

太赫兹光谱技术在储粮品质检测中的应用

杨 东, 苑江浩, 常 青, 曹 阳, 赵会义*

(国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

摘 要: 近年来粮食质量与安全问题备受国民的关注, 了解粮食在储藏过程中品质的变化趋势, 特别是在早期阶段对其劣变状况进行快速、准确检测是当前粮食行业的重要任务之一。太赫兹光谱探测与成像技术具有快速、无损、衰减性小、无电离辐射伤害等特性, 现已成为无损检测技术的研究热点, 在人体安全检查、环境监测、病变诊断、农产品质量控制等诸多领域取得了阶段性进展, 在储粮品质检测方面也具有良好的应用前景。本文主要对太赫兹时域光谱技术的探测原理和光学参数提取以及成像技术进行了综述, 重点阐述了该技术在储粮品质鉴别与分类、储粮新陈度、储粮真菌污染以及储粮害虫检测方面的应用研究, 并对太赫兹光谱技术在粮食品质快速检测中的发展趋势和应用前景进行了展望。

关键词: 太赫兹光谱; 储粮品质; 快速检测

Application of terahertz spectroscopy technology in the quality detection stored grain

YANG Dong, YUAN Jiang-Hao, CHANG Qing, CAO Yang, ZHAO Hui-Yi*

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

ABSTRACT: In recent years, the quality and safety of food grain have attracted national attention. It is one of the important tasks for grain industry to understand the changing trend of grain quality during storage, especially to detect its deterioration quickly and accurately in the early stage. Terahertz (THz) spectroscopy detection and imaging technology has become a research hotspot because of its the characteristics of fast, nondestructive, low attenuation and no ionizing radiation damage. It has made progress in many fields, such as human safety inspection, environmental monitoring, disease diagnosis, agricultural product quality detection and so on, and has a good application prospect in quality detection of stored grain. This paper reviewed the principle, parameters extraction and imaging technology of THz spectroscopy, and emphatically expounded the applications of identification and classification, freshness, fungal contamination and insects of stored grain. Finally, this paper prospected the development and application prospects of THz spectroscopy in the rapid detection of grain quality.

KEY WORDS: terahertz spectroscopy; stored grain quality; rapid detection

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ47037704)

Fund: Supported by the National Key Foundation for Exploring Scientific Instrument (2014YQ47037704)

*通讯作者: 赵会义, 博士, 研究员, 主要研究方向为粮食储藏工艺及信息化技术。E-mail: 501950375@qq.com

*Corresponding author: ZHAO Hui-Yi, Ph.D, Professor, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, No.11, Street of Baiwan Zhuang, Xicheng District, Beijing 100037, China. E-mail: 501950375@qq.com

1 引言

粮食作为国家重要的战略储备资源之一,其质量安全问题备受国民的关注^[1,2]。粮食在生产、收获、运输、储藏、加工等各个环节中都会受到不确定因素的影响使其品质发生劣变,特别是在储藏环节中,若不能早期监测粮食的品质变化,及时采取应对措施,将直接影响后期粮食加工成品的质量,造成经济损失^[3-5]。因此,了解粮食在储藏过程中品质的变化趋势,明确优鲜粮的评价标准,特别是在早期阶段对粮食品质的劣变状况进行快速、准确检测,并做出安全性评价是当前粮食行业的重要任务之一^[6-8]。

传统上用于粮食品质检测的方法主要以感官评价、理化和微生物检验为主^[9-11],但这些方法存在主观性强、不易量化、样品预处理繁琐、仪器成本高、检测周期长等缺陷,已满足不了现代粮食储藏工艺技术的发展需求^[12,13]。因此,迫切的需要开发一种快速、无损、准确、便宜的检测方法用于粮食多种品质的检测。

