

茶籽油掺杂辨识指标研究进展

张笑斐¹ 彭新颜²

(1. 山东商务职业学院粮油食品学院, 山东 烟台 264043; 2. 烟台大学生命科学学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 茶籽油因其高营养价值和经济价值, 常被掺入廉价油脂, 同时其品质也受到品种、产地及提取工艺等因素的影响。文章系统综述了茶籽油掺伪检测技术体系的主要分析指标, 重点探讨了其感官特性、理化特性、谱学识别特征及与其他方法的比较。并从辨识指标、采集手段及判别逻辑的综合视角出发, 概述了以光纤光谱仪为代表的便携化紫外光谱仪器在技术性能与应用范围方面的研究进展。

关键词: 茶籽油; 掺杂; 辨识指标; 谱学识别特征; 替代方法; 便携化紫外光谱仪

Research progress of adulteration identification indexes for camellia seed oil

ZHANG Xiaofei¹ PENG Xinyan²

(1. College of Grain, Oil and Food, Shandong Business Institute, Yantai, Shandong 264043, China;

2. School of Life Sciences, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract: Camellia seed oil, valued for its nutritional and economic benefits, is frequently adulterated with lower-grade oils. Additionally, its quality is influenced by multiple factors, including cultivar, geographical origin, and extraction techniques. This review systematically evaluates key analytical indexes for camellia seed oil authentication, focusing on sensory characteristics, physicochemical characteristics, spectral recognition characteristics, and comparison with different methods. From an integrated perspective of identification indexes, collection methods, and identification logic, this paper reviews the research progress of portable UV spectrometers (particularly fiber-optic-based systems) in technical performance and application scope.

Keywords: camellia seed oil; adulteration; identification index; spectral recognition characteristics; alternative method; portable UV spectrometer

近年来, 科学工作者不断探索食用油脂的质量鉴别和认证方法, 并针对分析鉴别技术进行了深入研究和实践, 旨在解决日益严峻且广泛的油脂掺假辨识难题^[1]。茶籽油中富含不饱和脂肪酸(>90%), 尤其是油酸(含量高达74%~87%), 同时还含有一定量的亚油酸^[2]。此外, 茶籽油中还存在角鲨烯、植物甾醇(β -谷甾醇、菜油甾醇、豆甾醇)、多酚类物质以及脂溶性维生素等多种天然抗氧化成分, 使其具有降低甘油三酯和胆固醇、预防心脏病、动脉硬化等功效^[3]。

为了维护茶籽油的优良品质、保障消费者权益以及推动公平交易, 有必要运用快速、精确的技术手段对茶籽油进行质量鉴定^[4]。就物理分析而言, 介电常数以及电导

率测量是一种检测造假茶籽油的简单、快速和廉价的技术^[5]。作为目前官方使用的茶籽油认证方法, 气相色谱技术可以根据纯茶籽油的现行标准, 以高灵敏度提供更准确的信息来量化特定标记物, 包括脂肪酸成分、植物甾醇以及挥发性化合物, 而色谱方法通常涉及繁琐且具有破坏性的样品制备, 使其耗时且污染环境^[6]。

为了克服以上缺点, 光谱分析(如近/中红外光谱、傅立叶变换拉曼光谱、紫外光谱以及荧光光谱等)成为近年来常见的分析方法^[1,4]。目前, 有关食用油掺杂的研究较多, 虽然掺杂检测技术路线相似, 但由于不同油脂的成分构成及微量成分含量和比例存在较大差异, 使得辨析特征物质和方法的适用性仍有明显不同。研究拟全面概述

基金项目: 山东省创新平台项目(编号: 2023981); 山东省自然科学基金面上项目(编号: ZR2020MC214)

通信作者: 张笑斐(1988—), 女, 山东商务职业学院讲师, 硕士。E-mail: 2899345178@qq.com

收稿日期: 2024-11-11 **改回日期:** 2025-07-12

引用格式: 张笑斐, 彭新颜. 茶籽油掺杂辨识指标研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(11): 209-214.

