

基于光电磁及感官信号的食用植物油 真实性快速鉴别方法研究进展

原 喆^{1,2}, 窦心敬^{1,3}, 张良晓^{1,3,5*}, 喻 理^{1,5}, 张 奇^{1,4}, 李培武^{1,3,4,5*}

- (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. 农业部油料作物风险评估重点实验室, 武汉 430062; 4. 农业部生物毒素检测重点实验室, 武汉 430062;
5. 农业部油料及制品质量监督检验测试中心, 武汉 430062)

摘 要: 食用植物油营养丰富, 是食品和饲料工业的重要基础原料, 但掺伪现象普遍存在。因此食用植物油真实性鉴别方法不仅保护了消费者安全, 同时也为维护食用油市场提供了有效的技术支撑。现有食用植物油真实性鉴别技术分为4类: 基于理化法的方法、基于特征成分的方法、基于光电磁及感官信号的快速鉴别方法、基于代谢组学的方法。基于光电磁及感官信号的食用植物油真实性的快速鉴别方法非常适合于现场初筛, 本文概述了这类方法的国内外研究进展, 并对其研究发展趋势进行了展望。

关键词: 光电磁; 感官信号; 食用植物油; 真实性; 快速检测

Advances on rapid authentication of edible vegetable oil based on the optics, electricity, magnetic or sensory signals

YUAN Zhe^{1,2}, DOU Xin-Jing^{1,4}, ZHANG Liang-Xiao^{1,4,5}, YU Li^{1,5}, ZHANG Qi^{1,3}, LI Pei-Wu^{1,3,4,5}

- (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. *Key laboratory of Detection for Mycotoxins, Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China*; 4. *Laboratory of Risk Assessment for Oilseeds Products (Wuhan), Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China*; 5. *Quality Inspection and Test Center for Oilseeds Products, Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China*)

ABSTRACT: Edible vegetable oil is nutritious and is an important basis for food and feed industry. But the phenomenon of adulteration is widespread. Therefore, authenticity identification method for edible vegetable oils not only meets market demands, but also provides effective technical support for the oil market. Existing edible vegetable oil authenticity identification technology include the methods based on the physical and chemical method, based on characteristic components, based on the optics, electricity, magnetic or sensory signals and sensory signals and based on metabonomics. The rapid identification method based on the optics, electricity, magnetic or sensory signals for the

基金项目: 国家农产品质量安全风险评估重大项目(GJFP2017001, GJFP2017015-02)、农业部、财政部专项课题(CARS-12-10B)

Fund: Supported by the National Key Project for Agro-product Quality & Safety Risk Assessment, PRC (GJFP2017001, GJFP201701502) and the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (CARS-12-10B)

***通讯作者:** 张良晓, 博士, 副研究员, 主要研究方向为粮油产品真实性鉴别、农产品质量安全与风险评估。E-mail: zhanglx@caas.cn

李培武, 博士, 研究员, 主要研究方向为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, Associate Professor, Oil Crops Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.2 Xudong 2nd Road, Wuhan 430062, China. E-mail: liangxiao_zhang@hotmail.com

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

authenticity of edible vegetable oil is very suitable for the scene in the early screening, so this paper summarized the domestic and overseas advance of this method, and prospected its research development trend.

KEY WORDS: optics, electricity, magnetic; sensory signals; edible vegetable oils; authentication; rapid detection

1 引言

食用油脂既是人们膳食结构中不可或缺的组成之一, 它对人体提供能量和必需脂肪酸等营养成分和维生素、多酚等功能成分, 同时也是食品和饲料工业的重要原料, 所以其品质和安全性也受到了大众的广泛关注。但是, 近年来受到利益驱使的食用植物油掺伪现象普遍存在, 常见的掺伪手段有: (1) 在高价食用植物油中掺入低价油, 如在橄榄油、花生油、油茶籽油等高价油中掺入大豆油、菜籽油等低价油^[1]; (2) 在食用油中掺入非食用油脂, 如矿物油、泔水油、煎炸老油甚至地沟油等^[2]; (3) 将低级别油掺入高级别的食用植物油, 这类掺伪手段常见于橄榄油的掺伪, 如将果渣油掺入特级初榨橄榄油。这些掺伪现象严重影响了食用植物油的市场, 对人们的身体健康也造成了威胁, 所以建立有效的食用植物油真实性鉴别方法十分重要。

