

## 油脂加工

## 分子蒸馏对沙棘果油品质影响的研究

司天雷<sup>1,2</sup>, 马靖轩<sup>1</sup>, 马传国<sup>1,2</sup>

(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:** 研究了分子蒸馏法处理沙棘果油, 对其中邻苯二甲酸丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二乙基己酯(DEHP)和苯并(a)芘的脱除效果以及 $V_E$ 、 $\alpha$ -生育酚、类胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素的损失情况进行研究。结果表明: 分子蒸馏工艺参数设定为蒸馏温度 180℃、刮膜转速 300 r/min、系统真空度 0.1 Pa、进料速率 1 mL/min 的情况下, 蒸馏后的沙棘果油中 DBP、DEHP 残留量低于国标检出限(均为 0.1 mg/kg), 显著优于国标限量要求(DBP 含量不大于 0.3 mg/kg、DEHP 含量不大于 0.5 mg/kg); 苯并(a)芘的残留量为 1.56  $\mu$ g/kg, 脱除率达到了 95.4%, 远低于国标限量要求(10  $\mu$ g/kg); 酸值(KOH)由 14.58 mg/g 降到 0.52 mg/g;  $V_E$ 和 $\alpha$ -生育酚经分子蒸馏后含量分别为 72.91 mg/100 g 和 67.65 mg/100 g, 损失率分别为 65.2% 和 59.2%; 类胡萝卜素和 $\beta$ -胡萝卜素的含量分别下降到 196.87 mg/100 g 和 5.25 mg/100 g, 损失率分别为 1.9% 和 24.6%。

**关键词:** 沙棘果油; 分子蒸馏; 邻苯二甲酸酯类塑化剂; 苯并(a)芘

中图分类号: TS225.1; TS224

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2018)05-0011-05

Effect of molecular distillation on quality of *Seabuckthorn* fruit oilSI Tianlei<sup>1,2</sup>, MA Jingxuan<sup>1</sup>, MA Chuanguo<sup>1,2</sup>

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

2. National Engineering Laboratory for Wheat &amp; Corn Further Processing, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** *Seabuckthorn* fruit oil was processed by molecular distillation then the removal effect of phthalic acid esters (PAEs) and benzo(a)pyrene (B(a)P) and loss of  $V_E$ ,  $\alpha$ -tocopherol, carotenoids and  $\beta$ -carotene were studied. The results showed that under the conditions of distillation temperature 180℃, rate of feed 1 mL/min, knifing speed 300 r/min and system vacuum degree 0.1 Pa, the DBP and DEHP residues were under the national standard detection limit (0.1 mg/kg), which was far more below the national standard limits (DBP  $\leq$  0.3 mg/kg, DEHP  $\leq$  0.5 mg/kg). The B(a)P residue in the oil was 1.56  $\mu$ g/kg and the removal rate reached 95.4%, which was far more below the national standard limit (10  $\mu$ g/kg). The acid value reduced from 14.58 mgKOH/g to 0.52 mgKOH/g. The contents of  $V_E$  and  $\alpha$ -tocopherol after molecular distillation were 72.91 mg/100 g and 67.65 mg/100 g respectively, and the loss rates were 65.2% and 59.2% respectively. The contents of carotenoids and  $\beta$ -carotene reduced to 196.87 mg/100 g and 5.25 mg/100 g correspondent with the loss rates 1.9% and 24.6%, respectively.

**Key words:** *Seabuckthorn* fruit oil; molecular distillation; PAEs; B(a)P

沙棘果油系从沙棘果汁中分离出的果汁油及从

沙棘果渣中分离出的果渣油。沙棘果油的主要功能性成分包括脂肪酸( $\Omega-3$ 和 $\Omega-7$ )、类胡萝卜素、生育酚、植物甾醇等。研究表明这些功能性成分的存在使沙棘果油具有抗菌、抗病毒、抗肿瘤、抗溃疡、抗衰老、抗辐射、增强免疫力等功效<sup>[1]</sup>, 在医药、保健食品等领域具有广阔的应用前景。

