DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251203005
引用格式: 孙晓燕, 孔丽艳, 张宏宏, 等. 光谱与智能传感技术在植物油掺伪鉴别中应用的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(8): 68–75.
SUN XY, KONG LY, ZHANG HH, *et al*. Research progress on the application of spectroscopy and intelligent sensing technology in identification of vegetable oil adulteration [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(8): 68–75. (in Chinese with English abstract).

光谱与智能传感技术在植物油掺伪鉴别中应用的研究进展

孙晓燕, 孔丽艳, 张宏宏, 肖舒元, 邱　硕, 刘朋宇*

(沈阳市食品药品检验所, 沈阳　110122)

摘　要: 植物油是人类膳食中单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸的主要来源, 在维持机体健康和营养平衡中发挥着关键作用。由于不同植物油之间存在显著的经济价值差异, 掺伪行为在生产与流通环节中频繁发生, 严重威胁食品安全与消费者权益。近年来, 光谱分析与智能传感检测因具备快速、无损、高灵敏等优势, 逐渐成为植物油真实性鉴别的重要研究方向。本文系统综述了近红外光谱、傅里叶红外光谱、高光谱成像、拉曼光谱以及荧光光谱技术在植物油掺伪检测中的研究进展。同时, 总结了光/电化学生物传感器、电子鼻系统以及基于智能手机的检测设备等智能传感检测技术的发展现状; 探讨了两者与化学计量学结合, 在掺假筛查和预测中的应用现状。本文旨在为基于光谱与智能传感技术的植物油真实性快速、智能检测研究提供科学参考与数据支撑。

关键词: 植物油; 光谱分析; 智能传感; 化学计量学; 掺伪鉴别

Research progress on the application of spectroscopy and intelligent sensing technology in identification of vegetable oil adulteration

SUN Xiao-Yan, KONG Li-Yan, ZHANG Hong-Hong, XIAO Shu-Yuan, QIU Shuo, LIU Peng-Yu*

(*Shenyang Institute for Food and Drug Control*, *Shenyang* 110122, *China*)

ABSTRACT: Vegetable oils are the primary dietary sources of monounsaturated and polyunsaturated fatty acids in human diets, playing a crucial role in maintaining human health and nutritional balance. Owing to the substantial economic disparities among different types of vegetable oils, adulteration events frequently occur during production and distribution, posing serious threats to food safety and consumer rights. In recent years, spectroscopic analysis and intelligent sensing technologies have attracted increasing attention for the authenticity identification of vegetable oils due to the advantages of rapidity, non-destructiveness and high sensitivity. This review systematically summarized

收稿日期: 2025-12-03
基金项目: 辽宁省自然科学基金计划博士科研启动项目(2025-BS-0975, 2025-BS-0974)
第一作者: 孙晓燕(1996—), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为食品真实性检测。E-mail: sunxy2023@126.com
***通信作者:** 刘朋宇(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全与质量检测。E-mail: 654805381@qq.com

the research progress of near-infrared spectroscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy, hyperspectral imaging, Raman spectroscopy and fluorescence spectroscopy in the detection of vegetable oil adulteration. Meanwhile, this paper comprehensively reviewed the development of intelligent sensing technologies, such as optical and electrochemical biosensors, electronic nose systems and smartphone-based detection devices, discussed the integration of these techniques with chemometrics for adulteration screening and prediction. This review aims to provide scientific references and data support for the development of rapid and intelligent detection strategies for the authenticity evaluation of vegetable oils based on spectroscopic and intelligent sensing technologies.

KEY WORDS: vegetable oil; spectroscopic analysis; intelligent sensing; chemometrics; adulteration identification

0　引　言

植物油是为人体提供必需脂质营养物质的膳食来源, 在维持人体营养中起着重要的作用。近年来, 全球植物油生产和消费量稳步增长。根据国家粮油信息中心统计, 2022 年我国食用油消费量达 3758 万吨, 位居世界首位[1]。伴随着油品消耗量的上升, 植物油掺伪方式和手段也不断更迭。全球食品欺诈和质量中心(Knowledge Centre for Food Fraud and Quality Worldwide, KC-FFQ)报告显示, 2023 年全球食品掺假事件中, 油脂类食品的掺假占比达 6.92%[2]。植物油掺伪通常包括(1)将经过压榨和简单过滤操作产生的冷轧油掺入经过复杂精炼过程处理的精炼油混合[3]; (2)将售价较低的菜籽油、大豆油等掺入橄榄油等售价较高的油品[4]; (3)将不可食用的矿物油、地沟油等混入食用植物油[5]。这些行为不仅造成经济欺诈, 也给公众健康带来潜在安全风险。因此, 开发快速、高灵敏和高效的植物油掺伪筛查手段尤为重要。

光谱分析技术通过解析物质的光谱特征以实现成分性质、结构识别, 已广泛应用于植物油掺伪筛查[6–7]。智能传感检测技术是利用纳米材料(1~100 nm)作为信号元件, 将待测物信号转换为可检测的电/光学信号, 具有快速、灵敏、选择性高等优点, 逐渐在食品、化学和环境监测等领域得到应用[8–9]。近年来, 光谱与智能传感检测结合化学计量学, 通过对大量数据的分析与建模, 进一步提高了植物油掺伪筛查的准确性和预测能力[10–11]。