现有食用植物油真实性鉴别技术分为4类: (1) 基于理化法的方法, 如酸法、热重法等^[3], 这类方法成本低, 但分辨率低, 不具备区分不同食用油的能力; (2) 基于特征成分的方法, 如利用食用油中的特征基因标记物、芝麻油中芝麻素等^[4]; (3) 基于光电磁及感官信号快速检测技术, 如近红外光谱法^[5-9]、拉曼光谱法^[10-15]等, 这类方法快速简便且绝大多数无损, 不过需要大量样本进行建模; (4) 基于代谢组学的食用油真实性鉴别方法, 即通过脂肪酸、甾醇、甘油酯等^[16,17]共有成分建立的保真技术。在这4类方法中, 最能够满足当今中国分散模式下市场经济需求的快速检测、现场筛查方法应该是基于光电磁及感官信号的食用植物油真实性鉴别方法。因此本文对基于光电磁及感官信号各类方法的研究进展进行了综述。

2 基于光电磁及感官信号的食用植物油真实性快速鉴别方法

常用的基于光电磁及感官信号的食用油真实性快速鉴别方法有红外光谱法、拉曼光谱法、紫外光谱技术、荧光光谱技术、核磁共振技术、X射线检测技术、高光谱图像检测技术、太赫兹技术、感官信号、离子迁移谱技术等。各种技术的特点见表1。

2.1 红外光谱法

红外光谱是一种快速无损的食品检测技术, 根据其波谱范围可分为近红外区、中红外区以及远红外区, 其中近红外光谱技术和中红外光谱技术广泛的应用于农产品、

表1 基于光电磁及感官信号的食用植物油真实性快速鉴别方法比较

Table 1 Comparison of different rapid authenticity identification methods based on the optics, electricity, magnetic or sensory signals in edible vegetable oil

方法名称	方法特点	文献
红外光谱法	方法简单, 快速且无损, 成本低, 样品用量少; 但受样品来源、环境条件等因素影响, 不适合做痕量分析	[7-9]
拉曼光谱法	操作简单, 分析时间短, 无损且用量少; 但其光谱及信号强度容易受到荧光背景的干扰	[11-15]
紫外光谱技术	非破坏性, 快速, 检测成本低; 但光谱反映信息有限	[18-20]
荧光光谱技术	灵敏度较高, 选择性好, 无污染, 无损; 但因产生荧光的物质较少而使其应用受限	[21-24]
核磁共振技术	精度高, 重现性好, 用时短; 但仪器造价相对较高, 数据处理相对复杂	[26-28]
X射线检测技术	方法简便, 快速且无损, 在不同种类食用油的分类上应用较多	[29,31]
高光谱图像检测技术	光谱响应范围较广, 信息丰富且数据量较大, 但数据处理复杂, 耗时较长	[33-35]
太赫兹技术	无损, 具有穿透性强、灵敏度较高的特点, 目前报道不多, 研究前景较强	[37-39]
感官信号	操作简单、快速, 重复性好; 但稳定性和精确度有待提高	[40-42]
离子迁移谱技术	快速, 简便; 但需耗试剂且有损	[43,44]

食品的质量定性定量检测中。一般近红外光谱是由分子的倍频、合频产生的, 可以反映有机分子中含H基团的特征信息。而中红外光谱是属于分子基频振动光谱, 从中可以得到分子的化学键和官能团的信息。这类技术因其操作简便, 分析时间快且对样品无损受到了人们的青睐。植物油的主要成分是甘油三酯, 而-CH₂-和-C=C-的数量反映出不同植物油中脂肪酸的种类及含量, 这种不同植物油间的差异在谱图中会有所体现。结合化学计量学分析, 红外光谱技术已广泛应用于植物油的分类研究当中。国际上结合化学计量学方法用近红外光谱技术对于橄榄油的溯源和保真进行了大量的研究, 取得理想的结果^[5]。同时, 傅里叶变换中红外光谱亦被用于食用植物油的掺伪问题^[6]。在国内基于近红外光谱技术油脂的品质和分类分析的研究也有很多, 冯利辉^[7]采用不同的模型能够识别不同种类的食用植

