

# 常见光谱技术在植物油品质检测中的应用

许林楠<sup>1</sup>, 林泓<sup>2</sup>, 钮冰<sup>1</sup>, 邓晓军<sup>2\*</sup>

(1. 上海大学 生命科学学院, 上海 200444; 2. 上海海关 动植物与食品  
检验检疫技术中心, 上海 200135)

**摘要:** 植物油品质检测技术中, 以光谱技术为代表的更为简单方便、快速而不失准确性的无损检测技术为市场所需要。该文从植物油组成成分、市场售卖植物油掺假现状两方面对植物油的品质相关指标进行了介绍, 着重介绍了红外光谱技术、拉曼光谱技术、荧光光谱技术、紫外光谱技术等不同光谱技术在植物油品质检测中的研究进展和应用现状, 最后提出了光谱技术在植物油品质检测发展中的瓶颈, 并对光谱技术在植物油品质检测中应用前景进行了展望。

**关键词:** 光谱; 植物油; 品质; 检测

**中图分类号:** O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2019)11-1400-07

## Application of Spectral Techniques in Quality Detection of Vegetable Oils

XU Lin-nan<sup>1</sup>, LIN Hong<sup>2</sup>, NIU Bing<sup>1</sup>, DENG Xiao-jun<sup>2\*</sup>

(1. School of Life Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Technical Center for Animal Plant and Food Inspection and Quarantine, Shanghai Customs, Shanghai 200135, China)

**Abstract:** Many methods have been used widely in quality detection of vegetable oils, including sensory evaluation, physical and chemical analysis, mass spectrometry, chromatography, chromatography-mass spectrometry, etc. However, performing these traditional methods usually requires time-consuming sample preparation and other complex processes. To meet the demands for developing industries and growing markets, a detection technique with simpler process and lower cost is needed in food quality detection. With the reduction of manufacturing cost and the improvement of performance, spectroscopy has been developing rapidly in the last decade for its rapidness, accuracy and non-destructive application. The spectral detection of vegetable oil quality has become a hot research topic, and a vast application of spectral techniques could be expected in food detection. The recent research progresses of vegetable oil quality detection is updated in this review based on spectral techniques. Indicators for evaluating the quality of vegetable oils are introduced in the beginning. Applications of different spectral techniques in vegetable oil quality detection, such as infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, fluorescence spectroscopy, ultraviolet spectroscopy, etc were highlighted afterwards. Furthermore, the current bottlenecks as well as the application prospects of spectral techniques in vegetable oil quality detection are predicted.

**Key words:** spectrum; vegetable oil; quality; detection

近年来, 中国食用油市场不断扩大, 作为中国居民生活必需品之一的植物油占比也随之上升, 食用油的品质问题受到了社会的广泛关注。常用的植物油品质检测方法有高效液相色谱法(HPLC)、液相色谱-质谱法(LC-MS)、气相色谱-质谱法(GC-MS)等, 然而这些方法不仅前处理复杂, 检测耗时, 而且对仪器要求高, 检测成本高, 应用场合多限于实验室内, 不能满足食用油品质快速检测的需求。近红外光谱、拉曼光谱等光谱技术根据物质的光谱特性来鉴别物质及确定其化学组成和相对含量, 具有无损检测、检测速度快、操作方便等优点, 且各种手持式光谱设备适用于现场实时检测, 降低了仪器、人力成本。

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-05-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1603503); 上海市科委项目(19395810100, 19391901500, 18DZ2201200)

\* 通讯作者: 邓晓军, 博士, 研究员, 研究方向: 食品质量安全评价, E-mail: xjdeng@yeah. ent

## 1 植物油品质概述

### 1.1 植物油的主要组成成分

食用油作为人民群众生活必需品，包括植物油和动物油脂两类，随着人们生活水平的提高，植物油已逐渐取代动物油脂<sup>[1]</sup>成为人们主要选择购买的食用油。植物油的主要成分为直链高级脂肪酸和甘油生成的酯、脂肪酸、矿物质等，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<sup>[2]</sup>。对植物油品质的评价包括两个方面：一方面是植物油质量安全的评价，其评价指标为质量指标，如酸价是游离脂肪酸含量的标志，过氧化值反映脂肪酸等被氧化的程度，极性组分可判断植物油煎炸过程中油品质量，碘值表征不饱和程度，反式脂肪酸可监测加工过程；另一方面，各种植物油的特征组分可作为判别是否掺假的特征指标，如根据不同植物油中脂肪酸的比例特征或者某种特异性组分，可以对市场上的掺假植物油进行初步鉴定<sup>[3]</sup>。

