

# 食用植物油营养成分及检测技术的研究进展

薛莉<sup>1,2</sup>, 黄晓荣<sup>1,2</sup>, 汪雪芳<sup>1,3</sup>, 郎呼呼<sup>1,3</sup>, 王晓<sup>1,4</sup>, 张良晓<sup>1,3,4\*</sup>, 李培武<sup>1,3,4,5\*</sup>,  
张文<sup>1,3\*</sup>, 张奇<sup>1,5</sup>

(1. 中国农业科学院油料作物研究所, 武汉 430062; 2. 农业部油料作物生物学与遗传改良重点实验室, 武汉 430062;  
3. 农业部油料及制品质量监督检验测试中心, 武汉 430062; 4. 农业部油料作物风险评估重点实验室, 武汉 430062;  
5. 农业部生物毒素检测重点实验室, 武汉 430062)

**摘要:** 食用植物油是人体生命活动和机体代谢过程中不可或缺的物质, 不仅为人体提供能量、必需脂肪酸, 还含有植物甾醇、维生素 E、多酚、角鲨烯和类胡萝卜素等多种营养成分。研究表明, 植物甾醇具有降低胆固醇水平、抗动脉粥样硬化和抗肿瘤等功能; 维生素 E 可以抑制油脂过氧化, 增加机体免疫能力, 预防和治疗心血管疾病等; 多酚具有消炎、预防冠心病等功能; 角鲨烯具有促进血液循环、活化机体细胞等功能。本文主要对植物油中的营养成分及相应检测技术进行了简要综述, 旨在促进植物油营养成分的深入研究, 挖掘食用油潜在营养成分和价值, 为指导消费者合理使用食用油提供科学依据。

**关键词:** 食用植物油; 营养成分; 检测技术

## Research progress of nutritional components in vegetable oils and analytical methods

XUE Li<sup>1,2</sup>, HUANG Xiao-Rong<sup>1,2</sup>, WANG Xue-Fang<sup>1,3</sup>, LANG Hu-Hu<sup>1,3</sup>, WANG Xiao<sup>1,4</sup>,  
ZHANG Liang-Xiao<sup>1,3,4\*</sup>, LI Pei-Wu<sup>1,3,4,5\*</sup>, ZHANG Wen<sup>1,3</sup>, ZHANG Qi<sup>1,5</sup>

(1. *Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Wuhan 430062, China*; 2. *Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China*; 3. *Quality Inspection and Test Center for Oilseeds Products, Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China*; 4. *Laboratory of Risk Assessment for Oilseeds Products (Wuhan), Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China*;  
5. *Key laboratory of Detection for Mycotoxins, Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China*)

**ABSTRACT:** Edible vegetable oil is indispensable for human life activities and metabolism, which not only provides energy and essential fatty acids, but also nutritional and functional components such as phytosterols, tocopherols, polyphenols, squalene and carotenoids for human. Studies show that phytosterols have functions like reducing cholesterol levels, resistance to atherosclerosis and antitumor and so on. Vitamin E can inhibit lipid peroxidation, increase the body's immune ability, prevent and treat cardiovascular diseases, etc. Polyphenols have functions such as

基金项目: 国家农产品质量安全风险评估重大项目(GJFP2016001、GJFP2016015)、农业部、财政部专项课题(CARS-13)

**Fund:** Supported by the National Key Project for Agro-product Quality & Safety Risk Assessment, PRC (GJFP2016001, GJFP2016015) and the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-13)

\*通讯作者: 张良晓, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品质量与营养、代谢组学、化学计量学。E-mail: liangxiao\_zhang@hotmail.com

李培武, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品、农产品质量与食品安全标准与检测技术研究。E-mail: peiwuli@oilcrops.cn

\*Corresponding author: ZHANG Liang-Xiao, Ph.D, Associate Professor, Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.2 Xudong 2nd Road, Wuchang District, Wuhan 430062, China. E-mail: liangxiao\_zhang@hotmail.com

LI Pei-Wu, Ph.D, Researcher, Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.2 Xudong 2nd Road, Wuchang District, Wuhan 430062, China. E-mail: peiwuli@oilcrops.cn

anti-inflammatory and prevention of coronary heart disease. Squalene can promote blood circulation and activate the body's cells, *etc.* Therefore, this review summarized the nutritional components of vegetable oils and their analytical techniques, so as to promote the further study of nutrients in vegetable oil, mine potential nutritive value of edible oils, and provide scientific basis for the rational use edible oils of consumers.

