

食用植物油掺伪鉴别技术研究进展

俞 玥¹, 宋嘉慧¹, 鲁玉杰¹, 郭元新¹, 李占明^{1,2*}, 周冬仁^{2*}

(1. 江苏科技大学粮食学院, 镇江 212100; 2. 浙江省淡水水产研究所, 湖州 313001)

摘 要: 近年来, 植物油掺伪问题频发, 现有理化特性和感官特性检测已无法满足相关的检测需求。由于检测时间长、检测成本高, 以及复杂的检测过程导致气相色谱法和高效液相色谱法等仪器分析方法的应用受限。近期, 新型传感技术、新材料和数字信息技术、电子鼻技术、机器视觉技术、组学技术等的发展为快速准确鉴别植物油掺伪提供了技术支持。鉴于此, 以食用植物油掺伪技术为对象, 本文综述了近期国内外对植物油掺伪检测的重要研究进展, 讨论了光谱检测技术、色谱检测技术、电子鼻检测技术、机器视觉技术、组学技术等分析方法的特点及发展现状, 并对植物油掺伪鉴别技术的发展进行了展望, 以期对植物油的掺伪检测提供一定的理论参考。

关键词: 掺伪; 仪器分析; 无损检测; 机器视觉; 电子鼻; 组学技术

A review of the determination methods of edible vegetable oils adulteration

YU Yue¹, SONG Jia-Hui¹, LU Yu-Jie¹, GUO Yuan-Xin¹, LI Zhan-Ming^{1,2*}, ZHOU Dong-Ren^{2*}

(1. School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China;
2. Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, Huzhou 313001, China)

ABSTRACT: Vegetable oils adulterations are frequently reported in recent years. The physicochemical and sensory characteristics are not suitable for the determination. Gas chromatography and high performance liquid chromatography are sensitive to verify the components. However, the detection time and cost as well as the complex detection processes result in the limited applications. The novel sensing technology, new materials and digital information technology, electronic nose technology, machine vision technology, and omics technology support the development of the rapid and accurate identification of vegetable oils adulteration. This paper discussed the characteristics and recent progress of vegetable oil adulteration on the topic of the spectrum detection, chromatographic detection, the electronic nose detection, machine vision technology, as well as omics technology, and introduced the prospective of vegetable oil adulteration identification, providing the determination knowledge for vegetable oil adulteration.

KEY WORDS: adulteration; instrumental analysis; nondestructive test; machine vision; electronic nose; omics technology

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31902204)、浙江省鱼类健康与营养重点实验室开放课题项目(ZJK202114)

Fund: Supported by the Youth Science Foundation of National Natural Science Foundation of China (31902204), and the Open Project of Zhejiang Provincial Key Laboratory of Fish Health and Nutrition (ZJK202114)

***通信作者:** 李占明, 博士, 讲师, 主要研究方向为农业智能装备及农产食品安全。E-mail: lizhanming@just.edu.cn

周冬仁, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水产食品健康与安全。E-mail: 872559718@qq.com

***Corresponding author:** LI Zhan-Ming, Ph.D, Lecturer, School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, 666 Changhui Road, Dantu District, Zhenjiang 212100, China. E-mail: lizhanming@just.edu.cn

ZHOU Dong-Ren, Master, Senior Engineer, Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, 999 Changqiao South Road, Wuxing District, Huzhou 313001, China. E-mail: 872559718@qq.com

0 引 言

食用植物油含有丰富的多不饱和脂肪酸,可有效缓解动脉硬化,降低因饱和脂肪酸摄入过多而引发心脑血管疾病的患病概率,同时也为人体提供所需的一些脂溶性维生素等营养元素。近年来,植物油市场上以次充好的掺伪现象频发^[1]。随着掺伪技术的不断提高,传统意义上的感官检测和理化检测,已经难以满足检测需要。气相色谱技术、气相色谱-质谱联用技术等方法,具有效率高和高灵敏度性等特点,可以测量物质的多种组分,但检测费时,价格较贵,检测过程复杂,适用范围受限^[2]。

近年来,随着传感技术、新材料及数字化信息技术等学科的交叉融合发展,电子鼻技术、智能算法、组学技术等的发展为食用植物油快速准确地掺伪鉴别研究提供了大量的定量模型和定性模型^[3-4]。对于植物油掺伪检测技术的研究,无论是传统常规的检测方法,还是现代仪器分析方法,或计算机视觉技术、组学技术等,在实际使用中各有利弊。目前从光谱检测技术、色谱检测技术、电子鼻技术、机器视觉技术、组学技术等方面全面阐述食用植物油掺伪鉴别技术的综述较少,相关领域的发展需要进一步关注。

鉴于此,在前期文献报道的基础上,本文综述了近期国内外对植物油掺伪检测的重要研究进展,讨论了光谱检测技术、色谱检测技术、电子鼻检测技术、机器视觉技术、组学技术等分析方法的特点及发展现状,以期为植物油的掺伪检测的深入研究提供一定的理论参考。

1 光谱检测技术

光谱检测技术,包括红外光谱技术、拉曼光谱技术、荧光光谱技术、太赫兹光谱技术等,被广泛用来检测植物

油掺伪的鉴别分析^[5]。然而,由于植物油成分复杂,光谱差异难以直接用于植物油的掺伪分析。近年来,随着化学计量学、机器学习等方法与光谱技术的联合应用,利用近红外、拉曼等光谱技术可以实现对植物油掺伪的定性和定量分析。表 1 给出了不同光谱方法在分析鉴别植物油研究上的原理及优缺点。本部分将着重对光谱检测技术在植物油掺伪鉴别分析上的研究进展进行归纳介绍。

1.1 红外光谱技术

利用化学计量学针对便携式傅里叶变换红外光谱仪获取橄榄油掺伪数据进行鉴别,利用簇类独立软模式识别(soft independent modeling of class analogy, SIMCA)模型,能准确鉴别掺伪 10%以上的特级初榨橄榄油^[10]。杨佳等^[11]利用傅里叶变换红外光谱数据对芝麻油的掺伪种类进行鉴别,建立了芝麻油、花生油等不同植物油的分类模型,模型的准确识别率达到 100%,通过采集不同比例的芝麻油-大豆油与芝麻油-葵花籽油二元系统的傅里叶变换红外光谱谱图,应用偏最小二乘法(partial least squares, PLS)分别建立二元系统定量分析模型,该模型可以准确预测芝麻油中 10%~100%的掺伪油。

近年来,随着化学计量学、机器学习等方法与近红外光谱法的联合应用,分析近红外光谱吸收位置和强度的差异,可以实现植物油等食品掺伪的定性和定量分析^[12]。陈洪亮等^[13]采用近红外植物油品质快速检测仪,利用稀疏编码算法结合支持向量分类法(support vector classification, SVC)建立的掺伪定性模型对掺伪芝麻油(大豆油与菜籽油)样本的判别准确率达到 100%。涂斌等^[14]利用近红外光谱分析技术结合化学计量学方法对稻米油掺伪进行定性-定量分析,对比了 PLS 和支持向量机回归(support vector regression, SVR) 2 种方法,结果证实二者均有较高的预测精确度。