物油, 同时也能够对二元掺伪体系进行定量分析。崔路^[8]利用近红外二维相关技术以橄榄油等主要食用植物油为研究对象, 提高了谱图分辨率, 增加了谱图信息, 能够更快速直观的对食用植物油的品质和种类进行判别分析。

红外光谱技术具有分析时间短, 样品用量少且无损, 能够实现在线检测等诸多优势, 但是由于其反映的是多组分信息, 光谱背景复杂、谱峰重叠等原因, 光谱容易受样品来源、环境条件等因素影响, 所以很难给出确证性的结论, 并不适合做痕量掺伪的分析^[9]。

2.2 拉曼光谱法

拉曼光谱是一种散射光谱, 具有测试时间短、操作简单、灵敏度高优点, 常被用作物质成分及结构分析的检测手段^[10]。与红外光谱技术相比, 它还能够反映出物质大分子的结构细微变化。在油脂检测方面, 由于不同种类的食用植物油的拉曼光谱富含充足的结构信息, 结合化学计量学方法可以进行食用植物油的真伪鉴别和溯源分析。Carmona 等^[11]能够利用拉曼光谱分别鉴别出掺有 5%玉米油和 5%葵花籽油的胡桃油。邓平建等^[12]利用拉曼显微光谱仪建立的多步聚类分析模型有效鉴定了芝麻油及各种类型掺伪的芝麻油, 可实现芝麻油快速无损的鉴别。张朝晖等^[13]采用便携式激光拉曼光谱仪建立了橄榄油的快速鉴定方法, 成功鉴别出掺有果渣油的橄榄油, 结果表明拉曼光谱可以作为橄榄油初步在线筛查的工具。

拉曼光谱技术快速、简便、无损的优点在保证食用植物油真实性上具有自身的优势, 但是其光谱及信号强度容易受到荧光背景的干扰, 其热效应也容易影响谱图的准确性。不过近些年拉曼成像技术在不断地发展和改进^[14], 同时国内外近些年也集中于便携式拉曼光谱仪的研究, 这也为食用植物油的快速检测及现场筛查技术提供了有效的技术支持^[15]。

2.3 紫外光谱技术

目前, 除红外、拉曼光谱外, 紫外光谱也常被用于食用油真实性鉴别研究中。不同种类的食用植物油因其紫外光谱特征吸收峰不同, 通过吸收光谱的差异性可以实现保真技术。Torrecilla 等^[18]建立了基于紫外可见光谱的橄榄油保真技术, 成功区分特级初榨橄榄油和掺有精炼橄榄油或者果渣油的假油, 当掺伪量低于 10%时, 均方误差小于 1%。Zhang 等^[19]利用紫外可见光谱探究加热对玉米油、大豆油、芝麻油等 6 种食用植物油品质的影响, 发现这几种食用油加热后紫外特征吸收峰都会出现在 370 nm, 同时结合化学计量学方法建立的不同种类的食用油的酸价模型可以成功鉴别出这些不同种类的食用油是否被加热。郑艳艳等^[20]利用油茶籽油和其他油的紫外光谱差异性, 通过判别分析和回归分析实现了掺伪油茶籽油的定性、定量检测。

