

# 豆类脂肪酸分析方法研究现状及进展

## Research status and progress of fatty acid analysis methods in beans

谢艳华<sup>1</sup> 谢 靓<sup>1</sup> 李 跑<sup>1</sup> 陈淼芬<sup>3</sup> 蒋立文<sup>1,2</sup> 陈力力<sup>1,2</sup>

XIE Yan-hua<sup>1</sup> XIE Jing<sup>1</sup> LI Pao<sup>1</sup> CHEN Miao-fen<sup>3</sup> JIANG Li-wen<sup>1,2</sup> CHEN Li-li<sup>1,2</sup>

(1. 湖南农业大学食品科技学院, 湖南 长沙 410128; 2. 食品科学与生物技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128; 3. 兽用中药资源与中兽药创制国家地方联合工程研究中心, 湖南 长沙 410128)

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Food Science and Biotechnology, Changsha 410128, China;

3. National and Provincial Union Engineering Research Center for the Veterinary Herbal Medicine Resources and Initiative, College of Food Science and Technology, Changsha 410128, China)

**摘要:**文章就豆类食品(以大豆制品为主)油脂抽提和脂肪酸甲酯化方法进行综述,并阐述脂肪酸的多种生理功能,分析各种不同脂肪酸检测方法差异,以期为豆制品加工过程中脂肪酸变化规律研究提供测试方法,为可能的功能性油脂食品开发提供依据。

**关键词:**豆类;脂肪酸;抽提;甲酯化;生理功能

**Abstract:** In this paper, the methods of fatty acid extraction and methyl esterification of beans (the main products are soy food) were reviewed. A variety of physiological functions of fatty acids are described. Moreover the differences of diverse detection methods of fatty acids were analyzed. We hope to provide testing methods for the change of fatty acids in bean product processing, and providing the basis for the development of potential function's in oil and fat products.

**Keywords:** beans; fatty acid; extraction; esterification; physiological function

随着生活水平的逐步提高,人们对健康重视程度与日俱增。脂肪酸在人体健康中起着重要作用,尤其在心血管疾病的发生和预防方面<sup>[1]</sup>。同时,脂肪酸能显著影响和改善神经或精神类疾病<sup>[2-3]</sup>,内分泌失调<sup>[4]</sup>以及代谢综合症相关的疾病,如糖尿病<sup>[5-6]</sup>。大部分豆类的油分含量为 13%~19%,最高可达 30%,油分中不饱和脂肪酸含量非常高,尤其是油酸、亚油酸和亚麻酸,豆类食品中脂肪酸的功能性研究已然

成为热点<sup>[7]</sup>。基于此,分析豆类食品的脂肪酸可以预测甚至预防某些疾病的发生,所以建立一种简洁、快速的提取分析方法对脂肪酸定性、定量具有重大意义。目前脂肪酸定性定量分析主要是利用气相色谱与质谱联用<sup>[8-9]</sup>,而气相色谱分析脂肪酸必然经过油脂抽提和脂肪酸甲酯化前处理步骤。

本研究的目的是对气相色谱中豆类食品最重要的油脂抽提技术和脂肪酸甲酯化方法进行总结,阐述脂肪酸的生理功能,推测常食用豆类食品尤其是发酵豆制品可以预防糖尿病、心血管疾病等疾病的发生。

### 1 脂肪酸的生理功能

按照饱和程度可将脂肪酸分为饱和脂肪酸(SFA)、单不饱和脂肪酸(MUFAs)和多不饱和脂肪酸(PUFAs)三类。早期研究<sup>[10]</sup>发现,富含饱和脂肪酸的膳食会使血清总胆固醇升高,尤其是低密度脂蛋白胆固醇的水平,增加患心血管疾病的风险。但最近有研究<sup>[11-12]</sup>表明饱和脂肪酸摄入不足也会对人体造成影响。不饱和脂肪酸具有抗炎和抗癌等多种功能,但摄入脂肪酸应适量,2010年,联合国粮食与农业组织(FAO)专家委员会报告中推荐膳食脂肪供能比为 30%~35%<sup>[13]</sup>。脂肪酸的主要生理功能见表 1。

