料油在脱酸过程中产生的3-MCPDE、GEs。

2.5 正交实验及其测结果

在单因素实验的基础上,以主蒸发器温度、进料速率、刮膜转速为考察因素,酸价为考察指标。设计三因素三水平正交实验,因素水平见表3,正交实验结果及分析

见表4。由表4可以看出,正交实验影响酸价的因素主次顺序为蒸馏温度(C)、刮膜转速(A)、进料速率(B),最佳工艺组合为 $A_1B_3C_3$,即刮膜转速120 r/min,进料速率10 mL/min,蒸馏温度270 °C。原料美藤果油酸价由为4.7 mg/g降至为1.1 mg/g。由于蒸馏温度在240 °C时的酸价和在270 °C时的酸价相差不大,又因为温度太高时会对油脂产生不利影响,所以在实际操作过程中可将蒸馏温度设置为240 °C。正交实验过程得到重相脱酸后的美藤果油中皆未检测出3-MCPDE和GEs,所得的轻相馏分中的3-MCPDE的含量为3.33 mg/kg, GEs的含量为0.85 mg/kg。

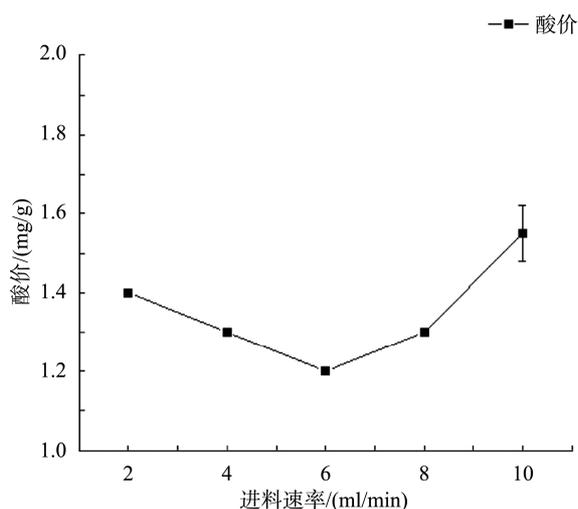


图3 进料速率对酸价的影响

Fig.3 Effect of feed rate on acid value

3 结论与讨论

分子蒸馏作为一种分离高效、绿色环保的技术,未来的开发应用将会得到进一步发展。单因素实验和正交实验结果表明,利用分子蒸馏可以对美藤果油进行脱酸,但考虑到蒸馏温度、进料速率和刮膜转速等工艺参数在实际效果上的影响,应综合进行优化。尽管分子蒸馏过程能够产生3-MCPDE和GEs这类潜在风险成分,然而分子蒸馏脱酸过程能够将3-MCPDE和GEs分离至轻相馏出物,使重相中脱酸油脂不含3-MCPDE和GEs,保证了成品油的食用安全。本研究可以为特色小品种油脂脱酸以及脱除油脂中3-MCPDE和GEs的工艺提供参考。

表3 因素水平
Table 3 Factor levels

水平	A 刮膜转速/(r/min)	B 进料速率/(mL/min)	C 主蒸发温度/°C
1	120	2	150
2	180	6	210
3	240	10	270

表 4 正交实验结果及分析
Table 4 Results and analysis of orthogonal experiment

编号	转速/(r/min)	进料速率/(mL/min)	主蒸发温度/°C	酸价/(mg/g)
1	120	2	150	2.6
2	180	6	150	3.0
3	240	10	150	2.9
4	240	6	210	2.3
5	180	2	210	2.0
6	120	10	210	1.3
7	120	6	270	1.2
8	180	10	270	1.2
9	240	2	270	1.2
K1	5.1	5.8	8.5	
K2	6.2	6.5	5.6	
K3	6.4	5.4	3.6	
R	1.3	1.1	4.9	

参考文献

- [1] 蔡志全. 特种木本油料作物星油藤的研究进展[J]. 中国油脂, 2011, (10): 1-6.
CAI ZQ. Advance in research on a special woody oilseed crop of *Plukenetia volubilis* L [J]. China Oils Fats, 2011, (10): 1-6.
- [2] 郭永生, 马传国, 刘君, 等. 不同方法制备的美藤果油品质研究[J]. 中国油脂, 2018, (43): 84-88.
GUO YS, MA CG, LIU J, et al. Quality of *Sacha inchi* oil prepared by different methods [J]. China Oils Fats, 2018, (43): 84-88.
- [3] 张嘉怡, 杜冰, 谢蓝华, 等. 绿色新资源食品——美藤果油[J]. 中国油脂, 2013, 38(7): 1-4.
ZHANG JY, DU B, XIE LH, et al. A new resource green food—*Sacha inchi* oil [J]. China Oils Fats, 2013, 38(7): 1-4.
- [4] WANG S, ZHU F, KAKUDA Y. *Sacha inchi* (*Plukenetia volubilis* L.): Nutritional composition, biological activity, and uses [J]. Food Chem, 2018, 265(1): 316-328.
- [5] 郭永生, 马传国, 刘君, 等. 美藤果油水包油型乳液的制备及其稳定性研究[J]. 中国油脂, 2019, (44): 23-28.
GUO YS, MA CG, LIU J, et al. Preparation and stability of *Sacha inchi* oil-in-water emulsion [J]. China Oils Fats, 2019, (44): 23-28.
- [6] 黎永乐, 李苑雯, 柏文良, 等. 深圳市售食用植物油中氯丙醇酯污染水平调查与分析[J]. 广东化工, 2015, (9): 73-74.
LI YL, LI YW, BAI WL, et al. Investigation and analysis of the chloropropane esters pollution level in vegetable oils which were sold in Shenzhen [J]. Guangdong Chem Ind, 2015, (9): 73-74.
- [7] 宁柠, 王卫飞, 李道明, 等. 食用油脂中缩水甘油酯的风险评估研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(1): 1-6.
NING N, WANG WF, LI DM, et al. Risk assessment on glycidyl esters in edible oils and fats [J]. China Oils Fats, 2016, 41(1): 1-6.
- [8] 李利君, 司天雷, 马传国. 食用油中缩水甘油酯的检测方法研究进展[J]. 中国油脂, 2017, (42): 83-87.
LI LJ, SI TL, MA CG. Progress in analytical approaches for glycidyl esters in edible oils [J]. China Oils Fats, 2017, (2): 83-87.
- [9] 吴少明, 傅武胜, 杨贵芝. 食用植物油中脂肪氯丙醇酯形成机制的研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(1): 266-270.
WU SM, FU WS, YANG GZ. Formation mechanism of 3-chloropropane-1,2-diol esters in edible vegetable oil [J]. Food Sci, 2014, 35(1): 266-270.
- [10] 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]. 无锡: 江南大学, 2015.
ZHOU HR. Distribution of 3-MCPD and 3-MCPDE in fats and oils, their determining and content changing during thermal processing and oil refining process [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [11] 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.
WANG LY, LIU YL, MA YX, et al. Effect of chloride ion content on 3-monochloro-1, 2-propanediol ester and glycidyl esters during soybean oil deodorization [J]. Food Sci, 2018, 39(20): 320-325.
- [12] 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.