2.4 荧光光谱技术

由于不同种类的食用植物油其中含有的荧光特征成分也不同, 所以可以利用荧光光谱根据荧光特征成分的差异来实现食用油真实性检测。Mabood 等^[21]探究热处理对于同步荧光光谱检测特级初榨橄榄油的影响, 得到室温(25 °C)和热处理(75 °C, 8 h)后的油样的差值光谱, 结合偏最小二乘法-判别分析建立的模型可以鉴别掺伪 2%精炼橄榄油的特级初榨橄榄油, 同时建立的偏最小二乘回归模型也可以用于定量分析。Xu 等^[22]利用三维荧光光谱技术成功鉴别区分食用调和油中的核桃油、大豆油、葵花籽油, 这种方法可以应用于检测市场上出售的食用调和油, 为管理调控食用调和油市场提供了技术支撑。彭翠红等^[23]比较分析了不同厂家同品种、不同品种、不同批次的市售花生油、芝麻油及调和油的荧光光谱差异特征, 结合系统聚类分析能够成功的区分 3 类食用植物油。李昊等^[24]提出一种利用荧光光谱技术快速鉴别食用植物油中是否含有地沟油, 能够成功检测到掺有 5%地沟油的花生油。因此我们可以看出荧光光谱技术也是一种快速、无需前处理、无损、灵敏度高的检测方法, 同时也能够成功的应用于食用植物油真实性鉴别中。

2.5 核磁共振技术

核磁共振与红外光谱、紫外光谱和质谱一起被称为“四大名谱”^[25]。它是一种基于原子核磁性的波谱技术, 适用于分析“高通量”光谱和结构信息, 能够应用于食用油真实性鉴别, 且现今核磁共振的灵敏度十分高, 完全能够满足检测需求, 但是一般核磁共振的检测仪器成本及维护费用很高限制了其应用范围。Merchak 等^[26]利用基于二维核磁共振技术的同位素分析, 同时结合三酰甘油酯矩阵分析其地理、植物溯源来区分不同种类的食用植物油。Sánchez-Rodríguez等^[27]通过核磁共振光谱数据提高了预测安达卢西亚不同原产地保护的特级初榨橄榄油中脂肪酸含量的准确度。邵小龙等^[28]结合主成分分析方法、偏最小二乘法用低场核磁成功区分出掺有体积分数为 5%大豆油的芝麻油, 掺有冷榨或热榨芝麻油的精炼芝麻油检出体积分数为 10%, 为芝麻油快速鉴定提供了参考, 也证明低场核磁技术是一种快速、可作为现场初筛的检测方法。

2.6 X 射线检测技术

X 射线是一种波长短、能量高的电磁波, 而 X 射线检测技术是一种借助 X 射线识别原子种类的方法。通过捕获 X 射线的穿透特性, 可以得到样品的透射图像和断层图像, 进而探明物质的内部结构; 通过捕获 X 射线与样品作用产生的荧光和衍射效应, 可以检测到样品所含多种元素的情况^[29]。Bortoleto 等^[30]采用 X 射线散射法结合主成分分析, 实现了玉米油、菜籽油、大豆油、葵花籽油的快速分类鉴

别,同时也可以区分特级初榨橄榄油和其他橄榄油。Li等^[31]采用能量色散X射线荧光光谱仪成功区分大豆油、芝麻油、玉米油等多种食用植物油,该方法简便快速且无损,也说明了X射线检测技术适用于食用植物油真实性快速鉴别。

2.7 高光谱图像检测技术

作为一项新兴的检测方法,高光谱图像技术(hyper-spectral image)将光学、电子信息处理学、计算机科学等领域的先进技术相结合,并有机地把传统的光谱技术和二维成像技术应用在一起^[32]。高光谱成像是在光谱维度上进行了细致的分割,它可以获得图像上每个点的光谱信息,同时也可以得到不同谱段的图像信息。在食用植物油的品质评价上,Martínez等^[33]利用高光谱信息实现了橄榄油的游离酸度、过氧化值及水分的在线评估,建立了多元线性回归模型,其中水分的预测误差为0.0006%。同时Xie等^[34]通过近红外-高光谱成像技术(near infrared hyperspectral imaging, NIR-HIS)建立的判定模型,能够快速、无损的鉴别不同种类的芝麻油。郭毅等^[35]研究了高光谱DN值和聚类分析法相结合鉴别食用油和地沟油的可行性。研究结果表明,建立的聚类分析模型能够精确区分样本中的各类地沟油和食用油。

