

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.033

# 白芝麻油脂理化特性及组成分析\*

梁少华 彭乐 王亚东 王培慧

(河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450052)

**【摘要】** 分析测定了不同产地白芝麻压榨油脂的折光指数、皂化值及不皂化物含量等理化指标;采用气相色谱法分析了压榨白芝麻油中脂肪酸成分含量,其不饱和脂肪酸的相对含量占84%以上;并用胰脂酶选择性水解方法分析了压榨白芝麻油的甘三酯分子结构组成,发现其LOL相对含量最高(22.98%~25.62%);高效液相色谱法测定压榨白芝麻油中维生素E含量为13.73~54.43 mg/(100 g),芝麻素含量为60.14~69.10 mg/(100 g);分析测定了不同产地芝麻制取的压榨白芝麻油氧化稳定性,结果表明,白芝麻油4号氧化稳定性相对较好。

**关键词:** 芝麻油 理化性质 脂肪酸组成 维生素E

**中图分类号:** TS225.1<sup>+</sup>1; TS201.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)11-0174-06

## Physical and Chemical Characteristics and Composition Analysis for White Sesame Oil

Liang Shaohua Peng Le Wang Yadong Wang Peihui

(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

### Abstract

The physical and chemical indexes of the squeezing white sesame oil from different areas were determined, including the refraction index, saponification number and unsaponifiable matter content, etc. The fatty acid compositions of white sesame oil were analyzed by using gas chromatography. The relatively content of unsaturated fatty acids was more than 84%. The method of pancreatic enzyme selective hydrolysis was used to analyze the triacylglycerols molecular structures in the squeezing white sesame oils. The LOL (sn-2-oleic acid-1,3-two linoleic acid glyceride) relatively content was the highest (22.98%~25.62%). The vitamin E and sesamin contents of the sesame oil were 13.73~54.43 mg/(100 g) and 60.14~69.10 mg/(100 g) respectively which were analyzed by using HPLC. The oxidative stability of the squeezing white sesame oil of different areas were measured. The results showed that the oxidative stability of white sesame oil (No.4) was relatively good.

**Key words** Sesame oil, Physical and chemical characteristic, Fatty acid composition, Vitamin E

### 引言

芝麻含油质量分数约50%,其中油酸和亚油酸占85%,蛋白质质量分数约25%,还含有大量的木脂素,包括芝麻酚、芝麻素、芝麻酚林、芝麻素酚、芝麻林素酚和维生素E等抗氧化物质<sup>[1-4]</sup>。研究表明

这些活性成分可消除有机自由基、抗癌细胞增殖、降低体内胆固醇水平、神经保护和抑制脂质过氧化,是重要的食品和药品工业原料<sup>[5-9]</sup>。白芝麻中的油脂和芝麻素含量高于黑色芝麻和棕色芝麻<sup>[10]</sup>。芝麻中脂肪酸组成分析方法有GC<sup>[11]</sup>,此外,还有反相HPLC<sup>[12]</sup>、NIR<sup>[13-14]</sup>等,随着仪器分析的进一步发

收稿日期:2011-12-16 修回日期:2012-04-08

\* 现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(nycytx-20-1-08)、河南省重点科技攻关计划资助项目(1021021110164)和河南省油料产后精深加工研究中心资金资助项目(2069999)

作者简介:梁少华,教授,主要从事油料加工及其资源综合利用研究,E-mail:shaohualiang832@126.com

展,分离分析脂肪酸的技术将会更加高效灵敏。

本文以不同产地白芝麻压榨油为原料,采用近代仪器和经典分析方法,研究白芝麻油的主要理化指标、理化常数、甘三酯组成及芝麻素等主要油溶性活性成分含量,以期对白芝麻的研究和深度开发利用奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料来源

白芝麻油 1 号(芝麻产地:河南省驻马店市);白芝麻油 2 号(芝麻产地:湖北省);白芝麻油 3 号(芝麻产地:安徽省);白芝麻油 4 号(芝麻产地:河北省);芝麻油:实验室通过冷榨法自制。