本文旨在阐述光谱分析和智能传感检测技术基本概况, 系统综述光谱分析和智能传感检测技术在植物油掺伪筛查中的应用现状, 并重点讨论其与化学计量学交叉融合的研究进展。最后, 对光谱分析和智能传感检测技术在植物油掺伪筛查的发展方向和未来趋势进行展望, 以期为构建快速、准确、智能的植物油真实性检测体系提供参考。

1　光谱分析在植物油掺伪检测中的应用进展

光谱分析技术具有快速、便捷和无损等显著优势, 是当前食品真实性评价中应用最为广泛的手段之一[12]。植物油掺伪通常表现为脂肪酸组成、挥发性组分以及特征微量成分的变化, 这些差异通常直接反应在光谱图中。例如, 掺入低价植物油往往导致脂肪酸碳链长度和不饱和度发生变化, 直接影响近红外光谱中 C-H 键伸缩振动倍频、合频以及酯基 C=O 振动特征峰的强度比例[13]。与传统依赖色谱和质谱技术进行“分离-检测”的分析方式不同, 光谱技术通过获取分子振动、转动或光吸收/散射等特征, 实现对油脂整体化学信息的直接、非接触式分析[14]。因此, 近红外光谱(near infrared spectroscopy, NIR)技术、傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)技术、高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)技术、拉曼光谱和荧光光谱等技术在植物油真伪识别、掺假比例评估等领域得到广泛应用。5 种光谱技术的比较如表 1。

表 1　5 种光谱技术的比较

Table 1　Comparison of 5 kinds of spectroscopic techniques

方法名称	光谱区间	分子层次信息	优点	缺点	参考文献
NIR 技术	800~2500 nm	C-H、O-H、N-H 键的倍频与合频振动信息	快速、简单、中高浓度掺假鉴定较为准确	痕量水平掺假鉴别困难	[15]
FTIR 技术	4000~400 cm^{-1}	C=O、C-O、C-H、C=C 键的振动信息	灵敏度高、快速	对样品状态敏感	[16]
HSI 技术	400~2500 nm	分子振动与空间分布特征	信息维度高、适合复杂掺假体系分析	数据量大、设备成本高	[17]
拉曼光谱技术	200~3500 cm^{-1}	C=C、C–C、C-H 键的振动信息	便携、快速	易受背景荧光干扰	[18]
荧光光谱技术	200~800 nm	电子跃迁	灵敏度高、操作简单	易受基质影响	[19]

1.1 近红外光谱技术

NIR 技术是一种简单、快速、高效、准确的无损检测技术[20]。近红外光谱区(800~2500 nm)与有机分子中含氢基团振动的各级倍频吸收区一致, 因此能够反映样品中脂肪酸链的特征信息。对于掺伪程度较高的样品, 简单的光谱峰位差异即可实现直观识别; 但对于低水平掺假, 必须借助化学计量学方法对光谱中的微小变化进行建模解析[21]。近年来, 随着化学计量学在近红外光谱数据分析中的不断成熟, 成功地解释了光谱信息与待测物质化学信息之间相关性, 提高了数据分析的精度和稳定性, 进一步促进了 NIR 在植物油掺伪筛查中的应用[22]。EL-MAOUARDI 等[23]评估了 NIR 结合化学计量学鉴定纯阿甘油与掺入玉米油、菜籽油、花生油和葵花籽油的混合样品的潜力。通过主成分分析(principal component analysis, PCA)区分纯阿甘油样品和其他掺假样品, 进一步, 基于 NIR 检测数据, 开发偏最小二乘-判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)模型以确定掺假油类型并量化掺假水平, 实现了掺假类型识别和掺假比例估计, 证明了 NIR 在检测和量化阿甘油掺假方面的潜力, 有望成为阿甘油和其他油品掺假的常规分析技术。WANG 等[24]使用 NIR 联合 PLS-DA、支持向量机(support vector machine regression, SVM)和决策树(decision tree, DT)算法开发了 3 种掺入玉米油、大豆油或菜籽油的山茶油定量模型, 在三类二元掺假体系中均取得了良好的预测效果, 为识别山茶油掺假提供了可靠思路, 为揭露食品中的欺诈行为提供了新的视角。

NIR 技术在植物油掺伪鉴别中展现出良好的通用性, 在中高水平掺假体系中有较高的鉴别能力。然而, 对于痕量掺假水平的鉴别仍需依赖化学计量学对大量样本进行统计分析。

