DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260114007
引用格式: 张嘉俊, 章海涛, 黄伟强, 等. 光谱无损检测技术在食品产地溯源中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(12): 99–107.
ZHANG JJ, ZHANG HT, HUANG WQ, *et al*. Research progress on the application of spectral nondestructive testing technology in food origin traceability [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(12): 99–107. (in Chinese with English abstract).

光谱无损检测技术在食品产地溯源中的应用研究进展

张嘉俊[1], 章海涛[1*], 黄伟强[1], 陈少敏[1], 陈远鸿[1], 庞世琦[1], 董建蕊[2]
(1. 广州海关技术中心, 广州 510623; 2. 中国海关科学技术研究中心, 北京 100026)

摘 要: 食品安全至关重要, 而建立食品产地溯源体系是其核心环节。该体系不仅是打击食品欺诈、规范市场秩序的基石, 更是保障消费者知情权与信任、维护国家税收的重要手段。相对传统方法而言, 由于光谱无损检测技术具备检测快速、高灵敏度、操作简便, 对样品无损等优点, 其在食品产地溯源中的应用越来越广泛。本文描述了以下 5 种现代新兴光谱检测技术: 激光诱导击穿光谱(laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)、高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)、X 射线荧光光谱(X-ray fluorescence spectroscopy, XRF)、拉曼光谱(Raman spectroscopy, RS)和太赫兹(Terahertz, THz)光谱, 综述了这 5 种光谱检测技术的基本原理, 以及近年来国内外在食品产地溯源领域的最新应用研究进展, 指出当前研究中值得关注与改进的方面, 以期为光谱无损检测技术在食品产地鉴别中的应用提供理论依据与技术参考。

关键词: 产地溯源; 光谱无损检测技术; 激光诱导击穿光谱法; 太赫兹

Research progress on the application of spectral nondestructive testing technology in food origin traceability

ZHANG Jia-Jun[1], ZHANG Hai-Tao[1*], HUANG Wei-Qiang[1], CHEN Shao-Min[1], CHEN Yuan-Hong[1], PANG Shi-Qi[1], DONG Jian-Rui[2]
(1. *Guangzhou Customs Technology Center*, *Guangzhou* 510623, *China*;
2. *China Customs Science and Technology Research Center*, *Beijing* 100026, *China*)

ABSTRACT: Food safety is of paramount importance, and establishing a food origin traceability system is a core component of this effort. This system serves not only as a cornerstone for combating food fraud and regulating market order but also as a vital means to safeguard consumers' right to information and trust, as well as to protect national tax revenue. Compared to traditional methods, spectral nondestructive testing technology is increasingly being applied in food origin traceability due to its advantages such as rapid detection, high sensitivity, ease of

收稿日期: 2026-01-14
基金项目: 海关总署科技计划项目(2022HK137); 广州海关科技计划项目(2023GZCK06)
第一作者: 张嘉俊(1991—), 男, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: zjj631@163.com
***通信作者:** 章海涛(1987—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为消费品质量管理。E-mail: zhanght@iqtcnet.cn

operation and nondestructive analysis of samples. This paper described the following 5 kinds of modern emerging spectroscopic detection techniques: Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), hyperspectral imaging (HSI), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), Raman spectroscopy (RS) and Terahertz (THz) spectroscopy. It reviewed the fundamental principles of these 5 kinds of spectroscopic detection techniques and the latest research progress in the field of food origin traceability both domestically and internationally in recent years. The study also highlighted noteworthy aspects and areas for improvement in current research, aiming to provide theoretical foundations and technical references for the application of spectroscopic nondestructive testing technology in food origin identification.

KEY WORDS: origin traceability; spectral nondestructive testing technology; laser-induced breakdown spectroscopy; Terahertz

0 引 言

随着社会的发展, 人们生活水平的提高, 人们对食品的关注点由“吃得饱”逐渐转变为“吃得好”。我国地大物博, 特产享誉全球: 东部有武夷山大红袍、奉化水蜜桃、阳澄湖大闸蟹; 南部有广东荔枝、容县沙田柚、攀枝花芒果、海南椰子、云南普洱茶; 西部有新疆哈密瓜、吐鲁番葡萄、库尔勒香梨、周至猕猴桃、西藏牦牛肉; 北部有五常大米、锡林郭勒羊肉、长白山人参、黑龙江黑木耳等产品。其中很多优秀的产品都已经被评为地理标志产品[1]。地理标志产品来自特定的地区, 其优良而独特的品质是该地区的自然因素或人文因素决定的, 所以此类产品的产地真实性尤为重要。但是近年来, 市场上假冒地理标志产品时有发生, 如阳澄湖大闸蟹、牛肉、奉化水蜜桃、五常大米、新会陈皮、茅台酒等产品的造假事件层出不穷[2−6]。这种行为不但损害了正常商家的合法权益, 而且还对消费者的饮食健康造成威胁。同时我国也是食品进口大国, 进口产品的产地真伪直接关系到产品的质量。而且由于关税政策和贸易协定等原因, 来自不同产地的同一类产品, 其税收也不一样。因此为了保障人们的食品安全、保护商户的合法权益和维护正常税收秩序, 对食品的产地进行溯源很有必要。

目前已报道的食品产地溯源技术众多, 传统的溯源技术有矿物元素指纹技术[7−11]、稳定同位素技术[12−15]、代谢组学技术[16−20]、DNA 溯源技术等[21−23], 但是这些方法往往需要进行较为复杂且时间较长的样品前处理, 种类繁多的化学试剂和相对昂贵的实验设备[24]。相比于其他溯源技术, 无损检测技术(non destructive testing, NDT), 由于其不损坏样品、简便快速、可操作性强、准确可靠等特点, 在食品产地溯源中极具发展潜力[25]。常见的光谱无损检测技术包括: 近红外光谱(near infrared pectroscopy, NIRS)、激光诱导击穿光谱(laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)、高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)、X 射线荧光光谱(X-ray fluorescence spectroscopy, XRF)、拉曼光谱(Raman spectroscopy, RS)和太赫兹(Terahertz, THz)。由于 NIRS 发展较早, 国内外研究比较成熟本文主要论述对象为 LIBS、HSI、XRF、RS 和 THz, 综述了上述 5 种光谱检测技术的原理以及在食品产地溯源中的应用研究进展, 为光谱无损检测技术在食品产地鉴别中的应用提供理论依据与技术参考。