**KEY WORDS:** vegetable oil; nutritional ingredients; analytical methods

## 1 引言

我国油料作物丰富, 植物油种类繁多。植物油是人类 3 大主要营养素之一, 除了给机体提供生长代谢所需要的能量外, 还为人体提供重要营养物质, 如必需脂肪酸、植物甾醇、生育酚及酚类化合物等<sup>[1]</sup>。另外, 植物油在食品加工中也具有重要的作用, 可用于油炸食品的加工, 并赋予食品良好的风味。

目前, 市场上食用油琳琅满目, 种类繁多, 不同植物油的脂肪酸含量构成, 营养功能各异<sup>[2,3]</sup>。常见的植物油主要有菜籽油、大豆油、花生油、葵花籽油、芝麻油、亚麻籽油和玉米油等。从营养价值看, 大豆油的脂肪酸组成较均衡, 含有丰富的油酸、维生素 E、维生素 D 以及卵磷脂, 对人体健康非常有益<sup>[4]</sup>。菜籽油脂肪酸组成合理、植物甾醇及微量元素含量较高, 维生素 E 组成比例适当。其中, 低芥酸菜籽油的不饱和脂肪酸含量高, 油酸含量达 60% 以上, 且含有合理的 *n-6/n-3* 脂肪酸比例, 被称为“最健康的食用植物油”<sup>[5]</sup>。花生油富含油酸, 能够降低血液胆固醇含量, 且热稳定性好, 被认为是最优质的烹饪和煎炸油<sup>[6]</sup>。玉米油富含不饱和脂肪酸和维生素 E、植物甾醇, 可抑制心血管疾病, 延缓衰老<sup>[7]</sup>。

现有文献对食用植物油的营养成分评价, 主要集中在脂肪酸组成、少数微量营养成分以及营养成分与化学成分间的关联上, 对不同植物油间营养差异研究甚少。因此, 开展食用植物油营养成分评价与挖掘的研究, 引导消费者合理消费, 通过摄取有益营养成分, 达到预防疾病的目的, 有助于推动食用油产业健康发展。

## 2 植物油主要营养成分及功能

### 2.1 脂肪酸

脂肪酸是油脂的基本组成部分, 是评价食用油品质的重要指标之一。杨春英等<sup>[8]</sup>研究表明, 植物油中最主要脂肪酸为棕榈酸( $C_{16:0}$ )、硬脂酸( $C_{18:0}$ )、油酸( $C_{18:1}$ )和亚油酸( $C_{18:2}$ ), 每种植物油均含有这 4 种脂肪酸, 其中以油酸和亚油酸两种不饱和脂肪酸含量居高。棕榈酸和硬脂酸属于饱和类脂肪酸, 适量食用有利于脂肪代谢, 过量食用则会导致体内脂肪沉积<sup>[9]</sup>, 容易诱发高血脂和血管硬化等疾病。油酸属于单烯不饱和脂肪酸, 较易被人体吸收, 能减

少高血脂的发生, 抑制低密度脂蛋白的升高<sup>[10]</sup>。亚油酸属于多烯类不饱和脂肪酸, 是人体不能合成而又必需的一种脂肪酸, 具有缓解血液中过量的胆固醇、增强细胞膜透性、阻止动脉硬化等功能<sup>[11,12]</sup>。

### 2.2 植物甾醇

植物甾醇是一类以环戊烷全氢菲为骨架的天然醇类化合物。植物油是人类植物甾醇的最主要食源性来源之一, 植物油中最主要的植物甾醇是菜籽甾醇、豆甾醇、菜油甾醇和  $\beta$ -谷甾醇<sup>[13]</sup>。植物甾醇是植物在生长过程中产生的一种次级代谢产物, 具有降低胆固醇水平、抗动脉粥样硬化、抗炎症、抗氧化、抗肿瘤等功能<sup>[14]</sup>。植物甾醇在不同植物油中的组成模式及含量存在着显著的差异, 因此可以作为食用油身份判别的重要依据<sup>[15,16]</sup>。近年来植物甾醇作为油脂中的一种功能组分, 已成为油脂科学与工程领域重要的研究课题之一<sup>[17]</sup>。