### 1.2 植物油的掺假现状

受经济利益驱使，一些不良商家将价廉植物油掺杂到某种高价植物油产品中，或是采用假的食用植物调和油配方，使植物油实际品质与标签描述品质不符。针对此现象，2018年12月21日开始执行的 GB 2716-2018《食品安全国家标准植物油》要求单一品种食用植物油不应掺有其他油脂、食用植物调和油标签标识应注明各种食用植物油的比例。因此，为了保证植物油市场的稳定并维护消费者权益，对植物油进行掺假判别和多项品质指标的检测具有重要意义。

## 2 常见光谱技术在植物油品质检测中的应用

在植物油品质检测过程中，经光谱测定初步得到的谱图往往包含了大量信息，需要经过降噪、特征峰提取、模型建立等一系列数据处理过程，才能建立稳定、可靠的光谱鉴定方法<sup>[4]</sup>。随着计算机技术水平的提高，光谱技术得到了迅速的发展，光谱仪器的自动化程度和各类光谱数据分析软件的智能化程度不断升级，显著提高了光谱检测的速度和精确度。而化学计量学在光谱分析中的应用，使分析结果产生了质的飞跃<sup>[5]</sup>，例如基于多尺度小波变换的化学计量学方法，可对光谱重叠峰进行有效分离；基于主成分分析(PCA)、偏最小二乘判别(PLS-DA)等化学计量学方法，可对真伪商品进行正确识别<sup>[6]</sup>。目前，光谱技术与化学计量学结合的研究方法已经在植物油品质检测方面得到广泛应用<sup>[7]</sup>。

近年来，光谱技术在植物油品质检测方面的应用，除了传统的一维光谱技术，也有大量使用二维相关光谱技术的报道<sup>[8]</sup>。二维光谱是光谱分析领域的最新进展之一，广义二维相关光谱包括二维相关近红外光谱、二维相关拉曼光谱、二维相关荧光光谱等。相较于传统一维光谱，二维光谱引入了温度等根据实验目标添加的外扰因素，能够根据施加外扰因素后研究体系的变化情况及其相关性，显示一维光谱中重叠和被掩盖的小峰，解释不同谱峰的相互关系，从而获得更多光谱信息<sup>[9]</sup>，具有更高的分辨率，适用于复杂基质干扰、谱峰化学意义阐释等一维光谱难以实现的应用。

### 2.1 红外光谱技术

在植物油品质优劣程度的检测中，常通过理化指标或者成分测定反映植物油的品质情况，已有红外光谱技术在植物油酸价(AV)、过氧化值(PV)、碘值(IV)、反式脂肪酸(TFA)等检测中的应用报道。2016年，Jiang等<sup>[10]</sup>将植物油样品溶于 $\text{CCl}_4$ 后置于红外石英比色皿(IQC)中，通过傅立叶变换红外光谱(FTIR)，选择 $3\ 535$ 、 $3\ 508$ 、 $3\ 340 \sim 3\ 390\ \text{cm}^{-1}$ 的光谱数据用于AV确定，结果发现红外光谱测量的AV与使用滴定法测量的AV之间具有良好线性关系，表明该法可以作为确定植物油AV经典方法的替代方法。在此基础上，2018年Shang等<sup>[11]</sup>同样利用IQC对植物油PV进行了红外光谱测定，不仅精确得到不依赖于油类型的PV值，并且可以有效替代美国石油化学家协会(AOCS)方案，将FTIR光谱的应用扩展到了定量分析。张欣<sup>[12]</sup>、莫欣欣<sup>[13]</sup>、朱雨田等<sup>[14]</sup>也通过选取合适的特征光谱波段，成功构建了植物油PV、AV、TFA和IV的近红外定量分析模型，证明了近红外光谱技术在植物油这4个参数定量测定方面的可行性。

红外光谱技术也可用于植物油掺假检测，红外光谱结合模式判别模型能够成功实现对橄榄油等植物油的掺假识别。Pan等<sup>[15]</sup>利用便携式FTIR光谱仪和化学计量学工具对掺入其他植物油的特级初榨橄