1 光谱检测技术简介

1.1 激光诱导击穿光谱技术

1962 年, 美国科学家戴维·克里默斯首次在第十届国际光谱学会议上提出了用红宝石微波激射器来诱导产生等离子体的光谱法, 然后 LIBS 技术开始逐渐应用于环境监控、化学成分分析等多个领域[26]。LIBS 原理: 等离子体里含有处于激发态的高能态离子和原子, 在等离子体向四周扩散时会快速冷却, 从而导致离子和原子跃迁到低能态, 呈现出特征光谱线[27]。通过光谱仪检测光谱的波长和光谱峰值的强度可以分析样品中的元素组成和元素浓度。

1.2 高光谱成像技术

20 世纪 80 年代初 HSI 技术开始兴起, 从灰度图像、彩色图像、多光谱图像发展到现如今的高光谱图像, 由二维谱图发展到三维谱图, 从高光谱遥感发展到 HSI[28]。通过成像技术对目标空间进行成像, 通过光谱技术对目标进行光谱采集, 将不同光谱通道的地物空间几何特性和光谱特性多维融合, 获取高光谱分辨率的连续、窄波段的图像数据[29]。目前 HSI 技术已经在环境保护、地质勘察、农业振兴、食品质量等领域有着广泛的应用。

1.3 X 射线荧光光谱技术

1895 年, 德国科学家威廉·康拉德·伦琴发现了 X 射线, 为后续 XRF 技术的发展奠定了基础。直到 1948 年, 美国科学家弗利德曼和伯克斯采用分光晶体和盖革计数器研制出首台波长色散 X 射线荧光光谱仪(wavelength dispersive X-ray fluorescence, WDXRF), 标志着 XRF 技术

逐渐进入实际应用阶段。当 X 射线照射物质时, 原子内层电子被击出形成空穴, 使原子处于不稳定的激发态, 随后, 较高能级的电子为填补空穴而向低能级跃迁, 同时释放出特定能量的特征 X 射线[30]。根据莫斯莱定律: 不同的元素具有独特的 X 射线特征谱线, X 射线频率的平方根与元素的原子序数呈正相关[31]。通过识别和分析样品辐射出的特征 X 射线的波长和光谱峰强度, 即可对样品的元素成分进行定性定量分析。

1.4　拉曼光谱技术

1928 年, 印度物理学家拉曼通过实验发现了光的拉曼散射现象, 为 RS 技术的发展奠定了基础。到 20 世纪 70 年代, 通过金属表面吸附不同的分子或离子起到增强效应的表面增强拉曼散射的出现, 使 RS 技术正式进入实际应用的阶段。根据散射光频率与入射光频率的关系, 可以将拉曼散射分为斯托克斯散射和反斯托克斯散射[32]。在 RS 中, 斯托克斯散射是位于瑞利线红侧的非弹性散射谱线。其拉曼位移取决于分子的振动-转动能级, 与入射光波长无关。由于物质分子组成及化学键结构各异, 其光谱中的特征峰位、强度与线宽直接对应特定化学键或官能团的分子振动与转动模式, 使得每种物质都具有独特的 RS 特征。通过对 RS 数据的收集与解析, 可对物质成分及其浓度实现定性定量分析。

1.5　太赫兹技术

在 1896 年和 1897 年, 德国物理学家海因里希・鲁本斯和美国物理学家厄内斯特・福克斯・尼科尔斯对波长在 20~1000 μm 的波段(对应频率约 0.3~15 THz)进行先期的探索。但是直至 1974 年左右, 英国科学家迈克尔 C 费莱明才正式在文章中提到“Terahertz”这个词语, 当时“THz”用于描述通过迈克尔逊干涉仪获取的一段 0.1~10 THz 的谱线[33]。直到 20 世纪 80 年代中后期, 对该波段的光谱技术研究才正式命名为 THz 技术。THz 波是指频率为 0.1~10.0 THz, 波长为 0.03~3.00 mm, 位于微波和红外之间的电磁波[34]。THz 技术可以实现对物质结构和性质的精准分析与鉴定, 从而实现对样品的定性分析。

2　光谱无损技术在食品产地溯源中的应用研究

2.1　光谱技术结合化学计量学建立产地溯源模型

在食品产地溯源的实际应用中, 通过光谱技术直接得到的样品原始谱图数据往往存在很多问题, 如噪声干扰严重、无关信息冗余、信息提取困难、数据质量不稳定、数据量过大等。为克服上述缺点, 需要使用数据解析算法对原始谱图数据进行预处理, 再结合模式识别算法建立准确、高效、稳定的产地溯源模型。建立模型的具体步骤如下: 采集样品原始光谱数据, 剔除异常数据后形成数据集; 将数据集划分为训练集和测试集; 对训练集进行预处理后利用算法生成模型; 最后用测试集评估模型的性能。溯源模型中常用的数据预处理算法有平滑(savitzky-golay, SG)、面积归一、多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)、最大最小归一化方法(min-max normalization, Min-Max)、标准正态变量变换(standard normal variate transformation, SNV)、均值中心化等; 常用的模式识别算法有主成分分析(principal component analysis, PCA)、支持向量机(support vector machine, SVM)、随机森林(random forest, RF)、卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)、偏最小二乘法判别分析(partial least squares discrimination analysis, PLS-DA)、K 最邻近算法、人工蜂群算法等。在产地溯源研究中, 化学计量学方法的发展趋势主要体现在从“单一”走向“融合”、从“经验”走向“智能”。分类算法正从以线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)、PLS-DA 为代表的浅层模型, 逐步转向 SVM、RF 及 CNN 等具备非线性映射能力和高容错性的机器学习模型。建模策略方面, 单一模型正逐渐被数据融合方法取代, 如同类技术(如多光谱)或异质技术(如光谱与成像)在低层、中层和高层上的信息融合。此外, 算法也正由“黑箱”向“可解释”方向发展, 研究者不再仅追求分类准确率, 更关注模型分类的依据。通过变量筛选识别关键特征标志物(如特定矿物元素或代谢物), 可以为溯源提供更具解释性的科学依据。总体而言, 未来的产地溯源将不再依赖单一指标, 而是融合多源信息, 利用智能算法揭示数据中隐含的“产地密码”, 从而构建更加精准、可靠的溯源体系。