### 2 豆类食品油脂抽提及其比较

脂肪酸分析过程中最关键的步骤是油脂抽提<sup>[25]</sup>。豆类油脂常用的抽提技术包括索氏抽提、超声波协助萃取、同时蒸馏萃取和简易溶剂萃取。

#### 2.1 索氏抽提技术

索氏抽提(soxhlet extraction)是利用溶剂回流和虹吸原理,使固体物质在每次回流中都能被纯溶剂萃取,是最常用的油脂提取技术。如蒋立文等<sup>[26]</sup>采用索氏抽提法从 4 个品种的四棱豆种子中提取到 20%~22%的油脂,但萃取时间长、溶剂消耗大且长期加热处理对样品脂肪酸种类和数目会

**基金项目:**国家自然科学基金项目(编号:31371828)

**作者简介:**谢艳华,女,湖南农业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**蒋立文(1968—),男,湖南农业大学教授,博士。

E-mail:jlw\_2002cn@yahoo.com.cn

陈力力(1962—),女,湖南农业大学教授,博士。

E-mail:chenlili001@tom.com

**收稿日期:**2016-07-08

表1 脂肪酸的主要生理功能

Table 1 The main physiological functions of fatty acids

脂肪酸组成	样本	预防疾病	参考文献
降低 <i>n</i> -3/ <i>n</i> -6 PUFA 比值, 增加 SFA 比值	结肠组织	结直肠癌	[14]
硬脂酸作为 <i>n</i> -3 多不饱和脂肪酸补充	鱼油	心血管疾病	[11]
超长链饱和脂肪酸	红细胞	心脏骤停	[12]
超长链饱和脂肪酸	血浆	糖尿病	[15]
在血清中增加 C <sub>16:0</sub> 、C <sub>18:1</sub> 和 C <sub>18:0</sub>	人血清	胰腺癌	[16]
降低 AA 和 DHA 浓度	大脑样本、鱼油	神经系统/精神	[17]
提高 AA 和 DGLA 水平, 降低 EPA 和 DHA 水平	人血浆	镰状细胞病	[18]
增加 EPA、C <sub>16:1</sub> 水平, 减少 C <sub>18:2</sub> , DHA 的含量	上皮细胞	囊性纤维化	[19]
少量 C <sub>16:0</sub> 和 C <sub>18:0</sub>	人类睑脂	睑板腺功能障碍	[20]
降低 <i>n</i> -3 和 <i>n</i> -6 多不饱和脂肪酸比例	血浆	多囊卵巢综合征	[21]
DHA+EPA	血清	心肌梗死	[22]
<i>n</i> -3 多不饱和脂肪酸	肠道	溃疡性结肠炎	[23]
<i>n</i> -3 和 <i>n</i> -6 多不饱和脂肪酸	植物油、鱼类	非酒精性脂肪性肝病	[24]

造成一定影响;于福宽等<sup>[27]</sup>为分析大豆中脂肪酸的组分,比较了索氏抽提、豆粉直接甲酯化和籽粒直接甲酯化3种方法,研究表明索氏抽提法提取剂的消耗是其它两种抽提方法的100倍,消耗时长是其它2种方法的3倍,其脂肪酸检测精确度也明显低于其它2种法。因此虽然索氏提取适用面广、成本低、提取率较高,但其存在萃取时间长、需使用大量溶剂和可重复性差、溶剂损失多、长时间加热处理可能会对样品脂肪酸造成影响等缺点,使这种方法适用于工业化生产,在豆类食品研究方面存在缺陷。

## 2.2 超声波协助萃取技术

超声波协助萃取是利用超声波辐射压强产生的强烈空化效应、机械振动等多级效应,增大物质分子速度和运动频率,从而加速目标成分进入溶剂以促进提取的进行。与常规索氏抽提相比,超声波协助萃取耗时短,如胡炜东等<sup>[28]</sup>以油莎豆为原料,采用超声波协助溶剂法提取油莎豆油,在最佳提取工艺条件下[超声时间仅20.5 min、超声温度39℃、料液比1:10(g/mL)、超声功率128 W],油莎豆油提取率高。同时,超声波协助萃取具有无需加热、产率高的优点<sup>[29]</sup>,尹璐海等<sup>[30]</sup>以黑豆为原料,探讨水酶法及超声波辅助水酶法提取黑豆油工艺条件,发现超声波协助处理的黑豆油提取率比未经超声波预处理的高出5.3%。但也存在一定缺点:萃取效率易受目标物固体颗粒的大小、空化作用的强度以及致密程度影响,而且溶剂特性(如粘度、溶解空气的能力等)对萃取效率也影响显著。