太赫兹(terahertz, THz)波是介于红外和微波之间的电磁辐射波。从能量角度上,太赫兹能量(约 4 meV)的大小在电子和光子之间,处于电子域向光子域的过渡区域^[14,15]。因受限于太赫兹波源产生以及检测技术,20 世纪 90 年代之前,电磁波谱区域中的太赫兹波段尚未有效的开发与利用,被人们称为“太赫兹空隙”(THz gap)^[16]。近年来,随着半导体材料技术、超快激光技术、数据分析技术的迅猛发展,促进了 THz 技术瓶颈问题的突破,也使 THz 技术逐步成为无损检测领域的研究热点^[17,18]。

相比于近红外光谱、拉曼光谱、X-ray 光谱等其他较成熟的无损检测技术,THz 光谱技术也存在固有的特性,如宽频带区域可避免散射的影响;能量低,以非电离辐射的方式作用于物品或人体,将伤害降到最低;对多数大分子生物表现出很强的吸收和谐振、能够以很小的衰减穿透物质;此外,太赫兹波段对水的吸收比较敏感,可通过该特性对物质进行鉴别分析^[19,20]。针对这些特性,THz 技术已在人体安检、天文观测、医疗疾病诊断、农产品质量控制与监测等诸多领域得到了应用^[21,22]。在粮食品质检测中还处于探索阶段,具有很大的发展空间和实用价值。鉴于此,本文主要对太赫兹时域光谱技术的探测原理和光学参数的提取以及成像技术进行了综述;重点阐述了该技术在储粮品质鉴别与分类、储粮新陈度、储粮真菌污染以及储粮害虫检测方面的应用研究;最后对太赫兹光谱技术在储粮品质检测中的发展趋势和应用前景进行了展望,以期对储粮品质现场、快速、原位检测与分选提供方法借鉴,同时能为粮情早期检测中预警模型的建立提供技术支持。

2 太赫兹光谱技术

2.1 太赫兹光谱技术原理

太赫兹波是指电子频谱上频率为 0.1~10 THz 的辐射波,其波长范围从 0.03 到 3 mm,介于无线电波和光波之间。是目前尚未完全开发和利用的电磁波谱区域。针对待测样品的不同物化特性,可将 THz 光谱技术划分为太赫兹时域波谱(terahertz time domain spectroscopy, THz-TDS),太赫兹时间分辨波谱(time-resolved terahertz spectroscopy, TRTS)和太赫兹发射波谱(terahertz emission spectroscopy, TES)3 种形式^[23,24]。其中,THz-TDS 技术的应用较为广泛,该技术早先(20 世纪 90 年代)是由 AT&T Bell 实验室以及 IBM 的 Watson 研究中心联合探索、突破发展起来的一种波谱类相干探测技术^[25,26],这项技术是基于飞秒超快激光技术来激发出的太赫兹脉冲信号并作用于样品,利用待测样品对 THz 不同频率的光谱产生的特征吸收信息来分析样品的内部组分、外部属性及其相互作用。THz-TDS 系统针对不同的测试需求可分为透射式、反射式、差分式、啁啾展宽式等,其中前 2 种方式较为常用。图 1^[4,14]为透射式太赫兹时域光谱检测系统示意简图。

首先由飞秒超快激光器(laser)产生激光脉冲作为系统的输入光源,脉冲信号经由分束镜(cent beam splitter, CBS)分成 2 路光信号 L1 和 L2。其中 L1 为强度较大的泵浦光(pump light),L2 为光强较弱的探测光(probe light)。L1 光路上泵浦光信号经传输先进入延迟装置系统,后入射到砷化镓(GaAs)光导天线上激发出 THz 脉冲信号,进一步经过一组校准后的抛物面镜(PM1 和 PM2)使脉冲信号射向待测样品。L2 光路上较弱的探测光的脉宽要远小于入射 THz 信号,探测光脉冲是通过电光晶体碲化锌(ZnTe)产生 THz 脉冲信号,随后作用于待测样品,再经另一组抛物面镜(PM3 和 PM4)入射到 ZnTe 晶体上,并与延迟系统的探测光谱汇合,共同触发探测器,形成 THz 完整波形。THz 信号经过电光晶体透射,探测光的相位会根据光的折射率或信号调制方式改变偏振状态,被棱镜(PBS)分成 2 束光且在偏振方向上垂直,最后入射到锁相放大器进行信号放大,并通过计算机进行数据采集以获取待测样品的最终完整 THz 光谱信息^[27,28]。