2.2　激光诱导击穿光谱技术在食品产地溯源中的应用

LIBS 技术除了在中药材产地溯源中有着广泛的应用, 近年来其在食品产地溯源方面也逐渐兴起。宋少忠等[35]采集吉林的 5 个产地(大安、公主岭、前郭、松原、洮儿河)的水稻, 采集 LIBS 数据后, 采用 SG 和归一化预处理, 选择 C、Mg、P、Cu、Ca、Fe、Na、H、N、K、O 等 11 个元素, 采用 PCA 二次支持向量机(PCA quadratic support vector machine, PCA-Quadratic SVM)建立模型, 对水稻产地识别正确度高达 97.3%。饶刚福等[36]采集江西赣州 4 个区县及湖北、四川等 6 省市共 10 个产地的纽荷尔脐橙, 采集 LIBS 光谱数据后, 先对 7 个省的光谱数据使用 15 点平滑+MSC 预处理, 选择 C、Mg、Ca、Na、H、N、K 等元素, 通过 PCA-多层感知器神经网络(multi-layer perceptron, MLP)建立脐橙产地鉴别模型。实验结果表明, 该模型对来自 7 个省份产地的训练集总准确率为 97.8%, 预测集总准确率为 95.3%; 再以江西赣州 4 区县的脐橙光谱数据进行验证, 其训练集总准确率为 100%, 预测集总准确率为 96.2%。郭茂等[37]采用 LIBS 结合机器学习算法对浙江金华火腿、江苏如皋火腿、云南宣威火腿进行产地鉴别研究。采集 LIBS 光谱数据后, 使用 Min-Max 预处理, 以全连接

神经网络(deep neural networks, DNN)建立火腿产地鉴别模型, 对火腿样品的产地识别正确率达 85.56%。ZHAO 等[38]基于 LIBS 对来自陕西、山西和吉林的单花种蜂蜜洋槐蜜以及来自山西、青海、湖北的百花蜜进行产地溯源研究, 采集光谱数据后, 选择 Mg、Ca、Na、K、C、H、O、N 等元素, 以 PCA-SVM 建立蜂蜜产地鉴别模型, 对洋槐蜜和百花蜜的产地识别正确率分别为 82.6%、99.7%。郑柯鑫[39]选择东北三省大兴安岭、抚松、恒仁、集安和石柱的 5 个产地的人参进行 LIBS 光谱数据采集后, 采用离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)预处理, 选择 Mg、Ca、Na、Fe、K 、O、N 等元素, 以 RF-反向传播神经网络(back propagation neural networks, BPNN)建立人参产地鉴别模型, 对人参产地溯源的正确率高达 100%。MONCAYO 等[40]为对西班牙原产地保护(protected designation of origin, PDO)认证的葡萄酒进行产地溯源研究, 选择了来自 11 个 PDO 地区的 38 种葡萄酒、3 种外国红葡萄酒和 4 种佐餐酒进行 LIBS 光谱数据采集, 选择 Mg、Ca、K、Na、Hα、C 等元素, 以神经网络(neural network, NN)建立葡萄酒鉴别模型, 可以准确分类葡萄酒的产地。

以上研究表明, LIBS 技术在食品溯源中展现出良好的应用前景, 核心在于快速、多元素、微损检测的元素分析, 可高效获取食品的“元素指纹”从而区分食品的产地。但是该技术还存在一定的问题: 固体样品检测一般需要经历烘干、粉碎、过筛、压片等步骤, 并不能真正做到无损检测; 而检测液体样品时, 激光脉冲会使液面产生液体溅射与波动, 导致等离子体不稳定, 信号重复性较差, 而且液体环境(尤其是水)对等离子体有较强的冷却效果, 会使等离子体寿命缩短, 导致信号减弱。

2.3 高光谱成像技术在食品产地溯源中的应用

HSI 技术融合了传统的成像和光谱技术的优点, 可以通过扫描样品无损获取目标物的空间信息和光谱信息, 因此该技术可以同时检测目标物的内外品质, 对样品进行产地识别。目前该技术已经普遍应用于油粮、水果、禽畜水产等方面。KIM 等[41]对韩国和中国的水稻进行产地识别研究, 分别采集来自韩国京畿道等 8 个区域和中国黑龙江、吉林、辽宁和江苏 4 个省的水稻样品, 获取 HSI 图像数据后, 采用 SG 一阶和二阶导数预处理, 以 PLS-DA 建立水稻产地鉴别模型, 对样品的产地鉴别正确率高达 98.89%。李泽旭[42]从河南、山东和陕西 3 个省选择郑麦系列、周麦系列、百农系列和其他系列品种的小麦共 19 种, 采集高光谱数据后, 采用 PCA+MSC 预处理, 以融合交叉注意力网络(integration of crossattention networks, ICAN)建立小麦产地鉴别模型, 对小麦的产地鉴别正确率高达 99.8%。黄琦[43]选取产自黑龙江、湖南、重庆、浙江和江西等 5 个产地的花生, 利用近红外高光谱系统成像, 以 MSC 预处理, 运用连续投影法(successive projections algorithm, SPA)提取特征波段, 利用麻雀搜索算法轻量级梯度提升机(sparrow search algorithm light gradient boosting machine, SSA-LightGBM)建立花生产地溯源模型, 对花生产地的鉴别准确率高达 99.37%。CHEN 等[44]基于 HSI 技术对 6 种著名的普洱茶(冰岛茶、班章茶、宫廷易武茶、高黎茶、景迈茶和下关沱茶)进行产地溯源。对采集到的图像数据进行 MSC+SG 预处理, 以经典 CNN 模型 AlexNet 模型建立产地鉴别模型, 对普洱熟茶产地鉴别的准确率达 95.66%。YANG 等[45]为对大蒜进行产地溯源的研究, 采集美国、中国、西班牙、秘鲁、阿根廷和越南 6 个国家的大蒜样品的高光谱图像数据, 通过分割一切模型(segment anything model, SAM)提取大蒜样本, 采用一阶导数变换(first-order derivative transformation, FODT)预处理, 以 SVM 建立模型, 在测试集上的准确率高达 96.6%。刘爱伦[46]基于 HSI 技术对东江湖蜜桔、寻乌蜜桔、窑湾蜜桔和涌泉蜜桔进行产地溯源。采集高光谱图像数据, 采用 MSC+无信息变量消除法(uninformative variables elimination, UVE)预处理, 以 SVM-DA 建立蜜桔产地鉴别模型, 对应的训练集和测试集准确率分别为 98.3%、96.0%。ZHAO 等[47]基于 HSI 对百合进行产地鉴别, 收集甘肃兰州、湖南邵阳和龙山、河南洛阳、江苏宜兴以及江西万载 6 个产地的百合样品, 采集 HSI 数据, 采用 RF-LDA 建立模型, 对百合产地鉴别的正确率达 100%。崔希炜等[48]以非地理标志葡萄为对照样品, 对地理标志产品科克铁热克葡萄进行产地鉴别, 采集 HSI 数据, 采用 SG 预处理, 以 PLS-DA 建立葡萄产地鉴别模型, 对葡萄产地的鉴别准确率达 95%。王靖等[49]采用 HSI 技术对宁夏银川、固原、盐池 3 个产地的绵羊进行产地鉴别, 采用面积归一化法预处理, 以竞争性正自适应加权算法(competitive adaptive reweighted sampling, CARS)-PLS-DA 建立羊肉溯源模型, 对应的校正集和预测集的正确率分别为 90.48%、84.21%。郑守国等[50]基于 HSI 对名优牛肉进行产地鉴别, 选择安徽大别山黄牛肉, 新疆伊犁褐牛肉和西藏牦牛肉, 采集高光谱图像, 以 MSC 预处理, 利用 SPA 选择特征波长, 以 K 最邻近算法(K-nearest neighbor algorithm, KNN)建立牛肉产地鉴别模型, 其识别正确率高达 99.14%。吴清松[51]选择对来自挪威、法罗、智利和虹鳟 4 个产地的三文鱼进行产地鉴别研究。采集样品高光谱图像数据后, 采用 SG 结合归一化预处理, 以 CNN-双向门控循环单元神经网络(bidirectional gated recurrent unit, BiGRU)建立三文鱼产地溯源模型, 对应的训练集准确率为 99.6%, 测试集准确率为 99.5%。