Citation: ZHANG Xiaofei, PENG Xinyan. Research progress of adulteration identification indexes for camellia seed oil[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 209-214.

当前用于茶籽油认证的掺杂辨识指标的研究进展,包括感官特征、物理化学特征以及谱学特征,以期为茶籽油品质分析及其快速辨识技术的全面了解提供参考依据。

1 菜籽油掺杂辨识指标

1.1 感官特征

感官特征是评估茶籽油品质的重要指标,主要包括颜色、气味和味道等^[6-7]。虽然国家标准对茶籽油的气味和味道有所描述,但这些感官特征容易受到测试者的感官敏锐度、辨别能力及主观影响,难以满足对茶籽油精确辨识的要求^[7]。

1.2 物理特征

物理特征通常通过各类油脂的物理属性参数来表征,涵盖了光学特性参数、介电常数、电导性等,这些性质能够在一定范围内反映茶籽油的化学构成^[8]。管金伟等^[9]采用竞争性自适应重加权算法(CARS)以及无信息变量剔除算法(UVE)提取特征信息后,利用吸收系数和约化散射系数建立的模型进行鉴别,其准确率高达95%以上。

感官特征和物理特征作为基础的掺杂鉴别指标,对人员和仪器的要求较低,仅可初步判断茶籽油的掺杂情况。

1.3 化学特征

基于油品化学特征研究较为认可的分析方法为仪器分析方法,常见于大型分析设备,如气相色谱和核磁共振等。不同油品在脂肪酸种类和组成上存在显著差异,且这种差别是内在的、难以改变的特征;茶籽油中富含棕榈酸(C_{16:0}, 8.37%~8.92%)、硬脂酸(C_{18:0}, 1.96%~2.64%)、油酸(C_{18:1}, 约80%)和亚油酸(C_{18:2}, 7.47%~9.19%)。Dou等^[8]基于脂肪酸谱和数据驱动软独立建模类比分析(DD-SIMCA)、正交偏最小二乘(OPLS)等分类方法建立了茶籽油的认证模型,且脂肪酸谱建立的模型具有更高的敏感性和特异性(100%),表明所有山茶油样品均被准确检测。此外,甘油三酯(TAGs)在植物油的生理功能中起着重要作用,也是常用的鉴别特征目标物。Mo等^[10]采用高效液相

色谱—二极管阵列检测器/电喷雾电离质谱法鉴定和定量茶籽油中16个TAGs,并结合化学计量学方法对不同地区的茶籽油进行全面分类。

茶籽油中高角鲨烯含量较高(122.02~751.64 mg/kg);此外,采用GC-MS方法检测显示,植物甾醇主要包括豆甾-7-烯-3-醇、桦木醇、羊毛甾醇、香树脂醇、羽扇豆醇、谷甾醇、环阿屯醇等;此外,还含有许多其他重要的生物活性成分,包括多酚类物质(如苯甲酸、对羟基苯甲酸、肉桂酸、儿茶素和柚皮素等)、生育酚(α -生育酚、 γ -生育酚、 δ -生育酚)、类胡萝卜素(类胡萝卜素、 β -胡萝卜素和叶黄素)等,这些化学特征为植物油认证的潜在标记^[11]。Shi等^[12]通过脂肪酸比例、生育酚组成及含量,结合层次聚类分析、偏最小二乘判别分析与类软独立建模(SIMCA)等化学计量学方法,验证了茶籽油与玉米油、菜籽油、米糠油等的掺假情况。该法对掺杂样品(5%~100%)的正确分类率在90.00%以上,表明多种分类方法互补应用于茶籽油鉴定具有可行性和较高准确性。茶籽油中各类化合物的样品制备及测定方法见表1。

