

太赫兹光谱技术在食品工业中的应用

马 皓¹ 黄略略² 段 续¹ 李潇婷² 李 彬² 陈 轩²

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471027;

2. 深圳职业技术大学食品药品学院, 广东 深圳 518055)

摘要:文章总结了太赫兹光谱技术在食品工业中的不同应用场景,分析了太赫兹光谱技术在各类应用中的有效性和优缺点。在食品溯源上,该技术结合光谱和图像信号,通过数学模型进行精准预测,可有效鉴别食品中的掺假问题。在成分检测方面,太赫兹技术通过定性定量分析,能对农药、兽药残留及食品添加剂进行检测,确保食品安全性。对于品质监测,该技术可利用光谱吸收特性,结合数学模型,监控油脂氧化和农产品霉变等品质变化。

关键词:太赫兹光谱;食品溯源;定性定量;成分检测;品质监测

Applications of terahertz spectroscopy in food industry

MA Hao¹ HUANG Luelue² DUAN Xu¹ LI Xiaoting² LI Bin² CHEN Xuan²

(1. College of Food & Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471027, China;

2. School of Food and Drug, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract:The article summarizes the various application scenarios of terahertz spectroscopy technology in the food industry, analyzing its effectiveness, advantages, and disadvantages in different applications. In food traceability, this technology combines spectral and image signals to achieve precise predictions through mathematical models, effectively identifying issues such as food adulteration. In component detection, through qualitative and quantitative analyses, terahertz technology enables the detection of pesticide residues, veterinary drug residues, and food additives to ensure food safety. For quality monitoring, the technology can leverage spectral absorption characteristics and integrate them with mathematical models to monitor quality changes, such as oil oxidation and mold growth in agricultural products.

Keywords: terahertz spectroscopy; food traceability; qualitative and quantitative determination; component detection; quality monitoring

近年来,太赫兹时域光谱技术经历了快速发展,以其穿透性强、安全性高、非接触、分辨率高及非破坏性检测等特性,被广泛应用于安全监控、品质评估、生物医疗等领域^[1]。太赫兹技术的研究方向呈现多样化趋势,最新的研究方向涵盖了提高成像精度的新型太赫兹成像技术^[2],以及与其他技术如光学、微波的融合应用,以发掘更广泛的潜能^[3]。同时,可调谐太赫兹滤波器的研发,为无线通信领域带来了新突破^[4]。此外,太赫兹波在生物医学领域的应用也备受关注,其独特的检测能力为疾病诊断和治疗提供了新途径^[5]。

太赫兹光谱是一种基于太赫兹波段的光谱分析技术,利用食品中的成分对太赫兹光谱的吸收特性和太赫

兹光谱的成像作用,进行食品的安全性检测、质量控制和成分分析等。文章通过总结太赫兹光谱技术在食品工业中的不同应用场景,分析太赫兹光谱技术在各类应用中的有效性和优缺点,并对该技术在食品工业中的进一步应用进行思考和总结,为食品安全和质量控制提供依据。

1 太赫兹光谱技术

1.1 太赫兹波

太赫兹波是指频率为 0.1~10.0 THz 的电磁波,在电磁频谱中位于微波与红外之间,与毫米波和红外波段相邻^[6-7]。作为一种新兴的检测技术,太赫兹技术可以根据样品的光谱特性进行定性或定量分析,并获取技术指

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31972207);广东省食品安全与质量控制科研创新团队(编号:2021KCXTD069)

通信作者:黄略略(1983—),女,深圳职业技术大学教授,博士。E-mail: huangll@szpu.edu.cn

段续(1973—),男,河南科技大学教授,博士。E-mail: duanxu_dx@163.com

收稿日期:2024-06-07 **改回日期:**2025-01-08

标^[8]。近年来,随着太赫兹光谱的快速发展,太赫兹光谱被广泛应用于食品质量及安全控制^[9]、农产品^[10]、高分子化合物^[11-15]、生物医学^[16]、国防^[17]、无损检测器^[18]、无线通信^[19-20]及其他领域^[21]。大多数极性分子在受到太赫兹辐射时会表现出强烈的吸收特性。通过分析其特征光谱,可以确定物质的内部成分。研究^[22]发现,许多有机分子的振动、旋转光谱和弱相互作用力在太赫兹频段范围内。与X射线辐射不同,太赫兹波光子的能量较低,可以避免对生物大分子的损伤并防止光电离^[23],此外,太赫兹光谱的波长长于红外光谱,因此不太容易受到散射效应的影响^[24]。

1.2 太赫兹光谱技术的原理

根据产生原理及应用领域的差异,太赫兹光谱可分为太赫兹频域光谱和太赫兹时域光谱两类。太赫兹频域光谱通常采用相干太赫兹辐射源作为脉冲激光器,选用辐射计作为传感器来测量不同频率下的太赫兹功率,从而直接获取频域信息。太赫兹频域光谱(THz-FDs)因其高分辨率和无需处理复杂数据的特点,适用于气体样品分析。与之相对的太赫兹时域光谱(THz-TDs)是频谱范围较宽且检测速度快,更适合于固体和液体样品的分析^[25]。THz-TDs作为一种目前被广泛采用的太赫兹光谱技术,图1揭示了其核心组件,包括超快脉冲激光器、时间延迟系统、太赫兹发射器和接收器等。超快脉冲激光器发出的激光经过分束镜一分为二,形成泵浦光和探测光两束。泵浦光进入时间延迟装置后,照射到太赫兹发射器上,在其表面产生太赫兹脉冲。这个脉冲随后进入由多个反射镜组成的太赫兹光路系统,穿过样品后抵达太赫兹接收器。与此同时,探测光被反射镜反射并与泵浦光在接收器处汇合,通过调节时间延迟装置,可以逐步构建出完整的太赫兹波形^[26]。