橄榄油进行筛选鉴别,选择  $800 \sim 1\,500\text{ cm}^{-1}$  的光谱数据,经矢量归一化(SNV)处理后建立簇类独立软模式识别(SIMCA)模型,结果发现 SIMCA 模型可识别含有不少于 10% 掺假油的橄榄油,建立的 PLS 模型则可以估计掺假含量在 5% 至 45% 范围内的掺假油,误差在 3% 以内。类似的研究中,Basri 等<sup>[16]</sup>利用近红外光谱技术对掺假棕榈油进行了鉴别;Kou 等<sup>[17]</sup>通过 FTIR 光谱法对掺有煎炸油(UFO)的植物油进行鉴定。然而,当掺假油与主油的红外光谱信息相似,特别是掺假油占比远大于主油时,一维红外光谱可能无法对掺假油进行定性鉴别。例如芝麻油和掺假芝麻油的化学结构相似,难以通过一维红外光谱鉴别掺有玉米油的芝麻油。Yang 等<sup>[18]</sup>通过对  $6\,000 \sim 4\,540\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,800 \sim 650\text{ cm}^{-1}$  处的有效红外光谱波段进行同步和异步二维光谱计算,发现相对于同步和异步二维红外相关光谱,使用同步-异步二维红外光谱结合多维偏最小二乘判别法(NPLS-DA)分析光谱数据,可在剔除冗余光谱信息的同时,更全面地展现待测物质的特征光谱信息,并最终通过最小二乘支持向量机(LS-SVM)预测模型实现了纯芝麻油和掺假芝麻油的分类。

## 2.2 拉曼光谱技术

拉曼光谱作为一种散射光谱,与分子极化率的变化有关,可以提供相关官能团信息,因此拉曼光谱技术可以对物质的结构和成分进行定性和定量分析<sup>[19]</sup>。该技术具有不需进行前处理、不破坏样品、分析速度快等特点<sup>[20]</sup>,为植物油的检测和分析带来了很大的便利,并得到了广泛应用<sup>[21-26]</sup>。常见的拉曼光谱技术包括常规拉曼光谱、表面增强拉曼光谱(SERS)、共振拉曼光谱(RRS)、傅立叶变换拉曼光谱(FT-Raman)等。

植物油中的不饱和脂肪酸对人体健康大有益处,但不饱和键容易氧化生成过氧化物,加速油脂腐败过程,因此有必要对油脂氧化程度进行测定。林新月等<sup>[27]</sup>采用普通拉曼光谱对亚麻籽油、鱼油和山茶油的氧化过程进行分析,发现  $974\text{ cm}^{-1}$  处特征峰的相对强度  $I_{974}/I_{1442}$  逐渐增加; $1\,265\text{ cm}^{-1}$  处峰的相对强度  $I_{1265}/I_{1442}$  逐渐降低。周秀军<sup>[28]</sup>利用拉曼光谱技术实现了食用植物油品质的快速定量分析,发现油脂皂化值在拉曼位移  $1\,104 \sim 1\,133\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,718 \sim 1\,772\text{ cm}^{-1}$ ,油脂碘值在拉曼位移  $1\,609 \sim 1\,689\text{ cm}^{-1}$  与拉曼光谱矩阵有较好的线性关系。Silvia 等<sup>[29]</sup>通过油样的拉曼光谱图,对不同品种橄榄油中的类胡萝卜素、脂肪酸组分进行了表征。

在目前的植物油市场,除了单一品种的食用植物油产品,食用植物调和油也是我国小包装食用植物油中的主要产品。市场上的食用植物调和油产品众多,且存在宣传配方比例与实际品质不符的问题,针对此现象,靳昱昱<sup>[30]</sup>基于拉曼光谱对含有菜籽油、花生油和芝麻油的 3 组分食用调和油进行快速定量检测,选取特征峰集中的  $600 \sim 3\,000\text{ cm}^{-1}$  波段建立基于非线性支持向量机(SVM)和 PLS 回归算法的定量分析模型,结果表明拉曼光谱技术结合化学计量学方法可快速定量检测上述 3 组分的含量,但由于该实验中采用的调和油样品由现压榨纯油调制而成,并且样品数量较少,所以结果可能会影响模型的适用性。针对这一缺点,董晶晶等<sup>[31]</sup>直接从市场上购买食用调和油产品,利用激光共聚焦显微拉曼结合 PLS 测定了食用调和油中饱和脂肪酸(SFA)、单不饱和脂肪酸(MUFA)、多不饱和脂肪酸(PUFA)的含量和比例。