### 1.2 试剂与仪器

#### 1.2.1 主要试剂

无水乙醚、氢氧化钠、盐酸、氢氧化钾、乙醚、石油醚、三氯甲烷、冰乙酸、可溶性淀粉、碘化钾、硫代硫酸钠、三氟化硼、氮气、正己烷、胆酸钠、无水硫酸钠、氯化钠、甲醇钠、氧化铝、乙醇(体积分数 95%)、正己烷(色谱纯)、甲醇(色谱纯)等。未标明的均为分析纯。

芝麻素标准品:芝麻素(Sigma 公司);维生素 E 标准品: $\alpha$ -生育酚、 $\beta$ -生育酚、 $\gamma$ -生育酚、 $\delta$ -生育酚,均为 Sigma 公司产品。

#### 1.2.2 主要仪器和装置

722S 型分光光度计,上海精密仪器有限公司;UV-1901 型可见紫外分光光度计,北京普析通用仪器有限公司;Waters2695 型高效液相色谱仪,上海易测仪器设备有限公司;GC-2010 型气相色谱仪,SHIMADZU 公司;Rancimat743 型氧化酸败仪,瑞士万通公司;WSL-2 型比较测色仪,上海易测仪器设备有限公司;阿贝折光仪,上海易测仪器设备有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 白芝麻油理化指标的测定

相对密度按照 GB/T 5518—2008 测定;折射指数按照 GB/T 5527—2010 测定;色泽按照 GB/T 22460—2008 测定;黏度按照 GB/T 5516—2011 测定;磷脂含量按照 GB/T 5537—2008 测定;酸价按照 ISO 660—1996 测定;皂化值按照 ISO 3657—1988 测定;不皂化物按照 ISO 3596—2—1988 测定。

#### 1.3.2 白芝麻油脂肪酸组成分析

芝麻油甲酯化采用 ISO 5509—2000 方法;脂肪酸甲酯的气相色谱分析采用 ISO 5508—1990 方法。

分析测定条件:BPX-70 毛细管脂肪酸分析柱,30.0 m $\times$ 320  $\mu$ m $\times$ 0.50  $\mu$ m,进样口温度 230 $^{\circ}$ C,柱

温 210 $^{\circ}$ C,氢离子火焰检测器 FID,检测器温度 300 $^{\circ}$ C,氮气流速 1.0 mL/min,氢气流速 35 mL/min,空气流速 400 mL/min。

#### 1.3.3 白芝麻油的 sn-2 位脂肪酸分布

取压榨白芝麻油样 5 g 溶于 25 mL 正己烷中,倒入聚氧化铝色谱柱中洗脱分离,得到中性油。称 0.1 g 中性油于 10 mL 离心管中,加入 20 mg 胰脂酶、2 mL 缓冲溶液、0.5 mL 胆酸钠溶液、0.2 mL 氯化钙溶液摇匀后,再分别加入 1 mL 乙醚及盐酸溶液离心分离,取离心管的上清液,经薄层层析后显色确定甘一酯,甘一酯甲酯化后,经气相色谱分析 sn-2 位脂肪酸组成<sup>[15]</sup>。

气相色谱分析 sn-2 位脂肪酸组成方法参照 1.3.2 节。由 sn-2 位脂肪酸组成分析,根据 1,3-随机-2-随机分布学说计算甘三酯的构成及含量。

#### 1.3.4 芝麻油中维生素 E 含量的分析

芝麻油中维生素 E 含量分析采用 GB/T 5009.82—2003 方法。

色谱条件:固定相,NH<sub>2</sub>柱(250 mm $\times$ 4.6 mm,5  $\mu$ m);流动相,正己烷与异丙醇体积比为 98:2;柱温 40 $^{\circ}$ C;柱压 20 kPa;流速 1.0 mL/min;采用 RF-10AXL 荧光检测器;激发波长 298 nm;发射波长 325 nm;进样量 5  $\mu$ L,外标法计算。