太赫兹时域光谱设备能够获取样品的时域光谱数据,并借助傅里叶变换将这些数据转换为频域光谱信息。在采集光谱数据过程中,可能会遇到由于环境因素、仪器

性能、操作技巧或样品本身的多样性导致的噪声和干扰。为了提升数据的信噪比并确保其可靠性,必须对光谱数据进行有效的预处理,包括平滑处理、校正以及归一化等。同时,利用物质在太赫兹波段的独特指纹特性,可以通过分析光谱中的特征峰位置来对物质进行准确的定性和定量分析^[27]。

1.3 太赫兹成像技术

太赫兹成像技术融合了光谱分析和成像技术的优势,能够精准地测量物体的形貌并通过数字信号处理及频谱分析方法来分析物质的太赫兹光谱响应特性。随着太赫兹波谱检测技术的迅猛发展,众多基于不同原理和结构的太赫兹成像技术应运而生。这些成像技术可以根据使用的辐射源类型被归类为脉冲太赫兹成像技术和连续太赫兹成像技术。连续太赫兹成像技术以其结构简单、成像迅速的特点,提供样品的强度信息,支持非相干成像;而脉冲太赫兹成像技术,虽然在结构上更为复杂且耗时相对较长,却能够提供包括样品的振幅、相位、折射率以及介电常数在内的丰富光学参数信息,属于一种相干成像方式。

随着太赫兹辐射源和探测装置的发展,太赫兹成像技术在成像速度、分辨率、维度和灵敏度等方面取得显著进展。在成像速度方面,时域成像技术受限于光学延迟技术,基于音圈电机带动反射镜的线性机械装置可实现10 ps范围高达100次扫描,而异步光学采样(ASOPS)和电控光学采样(ECOPS)可实现高达100 kHz的光学采样速度,但需要两台昂贵的飞秒激光器。时域成像技术从逐点扫描逐渐演变为线阵扫描和面阵扫描,还发展出基于面阵扫描的快速重构技术。此外,振镜、f-θ扫描装置和光栅等技术进一步提高了成像速度^[2]。

在食品工业中,太赫兹成像技术因其独特优势而备受青睐。与红外光谱相比,太赫兹成像技术具有更低的光子能量,对人体和食品无害,并能穿透包装材料实现非破坏性检测。相较于拉曼光谱,太赫兹成像不仅能识别分子结构,还能同时探测反射和透射信号,提供更全面的数据。虽然高光谱成像也提供详细信息,但太赫兹成像在穿透性和获取相位信息方面更具优势,特别适用于检测不透明物体和评估食品的新鲜度及水分含量。因此,太赫兹成像技术为食品安全提供了更加高效和全面的解决方案。

各类光学检测技术对比见表1。

2 太赫兹技术在食品工业中的应用

2.1 在食品溯源方面的应用

在食品领域,太赫兹光谱技术与机器学习算法的集

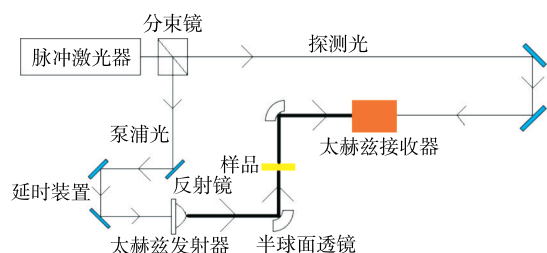


图1 THz-TDs系统示意图

Figure 1 Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system

表 1 各类光学检测技术对比

Table 1 Comparison of various optical inspection technologies

技术名称	优点	缺点	参考文献
红外光谱检测技术	特征性强,可确定分子结构和官能团;应用范围广;有较多标准谱图参考	灵敏度低;对对称分子检测有限;定量分析误差大;谱图解析复杂;含水样品测试受限	[28—31]
拉曼光谱检测技术	与红外光谱互补,对非极性键振动信息灵敏;测量快速;无损分析;测量方式灵活	信号弱;峰易重叠;存在荧光干扰;曲线易非线性;仪器成本高	[32—36]
高光谱成像技术	同时获取空间和光谱信息;信息丰富;可非接触式检测;适用于复杂混合物分析	数据量大,处理分析难;仪器成本高;数据获取速度慢	[37—41]
太赫兹成像技术	光子能量低,对人体和生物样品无伤害;穿透性好,可透视成像;有指纹频谱特性,能识别物质成分;能同时探测反射与透射信号;可获得相位等更多信息	含水样品成像受限;技术复杂,成本高,数据处理难	[42—44]

成,以及化学计量学的结合,构成了食品品质检测和真实性鉴别的核心技术框架。这一框架在陈皮^[45–46]、葵花籽^[47–48]、核桃^[49]、食用油^[50–51]、肉类^[52]和咖啡^[53]等多种农产品检测中展现出显著效能。通过集成K最近邻分类(KNNC)、随机森林分类(RFC)等机器学习算法,结合主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)等化学计量学方法,研究人员能够从太赫兹光谱数据中高效提取关键特征,构建高精度的分类与预测模型。这些研究不仅验证了太赫兹技术在提高检测效率和准确性方面的卓越表现,还强调了数据预处理与模型优化对确保检测结果可靠性的重要性。