1.2 傅里叶变换红外光谱技术

与 NIR 技术相比, FTIR 技术采集光谱范围更宽, 并以干涉图作为原始信号构建谱图, 能够实现微量、痕量物质的检测[25]。林伟琦[26]建立了基于 FTIR 数据解析的化学计量方法, 用于山茶油的聚类分析和判别分析。最终, 通过构建的掺伪模型, 实现了掺杂大豆油、玉米油、葵花籽油的山茶油样品分析, 最低检出限可达 5%。该方法可实现对山茶油掺伪的有效鉴定, 为规范山茶油市场提供技术支持。贾丹等[27]将 SVM 算法与 FTIR 结合, 实现了 6 种植物油的快速分类, 所构建的 PCA 结合蚁群优化 SVM 算法对, 分别为特级初榨橄榄油(extra virgin olive oil, EVOO)、玉米油、稻米油和葵花籽油的预测达到 100%, 显著提升了植物油鉴别效率, 为植物油种类识别提供了解决方案, 在植物油质量监管中表现出巨大应用潜力。FTIR 技术显著提高了植物油掺伪鉴别的灵敏度和识别能力, 在油品种类区分和低浓度掺假分析中展现出较大优势, 通过进一步优化模型稳定性可提高鉴别准确度。

1.3 高光谱成像技术

HSI 技术融合传统光谱技术和二维成像技术, 可同时获取样品的化学与物理特征, 是近年来迅速发展的非接触式检测技术[28]。HSI 能准确提供食品样本形状、大小等物理属性和脂肪、蛋白质等化学成分, 是出色的食品质量评估工具。联合多元分析(PCA、PLS-DA), HSI 能够准确、高效地实现植物油与掺假油的区分[29]。MALAVI 等[30]利用 HSI 分析对纯 EVOO 和与化学性质相似的掺假油(包括精炼橄榄油、橄榄渣油、榛子油等)样品的分析, 并构建了 PLS-DA、SVM、随机森林(random forest, RF)、K 近邻(K-nearest neighbor, KNN)和人工神经网络等模型, 成功应用于 EVOO 掺假检测, 特别是精炼橄榄油之类的化学成分相似的油品掺假, 为打击橄榄油行业的欺诈行为提供了有效解决方案。进一步, 利用 HSI 联合 SVM、RF、线性判别分析等算法对不同阶段油品掺假情况进行识别, 实现了 670 份包括杏仁油、芥末油、椰子油、橄榄油等在内的纯油样品和掺杂葵花籽油、蓖麻油、液体石蜡等在内的掺假油样品的分析, 分类准确率高达 100%, 为食品安全和质量控制提供强大数据支撑[17]。

HSI 技术展现出极高的分析判别能力, 尤其适用于多组分掺假体系的鉴别。然而, 由于其数据维度丰富、数据处理过程复杂, 对算法和设备提出了更高要求, 运行成本也相对较高, 限制了其在现场快速检测中的应用。

1.4 拉曼光谱技术

拉曼光谱技术通过分析样品在激光照射下的散射光谱, 获取特定分子振动、转动信息, 被广泛应用于物质鉴定领域[31]。由于其检测效率高、操作简单、设备便携等优点, 逐渐被应用于植物油质量筛查。近年来, 便携式拉曼光谱仪的迭代更新, 进一步推动了检测“从实验室到现场”的发展, 极大地提高了检测效率[32]。Ll 等[33]提出了基于便携式拉曼光谱仪的芝麻油多重掺假快速检测方法, 通过对芝麻油和 4 种掺假油的拉曼光谱进行 PLS-DA, 对 40 份掺有 4 种掺假油的芝麻油进行准确区分, 发掘了拉曼光谱在芝麻油多重掺假鉴定中的应用潜力, 尤其是在现场及时检测中的优势。CHANG 等[34]采用拉曼光谱对植物油样本中的游离脂肪酸谱进行表征, 联合 PCA 和 PLS-DA 构建了山茶油掺假预测模型。模型决定系数(determination coefficient, R^2)高达 0.98, 预测均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP)低至 1.45%, 显著提升了检测的可靠性, 推动了食品行业抽样程序的简化。

拉曼光谱技术在现场检测中展现出显著优势, 适用于快速筛查和定量分析。但其检测结果易受背景荧光干扰, 仪器的抗干扰能力和数据稳定性仍需改进。

1.5　荧光光谱技术

荧光光谱技术通过测量样品受激发后的荧光光谱, 实现分子结构和成分变化分析, 广泛应用于食品、环境和生物等领域[35]。该技术无需复杂样品前处理过程, 结合化学计量学手段可以实现食品真实性鉴别和预测。BEKOGIANNI 等[36]分别采用激光诱导击穿光谱和荧光光谱技术检测了来自 4 个不同地理区域的 EVOO 掺假情况, 荧光光谱在识别掺假油方面表现更佳, 激光诱导击穿光谱在产地预测方面表现优异, 两种技术相互补充, 为 EVOO 真实性鉴定提供了技术支撑。SHEN 等[37]搭建了一种紧凑型三维荧光光谱仪, 使用 18 个具有不同波长的发光二极管作为激发光源, 获得了来自不同产地的 4 种植物油样本光谱特征。结合二维卷积神经网络(2D-convolutional neural network, 2D-CNN)构建深度学习模型, 实现了掺伪芝麻油的定性和定量分析, 构建的紧凑型荧光光谱仪有望实现芝麻油分级, 解决市场上芝麻油掺假问题。WU 等[38]基于三维荧光光谱技术实现了900个掺假油样本和60个纯油样本的定性和定量分析, 使用包括 KNN、CNN、RF、SVM 和 PLS 在内的 5 种机器学习算法分别建模, 方法的 R^2 和 RMSEP 值分别在 0.89~0.99 和 0.01~0.05 之间。此结果表明, 三维荧光光谱技术是一种检测各种植物油掺假的可靠手段, 为食品安全和质量控制提供了强大数据支撑。