## 2.3 同时蒸馏萃取技术

同时蒸馏萃取技术是通过将样品液相与有机溶剂同时加热,使样品液相蒸气和有机溶剂蒸气在萃取装置中混合充分,冷凝后实现组分的相转移。同时蒸馏萃取能够在反复循环中实现高效萃取,如娄丽娟等<sup>[31]</sup>以黑豆为原料,以乙醚为提取剂,采用同时蒸馏萃取技术,从油脂含量不高的黑豆中得到17%左右的油脂,其中不饱和脂肪酸含量在80%以上。但和索氏抽提类似,同时蒸馏萃取技术同样存在有机溶剂消耗量大、加热萃取时间长的缺点,邱卓等<sup>[32]</sup>以5倍量石油醚回流提取2次,每次2h提取1000g猫豆粉末油脂,仅获得

油脂26.39g。同时蒸馏萃取对于中等至高沸点的成分萃取回收率较高,萃取液中无挥发性成分,气相色谱分析时不会污染色谱柱及色谱管路;在连续萃取的过程中,有效成分被浓缩,可将物料中的痕量挥发性成分分离出来,但也存在与索氏抽提法相似的缺陷。

## 2.4 简易溶剂萃取技术

传统的脂肪酸测定中,油脂抽提主要利用索氏抽提或二氧化碳临界萃取<sup>[33]</sup>两种方法。目前有不少研究在前人研究基础上,对传统方法进行了改良。与传统方法相比,简易溶剂萃取法在节省试验时间方面具有极大优势,雷雨和等<sup>[34]</sup>采用索氏抽提和简易溶剂萃取(苯:石油醚1:1)两种方法提取毛霉型豆豉中的油脂,两种抽提方法得到脂肪酸数量无显著性差异。但索氏抽提提取时间为6~12h,耗时长,而提取液直接提取法前处理时间只需15min左右。简易溶剂萃取具有提取率较高、试验费用省和工作量少的特点。李超颖等<sup>[35]</sup>采用溶剂浸提、水酶法和水酶-冻融3种方法提取油莎豆油,与溶剂浸提法相比,其他两种方法需进行冷冻、酶解等繁琐步骤,溶剂浸提法的油莎豆油提取率为89.65%,比水酶法高7.11%,比水酶-冻融技术高3.24%。加热辅助简易溶剂萃取能够使大豆油脂抽提更完全,例如范胜翔等<sup>[36]</sup>分别用简易甲酯化萃取法和加热甲酯化提取法(正己烷60℃浸提20min)对大豆油脂的提取进行了条件优化。加热甲酯化提取法提取的5种主要脂肪酸脂肪酸含量(棕榈酸、硬脂酸、油酸亚、油酸和亚麻酸)占粗脂肪含量比简易提取法高出23.69%~35.26%。

在豆类食品油脂的抽提法中,通过索氏抽提技术和同时蒸馏萃取技术得到的油脂提取率较高,但萃取溶剂和样品使用量大,抽提时间长,且长时间加热容易破坏豆类食品脂肪酸组成。超声波萃取能够使油脂从豆类食品中较完全抽提出来,简易溶剂萃取在节省样品用量、试验时间及简化抽提程序方面具有极大优势。因此,豆类食品尤其是发酵豆制品,采取超声波协助简易溶剂萃取技术抽提油脂是比较合适的。

## 3 豆类食品中脂肪酸甲酯化方法及其比较

脂肪酸进行色谱分析时,因其沸点高,在高温下不稳定,

须先将其衍生为易挥发的甲酯再进行分析。不同的油脂选择合适的甲酯化方法,制成有利于脂肪酸准确测定的衍生化产物,是色谱检测的关键和前提。脂肪酸常用的甲酯化方法一般分为酸甲酯化法、碱甲酯化法和酸碱甲酯化法。