#### 1.3.5 芝麻油中芝麻素含量的测定

芝麻油中芝麻素含量的测定采用 NY/T 1595—2008 方法。

色谱条件:固定相,C<sub>18</sub>色谱柱(250 mm $\times$ 4.6 mm,5  $\mu$ m);流动相,甲醇与水体积比为 70:30;流速 1.0 mL/min;检测波长 287 nm;柱温 30 $^{\circ}$ C。

#### 1.3.6 芝麻油氧化稳定性测定

实验采用 Rancimat743 型油脂氧化稳定测定仪测定样品氧化稳定性<sup>[16]</sup>。其原理为油脂样品在恒温下,向油脂中恒定速率通干燥空气,油脂中易氧化的物质被氧化成小分子易挥发的酸,挥发的酸被空气带入盛水的电导率测量池中,在线测量池中的电导率,记录电导率对反应时间的氧化曲线,对曲线求二阶导数,从而测出样品的诱导时间。在不同温度下测定样品的诱导时间,通过经验公式,外推样品在不同温度下的诱导时间,即在此温度下的使用或贮存时间。分析条件为:样品用量 5.0 g,温度 130 $^{\circ}$ C,通气量 20 L/h。

## 2 结果与讨论

### 2.1 白芝麻油理化指标分析

按照 1.3.3 节所述方法测定的 4 种压榨白芝麻油的理化指标结果见表 1。

表1 白芝麻油的理化指标

Tab.1 Physical and chemistry index of white sesame oils

参数	白芝麻油1号	白芝麻油2号	白芝麻油3号	白芝麻油4号
相对密度 $d_{20}^{20}/\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.919 2	0.903 5	0.924 8	0.912 6
折光指数 $n^{30}$	1.472 9	1.473 4	1.473 6	1.472 6
黏度/ $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$	0.064	0.055	0.053	0.055
酸值/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	0.88	2.25	2.28	2.29
磷脂质量分数/%	0.11	0.24	0.23	0.45
皂化值/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	188.10	189.01	188.21	187.10
不皂化物质量分数/%	0.79	0.57	0.44	0.48

结果表明,4个产地的压榨白芝麻油的相对密度、折光指数及黏度差别不大;各个产地压榨白芝麻油的色泽都相对较浅,这是由于压榨温度控制较低,还原糖类物质分解产物与氨基酸及蛋白质化合生成的黑色素较少;其酸值在0.88~2.29 mg/g之间,符合一级芝麻油的标准;磷脂质量分数在0.11%~0.45%之间,而河北省产的白芝麻压榨制取的白芝麻油磷脂含量最高,这可能与当地的气候条件以及芝麻品种差异有关;皂化值在187.10~189.01 mg/g之间;不皂化物质量分数在0.48%~0.79%之间,白芝麻油1号的不皂化物质量分数为0.79%,这可能与芝麻油中的芝麻素、芝麻酚林含量较高有关。

## 2.2 白芝麻油甘三酯组成分析

按照1.3.2节所述方法测得4种白芝麻油的脂肪酸组成分析结果见表2,白芝麻油1号的气相色谱图见图1。

表2 白芝麻油立体专一分布相对含量

Tab.2 Single-minded distribution relative content of white sesame oils

种类	位置	白芝麻油1号	白芝麻油2号	白芝麻油3号	白芝麻油4号
C16:0/P	sn-1,2,3	8.71	8.97	8.75	8.14
C16:0/P	sn-2	1.15	0.80	0.73	0.72
C16:0/P	sn-1,3	12.49	13.06	12.76	11.85
C18:0/St	sn-1,2,3	5.07	4.86	4.79	4.25
C18:0/St	sn-2	0.39	0.51	0.44	—
C18:0/St	sn-1,3	7.41	7.19	0.44	6.38
C18:1/O	sn-1,2,3	38.60	36.64	37.63	39.64
C18:1/O	sn-2	45.00	41.96	41.03	42.73
C18:1/O	sn-1,3	35.40	33.98	35.93	18.10
C18:2/L	sn-1,2,3	45.05	48.64	47.68	46.80
C18:2/L	sn-2	53.30	55.65	57.48	56.38
C18:2/L	sn-1,3	40.93	45.14	42.78	42.01
C18:3/Ln	sn-1,2,3	0.95	0.30	0.32	0.37
C18:3/Ln	sn-2	0.15	0.36	0.30	0.17
C18:3/Ln	sn-1,3	1.35	0.27	0.33	0.47

