

# 响应面法优化高压脉冲电场协同双酶法 提取乳木果油工艺及其品质分析

金 瑾<sup>1</sup>, 秦令祥<sup>2</sup>, 隋志方<sup>1</sup>, 刘延奇<sup>3</sup>

(1. 鹤壁市产品质量检验检测中心, 河南 鹤壁 458030; 2. 漯河食品工程职业大学, 河南 漯河 462300;  
3. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 郑州 450002)

**摘要:**旨在为乳木果油的高效提取提供参考,以乳木果为原料,采用高压脉冲电场协同双酶法提取乳木果油,通过单因素试验研究酶种类、电场强度、双酶添加量、酶解温度对乳木果油得率的影响,并采用响应面法优化提取工艺。同时对最佳工艺下提取的乳木果油的理化指标、脂肪酸组成和生物活性成分含量进行分析。结果表明:高压脉冲电场协同双酶法提取乳木果油最佳工艺为电场强度 20 kV/cm、双酶(纤维素酶与果胶酶质量比 1:1)添加量 2.0%、酶解温度 50℃,在此条件下乳木果油得率为 48.69%;所得乳木果油酸值、过氧化值均符合食用植物油国标要求,乳木果油主要脂肪酸为硬脂酸、油酸、亚油酸、棕榈酸和花生酸,不饱和脂肪酸含量为 47.85%;乳木果油含有 4.39%的萜烯醇、2.97%的 $\beta$ -香树脂素、1.52%的羽扇豆醇、1.48%的羊毛甾醇等生物活性成分。综上,高压脉冲电场协同双酶法提取乳木果油可行,产品品质较好。

**关键词:**乳木果油;高压脉冲电场;双酶;脂肪酸;生物活性成分

**中图分类号:**TS224.4;TS222+.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2025)07-0008-06

## Optimization of high voltage pulsed electric field combined dual enzymes method extraction of shea butter by response surface methodology and its quality analysis

JIN Jin<sup>1</sup>, QIN Lingxiang<sup>2</sup>, SUI Zhifang<sup>1</sup>, LIU Yanqi<sup>3</sup>

(1. Hebi City Product Quality Inspection and Testing Center, Hebi 458030, Henan, China; 2. Luohe Food Engineering Vocational University, Luohe 462300, Henan, China; 3. School of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Aiming to provide a reference for the efficient extraction of shea butter, shea fruit was used as raw material, and high voltage pulsed electric field combined dual enzymes method was used to extract shea butter. The effects of enzyme type, electric field intensity, dual enzymes dosage, and enzymatic hydrolysis temperature on the yield of shea butter were investigated by single factor experiment. The extraction process was optimized by response surface methodology. In addition, the physicochemical indicators, fatty acid composition and bioactive component content of the shea butter prepared under the optimal conditions were analyzed. The results showed that the optimal process for extracting shea butter were obtained as follows: electric field intensity 20 kV/cm, dual enzymes (a mass ratio of cellulase to pectinase 1:1) dosage 2.0%, and enzymatic hydrolysis temperature 50℃. Under these conditions, the yield of shea butter was 48.69%, and the acid value and peroxide value of the shea butter met the requirements of the national standard for edible vegetable oil. The main fatty acids of the shea butter

收稿日期:2024-04-11;修回日期:2025-02-14

作者简介:金 瑾(1981),女,高级工程师,研究方向为食品检验检测及功能食品开发(E-mail)emma1008sun@163.com。

通信作者:秦令祥,副教授,硕士(E-mail)10663123@qq.com。

included stearic acid, oleic acid, linoleic acid, palmitic acid, and arachidic acid, with unsaturated fatty acid content at 47.85%. The shea butter also contained 4.39% terpene alcohol, 2.97%

$\beta$ -amyrin, 1.52% lupeol, and 1.48% lanosterol, and other bioactive components. In summary, the method of extracting shea butter using high voltage pulsed electric field combined dual enzymes is feasible, and the product quality is good.