### 3.1 酸甲酯化法

酸甲酯化法是用酸做催化剂进行甲酯化,常见的有盐酸、硫酸和三氟化硼。不同酸的甲醇溶液所需浓度不同,一般盐酸—甲醇溶液为 5 g/mL,硫酸—甲醇溶液 1~2 mL/100 mL,三氟化硼—甲醇溶液 12~30 g/mL,代蕾莉等<sup>[37]</sup>采用索氏抽提黑豆油脂,分别以 1% 硫酸—甲醇溶液和 15% 三氟化硼—甲醇对其油脂进行甲酯化,其相对标准偏差分别为 4.8% 和 0.9%, $\alpha$ -亚麻酸 8 070~33 000 mg/kg, $\gamma$ -亚麻酸 0~770 mg/kg,如果硫酸和三氟化硼溶液的浓度太高会造成脂肪酸双键结构变化。合适的甲酯化试剂浓度是甲酯化完全的前提,刘冰<sup>[38]</sup>采用 30% 的三氟化硼乙醚—甲醇溶液 20 mL 对大豆油等 5 种植物油油脂甲酯化,气相色谱—质谱分析表明大豆油亚油酸 55.19%,总不饱和脂肪酸 83.56%,甲酯化较完全。三氟化硼货架期较短,常温长时间放置可能会产生怪峰或造成不饱和脂肪酸损失,建议冰箱密封保存。在选择酸时应考虑到样品不饱和脂肪酸的特殊结构,避免氧化性酸将双键氧化,导致脂肪酸甲酯化的产率低。

### 3.2 碱甲酯化法

碱甲酯化法是用碱作为催化剂,如 NaOH、KOH<sup>[39-40]</sup>或者  $\text{CH}_3\text{ONa}$  等,所用的催化剂均需配制甲醇溶液。碱甲酯化法只能用于酸价低于 2 mg KOH/g 的油脂甲酯化,如果其酸价高于 2 mg KOH/g 则催化剂与脂肪酸生成脂肪酸盐,不具有甲酯化作用且生成的脂肪酸盐难转化为脂肪酸甲酯。赵丽娟<sup>[41]</sup>采用索氏抽提法得到东北黄豆和黑豆油脂(酸价均低于 2 mg KOH/g),并以氢氧化钠甲醇液(0.5 mol/L)甲酯化处理,分析检测两种豆类均有 15 种脂肪酸,且两者均以亚油酸为主,分别占脂肪酸总量的 63.21% 和 61.66%。碱甲酯化法发生酯交换反应,反应条件温和,但在碱性环境中同时发生产物的水解反应,使脂肪酸的测定结果偏低,如杨莹莹等<sup>[42]</sup>以氢氧化钠—甲醇为衍生化试剂,采用气相—质谱联用(GC/MS)分析酱油渣脂肪酸组成及含量,其亚油酸的

含量仅占总脂肪酸含量的 33.26%,低于预期值。

### 3.3 酸碱甲酯化法

随着脂肪酸研究的不断深入,新的甲酯化方法不断应用到豆类食品脂肪酸的研究中。相比单一的甲酯化试剂,酸碱甲酯化法在提高脂肪酸检测数目方面具有一定的优势,姜波等<sup>[43]</sup>利用索氏抽提技术提取了大豆、葵花籽等 9 种植物油脂,以 14% 三氟化硼—甲醇溶液和 5% 氢氧化钾—甲醇溶液为甲酯化试剂,气相色谱—质谱法分析得到 20 种大豆油脂脂肪酸,远远高于单一甲酯化催化剂检测到 7 种脂肪酸<sup>[44]</sup>。同时,酸碱甲酯化法使脂肪酸甲酯化更完全,利于脂肪酸的进一步分析,如吴卫国等<sup>[45]</sup>采用酸碱甲酯化法结合气质联用技术获取了大豆油等 48 个植物油纯油样品的脂肪酸组成,并根据每类纯油脂的国家标准(如 GB 1535—2003 大豆油)分析了每类纯油的特征脂肪酸组成。酸碱甲酯化在很大程度上结合了酸甲酯化和碱甲酯化的优点,广泛应用于脂肪酸分析。

### 3.4 不同脂肪酸甲酯化方法比较

目前有不少关于不同甲酯化方法对脂肪酸检测结果影响的研究。在相同的色谱条件下,酸碱甲酯化法和酸甲酯化法得到的总离子流图基线稳定,酸碱甲酯化法处理后的溶液比酸甲酯化法处理的溶液分离时间短、分层容易、效果更好,相比之下酸碱酯化法更具优势<sup>[46]</sup>。但也有研究发现三氟化硼—甲醇溶液的甲酯化效果优于酸碱甲酯化法,伍新龄<sup>[47]</sup>采用三氟化硼—甲醇、5% 硫酸—甲醇、氢氧化钾—甲醇、酸碱结合法 4 种甲酯化方法处理大豆油等 5 种植物油,同一种植物油脂脂肪酸含量越高则其甲酯化效果越好。以亚麻酸( $\text{C}_{18:2}$ )含量为例,酯化效果最好的是三氟化硼—甲醇甲酯化法,其次为酸碱结合法。