表 1 植物油掺伪检测中不同光谱法的原理及优缺点
Table 1 Principles, advantages and disadvantages of different spectral methods in determining of vegetable oils adulteration

名称	原理	优点	缺点	参考文献
红外光谱技术	红外光照射到含氢基团上,导致其振动状态发生变化,而红外光谱区域内某处光子的能量与变化的能量相等,光会被吸收	快速、高效、无需前处理、多组分同时测定	仪器对外界环境的变化较为敏感,特征信息的有效提取较困难	[6]
拉曼光谱技术	食用油脂结构中的烯烃双键分子的振动具有较强的拉曼散射,依据不同种类植物油双键结构的数量和比例的不同区分	无需制备样品、无损、快速	重叠峰现象明显,表征谱峰分辨率低	[7]
荧光光谱技术	选择一定波长的辐射光源,使之正好与植物油结构中不同官能团的芳香环结构及不饱和脂肪酸的基态和激发态能级差相对应	高灵敏度、高选择性、高信息量、且不破坏样品结构	应用范围小,且容易受到外界环境的干扰。特征信息的提取较困难	[8]
太赫兹光谱技术	根据不同植物油分子的不同太赫兹特征光谱信息来判断掺伪	穿透性强,信噪比高	对实验环境中的温度和湿度要求较严格,适用范围受限	[9]

为了解决一维红外光谱法提取掺伪油特征信息困难的问题, 二维红外光谱法应运而生。有研究采用溶剂扰动法获得食用油的二维相关谱, 构建卷积神经网络对食用油的同步和异步相关谱进行分析。结果表明, 该方法可为实际应用中食用油的鉴别和掺伪分析提供一种替代方法^[15]。张婧等^[16]提出基于融合同步-异步二维近红外和中红外相关谱, 建立纯芝麻油和掺伪芝麻油的偏最小二乘判别分析 (partial least squares discrimination analysis, PLS-DA) 模型, 可有效地获取样品特征信息, 对校正集内部样品和未知样品的判别正确率均达到 100%。

综上, 红外光谱技术是植物油掺伪检测中发展最为成熟、体系最为健全的光谱检测技术, 除了可以高效快速地对样品进行检测以外, 更因为在样品检测中可以不破坏试验、操作简单等原因, 也被广泛运用于除植物油掺假以外的其他食品掺假检测中。

1.2 拉曼光谱技术

拉曼光谱技术可以提供相关官能团的光谱信息用于定性和定量分析, 而食用油脂结构中的烯烃双键分子的振动具有较强的拉曼散射, 依据不同种类植物油双键结构的数量和比例的不同区分掺伪植物油的种类。得益于不需前处理、不破坏样品等特点, 拉曼光谱技术近几年被广泛应用于植物油掺伪检测中^[17]。

研究发现, 由于植物油间光谱差异小, 研究中往往结合机器学习算法建立分析模型, 使用主成分分析 (principal component analysis, PCA)、聚类分析、支持向量机 (support vector machine, SVM)、PLS 等算法对光谱数据进行统计分析, 建立定性定量的分析模型, 使拉曼光谱技术对植物油的掺伪鉴别分析更加完善^[18-19]。利用拉曼光谱和指数方程拟合的数学方法, 对橄榄油与菜籽油或玉米油掺伪进行了测定, 结果表明不需要样品制备的拉曼光谱技术作为橄榄油掺伪检测技术的潜力得到了明确的证实^[20]。ZHANG 等^[21]使用拉曼光谱技术及 PCA 法准确地确定橄榄油中掺入 5% 其他类型的油。也有研究通过大豆原油与部分植物油精炼油拉曼谱图的特征差异, 并结合 PCA-SVM 模式识别建立了大豆原油是否掺伪的快速判别方法^[22]。对于不同来源及品牌的多批次多种植物油及精炼地沟油的研究显示, 基于拉曼光谱信息结合聚类分析法可有效鉴别不同掺伪类型的橄榄油^[23]。LI 等^[24]使用标准正态变量变换处理相关油脂的拉曼光谱数据, 建立了区间偏最小二乘判别分析鉴别橄榄油掺伪的方法, 可快速准确地鉴别橄榄油中掺入废弃烹饪油。与近红外光谱技术和中红外光谱技术, 拉曼光谱技术在植物油掺伪研究中应用适用性更好。

与一维红外光谱技术一样, 由于某植物油的一维拉曼光谱的光谱图无法准确区分植物油的种类^[25-26]。因此, 在植物油掺伪检测的研究中, 也常常采用可以显著提升表

征谱峰分辨率的二维光谱技术, 陈达等^[27]在温度外扰因素下利用二维相关拉曼光谱技术提取信息, 并结合多维偏最小二乘判别分析方法建模, 可有效避免光谱信息丢失, 完整挖掘植物油掺伪中丰富的光谱信息。

拉曼光谱技术和红外光谱技术有很多相似性, 都是发生在红外区, 只是不同于红外吸收光谱, 拉曼光谱不是吸收光谱, 而是一种阶数更高的光子分子相互作用, 虽然强度较红外光谱较弱, 但因为产生机制的不同, 可以对没有极性的对称分子进行检测, 弥补红外光谱技术的部分缺陷。

1.3 荧光光谱技术

通过选择一定波长的辐射光源, 使之正好与植物油结构中不同官能团的芳香环结构及不饱和脂肪酸的基态和激发态能级差相对应, 可获得特征元素的荧光光谱图。由于植物油中的特殊物质 (例如叶绿素、脂肪酸等) 具有荧光效应, 使得荧光光谱技术和其他光谱技术一样被广泛运用于植物油的掺伪检测中^[28-29]。

荧光光谱技术结合机器学习算法可以对掺伪植物油进行快速的定性定量分析, 常用的机器算法平行因子法、人工神经网络 (artificial neural network, ANN)、PLS-DA 等^[30-31]。GU 等^[32]利用平行因子法算法处理花生油荧光光谱的特征信息, 将理化指标与 ANN 算法结合建模, 模型可快速检测花生油掺伪。王挥等^[33]采集 350~400 nm 的特征荧光光谱波段建立 PLS-DA 模型, 实现了对初榨椰子油掺伪检测。

除了上述的机器学习算法以外, 近几年, 三维荧光光谱结合图像矩法, 通过大量实验证明对掺伪植物油定性定量分析的效果更佳, 克服了传统荧光光谱对掺伪样品特征信息无法有效提取的弊端。吴希军等^[34]利用平行因子法处理植物油的三维荧光光谱法数据, 相关研究可鉴别植物油种类。图像矩作为强有力的定性定量的工具, 通过整个图像空间计算得到的图像矩, 能够反映待测样品的全局信息和丰富的光谱信息, 最后通过大量实验找到样本分类的有效矩值, 即可将样本准确分类^[35]。有研究证实, 三维荧光光谱结合 Zernike 图像矩可以实现掺伪芝麻油的快速检测^[36]。