2.2 在成分检测方面的应用

太赫兹技术作为一种前沿的检测手段,在食品成分检测领域展现出前所未有的潜力。其独特的分子指纹识别能力^[54],使得太赫兹光谱能够捕捉到化合物特有的振动模式,这为识别和量化农药、兽药残留和非法食品添加

剂提供了精准的工具。李健等^[55]通过太赫兹光谱建立了农药氯氟氰菊酯浓度与吸收系数之间的线性关系;郝国徽等^[56]揭示了杀虫剂的低频振动光谱,强化了农药分子的识别。曹瑶瑶等^[57–58]进一步证明了太赫兹技术在抗生素识别和诺氟沙星浓度检测中的实用性。

太赫兹技术的另一大优势在于其低检测限与宽动态范围。即使在极低浓度下也能观察到化合物的特征吸收峰,展现出良好的线性关系,适用于从微量到高浓度的广泛样品检测。王立琦等^[59–60]利用太赫兹技术结合优化算法,不仅实现了反式脂肪酸的快速检测,还提高了预测的准确性。胡军等^[61–62]通过太赫兹光谱与机器学习算法的结合,实现了对三聚氰胺等食品添加剂的高灵敏度检测,突破了传统检测方法的局限。黄略略等^[63–64]展示了太赫兹技术在低浓度工业明胶检测和海藻糖异构体区分上的应用潜力,为食品安全检测开辟了新路径。

表2为太赫兹光谱技术在食品工业中的应用情况。

表 2 太赫兹光谱技术在食品工业中的应用

Table 2 Applications of terahertz spectroscopy in food industry

食品种类	测量范围/THz	预测模型	结论	参考文献
陈皮	0.2~2.0	SG-LDA-SVC	鉴别不同产地陈皮的准确率达到了100%	[45]
	0.6~1.8	PCA-SVM	陈皮年限预测准确度可达94%以上	[46]
葵花籽	0.2~1.6	SPA-BP	发芽葵花籽整体识别准确率为100%	[48]
	0.5~2.0	/	葵花籽饱满度的预测模型准确度高达96%	[47]
核桃	0.2~1.5	/	成功区分了正常与变质核桃,测量核桃壳厚度误差低至3.7%	[49]
食用油	1.2~6.6	RBFNN	鉴别葵花籽油掺假模型准确率达到100%	[50]
	0.2~1.6	PCA-SVM	成功区分不同种类食用油,识别准确率达93%	[51]
	0.06~4.00	EDM、LDA	利用太赫兹时域光谱技术进行以氧化性为评判目标的食用油品质评价具有一定的可行性,预测集识别正确率为95.65%	[65]
	0.3~2.0	SVM	太赫兹光谱技术结合机器学习算法可以有效检测橄榄油的氧化程度,预测集识别正确率为91.00%	[66]

续表 2

食品种类	测量范围/THz	预测模型	结论	参考文献
肉类	0.6~1.4	PCA-SVM	显著提升了肉类品质分类的准确率	[52]
咖啡	0~2.0	LD-PCA	分析了咖啡样品的 THz-TDS 光谱,利用 PCA 降维研究品种和烘焙程度,不同模型对比,LD 效果最佳,结合 PCA 可区分咖啡样品,为相关识别提供方法	[53]
农药残留	0.5~1.5	BP	建立了农药氯氟氰菊酯浓度与吸收系数之间的线性关系,能够检测出质量浓度为 0.20 μg/mL 的氟氯氰菊酯溶液	[55]
	0.2~2.2	/	证明太赫兹光谱技术在农药分子识别以及晶体密度泛函理论模拟在太赫兹吸收峰指认和振动模式归属方面的可行性	[56]
兽药残留	0.2~1.5	SPA-BPNN SPA-MLR	利用 THz-TDS 技术结合化学计量学方法对喹诺酮类抗生素培氟沙星和氟罗沙星进行定性定量检测是可行的	[57]
	0.4~1.5	SPA	太赫兹时域光谱技术可以比较准确地预测较大梯度的诺氟沙星,并在较小梯度诺氟沙星的预测方面表现出一定的潜力,但检测能力较弱	[58]
反式脂肪酸	0.5~2.5	PSO-LS-SVR	利用太赫兹光谱技术可以分析氢化大豆油中 TFAs 的组成和结构,实现 TFAs 含量的快速检测	[59]
	0.5~2.5	B3LYP	反式油酸在太赫兹波段的指纹谱验证了太赫兹时域光谱技术用于反式油酸检测的可行性	[60]
三聚氰胺	1.0~3.0	GRNN	验证了太赫兹光谱技术结合 GRNN 模型对掺杂三聚氰胺奶粉具有较好的检测效果	[61]
	0.5~2.8	LSSVR	实现基于 THz-TDS 技术对奶粉中非法添加剂三聚氰胺的定量检测	[62]
工业明胶	0~2.5	/	工业明胶的质量分数和吸收曲线峰高之间符合线性关系,可以通过这一发现对工业明胶的太赫兹检测结果进行定量	[63]
海藻糖	0~3.5	/	定性分析确定特征峰可区分异构体且优于红外;定量分析表明太赫兹光谱与 HPLC 分析纯度趋势相符,用于相对定量检测且偏差<5%	[64]
板栗	0.3~3.6	GA-SVM	利用太赫兹时域光谱技术可以实现对板栗果仁霉变程度的区分识别,预测集识别正确率为 100%	[67]
花生	0.3~3.6	Lib-SVM	应用太赫兹时域光谱技术结合 SVM 算法检测霉变花生仁效果良好,预测集识别正确率为 100%	[68]
小麦	0~3.5	D-BLS	与传统 BLS 算法相比,所提方法具有更高的识别精度;与 SVM、BPNN 和 CNN 相比,其在识别精度和时间上均具有明显的优势	[69]
	0.1~4.0	SVM	利用太赫兹光谱技术可实现小麦霉变程度的准确检测,判别准确率高达 98.61%	[70]
面粉	0.1~2.0	/	粉碎谷粒的吸收光谱与小麦中的扩展水网和自由水分子有关	[71]
牛肉、胡萝卜	0.5~2.0	SVR、GPR	GPR 对水分损失预测最佳;基 GPR 模型计算水分含量,有较高预测精度,为 MVD 中牛肉和胡萝卜切片水分含量实时预测提供新方法	[72]
拟南芥	0~2.0	/	叶片的辐射衰减度与组织含水量之间存在关系;应用有效介质理论模型建立了太赫兹测量方法,以测量水合和脱水叶片的含水量	[73]
叶片	0.3~1.5	/	提出了一种测量植物叶片含水量的新方法,将 THz-TDS 传输数据与迭代算法相结合	[74]
猕猴桃	/	/	THz 信号与材料宏观结构有关,FD 时间增加,信号强度对比度下降,FD-MVD 样品结构因干燥过程不同而有差异	[75]
氨基酸	0.5~3.0	/	5 种氨基酸在 0.5~3.0 THz 光学密度与浓度线性相关,混合样品浓度计算有一定误差范围,可通过增加标准样品提高准确性	[24]