### 2.3 维生素 E

维生素在食用植物油中含量较高, 植物油中维生素主要是维生素 E, 而日常生活中的饮食是维生素 E 的主要来源。维生素 E, 又名生育酚, 是所有具有  $\alpha$ -生育酚活性的生育酚和三烯生育酚及其衍生物的总称, 维生素 E 包括  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  和  $\delta$  4 种类型。维生素 E 是天然的抗氧化剂, 具有抗衰老、预防动脉硬化和心血管疾病等多种生理功能<sup>[18]</sup>。维生素 E 的主要来源是植物油和胚芽油, 如小麦胚芽油、玉米胚芽油、棉籽油、花生油和芝麻油等。因此, 维生素 E 的组成和含量可以作为食用植物油脂品质的一个重要评价指标<sup>[19]</sup>。

### 2.4 酚类化合物

植物多酚, 是分子中具有多个羟基酚类植物成分的总称, 其独特的多元酚结构赋予了它们独特的功能活性, 目前被广泛应用于医学、食品等相关领域。许多研究者发现多酚具有抗菌、消炎、预防冠心病、抗肿瘤等多种药理性机理。Pallavi 等<sup>[20]</sup>在油菜籽毛油中分离出菜籽酚, 证明菜籽酚的存在使得油脂更稳定。Chimi 等<sup>[21]</sup>证实了橄榄油中羟基酪醇、咖啡酸等多酚类物质对羟基自由基有强劲的清除能力。Bakkali 等<sup>[22]</sup>证明芝麻油中的芝麻酚经热裂解生成的芝麻酚, 是芝麻油具有较强氧化稳定性的主要成分。

## 2.5 角鲨烯

角鲨烯又称三十碳六烯,是三萜类开环化合物,是三萜醇及4-甲基甾醇的生源前体。角鲨烯是生物体内自身生成的一种活性物质,具有促进血液循环、活化机体细胞、抗氧化、消炎杀菌、细胞修复等功能<sup>[23]</sup>。角鲨烯主要来源于深海鲨鱼肝油,植物性产品橄榄油中的角鲨烯含量较高,除了橄榄油之外,其他植物油也或多或少含有角鲨烯。

## 2.6 类胡萝卜素

类胡萝卜素是一类脂溶性的色素,也是食用植物油中非常重要的营养活性成分,是食品加工工业中不可缺少的重要原料<sup>[24]</sup>。近年来试验研究表明,类胡萝卜素在基因表达、细胞增殖和分化调控、信号传导和细胞间隙连接通讯、机体抗氧化和免疫等方面有重要作用<sup>[25]</sup>。Krinsky等<sup>[26]</sup>研究发现,类胡萝卜素捕捉和淬灭自由基和单线氧的能力与其分子中共轭双键的数量有关,共轭双键数量越多,能力越强。类胡萝卜素还可与 $\alpha$ -生育酚(维生素E)协同合作产生抗氧化作用<sup>[27,28]</sup>。

## 3 主要营养成分检测技术

不同植物油的色泽、气味、滋味、烟点等固有属性不同,甘油酯、脂肪酸、植物甾醇等微量成分组成也存在差异。目前用于食用油品质检测的方法主要包括以紫外-可见分光光度计、荧光分光光度计、红外光谱法为主的光谱检测技术以及以气相色谱法、高效液相色谱法、色谱质谱联用法为主的色谱检测技术,以下从理论和实例两方面综述现有的营养功能成分检测技术。

### 3.1 光谱检测技术

#### 3.1.1 紫外-可见分光光度计

紫外-可见分光光度计分析检测的原理是基于测定物质中分子的基团吸收辐射(200~800 nm)、电子发生跃迁形成的吸收光谱而达到检测的目的。王耀等<sup>[29]</sup>基于花生油、调和油、葵花籽油和劣质食用油的紫外可见吸收光谱的吸收峰来鉴定各种油脂。谢宇奇等<sup>[30]</sup>用紫外可见吸收光谱法测定芒果叶中的芒果苷和叶绿素,该方法具有操作方便、检测速度快、运行成本低等优点。