酸甲酯化法的优点是适用面广、适合分析游离脂肪酸和结合脂肪酸,但存在甲酯化程度低的缺陷。三氟化硼—甲醇甲酯化的程度较高,但三氟化硼属于有毒试剂;碱甲酯化法反应条件温和且能避免多不饱和脂肪酸的氧化和异构化,但只适合分析结合脂肪酸。酸碱甲酯化法很大程度上结合了酸甲酯化法和碱甲酯化法的优点,分析效果最好,因此采用酸碱甲酯化法分析发酵豆制品中脂肪酸更适宜。豆类食品常用的脂肪酸分析方法见表 2。

表 2 豆类食品常用的脂肪酸分析方法

Table 2 Common fatty acid analysis methods in bean foods

油脂来源	萃取方法	溶剂	甲酯化方法	脂肪酸分析方法	参考文献
大豆	简易溶剂萃取	正己烷	碱甲酯化	GC	[35]
大豆油	—	正己烷	碱甲酯化	GC	[48]
豆豉	简易溶剂萃取	苯:石油醚 1:1	碱甲酯化	GC—MS	[28]
豆酱	索氏提取法	石油醚、乙醚	酸碱甲酯化	GC—MS	[46]
腐乳	简易溶剂萃取	石油醚、乙醚	酸甲酯化	GC—MS	[49]
酱油	索氏提取法	石油醚、乙醇	碱甲酯化	GC	[42]
丹贝	索氏提取法	石油醚	酸甲酯化	GC—MS	[50]
巴豆	索氏提取法	石油醚	酸甲酯化	GC—MS	[51]
油莎豆	同时蒸馏萃取	乙醚、正己烷	碱甲酯化	GC—MS	[52]
黑豆	超声波协助萃取	正己烷	碱甲酯化	GC—MS	[53]
四棱豆	简易溶剂萃取	甲醇、氯仿	碱甲酯化	毛细管柱	[54]
鹰嘴豆	索氏提取法	正己烷	酸碱甲酯化	GC—MS	[55]

## 4 展望

基于人们对豆类食品的喜爱程度,可通过富集脂肪酸的方法,更好地挖掘豆类食品利用价值,从而使研究豆类脂肪酸的生理功能更有意义。采用气相色谱法分析脂肪酸,豆类食品尤其是发酵豆制品采取超声波协助简易溶剂萃取技术进行油脂抽提较为合适,脂肪酸的甲酯化采取酸碱甲酯化法更为适宜。目前对于传统发酵豆制品研究主要集中在微生物<sup>[56-57]</sup>、工艺优化<sup>[58]</sup>、蛋白质<sup>[59-60]</sup>等方面,而发酵过程中脂肪酸的变化及与产品风味、营养方面的关系研究甚少,因此探究发酵豆制品在生产过程中脂肪酸变化及其与产品品质可能的关系,对于全面剖析发酵豆制品功能和品质的形成机理具有重要的理论价值和实际意义。