1.4 谱学识别特征

化学特征指标是根据仪器对确定的目标成分进行精确测定,并结合茶籽油中目标成分的正常范围判断掺杂情况。此方法通常需用到大型设备,但其思路简单、目的明确,因此操作难度适中。然而,对于未知成分的鉴别往往采用谱学特征辨识,包括红外光谱分析、傅里叶变换拉曼光谱、核磁共振检测以及荧光分析等(见表2),且常与化学计量学方法结合来实现辨识的目的^[20]。谱学识别特征需要专业的数据分析人员和大量的试验数据拟合模型,因此,谱学识别指标要求更高,且更适用于复杂的茶籽油掺杂问题。

茶籽油掺杂的化学本质是将来来源不同却具有高度化学相似性的甘油三酯分子混和,构成茶籽油的宏量成分并在外观和主要理化性质上表现出一致性。茶籽油中最常见的掺假油为大豆油,其次是菜籽油、葵花籽油、玉米

表1 茶籽油中各类化合物的样品制备和测定技术^[13-15]

Table 1 Sample preparation and determination techniques of various compounds in camellia seed oil

分析物	设备	方法
脂肪酸	GC	向样品中加入正己烷,在氢氧化钾/甲醇溶液中酯化
角鲨烯和甾醇	GC-MS	样品中加入5 α -胆碱-3 β -醇(内标)和正己烷,85℃下KOH—CH ₃ OH皂化1 h,冷却后加入饱和氯化钠,用正己烷提取不皂化物,用水洗涤,向正己烷层中加入无水硫酸钠,40℃旋转蒸发,溶解于正己烷中
多酚类物质	分光光度计	加入正己烷,上载于C ₁₈ 固相萃取(SPE)柱,用正己烷—乙酸乙酯(体积比9:1)和甲醇洗涤,氮气流干燥,甲醇—水(体积比1:1)再溶解,加入福林酚试剂和7.5% Na ₂ CO ₃ 溶液,暗处保存,测定765 nm处吸光度
α -生育酚	HPLC	溶解至己烷中
生育酚、类胡萝卜素、甾醇	LC-MS/MS	对样品进行超声处理,加入水和正己烷(体积比1:1),用己烷提取不皂化物,用10%乙醇/水洗涤组合己烷馏分至中性
挥发性化合物	GC-MS	固相微萃取法(SPME)纤维萃取

表2 当前茶籽油的掺杂案例和鉴定方法^[16-19]

Table 2 Adulteration cases and identification methods for camellia seed oil

掺杂油	设备	化学计量学方法
大豆油	中红外光谱衰减全反射+ 光纤漫反射—近红外光谱	类类比的软独立建模、偏最小二乘法
大豆油	GC-MS	
玉米油	电子鼻	主成分分析、线性判别分析, 人工神经网络
大豆油、玉米油	近红外光谱	偏最小二乘法
大豆油、葵花籽油、花生油	时间分辨发射荧光	平行因子分析、人工神经网络
大豆油、花生油、菜籽油	LC-MS/MS	
葵花籽油、玉米油、花生油	近红外光谱	偏最小二乘法
葵花籽油、玉米油、菜籽油	质子核磁共振	主成分分析潜在结构判别分析的正交投影、偏最小二乘法
大豆油、花生油、葵花籽油	激发发射矩阵荧光光谱	平行因子分析-线性判别分析、N维偏最小二乘法, 平行因子分析—偏最小二乘判别分析, 双向二维线性判别分析、N维偏最小二乘法
大豆油、葵花籽油、菜籽油、芝麻油、米糠油	傅立叶变换—拉曼光谱仪	
芝麻油、葵花籽油、玉米油、花生油和菜籽油	差示扫描量热法	逐步多元线性回归
纯茶籽油、非纯茶籽油	近红外光谱	主成分分析、层次聚类分析、根基函数神经网络、判别分析
不同氧化时间下的茶籽油	荧光光谱	主成分分析
茶籽油、橄榄油	离子迁移谱法	随机森林算法
菜籽油、玉米油、葵花籽油、芝麻油、特级初榨橄榄油	GC-MS	主成分分析、随机森林算法
大豆油、菜籽油、花生油、芝麻油、玉米胚芽油	GC-MS	遗传算法—支持向量机、多距离分类法、线性判别分析