以上研究表明, HSI 技术在食品产地溯源中应用效果良好, 对食品产地溯源的正确识别率普遍大于 95%, 可以高效、准确地鉴别食品的产地来源。而且其检测所用的样品不需要制备, 检测时样品也无需经过接触, 可以真正做到无损检测, 特别适合高货值食品。但是该技术还存在一定的缺陷: 由于样品进行了整体检测, 检测数据量很大、

冗余度较高, 信噪比较低, 需要优秀的数据处理和建模算法。

2.4　X 射线荧光光谱技术在食品产地溯源中的应用

近年来, 国内外学者对 XRF 技术在食品产地溯源方面的应用已有一定研究。丁柏尧[52]分析了来自黑龙江牡丹江市和依兰县、贵州黔东南土家族自治州以及四川达州市 4 个产地的水稻样品, 通过能量色散 X 射线荧光光谱技术获得谱图数据, 采用 SG+SNV 预处理, 以 SVM 建立水稻产地识别模型, 对应的验证集识别准确率为 100%, 交叉验证的总体准确率为 98.2%。韦紫玉等[53]采集黑龙江、河北和安徽 3 个产地小麦的 XRF, 通过 SG+中心化预处理, 使用 PCA 将数据降维处理, 以费希尔判别分析(Fisher discriminant analysis, FDA)+二次识别分析(quadratic discriminate analysis, QDA)建立小麦产地鉴别模型, 对应的训练集和测试集正确率分别为 97.06%、94.12%。田琼等[54]结合 XRF 技术对产自美国、阿根廷、巴西和乌拉圭鉴 4 个国家的大豆样本进行产地溯源探索, 采集 XRF 后, 使用箱型图法(box plot method, BPM)预处理, 以 PCA 结合人工神经网络法(artificial neural network method, ANN)建立大豆产地溯源模型, 对应的训练集和测试集正确率分别为 98.2%、95.8%。CABIAL 等[55]通过能量色散 X 射线荧光分析技术对菲律宾生咖啡豆进行产地鉴别, 采集来自科迪勒拉行政区等 4 个产地的咖啡豆的 XRF 数据, 以 RF 建立咖啡豆产地鉴别模型, 对产地鉴别的准确率高达 100%。PANEBIANCO 等[56]使用便携式 XRF 设备对 PDO 认证开心果进行产地溯源研究, 采集 PDO 认证的西西里地区不同产地的 19 种开心果样品的 XRF, 以 PCA 建立开心果产地溯源模型, 可以有效区分开心果的产地。

以上研究表明, 目前 XRF 技术具备非破坏性检测、快速高效、操作相对简便和自动化程度高等优点, 其检测核心与 LIBS 类似, 也是通过元素成分分析进行样品产地溯源, 而且其在植物源性食品的产地溯源方面成效显著。相比之下, 其在动物源性食品领域的溯源应用研究则明显不足, 这应是今后值得深入探索的方向。

2.5　拉曼光谱技术在食品产地溯源中的应用

RS 技术常应用于宝石矿物研究中, 近年来其在食品产地溯源方面的研究也逐渐兴起。王亚轩[57]以黑龙江五常市龙凤山和三河屯、佳木斯市以及杜尔伯特县的 6 个品种的粳米为研究对象, 利用RS技术采集原始光谱, 采用改进的分段拟合+去除基线预处理, 以 SPA-BPNN 建立大米产地识别模型, 对应的训练集识别准确率为 99.87%, 测试集识别准确率为99.23%; 基于此模型开发了在线大米产地鉴别系统, 对五常产地和非五常大米的识别正确率为 91.29%。李伟[58]通过 RS 仪分别获取具有高油、高蛋白和普通特性的23个黑龙江大豆品种光谱数据, 采用SG+SNV 预处理, 以改进随机蛙跳(modified random frog, MRF)-SVM 建立大豆品种鉴别模型, 对应的训练集和预测集的识别准确率分别为 99.56%、95.65%。STRADLING 等[59]通过便携式 RS 对加纳、多哥、科特迪瓦、塞拉利昂和利比里亚 5 个西非国家的棕榈油进行产地识别研究, 采集棕榈油样品 RS 后, 采用 SG 结合归一化预处理, 以 PCA 结合偏最小二乘回归(partial least squares-regression, PLS-R)建立棕榈油产地识别模型。实验结果表明, 模型决定系数为 0.9848, 预测能力为 0.9552, 可以有效地对棕榈油样品进行产地溯源。向玲等[60]采集贵州、四川和湖南 3 个产地(包括赤水河流域左岸、赤水河流域右岸和其他区域)的白酒进行产地鉴别研究, 对采集到的拉曼谱图进行 SG+归一化预处理, 以正交偏最小二乘法(orthogonal partial least square, OPLS)-DA 建立一种高效、可靠的酱香型白酒产地鉴别模型, 不仅能够准确区分白酒产地的省份, 还能对赤水河流域左右岸进行显著区分。周秀雯[61]基于 RS 对马来西亚、泰国、越南和柬埔寨 4 个国家的进口榴莲样品进行产地溯源研究, 采集榴莲样品 RS 后, 使用 SG+荧光背景扣除(fluorescence background subtraction, FBS)+基线校正预处理, 以 PCA-FDA 建立榴莲产地溯源模型, 对榴莲的产地溯源准确率达 80%。卢诗扬等[62]采集美国、中国山东和中国四川 3 个樱桃产地结合 RS 进行产地鉴别, 采集 RS 数据后, 采用 SG+MSC 预处理, 以长短期记忆(long short-term memory, LSTM)建立樱桃产地识别模型, 对产地鉴别的整体准确率高达 99.1%。MANDRILE 等[63]对产自意大利西北部皮埃蒙特地区的 PDO 认证葡萄(纳比奥罗、多赛托和巴贝拉)酿造的葡萄酒进行产地鉴定研究, 样品无需任何处理直接采集 RS 数据, 采用了 DA 建立葡萄酒产地鉴别模型, 对葡萄酒的产地识别准确率达 90%。FOWLER 等[64]结合 RS 对草饲和谷饲牛肉进行鉴别研究, 分别选择来自澳大利亚北部和南部不同地区的牛肉采集 RS 后, 采用 PLS-DA 建立牛肉鉴别模型。模型对草饲和谷饲牛肉的整体识别准确率为 86.3%, 其中南部产区的牛肉鉴别准确率为 73.2%, 北部产区的牛肉鉴别准确率为 95.7%。