## 参考文献

- [1] NISHI S K, KENDALL C W C, BAZINET R P, et al. Nut consumption, serum fatty acid profile and estimated coronary heart disease risk in type 2 diabetes[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2014, 24(8): 845-852.
- [2] TAHA A Y, CHEON Y, MA K, et al. Altered fatty acid concentrations in prefrontal cortex of schizophrenic patients[J]. *Journal of Psychiatric research*, 2013, 47(5): 636-643.
- [3] JOHNSON M, MÅNSSON J E, ÖSTLUND S, et al. Fatty acids in ADHD: plasma profiles in a placebo-controlled study of Omega 3/6 fatty acids in children and adolescents[J]. *ADHD Attention Deficit and Hyperactivity Disorders*, 2012, 4(4): 199-204.
- [4] YUICHI A, MASANORI H, HIROKI N, et al. Very-long-chain polyunsaturated fatty acids accumulate in phosphatidylcholine of fibroblasts from patients with Zellweger syndrome and acyl-CoA oxidase1 deficiency[J]. *Biochimica Et Biophysica Acta*, 2014, 1841(4): 610-619.
- [5] HAN Li-da, XIA Jian-fei, LIANG Qiong-lin, et al. Plasma esterified and non-esterified fatty acids metabolic profiling using gas chromatography-mass spectrometry and its application in the study of diabetic mellitus and diabetic nephropathy[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2011, 689(1): 85-91.
- [6] SERTOGLU E, KURT I, TAPAN S, et al. Comparison of plasma and erythrocyte membrane fatty acid compositions in patients with end-stage renal disease and type 2 diabetes mellitus[J]. *Chemistry & Physics of Lipids*, 2014, 178(1): 11-17.
- [7] CHA Youn-soo, KIM Soo-ran, YANG Ji-ae, et al. Kochujang, fermented soybean-based red pepper paste, decreases visceral fat and improves blood lipid profiles in overweight adults[J]. *Nutrition & Metabolism*, 2013, 10(1): 1-8.
- [8] 危晴, 王晓杰, 王维彬, 等. 乌骨藤脂肪酸组成成分的 GC/MS 分析[J]. *食品与机械*, 2013, 29(3): 31-33.
- [9] 李金玉. 利用气相色谱-质谱联用技术测定燕麦中脂肪酸的组成[J]. *食品与机械*, 2011, 27(3): 82-83.
- [10] OKSMAN M, IIVONEN H, HOGYES E, et al. Impact of different saturated fatty acid, polyunsaturated fatty acid and cholesterol containing diets on beta-amyloid accumulation in APP/PS1 transgenic mice[J]. *Neurobiology of Disease*, 2006, 23(3): 563-572.
- [11] WALKER C G, JEBB S A, CALDER P C. Stearidonic acid as a supplemental source of  $\omega$ -3 polyunsaturated fatty acids to enhance status for improved human health[J]. *Nutrition*, 2013, 29(2): 363-369.
- [12] LEMAITRE R N, KING I B, RICE K, et al. Erythrocyte very long-chain saturated fatty acids associated with lower risk of incident sudden cardiac arrest[J]. *Prostaglandins Leukotrienes & Essential Fatty Acids*, 2014, 91(4): 149-153.
- [13] FAO. Fats and fatty acids in human nutrition: Report of an expert consultation [R]. [S. l.]: Fao Food & Nutrition Paper, 2010.
- [14] ZHANG Jun-jie, ZHANG Li-jian, YE Xiao-xia, et al. Characteristics of fatty acid distribution is associated with colorectal cancer prognosis.[J]. *Prostaglandins Leukotrienes & Essential Fatty Acids*, 2013, 88(5): 355-360.
- [15] LEMAITRE R N, FRETTS A M, SITLANI C M, et al. Plasma phospholipid very-long-chain saturated fatty acids and incident diabetes in older adults: the Cardiovascular Health Study [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2015, 101(5): 1047-1054.
- [16] WANG Fei-hua, XIONG Xu-jie, GUO Xiao-feng, et al. Determination of fatty acids in bio-samples based on the pre-column fluorescence derivatization with 1,3,5,7-tetramethyl-8-butylurethylendiamine -difluoroboradiazole -indacene by high performance liquid chromatography[J]. *Journal of Chromatography A*, 2013, 1291(4): 84-91.
- [17] CANDIDATE K A, CANDIDATE D A G, CANDIDATE S A M, et al. A review of the possible role of the essential fatty acids and fish oils in the aetiology, prevention or pharmacotherapy of schizophrenia[J]. *Journal of Clinical Pharmacy & Therapeutics*, 2012, 37(2): 132-139.
- [18] ASLAN M, CELMELI G, ÖZCAN F, et al. LC-MS/MS analysis of plasma polyunsaturated fatty acids in patients with homozygous sickle cell disease[J]. *Clinical & Experimental Medicine*, 2014, 15(3): 397-403.
- [19] KATRANGI W, LAWRENZ J, SEEGMILLER A C, et al. Interactions of linoleic and alpha-linolenic acids in the development of fatty acid alterations in cystic fibrosis [J]. *Lipids*, 2013, 48(4): 333-342.
- [20] MORI N, FUKANO Y, ARITA R, et al. Rapid identification of fatty acids and (O-acyl)- $\omega$ -hydroxy fatty acids in human meibum by liquid chromatography/high-resolution mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2014, 1291(4): 129-136.
- [21] ZHANG Xiao-jing, HUANG Li-li, SU Huan-xing, et al. Characterizing plasma phospholipid fatty acid profiles of polycystic ovary syndrome patients with and without insulin resistance using GC-MS and chemometrics approach[J]. *Journal of Pharmaceutical & Biomedical Analysis*, 2014, 95(3): 85-92.
- [22] ARAKAWA K, HIMENO H, JIN K, et al. Impact of  $n$ -3 polyunsaturated fatty acids in predicting ischemia/reperfusion injury and progression of myocardial damage after reperfusion in patients with ST-segment elevation acute myocardial infarction[J]. *Journal of Cardiology*, 2015, 66(2): 101-107.
- [23] MARIONLETELLIER R, SAVOYE G, BECK P L, et al. Polyunsaturated fatty acids in inflammatory bowel diseases: a reappraisal of effects and therapeutic approaches [J].