然而, 油料本身以及油料在生产、储存、运输、加工过程中可能被环境污染, 例如包装材料、加工助

收稿日期: 2017-08-29; 修回日期: 2018-01-17

基金项目: “十三五”国家重点计划支持项目(2016YFD0401405)

作者简介: 司天雷(1986), 男, 讲师, 博士, 研究方向为油脂化学与工程(E-mail: tianleisi@aliyun.com)。

通信作者: 马传国, 教授, 博士生导师(E-mail: mcg66@163.com)。

剂、接触到塑料材质的设备零部件都是塑化剂向食用油中发生迁移的风险因素<sup>[2]</sup>。邻苯二甲酸酯类塑化剂(PAEs)外观为无色透明的油状黏稠液体,易溶于有机溶剂,PAEs没有明显的急毒性作用,但对肝、肾、肺及心脏、生殖等组织器官造成伤害,其中以雄性生殖系统损害最为明显<sup>[3-4]</sup>。另外,由于加工过程中的高温,脂肪、胆固醇、蛋白质和碳水化合物等发生热裂解反应,再经环化和聚合反应导致苯并(a)芘形成。苯并(a)芘是一种化学环境致癌物,是难降解的三致(致癌性、致畸性和致突变性)有毒有害化合物<sup>[5]</sup>。这些风险物质的产生严重影响了油脂的食用安全性。因此,有效脱除沙棘果油中这些有毒有害化合物并尽可能保留其中的功能性成分,对提高食用油品质 and 安全性具有重要意义。

短程分子蒸馏技术是利用轻分子和重分子的平均自由程的差异,在高真空下,当蒸发面和冷凝面的间距介于轻分子和重分子的平均自由程之间时,混合物可在远低于各自沸点的温度下进行分离的一种分离方法<sup>[6]</sup>。该技术的特点为操作温度低、受热时间短、热敏性物质损失少等。分子蒸馏技术在精细化工行业已被广泛应用,但利用分子蒸馏技术处理沙棘果油脱除塑化剂和苯并(a)芘的研究还少有报道。本研究采用分子蒸馏技术处理沙棘果油,对其中塑化剂和苯并(a)芘的脱除效果以及主要功能性成分的保留情况进行探索,为企业生产高质量的沙棘果油提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

沙棘果油经检测其中邻苯二甲酸丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二乙基己酯(DEHP)含量分别为16.71、18.88 mg/kg,苯并(a)芘含量33.72  $\mu\text{g/kg}$ ; DBP和DEHP标准品(纯度 $\geq 98\%$ ):美国Supelco公司;脂肪酸甲酯标准品(37种):Sigma中国公司;氘代同位素内标( $d_4$ -DBP和 $d_4$ -DEHP)(纯度 $\geq 99\%$ ):上海有机化学研究所;实验用水均为超纯水;苯并(a)芘标准品(纯度 $\geq 99.0\%$ ):加拿大TRC公司; $V_E$ 标准品、 $\alpha$ -生育酚( $\geq 95\%$ )、 $\beta$ -胡萝卜素( $\geq 90\%$ ):上海源叶公司;丙酮、三氯甲烷、环己烷、甲苯、乙腈、正己烷、二氯甲烷、无水乙醇、异丙醇均为色谱纯。

#### 1.1.2 仪器与设备

7890A-5975C Agilent 气相色谱-质谱联用仪,VKL70-5 VTA 分子蒸馏设备,7890A Agilent 气相色谱仪,E2695 Waters 高效液相色谱仪,UV2600 岛津紫外分光光度计,分析天平(感量为0.1 mg),R-201 II型旋转蒸发仪,MTN-2800 W 氮吹仪。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 沙棘果油前处理

将沙棘果油在水浴锅上加热至65℃后提高搅拌速率,加入油质量0.05%的磷酸,反应20 min,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,然后将离心后的沙棘果油置于烧杯中在280℃条件下加热,烧杯壁上无粘附物为脱胶处理满足分子蒸馏实验的要求,最后将处理后的沙棘果油作为分子蒸馏的样品备用。

