

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.02.016

# 食用植物油组分分析快速检测 技术研究进展

姚 晶, 樊 婷, 苏春燕, 任 蓉, 顾建华

(苏州市吴中区粮油质量监测中心, 江苏 苏州 215156)

**摘 要:** 对食用植物油组分快速检测方法, 包括模拟感官分析、光谱分析、电磁波谱分析和生物芯片技术, 从分析原理、应用技术等方面进行综述, 并对这些技术在食用植物油组分掺混鉴别的应用成果进行分析, 表明多通道、多参数、多容量的一体化在线快速检测技术将成为食用植物油组分分析发展方向, 将为进一步提升食用植物油质量监管水平, 保障我国消费者利益奠定技术基础。

**关键词:** 食用植物油; 组分分析; 快速检测; 掺混鉴别

中图分类号: TS227 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2020)02-0097-06

## Research progress on rapid determination of edible vegetable oil components

YAO Jing, FAN Ting, SU Chun-yan, REN Rong, GU Jian-hua

(Suzhou Wuzhong Grain and Oil Quality Inspection Center, Suzhou, Jiangsu 215156, China)

**Abstract:** This paper summarizes the rapid detection methods of edible vegetable oil components from the aspects of analysis principle and application technology, such as simulation sensory analysis, spectral analysis, electromagnetic spectrum analysis and biochip technology. The application results of these techniques in the component mixing identification of edible vegetable were further analyzed. It was showed that the integrated online rapid detection technology of multi-channel, multi parameter and multi capacity will be the developing direction of component analysis of edible vegetable oil and will lay a technical foundation for further improving the quality supervision of edible vegetable oil and safeguarding the interests of consumers in China.

**Key words:** edible vegetable oil; component analysis; rapid detection technology; mixing identification

食用植物油是油料作物的种子通过压榨、浸出等加工工艺再经精炼处理后得到的可供人们食用的油脂。植物油中包含单不饱和脂肪酸, 如油酸、花生一烯酸等, 多不饱和脂肪酸, 如亚油酸、亚麻酸、DHA、EPA 等, 同时含有甾醇、生育酚和谷维素等成分, 是人体赖以生存的必需品。常见的食用植物油有大豆油、花生油、芝麻油、菜籽油、葵花籽油、橄榄油等。不同来源的植物油, 其营养成分含量和脂肪酸组成互不相同<sup>[1]</sup>, 市场

价格水平也存在较大差异。目前, 市场上以低质、劣质的其他来源油脂掺入优质食用油中的报道屡见不鲜, 甚至也有报道矿物油、地沟油等非食用油谋取利益的违法行为, 严重损害了广大消费者的合法利益, 严重危害到广大消费者的食品安全。

食用植物油掺混鉴别是油脂行业一大难点问题, 至今仍无有效的解决办法, 而对油脂组分实现有效识别并进行快速准确定量是解决当前问题的有效途径, 在这个方向已有大量学者进行了研究, 并形成较为成熟的方法。食用植物油组分分析的常规方法有理化分析法, 如比色法、滴定法等; 色谱法, 如气相色谱法、液相色谱法等; 以

收稿日期: 2019-11-09

作者简介: 姚晶, 1987 年出生, 男, 工程师, 研究方向为粮油食品检测技术。

及气相色谱-质谱联用法等,虽然这些检测方法准确性好,精密度高,但处理步骤多、耗费时间长、检测效率低,且试剂消耗大、易污染环境,不合适快速检测。市场上食用植物油品类繁多、来源广泛、质量不一,且流通量大、流通速度快,以常规的方法进行质量监管效果有限,迫切需求开发油脂组分的快速检测分析方法。本文从模拟感官分析、光谱分析、电磁波谱分析和生物学特性等领域的快速检测方法进行综述,并对未来发展进行展望,以期对我国食用油组分检测提供参考依据,从而为形成成熟检测方法提供理论参考,提升质量监管水平,保障我国消费者利益。