#### 3.1.2 荧光分光光度计

荧光分光光度计原理是激发被测物质中的荧光物质变为激发态,以数字或图像的形式记录由激发态变为基态过程中所发出的荧光。方惠敏<sup>[31]</sup>通过对菜籽油、芝麻油、玉米油、花生油和葵花籽油5种植物油的同步荧光光谱和三维荧光光谱进行分析研究,结果发现结合2种谱图的特征,能够用于鉴别植物油品种的差异。

#### 3.1.3 红外光谱检测技术

红外光谱的原理是基于分析物质在红外区吸收能量跃迁达到检测的目的。周玲玲等<sup>[32]</sup>利用傅里叶变换衰减全

反射红外光谱技术结合偏最小二乘法,建立同时预测植物油酸值、黏度、折光率的模型,样品无需预处理,分析效率高。吴静珠等<sup>[33]</sup>采用红外光谱技术构建了食用油中4种主要脂肪酸(棕榈酸、硬脂酸、油酸和亚油酸)定量分析模型,基于竞争自适应重加权采样(competitive adaptive reweighted sampling, CARS)优选出的特征波长点优化模型,提高了脂肪酸近红外模型的预测能力。由此可见,紫外-可见光、荧光和红外等这一系列检测技术主要是依据食用植物油不同组成成分特征吸收峰不同,主要是 $\pi$ - $\pi$ 、C=O、C=C、CHO等特殊有机分子官能团的特征吸收峰强度与官能团浓度呈比例关系,借助化学计量学手段进行准确定量分析的技术<sup>[34]</sup>,这些方法普遍的缺点是模型依赖程度较高、方法重现性不好、且易受周围环境的干扰,定量准确度不高,目前,色谱检测技术依然是分析食用植物油的重要手段。

### 3.2 色谱质谱检测技术

#### 3.2.1 气相色谱法

植物油中的脂肪酸、甾醇以及挥发物的分析常用气相色谱法分析。由于脂肪酸甘油酯的沸点很高,直接用气相色谱需要固定相耐高温,但高温又将导致脂肪酸甘油酯分解<sup>[35]</sup>。因此,油脂中脂肪酸的气相色谱测定通常是将脂肪酸衍生为易挥发的衍生物——脂肪酸甲酯。杨培慧等<sup>[36]</sup>用了改进的碱催化法制备脂肪酸甲酯,再利用高分辨毛细管柱进行分析,测定了不同国家生产的食用油中的主要脂肪酸含量,并与国际标准作了比较和分析。植物甾醇的分析方法很多,但气相色谱法分离效果好、分析速度快、灵敏度高、操作简便,已经形成国际、国内标准方法<sup>[37]</sup>。张东生等<sup>[38]</sup>建立了气相色谱法测定油茶籽油中功能性成分角鲨烯的含量,该方法分析时间短、重现性好、灵敏度高,可用于食用植物中功能性成分角鲨烯含量的测定。

#### 3.2.2 高效液相色谱法

高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)加紫外-可见光检测器(ultraviolet-visible light detector, UV-DAD)广泛应用于食用油中营养成分的测定。张征等<sup>[39]</sup>采用正相超高压色谱直接测定几种食用油中维生素E的含量,建立了一种食用油中维生素E的快速测定方法体系,并运用该方法探讨了食用油脂中维生素E的分布特征。实验证明,该方法具有快速、准确、分离度好等特点。郑振佳等<sup>[40]</sup>采用柱前衍生-高效液相色谱荧光检测法分析了花生油中的游离脂肪酸。通过柱前衍生方法衍生,采用梯度淋洗方法同时测定了11种游离脂肪酸衍生物,该方法快速、简单。

#### 3.2.3 直接进样质谱法

质谱法(mass spectrometer, MS)是利用电磁学原理,对荷电分子或亚分子裂片按照其质量和电荷的比值(质荷比,  $m/z$ )进行分离和分析的方法。被分析的样品首先要离子