2.2 太赫兹时域光谱参数提取

太赫兹脉冲信号在作用于待测样品时部分能量会被样品吸收或散射,因此常用于描述物质材料光学性质的物理参数折射率($n_b(\omega)$)、消光系数($k_b(\omega)$)和吸收系数($a_b(\omega)$)同样适用于 THz 光谱特性的分析,但参数的计算通常需要两个理想化的条件:THz 时域光谱系统的响应函数与时间无关;待测样品的结构均匀且表面光滑。计算公式如下:

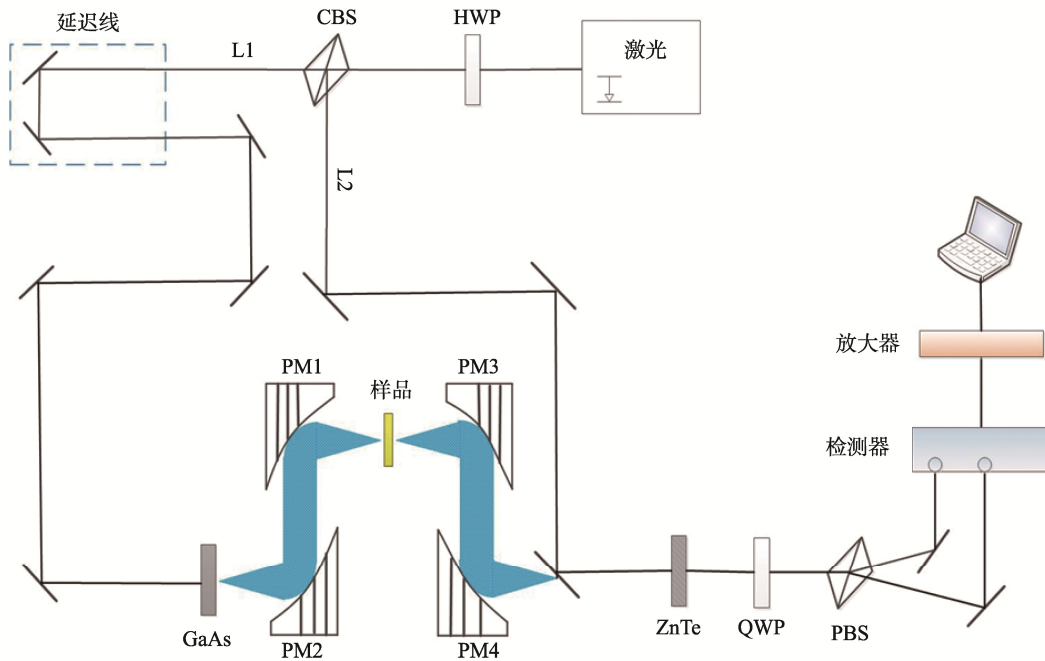


图1 透射式太赫兹时域光谱检测系统示意简图

Fig.1 Schematic of Terahertz time-domain system of transmission

$$n_b(\omega) = \Phi(\omega) \frac{c}{\omega d} + 1 \quad (1)$$

$$k_b(\omega) = \ln \left[\frac{4n_b(\omega)}{\rho(\omega)[n_b(\omega) + 1]^2} \right] \frac{c}{\omega d} \quad (2)$$

$$\alpha_b(\omega) = \frac{2k_b(\omega)\omega}{c} \frac{2}{d} \ln \left[\frac{4n_b(\omega)}{\rho(\omega)[n_b(\omega) + 1]^2} \right] \quad (3)$$

式中, ω 代表圆频率, $\Phi(\omega)$ 和 $\rho(\omega)$ 分别代表样品接收信号与参考信号比值的辐角和模, d 代表样品的厚度, c 是光速。也可根据上述 3 种基本参数变量计算出如介电常数等其他光学参数用于分析, 具体细节请参见文献^[29]。