- Inflammatory Bowel Diseases, 2013, 19(3): 650-661.
- [24] LAURINO C, PALMIERI B. PUFAS *n*-3, PUFAS *n*-6 and non-alcoholic fatty liver disease: pathogenesis and therapeutical approach[J]. Progress in Nutrition, 2015, 17(2): 87-105.
- [25] 袁汝玲, 王韧, 王莉, 等. 复合溶剂提取燕麦麸油工艺优化及其抗氧化活性物质分析[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 149-164.
- [26] 蒋立文, 郑兵福, 李白玉, 等. 四棱豆油脂、脂肪酸、蛋白质、氨基酸的分析[J]. 食品科学, 2010, 31(10): 231-234.
- [27] 于福宽, 孙君明, 韩粉霞, 等. 大豆籽粒中脂肪酸组分快速检测方法的比较分析[J]. 大豆科学, 2011, 30(4): 626-631.
- [28] 胡炜东, 蔡永敏, 杨俊峰. 超声波辅助提取油莎豆油工艺的研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 109-112.
- [29] 孙明哲. 牡丹籽油超声波辅助浸提工艺优化及其脂肪酸组成[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 182-185.
- [30] 尹璐海, 余佶, 余兆硕, 等. 黑豆油水酶法提取工艺及其脂肪酸组成分析[J]. 农产品加工, 2016(1): 22-25.
- [31] 娄丽娟, 马传国, 盖争艳. 黑豆油理化指标及脂肪酸组成分析[J]. 粮食与油脂, 2010(5): 23-24.
- [32] 邱卓, 蒋伟哲, 巫玲玲, 等. 猫豆营养成分的初步研究[J]. 广西中医药大学学报, 2011, 14(4): 48-49.
- [33] 赖锡湖, 黄卓, 李坚, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取茶叶籽油及其成分分析[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 38-40.
- [34] 雷雨和, 眭玥, 寿宇, 等. 永川毛莓型豆豉中脂肪酸提取方法比较研究[J]. 中国调味品, 2014(5): 114-117.
- [35] 李超颖, 敬思群. 油莎豆油不同提取方法的比较[J]. 中国酿造, 2014, 33(4): 61-64.
- [36] 范胜翔, 李斌, 孙君明, 等. 气相色谱方法定量检测大豆 5 种脂肪酸[J]. 中国油料作物学报, 2015(4): 548-553.
- [37] 代蕾莉, 李梅青, 张瑜, 等. 毛细管气相色谱法测定黑豆中  $\alpha$ -、 $\gamma$ -亚麻酸含量[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(1): 123-126.
- [38] 刘冰. GC—MS 分析测定 5 种植物油中脂肪酸成分研究[J]. 食品工业, 2014, 35(4): 222-224.
- [39] 卢银洁, 郝利平, 郭雨萱. 贮藏过程中胡麻油主要脂肪酸含量及组成变[J]. 食品与机械, 2016, 32(6): 115-117.
- [40] 南金平, 邹筱, 韩粉霞, 等. 基于大豆回交导入系的脂肪酸组分 QTL 定位[J]. 中国油料作物学报, 2015(3): 253-261.
- [41] 赵丽娟. 东北黄豆和黑豆脂肪酸成分的比较研究[J]. 食品科技, 2013(2): 155-158.
- [42] 杨莹莹, 姚舜, 万海清, 等. 酱油渣中油脂提取工艺的研究及其脂肪酸成分分析[J]. 中国酿造, 2011(11): 174-177.
- [43] 姜波, 胡文忠, 刘长建, 等. 九种植物油中脂肪酸成分的比较研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 108-113.
- [44] 金华, 刘治刚, 高艳, 等. 气相色谱—质谱法测定食用植物油中的脂肪酸[J]. 食品研究与开发, 2015(10): 107-109.
- [45] 吴卫国, 刘真知, 彭思敏, 等. 基于特征脂肪酸及脂肪酸比值的食用植物油掺假判别[J]. 食品科学, 2013, 34(16): 270-273.
- [46] 田甜, 武俊瑞, 岳喜庆. 传统豆酱中脂肪酸酯化方法的选择与组成分析[J]. 食品科学, 2014, 35(18): 78-83.
- [47] 伍新龄, 王凤玲, 关文强. 植物油脂肪酸甲酯化方法比较与含量测定[J]. 食品研究与开发, 2015(7): 84-87.
- [48] 李焕, 陈侨侨, 刘辉, 等. 定量结构-色谱保留相关方法分析食用植物油中脂肪酸组成[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 86-90.
- [49] 蒋丽婷. 豆腐乳物化性质与感官品质的相关性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 27-28.
- [50] 周思静, 李淑荣, 王志东, 等. 丹贝营养成分的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 336-338.
- [51] 付慧晓, 秦晶晶, 王道平, 等. 巴豆种仁中结合型脂肪酸及游离型脂肪酸的分析[J]. 贵阳医学院学报, 2013, 35(4): 3-6.
- [52] 晏小欣, 马泽鑫, 欧阳位麒, 等. 新疆油莎豆油提取及不饱和脂肪酸组成分析[J]. 食品科技, 2010(10): 226-229.
- [53] 尹璐海, 余佶, 余兆硕, 等. 黑豆油水酶法提取工艺及其脂肪酸组成分析[J]. 农产品加工, 2016(1): 22-25.
- [54] 郑兵福, 李白玉, 傅振华, 等. 四棱豆油脂的脂肪酸组成测定[J]. 食品工业科技, 2010(7): 342-344.
- [55] 海力前木·卡地尔, 艾拜都拉·阿布都拉. 新疆迪西型鹰嘴豆中脂肪和蛋白质组分的研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10 241-10 243.
- [56] 武俊瑞, 王晓蕊, 唐筱扬, 等. 辽宁传统发酵豆酱中乳酸菌及酵母菌分离鉴定[J]. 食品科学, 2015, 36(9): 78-83.
- [57] 耿予欢, 谢显华, 李国基. 酱油发酵过程中细菌群落结构的动态变化[J]. 现代食品科技, 2015(8): 83-87.
- [58] 何天明, 刘章武. 苦荞麦豆酱自然发酵工艺研究[J]. 中国酿造, 2013, 32(10): 57-60.
- [59] 曲直, 蒋爱民, 吴兰芳, 等. 阳江豆豉 *Aspergillus oryzae* 分离鉴定及其中性蛋白酶分析[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 22-25.
- [60] 沈柱英, 黄占旺, 肖建辉, 等. 纳豆糖蛋白的分离纯化、结构表征及其免疫活性研究[J]. 食品科学, 2015, 36(13): 215-222.