二维拉曼光谱可以显著提升表征谱峰的分辨率,对于一些因一维拉曼特征峰极其接近,无法准确分类的食用油,可采用二维拉曼光谱进行区分。如橄榄油、大豆油、葵花籽油的一维拉曼特征谱峰非常接近,当在橄榄油中掺入大豆油或葵花籽油时,很难通过一维拉曼光谱进行识别。陈达等<sup>[32]</sup>在温度外扰因素下利用二维相关拉曼光谱提取信息,发现随着橄榄油中其他油品掺杂浓度的增大,其光谱信息主要在  $1\,263 \sim 1\,656\text{ cm}^{-1}$  波段内发生变化,二维同步和二维异步相关拉曼光谱中  $1\,441\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,656\text{ cm}^{-1}$  两处的峰强也均和掺杂浓度相关;同时,很多一维谱图中的重叠峰变得更加清晰和容易分辨。最后结合 NPLS-DA 和多尺度建模思想建立模型,新模型不仅可准确挖掘掺假橄榄油中的表征光谱信息,还避免了信息丢失和基线干扰。

## 2.3 荧光光谱技术

荧光光谱技术是近年发展起来的新型分析检测技术,通过荧光光谱图中荧光能量和波长的关系鉴别荧光物质,常见的荧光光谱技术有常规荧光光谱技术、同步荧光光谱技术、三维荧光光谱技术等。由于植物油中含有的脂肪酸、生育酚、叶绿素等具有荧光效应,一些学者已经应用荧光光谱结合化学

计量学对植物油的品质评价进行了研究并取得了良好效果<sup>[33-35]</sup>。

根据荧光光谱数据与橄榄油主要质量参数(例如过氧化值、酸价等)之间的关系,可对橄榄油的品质进行评估。李双芳等<sup>[36]</sup>发现烘箱氧化葵花籽油时,随着天数增加,其三维荧光光谱发射波长范围变宽,荧光强度增强,并利用平行因子法(PARAFAC)筛选得到特征波长差  $\Delta\lambda = 50$  nm,同时结合特征光谱数据和偏最小二乘法建立酸价模型,实现了葵花籽油品质的快速辨别。类似的,Gu等<sup>[37]</sup>在得到花生油荧光光谱数据后,同样利用 PARAFAC 算法得到花生油的特征波长差  $\Delta\lambda = 120$  nm,并根据测得的酸价、过氧化值结合人工神经网络(ANN)建立了同步荧光光谱回归模型,实现了花生油品质的快速检测。Mishra等<sup>[38]</sup>将荧光光谱技术用于初榨橄榄油中叶绿素含量和氧化物含量的检测;王挥等<sup>[34]</sup>采集 350~400 nm 的特征荧光光谱波段建立偏最小二乘判别法(PLS-DA)模型,成功进行了初榨椰子油掺假检测。然而,一维荧光光谱也有一定缺陷,例如某些食用油的荧光信息隐含在主峰中,掩盖了部分关键信息,使谱图难以解析,此时可使用二维荧光光谱进行解决。于丽燕等<sup>[39]</sup>采用二维荧光光谱进行分析,发现当芝麻油中菜籽油含量为 3% 时,交叉峰正负情况与纯芝麻油峰相反,可在加热时间外扰因素下快速鉴别掺入较低浓度(3%)菜籽油的芝麻油。

## 2.4 紫外光谱技术

紫外光谱根据分子在紫外光区的吸收光谱图获取物质信息,目前已经广泛用于食用油、生化、药物、环境等领域。例如由于脂肪酸在紫外区有特征吸收光谱,可根据植物油的紫外光谱研究其精炼程度,此外,紫外光谱也广泛用于植物油的品质指标测定和掺假判别中<sup>[40-42]</sup>。

王宁等<sup>[43]</sup>利用游离脂肪酸与邻苯二甲酰亚胺钾快速反应生成邻苯二甲酰亚胺,而邻苯二甲酰亚胺在紫外光谱 290 nm 波长处有特征吸收峰的原理,采集 240~340 nm 处的特征紫外光谱数据,建立了线性关系良好的食用植物油酸价检测模型。郑艳艳等<sup>[44]</sup>选择 200~360 nm 处的特征紫外吸收光谱数据,通过判别分析实现了掺伪植物油的 100% 鉴别。紫外光谱技术也可与其他检测结合对植物油品质进行测定。例如 Garrido-Delgado 等<sup>[45]</sup>使用紫外离子迁移谱(UV-IMS)方法对初榨橄榄油及其与不同类型植物油的掺杂样品进行了判定。

## 2.5 其他光谱技术

光谱技术作为检测技术的一大分支,在植物油品质测定上占有较大优势。除了以上光谱技术,还有其他多种光谱技术也在植物油品质检测方面<sup>[46-48]</sup>得到了应用。例如低场核磁共振技术可通过测量横向、纵向弛豫时间及其对应的质子密度对植物油体系进行研究。原子分光光度法能分析多种元素,可通过测定目标元素含量对植物油进行品质评定。表 1 为其他光谱技术在植物油品质检测上的具体运用。