化, 然后根据不同离子在电场或磁场的运动轨迹的不同, 把离子按质荷比( $m/z$ )分开而得到质谱, 通过样品的质谱信息, 便可以进行样品的定性定量分析<sup>[41]</sup>。张丽丽<sup>[42]</sup>采用自行研制的表面解吸常压化学电离质谱法结合主成分分析法对不同种类的食用油进行品质分析, 获得其化学指纹图谱, 对指纹谱图信息进行数据分析, 实现了样品无需预处理、分析速度快的检测。周志权等<sup>[43]</sup>以质谱快速检测为基础, 运用改进的 BP 神经网络与表面解吸常压化学质谱技术相结合, 能够实现对大豆油、花生油和菜籽油进行有效分类和鉴别。

### 3.2.4 色谱质谱联用技术

色谱质谱联用技术能够结合色谱分离能力强和质谱高选择性和具有丰富结构信息的优点, 能实现准确定性定量分析复杂体系。色谱-质谱联用法分为气相色谱串联质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)和液相色谱串联质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)。杨春英等<sup>[13]</sup>建立了 GC-MS 测定食用植物油中植物甾醇含量的方法, 并对常见 14 种食用植物油中的 4 种植物甾醇进行了分析, 方法准确度高、重现性好、适用性强, 通过保留时间和质谱定性, 可准确地测定植物甾醇的含量。LC-MS 灵敏度更高, 可用于痕量分析。Mo 等<sup>[44]</sup>使用 LC-MS/MS 借助大气压化学电离检测器分析食用植物油中的 6 类植物甾醇和三萜烯醇, 该方法不需要样品衍生, 分析时间仅需 4 min, 具有高灵敏性和高选择性。吴晓等<sup>[45]</sup>以磁性羧基化多壁碳纳米管材料为基础, 建立了植物油中天然酚类化合物富集 LC-MS 分析方法, 应用于紫苏籽油中多酚成分的测定, 为全面认识紫苏籽油中酚类组分及开展紫苏籽油的品质与营养功能评价提供了必要基础。

随着气相色谱技术、液相色谱技术以及质谱技术等新兴技术的发展, 各国对食用植物油样品的分析检测研究也越来越多。质谱技术主要采用多反应监测技术, 与色谱联用技术的主要优点是可以快速、准确地从复杂基质样品中分析一些生物活性物质。LC-MS 具有不受环境干扰、操作简便、高灵敏度、高选择性的优点, 可用于分析复杂样品中的组成成分, 因此特别适合分析食用植物油样品中低含量目标物质的检测。

## 4 结 论

随着经济的发展, 生活水平的提高, 消费者对食用油的需求呈现出多样化趋势。传统的食用油已不能满足消费者对美味、营养、健康的需求。具有营养性、保健性、功能性的营养食用油今后将有巨大的市场空间。不同植物油的营养成分组成及含量不同, 使得营养功能不同, 因此明确不同植物油的营养组成成分, 建立食用油多种营养成分的快速检测技术, 发掘不同植物油的特色营养优势, 开展植物油营养成分挖掘与评价研究, 对于油脂产业的发