**Key words:** shea butter; high voltage pulsed electric field; dual enzymes; fatty acid; bioactive component

乳木果 (*Vitellaria paradoxa* C. F. Gaertn.), 又名牛油果, 是山榄科牛油果属乳木果树的果实<sup>[1-2]</sup>, 原产于西非<sup>[3]</sup>。乳木果富含脂肪、蛋白质和微量元素等<sup>[4-5]</sup>, 其种仁中脂肪含量高达 45% ~ 55%<sup>[1]</sup>。乳木果油, 又称牛油树脂, 呈白色至淡黄色<sup>[6]</sup>, 安全无毒, 有“植物油中的翡翠”之称<sup>[7]</sup>。2017 年 5 月, 国家卫生和计划生育委员会批准乳木果油为新食品原料<sup>[8]</sup>。乳木果油中含有不饱和脂肪酸、酚类化合物等功效成分<sup>[9]</sup>, 具有抗氧化、抗老、防晒保湿、降低胆固醇和抗炎抑菌等功效<sup>[10-11]</sup>。目前, 对乳木果油的研究大多集中在成分分析及功能作用方面, 而对其提取的相关报道较少。

传统的油脂提取方法有压榨法、溶剂浸出法, 但压榨法存在出油率低等问题<sup>[12]</sup>, 溶剂浸出法存在溶剂残留等问题<sup>[13]</sup>。酶法提油是通过酶破坏细胞壁, 促使脂多糖和脂蛋白分解, 从而促进油脂的溶出<sup>[14]</sup>。相较于单一酶法提油, 双酶法提油通过两种酶的互补和协同作用, 可显著加快反应速度并提升提油效率。高压脉冲电场 (High voltage pulsed electric field, HPEF) 技术是利用脉冲放电促使细胞破碎, 使胞内物质溶出的技术, 该技术已被应用于多种油料中油脂的提取<sup>[15]</sup>, 相较于传统油脂提取方法, HPEF 技术具有耗能低、油脂品质高等优点<sup>[16]</sup>, 但该技术乳木果油提取中未见报道。因此, 本文采用 HPEF 协同双酶法提取乳木果油, 采用单因素试验结合响应面法优化提取工艺, 并分析其品质, 以期乳木果油的高效提取提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

乳木果 (选取自然成熟、无腐烂、无虫害、饱满的果实, 油脂含量 53.29%), 广西润东苗木有限公司; 纤维素酶 (10 000 U/g)、果胶酶 (10 000 U/g), 深圳零零一生物科技有限公司; 半纤维素酶 (5 000 U/g)、碱性蛋白酶 (50 000 U/g)、酸性蛋白酶 (50 000 U/g), 广州华钰生物科技有限公司;  $\beta$ -谷甾醇、羊毛甾醇、羽扇豆醇、菜籽甾醇、 $\beta$ -香树脂素标准品, 湖北萃园生物科技有限公司; 萜烯醇标准品, 四川省维克奇生物科技有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

PEF 高压脉冲电场萃取设备, 南京杰隆电子科技有限公司; YJ-KH 鼓风干燥箱, 东莞友佳仪器有限公司; FS-200 中草药粉碎机, 南京冠诚机械设备有限公司; AX223 分析天平, 上海颖领电子衡器有限公司; LT 水浴锅, 上海理涛科技有限公司; TG16 离心机, 盐城凯特仪器有限公司; GC128 气相色谱仪, 上海仪田精密仪器有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 乳木果预处理

将乳木果放入干燥箱干燥, 再经粉碎机粉碎, 过筛, 备用。

#### 1.2.2 HPEF 协同双酶法提取乳木果油

准确称取 20.0 g 乳木果粉, 按料液比 1:10 加入水, 混合均匀, 放入高压脉冲电场萃取设备内, 在一定的电场强度、脉冲数为 10 的条件下进行 HPEF 提取, 所得混合料液用 0.1 mol/L 柠檬酸调节 pH 至 4.5, 加入一定量的双酶 (以乳木果粉质量计), 在一定的温度下酶解 4 h。酶解完成后在沸水浴中灭酶 10 min, 然后在 6 000 r/min 条件下离心 20 min, 取上层游离油, 在 105 °C 下干燥 1 h 得到乳木果油。

#### 1.2.3 乳木果油得率的计算

乳木果油得率 ( $Y$ ) 按式 (1) 计算。

$$Y = m_1 / m_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $m_1$  为乳木果油的质量, g;  $m_2$  为乳木果粉的质量, g。