表 1 其他光谱技术在植物油品质检测上的运用

Table 1 Application of other spectral techniques in the detection of vegetable oil quality

Vegetable oils	Spectral techniques	Application methods	Results or purposes	References
特级初榨橄榄油	紫外-可见吸收光谱技术(UV-Vis)	独立成分分析(ICA)	根据多酚化合物、生育酚、类胡萝卜素和叶绿素的量对不同的橄榄油品质进行评分	[49]
巴西坚果油、奇亚籽油、亚麻籽油、芝麻油、大豆油	核磁共振技术(NMR)	主成分分析(PCA)	核磁共振和化学计量学结合可将脂肪酸组分与植物油来源成功关联,适用于检测样品掺假	[50]
3种掺假食用植物油	核磁共振技术(NMR)	观察特征峰	随着掺假油浓度增加,特征峰面积的比例也随之增大,通过测定该特征峰面积比例可定量出掺伪量	[51]
大豆油	太赫兹光谱分析技术	偏最小二乘(PLS)、支持向量机回归(SVR)、最小二乘支持向量机(LS-SVR)	利用太赫兹光谱检测油脂中反式脂肪酸含量	[52]
大豆油、芝麻油等8种食用油	火焰原子吸收光谱技术(FAAS)	绘制标准曲线	一级大豆油的Fe含量最高,散装色拉油Zn含量最高	[53]
植物油	电感耦合等离子体发射光谱技术(ICP-AES)	多谱线拟合校正技术(MSF)	测定植物油中的磷	[54]

(续表 1)

Vegetable oils	Spectral techniques	Application methods	Results or purposes	References
大豆油、玉米油、向日葵油、菜籽油	火焰原子吸收光谱技术	使用微乳液进行样品制备, 通过电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)结果检查准确度	可准确测定植物原油和精制植物油中的 Fe 总量	[55]
豆油、菜籽油、茶籽油等 55 份植物油	激光拉曼光谱融合激光近红外光谱	数据融合技术、支持向量回归(SVR)	快速检测植物油不饱和脂肪酸(MUFA)和多不饱和脂肪酸(PUFA)含量, 采用特征层融合方法建立的含量预测模型的综合性能优于基于单光谱数据建立的模型	[56]

不同光谱技术特点各异, 在植物油品质检测方面各有侧重点, 同时也存在一定互补性。如对于聚合物分子, 拉曼散射的选择限制较小, 因而可得到更为丰富的谱带, S—S、C—C、C=C、N=N 等红外特征较弱的官能团在拉曼光谱中信号较为强烈<sup>[57]</sup>, 而近红外光谱技术主要反映有机分子含氢基团的特征信息。在对植物油中的水溶性物质进行检测时, 近红外光谱技术对水敏感和水拉曼散射弱的特点使得两种光谱技术有了很好的互补性。紫外光谱和荧光光谱反映的是目标分子或其衍生物的光谱信息, 不能反映基团信息, 通常作为植物油品质检测时某种特征物质的辅助检测手段。因此, 未来在植物油检测中既要选择合适的光谱技术, 也可考虑将多种光谱技术融合, 以达到事半功倍的效果。