展以及消费者合理选择食用油都具有重大的意义。

### 参考文献

- [1] Cert A, Moreda W, Pérez-Camino MC. Chromatographic analysis of minor constituents in vegetable oils [J]. *J Chromatogr A*, 2000, 881(1-2): 131-148.
- [2] 杨帆, 薛长勇. 常用食用油的营养特点和作用研究进展[J]. *中国食物与营养*, 2013, 03: 63-66.  
Yang F, Xue CY. Research advancement of nutritional characteristics and functions of common edible oils [J]. *J Chin Food Nutr*, 2013, 03: 63-66.
- [3] 熊源. 植物油的种类与营养价值 [J]. *中国粮食经济*, 2014, 06: 72.  
Xiong Y. Types and nutritional value of vegetable oils [J]. *China Grain Econ*, 2014, 06: 72.
- [4] 杨月欣, 王亚昌, 潘兴昌. 中国食物成分表[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2002.  
Yang YX, Wang YC, Pan XC. Chinese food composition table [M]. Beijing: Peking University Medical Publishers, 2012.
- [5] 熊秋芳, 张效明, 文静, 等. 菜籽油与不同食用植物油营养品质的比较-兼论油菜品质的遗传改良[J]. *中国粮油学报*, 2014, 06: 122-128.  
Xiong QF, Zhang XM, Wen J, *et al.* Comparison of nutritional values between rapeseed oil and several other edible vegetable oils-discussion of rapeseed quality genetic improvement [J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2014, 06: 122-128.
- [6] Carrin ME, Carelli AA, *et al.* Rapid fingerprinting of sterols and related compounds in vegetable and animal oils and phytosterol enriched-margarines by transmission mode direct analysis in real time mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2016, 211: 661-668.
- [7] 李爱江, 关随霞, 陈杰. 玉米油的营养功能及其制备工艺的研究 [J]. *农业机械*, 2011, 29: 55-57.  
Li AJ, Guan SX, Chen J. Corn oil nutrition function and its preparation technology research [J]. *Agric Mach*, 2011, 29: 55-57.
- [8] 杨春英, 刘学铭, 陈智毅. 15 种食用植物油脂肪酸的气相色谱-质谱分析 [J]. *食品科学*, 2013, 06: 211-214.  
Yang CY, Liu XM, Chen ZY. Determination of fatty acid profiles in fifteen kinds of edible vegetable oil by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Sci*, 2013, 06: 211-214.
- [9] 孟丽苹, 张坚, 王春荣, 等. 中国中老年人居民膳食脂肪酸摄入状况分析 [J]. *中国食物与营养*, 2009, (10): 58-61.  
Meng LP, Zhang J, Wang CR, *et al.* Analysis of dietary fatty acid intake of middle and old aged people in China [J]. *J Chin Food Nutr*, 2009, (10): 58-61.
- [10] 张月红, 刘英华, 王颀, 等. 中长链脂肪酸食用油降低超重高甘油三酯患者血脂和低密度脂蛋白胆固醇水平的研究[J]. *中国食品学报*, 2010, (2): 20-27.  
Zhang YH, Liu YH, Wang J, *et al.* Study on the medium-and long-chain fatty acid in dietary oil decrease blood triglyceride and LDL-c in overweight and primary hypertriglyceridemic chinese subjects [J]. *J Chin Food*, 2010, (2): 20-27.
- [11] 于海宁, 单伟光, Das UN, 等. 茶籽中脂肪酸的组成及其生物活性脂肪酸对高糖胁迫下 RF/6A 细胞生长的影响[J]. *茶叶科学*, 2009, (6): 419-425.  
Yu HN, Shan WG, Das UN, *et al.* Compositions of fatty acids in tea seeds and effects of their bioactive fatty acids on glucose-induced cytotoxicity in