## 1 模拟感官分析方法

### 1.1 电子鼻

电子鼻是一种仿生嗅觉系统,包括气体传输/采样系统、传感器阵列、信号预处理、模式识别、气味表达信号输出等五部分,食用油中普遍存在一些挥发性风味物质,其化学成分主要是醇、醛和酮类,不同食用油中挥发性成分种类和含量也不同<sup>[2-3]</sup>,呈现出不同风味,当这些气体在传感器中处于敏感材料测试环境时,与敏感材料产生化学作用,传感器将这些化学变化转化为电信号,结合人工神经网络(artificial neural network, ANN)主成分分析(principal component analysis, PCA),线性判别分析(latent dirichlet allocation, LDA)等数据分析方法<sup>[4]</sup>进行一系列处理,如消除噪声、特征提取、信号放大等操作如同人的嗅觉神经网络,根据特征响应谱的不同范围来区分各种气体,实现目标气体的定性定量分析。因此,电子鼻技术是一种高效、快速、无损、实时、绿色环保的无损检测技术,可用于食用油的快速组分分析。

鲁小利等<sup>[5]</sup>以模糊神经网络为分析模型,设计的仿生电子鼻系统,能实现对掺入大豆油的芝麻油进行定量预测,预测精度较高(准确度接近95%),运行时间短,可作为芝麻油等快速辨伪的有效手段。Bougrini M 等<sup>[6]</sup>使用配备 MOS 传感器阵列的标准电子鼻,可以准确检测到混入阿甘油中的葵花籽油,获得良好的结果。

### 1.2 电子舌

电子舌是仿生味觉系统,主要由味觉传感器

阵列、信号采集系统和模式识别系统等三部分组成;味觉传感器阵列相对于模拟生物系统中的舌头,对不同样品的“味道”进行感应,再由信号采集系统模拟大脑神经感觉系统进行采集,被激发的电信号传递到模拟大脑的感觉识别处理,对信号进行特征提取,建立模式识别模型,实现对不同被测溶液区分辨识<sup>[7]</sup>。此原理类似电子鼻检测技术,检测的形态则为固态液态为主,以评价测试液态样品“味道”,通过测试不同食用油所含的非挥发性特征物质为目标物质绘制“指纹图谱”,再利用不同的分析模型对搜集的数据进行处理分析,对被测对象进行识别和预测。

Oliveri 等<sup>[8]</sup>采用配有铂微电极的伏安型电子舌对食用油进行掺兑检测,以循环伏安电压为激励信号,采用主成分分析和 K 值临近分析方法,可以分辨出掺入玉米油的橄榄油样品,并对不同产地的橄榄油也能表现良好的识别效果。彭星星<sup>[9]</sup>采用电子舌结合 PCA 和 LDA 分析法,对核桃油中掺入菜籽油的现象进行快速检测,可以实现质量分数 50%以内掺假样品的区分,但是不同的是,在区分掺入比例 10%以内时,只有采用 LDA 分析法才可以将掺兑样品快速有效辨识。Bougrini M 等<sup>[6]</sup>还对之前相同的样品进行电子鼻检测后,又进行电子舌检测,结果显示电子舌检测的识别率更高(100%)。

## 2 光谱法

### 2.1 紫外光谱法

紫外吸收光谱的波长范围是 100~400 nm,由于分子中价电子经紫外照射时,电子从低能级跃迁到高能级,吸收相应波长的光,形成特有紫外吸收光谱<sup>[10]</sup>。由于各种食用油脂脂肪酸中的油酸、硬脂酸、亚麻酸和亚油酸含量各不相同,其各自的紫外光谱特征吸收峰也不尽相同,若在一种油中掺入其他品种的油脂,主成分含量发生变化,其紫外吸收光谱也会发生不同程度的变化,通过比对吸收光谱的差异,可以实现不同油脂掺兑的辨别。

Torrecilla 等<sup>[11]</sup>建立以紫外光谱法为基础的橄榄油鉴伪技术,成功将掺有精炼橄榄油或者果渣油的伪劣橄榄油区分出来,且当掺伪量低于 10%时,检验结果的平均方差小于 1%,准确性高、精

密度好、检测时耗少。胡月芳等<sup>[12]</sup>采用紫外光谱法对各掺假样品进行扫描,并用化学计量学方法对光谱数据进行分析,结合主成分分析法进行数据模型分析,有效辨别纯茶油与掺假花生油、掺菜籽油、掺假棕榈油的茶油样品。