### 3 结 语

光谱技术在食品安全领域的应用是当前的研究热点, 其在植物油品质检测中的研究也越发广泛和深入, 目前已经实现多种植物油掺伪的鉴定, 并能够同时检测多项品质相关理化指标, 且检测过程快速无损, 是传统检测方法的有力补充和替代。随着化学计量学的不断发展, 光谱技术能够结合各种模式判别模型和定性定量模型, 实现更深度的数据挖掘和更准确的结果判定, 在植物油检测领域具有广阔的应用空间。在国内, 光谱技术在植物油品质检测方面的应用研究还有很多工作要做, 因为目前的研究多限于实验室内, 研究中的样本来源有限, 且多以自行配制植物油进行调和检测<sup>[58-59]</sup>, 存在样本代表性不足、适用范围有限等问题, 其适用性还未扩展到海关口岸等领域以及植物油品质的现场实时检测环节, 缺乏市场适用性。因此, 建立标准化方法、完善开发新的数据处理方法、共享模型库、研制各种便携式光谱采集仪器、建立数据处理云平台等, 使光谱技术用于在线检测和过程分析过程, 实时监测并保证植物油产品品质, 具有一定的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] Pan D S. *Mod. Food* (潘东升. 现代食品), **2018**, 4(04): 109-111.
- [2] Xue L, Huang X R, Wang X F, Lang H H, Wang X, Zhang L X, Li P W, Zhang W, Zhang Q. *Food Safe Qual. Detec. Technol.* (薛莉, 黄晓荣, 汪雪芳, 郎呼呼, 王晓, 张良晓, 李培武, 张文, 张奇. 食品安全质量检测学报), **2017**, 8(2): 446-451.
- [3] Zhang Y Z, Yi X H, Deng X J, Zhao C M, Qu L, Guo D H, Chen Q. *Food Safe Qual. Detec. Technol.* (张英姿, 伊雄海, 邓晓军, 赵超敏, 曲栗, 郭德华, 陈沁. 食品安全质量检测学报), **2017**, 8(11): 4239-4246.
- [4] Chen T B, Liu M H, Huang L, Zhou H M, Wang C H, Yang H, Hu H Q, Yao M Y. *J. Anal. Chem.* (陈添兵, 刘木华, 黄林, 周华茂, 王彩虹, 杨晖, 胡慧琴, 姚明印. 分析化学), **2016**, 44(7): 1029-1034.
- [5] Pořízka P, Jakub K, Képeš E, David P, David W H. *Spectrochim. Acta B*, **2018**, 148: 65-82.
- [6] Hu L, Ma S, Yin C. *Spectrochim. Acta A*, **2018**, 193: 87-94.
- [7] Su D L, Zhang J H, Li G Y, Zhu X R, Liu W, Xie Q T, Shan Y. *J. Chin. Inst. Food Sci. Technol.* (苏东林, 张菊华, 李高阳, 朱向荣, 刘伟, 谢秋涛, 单杨. 中国食品学报), **2018**, 18(7): 332-338.
- [8] Yang R J, Yang Y R, Liu H X, Dong G M, Du Y H, Shan H Y, Zhang W Y. *Spectrosc. Spectral Anal.* (杨仁杰, 杨延荣, 刘海学, 董桂梅, 杜艳红, 单慧勇, 张伟玉. 光谱学与光谱分析), **2015**, 35(8): 2124-2129.
- [9] Wang Z H. *Two-dimensional Femtosecond Laser Electronic Spectra of a Dimer System*. Harbin: Harbin Institute of Technology(王赞浩. 二聚体体系的飞秒激光二维电子光谱. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学), **2011**.
- [10] Jiang X, Li S, Xiang G, Li Q H, Fan L, He L J, Gu K R. *Food Chem.*, **2016**, 212: 585-589.
- [11] Shang J, Wu X R, Hu K Q, Huan Z Y, Li Q, Yu X Z. *Anal. Methods*, **2018**, 10(29): 3675-3679.
- [12] Zhang X, Tang Y Y, Wang X Z, Wu Q, Sun Q X, Wang Z W, Liu T, Wang C T. *Shandong Agric. Sci.* (张欣, 唐月异, 王秀贞, 吴琪, 孙全喜, 王志伟, 刘婷, 王传堂. 山东农业科学), **2018**, 50(6): 167-170.