油。常见的计算学方法主要包括PCA、HCA、LDA、PLS-DA、SIMCA、RF以及SVM,这些分析技术旨在识别样本间的相似性和挖掘其潜在的关联模式。

1.4.1 质谱法 质谱法是通过检测油样中各种复杂成分所产生离子的形成和质荷比,为不同食用油的定性和定量分析提供准确的信息^[21]。当与色谱技术联用时,色谱—质谱联用技术能够同时对多种目标化合物进行定性和定量分析,具有较高的分子特异性^[21]。Jia等^[22]采用二维气相色谱和四极杆质谱和顶空—气相色谱—离子迁移谱为区分特级初榨茶籽油、初榨茶籽油、芳香茶籽油的57种气味提供了指纹信息,其中(*E,E*)-2,4-庚二烯醛、(*E,E*)-2,4-壬二烯醛和柠檬烯为初榨茶籽油中的芳香活性化合物,而糠醛3-乙基-2,5-二甲基吡嗪为芳香茶籽油中烘烤气味和坚果气味的主要来源。Hu等^[23]采用UPLC-QTOF-MS技术结合化学计量学对掺杂菜籽油、花生油和大豆油的茶籽油进行了鉴定,所建立的OPLS-DA和OPLS-DA预测模型在定性和定量分析掺入5%其他油的山茶油中具有高度准确性,说明组学技术在掺杂研究中具有巨大的潜力。

1.4.2 红外光谱 作为最广泛使用的振动光谱技术之一,红外光谱可以给出具有以下化学键的每个化合物的唯一信息,即O—H、N—H、C=O和C—H,而近红外光谱对N—H、O—H、C—H和S—H官能团更为敏感^[24]。Du等^[25]基于现场近红外光谱和化学计量学,实现了对廉价

油脂(如玉米油、菜籽油和葵花籽油)掺杂茶籽油的实时、定量检测。该研究经过光谱一阶求导预处理、多元散射校正、标准正态变量变换和Savitzky-Golay平滑等预处理方法优化后,采用偏最小二乘法判别分析成功识别了茶籽油中掺杂的廉价油脂,准确率高达96.7%。Chen等^[26]采用竞争自适应重加权抽样(CARS)、弹性成分回归(ECR)和偏最小二乘(PLS)结合傅里叶变换近红外光谱仪,对掺杂不同比例的5种廉价油品的60份油样进行扫描,建立的近红外光谱定量检测模型能够快速、实时地检测掺假情况,其校正均方根误差和预测均方根误差均<0.04。近红外技术与CARS或ECR技术相结合,是快速检测其他植物油掺假的可行方法。

1.4.3 拉曼光谱 拉曼光谱作为另一种非破坏性、高灵敏度和可在线检测的光谱技术,是一种基于散射光效应和分子振动来获得不同化合物和混合物的单个分子结构的理想替代方案^[27]。与傅立叶变换相结合,傅立叶变换拉曼光谱有助于消除背景荧光,从而获得更好的分子振动信息。Wu等^[28]将拉曼光谱与3种深度学习模型(CNN-LSTM、改进的AlexNet和ResNet)结合,提出了一种同时定量分析多组分调和油的新方法,每种油的决定系数均>0.995且预测均方误差<2%,此结果为鉴定错误标记的调和油提供了一种快速准确的方法^[28]。

1.4.4 荧光光谱 由特征激发波和发射波长组成的荧光光谱,已成为分析具有抗氧化活性及生物活性的共轭结

构荧光成分的重要技术。在食品及天然产物检测领域,该技术常用于检测如维生素 E 和酚类化合物等具有抗氧化活性和生物活性的化合物^[29]。Hu 等^[30]主要通过对经 SNV 标准化处理的近红外光谱和荧光光谱数据进行融合,通过构建 OPLS 模型可以快速分析油茶中掺杂的廉价植物油,其灵敏度和特异性分别为 0.954 和 0.91,具有较强的识别能力。前表面荧光光谱法已被用于获得掺杂茶籽油样品的激发发射矩阵(EEM)荧光光谱和发射荧光光谱。Tang 等^[29]通过检测 5 种纯油和 109 种掺假油样品,发现掺假茶籽油的荧光强度与添加油的体积百分比之间呈强线性关系($R^2>0.99$),且检出限和预测值均方根误差分别为 1% 和 5.66%。此外,发射荧光光谱数据的 PCA 分析表明,其还有可能准确地判断来自不同地理来源的茶籽油。