2.8 太赫兹技术

太赫兹时域光谱(terahertz time domain spectroscopy, THz-TDS)是一种频率介于微波和红外之间的光谱,从能量上来看介于光子和电子之间,现今太赫兹技术广泛应用在许多不同领域^[36]。近些年来,该技术已开始应用于油脂的性质和结构分析中。Tobolova等^[37]将太赫兹时域光谱技术结合聚类分析成功应用于区分精炼、初榨、特级初榨这3种食用油。而太赫兹技术在地沟油的鉴别上也有比较突出的进展,Zhan等^[38]利用太赫兹时域光谱结合化学计量学方法发现地沟油和食用油的差异,成功实现了食用植物油真实性的鉴别。詹洪磊等^[39]采集不同频域的吸收谱进行聚类分析,结合概率神经网络成功实现地沟油和食用油的区分。以上研究结果表明,太赫兹时域光谱技术结合统计方法可广泛应用成为食用植物油真实性鉴别的快速有效手段。

2.9 感官信号

近些年发展迅速的基于感官信号的检测仪器设备,具有快速、无损、针对性强的巨大优势。电子鼻、电子舌作为新兴检测手段,根据样品在传感器上信号的不同实现食用植物油的检测,在食用油溯源和品质分析上有广泛的应用前景。目前国内外的相关研究中,Veloso等^[40]通过电子舌结合化学计量学工具建立的模型能够较好的鉴定特级初榨橄榄油。Shao等^[41]利用电子鼻和统计学方法将冷榨、

热榨、精炼3种不同的芝麻油区分开,也完全鉴别出掺有精炼大豆油的压榨芝麻油。李靖等^[42]利用PEN3型电子鼻系统探究了大豆煎炸油品质的变化,采用判别分析和主成分分析实现了电子鼻系统快速检测煎炸油新鲜程度和品质变化。由此看出,电子鼻和电子舌是一类快速、简便、重复性好的方法,适用于现场筛查及快速检测。

2.10 离子迁移谱技术

离子迁移谱技术是一种痕量有机化合物检测手段,主要应用于挥发物的分析。离子迁移谱作为一种简单快速的检测手段,可用于气体、液体的分析检测,在食用植物油真实性鉴别上也有较好的应用。Garrido-Delgado等^[43]在橄榄油级别分类这一块,运用2种离子迁移谱辨别3种不同的橄榄油,即橄榄油、特级初榨橄榄油、油渣橄榄油,且识别率很高。Zhang等^[44]利用离子迁移谱指纹图谱建立一种快速有效的芝麻油真实性鉴别方法,基于支持向量机的判别模型可以成功鉴别最低掺伪量为10%的芝麻油,准确率为94.2%。随着离子迁移谱的进步和发展,和其他技术联用的方法在很多领域都得到了应用,有很好的发展前景。

3 展望

食用植物油在真实性鉴别方面,基于光电磁及感官信号的快速检测方法具有操作简便,快速,且绝大多数无损的巨大优势,为食用油市场的现场初筛和快速检测提供了科学的技术支撑。但是随着食用植物油掺伪技术的复杂化,对于其真实性鉴别方法的要求也越来越高。而这类方法一般基于全谱分析,因全谱并不具备明确、具体的化学意义,需要采集大量的纯的和可能掺伪的样本信号,结合化学计量学方法提取有效的信息进行建模。由于多元掺伪的可能性非常多,配制各种潜在可能的掺伪样品需要高成本,花费大量时间,因此现有方法基本上用于解决一元或二元掺伪。快速检测技术结合先进的化学计量学方法实现多元掺伪和未知掺伪鉴别将是未来的发展方向。随着技术的发展与研究,食用植物油真实性鉴别技术将会更为快速、准确,满足广大群众和市场需求。

参考文献

- [1] 高蓓,章晴,杨悠悠,等.食用植物油鉴别进展研究[J].食品安全质量检测学报,2015,6(7):2789-2794.
- [2] Gao B, Zhang Q, Yang YY, et al. Research progress on the identification of edible vegetable oil adulteration [J]. J Food Saf Qual, 2015, 6(7): 2789-2794.
- [3] 刘焱,谭贵良,董军,等.食用油脂鉴别技术研究进展[J].粮食与油脂,2015,28(4):5-7.
- [4] Liu Y, Tan GL, Dong J, et al. Research progress on authenticity assessment technology of the edible oils and fats [J]. J Cere Oils, 2015,