- [13] Mo X X, Sun T, Liu M H, Ye Z N. *Chin. J. Anal. Chem.* (莫欣欣, 孙通, 刘木华, 叶振南. 分析化学), **2017**, 45(11): 1694 – 1702.
- [14] Zhu Y T, Li J C, Gao S J, Luo Z J, Huang Y Q, He M X, Zheng Y Y. *China Oils Fats*(朱雨田, 李锦才, 高素君, 罗兆基, 黄勇旗, 何美霞, 郑燕燕. 中国油脂), **2017**, 42(9): 133 – 135.
- [15] Pan M, Sun S Q, Zhou Q, Chen J B. *J. Food Sci.*, **2018**, 83(6): 1605 – 1612.
- [16] Basri K N, Hussain M N, Bakar J, Sharif Z, Khir M F A, Zoofakar A S. *Spectrochim. Acta A*, **2016**, 173: 335 – 342.
- [17] Kou Y X, Li Q, Liu X L, Zhang R, Yu X Z. *J. Oleo Sci.*, **2018**, 67(9): 1083 – 1089.
- [18] Yang R J, Dong G M, Sun X S, Yang Y R, Liu H X, Du Y H, Jin H, Zhang W Y. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, **2017**, 119(9): 1 – 7.
- [19] Gao J M, Zhang Z M, Li G K. *J. Instrum. Anal.* (高嘉敏, 张卓旻, 李攻科. 分析测试学报), **2016**, 35(12): 1647 – 1653.
- [20] Liu Y D, Liu T, Sun X D, Ouyang A G, Hao Y. *Spectrosc. Spectral Anal.* (刘燕德, 刘涛, 孙旭东, 欧阳爱国, 郝勇. 光谱学与光谱分析), **2010**, 30(11): 3007 – 3012.
- [21] Deng P J, Liang Y, Yang D Y, Li H, Yang Y C, Geng Y J. *J. Chin. Cereals Oils Assoc.* (邓平建, 梁裕, 杨冬燕, 李浩, 杨永存, 耿艺介. 中国粮油学报), **2016**, 31(4): 72 – 75.
- [22] Li Z S, Yao Z X, Su H, Lü J X, Sun Z Q, Yan Y F. *Food Sci. Technol.* (李张升, 姚志湘, 粟晖, 吕金星, 孙增强, 闫一夫. 食品科技), **2015**, 40(10): 275 – 278.
- [23] Li Y P, Fang T, Zhu S Q, Huang F R, Chen Z Q, Wang Y. *Spectrochim. Acta A*, **2018**, 189: 37 – 43.
- [24] De Géa Neves M, Poppi R J. *Food Anal. Methods*, **2018**, 11(7): 1897 – 1905.
- [25] Gulgun Y T, Ayvaz H. *J. Food. Meas. Charact.*, **2017**, 11(2): 523 – 529.
- [26] Dong H S, Zang P, Li Y P, Chen B. *J. Optoelectron. · Laser*(董海胜, 臧鹏, 李云鹏, 陈斌. 光电子·激光), **2013**, 24(7): 1370 – 1374.
- [27] Lin X Y, Zhu S, Li Y. *J. Food Sci. Biotechnol.* (林新月, 朱松, 李玥. 食品与生物技术学报), **2017**, 36(6): 610 – 616.
- [28] Zhou X J. *Qualitative Identification and Quantitative Analysis of Edible Vegetable Oil Based on Raman Spectroscopy*. Hangzhou: Zhejiang University(周秀军. 基于拉曼光谱的食用植物油定性鉴别与定量分析. 杭州: 浙江大学), **2013**.
- [29] Silvia P, Chiara A, Claudia Z, Daniela F, Franco F, Chiara B, Enrico B. *Food Control*, **2019**, 96: 137 – 145.
- [30] Jin T T. *Detection Method and Research for the Quality Indexs of Edible Vegetable Oil Based on Raman Spectroscopy*. Nanchang: East China Jiaotong University(靳昙昙. 食用植物油质量指标拉曼光谱快速检测方法研究. 南昌: 华东交通大学), **2016**.
- [31] Dong J J, Wu J Z, Chen Y, Liu C L. *Imaging Sci. Photochem.* (董晶晶, 吴静珠, 陈岩, 刘翠玲. 影像科学与光化学), **2017**, 35(2): 147 – 152.
- [32] Chen D, Xu Y T, Li Q F, Yu L, Jin Y, Xu K X. *Nanotechnol. Precision Eng.* (陈达, 许云涛, 李奇峰, 于苓, 金涌, 徐可欣. 纳米技术与精密工程), **2016**, 14(1): 60 – 65.
- [33] Xu J, Wang Y T, Wu X J, Zhao X. *Chin. J. Lumin.* (徐婧, 王玉田, 吴希军, 赵旭. 发光学报), **2017**, 38(9): 1240 – 1248.
- [34] Wang H, Song F, Cao F Y, Shen X J, Zhang Y F, Zhao S L. *Food Ind.* (王挥, 宋菲, 曹飞宇, 沈晓君, 张玉锋, 赵松林. 食品工业), **2017**, 38(5): 293 – 296.
- [35] Wu X J, Tian R L, Sun M F, Pan Z. *Spectrosc. Spectral Anal.* (吴希军, 田瑞玲, 孙梦菲, 潘钊. 光谱学与光谱分析), **2016**, 36(7): 2155 – 2161.
- [36] Li S F, Guo Y B, Sun Y H, Gu H Y. *Spectrosc. Spectral Anal.* (李双芳, 郭玉宝, 孙艳辉, 顾海洋. 光谱学与光谱分析), **2018**, 38(4): 1165 – 1170.
- [37] Gu H Y, Sun Y H, Liu S L, Li S F, Zhang W W. *Food Anal. Methods*, **2018**, 11(12): 3464 – 3470.
- [38] Mishra P, Lleó L, Cuadrado T, Ruiz – Altisent M, Hernández – Sánchez N. *Eur. Food Res. Technol.*, **2018**, 244: 565 – 575.
- [39] Yu L Y, Chen B, Tian P, Ran G M, Sun R M. *J. Pharm. Res.* (于丽燕, 陈斌, 田萍, 冉桂梅, 孙荣梅. 药学研究), **2015**, 34(10): 564 – 567.
- [40] Zhao J, Yang Z Y, Yan Z L, Xiang S P. *J. Tianjin Univ. Sci. Technol.* (赵娟, 杨志岩, 闫仲丽, 降升平. 天津科技大学学报), **2012**, 27(2): 39 – 43.
- [41] Long L L, Xue Y L, Zhang R, Zhu L, Zhang D. *Farm Mach.* (龙伶俐, 薛雅琳, 张蕊, 朱琳, 张东. 农业机械), **2012**, 24: 61 – 63.
- [42] Tian Y L, Wang M, Wang C, Zhao Y. *J. Chin. Cereals Oils Assoc.* (田益玲, 王梅, 王聪, 赵艳. 中国粮油学报), **2017**, 32(4): 122 – 126.
- [43] Wang N, Gao Y, Yu X Z, Xu L R. *Food. Sci.* (王宁, 高媛, 于修焯, 徐立荣. 食品科学), **2014**, 35(24): 282 – 285.
- [44] Zheng Y Y, Wu X H, Hou Z Z. *China Oils Fats*(郑艳艳, 吴雪辉, 侯真真. 中国油脂), **2014**, 39(1): 46 – 49.
- [45] Garrido – Delgado R, Munoz – Perez M E, Arce L. *Food Control*, **2017**, 85: 292 – 299.