- RF/6A cells [J]. *J Tea Sci*, 2009, (6): 419–425.
- [12] Borges OP, Carvalho JS, Correia PR, *et al.* Lipid and fatty acid profile of *Castanea sativa* Mill. chestnut of 17 native Portuguese cultivars [J]. *J Food Comp Anal*, 2007, 20(2): 80–89.
- [13] 杨春英, 刘学铭, 陈智毅, 等. 气相色谱-质谱联用法测定 14 种食用植物油中的植物甾醇[J]. *中国粮油学报*, 2013, 02: 123–128.  
Yang CY, Liu XM, Chen ZY, *et al.* Determination of phytosterols of fourteen edible vegetable oils by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2013, 02:123–128.
- [14] Beveridge THJ, Li TSC, Drover JCG. Phytosterol content in American ginseng seed oil [J]. *J Agric Food Chem*, 2002, 50(4): 744–750.
- [15] Esche R, Scholz B, Engel KH. Online LC-GC analysis of free sterols/stanols and intact steryl/stanyl esters in cereals [J]. *J Agric Food Chem*, 2013, 61(46): 10932–10939.
- [16] Galeano Diaz T, Durán Merás I, Sánchez Casas J, *et al.* Characterization of virgin olive oils according to its triglycerides and sterols composition by chemometric methods [J]. *Food Control*, 2004, 16(4): 339–347.
- [17] 韩军花. 植物甾醇的性质、功能及应用[J]. *国外医学(卫生学分册)*, 2001, 28(05): 285–291.  
Han JH. The function and application of plant phytosterol [J]. *Foreign Med (Hyg Fascicule)*, 2001, 28(05): 285–291.
- [18] 栾礼侠, 许松林, 任艳奎. 分子蒸馏技术提纯天然维生素 E 的工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2006, 21(1): 100–103.  
Luan LX, Xu SL, Ren YK. Hygiene verify and ames teston the capsule of microbial polyunsaturated fatty acids microcapsule powder [J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2006, 21(1): 100–103.
- [19] Zuta PC, Simpson BK, Zhao X, *et al.* The effect of  $\alpha$ -tocopherol on the oxidation of mackerel oil [J]. *Food Chem*, 2007, 100(2): 800–807.
- [20] Pallavi S, Jha AB, Dubey, RS. *et al.* Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions [J]. *J Botany*, 2012, 217037.
- [21] Chimi H, Cillard J, Cillard P, *et al.* Peroxyl and hydroxyl radical scavenging activity of some natural phenolic antioxidants [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1991, 68(5): 307–312.
- [22] Bakali F, Averbeck S, Averbeck D, *et al.* Biological effects of essential oils: a review [J]. *Food Chem Toxi*, 2008, 46(2): 446–475.
- [23] 周茂君, 向仕学, 等. 保健食品中角鲨烯的气相色谱分析[J]. *预防医学情报杂志*, 2003, 19(2): 186–187.  
Zhou MJ, Xiang SX, *et al.* Analysis of health food of squalene in gas chromatography [J]. *J Prev Med Inform*, 2003, 19(2): 186–187.
- [24] Ibanéz E, Herrero M, Mendiola JA, *et al.* Extraction and characterization of bioactive compounds with health benefits from marine resources. macro and micro algae, cyanobacteria and invertebrates [J]. *Mar Bioac Compound*, 2012: 55–98.
- [25] Karadas F, Pappas AC, Surai PF, *et al.* Embryonic development within carotenoid-enriched eggs influences the post-hatch carotenoid status of the chicken [J]. *Comparative Biochem Physiol B: Biochem Mol Biol*, 2005, 141(2): 244–251.
- [26] Krinsky NI. Effects of carotenoids in cellular and animal systems [J]. *J Am Clin Nutr*, 1991, 53(1): 238S–246S.
- [27] 陈波. 不同来源的类胡萝卜素在动物机体内的沉积 [J]. *中国家禽*, 1997, (11): 7–8.  
Chen B. Accumulation of Carotenoids of vairous source in chicken tissues [J]. *China Poultry*, 1997, (11): 7–8.
- [28] 靳青, 毕宇霖, 刘晓牧, 等. 类胡萝卜素代谢及功能研究进展[J]. *动物营养学报*, 2014, 12: 3561–3571.  
Ji Q, Bi YL, Liu XM, *et al.* Recent advances on research of carotenoid metabolism and functions [J]. *Chin Anim Nutr*, 2014, 12: 3561–3571.
- [29] 王耀, 尹平河, 梁芳慧, 等. 紫外可见分光光度法鉴别掺兑桐油的花生油[J]. *分析试验室*, 2006, 25(3): 92–94.  
Wang Y, Yin PH, Liang FH, *et al.* Distinguishing hogwash oil from peanut oil by ultraviolet-visible spectrophotometry [J]. *Chin Anal Lab*, 2006, 25(3): 92–94 .
- [30] 谢宇奇, 林翠梧, 赖清华, 等. 紫外-可见吸收光谱法测定芒果叶中的芒果苷和叶绿素[J]. *南方农业学报*, 2014, 03:463–468.  
Xie YQ, Lin CW, Lai QH, *et al.* Determination of chlorophyll and mangiferin content in mangoleaves by using UV-VIS Spectrum [J]. *J Southern Agric*, 2014, 03: 463–468.
- [31] 方惠敏. 植物油的荧光光谱法研究[J]. *生物学杂志*, 2009, 06: 83–85, 91.  
Fang HM. Study on the fluoescence spectrum of vegetable oil [J]. *J Biology*, 2009, 06: 83–85, 91.
- [32] 周玲玲, 姚志湘, 粟晖, 等. ATR/FTIR 法检测植物油的品质指标[J]. *中国油脂*, 2016, 04: 96–99.  
Zhou LL, Yao ZX, Li H, *et al.* Determination of quality indicators of vegetable oil by ATR/FTIR [J]. *China Oils Fats*, 2016, 04: 96–99.
- [33] 吴静珠, 徐云. 基于 CARS-PLS 的食用油脂脂肪酸近红外定量分析模型优化[J]. *农业机械学报*, 2011, 10: 162–166.  
Wu JZ, Xu Y. NIR quantitative model optimization of fatty acid in edible oil based on CARS-PLS [J]. *J Agric Mach*, 2011, 10: 162–166.
- [34] Ge F, Chen CY, Liu DQ. Rapid quantitative determination of walnut oil adulteration with sunflower oil using fluorescence spectroscopy [J]. *Food Anal Methods*, 2014, 7: 146–150.
- [35] Grob Jr K. Degradation of triglycerides in gas chromatographic capillaries: studies by reversing the column [J]. *J Chromatogr*, 1981, 205: 289–296.
- [36] 杨培慧, 郑志雯, 赵秋香, 等. 食用植物油脂肪酸的高分辨气相色谱分析 [J]. *中国油脂*, 2003, 07: 48–50.  
Yang PH, Zheng ZW, Zhao QX, *et al.* Determination of fatty acid content in edible vegetable oils by GC analysis [J]. *China Oils Fats*, 2003, 07: 48–50.
- [37] 朱琳, 张蕊, 薛雅琳, 等. 植物油中甾醇组成及总量测定方法的改进 [J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(8): 109–112.  
Zhu L, Zhang R, Xue YL, *et al.* Improvement of the measuring methods of composition and total contents of sterols in vegetable oils [J]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 2012, 27(8): 109–112.
- [38] 张东生, 薛雅琳, 金青哲, 等. 油茶籽油中角鲨烯含量的测定[J]. *中国油脂*, 2013, 11: 85–88.  
Zhang DS, Xue YL, Jin QZ, *et al.* Determination of squalene in oil-tea camellia seed oil [J]. *China Oils Fats*, 2013, 11: 85–88.
- [39] 张征, 徐春祥, 刘佳妮, 等. 正相超高压液相色谱法测定植物油中的维生素 E[J]. *中国粮油学报*, 2012, 10: 109–112.  
Zhang Z, Xu CX, Liu JD, *et al.* Determination of vitamin E in edible plant oil by normal phase ultra performance liquid chromatography [J]. *J Chin Cereal Oils Assoc*, 2012, 10: 109–112.
- [40] 郑振佳, 赵先恩, 迟炳海, 等. 花生油中游离脂肪酸的 HPLC-FLD 分析 [J]. *分析试验室*, 2011, 30(3): 23–27.