荧光光谱技术在植物油掺伪检测中具有灵敏度高、操作简单等优点, 然而, 样品中的基质通常会干扰荧光光谱的准确性, 因此应选择适当的样品状态和浓度范围以获得可靠的分析结果。不同光谱技术在植物油掺伪检测中的检测对象、检测准确性等方面存在差异(表 2)。单一光谱技术在面对油脂组成相近或多组分复杂掺假体系时, 往往存在判别能力受限的问题。近年来, 多光谱融合与多技术联用逐渐应用于植物油掺伪检测。HSI 技术通过融合光谱信息与空间分布特征, 为多技术联用提供了天然平台, 与化学计量学、深度学习算法相结合, 可实现对复杂掺假模式的多维识别与定量分析。不同光谱技术在植物油掺伪检测中相互补充, 通过构建多模态光谱信息融合体系, 有望进一步提升植物油真实性评价的准确性。

2　智能传感检测在植物油掺伪鉴别中的应用研究进展

随着食品产业的快速发展和监管需求的不断提高, 传统检测技术在大规模抽检和现场实时监测中的不足愈发明显。智能传感技术依托功能化纳米材料、生化识别元件以及多维信号采集方式, 在植物油掺伪识别方面表现出显著优势[39]。通过构建光学、电化学、气体传感器, 实现对植物油挥发性成分、理化指标等信息的分析。相比传统色谱和光谱检测, 智能传感检测具有设备小型化、现场响应快速等特点, 正推动植物油真实性鉴别从实验室分析向现场实时检测转型[40–42]。目前, 光/电化学纳米传感器、电子鼻以及基于智能手机的检测平台均已在植物油种类区分、掺假比例预测和来源鉴别等应用场景中展示出巨大应用潜力(表 3)。

2.1　光/电化学生物传感器

生物传感器通常由生物识别元件、信号转换元件以及数据处理单元构成。生物识别元件通过酶、抗体、适配体或其他生物分子选择性识别目标分子, 信号转换元件将识别过程产生的物理或化学变化转变为可测的光学或电学信号, 数据处理单元对信号进行采集和处理[48]。光学型传感器通常基于紫外吸收、荧光、化学发光等光学现象, 将识别事件转化为可测的光信号[49]; 电化学生物传感器则通过电流、电位及电化学阻抗等信号的检测实现分析[50]。

表 2　不同光谱技术在植物油掺伪检测中的应用

Table 2　Application of different spectroscopic techniques in the detection of vegetable oil adulteration

检测技术	油样	掺假油	分析方法	RMSEP	参考文献
NIR	阿甘油	玉米油、菜籽油、花生油、葵花籽油	PCA、PLS-DA	1.7	[23]
	山茶油	玉米油、大豆油、菜籽油	PLS、SVM、DT	0.95 1.17	[24]
FTIR	山茶油	大豆油、玉米油、葵花籽油	PLS-DA、KNN、PCA-LDA	1.42~10.39	[26]
	特级初榨橄榄油	玉米油、葵花籽油	SVM	-	[27]
HSI	特级初榨橄榄油	精炼橄榄油、橄榄油渣、榛子油	PLS-DA、RF、KNN	-	[30]
	杏仁油、椰子油、橄榄油	葵花籽油、蓖麻油、液体石蜡	SVM、LR、LDA、RF、DT、KNN	-	[17]
拉曼光谱	芝麻油	大豆油、玉米油、菜籽油、葵花籽油	PLS-DA	-	[33]
	山茶油	菜籽油、玉米油、花生油	PLS-DA、PCA	1.45	[34]
荧光光谱	芝麻油	大豆油、花生油、葵花籽油	2D-CNN	2.43	[37]
	橄榄油	花生油、玉米油、棕榈油	KNN、CNN、RF、SVM、PLS	1~5	[38]

注: 线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA); 逻辑回归(logistic regression, LR)。

表 3 不同智能传感技术在植物油掺伪检测中的应用

Table 3 Application of different intelligent sensing techniques in the detection of vegetable oil adulteration

检测方法	油样	掺假油	掺假比例/%	方法性能	参考文献
光/电化学生物传感器	花生油	二次加热油	1~100	LOD=0.45% R^2=0.998	[43]
	初榨椰子油	椰子油	20	检测时间仅需 3~5 s	[40]
电子鼻系统	芝麻油	菜籽油、葵花籽油	5	R^2=0.981 RMSE=0.0178	[44]
	特级初榨橄榄油	菜籽油	5~20	R^2=0.8565 RMSE=2.7125	[45]
基于智能手机的检测设备	特级初榨橄榄油	橄榄油	5~50	R^2=0.98 RMSE=0.02	[46]
	菜籽油	花生油	5~30	LOD 0.2~0.3 ppm	[47]