- [46] Tu B. *Research on Rapid Detection Method of Edible Oil Quality and Variety Based on Data Fusion of Near-infrared and Raman Spectroscopy*. Wuhan: Wuhan Polytechnic University(涂斌. 基于近红外-拉曼光谱融合的食用油品质和品种快速检测方法研究. 武汉: 武汉轻工大学), **2016**.
- [47] Wójcicki K, Khmelinskii I, Sikorski M, Sikorska E. *Food Chem.*, **2015**, 187: 416-423.
- [48] Valentina G, Roberto B, Roberto R, Antonia T, Riccardo G, Alessandro L. *Biosyst. Eng.*, **2018**, 172: 102-109.
- [49] Alves F C G B S, Coqueiro A, Março P H, Valderrama P. *Food Chem.*, **2018**, 273: 124-129.
- [50] Ravaglia L M, Pizzotti A B C, Alcantara G B. *J. Food Sci. Technol.*, **2019**, 56(1): 507-511.
- [51] Zhou N, Liu B L, Wang X, Wang H Z, Yang P Q, Zhou H. *Food Ferment. Ind.* (周凝, 刘宝林, 王欣, 汪宏志, 杨培强, 周航. 食品与发酵工业), **2011**, 37(3): 177-181.
- [52] Cui Y. *Research on Modeling Method for Detecting Content of Trans Fatty Acids in Soybean Oil Based on Terahertz Spectroscopy*. Harbin: Harbin University of Commerce(崔月. 基于 THz 光谱检测大豆油中反式脂肪酸含量建模方法研究. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学), **2017**.
- [53] Liu L, Yang X L. *Anhui Chem. Ind.* (刘里, 杨晓丽. 安徽化工), **2016**, 42(1): 86-87.
- [54] Guo L, Xie M Y, Yan A P, Li B Y. *Chin. J. Anal. Lab.* (郭岚, 谢明勇, 鄢爱平, 李包友. 分析试验室), **2007**, 26(4): 58-61.
- [55] Galuch M, Piccioli A, Sobieski N E, Fier N, Saldan N, Garcia E. *J. Brazil. Chem. Soc.*, **2018**, 29(4): 748-756.
- [56] Wu S, Wang J, Yu Y R, Tu B, Zheng X, He D P. *J. Chin. Cereals Oils Assoc.* (吴双, 王杰, 俞雅茹, 涂斌, 郑晓, 何东平. 中国粮油学报), **2017**, 32(11): 166-172.
- [57] Zhang X. *Studies on Discrimination of Honey Adulteration by Near Infrared and Raman Spectroscopy*. Changsha: Central South University(张欣. 近红外和拉曼光谱法测定蜂蜜掺假研究. 长沙: 中南大学), **2011**.
- [58] Liu Y D, Jin T T, Wang H Y. *Opt. Precision Eng.* (刘燕德, 靳昙昙, 王海阳. 光学精密工程), **2015**, 23(9): 2490-2496.
- [59] Zhang Y J, He B D, Fu X H, Xu J R, Zhou K P. *Spectrosc. Spectral Anal.* (张燕君, 何宝丹, 付兴虎, 徐金睿, 周昆鹏. 光谱学与光谱分析), **2017**, 37(8): 2440-2445.

(责任编辑: 盛文彦)