荧光光谱技术因为在检测过程中易受相互元素干扰及谱图出现叠加峰等影响因素, 导致分析过程较为繁琐, 不过随着化学计量法的不断成熟, 通过与化学计量法的结合建立定量定性模型可以大大降低分析难度, 提高分析结果的准确度。

1.4 太赫兹光谱技术

相比红外光谱技术, 太赫兹时域光谱具有穿透性强、光谱信息更加丰富、光谱范围宽、信噪比高等优势^[37]。生物分子的太赫兹光谱特征信息, 已广泛运用到医学、生

物理学等多个领域。近几年,太赫兹光谱技术在植物油的掺伪检测研究中亦有相关报道^[38]。太赫兹时域光谱技术主要包含透射式、反射式、衰减全反射式。其中,衰减全反射式太赫兹时域光谱技术,在测量植物油等液体样品时,可有效避免在测试植物油样品时样品池产生的干扰,获取的光学参数更加准确,提高实验结果的准确性^[39]。太赫兹光谱技术与机器学习算法结合,可进一步提高实验结果的准确性。

反复烹炸过的油和未使用过的油的太赫兹波谱和光学特性显著不同,并且会随着频率的增加而变化,可用于实现植物油高温使用与否的鉴别分析。廉飞宇等^[40]使用 PCA 和 SVM 分析不同的芝麻油和花生油的太赫兹时域光谱数据,结果表明,对食用油种类识别的正确率可达到 93%。然而,随着研究的不断深入,对于太赫兹光谱的检测,也暴露出了许多问题,实验要求苛刻,仪器体系庞大,便携性差,光谱体系不成熟等,都需要在未来通过大量研究得以解决。

1.5 多元光谱技术

当掺伪油与主油之间的光谱差异非常小时,利用传统单一的光谱技术无法进行有效区分。对于光谱信息相似的掺伪植物油的快速鉴别,也包括掺伪量较少导致光谱信息差异小的样本,多元光谱技术具有优势,即利用不同光谱检测技术在植物油掺伪检测方面的互补性去完成植物油的掺伪检测。以聚合物分子为例,拉曼散射可获得更为丰富的谱带,相较于其他光谱技术,拉曼光谱技术使部分信号较弱的官能团的信号表现更为强烈,而近红外光谱技术对于植物油中含氢基团的信息的提取具有优势^[41],因此针对拉曼光谱结合近红外光谱的检测方法多有报道。涂斌等^[42]结合掺伪花生油的拉曼光谱及近红外光谱特征信息,利用化学计量学建模型实现花生油掺伪的有效鉴别。因此,植物油检测单一的光谱技术难以实现鉴别时,可考虑将多种光谱技术特征信息结合,综合各光谱技术的优势,提高植物油掺伪检测的准确性^[43]。

近来,二维光谱检测技术在植物油掺伪研究中的应用渐增,二维光谱技术能够有效地从复杂生物系统中提取微弱、重叠的特征光谱信息。当掺伪油与主油的红外光谱

信息相似时,一维光谱信息不足导致无法准确分类的样品,二维光谱信息提供了可能的解决思路^[44]。光谱技术在植物油掺伪检测中,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,并且得益于数据处理方法的进步,光谱法与机器算法的融合,利用多种模式判别模型及定性定量模型,深度挖掘数据信息以实现更准确的鉴别分析结果。同时,多光谱融合技术带来的特征信息的互补性,结合机器学习算法,为植物油掺伪光谱检测提供了新的思路^[45]。但是光谱检测技术的发展仍旧存在限制因素,如样本的代表性不足、研究多在实验室中、缺乏市场适用性等,因此各种植物油的判别和定性定量模型、数据库需要完善,并研制便携式光谱采集仪器,来应对目前市场上对于植物油掺伪检测快速便携、高效的要求。

2 色谱检测分析

色谱技术本质上是通过流动相和固定相对待测样品的各组分进行分离,因为植物油的各组分物质的分配系数不同,组分物质在流动相和固定相中不断相互运动后最终实现物质的分离,而后通过检测系统,得出色谱图进而对待测样品进行定性定量分析^[46]。目前用于植物油掺伪检测的色谱技术主要包括高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)、气相色谱法(gas chromatography, GC)、色谱-质谱联用技术、同位素质谱法等(表 2),本部分主要介绍几种色谱方法及其在植物油成分分析及掺伪鉴别上的优缺点,以及相关的研究进展。

2.1 高效液相色谱技术

当前 HPLC 技术检测掺伪植物油,主要检测植物油中的特征元素,如棉籽油中的棉酚,芝麻油中的芝麻素、芝麻酚,菜籽油中的硫代葡萄糖苷等^[51]。利用 HPLC 测定芝麻素和芝麻林素的含量是鉴别掺伪芝麻油的重要依据^[52]。除此之外,利用 HPLC 获取的特异性脂肪醛类物质的含量信息可鉴别精炼地沟油^[53]。结合机器学习算法可以更有效地获取掺伪植物油的特征信息,而 PARK 等^[54]利用 C₁₈ 反相柱 HPLC 测试甘三酯的含量,结合化学计量学有效鉴别掺紫苏油的芝麻油(5%以上)。

表 2 植物油掺伪检测过程中不同色谱检测技术比较

Table 2 Comparison of different chromatographic detection techniques in the detection of vegetable oil adulteration

色谱技术		优点	缺点	参考文献
气相色谱法	分离效能高、灵敏度高、分析速度快、应用范围广	沸点太高或热稳定性差的物质都难于直接应用气相色谱法	[47]	
高效液相色谱法	速度快、分辨率高、灵敏度高、样品用量少	分析成本高,分析柱价格昂贵,分析时间比气相长	[48]	
同位素质谱技术	灵敏度高、定性能力强、样品用量少	定量分析复杂、分析样品需要纯化	[49]	
色谱-质谱联用技术	分析范围广、分离能力强、定性分析结果可靠	仪器昂贵	[50]	

有研究使用高效液相色谱飞行时间质谱联用技术分析多种植物油脂质的组成和分布,证实甘油三酯类化合物的浓度差异可用于区分不同的植物油^[55]。有研究采用超高效液相色谱-静电场轨道阱-质谱联用技术研究 6 种不同种类的常见食用植物油的脂质轮廓谱^[2],结果表明,典型的甘油三酯化合物的差异可作为常见食用植物油分类的标识物,因此高效液相色谱技术可以用于食用植物油的掺杂掺伪检验。