2.3 在品质变化监测方面的应用

太赫兹技术在食品安全检测领域,尤其是在食用油脂品质监测和易霉变农产品的检测中,展现出了其高精度与模式识别的独特优势。食用油脂的品质直接影响人体健康,而传统检测方法如气相色谱法、液相色谱法^[76-77]及色谱-质谱联用分析法^[78]虽然精准,但繁琐的样品预

处理过程和严格的检测条件限制了其应用效率。杨雨菲等^[65-66]分别在食用油和橄榄油的品质检测中,运用太赫兹光谱技术结合SVM识别算法,实现了油脂氧化状态的快速、无损检测,准确率高达95.65%和91.00%,标志着太赫兹技术在食用油品质实时监控方面迈出了重要一步,为强化食品安全和保障公众健康提供了强有力的技术支持。

与此同时,太赫兹技术在监测易霉变农产品的霉变程度上也发挥了重要作用。在板栗^[67]、花生^[68]、小麦^[69-70]等农产品的霉变检测中,利用太赫兹光谱技术结合遗传算法、粒子群优化(PSO)等算法,建立了高精度的定性判别模型。这些研究不仅验证了太赫兹技术在农产品霉变程度检测中的高效性和准确性,还突显了技术融合与优化算法在提升检测能力上的重要性,强调了预处理与模型优化对提高检测准确性的关键作用。

太赫兹技术在水分含量监测与食品成分分析方面同样展现出显著潜力。鉴于水果、蔬菜及肉类易受微生物侵害而腐坏,干燥成为延长保质期的有效手段^[79],但传统水分检测方法耗时且效率低下。太赫兹技术利用水分子氢键网络的快速相互作用^[80-81],通过在远红外和微波区与太赫兹波产生共振和弛豫,实现对水分含量的快速、非破坏性检测。含水量低的区域对太赫兹波的透射率高,而含水量高的区域透射率低^[82],这一特性使得太赫兹技术能够直观反映样品含水量。在面粉^[71]、牛肉和胡萝卜^[72]、拟南芥植物^[73]、叶片^[74]等不同食品样本中验证了太赫兹技术在水分含量监测中的准确性和实用性;Huang等^[75]展示了太赫兹技术在优化干燥工艺方面的潜力,如结合冷冻干燥和微波真空干燥,缩短干燥时间,节约能源,同时保持产品品质。

此外,太赫兹技术在食品营养价值和物理性质分析,特别是蛋白质和氨基酸的定量检测方面,显示出了独特优势。Ueno等^[24]利用太赫兹时域光谱技术对氨基酸进行了定量分析,证实了氨基酸的光密度与浓度之间的线性关系,展示了太赫兹吸收光谱在干制食品中蛋白质和氨基酸定量检测的巨大潜力。

尽管太赫兹技术在食品溯源、成分检测和品质监测中展现出巨大潜力,但其在模型泛化、数据预处理和复杂样品基质的处理方面仍面临挑战。同时,检测限、重复性、预测精度和深度学习处理能力仍需提升。未来研究应致力于提高方法普适性、扩展样本集、融合多元分析技术,并深入解析活性成分功能。通过完善理论模型和增强复杂样品处理能力,推动太赫兹技术在食品领域从科研向高效应用的转化,树立无损检测的新标杆。