### 1.2.2 沙棘果油相关指标测定

DBP和DEHP含量测定参考GB 5009.271—2016;苯并(a)芘含量测定参考GB 5009.27—2016; $V_E$ 、 $\alpha$ -生育酚含量测定参考GB 5009.82—2016;类胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素含量测定参考GB 31624—2014;酸值测定参考GB/T 5530—2005。

脂肪酸组成分析采用三氟化硼甲酯化法(GB/T 17376—2008),进行气相色谱分析。分析条件:HP-88毛细管色谱柱(100 m  $\times$  250  $\mu\text{m}$   $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ );载气为纯度99.999%氮气;柱初温140℃,保温5 min,以4℃/min升温速率升至240℃,保温25 min;进样口温度240℃;柱流量1.00 mL/min,分流比40:1;进样量1  $\mu\text{L}$ ;FID检测器温度250℃;氢气流量45 mL/min,空气流量400 mL/min。

### 1.2.3 沙棘果油中塑化剂、苯并(a)芘的分子蒸馏脱除

向分子蒸馏装置的进料器中加入处理过备用的沙棘果油,逐次打开旋片泵、扩散泵使真空系统的真空度为0.1 Pa,打开加热器到设定的蒸馏温度,调节设备进料速率和刮膜转速,对沙棘果油进行分子蒸馏。对分子蒸馏后的沙棘果油进行DBP、DEHP和苯并(a)芘含量的测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 蒸馏温度对沙棘果油中DBP、DEHP和苯并(a)芘的脱除效果

选取刮膜转速300 r/min,进料速率3 mL/min,系统真空度0.1 Pa,蒸馏温度分别为180、200、220、240℃进行沙棘果油中塑化剂、苯并(a)芘的分子蒸馏脱除,沙棘果油中DBP、DEHP和苯并(a)芘含量变化如表1所示。

表1 蒸馏温度对沙棘果油中DBP、DEHP和苯并(a)芘含量的影响

蒸馏温度/ ℃	DBP 含量/ (mg/kg)	DEHP 含量/ (mg/kg)	苯并(a)芘含量/ ( $\mu\text{g/kg}$ )
180	—	—	1.67
200	—	—	1.16
220	—	—	1.08
240	—	—	1.06

注 “—”表示未检出。下同。

由表 1 可知,塑化剂( DBP、DEHP) 在 180 ℃ 时就能够被有效脱除,分子蒸馏处理后的沙棘果油中 DBP 和 DEHP 的含量均低于 GB 5009. 271—2016 《食品安全国家标准 食品中邻苯二甲酸酯的测定》的检出限 0. 1 mg/kg,并且远低于 GB 9685—2008 《食品容器、包装材料用添加剂使用卫生标准》规定,非人为添加, DBP 含量不大于 0. 3 mg/kg、DEHP 含量不大于 0. 5 mg/kg 的限量要求。随着蒸馏温度的升高, DBP 和 DEHP 的含量均低于检出限,但是随着蒸馏温度的升高,特别是当蒸馏温度高于 200 ℃ 时,沙棘果油的颜色明显变深,为暗红色,因此蒸馏温度不宜选择过高。苯并( a) 芘在 180 ~ 240 ℃ 的蒸馏温度下脱除率为 95% ~ 97%,苯并( a) 芘的残留量由 180 ℃ 时的 1. 67 μg/kg,随着蒸馏温度的升高降低到 1. 06 μg/kg。根据 GB 2762—2017 《食品安全国家标准 食品中污染物限量》油脂中苯并( a) 芘的含量不得超过 10 μg/kg 的规定,180 ℃ 时苯并( a) 芘残留量远低于国标限量要求。考虑到降低温度能够减少油脂中  $V_E$ 、胡萝卜素等功能性成分的损失<sup>[7]</sup>,因此选取 180 ℃ 为蒸馏温度即可使 DBP、DEHP 和苯并( a) 芘的残留量满足国标要求。

2.2 刮膜转速对沙棘果油中 DBP、DEHP 和苯并( a) 芘的脱除效果

选取蒸馏温度 180 ℃,进料速率 3 mL/min,系统真空度 0. 1 Pa,刮膜转速分别为 200、240、300 r/min 进行沙棘果油中塑化剂和苯并( a) 芘的分子蒸馏脱除,沙棘果油中 DBP、DEHP 和苯并( a) 芘含量变化如表 2 所示。