2.3 太赫兹光谱成像技术

与可见光、近红外、拉曼、X 射线等可成像技术相类似, THz 波谱同样可以作为目标物体的信号源进行成像表达与分析。针对 THz 信号发射源的不同, 目前可将 THz-TDS 成像技术分成脉冲波成像和连续波成像^[5,30]。采集到的样品 THz-TDS 光谱图像具有丰富的外部属性特征信息, 如样本的形态特征, 纹理特征, 每个像素点在 THz 频段的响应强度等都可作为判别目标物特性的可靠依据。与时频域光谱信息相结合分析, 可进一步增加目标检测的全面性与准确性, THz 成像技术在无损检测领域具有很大发展潜力^[31,32]。

Hu 等^[33]搭建了 THz-TDS 成像系统平台, 对芯片和树叶进行了成像实验, 为太赫兹成像技术的研究开辟了先例。近年来, 随着光学成像技术, 计算机视觉技术, 数据分析与集成技术的不断发展, 太赫兹成像技术的研究不断取

得突破, 并在安防检查、医学癌变诊断、食品包装材料、集成电路芯片检测等多个领域得到了应用。在农业上系统化、规模化的应用处于起步阶段, 特别是在粮食品质检测方面具有很高的利用价值和发展空间。

3 太赫兹光谱技术在储粮品质检测中的应用研究

3.1 在储粮品质鉴别与分类方面的研究

太赫兹波谱区域的开发与利用起步较晚, 特别是在粮食品质快速检测方面还具有较大的研究空间。多数学者首先围绕着 THz 光谱技术对储粮品质展开了定性方面的研究, 如通过玉米籽粒不同区域对 THz 光谱的吸收特性对优质种子进行鉴别与分选; 优选出最适宜的光谱区域, 建立了小麦品种的分类模型; 融合多种化学计量学方法建立了转基因、非转基因大米及水稻种子的判别分类模型; 建立了大米中农药吡虫啉残留的检测模型(应用进展如表 1 所示)。由此可知, 利用 THz 光谱技术对粮食品种的分类、转基因种子的鉴别、农药残留检测等进行应用是可行的。

3.2 储粮新陈度检测方面的研究

粮食是有生命的活体, 自身具有生理生化特性, 在储藏过程中不断的与储粮生态环境进行着信息交换, 消耗大分子的有机物质, 随着储藏期限的延长, 生态环境的恶化, 粮食会出现变性以及营养物质流失的现象, 致使其逐渐陈

化,品质下降,直至丧失使用和食用价值。因此,储粮新陈度早期变化的快速和准确检测愈加重要。

通常,粮食在储藏过程中其水分、氨基酸、淀粉、粘度值、发芽率等指标会随着品质下降而发生变化,可通过对指标的检测来预知储粮新陈度状况,从而为进一步决策提供依据。相关研究人员针对 THz 光谱对水分的敏感性吸收作用建立了小麦粉粒中含水量的预测模型;对小麦样品的储藏年份、以及芽变初期状况、发芽阶段、麦芽糖含量分别进行了检测,并取得了较为理想的研究结果;另有研究人员对谷子样品中的谷氨酸、谷氨酰胺和酪氨酸进行了定量分析,新建模型具有更好的鲁棒性和稳定性,应用细节如表 1 所示。由此可知,太赫兹光谱技术有很大的潜力对粮食在储藏过程中的多种新陈度指标进行定量分析。当前 THz 技术对小麦样品的相关研究报道较多,而对于稻谷、玉米、大豆等其他储粮相关品质指标检测方面的研究还需进一步推进。