1.4.5 紫外光谱 紫外可见光光谱可表征食用油对紫外光的吸收特征,该特征主要由食用油分子中 π 电子的共轭程度、分子内双键数量等结构因素决定。因此,不同种类的食用油会表现出不同的紫外可见光光谱。油脂的脂肪酸组成,特别是不饱和脂肪酸中烯键的位置和数量,是决定不同类型油脂营养价值和加工性能的关键因素。此外,油脂的脂肪酸组成,尤其是不饱和脂肪酸上的烯键位置及数量是不同种类油脂营养价值和加工性能的决定性因素,也将赋予其特异性的化学活性。余盖文等^[31]建立了基于动态紫外光谱和多指标聚类分析的异种油脂掺杂辨识方法,通过利用 0.1 mm 光程薄膜样品池采集油品在 130 °C 镍催化条件下 10 min 内的动态紫外光谱,可拟合 272, 282, 305, 320 nm 处吸光度动力学方程,进而计算吸光度增量,并以此为特征指标进行聚类分析可确定油品类别。

表 3 紫外吸收光谱测定化学组分的相关参数
Table 3 Relevant parameters of chemical components determined by ultraviolet absorption spectroscopy

组分	吸收波长/ nm	百分吸光 系数/%	组分	吸收波长/ nm	百分吸光 系数/%
甾醇	190	10 000	乙烯	310~330	50~100
二烯	220~230	10 000	α -二酮	280	20
三烯	265~270	10 000	α -酮醛	282	19
四烯	310~320	10 000	α -酮酸	210	400
酮醛- α, β	220~250	10 000			

1.4.6 核磁共振波谱技术 核磁共振波谱技术(^1H NMR、 ^{13}C NMR 和 ^{31}P NMR)已成为分析多组分的重要技术,在分子水平上具有高精度和可重复性的特点^[32]。Shi 等^[32]采用质子核磁共振(^1H NMR)和化学计量学方法成功鉴别了 3 种不同廉价植物油在茶籽油中的掺假情况。利用 PLS-DA 模型预测了茶籽油的掺假水平,并通过变量重要性投影(VIP)评分筛选出潜在的关键标记,且 PLS 模

型准确率 $>90\%$ 。将红外光谱、拉曼光谱、荧光光谱和核磁共振波谱等多种谱学技术与化学计量学方法相结合,可有效用于茶籽油的真伪鉴定。上述方法能够高精度分辨茶籽油与市场上常见的掺假油,包括大豆油、葵花籽油、芝麻油、玉米油、花生油、菜籽油和米糠油。

1.4.7 其他特征 E-nose、IRMS、DSC、IMS、DNA 等其他重要的分析方法已被用于茶籽油的鉴定,具有较大的潜力^[33]。Li 等^[34]使用自行开发的带有 8 个传感器的电子鼻平台来辨识不同比例菜籽油、大豆油和玉米油掺杂茶籽油,通过采用 LDA、SV 和 RF 方法以及使用修正前和修正后的数据集构建定性识别模型,并采用 PLSR 和 BPNN 进行定量预测。结果表明,定性和定量模型均显著提高了预测性能,准确度由 88.67% 提高到 98.67%,且 RF 和 BPNN 模型在定性和定量检测方面分别优于其他模型。植物油具有独特的 DNA 片段,因而对茶籽油的 DNA 片段进行鉴定分析,可筛选出 3 个特征 DNA 序列,其仅能以茶籽油提取的 DNA 为模板进行 PCR 扩增的特异性 DNA,因而可依次建立掺假比例与 qPCR Ct 值之间的计算模型,可快速鉴定茶籽油掺假^[35]。热重分析是常用的分析手段,不同油脂的成分具有较大差异,其形成的热重曲线可能存在一定差异。采用 DSC 法对茶籽油中掺入的芝麻油、葵花籽油、花生油、玉米油和菜籽油进行分析,掺杂后形成的热重曲线有一定差异,其也可用于茶籽油鉴定^[36]。风味物质是油脂的主要微量成分,可采用顶空-气相色谱-离子迁移谱结合 PCA 分析法分析不同品种茶籽油风味物质,其风味物质主要由醛类、酮类、杂环类、醇类、酯类和酸类组成。Fang 等^[15]通过相似性分析建立了不同山茶品种的风味指纹图谱,其也可作为茶籽油品种鉴定的标准图谱。表 4 总结了用于茶籽油鉴定的各种分析方法的优缺点。