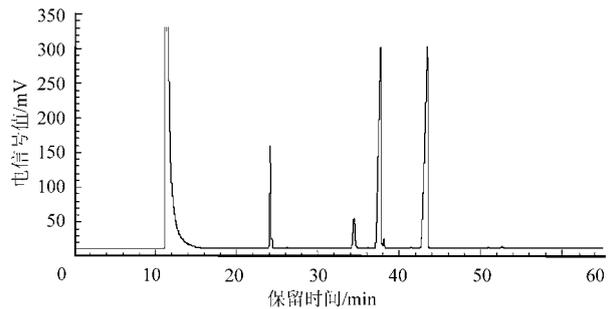


图1 白芝麻油1号气相色谱图

Fig.1 Gas chromatogram of white sesame oil (No.1)

按照1.3.3节所述方法分析测定压榨白芝麻油1号sn-2位脂肪酸组成分析结果,如图2所示;采用1,3-随机-2-随机分布学说计算出4种压榨白芝麻油的甘三酯中sn-1位、sn-2位及sn-3位脂肪酸组成分布结果,如表2所示。

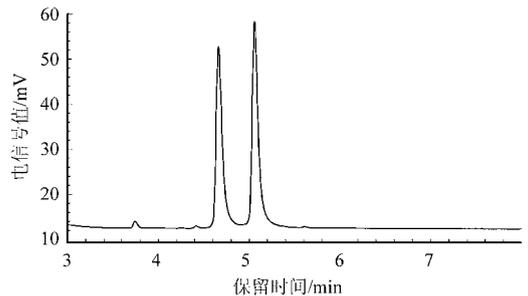


图2 白芝麻油1号sn-2位脂肪酸组成色谱图

Fig.2 sn-2 fatty acid composition chromatogram of white sesame oil (No.1)

从表2可看出白芝麻油的脂肪酸组成为亚油酸(C18:2/L)相对含量45.05%~48.64%,油酸(C18:1/O)相对含量36.64%~39.64%,棕榈酸(C16:0/P)相对含量8.14%~8.97%,硬脂酸(C18:0/St)相对含量4.25%~5.07%,亚麻酸(C18:3/Ln)相对含量0.30%~0.95%。有报道称<sup>[17]</sup>棕榈酸和油酸与硬脂酸含量呈现负相关,本次实验结果与之相符。不饱和脂肪酸相对含量达84%以上,而饱和脂肪酸仅有13%左右。其中,亚麻酸和亚油酸是人体必需脂肪酸。

从4种白芝麻油立体专一分布可看出sn-2位上棕榈酸、硬脂酸的分布很少;而油酸、亚油酸在sn-2位分布比sn-1、sn-3位要多,并且在sn-1、sn-2、sn-3位的分布都在35%~60%之间。这符合植物油脂甘三酯立体专一分布的特点:饱和脂肪酸一般相对集中在sn-1和sn-3位上,不饱和脂肪酸较多连接在sn-2位上<sup>[16]</sup>。