#### 1.2.4 乳木果油的品质分析

##### 1.2.4.1 理化指标测定

分别按照 GB 5009.229—2016、GB 5009.227—2016、GB/T 5534—2008、GB/T 5532—2022、GB/T 5535.1—2008 测定乳木果油的酸值、过氧化值、皂化值、碘值、不皂化物含量。

##### 1.2.4.2 脂肪酸组成测定

按照 GB 5009.168—2016 测定乳木果油的脂肪酸组成及相对含量。

##### 1.2.4.3 生物活性成分的测定

参照 Azadmard-Damirchi<sup>[17]</sup>、Tabee<sup>[18]</sup> 等方法对乳木果油中萜烯醇、 $\beta$ -香树脂素、羊毛甾醇、

羽扇豆醇、 $\beta$ -谷甾醇、菜籽甾醇含量进行测定。

### 1.2.5 数据处理

每组试验重复3次,采用Excel 2010和Design-Expert 12软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 乳木果油提取单因素试验

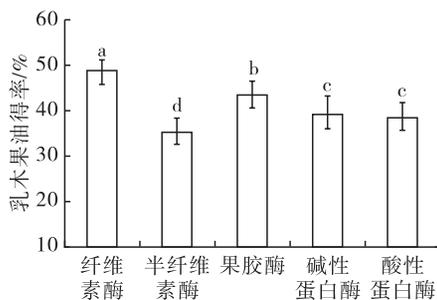
#### 2.1.1 酶的选择

在无HPEF提取,采用单一酶,在各自适宜的酶解温度和pH条件(见表1)下,按1.2.2方法进行酶法提取乳木果油,考察酶种类对乳木果油得率的影响,结果见图1。

表1 不同酶的酶解提取条件

Table 1 Extraction conditions for different enzymes

酶种类	添加量/%	pH	酶解温度/°C
纤维素酶	2	4.5	50
半纤维素酶	2	4.5	45
果胶酶	2	4.5	45
碱性蛋白酶	2	8.0	50
酸性蛋白酶	2	4.0	50



注:不同小写字母表示有显著差异( $p < 0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ )

图1 酶种类对乳木果油得率的影响

Fig. 1 Effect of enzyme types on the yield of shea butter

由图1可知,不同酶的乳木果油得率存在差异,其中纤维素酶的乳木果油得率最大,之后依次是果胶酶、碱性蛋白酶、酸性蛋白酶、半纤维素酶的,这可能是不同的酶对乳木果酶解的程度不同导致的。由于植物细胞壁主要成分是纤维素和果胶,单一酶作用不能充分水解细胞壁,纤维素酶和果胶酶复合后酶解效果可能会更好。因此,本试验选择纤维素酶和果胶酶(质量比1:1)复合进行乳木果油的提取。

#### 2.1.2 电场强度的影响

在双酶添加量2.0%、酶解温度50°C条件下,考察电场强度对乳木果油得率的影响,结果见图2。

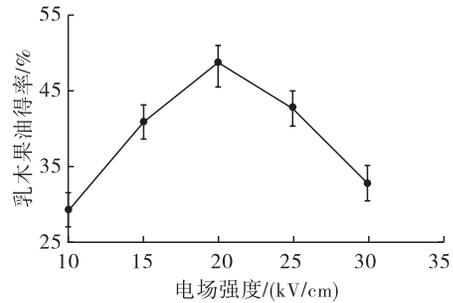


图2 电场强度对乳木果油得率的影响

Fig. 2 Effect of electric field intensity on the yield of shea butter

由图2可知,乳木果油得率随着电场强度增加呈先升高后降低的趋势,在电场强度为20 kV/cm时达到最大值。增大电场强度,可促使物料细胞膜两侧的电位差增加,导致物料细胞破坏数量和程度增加,利于物料中油脂的扩散和溶出,从而使油脂得率升高;但电场强度过高,会导致油脂降解,从而使油脂得率降低。因此,电场强度以20 kV/cm为佳。