2.2 同位素质谱技术

除了液相色谱法、气相色谱法以外,同位素质谱法也应用于植物油鉴别。同位素质谱法的检测项目主要为 $\delta^{13}\text{C}$ ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$),根据 C3 植物油和 C4 植物油的 $\delta^{13}\text{C}$ 的不同来对掺伪的植物油进行定性分析^[56]。采用同位素质谱技术和共振拉曼光谱技术对意大利 7 个地区 38 种特级初榨橄榄油的同位素组成和类胡萝卜素含量进行了测定,线性判别分析结果表明,同位素技术结合类胡萝卜素数据可以从受相似地理和气候参数影响的生产现场区分特级初榨橄榄油^[57]。HUANG 等^[58]研究了用碳同位素技术检测橄榄油和大豆油中不同掺伪程度的玉米油的可能性,结果表明不同产地的橄榄油和大豆油样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均低于玉米油样品,同时,不同掺伪含量(25%、50%、75%、95%)的橄榄油和大豆油样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异均有统计学意义($P<0.05$)。因此,碳稳定同位素技术是检测橄榄油和大豆油完全或部分被玉米油替代的良好工具。KIM 等^[59]通过对紫苏油 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 同位素比值(以 $\delta^{13}\text{C}$ 表示)或脂肪酸组成的分析,可以实现紫苏油中掺有玉米油[浓度 $\geq 5\%$ (体积分数)]的鉴别。

2.3 气相色谱技术

不同植物油的甘油三酯的结构和脂肪酸含量和组成是不同的,如菜籽油含有芥酸、亚麻油,大豆油含有亚麻酸,花生油含有花生四烯酸等,掺入其他植物油会影响主油的脂肪酸含量和组成,通过 GC 技术可以分析样品的脂肪酸的组成和含量,可鉴别是否掺伪。GC 技术也可以结合机器学习算法对掺伪植物油进行更深的研究。TIAN 等^[60]评价了 GC 和气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)系统检测不同配比菜籽油掺伪花生油的可行性。研究结果表明,通过 GC-IMS 结合 PCA 和聚类分析,得到了满意的掺伪检测结果。与 GC 技术相比,GC-IMS 具有更高的效率和可行性,可作为检测各种物质掺伪的依据。

MONFREDA 等^[61]采用 GC 法对橄榄油和葵花籽油混合物进行脂肪酸分析,应用多种模型识别方法鉴别橄榄油含量。JABEUR 等^[62]认为脂肪酸乙酯可以作为检测特级初榨橄榄油欺诈的参数,即使掺伪较低水平的精制果渣橄榄油(1%),也能有效鉴别掺伪,使用线性判别分析可以识别出最具判别性的变量,可以更快、成本更低地鉴别特级初榨橄榄油掺伪。有研究通过测定脂肪酸组成,利用判别分

析和 PCA 方法,研究了芝麻油和混合芝麻油中脂肪酸组成及其比值的数据分布规律,总准确度在 97.27%~100%之间。利用偏最小二乘多元定量方法,成功地对芝麻油中添加植物油的种类和含量进行了定量识别^[63]。

2.4 色谱-质谱技术

由于食用植物油掺伪问题的复杂化、多元化,单一的 GC 无法系统考虑每类油脂不同产地和品种之间的差异,所以比起单独使用 GC 进行检测,实验中也常常使用色谱-质谱联用技术。王世成等^[64]采用 HPLC-MS 技术鉴别出地沟油中多种亚油酰基氧化产物,并筛选出含有亚油酸环氧化物的甘油三酯分子为地沟油和食用油的差异标志成分。RUIZ-SAMBLÁS 等^[65]采用高温 GC-MS 分析法分析了掺入其他植物油的橄榄油样品的甘油三酯组成,使用 SIMCA 法建立并优化掺伪模型,可识别掺入 10%以上的其他植物油的橄榄油。周芳芳等^[66]采用 GC-MS 检测薄荷油中的亚油酸、油酸棕榈酸、硬脂酸等植物油特征成分的含量,鉴别薄荷油样品中是否掺杂植物油,最低可检出的掺加量为 0.001%。何小青等^[67]建立了微波辅助衍生化 GC-MS 测定食用植物油中的脂肪酸组成含量,使用校正变换矩阵法建立的校正模型对多元人工合成植物油样品进行了计算分析,待测样品的平均预测误差均不超过 5%。毛丽莎等^[68]建立了食用油脂中测定柠檬烯的 GC-MS,该方法对泔水油的鉴别灵敏度高,判断正确率达到 100%。

目前对于植物油掺伪的色谱检测应用已经相当普遍,是国标中推荐的用于植物油掺伪检测的方法,且利用色谱法分析食用植物油中特征脂肪酸含量和鉴别食用植物油掺杂的研究已经比较成熟。但色谱检测在植物油掺伪检测的研究仍旧存在诸多问题,如何提高仪器设备的便携性,以及如何开发低含量掺伪植物油的可靠实用的检测技术,依旧是需要研究和讨论的问题。GC-MS 和 HPLC-MS 技术虽然在一定程度上扩大了色谱技术的适用范围,但由于仪器设备较为昂贵、便携性较差等原因,使得色谱质谱联用技术目前适用性受限。

3 电子鼻技术

不同于以上的几种现代仪器检测技术,电子鼻技术是基于仿生学的原理模拟动物嗅觉系统,分析、识别、检测气味物质和大多数挥发性成分的技术。相较于光谱和色谱,其响应是样品中挥发成分的整体信息(指纹信息)。由于可获取植物油样品的指纹信息,使得电子鼻技术在鉴别和分析植物油掺伪研究中的适用性良好^[69]。

研究表明,电子鼻技术对于不同植物油的掺伪检测效果有差异,且在混合油定性检测中线性判别式分析方法优于 PCA 方法。ORDUKAYA 等^[70]利用电子鼻收集了来自土耳其巴利克西尔不同地区的橄榄油数据,通过主成分分

析将收集到的 32 个输入的数据减少到 8 个输入, 研究中使用了不同的机器学习分类器, 如朴素贝叶斯模型、线性判别分析、决策树、ANN 和 SVM 等, 研究结果表明, 所创建的方法在鉴别和分类不同类型的橄榄油质量控制方面都比传统的化学分析技术速度快, 成本低。

与色谱仪等大型仪器相比, 电子鼻技术响应时间短、重复性好、检测速度快, 并且其测定评估范围广, 可以检测各种不同种类的食品。但由于目前电子鼻的传感器技术还不够成熟, 内部结构比较复杂, 数据处理较为繁琐, 检测的精度还有待提高等原因, 对于电子鼻检测技术在植物油掺伪检测中的研究还需要进一步开发^[71]。电子鼻技术依靠植物油中的挥发性物质进行检测, 而植物油中挥发性组分复杂, 挥发性物质的提取方法对于检测结果也有很大的影响, 如何充分提取并分离鉴定挥发性成分, 也是电子鼻技术在植物油的研究上需要深入探析的问题。

4 机器视觉技术

机器视觉技术的基本原理是利用图像传感器获取检测对象的视觉信息, 通过图像采集卡将图像信息传输给计算机, 再经由图像预处理、特征信息提取和数据分析等工作, 最终输出图像识别检测结果。因其快速无损的特点, 为植物油掺伪检测提供了新的方向^[72-73]。植物油中有大量的叶绿素、胡萝卜素等有色物质, 不同的植物油呈现的颜色也有所不同, 这也可以作为利用计算机视觉技术判断植物油掺伪的重要参数。