由sn-2位脂肪酸组成分析数据可计算出不同压榨白芝麻油中甘三酯的组成,主要甘三酯组成见表3。

表 3 白芝麻油甘三酯成分质量分数

Tab. 3 Triacylglycerol components of white sesame oils

甘三酯 种类	% 白芝麻			
	油 1 号	油 2 号	油 3 号	油 4 号
LLnL	0.62	0.21	0.21	0.25
LLL	8.93	11.34	10.52	9.95
LOLn	1.05	0.31	0.35	0.42
PLL	5.64	6.72	6.41	5.74
LOL	22.98	25.62	25.18	25.59
OLnO	0.45	0.12	0.14	0.17
PPL	0.95	1.04	1.02	0.86
PLO	9.64	10.13	9.97	9.57
StLL	3.30	3.63	3.51	3.02
OOL	19.72	19.30	20.03	21.86
PPO	0.80	0.79	0.74	0.67
StOL	5.64	5.48	5.47	5.03
OOO	5.64	4.84	5.30	6.20
OPO	4.12	3.81	3.85	3.96
PLSt	1.10	1.13	1.10	0.89
StOO	2.41	2.07	2.11	2.08
StLSt	0.31	0.31	0.31	0.23
StPO	0.92	0.86	0.81	0.68
StOSt	0.27	0.23	0.22	0.17

从表 3 可看出白芝麻油中的甘三酯组成主要是以油酸、亚油酸为主的甘三酯。其中以 LOL 相对含量最高(22.98% ~ 25.62%),其次是 OOL 相对含量 19.72% ~ 21.86%,比较高的甘三酯还有 PLO (9.57% ~ 10.13%)、LLL(8.93% ~ 11.34%),其余相对较少。结果表明白芝麻的甘三酯组成与李桂华<sup>[18]</sup>等研究的黑芝麻甘三酯组成相比差别很大,除了基因控制这一主要因素之外,气候条件(如降水量和日光照时间)也会影响各种脂肪酸的含量,从而导致甘三酯组成发生变化<sup>[17]</sup>。

### 2.3 维生素 E 含量分析

高效液相色谱分析测定的维生素 E 色谱图见图 3, 4 个产地白芝麻油维生素 E 含量见表 4。

由表 4 可以看出,白芝麻油中的维生素 E 主要是  $\gamma$ -生育酚,其他生育酚含量较少,并且  $\gamma$ -生育酚具有显著的防癌治疗效果<sup>[9]</sup>。在通常条件下, $\alpha$ -生育酚生理活性最强, $\beta$ -生育酚及  $\gamma$ -生育酚不及其一半效能, $\delta$ -生育酚几乎没有效能。而抗氧化能力从小到大为  $\alpha$ -生育酚、 $\beta$ -生育酚、 $\gamma$ -生育酚、 $\delta$ -生育酚。有研究报道黑芝麻油中的维生素 E 含量高于白芝麻油,其含量为  $(54 \pm 9.8) \text{ mg}/(100 \text{ g})$ <sup>[3]</sup>,白芝麻油

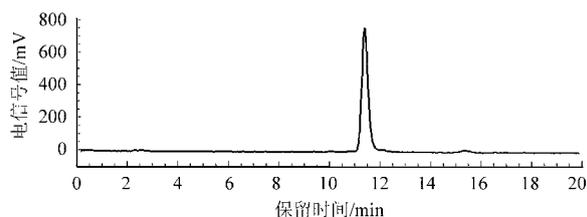


图 3 白芝麻油 1 号维生素 E 分析测定色谱图

Fig. 3 Vitamin E determination chromatogram of white sesame oil (No. 1)

中的维生素 E 含量为 24.87 ~ 72.07 mg/(100 g),含量较低,但是白芝麻油中的芝麻素含量高于黑芝麻,与维生素 E 发生协同增效的作用,延长白芝麻油的保质期。

表 4 白芝麻油中维生素 E 质量比

Tab. 4 Vitamin E content of white sesame oils

成分	mg/(100 g) 白芝麻			
	油 1 号	油 2 号	油 3 号	油 4 号
$\alpha$ -生育酚	—	—	—	—
$\beta$ -生育酚	—	—	—	—
$\gamma$ -生育酚	24.87	43.52	54.43	72.07
$\delta$ -生育酚	—	—	—	—
总量	24.87	43.52	54.43	72.07