注: 检出限(limit of detection, LOD)。

近年来, 光/电化学生物传感器凭借其高灵敏、响应快和易于小型化等特点, 成为植物油掺伪检测的重要手段。ZHANG 等[43]开发了一种基于氟硼二吡咯(boron dipyrromethenes, BODIPY)的开启型近红外荧光传感器, 无需任何前处理过程, 通过将传感器与油样直接混合, 实现了对不同加热时间以及花生油掺假比例的检测。以花生油为模型, 该传感器能够对油炸时间和掺假程度(0%~100%, LOD=0.45%, R^2=0.998)进行准确分析, 具有操作简单、灵敏度高等优势, 为家用食品安全监测工具研发提供了一种新思路。橄榄苦苷(oleuropein, OLEU)是 EVOO 品质鉴别的重要标志物, 通过检测 OLEU 的含量可以鉴定植物油掺伪情况。BOUNEGRU 等[51]将酪氨酸酶固定在单壁碳纳米管修饰的电极上, 构建了 SPE/SWCNT/Tyr 传感器, 用于 OLEU 的检测。该传感器在 0.49~11.22 μmol/L 浓度范围内具有良好的线性关系, LOD 低至 9.53×10^{-8} mol/L, 具有较高的灵敏度, 能够有效识别 EVOO 中的 OLEU, 为在不同生产阶段定量橄榄油中 OLEU 开辟了新的思路。进一步, 通过构建由脂肪酶、甘油激酶和甘油修饰的三电极生物传感器, 在 3~5 s 内实现掺假比例 20%的初榨椰子油检测, 并具有可重复使用的优势(使用寿命可达到 25 d)[40]。进一步, 可通过优化固定方法和交联方法, 实现其他植物油如芥菜油、棕榈油等的检测, 为植物油掺伪筛查提供新思路。随着纳米技术和信号放大策略的持续进步, 光/电化学生物传感器在检测灵敏度、抗干扰能力和便携性方面持续提升, 逐渐成为植物油掺伪检测领域的重要发展方向。

2.2 电子鼻系统

电子鼻系统是基于人类嗅觉仿生技术开发的智能传感技术, 被广泛应用于食品识别与质量评价。该技术基于多传感器阵列对样品中挥发性分子的响应, 通过构建综合响应谱图, 结合模式识别算法, 对样品进行分类、鉴别或等级评价[52]。HOSSEINI 等[44]开发了一款基于金属氧化物半导体(metal oxide semiconductor, MOS)的电子鼻, 结合多层感知器(multi-layered perceptron, MLP)算法, 通过评估挥发性有机物, 实现了 15 种“芝麻油-菜籽油”, “芝麻油-葵花籽油”混合样本的鉴别。该模型 R^2 高达 0.981, RMSE 低至 0.0178, 可有效区分掺假水平低至 5%的芝麻油样本, 为芝麻油掺伪提供了一种无损、快速、有效的解决方法。MIRHOSEINI-MOGHADDAM 等[45]开发了一套包含 13 个气体传感器的电子鼻和计算机视觉组成的综合系统, 用于检测 EVOO 中的掺假情况。PCA-非线性二次判别对 EVOO 分类的准确率高达 100%; 多元线性回归(multiple linear regression, MLR)用于估计掺假百分比, 其 R^2=0.8565, RMSE=2.7125。研究结果表明, 该系统可实现 EVOO 掺杂油的快速、无损、高灵敏检测。此外, 为解决环境湿度对基于 MOS 构建的电子鼻系统检测掺假茶油准确性影响这一难题, 一套由 8 个 MOS 传感器组成的电子鼻平台被用于不同湿度水平(20%、40%和 60%)下, 不同掺杂比例菜籽油、大豆油和玉米油的山茶油的掺假情况鉴别, 增强了电子鼻系统在复杂环境中的适用性[41]。在植物油掺伪鉴别领域, 电子鼻系统能够有效识别不同油品及其掺伪后挥发性成分差异, 实现快速、智能的真实性评价, 未来有望进一步扩展至油品产区溯源等领域。

2.3 基于智能手机的检测设备

为应对食品安全检测对快速、实时和便携的发展需求, 基于智能手机的检测平台受到越来越多关注。依托智能手机在图像捕获、光谱信号采集与数据传输方面的优势, 通过外接微型光谱仪、比色或荧光检测模块以及微流控芯片等小型化分析单元, 实现样品信号的快速采集、处理与结果输出[53−55]。SONG 等[46]利用智能手机结合图像处理和化学计量学, 实现了掺假浓度在 5%~50%范围内 EVOO 中植物油掺假的含量鉴定。该方法通过视频捕获不同颜色光线照射下样品表面颜色变化, 并将其转换为光谱数据进行掺假分析, 为植物油掺假鉴定提供了一种低成本解决方案。DENG 等[56]开发了一种基于 NIR 和智能手机的二元掺假检测系统, 对 243 份不同浓度掺假的山茶油样品进行鉴定。通过 NIR 获取了掺杂油样的光谱信息, 使用智能手机拍摄图像和视频获得掺杂油样的视觉数据, 这种多模态融合策略为山茶油掺伪实时监测提供了新思路。BILAL 等[47]构建