上述研究结果显示, RS 技术检测核心是通过特定化学键或官能团进行定性定量分析, 更适合有机物结构分析, 具备检测灵敏度高、检测快速、无损和无污染等优点, 而且在植物源性食品产地溯源中有着广泛的应用。此外, 由于水在 RS 中的信号非常弱, 其 RS 谱图较为简单, 因此 RS 是分析水溶液体系的理想工具。同时, RS 也有一定的不足之处: RS 非常灵敏, 其准确性很容易受到环境因素的影响。

2.6　太赫兹光谱技术在食品产地溯源中的应用

近年来, THz 技术已逐渐应用于食品产地溯源领域。杜秀洋[65]采集江西贡米、东北香米和泰国茉莉香米的 THz 光谱数据, 无需对数据进行预处理, 使用基于径向基函数(radial basis function, RBF)核函数的 LS-SVM 建立大米产

地鉴别模型, 对大米的产地识别准确率高达 100%。SHEN 等[66]对山东、陕西、河南、河北和安徽 5 个产地的小麦进行产地溯源研究, 采集 THz 图谱数据后, 采用 SNV+UVE 法预处理, 以 LS-SVM 建立小麦产地溯源模型, 对小麦的产地溯源准确率可达 96.76%。魏枭[67]对中国、美国和阿根廷 3 个国家的大豆进行产地鉴别, 采集样品的 THz 图谱数据, 经区间偏最小二乘法(interval partial least squares, iPLS)优化选择特征光谱区间, 使用标准化预处理, 以人工蜂群算法(artificial bee colony algorithm, ABC)-SVM 建立大豆产地鉴别模型, 对大豆的产地鉴别整体正确率为 94.74%。胡晓华等[68]采集埃塞俄比亚、印度尼西亚和哥斯达黎 3 个产地的咖啡豆 THz 光谱数据, 通过 PCA 进行光谱特征的降维和提取, 以粒子群参数(partical swarm optimization, POS)-SVM 建立咖啡豆产地鉴别模型, 对应的建模集产地识别准确率为 100%, 预测集准确率为 95%。LIU 等[69]收集产自澳大利亚、西班牙、希腊和意大利 4 个国家的特级初榨橄榄油样品进行产地溯源研究, 采集 THz 数据后, 以遗传算法(genetic algorithm, GA)选择光谱特征, 以 LS-SVM 建立橄榄油产地鉴别模型, 对应的测试集产地识别率为 96.25%。余静孝等[70]采集包括来自新会 5 个产地(古井、七堡、双水, 梅江和三江)的陈皮样品, 采集 THz 光谱, 经 SG 预处理, 以 LDA-支持向量机分类(support vector machine classification, SVC)建立陈皮产地溯源模型, 对应陈皮产地鉴别的测试集与预测集的准确度均达 100%。

以上研究表明, THz 光谱技术检测的核心是鉴定和分析决定物性的生物和化学大分子, 更适合有机物的分析, 具备灵敏性高、前处理简单、透视性强、安全性高等优点, 其在植物源性食品的产地溯源中应用效果较好, 对植物源性食品的产地追溯准确率基本超过 95%。但是 THz 光谱技术在动物源性食品产地溯源方面的应用鲜有报道, 今后在开拓更多种类的植物源性食品的产地溯源的同时, 也可以加强对动物源性食品产地溯源的应用开发。THz 光谱技术还有一定的不足之处: 所用的仪器复杂昂贵、体积庞大, 不便于现场检测; 食品中的水分会干扰 THz 信号, 检测水果等水分含量高的食品需经干燥。

3 结束语

本文系统综述了 5 种光谱检测技术的基本原理及其在食品产地溯源中的最新研究进展, 同时分析了各项技术的适用范围与优缺点。相较于传统化学分析方法前处理复杂耗时、试剂繁多、设备成本昂贵等局限, 无损检测技术在食品产地溯源中具备易操作、快速、无损等优点。

为推动光谱无损检测技术的深入应用, 未来可聚焦以下方向: (1)针对部分光谱检测技术的样品还需制备, 不能真正达成无损检测, 可以开发更多功能模块, 以降低水分等因素对检测的影响, 最终使技术发展成样品无需制样, 无接触、无损检测的理想状态。(2)针对光谱检测设备体积庞大、应用推广受限的现状, 亟需开发小型便携式的检测设备, 或者针对现有的便携式设备, 需提高其检测灵敏度和准确性; (3)构建多种食品, 特别是地理标志产品与 PDO 认证等产品的标准光谱数据库, 建立国家级别的数据库, 甚至进行国与国之间的合作共建全球数据库, 以庞大而规范的数据库支持光谱分析的统一化和标准化; (4)目前计算机技术发展迅速, 应加强对原有算法的优化和开发更优越的算法, 以便于与光谱结合, 提高特征提取、图像成型、图像分析的能力; (5)针对光谱技术在部分食品产地溯源上准确性偏低, 可以进行多种光谱检测技术结合或者光谱检测技术结合其他化学分析方法的研究, 提高检测的准确性。

参考文献

[1] 李雅茹, 李佳佳, 徐晨飞. 科普视角下地理标志产品公众认知影响因素研究——基于 SEM 与 fsQCA 方法的实证分析[J]. 乡村科技, 2025, 16(19): 3–11.
LI YR, LI JJ, XU CF. Study on factors influencing public cognition of geographical indication products from a science communication perspective—an empirical analysis based on SEM and fsQCA methods [J]. Rural Science and Technology, 2025, 16(19): 3–11.