### 2.4 芝麻素含量分析

高效液相色谱分析测定 1 号、2 号、3 号和 4 号白芝麻油中的芝麻素含量分别为 60.97、69.10、60.14、67.86 mg/(100 g)。

高效液相色谱分析测定的压榨白芝麻油芝麻素色谱图见图 4,芝麻素保留时间 14 min 左右。4 个产地白芝麻油中芝麻素含量在 60.14 ~ 69.10 mg/(100 g)之间,其中湖北省产的白芝麻油中的芝麻素含量较其他产地高,这可能与芝麻的品种、当地的气候及土壤种类差异有关,但是总体变化范围不大,这与刘玉兰<sup>[19]</sup>等研究的不同产地芝麻抗氧化成分及氧化稳定性所得结论一致。芝麻素是油溶性的木脂素,由于芝麻素含量与芝麻的含油量呈现正相关,黑芝麻

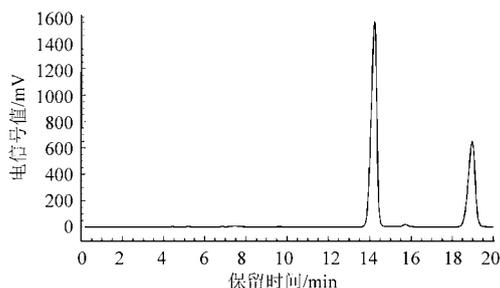


图 4 白芝麻油中芝麻素含量分析高效液相色谱图

Fig. 4 HPLC figure of sesamin content in white sesame oils

和黄芝麻的含油量低于白芝麻,因此白芝麻油中的芝麻素高于黑芝麻油和黄芝麻<sup>[10]</sup>。

## 2.5 氧化稳定性分析

采用 Rancimat 743 型氧化酸败仪测定芝麻油氧化稳定性,结果见图 5。

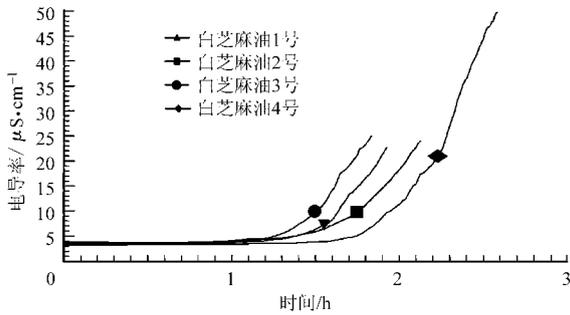


图5 白芝麻油氧化稳定性 Rancimat 分析

Fig.5 Rancimat analysis of oxidation stability in white sesame oils

图5显示了电导率对反应时间的氧化曲线,对曲线求二阶导数,从而测出样品的诱导时间。在温度 130℃,通气量 20 L/h 条件下,白芝麻油 1 号 1.55 h,白芝麻油 2 号 1.75 h,白芝麻油 3 号 1.50 h,白芝麻油 4 号 2.22 h,河北省产的白芝麻氧化稳定性相对较好。主要原因是白芝麻油 4 号中维生素 E 含量最高,并且芝麻油中含有的芝麻素和维生素 E

的协同作用使抗氧化活性增强<sup>[20]</sup>。因此白芝麻油也被广泛用于和氧化稳定性差的油脂调合复配来提高其氧化稳定性和货架寿命<sup>[21-22]</sup>。

## 3 结论

(1) 白芝麻油脂肪酸组成中亚油酸、油酸这两种不饱和脂肪酸相对含量较高,占总脂肪酸相对含量的 84% 以上,白芝麻油 sn-2 位主要是油酸、亚油酸,其相对含量分别在 41.03% ~ 45.00% 之间和 53.30% ~ 57.48% 之间。

(2) 白芝麻油甘三酯分子结构组成中 LOL 相对含量最高为 22.98% ~ 25.62%,其次是 OOL 相对含量 19.72% ~ 21.86%,比较高的甘三酯还有 PLO (9.57% ~ 10.13%)、LLL (8.93% ~ 11.34%),其余相对较少。

(3) 不同产地白芝麻压榨制取的芝麻油中芝麻素、维生素 E 含量分别在 60.14 ~ 69.10 mg/(100 g) 之间和 13.73 ~ 54.43 mg/(100 g) 之间,维生素 E 组成主要是  $\gamma$ -生育酚。