了一种基于智能手机的比色阵列传感器, 结合多元统计分析, 实现了菜籽油掺假花生油(5%~30%)的快速检测。PCA和层次聚类分析(hierarchical clustering analysis, HCA)结果显示可明显区分纯油和掺假样品, KNN 模型在掺假比例分析有很高的准确率, 为植物油掺伪的现场检测提供了有效方案。基于智能手机的检测设备具备操作简便、成本低、现场适用性强等优点, 为构建高效、智能的植物油真实性检测体系提供了新的技术路径。

3　结束语

植物油掺伪是食品安全监管领域长期存在的质量管理问题, 对消费者权益、产业规范发展和食品安全监管带来负面影响。近年来, 光谱分析技术与智能传感技术的快速发展, 为植物油掺伪的高效筛查提供了新思路。光谱分析技术凭借其快速、无损等优势, 在植物油掺伪监测中展现出广泛适用性。从 NIR、FTIR、拉曼和荧光等光谱技术, 到 HSI 技术与多光谱技术融合, 逐渐深入研究油脂整体化学信息与光谱响应之间的关联, 结合化学计量学与机器学习模型, 可实现油品真伪区分、掺假水平定量预测及来源判别[57]。同时, 智能传感技术依托纳米材料、生物识别元件和多维信号采集策略, 可实现对挥发性组分、关键标志物及复杂理化信息的快速获取, 提高了植物油掺伪检测的实时性和便携性, 降低了检测成本。

随着大数据技术、人工智能算法和智能硬件设备的持续提升, 光谱分析与智能传感技术在植物油掺伪筛查中的应用具有巨大发展潜力: (1)将光谱数据与其他油脂化学特征库联通, 构建出更通用、可靠的植物油真实性评价模型; (2)加强与化学计量学和机器学习算法的交叉应用, 开发小样本量多维分析模型, 解决样本来源复杂, 掺伪形式多样带来的预测误差; (3)优化电子鼻系统阵列结构和数据解析算法, 推动实现接近人类感官的油品风味和整体质量识别; (4)加速便携式与可穿戴检测设备的发展, 推动小型检测设备在生产加工、市场监管及家庭自检等应用场景的使用。

综上所述, 光谱分析与智能传感技术正加速推动植物油真实性鉴别向智能、便携和多场景应用发展, 未来有望建立起更加精准、高效、可溯源的植物油真实性检测体系, 为保障食品安全与促进油脂行业高质量发展提供强有力的技术支撑。

参考文献

[1] 王瑞元. 2022 年我国粮油产销和进出口情况[J]. 中国油脂, 2023, 48(6): 1–7.
WANG RY. The production, sales, and import-export situation of grain and oil in China in 2022 [J]. China Oils and Fats, 2023, 48(6): 1–7.

[2] POLAKOVA KN, BOBKOVÁ A, DEMIANOVÁ A, *et al.* Adulteration in food industry in 2023-overview [J]. Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 2024, 13(6): 11048.

[3] DRAKOPOULOU SK, KRITIKOU AS, BAESSMANN C, *et al.* Untargeted 4d-metabolomics using trapped ion mobility combined with LC-HRMS in extra virgin olive oil adulteration study with lower-quality olive oils [J]. Food Chemistry, 2024(434): 137410.

[4] LU CH, LI BQ, JING Q, *et al.* A classification and identification model of extra virgin olive oil adulterated with other edible oils based on pigment compositions and support vector machine [J]. Food Chemistry, 2023(420): 136161.

[5] YUAN D, LI SW, ZHANG LX, *et al.* Rapid and sensitive quantification of capsaicinoids for edible oil adulteration by immunomagnetic solid-phase extraction coupled with time-resolved fluorescent immunochromatographic assay [J]. Food Chemistry, 2023(404): 134552.

[6] RIFNA EJ, PANDISELVAM R, KOTHAKOTA A, *et al.* Advanced process analytical tools for identification of adulterants in edible oils–A review [J]. Food Chemistry, 2022(369): 130898.

[7] SHI SJ, ZHANG KD, TIAN NN, *et al.* Spectroscopic techniques combined with chemometrics for rapid detection of food adulteration: Applications, perspectives, and challenges [J]. Food Research International, 2025(211): 116459.

[8] ZHANG JJ, HUANG HX, SONG GC, *et al.* Intelligent biosensing strategies for rapid detection in food safety: A review [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2022(202): 114003.

[9] ZHANG W, CHEN J, XIE L. Optical biosensor arrays based on nanozymes for environmental monitoring and food safety detection: Principles, design, and applications [J]. Analytical Methods, 2025, 17(5): 882–891.