表 2 刮膜转速对沙棘果油中 DBP、DEHP 和苯并( a) 芘的影响

刮膜转速/ ( r/min)	DBP 含量/ ( mg/kg)	DEHP 含量/ ( mg/kg)	苯并( a) 芘含量/ ( μg/kg)
200	—	—	1. 74
240	—	—	1. 69
300	—	—	1. 67

由表 2 可知, DBP、DEHP 含量在刮膜转速为 200 r/min 时,由原来的 16. 71、18. 88 mg/kg 降低至国标方法的检出限以下,随着刮膜转速的升高 DBP 和 DEHP 的残留量没有显著变化,都是未检出。苯并( a) 芘的残留量则随着刮膜转速的提高降低,在刮膜转速为 300 r/min 时达到最低残留量 1. 67 μg/kg,脱除率达到 95%,残留量远低于国标 10 μg/kg 的限量要求,因此选取刮膜转速为 300 r/min。类似的研究表明,刮膜转速对轻相分离物的规律为,较高的刮膜转速有利于相对分子质量大的目标物的脱

除。刮膜的旋转可以使油脂均匀地在分子蒸馏筒体内壁形成薄液膜,提高转速,液膜厚度降低,有利于减少液膜的传热阻力、传质阻力,从而提高蒸发速率和分离效率;但对于低相对分子质量物质,随着转速的提高,可能导致冷凝面冷凝物增多,且目标物冷凝时释放热量,而这部分热量不能及时流出,导致部分自由程相对较大的组分从冷凝面重新进入油脂中<sup>[8]</sup>。本研究中苯并( a) 芘的脱除与该规律基本一致。

2.3 进料速率对沙棘果油中 DBP、DEHP 和苯并( a) 芘的脱除效果

选取蒸馏温度 180 ℃,刮膜转速 300 r/min,系统真空度 0. 1 Pa,进料速率分别为 1、3、5 mL/min 对沙棘果油中塑化剂和苯并( a) 芘进行分子蒸馏脱除,沙棘果油中 DBP、DEHP 和苯并( a) 芘含量变化如表 3 所示。

表 3 进料速率对沙棘果油中 DBP、DEHP 和苯并( a) 芘含量的影响

进料速率/ ( mL/min)	DBP 含量/ ( mg/kg)	DEHP 含量/ ( mg/kg)	苯并( a) 芘含量/ ( μg/kg)
1	—	—	1. 56
3	—	—	1. 62
5	0. 16	0. 29	1. 83

由表 3 可知, DBP、DEHP 在进料速率分别为 1、3 mL/min 时,其残留量由原来的 16. 71、18. 88 mg/kg 降低至国标方法的检出限以下,都是未检出,随着进料速率升高到 5 mL/min, DBP 和 DEHP 的残留量有所升高,分别为 0. 16、0. 29 mg/kg,但仍满足国标的限量要求。苯并( a) 芘的残留量随着进料速率的上升而升高,由 1. 56 μg/kg 升高至 1. 83 μg/kg,脱除率由 95. 4% 下降到 94. 6%,但是残留量依然远低于国标 10 μg/kg 的限量要求。结果表明,随着进料速率增大,沙棘果油经过蒸发表面的时间缩短,因此受热时间变短,使目标物的分离效率有所降低,这与 Moraes 等<sup>[9]</sup>和栾礼侠<sup>[10]</sup>研究结果类似。

2.4 分子蒸馏处理对沙棘果油中功能性成分含量的影响

本研究选取的分子蒸馏温度均能够有效脱除 DBP、DEHP 和苯并( a) 芘,刮膜转速为 300 r/min、进料速率为 1 mL/min 时苯并( a) 芘的残留量最低。因此,选取刮膜转速 300 r/min、进料速率 1 mL/min、系统真空度 0. 1 Pa,蒸馏温度分别为 180、200、220 ℃ 条件下检测分子蒸馏处理对沙棘果油中  $V_E$ 、 $\alpha$ -生育酚、类胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素含量的影响,结果如表 4 所示。