(4) 用 Rancimat 法测定不同产地白芝麻压榨制取的白芝麻油氧化稳定性,在 130℃ 条件下,氧化诱导时间分别为:白芝麻油 1 号 1.55 h,白芝麻油 2 号 1.75 h,白芝麻油 3 号 1.50 h,白芝麻油 4 号 2.22 h。

## 参 考 文 献

- 张鹏,张海洋,郑永战,等.芝麻种质资源因子分析及聚类分析[J].中国油料作物学报,2008,30(1):71~78.  
Zhang Peng, Zhang Haiyang, Zheng Yongzhan, et al. Factor and cluster analysis of sesame (*Sesamum indicum*) germplasm resources[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2008, 30(1): 71~78. (in Chinese)
- 杜仲鏞,徐英.芝麻油制取新工艺研究及在化妆品中开发应用[J].粮油加工,2006(12):21~22.
- Ali A Moazzami, Afaf Kamal-Eldin. Sesame seed is a rich source of dietary lignans[J]. JAOCS, 2006, 83(8): 719~723.
- 梁少华.植物油料资源综合利用[M].南京:东南大学出版社,2009:401~402.
- Kiso Y. Antioxidative role of sesamin, a functional in sesame seed, and its effect on lipid and alcohol metabolism in the liver; a DNA microarray study[J]. Biofactors, 2001, 21(1~4): 191~196.
- Zoe Konsoula, Maria Liakopoulou-Kyriakides. Effects of endogenous antioxidants of sesame seeds and sesame oil to the thermal stability of edible vegetable oils[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(9): 1379~1386.
- Pey Rong Chen, Kuo Liong Chien, Ta Chen Su, et al. Dietary sesame reduces serum cholesterol and enhances antioxidant capacity in hypercholesterolemia[J]. Nutrition Research, 2005, 25(6): 559~567.
- Jan Frank, Xiao Wei Dawn Chin, Charlotte Schrader, et al. Do tocotrienols have potential as neuroprotective dietary factors? [J]. Ageing Research Reviews, 2012, 11(1):163~180.
- Sharon Campbell, William Stone, Sarah Whaley, et al. Development of gamma ( $\gamma$ )-tocopherol as colorectal cancer chemopreventive agent[J]. Critical Reviews in Oncology/Hematology, 2003, 47(3): 249~259.
- Tashiroa T, Fukudab Y, Osawaa T, et al. Oil and minor components of sesame (*Sesamum indicum* L.) strains[J]. J. Am. Oil. Chem. Soc., 1990, 67(8): 508~511.
- Mohamed Elleuch, Souhail Besbes, Olivier Roiseux, et al. Quality characteristics of sesame seeds and by-products[J]. Food Chemistry, 2007, 103(2): 641~650.
- Kikugawa K, Arai M, Kurechi T. Participation of sesamol in stability of sesame oil[J]. JAOCS, 1983, 60(8): 1528~1533.
- Tetsuo Sato, Aye Aye Maw, Masumi Katsuta. NIR reflectance spectroscopic analysis of the FA composition in sesame