- Deng ZJ, Zhao XE, Chi BH, *et al.* HPLC-FLD analysis of free fatty acids in peanut oil [J]. *Anal Lab*, 2011, 30(3): 23–27.
- [41] 杜海丽. 用于液质联用定量分析的化学计量学方法与应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- Du HL. Research on the theory and applications of chemometric methods for quantitative liquid chromatography-mass spectrometry [D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [42] 张丽丽. 食用油的表面解吸常压化学电离质谱分析[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- Zhang LL. Analysis of edible vegetable oil by surface desorption atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [43] 周志权, 张婷婷, 贾滨, 等. 神经网络用于直接化学电离质谱分析食用油品质的研究 [J]. *分析化学*, 2011, 11: 1665–1669.
- Zhou ZQ, Zhang TT, Jia B, *et al.* Surface desorption atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry for edible oil analysis based on back propagation neural networks [J]. *Anal Chem*, 2011, 11: 1665–1669.
- [44] Mo S, Dong L, Hurst WJ, *et al.* Quantitative analysis of phytosterols in edible oils using APCI liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Lipids*, 2013, 48(9): 949–956.
- [45] 吴娆, 马飞, 张良晓, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定紫苏籽油中 11 种酚类化合物 [J]. *分析化学*, 2015, 10: 1600–1606.
- Wu R, Ma F, Zhang LX, *et al.* Simultaneous determination of 11 phenolic

compounds in *perilla* oil by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Chin J Anal Chem*, 2015, 10: 1600–1606.

(责任编辑: 姚 菲)

## 作者简介



薛 莉, 硕士, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: xueli201611@126.com



张良晓, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为食品质量与营养、代谢组学、化学计量学。

E-mail: liangxiao\_zhang@hotmail.com



李培武, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为食品、农产品质量与食品安全标准与检测技术。

E-mail: peiwuli@oilcrops.cn