表4 分子蒸馏处理后沙棘果油中  $V_E$ 、 $\alpha$ -生育酚、类胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素的含量

功能性成分	原料中含量/ (mg/100 g)	含量/(mg/100 g)		
		180 ℃	200 ℃	220 ℃
$V_E$	209.43	72.91	71.66	64.12
$\alpha$ -生育酚	166.01	67.65	67.01	60.65
类胡萝卜素	200.76	196.87	180.21	185.64
$\beta$ -胡萝卜素	6.96	5.25	4.78	4.86

由表4可知,经过分子蒸馏处理,沙棘果油中的  $V_E$  和  $\alpha$ -生育酚的含量显著降低,在蒸馏温度为180 ℃时,  $V_E$  和  $\alpha$ -生育酚的含量从原料中的209.43 mg/100 g和166.01 mg/100 g,分别下降到72.91 mg/100 g和67.65 mg/100 g,损失率分别为65.2%和59.2%,并且随着蒸馏温度的升高,  $V_E$  和  $\alpha$ -生育酚含量进一步降低,在220 ℃时达到最低,分别为64.12 mg/100 g和60.65 mg/100 g,损失率分别为69.4%和63.5%。类胡萝卜素和  $\beta$ -胡萝卜素的含量也是随着蒸馏温度的升高而降低,在180 ℃时从原料中的200.76 mg/100 g和6.96 mg/100 g分别降到196.87 mg/100 g和5.25 mg/100 g,损失率分别为1.9%和24.6%。在200 ℃时类胡萝卜素含量达到最低,为180.21 mg/100 g,220 ℃略有升高,为185.64 mg/100 g。 $\beta$ -胡萝卜素含量在200 ℃和220 ℃时分别为4.78 mg/100 g和4.86 mg/100 g。这些功能性成分的损失由进料速率较慢、物料通过蒸发壁的时间较长导致。 $V_E$ 、 $\alpha$ -生育酚、类胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素都是沙棘果油中的营养物质,是天然的抗氧化剂,含量越高,沙棘果油的氧化稳定性越好,并且营养价值也更高<sup>[11]</sup>,因此在有效脱除塑化剂和苯并(a)芘的基础上,蒸馏温度越低越有利于提高沙棘果油的品质。

## 2.5 分子蒸馏处理对沙棘果油酸值的影响

选取刮膜转速300 r/min,进料速率1 mL/min,系统真空度0.1 Pa,蒸馏温度分别为180、200、220 ℃条件下检测分子蒸馏处理对沙棘果油酸值的影响,结果如表5所示。

表5 分子蒸馏处理后沙棘果油酸值的变化

蒸馏温度/℃	酸值(KOH)/(mg/g)
180	0.52
200	0.46
220	0.49

由表5可知,沙棘果油的酸值经过分子蒸馏处理后显著降低,原料油的酸值(KOH)为14.58 mg/g,经不同温度的分子蒸馏处理后,酸值(KOH)分别降为0.52、0.46 mg/g和0.49 mg/g。在220 ℃时酸值略

有升高,可能是由于冷凝面脂肪酸增多,脂肪酸冷凝时释放热量,而这部分热量不能及时流出,导致部分脂肪酸从冷凝面重新进入油脂中。酸值的降低有利于沙棘果油的氧化稳定性和营养品质。

## 2.6 分子蒸馏处理后沙棘果油脂肪酸组成

选取刮膜转速300 r/min,进料速率1 mL/min,系统真空度0.1 Pa、蒸馏温度180 ℃条件下检测分子蒸馏处理后沙棘果油主要脂肪酸组成,利用37种混合脂肪酸甲酯标样根据出峰时间和出峰顺序判断样品的脂肪酸种类,用面积归一化法进行脂肪酸相对定量。结果如表6所示。

表6 分子蒸馏处理后沙棘果油中主要脂肪酸组成

脂肪酸	相对含量/%	
	原料	分子蒸馏处理
C14:0	0.41	0.41
C16:0	28.20	28.18
C16:1	24.78	24.78
C18:0	1.45	1.46
C18:1	29.13	29.15
C18:2	6.96	6.98
C20:0	0.66	0.66
C18:3	6.41	6.38