## 2.2 红外光谱法

红外光谱常用的是在 0.78~1 000  $\mu\text{m}$  波长范围内近红外光谱,不同波段食用油中的不同组成化合物、官能团吸收了特征波长的红外光,由基态跃迁不同激发态,形成不同频率不同程度的吸收峰<sup>[13]</sup>,再结合数据处理方法,可反映被测物质的组成信息,并在一定范围内计算出被测物质组分的含量,实现对样品的定性定量测定。

GönülAkin 等<sup>[14]</sup>利用衰减全反射红外光谱 (attenuated total reflectance mid infrared, ATR-MIR),结合 PCA、LDA、软独立建模分类法 (soft independent modeling taxonomy, SIMCA) 和偏最小二乘回归 (partial least squares regression, PLSR) 等多元分析方法,利用特征波数区域对 33 种纯油和 96 种混合油进行定性和定量分析,品种检出限低于 5%。李淑娟等<sup>[15]</sup>采用近红外光谱 (near infra-red, NIR) 技术,结合 PLSR 定量分析模型,实现四元调和油组分的准确快速定量分析,相关系数可达 0.98 以上。

## 2.3 荧光光谱法

利用某些物质被激发光照射后所产生的、能够反映出该物质特性的荧光,以进行该物质的定性和定量分析,称为荧光分析。荧光定性定量分析与紫外可见吸收光谱法相似,都是荧光光谱峰的个数、位置、相对强度及轮廓进行分析<sup>[16]</sup>。荧光光谱法 (fluorescent spectroscopy, FS) 是利用不同种类的食用植物油成分具有的荧光特性,如橄榄油的荧光特征成分是叶绿素和类胡萝卜素,在遇到激发光时被激发跃迁到更高能级又回到稳定状态的过程中所放出的荧光,利用不同荧光特征成分的荧光光谱差异来实现食用油成分定性定量检测。

Hina A 等<sup>[17]</sup>使用葵花籽油对纯橄榄油进行掺兑,使用 350 nm 波长进行激发,利用 PCA 和 PLSR 分析处理获得荧光光谱的指纹图谱,结合化学计量学实现纯橄榄油中掺假物质进行鉴别和定量分

析。方晓明<sup>[18]</sup>等采用同步荧光光谱法对 20 种食用植物油和掺混的特级初榨橄榄油的荧光光谱图进行比较,结合 PLSR 分析,此法能够将特级初榨橄榄油与其他 17 种植物油明显地区分开来,掺兑量达 1%便可有效辨别。

## 2.4 太赫兹光谱法

太赫兹 (terahertz, THz) 辐射 (0.1~10 THz) 是频率介于微波和红外波段之间的电磁辐射,属于远红外和亚毫米波范畴。太赫兹波脉冲宽度在亚皮秒量级,作为物体成像的光源,其成像和光谱技术可以提供微波和 X 射线技术所不能提供的信息,光子能量和高时空相干性,包含分子转动和振动信息,通过分子的振动、转动能级可测得信号,以此反映出被测对象的物理、化学和结构信息<sup>[19-20]</sup>。

由于食用油和地沟油的吸收光谱存在差异,但波形非常相似,Zhan 等<sup>[21]</sup>以太赫兹光谱和数学方法为基础,采用 PCA 和支持向量机 (support vector machine, SVM) 分析法对食用油和地沟油进行辨别,识别精度可达到 100%。廉飞宇等<sup>[22]</sup>采用太赫兹时域光谱法 (terahertz time domain spectroscopy, THz-TDS) 研究 4 种食用油 (黑芝麻油、芝麻油、小磨香油和花生油) 在 0.2~1.6 THz 波段的延时特性和折射率特性,结合 PCA 和 SVM 分析法进行识别,结果表明此方法的正确率可达到 93%。

## 2.5 高光谱成像法

高光谱成像技术 (hyper-spectral image, HSI) 基于非常多窄波段的影像数据技术,它将成像技术与光谱技术相结合,探测目标的二维几何空间及一维光谱信息,获取高光谱分辨率的连续、窄波段的图像数据,综合运用空间图像数据信息和光谱技术,对被测物质进行“图谱结合”全面分析的检测技术,可用于各领域的无损检测<sup>[23]</sup>。不同种类食用油的透射值在某一波段有明显差异,所得到的透射值曲线亦不同,通过与合格食用油样品的高光谱透射值标准曲线构建数据库比对分析,可以判断待检测样品是否为掺假<sup>[24]</sup>。