GARCIA 等^[74]证实了将叶绿素、二酰基甘油、直链蜡脂、甾醇和三酰基甘油等物质作为初榨橄榄油掺伪鉴别标记物的可行性。针对不同品牌的初榨橄榄油和不同比例的大豆油掺伪问题, DE 等^[75]结合数字图像处理和有监督模式识别, 利用连续投影算法结合线性判别分析和 PLS-DA 模型品牌分类的准确率达到 100%, 针对掺了大豆油的样品, 针对不同品牌橄榄油样品的模型的识别准确率略有差别。

目前, 机器视觉技术运用于植物油掺伪检测的国内外研究相对较少, 且准确度不高, 并且该技术由于对外界环境极为敏感, 特别是外界光照对正确植物油颜色的判断有着极大的影响。除此之外, 缺乏相关的数据库和标准颜色模型也是当前机器视觉技术用于植物油掺伪鉴别研究时面临的问题。

5 组学技术

组学技术是近几年发展起来的新学科, 组学技术是以组群指标分析为基础, 以高通量检测 and 数据处理为手段, 对所测样品中低分子量物质同时进行定性和定量分析的检测技术^[76]。基因组学、代谢组学、核磁共振技术(nuclear magnetic resonance, NMR)组学等组学技术近几年逐渐用于植物油的掺伪检测中。基于基因组学特异性强、灵敏度高和高通量的特点, 广泛用于包括食用油在内的食品掺伪

检测中。KALOGIANNI 等^[77]使用单核苷酸多态性基因分型可以确定 5 个最常见的希腊橄榄油品种。代谢组学的主要研究手段包括核磁共振技术和色谱-质谱技术, 代谢组学作为全面分析食品成分组成的整体分析方法, 与其他检验方法在检测非特定目标物方面相比存在一定优势。针对橄榄油中掺入蔬菜油和花生油的一项研究中, 利用 PCA 和 PLS 模型分析代谢组学数据, 所建立的模型可快速判断橄榄油中蔬菜油和花生油的掺伪^[78]。

NMR 技术灵敏度高、准确度好、可重复性较强、对样品没有损坏且简便易于操作^[14], NMR 主要分为高分辨率和低分辨率 2 个类型。其中, 低分辨率 NMR 仪具有体积小、便宜廉价、易于操作等优点, 广泛用于食品安全检测, 特别是植物油的掺伪检测中。WANG 等^[79]利用低场核磁共振波谱(low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)联合 PCA 和 PLS 法、以及偏最小二乘回归模型(partial least-squares regression, PLSR)对核桃油掺伪(大豆油、玉米油、葵花油)进行检测, 结果表明可以很好地鉴别核桃油掺伪并对掺伪水平进行准确定量。ZHU 等^[80]的研究表明利用 LF-NMR 联合 PCA 和判别分析模型可以区分出花生油中掺入 10%以上的棕榈油、大豆油和葡萄籽油。MANNINA 等^[81]对掺入了精炼橄榄油的榛子油进行 NMR 分析, 结果表明, 掺入 10%橄榄油可以被检出。

组学技术凭借高灵敏度、高通量的特点, 在包括植物油掺伪检测在内的食品安全检测中得以广泛利用。相比传统的食品安全检测技术, 代谢组学和基因组学技术凭借自身的优势, 现已在植物油掺伪检测中占有一席之地。随着 NMR 技术特别是 LF-NMR 的发展, NMR 技术在植物油掺伪检测的应用也开始普及^[82]。组学技术用于植物油掺伪的研究在样本采集与制备、生物标志物的筛选、方法通用性等方面均需进一步完善。

6 结束语

光谱检测技术、色谱检测技术及代谢组学技术、基因组学技术等技术的发展为植物油掺伪检测提供了良好的理论及基础数据。其中, 色谱检测技术虽然可以实现掺伪植物油的定性定量检测, 但是由于仪器庞大、样品预处理烦琐等原因限制了现场实时应用。近年来报道的电子鼻技术、机器视觉技术等提供了新的解决方案, 但是由于植物油成分的复杂性、仪器设备易受环境影响等原因, 技术尚未成熟, 急需进一步的探索与开发。基于高通量测试手段的组学技术的快速发展为植物油中特征性标志物的筛选、小分子物质的鉴别等提供了新的视角, 相关研究的开展对于积累植物油鉴别分析的基础数据具有良好的科学意义, 同时相关技术的发展也为植物油的产地溯源提供了可靠的研究手段。未来, 还需要不断深入研究智能算法在植物油掺伪检测中的运用, 构建定性定量模型, 不断完善植物油的掺