- 28(4): 5-7.
- [3] 魏晓敏. 食用油中掺入非食用油的检验方法[J]. 黑龙江科学, 2016, 7: 134-135.
- Wei XM. Test methods of the incorporation of non-edible oil into edible oil [J]. Heilongjiang Sci, 2016, 7: 134-135.
- [4] Wu R, Ma F, Zhang LX, *et al.* Simultaneous determination of phenolic compounds in sesame oil using LC-MS/MS combined with magnetic carboxylated multi-walled carbon nanotubes [J]. Food Chem, 2016, 204: 334-342.
- [5] Laroussi-Mezghani S, Vanloot P, Molinet J, *et al.* Authentication of Tunisian virgin olive oils by chemometric analysis of fatty acid compositions and NIR spectra. Comparison with Maghrebian and French virgin olive oils [J]. Food Chem, 2015, 173: 122-132.
- [6] Hirri A, Bassbasi M, Platikanov S, *et al.* FTIR spectroscopy and PLS-DA classification and prediction of four commercial grade virgin olive oils from Morocco [J]. Food Anal Methods, 2016, 9(4): 1936-1975.
- [7] 冯利辉. 食用植物油掺伪检测与定量分析的近红外光谱法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- Feng LH. Detection of adulteration and quantitative analysis of edible vegetable oil by near infrared spectroscopy [D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.
- [8] 崔路. 近红外二维相关技术在食用植物油品质分析中的应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- Cui L. Application study of near-infrared two-dimensional correlation technology in quality analysis of edible vegetable oil [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [9] 王小燕, 王锡昌, 刘源, 等. 近红外光谱技术在食品掺伪检测应用中的研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(1): 265-269.
- Wang XY, Wang XC, Liu Y, *et al.* Application of near-infrared spectroscopy in food adulteration detection: A review [J]. Food Sci, 2011, 32(1): 265-269.
- [10] 刘宸, 黄文倩, 王庆艳, 等. 拉曼光谱在食品无损检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(8): 2981-2987.
- Liu C, Huang WQ, Wang QY, *et al.* Application of Raman spectroscopy technique in food non-destructive determination [J]. J Food Saf Qual, 2015, 6(8): 2981-2987.
- [11] Carmona MA, Lafont F, Sanchidriana CJ, *et al.* Characterization of macadamia and pecan oils and detection of mixtures with other edible seed oils by Raman spectroscopy [J]. Grasas Aceites, 2015, 66(3): e094.
- [12] 邓平建, 梁裕, 杨冬燕, 等. 拉曼光谱-聚类分析快速鉴别掺伪芝麻油[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(12): 4991-4999.
- Deng PJ, Liang Y, Yang DY, *et al.* Rapid detection of adulterated sesame oil by Raman spectrum-cluster analysis [J]. J Food Saf Qual, 2015, 6(12): 4991-4999.
- [13] 张朝晖, 严华, 顾强, 等. 便携式激光拉曼光谱法快速鉴别橄榄油掺假[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(1): 4324-4329.
- Zhang ZH, Yan H, Gu Q, *et al.* Rapid detection of adulterated olive oil by portable laser Raman spectroscopy [J]. J Food Saf Qual, 2015, 6(1): 4324-4329.
- [14] 陈健, 肖凯军, 林福兰. 拉曼光谱在食品分析中的应用[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 554-558.
- Chen J, Xiao KJ, Lin FL. Review on Raman spectroscopy application in food analysis [J]. Food Sci, 2007, 28(12): 554-558.
- [15] 刘燕德, 谢庆华. 拉曼光谱技术在粮油品质检测中的应用[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(8): 76-79.