#### 2.1.3 双酶添加量的影响

在电场强度20 kV/cm、酶解温度50°C条件下,考察双酶添加量对乳木果油得率的影响,结果见图3。

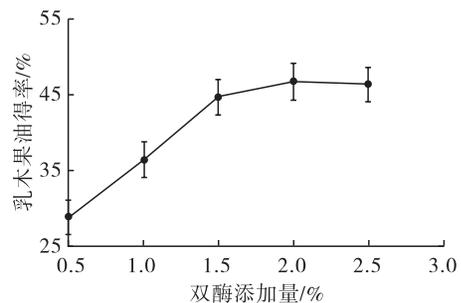


图3 双酶添加量对乳木果油得率的影响

Fig. 3 Effect of dual enzymes dosage on the yield of shea butter

由图3可知,乳木果油得率随着双酶添加量的增加先升高后趋于稳定,在双酶添加量为2.0%时达到最大值。酶添加量增加,双酶的作用效果不断增强,细胞被破坏的程度增强,油脂溶出增加,油脂得率升高;但当双酶添加量超过2.0%后,酶的作用基本完全,油脂溶出也基本完全,再增加双酶添加量,油脂溶出也不再增多,油脂得率趋于稳定。因此,双酶添加量以2.0%为佳。

#### 2.1.4 酶解温度的影响

在电场强度20 kV/cm、双酶添加量2.0%条件下,考察酶解温度对乳木果油得率的影响,结果见图4。

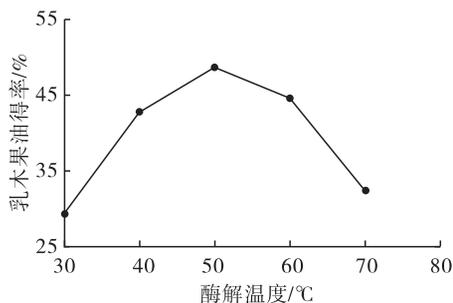


图4 酶解温度对乳木果油得率的影响

Fig. 4 Effect of enzymatic hydrolysis temperature on the yield of shea butter

由图4可知,乳木果油得率随着酶解温度升高先升高后减小,在酶解温度50℃时达到最大值。酶解温度升高,酶的活性和作用效果不断增强,使乳木果油得率提高,但酶解温度过高会抑制酶的活性,使乳木果油得率降低。因此,酶解温度以50℃为佳。

## 2.2 乳木果油提取响应面试验

### 2.2.1 回归方程的建立

在单因素试验的基础上,选择纤维素酶和果胶酶(质量比1:1)复合作为酶解用酶,以乳木果油得率( $Y$ )为响应值,电场强度( $A$ )、双酶添加量( $B$ )和酶解温度( $C$ )为影响因素,采用 Design - Expert 12 软件设计响应面试验。响应面试验因素与水平见表2,响应面试验设计与结果见表3。

表2 响应面试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of response surface methodology

水平	A 电场强度/ (kV/cm)	B 双酶 添加量/%	C 酶解 温度/℃
-1	15	1.5	40
0	20	2.0	50
1	25	2.5	60

表3 响应面试验设计与结果

Table 3 Design and results of response surface methodology

试验号	A	B	C	Y/%
1	-1	-1	0	38.26
2	1	-1	0	42.74
3	-1	1	0	43.47
4	1	1	0	43.19
5	-1	0	-1	42.93
6	1	0	-1	44.72
7	-1	0	1	42.19
8	1	0	1	44.69
9	0	-1	-1	43.18
10	0	1	-1	45.73
11	0	-1	1	42.55
12	0	1	1	45.78

续表3

试验号	A	B	C	Y/%
13	0	0	0	48.67
14	0	0	0	48.68
15	0	0	0	48.69
16	0	0	0	48.71
17	0	0	0	48.72

采用 Design - Expert 12 软件对表3的试验结果进行回归拟合,得到回归方程: $Y = 48.69 + 1.06A + 1.43B - 0.17C - 1.19AB + 0.1775AC + 0.17BC - 3.73A^2 - 3.05B^2 - 1.33C^2$ 。