2 结论与展望

目前,茶籽油因其高营养价值,尤其是富含不饱和脂肪酸等有益健康成分,而受到全世界尤其是中国消费者的广泛认可。但在当前市场中,茶籽油常常被掺杂相对廉价的植物油,如大豆油、花生油和葵花籽油等。茶籽油掺杂辨识技术体系可采用以下流程:① 选择可靠的辨识指标;② 选择稳定且可临场化的数据采集手段;③ 选择判别逻辑性强的方案。现有的茶籽油辨识技术所选用的感官、物理及化学特征指标,由于其分辨能力有限,且可能因精炼加工处理而被削弱甚至去除,因此在茶籽油掺杂中的应用具有一定的偶然性,导致基于这些成分的辨识指标缺乏可靠性与稳定性。只有油脂本身的宏量化学组分(甘油三酯、脂肪酸)及其衍生物(共轭脂肪酸、甘油三酯聚合物等)才是影响油脂综合特性的核心指标,且这些成分在油脂中必然存在,因此可作为可靠且通用的辨识指标。针对茶籽油化学组分和谱学信号的采集或定量表征通常使用液相色谱、气相色谱以及红外光谱等复杂

表 4 茶籽油鉴别中不同分析方法比较^[18,33]

Table 4 Comparison of different analytical methods for camellia seed oil identification

设备	优点	缺点
GC-MS	官方的方法,高灵敏度和精确度 专一性强	样本提取耗时、消耗大量有机溶剂 样本销毁、化学分析复杂
LC-MS	精密度高,重复性好,高分辨率 高度专一性	样品提取耗时、消耗大量溶剂和有毒试剂、样本 销毁
NIR/MIR	最低限度的样品制备 节省时间和成本、样品非破坏性	数据分析耗时
荧光光谱	最小样品制备、节省时间和成本 非破坏性、易于使用	数据分析耗时
傅里叶变换拉曼光谱	最小样品制备、低成本、非破坏性、高灵敏度、允许在线检 测、提供丰富的定量和定性信息、操作简单	数据分析耗时
¹ H NMR	非破坏性、重复性高、提供范围广泛的定性和定量信息	价格昂贵,信号重叠,需专业操作人员
DCS	易于操作、分析速度快、环保	样品提取耗时,仅用于定性分析
电子鼻	高灵敏度,简单、快速、环保	市面上可供选择的传感器较少,笨重
IRMS	所需样本数量较少、高精度	不适用于具有相似同位素的样品
IMS	高灵敏度,简单、便携	低分辨率
DNA	高特异性和稳定性、可重复性	样本提取和数据分析耗时,高成本,技术上具有 挑战性
感官特性和物理特性	易于使用、低成本	耗时、重复性低

分析仪器,但仪器成本昂贵,且操作繁复,因此难以推广应用于茶籽油的现场快速分析和评判。而紫外分光光度计不仅具有成本低廉和普及度高的特性,还可以快速采集信息,且能够高灵敏地表征脂肪酸中烯键的多种化学行为。此外,以光纤光谱仪为代表的便携化紫外光谱仪近年来快速发展与普及,为此类技术应用于生产、流通、销售和应用等各阶段的掺杂防控提供了良好的应用基础和技术支持。

参考文献

[1] SCHWARZ A N, ZÜLLIG T, SCHICHER M, et al. Securing food authenticity by translating triacylglycerol profiles of edible oils into a versatile identification method for pumpkin seed oil adulteration[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141467.