- Liu YD, Xie QH. Analysis of the oil-water mixture frying machine on thermal conductivity with Raman spectra [J]. J Chin Agric Mech, 2016, 37(8): 76-79.
- [16] Zhang LX, Li PW, Sun XM, *et al.* One-class classification based authentication of peanut oils by fatty acid profiles [J]. Rsc Adv, 2015, 5: 85046-85051.
- [17] Hu W, Zhang LX, Li PW, *et al.* Characterization of volatile components in four vegetable oils by headspace two-dimensional comprehensive chromatography time-of-flight mass spectrometry [J]. Talanta, 2014, 129: 629-635.
- [18] Torrecilla JS, Rojo E, Domínguez JC, *et al.* A novel method to quantify the adulteration of extra virgin olive oil with low-grade olive oils by UV-Vis [J]. J Agric Food Chem, 2010, 58: 1679-1684.
- [19] Zhang WL, Li N, Feng YY, *et al.* A unique quantitative method of acid value of edible oils and studying the impact of heating on edible oils by UV-Vis spectrometry [J]. Food Chem, 2015, 185: 326-332.
- [20] 郑艳艳, 吴雪辉, 侯真真. 紫外光谱法对油茶籽油掺伪的检测[J]. 中国油脂, 2014, 39(1): 46-49.
- Zheng YY, Wu XH, Hou ZZ. Detection of adulterated oil - tea camellia seed oil by UV spectroscopy [J]. China Oils Fats, 2014, 39(1): 46-49.
- [21] Mabood F, Boqué R, Folcarelli R, *et al.* The effect of thermal treatment on the enhancement of detection of adulteration in extra virgin olive oils by synchronous fluorescence spectroscopy and chemometric analysis [J]. Spectrochim Acta A, 2016, 161:83-87.
- [22] Xu J, Liu XF, Wang XT. A detection method of vegetable oils in edible blended oil based on three-dimensional fluorescence spectroscopy technique [J]. Food Chem, 2016, 212: 72-77.
- [23] 彭翠红, 王少玲, 徐永群, 等. 荧光光谱法快速鉴别花生油、芝麻油和调和油[J]. 光谱实验室, 2012, 29(2): 750-756.
- Peng CH, Wang SL, Xu YQ, *et al.* Rapid identification of edible oil, sesame oil and blend oil by fluorescence spectrometry [J]. Chin J Spec Lab, 2012, 29(2): 750-756.
- [24] 李昊, 陈明惠. 荧光光谱分析法在地沟油鉴别中的应用研究[J]. 激光生物学报, 2014, 23(5): 472-476.
- Li H, Chen MH. Application of Fluorescence spectrum analysis in identification of waste oil [J]. Acta Laser Biol Sin, 2014, 23(5): 472-476.
- [25] 陈颖. 食用油真伪鉴别方法研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2014, 32(6): 1-8.
- Chen Y. Progress of edible oil authentication [J]. J Food Sci Tech, 2014, 32(6): 1-8.
- [26] MerchakN, Silvestre V, Rouger L, *et al.* Precise and rapid isotopic analysis by ^1H - ^{13}C 2D NMR: Application to triacylglycerol matrices [J]. Talanta, 2016, (156-157): 239-244.
- [27] Sánchez-Rodríguez MI, Sánchez-López EM, Marinas A, *et al.* Improving the estimations of fatty acids in several andalusian PDO olive oils from NMR spectral data [J]. J Appl Stat, 2016, 43(10): 1765-1793.
- [28] 邵小龙, 张蓝月, 冯所兰. 低场核磁技术检测芝麻油掺假[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 110-113.
- Shao XL, Zhang LY, Feng SL. Application of LF-NMR for detection of sesame oil adulteration [J]. Food Sci, 2014, 35(20): 110-113.
- [29] 潘立刚, 张缙, 陆安祥, 等. 农产品质量无损检测技术研究进展与应用