[2] 白杨, 张函. 起底“ 阳澄湖化” 大闸蟹的身世之谜[N]. 北京商报, 2021-10-26(003).
BAI Y, ZHANG H. The mystery of the origin of the “Yangcheng lake transformation” hairy crab [N]. Beijing Business Today, 2021-10-26(003).

[3] LI XM, ZANG MW, LI D, *et al*. Meat food fraud risk in Chinese markets 2012–2021 [J]. Nature Partner Journal Science of Food, 2023, 7(1): 12.

[4] 徐凯鑫. 个个都是“五常大米”? 农产品“蹭名牌”亟待“打假”[N]. 新华每日电讯, 2024-10-29(002).
XU KX. Is every single one “wuchang rice”? The “piggybacking on famous brands” in agricultural products urgently needs to be “counterfeited” [N]. Xinhua Daily Telegraph, 2024-10-29(002).

[5] 安明霞. “产地假冒”“年份虚报”“偷梁换柱”败坏整个行业[N]. 中华合作时报, 2025-02-25(B01).
AN MX. Counterfeiting of origin, false reporting of year, and poaching have corrupted the entire industry [N]. China Cooperative Times, 2025-02-25(B01).

[6] 罗翔. 行刑衔接守匠心跨域协作护公平[N]. 贵州法治报, 2025-09-19(007).
LUO X. Execution connection, craftsmanship, cross domain cooperation, and protection of fairness [N]. Guizhou Rule of Law Daily, 2025-09-19(007).

[7] PAN XW, YAN WJ, WU XP, *et al*. Replacing traditional coffee appraisers with inductively coupled plasma mass spectrometry (ICPMS): From manual sensory evaluation to scientific analysis [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101980.

[8] ZENG GF, WANG ZY, HOU YY, *et al*. Identification of soybean origin via TAGs profile analysis using MALDI-TOF/MS [J]. Food Analytical Methods, 2024(17): 766–772.

[9] HONG YH, BIRSE N, QUINN B, *et al*. Data fusion and multivariate analysis for food authenticity analysis [J]. Nature Communications, 2023,

14(1): 3309.

[10] CHI XL, ZHANG YD, ZHENG N, *et al*. HS-GC-IMS and HS-SPME/GC-MS coupled with E-nose and E-tongue reveal the flavors of raw milk from different regions of China [J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100673.

[11] 唐静, 薛竣仁, 刘洪波, 等. 不同产地中华绒螯蟹螯肉矿质元素含量比较及产地判别研究[J]. 水产科技情报, 2025, 52(3): 152–157.
TANG J, XUE JR, LIU HB, *et al*. A study of mineral element contents and origin discrimination based on chela meats of *Eriocheir sinensis* from different regions [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2025, 52(3): 152–157.

[12] DAVIS RP, BOYD CE, GODUMALA R, *et al*. Assessing the variability and discriminatory power of elemental fingerprints in whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* from major shrimp production countries [J]. Food Control, 2022, 133: 108589.

[13] ZHANG J, MA YQ, SHAO FL, *et al*. Geographical origin identification of tequila based on multielement and stable isotopes [J]. Journal of Food Quality, 2021, 2021(1): 6615264.

[14] 刘星, 饶钦雄, 卢阳阳, 等. 稳定同位素技术溯源羊肚菌产地[J]. 食用菌学报, 2025, 32(1): 77–88.
LIU X, RAO QX, LU YY, *et al*. Stable isotope technology for tracing geographical origin of *Morchella* spp. [J]. Acta Edulis Fungi, 2025, 32(1): 77–88.

[15] 王海燕, 冯邹达, 冯家望, 等. 不同产区海鲈鱼碳和氮稳定同位素比值分析及产地鉴别[J]. 现代农业科技, 2025(12): 135–138, 144.
WANG HY, FENG ZD, FENG JW, *et al*. Analysis of carbon and nitrogen stable isotope ratios and origin identification of sea bass from different production areas [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025(12): 135–138, 144.

[16] 王晓宇, 王珍珍, 胡梦雅, 等. 基于非靶向代谢组学与机器学习的朝天椒产地鉴别[J]. 中国食品学报, 2025, 25(5): 418–427.
WANG XY, WANG ZZ, HU MY, *et al*. Identification of *Capsicum frutescens* origin based on untargeted metabolomics and machine learning [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(5): 418–427.

[17] 李密, 巩志国, 杨丽, 等. 基于非靶向代谢组学的葡萄酒原产地溯源分析[J]. 分析测试学报, 2024, 43(9): 1417–1424.
LI M, GONG ZG, YANG L, *et al*. Origin traceability of wine based on untargeted metabolomics [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2024, 43(9): 1417–1424.

[18] ZHONG P, WEI XQ, XU Y, *et al*. Integration of untargeted and pseudotargeted metabolomics for authentication of three shrimp species using UHPLC-Q-orbitrap [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(31): 8861–8873.

[19] ZHU MT, LONG Y, MA YJ, *et al*. Comparison of chemical and fatty acid composition of green coffee bean (*Coffea arabica* L.) from different geographical origins [J]. Food Science and Technology/Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 2021, 140: 110802.

[20] SALZANO A, MANGANIELLO G, NEGLIA G, *et al*. A preliminary study on metabolome profiles of buffalo milk and corresponding mozzarella cheese: Safeguarding the authenticity and traceability of protected status buffalo dairy products [J]. Molecules, 2020, 25(2): 304.

[21] 张静, 邱嘉兴, 魏晓雅, 等. 一种动物源性食品的 DNA 条形码的溯源方法: 202510688474.8[P]. 2025-09-12.
ZHANG J, QIU JX, WEI XY, *et al*. A method for tracing the DNA barcode of animal derived food: 202510688474.8 [P]. 2025-09-12.

[22] 章沙沙. 基于SSR分子标记构建盘锦大米DNA指纹图谱[J]. 农产品质量与安全, 2025(1): 80–85.
ZHANG SS. DNA fingerprinting of Panjin rice constructed by SSR molecular markers [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2025(1): 80–85.

[23] 陆焦焦. 基于 DNA 条形码的冬虫夏草鉴别及产地溯源研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
LU JJ. Species identification and geographical origin traceability of *Ophiocordyceps sinensis* based on DNA barcoding [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.