[10] HASSAN MM, XU Y, ZAREEF M, *et al.* Recent progress in chemometrics driven biosensors for food application [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2022, 156: 116707.

[11] XU R, ADIL MZ, JABEEN S, *et al.* Recent advancements in chemometrics based non-destructive analytical techniques for rapid detection of adulterants in milk and dairy products–a review [J]. Food Control, 2025(174): 111247.

[12] JOHN DK, DOSSANTOS-SOUZA K, FERRÃO MF. Overview of cocaine identification by vibrational spectroscopy and chemometrics [J]. Forensic Science International, 2023(342): 111540.

[13] MOUSA MAA, WANG Y, ANTORA SA, *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): 8009–8027.

[14] MOHAMMED F, GUILLAUME D, WARLAND J, *et al.* Analytical methods to detect adulteration of argan oil: A critical review [J]. Microchemical Journal, 2021(168): 106501.

[15] 吴成招, 王一韬, 胡栋, 等. 近红外光谱技术在食用油掺伪检测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(3): 685–691.
WU CZ. WANG YT, HU D, *et al.* Research progress of near-infrared spectroscopy technology in the detection of adulteration in edible oils [J].

Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(3): 685–691.

[16] KANWAL N, MUSHARRAF SG. Analytical approaches for the determination of adulterated animal fats and vegetable oils in food and non-food samples [J]. Food Chemistry, 2024(460): 140786.

[17] AQEEL M, SOHAIB A, IQBAL M, *et al.* Hyperspectral identification of oil adulteration using machine learning techniques [J]. Current Research in Food Science, 2024(8): 100773.

[18] WANG HP, XIN YJ, MA HZ, *et al.* Rapid detection of chinese-specific peony seed oil by using confocal raman spectroscopy and chemometrics [J]. Food Chemistry, 2021(362): 130041.

[19] HAMDY O, MOHAMMED HS. Post-heating fluorescence-based alteration and adulteration detection of extra virgin olive oil [J]. Journal of Fluorescence, 2023, 33(4): 1631–1639.

[20] SQUEO G, CRUZ J, DE ANGELIS D, *et al.* Considerations about the gap between research in near-infrared spectroscopy and official methods and recommendations of analysis in foods [J]. Current Opinion in Food Science, 2024(59): 101203.

[21] NUNES A, ZILTO-AZEVEDO G, ROCHADOS-SANTOS B, *et al.* Characterization of brazilian floral honey produced in the states of santa catarina and são paulo through ultraviolet–visible (UV–vis), near-infrared (NIR), and nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy [J]. Food Research International, 2022(162): 111913.

[22] OTSUKA Y, HIGASHINAKAO T, KONO H, *et al.* Monitoring dental zinc oxide polyacrylate cement using near-infrared spectroscopy [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2025, 44(2): 48.

[23] EL-MAOUARDI M, DE-BRAEKELEER K, BOUKLOUZE A, *et al.* Comparison of near-infrared and mid-infrared spectroscopy for the identification and quantification of argan oil adulteration through PCA, PLS-DA and PLS [J]. Food Control, 2024(165): 110671.

[24] WANG RN, FANG Y, LUO WF, *et al.* Quantitative analysis of camellia oil binary adulteration using near infrared spectroscopy combined with chemometrics [J]. Microchemical Journal, 2025(217): 115018.

[25] VIEIRA LS, ASSIS C, DEQUEIROZ MELR, *et al.* Building robust models for identification of adulteration in olive oil using FT-NIR, PLS-DA and variable selection [J]. Food Chemistry, 2021(345): 128866.

[26] 林伟琦. 基于傅里叶变换衰减全反射红外光谱鉴别山茶油掺假[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 215–223.
LIN WQ. Identification of Camellia oil adulteration by attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 215–223.

[27] 贾丹, 明米娜, 雷蕾, 等. 基于 PCA-ACO-SVM 算法和 FTIR 技术的植物油种类鉴别[J]. 光散射学报, 2024, 36(4): 454–460.
JIA D, MING MN, LEI L, *et al.* Identification of vegetable oil species based on PCA-ACO-SVM algorithm and FTIR technology [J]. The Journal of Light Scattering, 2024, 36(4): 454–460.

[28] KUCHA C, OLANIYI EO. Applications of hyperspectral imaging in meat tenderness detection: Current research and potential for digital twin technology [J]. Food Bioscience, 2024(58): 103754.

[29] PANDISELVAM R, RAJBONGSHI B, DEEPALI D, *et al.* Advances in non-invasive techniques for enhancing cottonseed oil quality and shelf life: A sustainable approach [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2025, 19: 9354–9381.

[30] MALAVI D, RAES K, VANHAUTE S. Integrating near-infrared hyperspectral imaging with machine learning and feature selection: Detecting adulteration of extra-virgin olive oil with lower-grade olive oils and hazelnut oil [J]. Current Research in Food Science, 2024(9): 100913.

[31] WANG JJ, CHEN QS, BELWAL T, *et al.* Insights into chemometric algorithms for quality attributes and hazards detection in foodstuffs using raman/surface enhanced raman spectroscopy [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(3): 2476–2507.