伪检测标准, 建立数据处理云平台、共享数据库及模型库, 开发研制便携式智能设备, 以更好地适应植物油掺伪鉴别的应用需求, 保障食品安全。

参考文献

- [1] KOU YX, LI QI, LIU XL, *et al.* Efficient detection of edible oils adulterated with used frying oils through PE-film-based FTIR spectroscopy combined with DA and PLS [J]. *J Oleo Sci*, 2018, 67: 1083–1089.
- [2] DU SS, SU MK, JIANG YF, *et al.* Direct discrimination of edible oil type, oxidation, and adulteration by liquid interfacial surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. *ACS Sensors*, 2019, 4: 1798–1805.
- [3] MILANEZ K, NÓBREGA T, NASCIMENTO DS, *et al.* Multivariate modeling for detecting adulteration of extra virgin olive oil with soybean oil using fluorescence and UV-Vis spectroscopies: A preliminary approach [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2017, 85: 9–15.
- [4] 胡仁伟, 俞玥, 倪明龙, 等. 基于深度信念网络的近红外光谱鉴别莲子粉掺假[J]. *食品科学*, 2020, 41: 298–303.
- [5] HU RW, YU Y, NI ML, *et al.* Identification of adulteration of lotus seed powder by near infrared spectroscopy based on deep belief network [J]. *Food Sci*, 2020, 41: 298–303.
- [6] LI X, ZHANG LX, ZHANG Y, *et al.* Review of NIR spectroscopy methods for nondestructive quality analysis of oilseeds and edible oils [J]. *Trend Food Sci Technol*, 2020, 41: 298–303.
- [7] YUAN Z, ZHANG LX, WANG D, *et al.* Detection of flaxseed oil multiple adulteration by near-infrared spectroscopy and nonlinear one class partial least squares discriminant analysis [J]. *LWT*, 2020, 125: 109–247.
- [8] LIU JJ. Terahertz spectroscopy and chemometrics classification of transgenic corn oil from corn edible oil [J]. *Micro Optical Technol Letter*, 2017, 59: 654–658.
- [9] ARSLAN F, AKIN G, KARUK ELMAS S, *et al.* Rapid detection of authenticity and adulteration of cold pressed black cumin seed oil: A comparative study of ATR-FTIR spectroscopy and synchronous fluorescence with multivariate data analysis [J]. *Food Control*, 2019, 98: 323–332.
- [10] FENG CH, OTANI C. Terahertz spectroscopy technology as an innovative technique for food: Current state-of-the-Art research advances [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2020. DOI: 10.1080/10408398.2020.1779649
- [11] PAN M, SUN SQ, ZHOU Q, *et al.* A simple and portable screening method for adulterated olive oils using the hand-held FTIR spectrometer and chemometrics tools [J]. *J Food Sci*, 2018, 83: 1605–1612.
- [12] 杨佳, 武彦文, 李冰宁, 等. 近红外光谱结合化学计量学研究芝麻油的真伪与掺伪[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29: 114–119.
- [13] YANG J, WU YW, LI BN, *et al.* Study on authenticity and adulteration of sesame oil by near infrared spectroscopy combined with stoichiometry [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2014, 29: 114–119.
- [14] ZHOU D, YU Y, HU R, *et al.* Discrimination of *Tetragium hemsleyanum* according to geographical origin by near-infrared spectroscopy combined with a deep learning approach [J]. *Spec Acta A*, 2020, 238: 118380.
- [15] 陈洪亮, 曾山, 王斌, 等. 优化基于近红外光谱的联合间隔偏最小二乘法建模检测芝麻油掺伪含量[J]. *中国油脂*, 2020, 45: 86–90.
- [16] CHEN HL, ZENG S, WANG B, *et al.* Optimization of joint interval partial least squares modeling based on near infrared spectroscopy for detection of adulteration content in sesame oil [J]. *China Oils Fats*, 2020, 45: 86–90.
- [17] 涂斌, 宋志强, 郑晓, 等. 基于激光近红外的稻米油掺伪定性-定量分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35: 1539–1545.
- [18] TU B, SONG ZQ, ZHENG X, *et al.* Qualitative-quantitative analysis of adulteration of rice oil based on laser near infrared [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2015, 35: 1539–1545.
- [19] LIU Y, YAO LY, XIA ZZ, *et al.* Geographical discrimination and adulteration analysis for edible oils using two-dimensional correlation spectroscopy and convolutional neural networks (CNNs) [J]. *Spec Acta A*, 2020, 246: 118–973.
- [20] 张婧, 单慧勇, 杨仁杰, 等. 基于近-中红外相关谱融合判定掺伪芝麻油[J]. *光子学报*, 2019, 48: 62–68.
- [21] ZHANG J, SHAN HY, YANG RJ, *et al.* Determination of adulterated sesame oil based on near-mid-infrared correlation spectrum fusion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48: 62–68.
- [22] BERGHIAN-GROSAN C, MAGDAS D. Raman spectroscopy and machine-learning for edible oils evaluation [J]. *Talanta*, 2020. DOI: 10.1016/j.talanta.2020.121176
- [23] MEENU M, CAI QX, XU BJ. A critical review on analytical techniques to detect adulteration of extra virgin olive oil [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2019, 91: 391–408.
- [24] TEIXEIRA AM, SOUSA C. A review on the application of vibrational spectroscopy to the chemistry of nuts [J]. *Food Chem*, 2019, 277: 713–724.
- [25] LIMA TKD, MUSSO M, MENEZES DB. Using Raman spectroscopy and an exponential equation approach to detect adulteration of olive oil with rapeseed and corn oil [J]. *Food Chem*, 2020, 333: 127–454.
- [26] ZHANG XF, QI XH, ZOU MQ, *et al.* Rapid authentication of olive oil by Raman spectroscopy using principal component analysis [J]. *Anal Lett*, 2011, 44: 2209–2220.
- [27] 李冰宁, 武彦文, 汪雨, 等. 拉曼光谱结合模式识别方法用于大豆原油掺伪的快速判别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34: 2696–2700.
- [28] LI BN, WU YW, WANG Y, *et al.* Rapid discrimination of adulteration of soybean crude oil using Raman spectroscopy combined with pattern recognition method [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2014, 34: 2696–2700.
- [29] 邓平建, 梁裕, 杨冬燕, 等. 基于拉曼光谱-聚类分析快速鉴别掺伪油茶籽油[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31: 72–75, 80.
- [30] DENG PJ, LIANG Y, YANG DY, *et al.* Rapid identification of adulterated camellia oil based on Raman spectroscopy-cluster analysis [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2016, 31: 72–75, 80.
- [31] LI YP, FANG T, ZHU SQ, *et al.* Detection of olive oil adulteration with waste cooking oil via Raman spectroscopy combined with iPLS and SiPLS [J]. *Spec Acta A*, 2018, 189: 37–43.
- [32] QIU J, HOU HY, HUYEN N, *et al.* Raman spectroscopy and 2DCOS analysis of unsaturated fatty acid in edible vegetable oils [J]. *Appl Sci*, 2019, 9: 2807.
- [33] HU X, WU RM, ZHU XY, *et al.* Fast detection of chlorpyrifos residues in tea via surface-enhanced Raman spectroscopy combined with two-dimensional correlation spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39: 0730001.
- [34] 陈达, 许云涛, 李奇峰, 等. 基于多尺度二维相关拉曼光谱的橄榄油掺杂检测[J]. *纳米技术与精密工程*, 2016, 14: 60–65, 1672–6030.
- [35] CHEN D, XU YT, LI QF, *et al.* Olive oil doping detection based on multi-scale two-dimensional correlation Raman spectroscopy [J]. *Nanotechnol Preci Eng*, 2016, 14: 60–65, 1672–6030.
- [36] WANG T, WU HL, LONG WJ, *et al.* Rapid identification and quantification of cheaper vegetable oil adulteration in camellia oil by using excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy combined with chemometrics [J]. *Food Chem*, 2019, 293: 348–357.
- [37] KARUK EŞ, ARSLAN F, AKIN G, *et al.* Synchronous fluorescence