[2] DENG X Z, WEI Y Y, JIANG S, et al. Recent advances in the application of tea tree oil in the storage of fruit and vegetables [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 219: 113260.

[3] JOLLY A M, SIJISHA K S, MISHRA V, et al. Exploratory studies of tea seed & tea fruit shell (*Camellia sinensis* (L) O. Kuntze for their value addition[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 219: 119086.

[4] WANG J H, QIAN J J, XU M T, et al. Adulteration detection of multi-species vegetable oils in camellia oil using Raman spectroscopy: comparison of chemometrics and deep learning methods[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141314.

[5] WU M F, LI M M, FAN B, et al. A rapid and low-cost method for detection of nine kinds of vegetable oil adulteration based on 3-D fluorescence spectroscopy[J]. LWT-Food Science and

Technology, 2023, 188: 115419.

[6] 葛艳争, 孙晓雪, 安永强, 等. 基于气相色谱—离子迁移谱、感官、电子鼻分析不同贮藏时间辣椒油风味成分[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 12-21.

GE Y Z, SUN X X, AN Y Q, et al. Flavor components of chili oil with different storage durations based on gas chromatography-ion mobility spectrometry, sensory evaluation, and electronic nose analysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 12-21.

[7] SONG D, DONG K, LIU S Y, et al. Research advances in detection of food adulteration and application of MALDI-TOF MS: a review[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 140070.

[8] DOU X J, WANG X F, MA F, et al. Geographical origin identification of camellia oil based on fatty acid profiles combined with one-class classification[J]. Food Chemistry, 2024, 433: 137306.

[9] 管金伟, 李大鹏, 龚中良, 等. 茶油鉴别光学特性参数的对比分析[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 30-36.

GUAN J W, LI D P, GONG Z L, et al. Comparative analysis of optical characterization parameters for tea oil forensics[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 30-36.

[10] MO L Y, QIAN J Q, LI Q, et al. Quality control of camellia oil based on HPLC fingerprinting techniques combined with chemometric methods for triglycerides[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2023, 125(11): 2200212.

[11] TANG X Y, JIANG Y, GUAN J H, et al. Characterization and discrimination of camellia oil varieties according to fatty acid, squalene, tocopherol, and volatile substance contents by chromatography and chemometrics[J]. European Food Research and Technology, 2024, 250(1): 151-165.