由表6可知,沙棘果油的脂肪酸组成在分子蒸馏处理前后没有发生显著变化,特别是其中的功能性脂肪酸亚麻酸( $\Omega$ -3)和棕榈油酸( $\Omega$ -7)含量基本一致。这两种功能性脂肪酸分别占原料和分子蒸馏后样品的31.19%和31.16%,与Kaminskas等<sup>[12]</sup>和薄海波等<sup>[13]</sup>的研究结果一致。沙棘果的品种不同,提取方法不同,以及提取的部位(果肉,沙棘籽)不同都会导致脂肪酸组成有所不同<sup>[14]</sup>。原料与分子蒸馏后的样品均未检测到反式脂肪酸,这与沙棘果油的提取工艺以及分子蒸馏技术有关。本研究所使用的沙棘果油是将沙棘果全果直接压榨然后离心分离后得到的沙棘果油,生产过程中没有高温环节,而分子蒸馏是在高真空度环境中进行,操作温度低,受热时间短,因此未检测到反式脂肪酸的生成。

## 3 结 论

本实验通过分子蒸馏法处理沙棘果油,对油脂中的DBP、DEHP和苯并(a)芘的残留进行分析,同时研究沙棘果油中的功能性成分  $V_E$ 、 $\alpha$ -生育酚、类胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素含量变化。结果表明:采用蒸馏温度180 ℃、刮膜转速300 r/min、系统真空度0.1 Pa、进料速率1 mL/min时,沙棘果油中DBP和DEHP的残留量可分别由16.71、18.88 mg/kg降低至国标方法检出限0.1 mg/kg以下,远低于国标DBP含量不大于0.3 mg/kg、DEHP含量不大于0.5 mg/kg的限量要求,苯并(a)芘的残留量为1.56

$\mu\text{g}/\text{kg}$ , 脱除率达到了 95.4%, 远低于国标限量要求的  $10 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。酸值(KOH)由  $14.58 \text{ mg}/\text{g}$  降为  $0.52 \text{ mg}/\text{g}$ 。脂肪酸组成未发生明显变化, 并且未检测出反式脂肪酸。分子蒸馏法处理沙棘果油虽然能够有效脱除油脂中的有害物质, 但是对于一些功能性成分如  $V_E$ 、 $\alpha$ -生育酚、类胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素也造成了一定损失, 特别是  $V_E$  和  $\alpha$ -生育酚对分子蒸馏温度十分敏感, 在  $180^\circ\text{C}$  时就明显大量损失, 由原料中的  $209.43 \text{ mg}/100 \text{ g}$  和  $166.01 \text{ mg}/100 \text{ g}$ , 分别下降到  $72.91 \text{ mg}/100 \text{ g}$  和  $67.65 \text{ mg}/100 \text{ g}$ , 损失率分别为 65.2% 和 59.2%。类胡萝卜素和  $\beta$ -胡萝卜素的含量在  $180^\circ\text{C}$  时由原料中的  $200.76 \text{ mg}/100 \text{ g}$  和  $6.96 \text{ mg}/100 \text{ g}$ , 分别下降到  $196.87 \text{ mg}/100 \text{ g}$  和  $5.25 \text{ mg}/100 \text{ g}$ , 损失率分别为 1.9% 和 24.6%。在有效脱除有害物质的同时尽可能使用较低的温度有利于减少  $V_E$ 、 $\alpha$ -生育酚、类胡萝卜素、 $\beta$ -胡萝卜素等功能性物质的损失, 提高油脂的氧化稳定性, 减少营养物质的损失。

#### 参考文献:

- [1] 臧茜茜, 邓乾春, 从仁怀, 等. 沙棘油功效成分及药理功能研究进展[J]. 中国油脂, 2015, 40(5): 76-81.
- [2] 孙宝国, 孙金沅. 邻苯二甲酸酯类化合物的天然存在及安全性问题的探讨[J]. 中国食品学报, 2011(8): 1-8.
- [3] 柳春红, 孙远明, 杨艺超, 等. 邻苯二甲酸酯类增塑剂的污染及暴露评估现状[J]. 现代食品科技, 2012, 28(3): 339-341.
- [4] NANNI N, FISELIER K, GROB K, et al. Contamination of vegetable oils marketed in Italy by phthalic acid esters[J]. Food Control, 2011, 22: 209-214.