- spectroscopy combined with chemometrics for rapid assessment of cold-pressed grape seed oil adulteration: Qualitative and quantitative study [J]. *Talanta*, 2019, 196: 22–31.
- [30] MABOOD F, BOQUÉ R, FOLCARELLI R, *et al.* Thermal oxidation process accelerates degradation of the olive oil mixed with sunflower oil and enables its discrimination using synchronous fluorescence spectroscopy and chemometric analysis [J]. *Spectrochim Acta A*, 2015, 143: 298–303.
- [31] HU LQ, MA S, YIN CL. Discrimination of geographical origin and detection of adulteration of kudzu root by fluorescence spectroscopy coupled with multi-way pattern recognition [J]. *Spectrochim Acta A*, 2018, 193: 87–94.
- [32] GU HY, SUN YH, LIU SL, *et al.* A feasibility study of the rapid evaluation of oil oxidation using synchronous fluorescence spectroscopy [J]. *Food Anal Method*, 2018, 11: 3464–3470.
- [33] 王挥, 宋菲, 曹飞宇, 等. 基于荧光光谱的初榨椰子油掺假检测技术研究[J]. *食品工业*, 2017, 38: 293–296.
- WANG H, SONG F, CAO FY, *et al.* Detection technology of adulteration of coconut oil based on fluorescence spectrum [J]. *Food Ind*, 2017, 38: 293–296.
- [34] 吴希军, 潘钊, 赵彦鹏, 等. 荧光光谱及平行因子分析法在植物油鉴别中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34: 2137–2142.
- WU XJ, PAN Z, ZHAO YP, *et al.* Application of fluorescence spectrum and parallel factor analysis in identification of vegetable oils [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2014, 34: 2137–2142.
- [35] SUN JN, CHEN J, SHI YP. Ionic liquid-based electromembrane extraction and its comparison with traditional organic solvent based electromembrane extraction for the determination of strychnine and brucine in human urine [J]. *J Chromatogr A*, 2014, 1352: 1–7.
- [36] 吴希军, 崔耀耀, 潘钊, 等. 三维荧光光谱结合 Zernike 图像矩快速鉴别掺伪芝麻油[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38: 2456–2461.
- WU XJ, CUI YY, PAN Z, *et al.* Rapid identification of fake sesame oil by three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with Zernike image moment [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2018, 38: 2456–2461.
- [37] CAO YQ, CHEN JN, HUANG PJ, *et al.* Inspecting human colon adenocarcinoma cell lines by using terahertz time-domain reflection spectroscopy [J]. *Spectrochim Acta A*, 2019, 211: 356–362.
- [38] YIN M, TANG SF, TONG MM. Identification of edible oils using terahertz spectroscopy combined with genetic algorithm and partial least squares discriminant analysis [J]. *Anal Method*, 2016, 8: 2794–2798.
- [39] LIU W, LIU CH, YU JJ, *et al.* Discrimination of geographical origin of extra virgin olive oils using Terahertz spectroscopy combined with chemometrics [J]. *Food Chem*, 2018, 251: 86–92.
- [40] 廉飞宇, 付麦霞, 葛宏义, 等. 太赫兹时域光谱识别 4 种食用油真实性的研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42: 69–73.
- LIAN FY, FU MX, GE HY, *et al.* Study on identification of authenticity of four kinds of edible oil by Terahertz time domain spectrum [J]. *China Oils Fats*, 2017, 42: 69–73.
- [41] ZHANG WY, MA J, SUN DW. Raman spectroscopic techniques for detecting structure and quality of frozen foods: Principles and applications [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2020, (8): 1–17.
- [42] 涂斌, 陈志, 彭博, 等. 基于多源光谱特征融合技术的花生油掺伪检测[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42: 169–173.
- TU B, CHEN Z, PENG B, *et al.* Detection of adulteration of peanut oil based on multi-source spectral feature fusion technology [J]. *Food Ferment Ind*, 2016, 42: 169–173.
- [43] XU Y, ZHONG P, JIANG AM, *et al.* Raman spectroscopy coupled with chemometrics for food authentication: A review [J]. *Trac Trend Anal Chem*, 2020, 131: 116017.
- [44] SOHNG W, PARK Y, JANG D, *et al.* Incorporation of two-dimensional correlation analysis into discriminant analysis as a potential tool for improving discrimination accuracy: Near-infrared spectroscopic discrimination of adulterated olive oils [J]. *Talanta*, 2020, 212: 120–148.
- [45] HE WX, LEI TX. Identification of camellia oil using FT-IR spectroscopy and chemometrics based on both isolated unsaponifiables and vegetable oils [J]. *Spectrochim Acta A*, 2020, 228: 117–839.
- [46] PÉREZ-CASTAÑO E, SÁNCHEZ-VIÑAS M, GÁZQUEZ-EVANGE LISTA D, *et al.* Quantification of extra virgin olive oil in dressing and edible oil blends using the representative TMS-4,4'-desmethylsterols gas-chromatographic-normalized fingerprint [J]. *Food Chem*, 2018, 239: 1192–1199.
- [47] JABEUR H, ZRIBI A, MAKNI J, *et al.* Detection of chemlali extra-virgin olive oil adulteration mixed with soybean oil, corn oil, and sunflower oil by using GC and HPLC [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62: 4893–4904.
- [48] ÇELİK S, ASFOOR A, ŞENOL O, *et al.* Screening method for argan oil adulteration with vegetable oils: An online HPLC assay with postcolumn detection utilizing chemometric multidata analysis [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67: 8279–8289.
- [49] CUCHET A, JAME P, ANCHISI A, *et al.* Authentication of the naturalness of wintergreen (*Gaultheria* genus) essential oils by gas chromatography, isotope ratio mass spectrometry and radiocarbon assessment [J]. *Ind Crop Prod*, 2019, 142: 111–873.
- [50] BEALE D, MORRISON P, KARPE A, *et al.* Chemometric analysis of lavender essential oils using targeted and untargeted GC-MS acquired data for the rapid identification and characterization of oil quality [J]. *Molecules*, 2017, 22: 1339.
- [51] 刘伟, 张敏, 张然, 等. 植物油掺伪检验技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8: 1533–1538.
- LIU W, ZHANG M, ZHANG R, *et al.* Research progress on adulteration detection technology of vegetable oil [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8: 1533–1538.
- [52] 孙荣华, 何良兴, 李岗. 芝麻油特征成分检测及防伪技术的研究[J]. *中国卫生检验杂志*, 2010, 20: 49–52, 60.
- SUN RH, HE LX, LI G. Study on detection of characteristic components and anti-counterfeiting technology of sesame oil [J]. *Chin J Health Lab Sci*, 2010, 20: 49–52, 60.
- [53] 董树清, 王利涛, 张霞, 等. 高效液相色谱法测定地沟油中脂肪醛类物质[J]. *食品工业科技*, 2013, 34: 313–316, 360.
- DONG SQ, WANG LT, ZHANG X, *et al.* Determination of aliphatic aldehydes in gutter oil by high performance liquid chromatography [J]. *Sci Tech Food Indust*, 2013, 34: 313–316, 360.
- [54] PARK Y, CHANG P, LEE J. Application of triacylglycerol and fatty acid analyses to discriminate blended sesame oil with soybean oil [J]. *Food Chem*, 2010, 123: 377–383.
- [55] NGUYEN T, APARICIO M, SALEH M. Accurate mass GC/LC-quadrupole time of flight mass spectrometry analysis of fatty acids and triacylglycerols of spicy fruits from the apiaceae family [J]. *Molecules*, 2015, 20: 21421–21432.
- [56] HONG E, LEE S, JEONG J, *et al.* Modern analytical methods for the detection of food fraud and adulteration by food category [J]. *J Sci Food Agric*, 2017, 97: 3877–3896.
- [57] PORTARENA S, BALDACCHINI C, BRUGNOLI E. Geographical discrimination of extra-virgin olive oils from the Italian coasts by combining stable isotope data and carotenoid content within a multivariate