- REN WX, LIU YL, MA YX, *et al.* Effect of corn oil deodorization on 3-MCPD esters and glycidol esters [J]. *China Oils Fats*, 2018, 43(4): 57-60.
- [13] FREUDENSTEIN A, WEKING J, MATTHUS B. Influence of precursors on the formation of 3-MCPD and glycidyl esters in a model oil under simulated deodorization conditions [J]. *Eur J Lipid Sci Tech*, 2013, 115(3): 286-294.
- [14] 李利君, 李加辛, 马传国. 食用油中 3-氯丙醇酯的形成机理与消减方法的研究进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2019, (40): 123-132.
- LI LJ, LI JX, MA CG. Research progress on formation mechanism and subtraction methods of 3-chloropropanol esters in edible oils [J]. *J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2019, (40): 123-132.
- [15] 孙月娥, 李超, 王卫东. 分子蒸馏技术及其应用[J]. *粮油加工*, 2010, (2): 91-95.
- SUN YE, LI C, WANG WD. Molecular distillation technology and its application [J]. *Cere Oil Proc*, 2010, (2): 91-95.
- [16] 赵曼, 马传国, 陈小威, 等. 食用油脂生产过程中邻苯二甲酸酯类的迁移规律及其脱除方法的研究进展[J]. *中国油脂*, 2019, (44): 80-84.
- ZHAO M, MA CG, CHEN XW, *et al.* Progress in migration rule and removal method of phthalate esters in edible oils and fats processing [J]. *China Oils Fats*, 2019, (44): 80-84.
- [17] 宋志华, 王兴国, 金青哲, 等. 分子蒸馏从大豆脱臭馏出物中提取维生素 E 的研究[J]. *粮油加工*, 2009, (1): 79-81.
- SONG ZH, WANG XG, JIN QZ, *et al.* Extraction of vitamin E from soybean deodorizer distillate by molecular distillation [J]. *Cere Oil Proc*, 2009, (1): 79-81.
- [18] 朱振雷, 操丽丽, 姜绍通, 等. 分子蒸馏技术纯化甘油二酯工艺优化及产品分析[J]. *食品科学*, 2014, (35): 43-47.
- ZHU ZL, CAO LL, JIANG ST, *et al.* Optimization of purification of diacylglycerol by molecular distillation and characterization of purified product [J]. *Food Sci*, 2014, (35): 43-47.
- [19] 马靖轩, 马传国, 司天雷, 等. 分子蒸馏精制棕榈油甘油二酯工艺研究[J]. *中国油脂*, 2018, (43): 6-9.
- MA JX, MA CG, SI TL, *et al.* Refining of palm oil diacylglycerol by molecular distillation [J]. *China Oils Fats*, 2018, (43): 6-9.
- [20] 孙亚辉, 马传国, 王伟, 等. 分子蒸馏分离提纯甘油二酯中试工艺研究[J]. *粮食与油脂*, 2015, (28): 55-58.
- SUN YH, MA CG, WANG W, *et al.* Pilot trial for separation and purification of diacylglycerol by molecular distillation [J]. *J Cere Oils*, 2015, (28): 55-58.
- [21] 惠菊, 单良, 金青哲, 等. 分子蒸馏提纯共轭亚油酸甘油酯的工艺研究[J]. *粮油加工*, 2009, (8): 60-62.
- HUI J, SHAN L, JIN QJ, *et al.* Purification of conjugated linoleic acid glyceride by molecular distillation [J]. *Cere Oil Proc*, 2009, (8): 60-62.
- [22] MORAES EB, BATISTELLA CB, ALVAREZ MET, *et al.* Evaluation of tocopherol recovery through simulation of molecular distillation process [J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2004, 114(1-3): 689-712.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介



闫亚鹏, 硕士, 主要研究方向为油脂化学与工艺学。

E-mail: 1425927543@qq.com



马传国, 教授, 主要研究方向为食品专用油脂以及植物油脂合成绿色工业品的研究与开发。

E-mail: mcg@haut.edu.cn