- (*Sesamum indicum* L.) seeds[J]. *JAACS*, 2003, 80(12): 1 157 ~ 1 161.
- 14 吴静珠,徐云. 基于 CARS-PLS 的食用脂肪酸近红外定量分析模型优化[J]. *农业机械学报*,2011,42(10):162 ~ 166.  
Wu Jingzhu, Xu Yun. NIR quantitative model optimization of fatty acid in edible oil based on CARS-PLS[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(10):162 ~ 166. (in Chinese)
- 15 李桂华. 油料油脂检验与分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- 16 孙曙庆. 油脂氧化稳定性的研究[J]. *食品与发酵工业*, 1998, 25(3): 20 ~ 22.  
Sun Shuqing. Study on oxidative stability of fats and oils[J]. *Food and Fermentation Industries*, 1998, 25(3):20 ~ 22. (in Chinese)
- 17 Beatrice A Were, Augustino O Onkware, Samuel Gudu, et al. Seed oil content and fatty acid composition in East African sesame (*Sesamum indicum* L.) accessions evaluated over 3 years[J]. *Field Crops Research*, 2006, 97(2~3): 254 ~ 260.
- 18 李桂华, 王瑞雪, 王婷婷. 河南省黑芝麻及其油脂组成成分分析研究[J]. *河南工业大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(5): 10 ~ 13.  
Li Guihua, Wang Ruixue, Wang Tingting. The analysis of the composition of the black sesame and sesame oil from Henan Province[J]. *Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition*, 2008, 29(5): 10 ~ 13. (in Chinese)
- 19 刘玉兰, 陈刘杨, 汪学德, 等. 国产芝麻和进口芝麻及加工芝麻油品质对比[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 150 ~ 153.  
Liu Yulan, Chen Liuyang, Wang Xuede, et al. Comparison of domestic and imported sesames and their oil processing properties[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(1):150 ~ 153. (in Chinese)
- 20 黄纪念, 宋国辉, 孙强. 芝麻和芝麻油的抗氧化活性[J]. *中国食物与营养*, 2009(2): 26 ~ 27.
- 21 Suja K P, Abraham J T, Thamizh S N, et al. Antioxidant efficacy of sesame cake extract in vegetable oil protection[J]. *Food Chemistry*, 2004, 84(3): 393 ~ 400.
- 22 Chung J, Lee T, Choe E. Oxidative stability of soybean and sesame oil mixture during frying of flour dough[J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(7): 574 ~ 578.

~~~~~

(上接第 173 页)

- 8 袁亚宏,王周利,蔡瑞,等. 苹果汁中拟除虫菊酯类农药的超声波-TiO<sub>2</sub>催化去除[J]. *农业机械学报*, 2011,42(11): 124 ~ 129.  
Yuan Yahong, Wang Zhouli, Cai Rui, et al. Catalytic removal of pyrethroid pesticides in aspple juice by ultrasonic treatment coupling with TiO<sub>2</sub> [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11):124 ~ 129. (in Chinese)
- 9 Hideyuki Katsumata, Toshiko Okada, Satoshi Kaneco, et al. Degradation of fenitrothion by ultrasound/ ferrioxalate/UV system [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, 17(1):200 ~ 206.
- 10 林抗美,马丽娜,朱育菁,等. 乐果液相色谱与气相色谱检测方法的比较[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(10):453 ~ 456.  
Lin Kangmei, Ma Lina, Zhu Yujing, et al. Comparison between the detection methods of dimethoate by HPLC and GC [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008. 24 (10):453 ~ 456. (in Chinese)
- 11 张光明,周吉全,张锡辉,等. 超声波处理难降解有机物影响参数研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005,6(5):42 ~ 45.  
Zhang Guangming, Zhou Jiquan, Zhang Xihui, et al. Study of sonication parameters for refractory organic chemicals [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6(5):42 ~ 45. (in Chinese)
- 12 马海乐,雷丽云,骆琳,等. 脉冲超声辅助提取双低菜籽蛋白的试验 [J]. *江苏大学学报:自然科学版*, 2007, 28(5): 369 ~ 372.  
Ma Haile, Lei Liyun, Luo Lin, et al. Pulsed ultrasonic-assisted extraction of proteins from double-low defatted rapeseed [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2007, 28 (5): 369 ~ 372. (in Chinese)
- 13 郑怀礼,张占梅. 双频超声辐射协同 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>降解偶氮染料废水的研究 [J]. *环境工程学报*, 2010,4(11):2 401 ~ 2 406.  
Zheng Huaili, Zhang Zhanmei. Degradation of azo dye wastewater by dual-frequency ultrasound synergized with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(11):2 401 ~ 2 406. (in Chinese)
- 14 吴晓晖. 造纸废水的超声降解研究[D]. 武汉:华中科技大学,2003.  
Wu Xiaohui. Study on the treatment of paper mill wastewater by ultrasound[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2003. (in Chinese)