- analysis [J]. Food Chem, 2017, 215: 1–6.
- [58] HUANG J, NORGBEY E, NKRUMAH P, *et al.* Detection of corn oil in adulterated olive and soybean oil by carbon stable isotope analysis [J]. J Consum Prot Food S, 2017, 12: 201–208.
- [59] KIM J, YANG S, JO C, *et al.* Comparison of carbon stable isotope and fatty acid analyses for the authentication of perilla oil [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2018, 120: 170–480.
- [60] TIAN L, ZENG Y, ZHENG X, *et al.* Detection of peanut oil adulteration mixed with rapeseed oil using gas chromatography and gas chromatography–ion mobility spectrometry [J]. Food Anal Method, 2019, 12: 2282–2292.
- [61] MONFREDA M, GOBBI L, GRIPPA A. Blends of olive oil and seeds oils: Characterisation and olive oil quantification using fatty acids composition and chemometric tools. Part II [J]. Food Chem, 2014, 145: 584–592.
- [62] JABEUR H, DRIRA M, REBAI A, *et al.* Putative markers of adulteration of higher-grade olive oil with less expensive pomace olive oil identified by gas chromatography combined with chemometrics [J]. J Agric Food Chem, 2017, 65: 5375–5383.
- [63] XING CR, YUAN XY, WU XY, *et al.* Chemometric classification and quantification of sesame oil adulterated with other vegetable oils based on fatty acids composition by gas chromatography [J]. LWT, 2019, 108: 437–445.
- [64] 王世成, 范津杉, 王颜红, 等. 液相色谱-大气压化学电离质谱分析鉴别地沟油中的氧化成分[J]. 分析化学, 2014, 42: 741–746.
WANG SC, FAN JS, WANG YH, *et al.* Identification of oxidizing components in gutter oil by liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry [J]. Anal Chem, 2014, 42: 741–746.
- [65] RUIZ-SAMBLÁS C, MARINI F, CUADROS-RODRÍGUEZ L, *et al.* Quantification of blending of olive oils and edible vegetable oils by triacylglycerol fingerprint gas chromatography and chemometric tools [J]. J Chromatogr B, 2012, 910: 71–77.
- [66] 周芳芳, 胡艳云, 吕亚宁, 等. 气相色谱-质谱法测定薄荷原油中的掺假植物油[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2015, 21: 766–773.
ZHOU FF, HU YY, LV YN, *et al.* Determination of adulterated vegetable oil in mint crude oil by gas chromatography-mass spectrometry [J]. J Shanghai Univ (Nat Sci), 2015, 21: 766–773.
- [67] 何小青, 许德英, 罗美中, 等. 微波辅助衍生 GC-MS 测定脂肪酸及校正变换矩阵法用于食用植物油鉴别的研究[J]. 分析测试学报, 2005, (1): 25–28.
HE XQ, XU DY, LUO MZ, *et al.* Microwave-assisted derivatization GC-MS determination of fatty acids and correction transformation matrix method for identification of edible vegetable oil [J]. J Anal Test, 2005, (1): 25–28.
- [68] 毛丽莎, 仲岳桐, 卢紫燕, 等. 滴水油特征成分柠檬烯的气质联用技术鉴定研究[J]. 中国热带医学, 2013, 13: 548–550.
MAO LS, ZHONG YT, LU ZY, *et al.* Identification of limonene, a characteristic component of slops and oil, by combination of make-work technology [J]. Chin J Trop Med, 2013, 13: 548–550.
- [69] WEI XB, SHAO XF, WEI YY, *et al.* Rapid detection of adulterated peony seed oil by electronic nose [J]. J Food Sci Technol, 2018, 55: 2152–2159.
- [70] ORDUKAYA E, KARLIK B. Quality control of olive oils using machine learning and electronic nose [J]. J Food Qual, 2017, 2: 927–2404.
- [71] MAJCHRAZAK T, WOJNOWSKI W, DYMERSEKI T, *et al.* Electronic noses in classification and quality control of edible oils: A review [J]. Food Chem, 2018, 246: 192–201.
- [72] RASHVAND M, OMID M, MOBLI H, *et al.* Evaluation of an adulteration detection system of olive oil based on machine vision and dielectric spectroscopy [J]. J Res Mech Agric Machin, 2017, 1: 6.
- [73] RASHVAND M, AKBARNIA A. The feasibility of using image processing and artificial neural network for detecting the adulteration of sesame oil [J]. AIMS Agric Food, 2019, 4: 237.
- [74] GARCIA R, MARTINS N, CABRITA M. Putative markers of adulteration of extra virgin olive oil with refined olive oil: Prospects and limitations [J]. Food Res Int, 2013, 54: 2039–2044.
- [75] DE MELO MILANEZ K, PONTES M. Classification of extra virgin olive oil and verification of adulteration using digital images and discriminant analysis [J]. Anal Method, 2015, 7: 8839–8846.
- [76] UNCU A, UNCU A. A barcode-DNA analysis method for the identification of plant oil adulteration in milk and dairy products [J]. Food Chem, 2020, 326: 126–986.
- [77] KALOGIANNI D, BAZAKOS C, BOUTSIKA L, *et al.* Olive oil DNA fingerprinting by multiplex SNP genotyping on fluorescent microspheres [J]. J Agric Food Chem, 2015, 63: 3121–3128.
- [78] GOODACRE R, VAIDYANATHAN S, BIANCHI G, *et al.* Metabolic profiling using direct infusion electrospray ionisation mass spectrometry for the characterization of olive oils [J]. Analyst, 2002, 127: 1457–1462.
- [79] 王晓玲, 吴晶, 谭明乾. 低场核磁共振结合化学计量学方法快速检测掺假核桃油[J]. 分析测试学报, 2015, 34: 789–794.
WANG XL, WU J, TAN MG. Rapid detection of adulterated walnut oil by low field NMR combined with stoichiometry [J]. J Anal Measure, 2015, 34: 789–794.
- [80] ZHU WR, WANG X, CHEN LH. Rapid detection of peanut oil adulteration using low-field nuclear magnetic resonance and chemometrics [J]. Food Chem, 2017, 216: 268–274.
- [81] MANNINA L, D'IMPERIO M, CAPITANI D, *et al.* ¹H NMR-based protocol for the detection of adulterations of refined olive oil with refined hazelnut oil [J]. J Agric Food Chem, 2009, 57: 11550–11556.
- [82] RAVAGLIA L, PIZZOTTI A, ALCANTARA G. NMR-based and chemometric approaches applicable to adulteration studies for assessment of the botanical origin of edible oils [J]. J Food Sci Technol, 2019, 56: 507–511.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介

俞 玥, 博士, 讲师, 主要研究方向为
农业智能装备及农产食品安全。
E-mail: yuyueoffice2012@126.com

李占明, 博士, 讲师, 主要研究方向为
农业智能装备及农产食品安全。
E-mail: lizhanming@just.edu.cn

周冬仁, 硕士, 高级工程师, 主要研究
方向为水产食品健康与安全。
E-mail: 872559718@qq.com