3 结论与展望

太赫兹特征光谱可用于分辨食品种类与产地、食品中违法添加的物质、监测食品贮藏品质变化,还可以分析食品中水分、蛋白质和氨基酸含量。目前,太赫兹光谱仪的成本可控制在5万元以内,低端太赫兹光谱仪的成本已接近常规光谱仪,如拉曼光谱仪、台式分光光谱仪。为加快其产业化应用,需持续创新以降低成本和提高性能,开发易用的模块化设备;加强市场宣传和交流,提升用户认知;促进产学研合作,开发实用产品。此外,未来的无线局域网也将使用太赫兹波,太赫兹技术被认为是6G数据传输的关键技术之一。因此,该技术将对食品智能加工产生重大影响。尽管太赫兹技术在基础研究和应用研究领域有广泛的应用潜力,但仍有一些局限性需要克服。

(1) 水对太赫兹频谱检测的影响仍是一个亟待解决的问题。虽然现有的研究尝试通过提高辐射功率、运用全衰减反射模块和薄层透射等策略来减轻水的影响,但这些方法并不能从根本上解决水的高敏性带来的干扰。

(2) 太赫兹检测技术在检测速度方面仍有较大的进步空间。可利用快速光学延迟线和非机械时域采样技术提升扫描速度。同时,通过引入2D Galvano扫描仪、空间成像和层析成像技术、改进信号处理技术或采用更先进的快速探测器,进一步加快扫描进程。

(3) 与新技术新方法结合是太赫兹技术持续发展的有效路径。积极探索机器学习、人工智能算法等高效准确模型与太赫兹技术的融合,探索化学测量分析的革命性变革。

通过一系列的技术研发与整合,太赫兹技术在食品工业中将发挥更大的作用,以更强大的技术优势保障食品安全和品质控制。

参考文献

- [1] ZHANG L H, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Terahertz spectroscopy: a powerful technique for food drying research[J]. Food Reviews International, 2023, 39(3): 1 733-1 750.
- [2] 王与焯, 李海滨, 葛梅兰, 等. 太赫兹成像技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(18): 46-61.
WANG Y Y, LI H B, GE M L, et al. Terahertz imaging technology and its application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(18): 46-61.
- [3] 李堂玥, 牟达, 夏鹏宇, 等. 基于太赫兹时域光谱系统共光路光纤耦合系统的设计及误差分析[J]. 中国激光, 2024, 51(8): 174-183.
LI T Y, MU D, XIA P Y, et al. Design and error analysis of a fiber coupling system based on THz-TDS common optical path

- [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(8): 174-183.
- [4] ZAMAN A, ALMOND N W, LU Y Z, et al. Graphene-based external optoelectronic terahertz modulators for high speed wireless communications[C]// 14th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Lancaster: IEEE, 2021: 13-15.
- [5] YAN Z Y, ZHU L G, MENG K, et al. THz medical imaging: from in vitro to in vivo[J]. Trends in Biotechnology, 2022, 40(7): 816-830.
- [6] BAXTER J B, GUGLIETTA G W. Terahertz spectroscopy[J]. Analytical Chemistry, 2011, 83(12): 4 342-4 368.
- [7] JÖRDENS C, KOCH M. Detection of foreign bodies in chocolate with pulsed terahertz spectroscopy[J]. Optical Engineering, 2008, 47(3): 037003.
- [8] YE D D, WANG W Z, ZHOU H T, et al. Characterization of thermal barrier coatings microstructural features using terahertz spectroscopy[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 394: 125836.
- [9] LI Z. Wavelength selection for quantitative analysis in terahertz spectroscopy using a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016, 6(5): 658-663.
- [10] WAHAIA F, KASALYNAS I, SELIUTA D, et al. Terahertz spectroscopy for the study of paraffin-embedded gastric cancer samples[J]. Journal of Molecular Structure, 2015, 1079: 391-395.
- [11] LU S H, ZHANG X, ZHANG Z Y, et al. Quantitative measurements of binary amino acids mixtures in yellow foxtail millet by terahertz time domain spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2016, 211: 494-501.
- [12] SCHERGER B, WIETZKE S, SCHELLER M, et al. Characterization of micro-powders for the fabrication of compression molded THz lenses[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, 32(7): 943-951.
- [13] SCHERGER B, BORN N, JANSEN C, et al. Compression molded terahertz transmission blaze-grating[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(5): 556-561.
- [14] BUSCH S F, BORN N, KOCH M, et al. Terahertz reflection gratings made by room-temperature high-pressure molding[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013, 34(7): 413-415.
- [15] WICHMANN M, MONDOL A S, KOCIC N, et al. Terahertz plastic compound lenses[J]. Applied Optics, 2013, 52(18): 4 186-4 191.
- [16] KIM S J, BORN B, HAVENITH M, et al. Real-time detection of protein-water dynamics upon protein folding by terahertz absorption spectroscopy[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2008, 47(34): 6 486-6 489.
- [17] DAMIAN V, LOGOFĂTU P C, VASILE T. 3D THz hyperspectrum applied in security check-in[C]// Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII. Constanta: SPIE, 2016: 25-28.
- [18] REDO-SANCHEZ A, SALVATELLA G, GALCERAN R, et al. Assessment of terahertz spectroscopy to detect antibiotic residues in food and feed matrices[J]. Analyst, 2011, 136(8): 1 733-1 738.
- [19] JORNET J M, AKYILDIZ I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(10): 3 211-3 221.
- [20] MALHOTRA I, RANJAN JHA K, SINGH G. Analysis of highly directive photoconductive dipole antenna at terahertz frequency for sensing and imaging applications[J]. Optics Communications, 2017, 397: 129-139.
- [21] TU W L, ZHONG S C, INCECIK A, et al. Defect feature extraction of marine protective coatings by terahertz pulsed imaging[J]. Ocean Engineering, 2018, 155: 382-391.
- [22] HE M X, AZAD A K, YE S H, et al. Far-infrared signature of animal tissues characterized by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Optics Communications, 2006, 259(1): 389-392.
- [23] ZEITLER J A, TADAY P F, NEWNHAM D A, et al. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging in the pharmaceutical setting-a review[J]. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2007, 59(2): 209-223.
- [24] UENO Y, RUNGSAWANG R, TOMITA I, et al. Quantitative measurements of amino acids by terahertz time-domain transmission spectroscopy[J]. Analytical Chemistry, 2006, 78(15): 5 424-5 428.
- [25] 延凯悦, 冯毅, 马静艳, 等. 太赫兹应用分析和展望[J]. 邮电设计技术, 2020(4): 6-10.
- YAN K Y, FENG Y, MA J Y, et al. Analysis and prospect of terahertz technology application[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(4): 6-10.
- [26] 孙一健, 王继芬. 太赫兹时域光谱技术在食品、药品和环境领域中的应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 12-21.
- SUN Y J, WANG J F. Research progress of terahertz time-domain spectroscopy in food, drugs, and environment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 12-21.
- [27] 吴遵红, 徐义, 李昌胜, 等. 太赫兹波在无损检测领域的应用[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(9): 180-182.
- WU Z H, XU Y, LI C S, et al. Application of terahertz wave in nondestructive testing field[J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(9): 180-182.
- [28] JOHNSON J B, WALSH K B, NAIKER M, et al. The use of infrared spectroscopy for the quantification of bioactive compounds in food: a review[J]. Molecules, 2023, 28(7):