[24] 罗晓宏, 王楠希, 陈红娟, 等. 基于化学计量学和近红外光谱法的油莎豆产地溯源[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 178–184.
LUO XH, WANG NX, CHEN HJ, *et al*. Traceability of geographical origin of *Cyperus esculentus* based on chemometrics and near infrared spectroscopy [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 178–184.

[25] CHENG JH, YU PP, HUANG YR, *et al*. Application status and prospect of impedance spectroscopy in agricultural product quality detection [J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1525.

[26] 袁冬青, 周明, 刘长隆, 等. 激光感生击穿光谱技术(LIBS)的原理及影响因素[J]. 光谱学与光谱分析, 2008(9): 2019–2023.
YUAN DQ, ZHOU M, LIU CL, *et al*. The theory and the influential factors of laser induced breakdown spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008(9): 2019–2023.

[27] 孙佳星. 基于 LIBS 技术的水中重金属检测与白芷产地鉴别研究[D]. 保定: 河北大学, 2024.
SUN JX. Research on heavy metal detection in water and identification of the origin of *Angelica dahurica* based on LIBS technology [D]. Baoding: Hebei University, 2024.

[28] 李雄. 基于高光谱成像的薄壳药材酸枣仁种子质量无损检测研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2024.
LI X. Nondestructive testing of seed quality of shelled medicinal material semen ziziphi spinosae based on hyperspectral imaging [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2024.

[29] ZAREEF M, ARSLAN M, HASSAN MM, *et al*. Recent advances in assessing qualitative and quantitative aspects of cereals using nondestructive techniques: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116: 815−828.

[30] 史先肖, 郑乘云, 房秋雨, 等. X 射线荧光光谱技术在食品、生物医药和化妆品领域的应用进展[J]. 分析仪器, 2019(1): 6–11.
SHI XX, ZHENG CY, FANG QY, *et al*. Progress in application of X-ray fluorescence spectroscopy in food, biomedicine and cosmetics [J]. Analytical Instrumentation, 2019(1): 6–11.

[31] 武挺. X 射线荧光光谱分析技术在质量检测中的应用探讨[J]. 化工管理, 2018(17): 202.
WU T. Exploration of the application of X-ray fluorescence spectroscopy analysis technology in quality inspection [J]. Chemical Engineering Management, 2018(17): 202.

[32] 申禹. 基于拉曼光谱技术的不同产地大米的检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
SHEN Y. Research on the detection method of rice from different origins

based on Raman spectroscopy [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.

[33] 杨娅娅, 张艳, 赵坚. 太赫兹技术在农作物品质检测中的研究进展[J]. 应用激光, 2024, 44(1): 109–118.
YANG YY, ZAHNG Y, ZHAO J. Research progress of terahertz technology in crop quality detection [J]. Applied Laser, 2024, 44(1): 109–118.

[34] 葛宏义, 王顺, 蒋玉英, 等. 太赫兹近场成像技术及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(16): 45–64.
GE HY, WANG S, JIANG YY, *et al*. Terahertz near-field imaging techniques and applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(16): 45–64.

[35] 宋少忠, 符少燕, 刘园园, 等. 激光诱导击穿光谱技术对水稻产地识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(6): 1553–1558.
SONG SZ, FU SY, LIU YY, *et al*. Identification of rice origin using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(6): 1553–1558.

[36] 饶刚福, 黄林, 刘木华, 等. 基于激光诱导击穿光谱的脐橙产地鉴别研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 440–445.
RAO GF, HUANG L, LIU MH, *et al*. Origin identification of navel orange based on laser induced breakdown spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronies Progress, 2018, 55(9): 440–445.

[37] 郭茂, 黄忠宇, 汪杰, 等. 基于激光诱导击穿光谱技术结合机器学习算法的 3 种干腌火腿产地识别[J]. 中国食品学报, 2022, 22(10): 279–285.
GUO M, HUANG ZY, WANG J, *et al*. Origin identification of three kinds of dry-cured ham based on laser-induced breakdown spectroscopy technology combined with machine learning algorithm [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(10): 279–285.

[38] ZHAO ZF, CHEN L, LIU F, *et al*. Fast classification of geographical origins of honey based on laser-induced breakdown spectroscopy and multivariate analysis [J]. Sensors, 2020, 20(7): 1878.

[39] 郑柯鑫. 基于 LIBS 技术的人参产地快速鉴别研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
ZHENG KX. Research on rapid identification of ginseng origin based on laser-induced breakdown spectroscopy technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022.

[40] MONCAYO S, ROSALES JD, IZQUIERDO-HORNILLOS R, *et al*. Classification of red wine based on its protected designation of origin (PDO) using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) [J]. Talanta, 2016, 158: 185–191.

[41] KIM MJ, LIM J, KWON SW, *et al*. Geographical origin discrimination of white rice based on image pixel size using hyperspectral fluorescence imaging analysis [J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 5794.

[42] 李泽旭. 基于数据增强与交叉感知的高光谱小麦种子鉴别研究及应用[D]. 新乡: 河南科技学院, 2024.
LI ZX. Hyperspectral wheat seed identification based on data augmentation and cross sensing [D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2024.

[43] 黄琦. 基于高光谱成像技术与机器学习的花生产地溯源与含水率无损检测研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2023.
HAUNG Q. Research on peanut origin traceability and moisture content nondestructive testing based on hyperspectral imaging technology and machine learning [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2023.

[44] CHEN MJ, GUO W, YI XQ, *et al*. Hyperspectral imaging combined with convolutional neural network for Pu'er ripe tea origin recognition [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025: 139: 107093.

[45] YANG R, WEI W, FENG YM. Hyperspectral imaging for non-destructive origin authentication of peeled garlic products [J]. Food Bioscience, 2025, 71: 107298.

[46] 刘爱伦. 基于高光谱成像技术的蜜桔产地、货架期和糖度最优检测位置研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.
LIU AIL. Study on the method of detecting the origin, shelf life and sugar content of orange based on hyperspectral imaging technology [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.

[47] ZHAO Q, MIAO PQ, LIU CQ, *et al*. Accurate and non-destructive identification of origins for lily using near-infrared hyperspectral imaging combined with machine learning [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 129: 106080.