Xie 等<sup>[25]</sup>采用近红外高光谱成像技术 (NIR-HSI) 无损鉴别芝麻油,分别扫描获得 4 个品种芝麻油在 874~1 734 nm 的高光谱图谱,以最小二乘

支持向量机 (least square-support vector machine, LS-SVM) 和线性判别分析 (linear discriminant analysis, LDA) 两个分类模型进行分析获得较好结果 (预测集分类率分别为 95.59% 和 98.53%)。郭毅<sup>[26]</sup>等利用反射光高光谱 DN 值进行聚类分析, 结合相关性最短距离法及内平方和距离法将油品分为 22 类, 实现精确区分样本中的各类油品。

## 2.6 拉曼光谱法

拉曼光谱 (raman spectroscopy, RS) 是在拉曼散射效应的原理基础上开发的光谱分析技术, 是一种散射光谱, 通过对与入射光频率不同的散射光谱进行分析以得到分子振动、转动方面信息, 并应用于分子结构研究的一种分析方法。食用油中特有的化学结构和衍生结构丰富, 通过对这些特征物质化学键及键能进行定性分析, 从而实现食用油中各组分含量的定量分析, 应用于食用油的掺假鉴别的领域<sup>[27]</sup>。

Georgouli 等<sup>[28]</sup>采用拉曼光谱法对被测样品进行扫描, 对获得的化学指纹光谱结合 k 近邻 (k-nearest neighbors, kNN) 算法模型分析, 可得出在特级初榨橄榄油中掺入榛子油的百分比。张燕君<sup>[29]</sup>等提出了一种基于激光拉曼光谱和人工蜂群智能优化支持向量回归机 (artificial bee colony-support vector machine for regression, ABC-SVR) 算法的快速定量检测三组分混和油中 3 种脂肪酸含量的方法, 实验结果表明预测值与真实值非常接近, 均方差均低于 0.002, 此法可用于对食用油掺伪分析。

## 3 电磁波谱法

### 3.1 核磁共振法

核磁共振技术 (nuclear magnetic resonance, NMR) 是指核磁矩不为零的原子核, 在外磁场作用下, 核自旋能级发生塞曼分裂 (zeeman splitting), 共振吸收某一特定频率射频辐射的物理过程。利用外加磁场对原子核进行能量激发后, 发生能级跃迁在给定的外加磁场中, 只吸收某一特定频率射频场提供的能量, 形成核磁信号, 不同原子都对应着不同频率的峰, 根据不同数量、位置和形态的吸收峰型判断出被检测物质分子的种类和状态, 以此推断其结构并计算含量<sup>[30-31]</sup>。

Zhang 等<sup>[32]</sup>采用核磁共振波谱应用于葵花籽、油菜籽、芝麻、大豆、花生、玉米和橄榄油等七种植物源的各种精制食用油分析, 对食用油中的油酸、亚油酸、亚麻酸、饱和脂肪酸及其碘值进行定量分析, 利用主成分分析法, 结合多元统计分析, 对其来源进行鉴别。郝景昊等<sup>[33]</sup>利用纯品菜籽油、玉米油、大豆油、花生油、棉籽油、葵花籽油、芝麻油、棕榈油等常见食用油的 <sup>1</sup>H NMR 谱中各信号峰的积分面积, 选取 2~3 组积分面积制作标准图建立谱库, 对 63 份样品进行 NMR 扫描, 谱图比对, 实现掺伪食用油准确判别, 最低可辨别量为 24 mL/L。

### 3.2 X 射线法

X 射线是波长范围在 0.001~100 nm 且能量很大的电磁波, 具有一定波长的 X 射线照射到结晶性物质上时, 因在结晶内遇到规则排列的原子或离子而发生散射, 散射的 X 射线在某些方向上相位得到加强, 从而显示与结晶结构相对应且特有的衍射现象。当照射待测样品时, 产生荧光和衍射效应, 由于不同样品组分使穿透射线衰减程度不同, 再结合相关分析方法, 通过对射线强度变化进行分析评价<sup>[34-35]</sup>。