- 3 215.
- [29] GRASSI S, ALAMPRESE C. Advances in NIR spectroscopy applied to process analytical technology in food industries[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2018, 22: 17-21.
- [30] 周旭, 杨倩倩, 张进, 等. 基于便携式近红外光谱仪的黄桃腐败时间快速预测[J]. *食品与机械*, 2024, 40(5): 101-106, 187.
- ZHOU X, YANG Q Q, ZHANG J, et al. Rapid prediction of yellow peach spoilage time based on portable near infrared spectrometer[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(5): 101-106, 187.
- [31] 邵淑娟, 李丽, 温磊, 等. 中红外光谱模型用于烤肉中苯并[a]芘的快速检测和评估[J]. *食品与机械*, 2023, 39(3): 34-37, 102.
- SHAO S J, LI L, WEN L, et al. Rapid detection and evaluation of benzo[a]pyrene in barbecue by mid-infrared spectroscopy model[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(3): 34-37, 102.
- [32] WU L, TANG X M, WU T, et al. A review on current progress of Raman-based techniques in food safety: from normal Raman spectroscopy to SESORS[J]. *Food Research International*, 2023, 169: 112944.
- [33] WANG K Q, LI Z L, LI J J, et al. Raman spectroscopic techniques for nondestructive analysis of agri-foods: a state-of-the-art review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 490-504.
- [34] PETERSEN M, YU Z L, LU X N. Application of Raman spectroscopic methods in food safety: a review[J]. *Biosensors*, 2021, 11(6): 187.
- [35] 王留留, 孙方涛. 表面增强拉曼光谱技术在食品安全检测领域中的应用[J]. *食品与机械*, 2024, 40(1): 212-218.
- WANG L L, SUN F T. Application of surface-enhanced Raman spectroscopy in food safety detection[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(1): 212-218.
- [36] 胡家勇, 周陶鸿, 姚晓帆, 等. 表面增强拉曼光谱法筛查保健酒中那非类药物[J]. *食品与机械*, 2022, 38(9): 64-71.
- HU J Y, ZHOU T H, YAO X F, et al. Screening of PDE-5 inhibitors in health wine by surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(9): 64-71.
- [37] RAVIKANTH L, JAYAS D S, WHITE N D G, et al. Extraction of spectral information from hyperspectral data and application of hyperspectral imaging for food and agricultural products[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(1): 1-33.
- [38] KANG Z L, ZHAO Y C, CHEN L, et al. Advances in machine learning and hyperspectral imaging in the food supply chain [J]. *Food Engineering Reviews*, 2022, 14(4): 596-616.
- [39] BAIANO A. Applications of hyperspectral imaging for quality assessment of liquid based and semi-liquid food products: a review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 214: 10-15.
- [40] 章恺, 朱丽芳, 李入林, 等. 基于改进 WOA-LSSVM 和高光谱的猕猴桃糖度无损检测[J]. *食品与机械*, 2024, 40(5): 107-112, 226.
- ZHANG K, ZHU L F, LI R L, et al. Non destructive detection of kiwifruit sugar content based on improved WOA-LSSVM and hyperspectral analysis[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(5): 107-112, 226.
- [41] 赵静远, 张俊芹, 孙梅, 等. 基于高光谱成像的羊肉掺假可视化无损定量检测[J]. *食品与机械*, 2022, 38(10): 61-68.
- ZHAO J Y, ZHANG J Q, SUN M, et al. Visualization of lamb adulteration based on hyperspectral imaging for non-destructive quantitative detection[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(10): 61-68.
- [42] AFSAH-HEJRI L, HAJEB P, ARA P, et al. A comprehensive review on food applications of terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(5): 1 563-1 621.
- [43] FENG C H, OTANI C. Terahertz spectroscopy technology as an innovative technique for food: current state-of-the-Art research advances[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(15): 2 523-2 543.
- [44] FU Y, REN Y Q, SUN D W. Novel analysis of food processes by terahertz spectral imaging: a review of recent research findings[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 147: 104463.
- [45] 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 J X, WEI Q Y, 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.
- [46] 杨少壮, 李灿, 李辰, 等. 不同贮存年限陈皮的太赫兹光谱和成像的差异分析[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(12): 258-266.
- YANG S Z, LI C, LI C, et al. The differences in the dried tangerine peels stored for different years revealed by terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(12): 258-266.
- [47] 刘俊彬. 薄壳类作物种子质量 THz 光谱和图像检测应用基础研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021: 33.
- LIU J B. Basic research on application of terahertz spectrum and image thin shell seed quality detection[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021: 33.
- [48] 孙晓荣, 田密, 刘翠玲, 等. 基于太赫兹成像技术的发芽葵花籽无损检测研究[J]. *食品科技*, 2023, 48(2): 296-302.
- SUN X R, TIAN M, LIU C L, et al. Nondestructive testing of germinated sunflower seeds based on THz imaging technology [J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(2): 296-302.
- [49] 戚淑叶, 张振伟, 赵昆, 等. 太赫兹时域光谱无损检测核桃品质的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3 390-3 393.
- QI S Y, ZHANG Z W, ZHAO K, et al. Evaluation of walnut by