### 2.2.2 回归模型的方差分析

对回归模型进行方差分析,结果见表4。

表4 回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance in regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	146.93	9	16.33	12 634.08	<0.000 1**
A	9.01	1	9.01	6 972.92	<0.000 1**
B	16.36	1	16.36	12 660.52	<0.000 1**
C	0.23	1	0.23	176.31	<0.000 1**
AB	5.66	1	5.66	4 383.73	<0.000 1**
AC	0.13	1	0.13	97.53	<0.000 1**
BC	0.11	1	0.11	89.46	<0.000 1**
A <sup>2</sup>	58.53	1	58.53	45 293.50	<0.000 1**
B <sup>2</sup>	39.19	1	39.19	30 327.67	<0.000 1**
C <sup>2</sup>	7.48	1	7.48	5 792.27	<0.000 1**
残差	0.009	7	0.001		
失拟项	0.007	3	0.002	5.68	0.063 3
纯误差	0.002	4	0.000		
总和	146.93	16			

注:\*\*表示差异极显著( $p < 0.01$ )

Note: \*\*.  $p < 0.01$

由表4可知,模型 $p$ 值小于0.01,极显著,而失拟项 $p$ 值大于0.05,不显著,表明此模型可信度高。模型的决定系数( $R^2$ )为0.999 9,表明模型拟合度高,模型的调整决定系数( $R^2_{Adj}$ )为0.999 9,表明此模型能解释99.99%响应值的变化,可用于HPEF协同双酶法提取乳木果油的工艺优化。由表4还可知,所有项的影响均极显著( $p < 0.01$ ),各因素影响大小顺序为 $B > A > C$ ,即双酶添加量 > 电场强度 > 酶解温度。

### 2.2.3 最佳条件的确定及验证

预测的乳木果油最佳提取工艺为电场强度20.55 kV/cm、双酶添加量2.11%、酶解温度49.61℃,在此条件下乳木果油得率理论值为48.91%。结合实际情况,将上述工艺调整为电场强度20 kV/cm、双酶添

加量 2.0%、酶解温度 50℃,在此条件下进行 3 次平行验证试验,乳木果油得率的平均值为 48.69%,与理论值的相对误差为 0.45%,表明该模型可靠。

## 2.3 乳木果油的品质分析

### 2.3.1 理化指标

对最佳提取工艺下所得乳木果油的理化指标进行测定,结果见表 5。

表 5 乳木果油的理化指标

Table 5 Physicochemical indicators of shea butter

项目	指标
不皂化物含量/%	6.29 ± 0.22
酸值(KOH)/(mg/g)	2.93 ± 0.18
过氧化值/(g/100 g)	0.22 ± 0.14
皂化值(KOH)/(mg/g)	181.05 ± 1.31
碘值(I)/(g/100 g)	86.29 ± 0.53

由表 5 可知,HPEF 协同双酶法提取的乳木果油的酸值、过氧化值均满足 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》要求〔酸值(KOH) ≤ 3 mg/g,过氧化值 ≤ 0.25 g/100 g〕。

### 2.3.2 脂肪酸组成

最佳提取工艺下所得乳木果油的主要脂肪酸组成及相对含量见表 6。

表 6 乳木果油的主要脂肪酸组成及相对含量

Table 6 Main fatty acid composition and relative content of shea butter

脂肪酸	相对含量/%
硬脂酸	45.83 ± 0.18
油酸	42.69 ± 0.23
亚油酸	5.16 ± 0.11
棕榈酸	3.11 ± 0.16
花生酸	1.48 ± 0.09

由表 6 可知,HPEF 协同双酶法提取的乳木果油的脂肪酸主要是硬脂酸和油酸,不饱和脂肪酸含量为 47.85%,与张传光等<sup>[1]</sup>的研究结果相似。

### 2.3.3 生物活性成分

最佳提取工艺下所得乳木果油的生物活性成分及含量见表 7。

表 7 乳木果油的生物活性成分及含量

Table 7 Content of bioactive components in shea butter

成分	含量/%
萜烯醇	4.39 ± 0.11
β-香树脂素	2.97 ± 0.05
羽扇豆醇	1.52 ± 0.12
羊毛甾醇	1.48 ± 0.14
β-谷甾醇	0.67 ± 0.04
菜籽甾醇	0.05 ± 0.03