Gisele 等<sup>[36]</sup>将 X 射线用于不同基质植物油的分类, 用 Rh 管作为 X 射线线源, 对玉米油、菜籽油、大豆、葵花籽油和橄榄油 (特级初榨橄榄油等) 进行分类, 评分图显示每种油有不同组分, 结合 PCA 对植物油样品进行快速分析归类。Li 等<sup>[37]</sup>提出了一种基于瑞利-康普顿散射强度比和有效原子序数的分析方法, 利用共聚焦能量色散 X 射线荧光和散射光谱法对植物油进行无损鉴别, 利用 X 射线荧光法测得的不可见光元素含量, 通过与瑞利-康普顿散射强度比和有效原子序数的标定曲线差值来计算出不同植物油组分含量, 从而实现种类辨别。

## 4 生物芯片技术

可视生物芯片技术 (biochip) 是将大量生物大分子, 如核酸、蛋白、多肽甚至组织切片、细胞等生物样品有序地固化于载体表面, 然后与已标记的待测生物样品中靶分子杂交, 杂交信号的强度可反映样品中靶分子的数量, 杂交信号再经

酶催化后,以厚度变化或颜色改变等途径经计算机数据库分析处理后实现可视化定性定量结果<sup>[38]</sup>。可视化芯片应用新的标记方法取代传统的荧光标记,而并借助相应的显色方法,使得实验结果能直接被肉眼所观察到,具有快速、可视、设备要求低等特点,广泛应用于各个领域<sup>[39]</sup>。

Li 等<sup>[40]</sup>建立了橄榄油、花生油、葵花油、芝麻油、菜籽油、玉米油、山茶油、大豆油和棕榈油等 9 种油料的液相芯片鉴别方法,经对相应食用油的验证,结果表明该方法能准确鉴别调和油中不同来源的品种,并能识别掺假植物油。张铭润<sup>[41]</sup>等制备了由聚二烯丙基二甲基氯化铵(PDDA)和环状糊精( $\alpha/\beta/\gamma$ 型,或混合型)

同时修饰的纳米金复合探针用于劣质油掺入正常油的检测,当劣质油勾兑比大于 5.0%时可准确识别,准确率达到 97%。

## 5 讨论

从模拟感官分析、光谱分析、电磁波谱分析和生物学特性等领域特性形成的快速检测方法,均有各自的特点。如表 1 所示,快速、准确、高效是模拟感官分析、光谱分析、电磁波谱分析和生物学特性等检测方法共同的特征,各检测方法主要特点比较相近,但因分析原理不同,以及检测仪器的关键核心部件材料、工艺等差异,各方法的适用性、精密度、灵敏度等关键方面仍存在较大差异。

表 1 食用植物油快速检测各方法的优缺点一览表

类别	方法	优点	缺点
模拟感官分析法	电子鼻	无需前处理;快速检测;实时分析;在线检测;可实现气味物质交叉作用的分析	设备成本高;维护保养苛刻;检测具有选择性及局限性,用于含有存在挥发性特征物质的检测;检测结果受样品状态和环境因素影响较大;不能批量检测
	电子舌	快速检测;实时分析;在线检测;可实现风味物质交叉作用的分析	设备成本高;维护保养苛刻;检测具有弱选择性及局限性;复杂样品需前处理;检测结果受样品状态和环境因素影响较大;不能批量检测
分子光谱分析法	紫外光谱法	设备简单,易于维护;方法操作简便、迅速;可批量连续检测	准确度、灵敏度相对不高;易受其他紫外吸收物质干扰;受样品状态限制,只能检测液态样品
	红外光谱法	样品无需前处理;设备简单,易于维护;分析速度快;不受样品物态限制;可实现无损检测和批量连续检测	灵敏度差,一般要求检测含量大于 1%;建模难度大
	荧光光谱法	设备简单,易于维护;选择性强;用量量少;方法简便;可批量连续检测	部分样品需进行一定前处理;荧光光强不高,持续的时间较短,易受某些离子干扰的影响,荧光会猝灭,实验速度必须要快;荧光易散射,准确度相对不高
	太赫兹光谱法	样品无需前处理;操作快速、简便;专属性高;特异性强;高透射性,信噪比高;带宽宽,信息量大;低能,灵敏度高;应用范围广;可实时、批量、无损、在线检测	仪器设备昂贵;维护保养复杂;分辨率不高;窄波谱短技术尚不成熟;可测量频谱范围小
	高光谱成像法	样品无需前处理;操作快速、简便;光谱信息连续;分辨率高;具有光谱和成像的双重功能;灵敏度高;应用范围广;可实时、批量、无损、在线检测	仪器设备昂贵;化学图像依赖成像系统,不利于实验数据处理;建模难度大
	拉曼光谱法	样品无需前处理;仪器操作快速、简单;测定时间短;灵敏度高;可无损、批量连续、在线检测	易受光学系统参数等因素影响;分析结果易受污染物影响
电磁波谱法	核磁共振法	操作容易、简单;分析时间短;专属性强;准确度高;可提供原子水平上的信息;可批量连续、在线检测	部分样品需进行前处理;仪器设备昂贵;维护保养复杂;灵敏度相对较低;样品制备易带来干扰
	X 射线法	所需样品少;无需前处理;操作容易、简单;分析时间短;可批量连续、无损、在线检测	设备昂贵;灵敏度不高;对吸收系数很大的试样检测受到一定的限制
生物芯片技术	可视生物芯片技术	设备简单;操作快速;特异性强;准确性高;分析时间短;可批量连续、在线检测	样品需进行前处理;需要消耗一定化学生物试剂;对操作的要求更高;技术操作繁杂;自动化程度低