- terahertz nondestructive technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(12): 3 390-3 393.
- [50] 殷明. 基于宽频太赫兹光谱和化学计量学的食用油脂鉴别及掺假检测研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 77.
- YIN M. Research on the authentication and adulteration detection of the edible oil by broadband terahertz spectroscopy and chemometrics[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 77.
- [51] 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.
- LIAN F Y, FU M X, GE H Y, et al. Identification of four kinds of edible oils by terahertz time-domain spectroscopy[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(7): 69-73.
- [52] 杨少壮, 李灿, 李辰, 等. 基于太赫兹光谱分析技术的肉类鉴别[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(11): 227-235.
- YANG S Z, LI C, LI C, et al. Study of meat identification based on terahertz spectroscopy[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(11): 227-235.
- [53] HUANG L L, LIU M L, LI B, et al. Terahertz spectroscopic identification of roast degree and variety of coffee beans[J]. Foods, 2024, 13(3): 389.
- [54] 马卿效, 李春, 李天堂, 等. 太赫兹光谱技术在农药检测领域的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 81-89.
- MA Q X, LI C, LI T Y, et al. Research progress of terahertz spectroscopy in the field of pesticide detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 81-89.
- [55] 李健, 焦丽娟, 李逸楠. 太赫兹时域光谱系统在分析氟氯氰菊酯正己烷溶液中的应用[J]. 纳米技术与精密工程, 2015, 13(2): 128-133.
- LI J, JIAO L J, LI Y N. Application of terahertz time-domain spectroscopy in determination of cyfluthrin in n-hexane[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2015, 13(2): 128-133.
- [56] 郝国徽, 郭昌盛, 杜勇, 等. 除虫脲和高效氯氟氰菊酯的太赫兹光谱及密度泛函理论研究(英文)[J]. 光散射学报, 2013, 25(2): 198-208.
- HAO G H, GUO C S, DU Y, et al. Investigation of diflubenzuron and λ -cyhalothrin by terahertz spectroscopy and density functional theory[J]. The Journal of Light Scattering, 2013, 25(2): 198-208.
- [57] 曹瑶瑶, 李霞, 白军朋, 等. 基于 THz-TDS 技术的培氟沙星和氟罗沙星抗生素定性定量检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(6): 1 798-1 803.
- CAO Y Y, LI X, BAI J P, et al. Study on qualitative and quantitative detection of pefloxacin and fleroxacin veterinary drugs based on THz-TDS technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(6): 1 798-1 803.
- [58] 白军朋, 李斌, 张淑娟, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的诺氟沙星浓度检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(9): 2 710-2 716.
- BAI J P, LI B, ZHANG S J, et al. Study on norfloxacin concentration detection based on terahertz time domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(9): 2 710-2 716.
- [59] 王立琦, 王睿莹, 姚静, 等. 氢化大豆油中反式脂肪酸的太赫兹光谱分析[J]. 中国食品学报, 2022, 22(12): 282-289.
- WANG L Q, WANG R Y, YAO J, et al. THz spectroscopic analysis of trans-fatty acids in hydrogenated soybean oil[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(12): 282-289.
- [60] 康旭升, 张光新, 陈锡爱, 等. 反式油酸的太赫兹光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(10): 2 629-2 633.
- KANG X S, ZHANG G X, CHEN X A, et al. Terahertz spectroscopic investigation of elaidic acid[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(10): 2 629-2 633.
- [61] 胡军, 徐振, 李茂鹏, 等. 基于神经网络算法与太赫兹光谱检测技术的奶粉三聚氰胺含量测定[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 370-377.
- HU J, XU Z, LI M P, et al. Determination of melamine content in milk powder based on neural network algorithm and terahertz spectrum detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 370-377.
- [62] 郭以恒, 燕芳, 赵渺钰, 等. 基于太赫兹光谱的三聚氰胺定量分析[J]. 光学学报, 2023, 43(19): 297-303.
- GUO Y H, YAN F, ZHAO M Y, et al. Quantitative analysis of melamine based on terahertz spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(19): 297-303.
- [63] 黄略略, 李辰, 李彬, 等. 太赫兹波谱用于违法添加工业明胶的检测[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(11): 33-39.
- HUANG L L, LI C, LI B, et al. Studies on illegal additive industrial gelatin detection by terahertz spectroscopy[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(11): 33-39.
- [64] HUANG L L, LI C, LI B, et al. Studies on qualitative and quantitative detection of trehalose purity by terahertz spectroscopy[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(4): 1 828-1 836.
- [65] 杨雨菲, 刘翠玲, 吴静珠, 等. 食用油储存期品质变化的太赫兹光谱无损识别[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 248-254.
- YANG Y F, LIU C L, WU J Z, et al. Terahertz spectroscopy for non-destructive identification of quality change of edible oils during storage[J]. Food Science, 2021, 42(12): 248-254.
- [66] 刘伟, 刘长虹, 余俊杰, 等. 基于时域太赫兹光谱技术的橄榄油氧化程度检测研究[J]. 南方农机, 2021, 52(5): 5-7, 17.
- LIU W, LIU C H, YU J J, et al. Detection of oxidation degree of olive oil based on time-domain terahertz spectroscopy[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 5-7, 17.
- [67] 孙晓荣, 田密, 刘翠玲, 等. 太赫兹衰减全反射技术对板栗果