由表 7 可知,乳木果油中生物活性成分萜烯醇、β-香树脂素、羽扇豆醇、羊毛甾醇含量分别为 4.39%、2.97%、1.52% 和 1.48%,与黄贤校等<sup>[9]</sup>报道的乳木果油中生物活性成分的含量相当。此外,乳木果油还含有少量的 β-谷甾醇和菜籽甾醇。

## 3 结论

采用 HPEF 协同双酶法提取乳木果油,在单因素试验的基础上,经响应面法优化,得到最佳提取工艺为电场强度 20 kV/cm、双酶(纤维素酶与果胶酶质量比 1:1)添加量 2.0%、酶解温度 50℃,在此条件下乳木果油得率为 48.69%。所得乳木果油酸值、过氧化值均符合食用植物油国标要求,乳木果油主要脂肪酸为硬脂酸、油酸、亚油酸、棕榈酸和花生酸,不饱和脂肪酸含量为 47.85%,并且含有 4.39% 的萜烯醇、2.97% 的 β-香树脂素、1.52% 的羽扇豆醇、1.48% 的羊毛甾醇等生物活性成分,是具有一定营养价值的功能性油脂。

## 参考文献:

- [1] 张传光,罗婷,负新华,等. 云南引种乳木果现状及乳木果油脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2019, 44(4): 102-104, 111.
- [2] 陈倩颖,程孝中,蔡旭冉. 超临界 CO<sub>2</sub> 提取乳木果油工艺条件优化及对大鼠抗氧化能力的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(12): 145-150.
- [3] DIMOBE K, GOETZE D, OUÉDRAOGO A, et al. Aboveground biomass allometric equations and carbon content of the shea butter tree (*Vitellaria paradoxa* C. F. Gaertn., Sapotaceae) components in Sudanian savannas (West Africa) [J]. Agrofor Syst, 2019, 93(3): 1119-1132.
- [4] MARANZ S, WIESMAN Z. Influence of climate on the tocopherol content of shea butter[J]. J Agric Food Chem, 2004, 52(10): 2934-2937.
- [5] 吴文澜,梁菊,董亚南,等. 乳木果油的油脂成分分析及其体外促渗作用[J]. 武汉大学学报(理学版), 2012, 58(4): 313-316.
- [6] 李建林,魏冰,孟橘,等. 乳木果油制取工艺及设备探讨[J]. 粮食与食品工业, 2015, 22(6): 22-26.
- [7] 杨耿,张勋,陈亦豪,等. 乳木果油的超声波辅助提取工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2018, 43(11): 89-93.
- [8] 解读《乳木果油等 10 种新食品原料的公告》[J]. 饮料工业, 2017, 20(3): 4-5.
- [9] 黄贤校,邹彦平,高媛媛,等. 乳木果液油中生物活性物质提取工艺的研究[J]. 中国油脂, 2015, 40(4): 69-73.

(下转第 33 页)

260 ℃脱臭处理 1 h 条件下, COS 酯交换产物中总 CPFA 含量由 96.51 mg/kg 降低至 45.23 mg/kg, Halphen 实验结果显示为阴性。综上, COS 酯交换产物可作为起酥油基料油。