## 6 总结与展望

综上所述,基于模拟感官分析、光谱分析、电磁波谱分析和生物芯片的快速检测方法均可用于

食用植物油组分的快速检测,且都实现准确、快速辨别掺入组分的定性定量分析效果。这些快速分析技术的共同之处是信号经不同技术采集后均需由合适的分析数据库比对模型进行分析处理,核

心在于样品数据库的构建,结果的准确性和精密性受样品预处理方法、信号采集方式选择和建模方法等多因素的共同影响,只有与检测样品匹配且数据库数据完整才能实现准确快速检测。在今后的发展中,将有越来越多的信号采集技术运用于食用植物油的快速检测,随着基础研究的不断深入和信息技术的不断完善,多通道、多参数、多容量的一体化在线快速检测技术将成为发展重点,必将形成全覆盖、深层次、多方位的食品监管体系,有力保障我国消费者的合法权益。

### 参考文献:

- [1] 王肇慈. 粮油食品品质分析(第二版)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000.
- [2] 林婵. 食用油掺假检测研究进展[J]. 现代食品, 2017, 22: 17-20.
- [3] 王亚雷, 贾文坤, 潘立刚, 等. 电子鼻技术在肉类品质应用中快速分析初探[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2): 419-424.
- [4] WEN S J, GANG L, ZHUO J J, et al. Advances in electronic nose development for application to agricultural products [J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(10): 2226-2240.
- [5] 鲁小利, 王俊. 仿生电子鼻在芝麻油掺伪检测中的应用研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(6): 75-77.
- [6] BOUGRINI M, TAHRI K, HADDI Z, et al. Detection of adulteration in argan oil by using an electronic nose and a voltammetric electronic tongue[J]. Journal of Sensors, 2014, 1-10.
- [7] 刘雅婧, 袁建, 鞠兴荣, 等. 电子舌快速检测食用植物油掺伪[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(10): 2339-2344.
- [8] OLIVERI P, BALDO M A, DANIELE S, et al. Development of a voltammetric electronic tongue for discrimination of edible oils[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2009, 395(4): 1135-1143.
- [9] 彭星星. 核桃油氧化稳定性及其鉴别技术研究[D]. 西北农林科技大学, 2015.
- [10] 张成飞. 植物油模式识别与掺混量检测方法的研究[D]. 吉林大学, 2009.
- [11] TORRECILLA J S, ROJO E, DOMÍNGUEZ J C, et al. A novel method to quantify the adulteration of extra virgin olive oil with low-grade olive oils by UV-Vis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58: 1679-1684.
- [12] 胡月芳, 黄志强, 王灿玲. 紫外光谱法结合化学计量法鉴别茶油掺假的研究[J]. 广东农业科学, 2015, 23: 112-116.
- [13] 陆婉珍. 现代近红外光谱分析技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [14] GÖNÜL A, ŞÜKRIYE N, KARUK E, et al. Chemometric classification and quantification of cold pressed grape seed oil in blends with refined soybean oils using attenuated total reflectance-mid infrared (ATR-MIR) spectroscopy[J]. Food Science and Technology, 2019, 100: 126-137.
- [15] 李淑娟, 卞希慧, 李倩, 等. 基于近红外光谱的四元调和食用油定量分析[J]. 天津科技大学学报, 2018, 33(3): 18-24.
- [16] 程宁宁, 贾颖萍, 尹静梅. 现代分析仪器检测油脂过氧化值的研究进展[J]. 食品工业, 2017, 38(6): 266-269.
- [17] HINA A, MUHAMMAD S, MUHAMMAD R A, et al. Validation of fluorescence spectroscopy to detect adulteration of edible oil in extra virgin olive oil (EVOO) by applying chemometrics[J]. Applied Spectroscopy, 2018, 72 (9): 1371-1379.
- [18] 方晓明, 张欣, 冯春野, 等. 油脂同步荧光光谱检测及橄榄油掺假鉴别[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(9): 112-118.