[48] 崔希炜, 黄恺文, 江涛, 等. 基于高光谱成像技术的科克铁热克葡萄品质预测和地理标志识别[J/OL]. 食品与发酵工业, 1−12. [2025-12-04]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042706
CUI XW, HUANG KW, JIANG T, *et al*. Quality prediction and geographical indication identification of Koktiyerek grape based on hyperspectral imaging technology [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1−12. [2025-12-04]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042706

[49] 王靖, 丁佳兴, 郭中华, 等. 基于近红外高光谱成像技术的宁夏羊肉产地鉴别[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 250−254, 260.
WANG J, DING JX, GUO ZH, *et al*. Identification of geographical origins of mutton in Ningxia based on the near infrared hyperspectral imaging technique [J]. Seience and Technology of Food Industry, 2018, 39(2): 250–254, 260.

[50] 郑守国, 翁士状, 刘瑜凡, 等. 融合高光谱成像多类特征的名优牛肉种类鉴别[J]. 激光杂志, 2021, 42(8): 57–61.
ZHENG SG, WENG SZ, LIU YF, *et al*. Identification of famous beef species using multiple futures of hyperspectral imaging [J]. Laser Journal, 2021, 42(8): 57–61.

[51] 吴清松. 三文鱼产地溯源与品质属性的高光谱成像检测方法研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2024.
WU QS. Research on hyperspectral imaging detection method for tracing the origin and quality attributes of salmon [D]. Chendu: Sichuan Agricultural University, 2024.

[52] 丁柏尧. 基于融合光谱的大米产地溯源方法研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江省科学院石油化学研究院, 2025.
DING BY. Research on rice origin tracing method based on fusion spectroscopy [D]. Harbin: Institute of Petrochemistry, Heilongjiang Academy of Science, 2025.

[53] 韦紫玉, 熊颖, 陈通. 基于能量色散型 X 射线荧光光谱技术的小麦产地识别研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(6): 66–69.
WEI ZY, XIONG Y, CHEN T. Study on wheat origin identification based on energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopy [J]. Cereals & Oils, 2019, 32(6): 66–69.

[54] 田琼, 洪武兴, 卢韵宇, 等. 基于X射线荧光光谱分析技术的进口大豆产地鉴别[J]. 中国口岸科学技术, 2021, 3(11): 48–57.
TIAN Q, HONG WX, LU YY, *et al*. Origin discrimination method of imported soybean based on X-ray fluorescence spectrum [J]. China Port

Science and Technology, 2021, 3(11): 48–57.

[55] CABIAL RFL, SALVIEJO GJC, GARCIA EV, *et al*. Varietal and regional traceability of philippine green coffee beans through multi-elemental analysis using portable and energy-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy [J]. Philippine Journal of Material Science & Nanotechnology, 2024, 10(1): 23.

[56] PANEBIANCO S, BARONE G, CAGGIANI MC, *et al*. Quality and origin assessment of pistachio nuts by using X-ray fluorescence spectroscopy and chemometrics [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2025, 223: 111902.

[57] 王亚轩. 基于拉曼光谱的大米产地鉴别机理与系统研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2022.
WANG YX. Study on mechanism and system of rice origin identification based on Raman spectroscopy [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2022.

[58] 李伟. 基于拉曼光谱的高油和高蛋白大豆品种鉴别机理与方法研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2024.
LI W. Study on mechanism and method of high-oil and high-protein soybean varieties identification based on Raman spectroscopy [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2024.

[59] STRADLING J, LIMA C, GROSMAN R, *et al*. Raman on the palm: Handheld Raman spectroscopy for enhanced traceability of palm oil [J]. NPJ Science of Food, 2025, 9(1): 1.

[60] 向玲, 贾俊杰, 毛雪婷, 等. 基于表面增强拉曼光谱技术对不同产地酱香型白酒的鉴别研究[J/OL]. 分析测试学报, 1−17. [2025-12-04]. https://link.cnki.net/urlid/44.1318.TH.20251203.1427.003
XIANG L, JIA JJ, MAO XT, *et al*. Study on the identification of sauce-flavor baijiu from different origins based on surface-enhanced Raman spectroscopy technology [J/OL]. Journal of Instrumental Analysis, 1−17. [2025-12-04]. https://link.cnki.net/urlid/44.1318.TH.20251203.1427.003

[61] 周秀雯. 进口榴莲原产地溯源技术研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021.
ZHOU XW. Study on tracing the geographical origin of imported durian (*Durio zibethinus Murr.*) [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2021.

[62] 卢诗扬, 张雷蕾, 潘家荣, 等. 拉曼光谱结合LSTM长短期记忆网络的樱桃产地鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(4): 1177–1181.
LU SY, ZHANG LL, PAN JR, *et al*. Study on the indetification of the geographical origin of cherries using Raman spectroscopy and LSTM [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(4): 1177–1181.

[63] MANDRILE L, ZEPPA G, GIOVANNOZZI AM, *et al*. Controlling protected designation of origin of wine by Raman spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2016, 211: 260–267.

[64] FOWLER SM, KERR M, HOPKINS DL, *et al*. Validation of Raman spectroscopic models to verify the origin of Australian beef grown under different production systems [J]. Meat Science, 2024, 214: 7.

[65] 杜秀洋. 基于太赫兹时域光谱技术的稻米品质检测研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020.
DU XY. Research on rice quality detection based on terahertz time domain spectroscopy [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020.

[66] SHEN Y, LI B, LI GL, *et al*. Rapid identification ofproducing area of wheat using terahertz spectroscopycombined with chemometrics [J]. Spectrochimica ActaPart A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 269: 120694.

[67] 魏枭. 基于太赫兹光谱的大豆转基因、产地鉴别和蛋白质等定量检测方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
WEI X. Research on transgenic, origin identification and protein etc. quantitative detection methods of soybeans based on terahertz spectroscopy [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.

[68] 胡晓华, 刘伟, 刘长虹, 等. 基于太赫兹光谱和支持向量机快速鉴别咖啡豆产地[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 302–307.
HU XH, LIU W, LIU CH, *et al*. Rapid identification of producing area of coffee bean based on terahertz spectroscopy and support vector machine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(9): 302–307.

[69] 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 Chemistry, 2018, 251: 86–92.

[70] 余静孝, 韦庆益, 罗洁, 等. 结合 SG-LDA-SVC 的太赫兹时域光谱快速无损鉴别陈皮产地的方法研究[J]. 现代农业装备, 2022, 43(4): 16–21, 28.
YU JX, WEI QY, LUO J, *et al*. Rapid nondestructive identification of tangerine peel origin based on terahertz time-domain spectroscopy combined with SG-LDA-SVC [J]. Modern Agricultural Equipment, 2022, 43(4): 16–21, 28.

(责任编辑: 韩晓红　安香玉)