#### 参考文献:

- [1] 侯安会, 薛敏, 梁晓芳, 等. 大豆油与棉籽油饲料对花鲈生长性能及脂质和能量代谢的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(6): 3903-3919.
- [2] 殷晓琳, 杨国龙, 刘伟, 等. 棉籽油硬脂和全氢化棉籽油硬脂的组成、热性质和微观结构分析[J]. 中国油脂, 2023, 48(3): 12-17.
- [3] 谢志军, 王会, 张科红. 棉籽油干法分提工艺实践及分提产品的应用[J]. 中国油脂, 2011, 36(8): 18-20.
- [4] 王美霞, 周大云, 马磊, 等. 棉籽油脂肪酸组成分析与评价[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 136-141.
- [5] MITCHELL B, ROZEMA B, VENNARD T, et al. Determination of nutritional and cyclopropenoid fatty acids in cottonseed by a single GC analysis[J]. J Am Oil Chem Soc, 2015, 92(7): 947-956.
- [6] 焦晓明. 植物环丙烯脂肪酸合成的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [7] 仪凯, 彭元怀, 李建国. 我国食用油脂改性技术的应用与发展[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(2): 1-3.
- [8] 温小荣, 周二晓, 袁媛, 等. 工业酶法和化学法酯交换在油脂改性应用中的比较[J]. 中国油脂, 2020, 45(5): 78-81.
- [9] ANDERSON D. A primer on oils processing technology [M]//SHAHIDI F. Bailey's industrial oil fat products. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2005: 1-56.
- [10] 唐传核, 彭志英. 酯交换技术及其在油脂工业中的应用[J]. 中国油脂, 2002, 27(2): 59-62.
- [11] 黄璜. 脂肪酶催化棉籽油冬化产物制备结构脂质研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
- [12] SU R, LIU X, SUN - WATERHOUSE D, et al. Enzymatic interesterification of palm stearin, flaxseed oil and cottonseed stearin to produce stable plastic fat with balanced  $\omega$ -6 and  $\omega$ -3 fatty acids[J]. J Oleo Sci, 2023, 72(8): 799-810.
- [13] 王辉. 棉籽油酯交换法制备零反式脂肪酸起酥油的研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2014.
- [14] 宋振佳. 棉籽油制备零反式脂肪酸烘焙型起酥油的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [15] 康宝. 高油酸花生油酶促酯交换合成类可可脂及其性能研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
- [16] PUTLAND A W. Halphen test for cottonseed oil [J]. Cotton Oil Press, 1922, 6(2): 41-42.
- [17] 徐存吉. 酯化反应的反应条件优化及低反式脂肪酸营养黄油的制备[D]. 合肥: 安徽大学, 2013.
- [18] MING L O, GHAZALI H M, CHIEW LET C. Use of enzymatic transesterified palm stearin - sunflower oil blends in the preparation of table margarine formulation [J]. Food Chem, 1999, 64(1): 83-88.
- [19] MIKLOS R, ZHANG H, LAMETSCH R, et al. Physicochemical properties of lard - based diacylglycerols in blends with lard [J]. Food Chem, 2013, 138(1): 608-614.
- [20] 张文德. 香油掺假检验: Halphen 试验方法的改进 [J]. 中国油脂, 1988, 13(2): 31-33.
- [21] FAURE P K. Sterculic acid and its halphen reaction[J]. Nature, 1956, 178(4529): 372-373.
- 
- (上接第 12 页)
- [10] KORNSTEINER M, WAGNER K H, ELMADFA I. Tocopherols and total phenolics in 10 different nut types [J]. Food Chem, 2006, 98(2): 381-387.
- [11] 沈金荣. 乳木果油的提取及其类可可脂的制备[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [12] 高娟娟, 李栋, 苏丹, 等. 沙棘果油的提取工艺及其营养因子应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 400-407.
- [13] 周程. 桂花精油提取技术的研究进展[J]. 轻工科技, 2021, 37(8): 16-17.
- [14] 王恺, 田振华. 果胶酶法提取亚麻籽油工艺条件优化[J]. 中国油脂, 2022, 47(8): 31-33.
- [15] 王菊花, 许佳敏, 白万明, 等. 高压脉冲电场处理对初榨橄榄油得率和品质的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(4): 11-15, 38.
- [16] LUCAS P F, ERIC K S. Pulsed electric field - assisted extraction techniques for obtaining vegetable oils and essential oils: Recent progress and opportunities for the food industry[J/OL]. Sep Pur Technol, 2025, 354: 128833 [2024-04-11]. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128833>.
- [17] AZADMARD - DAMIRCHI S, HABIBI - NODEH F, HESARI J, et al. Effect of pretreatment with microwaves on oxidative stability and nutraceuticals content of oil from rapeseed[J]. Food Chem, 2010, 121(4): 1211-1215.
- [18] TABEE E, AZADMARD - DAMIRCHI S, JÄGERSTAD M, et al. Effects of  $\alpha$ -tocopherol on oxidative stability and phytosterol oxidation during heating in some regular and high - oleic vegetable oils[J]. J Am Oil Chem Soc, 2008, 85(9): 857-867.