- [19] 聂美彤, 徐德刚, 王与焱, 等. 基于衰减全反射式太赫兹时域光谱技术的食用油光谱特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2016-2020.
- [20] 刘丽萍, 王煜斐, 张亚洲, 等. 太赫兹光谱技术检测水分及水合作用的研究进展[J]. 分析化学进展, 2018, 8(1): 1-10.
- [21] ZHAN H, XI J, 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.
- [22] 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(7): 69-73.
- [23] 郭昊蔚, 李春霖, 龚淑英, 等. 光谱技术在茶叶理化指标检测中的研究进展[J]. 2019, 45(1): 9-12.
- [24] 张慧, 毛润乾, 郑基焕, 等. 地沟油高光谱透射检测分析[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(5): 31-32.
- [25] XIE C Q, WANG Q N, HE Y. Identification of different varieties of sesame oil using near-infrared hyperspectral imaging and chemometrics algorithms[J]. Plos One, 2014, 9(5): 98522-98522.
- [26] 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.
- [27] 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[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016.
- [28] GEORGOULI, KONSTANTIA, MARTINEZ D R, et al. Continuous statistical modelling for rapid detection of adulteration of extra virgin olive oil using mid infrared and Raman spectroscopic data[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 735-742.
- [29] 张燕君, 张芳草, 付兴虎, 等. 基于 ABC-SVR 算法的拉曼光谱检测混合油脂脂肪酸含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(7): 2147-2152.
- [30] KLEINBERG R L, JACKSON J A. An introduction to the history of NMR well logging[J]. Concepts in Magnetic Resonance, 2001, 13(6): 340-342.
- [31] 张琰. 基于核磁共振技术的食用植物油成分检测与品质鉴别研究[D]. 厦门大学, 2017.
- [32] ZHANG Y, ZHAO Y, SHEN G. NMR spectroscopy in conjugation with multivariate statistical analysis for distinguishing plant origin of edible oils[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2018, 69: 140-148.
- [33] 郝景昊, 李中贤, 何金环, 等. 食用油掺伪的  $^1\text{H}$  NMR 判别[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 131-136.
- [34] 刘粤惠, 刘平安. X 射线衍射分析原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [35] 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.
- [36] GISELE G B, LUIZ C M P, MARIA I M S. A new application of X-ray scattering using principal component analysis -classification of vegetable oils[J]. Analytica Chimica Acta, 2005, 539: 283-287.
- [37] LI F, LIU Z, SUN T. Authentication of vegetable oils by confocal X-ray scattering analysis with coherent/incoherent scattered X-rays [J]. Food Chemistry, 2016, 210: 435-441.
- [38] 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.
- [39] 赵玉佳, 文心田, 马锐, 等. 可视化芯片显色技术在病原学检测中的研究进展[J]. 中国预防兽医学报, 2017, 39(2): 159-162.
- [40] LI Y, WU Y, HAN J, et al. Species-specific identification of seven vegetable oils based on suspension bead array[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(9): 2362-2367.
- [41] 张铭润, 白瑞樱, 王弘, 等. 一种食用油质量的快速检测方法[J]. 食品工业科技, 2015, 36(22): 67-70. 