(上接第10页)

且制备的榛子油酸值低, 过氧化值也低,  $V_E$  和植物甾醇含量相对较高, 榛子油品质更好。采用单因素实验和响应面实验优化得到超临界  $\text{CO}_2$  萃取榛子油最佳工艺条件为: 萃取压力  $27 \text{ MPa}$ , 萃取温度  $50^\circ\text{C}$ ,  $\text{CO}_2$  流量  $20 \text{ L}/\text{h}$ 。在最优工艺条件下, 榛子的提油率为 93.32%。榛子油是一种不饱和脂肪酸含量很高的油品, 其不饱和脂肪酸含量达 95% 以上。

#### 参考文献:

- [1] 杨青珍, 王锋, 李康. 超声波辅助提取榛子油的工艺条件优化[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(8): 58-61.
- [2] 刘景圣, 郑鸿雁, 袁媛, 等. 超临界  $\text{CO}_2$  萃取榛子油工艺条件的研究[J]. 食品科学, 2003, 24(8): 96-98.
- [3] 忻耀年. 油料冷榨的概念和应用范围[J]. 中国油脂, 2005, 30(2): 20-22.
- [4] 齐玉堂, 许芙萍, 祁鲲. 低温制油技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 271.

- [5] 冯亚净, 王瑞鑫, 李书国. 食品中苯并芘的来源及减控方法的研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(2): 72-75.
- [6] 张泽生, 冯帆, 胡芳, 等. 分子蒸馏技术富集沙棘果油中棕榈油酸的研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(3): 39-41.
- [7] 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.
- [8] 刘玉兰, 杨金强, 张明明, 等. 分子蒸馏法脱除油脂中塑化剂效果的研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(2): 19-22.
- [9] MORAES E B, BATISTELLA C B, ALVAREZ M E T, et al. Evaluation of tocopherol recovery through simulation of molecular distillation process[J]. Appl Biochem Biotech, 2004, 113: 689-711.
- [10] 栾礼侠. 分子蒸馏分离工艺研究及其在物料分离中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [11] 王岳. 沙棘全果油生物活性及超临界  $\text{CO}_2$  萃取工艺[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [12] KAMINSKAS A B V, BUDRIONIENE R, HENDRIXSON V, et al. Fatty acid composition of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) pulp oil of Lithuanian origin stored at different temperatures[J]. Biologija, 2006, 6(2): 39-41.
- [13] 薄海波, 秦榕. 沙棘果油与沙棘籽油脂肪酸成分对比研究[J]. 食品科学, 2008, 29(5): 378-381.
- [14] 丁健, 关莹, 阮成江, 等. 沙棘果油提取工艺的正交试验优化及其脂肪酸组分测定[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 13-18.

- [5] 胡淑珍, 王振, 李树君, 等. 浸出制油技术研究进展[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(11): 153-157.
- [6] SAHENA F, ZAIDUL I S M, JINAP S. Application of supercritical  $\text{CO}_2$  in lipid extraction[J]. J Food Eng, 2009, 95(2): 240-253.
- [7] 高荣海. 榛子油提取工艺的研究[J]. 辽宁林业科技, 2013(6): 25-27.
- [8] LI G P, LI J, LI D. Seasonal variation in nutrient composition of *Mytiluscoruscus* form China[J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(13): 7831-7837.
- [9] YALCIN H. Antioxidative effects of some phenolic compounds and carotenoids on refined hazelnut oil[J]. J Verbr Lebensmi, 2011, 6(3): 353-358.
- [10] 王予沁, 李桂华, 张文, 等. 河南省核桃仁及核桃油组成成分分析的研究[J]. 粮油加工, 2009(8): 47-50.
- [11] 蔡达, 刘红芝, 刘丽, 等. 不同工艺制备核桃油品质比较及相关性分析[J]. 中国油脂, 2014, 39(3): 39-42.