[32] WANG JH, QIAN JJ, XU MT, *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.

[33] LI X, WANG D, MA F, *et al.* Rapid detection of sesame oil multiple adulteration using a portable Raman spectrometer [J]. Food Chemistry, 2023(405): 134884.

[34] CHANG B, LI Z, JI K, *et al.* Rapid quantitative determination of adulteration of camellia oil using portable Raman spectroscopy and chemometrics [J]. Processes, 2025, 13(2): 456

[35] WU G, DOU XL, LI DP, *et al.* Recent progress of fluorescence sensors for histamine in foods [J]. Biosensors-Basel, 2022, 12(3): 161

[36] BEKOGIANNI M, STAMATOUKOS T, NANOU E, *et al.* Laser-induced breakdown spectroscopy *vs*. Fluorescence spectroscopy for olive oil authentication [J]. Foods, 2025, 14(6): 1045.

[37] SHEN FZ, FENG X, LI YF, *et al.* Compact three-dimensional fluorescence spectroscopy and its application in food safety [J]. LWT, 2024(202): 116324.

[38] WU MF, LI MM, 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, 2023(188): 115419.

[39] SONG Y, ZHANG TY, WANG XY, *et al.* Photoelectrochemical biosensor based on quantum dots sensitized TiO_2 nanoparticles for detecting phosphatidylcholine in plant oil [J]. Food Bioscience, 2025(68): 106630.

[40] AUDDY I, MAURIKAA CS, HARIHARAN N, *et al.* Development of amperometric enzyme-based biosensor to evaluate the adulteration in virgin coconut oil [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(9): 16337.

[41] LI DP, 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, 2024(210): 116822.

[42] YUN P, JINOROSE M, DEVAHASTIN S. Rapid smartphone-based assays for pesticides inspection in foods: Current status, limitations, and future directions [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(18): 6251–6271.

[43] ZHANG JY, HU X, YUAN J, *et al.* A dual-response NIR fluorescent probe for monitoring of cooking oil degradation and adulteration [J]. Food Control, 2026(179): 111563.

[44] HOSSEINI H, MINAEI S, BEHESHTI B. A dedicated electronic nose combined with chemometric methods for detection of adulteration in sesame oil [J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(10): 2681–2694.

[45] MIRHOSEINI-MOGHADDAM SM, YAMAGHANI MR, BAKHSHIPOUR A. Application of electronic nose and eye systems for detection of adulteration in olive oil based on chemometrics and optimization approaches [J]. JUCS-Journal of Universal Computer Science, 2023, 29(4): 300–325.

[46] SONG WR, SONG ZY, VINCENT J, *et al.* Quantification of extra virgin olive oil adulteration using smartphone videos [J]. Talanta, 2020(216): 120920.

[47] BILAL M, ARSLAN M, SAMEE U, *et al.* Efficient detection of adulteration in peanut seed oil using a smartphone-based colorimetric sensor array system [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025(144): 107654.

[48] BAO F, LIANG Z, DENG J, *et al.* Toward intelligent food packaging of biosensor and film substrate for monitoring foodborne microorganisms: A review of recent advancements [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(12): 3920–3931.

[49] OLIVEIRA S, SHARIFUZZAMAN M, MORO G, *et al.* Advances in optical devices for the detection of contaminants in food and water [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2025(184): 118139.

[50] CHOI HK, YOON J. Enzymatic electrochemical/fluorescent nanobiosensor for detection of small chemicals [J]. Biosensors-Basel, 2023, 13(4): 492.

[51] BOUNEGRU AV, APETREI C. Studies on the detection of oleuropein from extra virgin olive oils using enzymatic biosensors [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(20): 12569.

[52] TAN CH, KONG I, IRFAN U, *et al.* Edible oils adulteration: A review on regulatory compliance and its detection technologies [J]. Journal of Oleo Science, 2021, 70(10): 1343–1356.

[53] SIVAKUMAR R, LEE NY. Recent progress in smartphone-based techniques for food safety and the detection of heavy metal ions in environmental water [J]. Chemosphere, 2021(275): 130096.

[54] XUE JQ, MAO K, CAO HR, *et al.* Portable sensors equipped with smartphones for organophosphorus pesticides detection [J]. Food Chemistry, 2024(434): 137456.

[55] AL-SHAWI SG, NASSER EK, KAREEM AK, *et al.* Smartphone-integrated lateral flow assays for food safety assessment: Recent trends and future perspectives [J]. Microchemical Journal, 2025(214): 113978.

[56] DENG ZW, ZHENG Y, LAN T, *et al.* Detection of camellia oil adulteration based on near-infrared spectroscopy and smartphone combined with deep learning and multimodal fusion [J]. Food Chemistry, 2025(472): 142930.

[57] SULAIMAN N, SANNY M, YEOH CB, *et al.* Application of metabolomics and chemometrics for authentication of vegetable oils and adulteration detection: A review [J]. European Food Research and Technology, 2025, 251(10): 3175–3198.

(责任编辑：韩晓红　蔡世佳)