- 仁霉变程度判别研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(14): 4 527-4 533.
- SUN X R, TIAN M, LIU C L, et al. Identification of moldy degree of Chinese chestnut kernel by terahertz attenuated total reflection technique[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(14): 4 527-4 533.
- [68] 刘翠玲, 胡莹, 吴静珠, 等. 基于太赫兹衰减全反射技术的花生霉变程度判别[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 333-338, 355.
- LIU C L, HU Y, WU J Z, et al. Discrimination of peanut mildew degree based on terahertz attenuated total reflection spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 333-338, 355.
- [69] 葛宏义, 王飞, 蒋玉英, 等. 基于宽度学习的太赫兹光谱图像小麦霉变识别研究[J]. 量子电子学报, 2023, 40(3): 360-368.
- GE H Y, WANG F, JIANG Y Y, et al. Identification of wheat mold using terahertz images based on Broad Learning System [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2023, 40(3): 360-368.
- [70] 杨承霖, 刘嘉祺, 郭芸成, 等. 结合太赫兹光谱与机器学习的小麦霉变程度判别[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 343-350.
- YANG C L, LIU J Q, GUO Y C, et al. Detection of mildew degree of wheat using terahertz spectroscopy and machine learning[J]. Food Science, 2023, 44(12): 343-350.
- [71] CHUA H S, OBRADOVIC J, HAIGH A D, et al. Terahertz time-domain spectroscopy of crushed wheat grain[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Long Beach, CA: IEEE, 2005: 17.
- [72] REN Y Q, LEI T, SUN D W. *In-situ* indirect measurements of real-time moisture contents during microwave vacuum drying of beef and carrot slices using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2023, 418: 135943.
- [73] CASTRO-CAMUS E, PALOMAR M, COVARRUBIAS A A. Leaf water dynamics of Arabidopsis thaliana monitored in-vivo using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2 910.
- [74] GENTE R, BORN N, VOB N, et al. Determination of leaf water content from terahertz time-domain spectroscopic data [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013, 34(3): 316-323.
- [75] HUANG L L, LIAN M M, DUAN X, et al. Studies on the quality and moisture distribution of kiwifruit dried by freeze drying combined with microwave vacuum drying[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(1): e13581.
- [76] 陈通, 谷航, 陈明杰, 等. 基于气相离子迁移谱对葵花籽油精炼程度的检测[J]. 食品科学, 2019, 40(18): 312-316.
- CHEN T, GU H, CHEN M J, et al. Measurement of the refining degree of sunflower oil based on gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2019, 40(18): 312-316.
- [77] 龙锦林, 武斌, 王春丽, 等. 液相色谱在食用油中甘油三酯分析检测中的应用[J]. 食品工业, 2019, 40(9): 316-319.
- LONG J L, WU B, WANG C L, et al. Application of liquid chromatography in the analysis of triglycerides in edible oils [J]. The Food Industry, 2019, 40(9): 316-319.
- [78] 苗雨田, 杨悠悠, 王浩, 等. 气相色谱-质谱法测定食用油中3-氯丙醇酯[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(11): 135-139.
- MIAO Y T, YANG Y Y, WANG H, et al. Determination of 3-chloropropanol-1, 2-diol (3-MCPD) esters in edible oil by gas chromatography and mass spectrometry[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(11): 135-139.
- [79] JIANG H, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Comparison of drying characteristic and uniformity of banana cubes dried by pulse-spouted microwave vacuum drying, freeze drying and microwave freeze drying[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(9): 1 827-1 834.
- [80] STANLEY H E, BULDYREV S V, CANPOLAT M, et al. The puzzle of liquid water: a very complex fluid[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1999, 133(1/2/3/4): 453-462.
- [81] YADA H, NAGAI M, TANAKA K. Origin of the fast relaxation component of water and heavy water revealed by terahertz time-domain attenuated total reflection spectroscopy [J]. Chemical Physics Letters, 2008, 464(4/5/6): 166-170.
- [82] SANTAVICCA D F, REULET B, KARASIK B S, et al. Energy resolution of terahertz single-photon-sensitive bolometric detectors[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(8): 083505.