- [12] SHI T, WU G C, JIN Q Z, et al. Camellia oil adulteration detection using fatty acid ratios and tocopherol compositions with chemometrics[J]. Food Control, 2022, 133: 108565.
- [13] ZHANG H H, GAO P, MAO Y N, et al. Physicochemical study of Camellia oleifera Abel. seed oils produced using different pretreatment and processing methods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 173: 114396.
- [14] WEI Z, YANG K Z, GUO M M, et al. The effect of thermal pretreatment processing on the distribution of free and bound phenolics in virgin Camellia oleifera seed oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 161: 113349.
- [15] FANG Z Y, LI G Z, GU Y, et al. Flavour analysis of different varieties of camellia seed oil and the effect of the refining process on flavour substances[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 170: 114040.
- [16] 管照奕珠, 方芳, 王耀耀, 等. 电子鼻技术结合化学计量学快速鉴别掺假茶籽油[J]. 食品与机械, 2023, 39(6): 31-36, 179.
- GUAN ZHAO Y Z, FANG F, WANG Y Y, et al. Rapid identification of adulterated camellia seed oil by nose combined with chemometrics[J]. Food & Machinery, 2023, 39(6): 31-36, 179.
- [17] FAROOQ S, AHMAD M I, ALI U, et al. A review of advanced techniques for detecting the authenticity and adulteration of camellia oil[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2024, 101(11): 1 209-1 227.
- [18] KUANG J H, LUO N N, HAO Z Q, et al. NI-Raman spectroscopy combined with BP-Adaboost neural network for adulteration detection of soybean oil in camellia oil[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(4): 3 208-3 215.
- [19] HAN J X, SUN R X, ZENG X Y, et al. Rapid classification and quantification of camellia (*Camellia oleifera* Abel.) oil blended with rapeseed oil using FTIR-ATR spectroscopy[J]. Molecules, 2020, 25(9): 2 036.
- [20] HUO X S, CHEN P, LI J Y, et al. Commentary on the review articles of spectroscopy technology combined with chemometrics in the last three years[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2024, 59(4): 423-482.
- [21] AI F F, BIN J, ZHANG Z M, et al. Application of random forests to select premium quality vegetable oils by their fatty acid composition[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 472-478.
- [22] JIA X, ZHOU Q, HUANG D, et al. Insight into the comparison of key aroma-active compounds between camellia oils from different processing technology[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137090.
- [23] HU Q, ZHANG J K, XING R R, et al. Integration of lipidomics and metabolomics for the authentication of camellia oil by ultra-performance liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry coupled with chemometrics [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131534.
- [24] MOUSA M A A, WANG Y Y, ANTORA S A, et al. An overview of recent advances and applications of FT-IR spectroscopy for quality, authenticity, and adulteration detection in edible oils[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(29): 8 009-8 027.
- [25] DU Q W, ZHU M T, SHI T, et al. Adulteration detection of corn oil, rapeseed oil and sunflower oil in camellia oil by *in situ* diffuse reflectance near-infrared spectroscopy and chemometrics[J]. Food Control, 2021, 121: 107577.
- [26] CHEN H, LIN Z, TAN C. Fast quantitative detection of sesame oil adulteration by near-infrared spectroscopy and chemometric models[J]. Vibrational Spectroscopy, 2018, 99: 178-183.
- [27] KRYSA M, SZYMAŃSKA-CHARGOT M, ZDUNEK A. FT-IR and FT-Raman fingerprints of flavonoids: a review[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133430.
- [28] WU X J, ZHANG X, DU Z R, et al. Raman spectroscopy combined with multiple one-dimensional deep learning models for simultaneous quantification of multiple components in blended olive oil[J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137109.
- [29] TANG C, SHEN Q, SHAO S J, et al. Quality authentication of camellia (*Camellia oleifera* Abel.) oil based on fluorescence spectroscopy[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 136: 106690.
- [30] HU O, CHEN J, GAO P F, et al. Fusion of near-infrared and fluorescence spectroscopy for untargeted fraud detection of Chinese tea seed oil using chemometric methods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(5): 2 285-2 291.
- [31] 余盖文, 洪梦佳, 黄庆德, 等. 食用油脂掺杂辨识指标的分析探讨[J]. 中国油脂, 2019, 44(4): 91-95.
- YU G, HONG M, HUANG Q, et al. Discrimination characteristics of edible oil adulteration[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(4): 91-95.
- [32] SHI T, ZHU M T, CHEN Y, et al. ¹H NMR combined with chemometrics for the rapid detection of adulteration in camellia oils[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 308-315.
- [33] SHI T, WU G C, JIN Q Z, et al. Camellia oil authentication: a comparative analysis and recent analytical techniques developed for its assessment. A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 88-99.
- [34] LI D P, JIANG H, YANG G, et al. Qualitative and quantitative detection of camellia oil adulteration using electronic nose based on wavelet decomposition humidity correction[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 210: 116822.
- [35] YUAN J J, WANG C Z, CHEN H X, et al. Identification and detection of adulterated *Camellia oleifera* Abel. oils by near infrared transmittance spectroscopy[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(2): 300-313.
- [36] LI R F, HUANG J L, HUANG L, et al. Comparison of GC and DSC monitoring the adulteration of camellia oil with selected vegetable oils[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 126(3): 1 735-1 746.