- [J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 324–329.
Pan LG, Zhang J, Lu AX, *et al.* Review on non-destructive determination technology for agricultural product quality [J]. *Tran CSAE*, 2008, 24(2): 324–329.
- [30] Bortoleto GGB, Pataca LCM, Bueno MLMS. A new application of X-ray scattering using principal component analysis -classification of vegetable oils [J]. *Anal Chim Acta*, 2005, 539: 283–287.
- [31] Li FZ, Liu ZG, Sun TX. Authentication of vegetable oils by confocal X-ray scattering analysis with coherent/incoherent scattered X-rays [J]. *Food Chem*, 2016, 210: 435–441.
- [32] 郭培源, 刘波, 李杨, 等. 食品安全现代检测技术综述[J]. *中国酿造*, 2014, 33(4): 5–8.
Guo PY, Liu B, Li Y, *et al.* Review of the current technique on food safety detection [J]. *China Brew*, 2014, 33(4): 5–8.
- [33] Martínez DM, Cano MP, Gámez GJ, *et al.* On-line system based on hyperspectral information to estimate acidity, moisture and peroxides in olive oil samples [J]. *Comput Electron Agric*, 2015, 116: 1–7.
- [34] Xie CQ, Wang QN, He Y. Identification of different varieties of sesame oil using near-infrared hyperspectral imaging and chemometrics algorithms [J]. *Plos One*, 2014, 9(5): e98522–e98522.
- [35] 郭毅, 丁海勇, 徐晶鑫, 等. 地沟油的高光谱数据聚类分析[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(1): 37–41.
Guo Y, Ding HY, Xu JX, *et al.* Clustering analysis based on hyperspectral DN values of waste oil [J]. *Remote Sens Land Resour*, 2014, 26(1): 37–41.
- [36] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
Xu JZ, Zhang XC. *Terahertz Science, technology and Applications* [M]. Beijing: Beijing University Press, 2007.
- [37] Tobolová M, Křesálek V. Edible oil comparison by terahertz time domain spectroscopy system Tera OSCAT [J]. *Int Confer Circ*, 2014, 1: 134–137.
- [38] Zhan HL, Xi JF, Zhao K, *et al.* A spectral-mathematical strategy for the identification of edible and swill-cooked dirty oils using terahertz spectroscopy [J]. *Food Control*, 2016, 67: 114–118.
- [39] 詹洪磊, 宝日玛, 戈立娜, 等. 利用太赫兹技术和统计方法鉴别地沟油[J]. *中国油脂*, 2015, 40(4): 52–54.
Zhan HL, Bao RM, Ge LN, *et al.* Discerning of swill-cooked dirty oil by terahertz technology and statistical method [J]. *China Oils Fats*, 2015, 40(4): 52–54.
- [40] VelosoA CA, Dias LG, Rodrigues N, *et al.* Sensory intensity assessment of olive oils using an electronic tongue Sensory intensity assessment of olive oils using an electronic tongue [J]. *Talanta*, 2016, 146: 585–593.
- [41] Shao XL, Li H, Wang N, *et al.* Comparison of different classification methods for analyzing electronic nose data to characterize sesame oils and blends [J]. *Sensors*, 2015, 15: 26726–26742.
- [42] 李靖, 王成涛, 刘国荣, 等. 电子鼻快速检测煎炸油品质[J]. *食品科学*, 2013, 34(8): 236–239.
Li J, Wang CT, Liu GR, *et al.* Detection of walnut oil adulterated with soybean oil, rapeseed oil/corn oil using electronic nose [J]. *Food Sci*, 2013, 34(8): 236–239.
- [43] Garrido-Delgado R, Mercader-Trejo F, Sielemann S, *et al.* Direct classification of olive oils by using two types of ion mobility spectrometers [J]. *Anal Chim Acta*, 2011, 696: 108–115.
- [44] Zhang LX, Shuai Q, Li PW, *et al.* Ion mobility spectrometry fingerprints: A rapid detection technology for adulteration of sesame oil [J]. *Food Chem*, 2016, 192: 60–66.

(责任编辑: 武英华)

作者简介



原 喆, 硕士, 主要研究方向为农产品质量与食品安全。

E-mail: yuanzhe915@yeah.net



张良晓, 博士, 副研究员, 主要研究方向为粮油产品真实性鉴别、农产品质量与安全风险评估。

E-mail: liangxiao_zhang@hotmail.com



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

E-mail: peiwuli@oilcrops.cn