(上接第 107 页)

- [5] ROBERT Soliva-Fortuny C, OLGA Martin-Belloso. New advances in extending the shelf-life of fresh-cut fruits: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2003, 14(9): 341-353.
- [6] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 31.
- [7] 林永艳, 谢晶, 朱军伟, 等. 真空预冷对青菜贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(21): 314-317.
- [8] ZHAN Li-juan, LI Yu, HU Jin-qiang, et al. Browning inhibition and quality preservation of fresh-cut romaine lettuce exposed to high intensity light [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 14(2): 70-76.
- [9] 张立奎. 鲜切生菜在贮藏期间的微生物生长模型[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(2): 49-49.
- [10] FRANCO Cataldo. DNA degradation with ozone [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2006, 38(38): 248-254.
- [11] MANJU Sharma, HUDSON James. Ozone gas is an effective and practical antibacterial agent [J]. American Journal of Infection Control, 2008, 36(8): 559-663.
- [12] 林永艳, 谢晶, 朱军伟, 等. 清洗方式对鲜切生菜保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 211-213.
- [13] 王宏, 董大远. 清洗剂对生菜贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(8): 153-156.
- [14] 邓义才, 赵秀娟. 臭氧的保鲜机理及其在果蔬贮运中的应用[J]. 广东农业科学, 2005(2): 67-69.
- [15] 胡小荣, 陶梅, 卢新雄, 等. 不同含水量大葱种子贮藏过程中的糖代谢研究[J]. 植物遗传资源学报, 2006, 7(1): 85-88.
- [16] 肖卫华, 李里特, 李再贵, 等. 电生功能水对草莓的保鲜试验研究[J]. 食品科学, 2003, 24(5): 152-155.