3.3 储粮真菌污染检测方面的研究

粮食在储藏过程中,除了自身生理作用的影响,还会受到生态环境中有害微生物的影响使其品质发生劣变。有害微生物在适宜环境下会不断分解粮食中的营养物质,使其变质、霉腐、致使粮食出现变色、变味、生霉等症状,甚至还会产生具有毒性和致癌性的真菌毒素,严重影响了储粮的品质与安全状况,还会对人、畜健康构成威胁。因此,对储粮危害真菌进行早期检测和及时预报的任务不可忽视。储粮中常见的危害真菌主要以灰绿曲霉、亮白曲霉、赭曲霉、局限曲霉、黄曲霉、青霉等为主,其中黄曲霉是导致粮堆快速发热和霉变的主要危害真菌,部分黄曲霉可产生毒性较大且具有致癌性的黄曲霉毒素,是当前研究的重点。目前,利用 THz 技术检测储粮危害真菌的研究还尚未成熟,但已有相关学者对其进行了探索。如对黄曲霉毒素 B₁ 和 M₁ 标准液在 THz 波段内吸收峰位置以及吸收强度进行了分析;进一步对从玉米种提取出的黄曲霉毒素 B₁ 进

表 1 太赫兹光谱技术在粮食品质检测中的应用研究
Table 1 Application research on quality in grain using terahertz spectroscopy

应用领域	研究样本	研究方法	研究内容	参考文献
品质鉴别与分类	玉米种子	空间图样成份分析	玉米种子鉴定与识别	2006 ^[34]
	高油玉米	图谱统计分析	玉米种子油分检测与品种判别	2014 ^[35]
	小麦	偏最小二乘, 区间偏最小二乘	品种判别	2015 ^[36]
	大米	LS-SVM, RF, PCA-BPNN	转基因大米鉴别	2016 ^[37]
	水稻	SR, LS-SVM, RF	转基因水稻种子鉴别	2017 ^[38]
	大米粉末	SVR, PLS, iPLS, biPLS	大米粉末中农药吡虫啉残留检测	2015 ^[39]
新陈度检测	小麦、小麦粉	统计分析	不同水分含量检测	2005 ^[40]
	小麦	统计分析	不同年份小麦检测	2015 ^[6]
	谷子	PLS, N-PLS	谷氨酸、谷氨酰胺和酪氨酸	2017 ^[41]
	小麦籽粒	PLS, LS-SVM, BPNN	发芽早期阶段检测	2016 ^[42]
真菌污染检测	小麦	PCA, SVM	麦芽糖检测	2018 ^[43]
	玉米	多重 D-S 证据理论	黄曲霉毒素 B ₁	2014 ^[44]
		指纹图谱分析	黄曲霉毒素 B ₁ 和 M ₁	2014 ^[45]
	玉米	PLS, PCR SVM	黄曲霉毒素 B ₁ 定量预测	2016 ^[46]
	小麦	PCA, SVM, PLSR, BPNN	不同霉变程度检测	2015 ^[47]
	小麦籽粒	伪彩色图统计分析	粮虫侵染检测	2014 ^[48]
害虫检测	稻谷	PLS-DA	稻谷样品中识别玉米象	2015 ^[49]
	小麦	统计分析	霉变、虫蛀、和发芽小麦分类	2014 ^[50]
	小麦粉	PLSR	小麦粉中预测玉米象碎片	2015 ^[51]

注: PLS: partial least squares, 偏最小二乘法; iPLS: interval partial least squares, 间隔偏最小二乘法; biPLS: backward interval partial least squares, 反向间隔偏最小二乘法; PLS-DA: partial least squares discrimination analysis, 偏最小二乘判别分析; LS-SVM: least squares support vector machines, 最小二乘支持向量机; RF: random forests, 无线电频率; PCA-BPNN: principal component analysis-BP neural network, 主成分分析 BP 神经网络; PLSR: partial least squares regression, 偏最小二乘回归。

行了有效检测;在此基础上,相关学者建立了不同浓度梯度的黄曲霉毒素 B₁ 含量的定量预测模型,取得一定进展;另有学者利用多元数据分析方法对不同霉变程度的小麦籽粒进行判别(见表 1)。由此可知,利用 THz 光谱技术结合化学计量学方法对检测储粮受霉菌及真菌毒素感染状况的研究已经开展,但多数研究关注黄曲霉及其毒素的感染状况,缺乏对其他典型储藏真菌的鉴别,及储粮早期霉变状况的检测方面的研究。

3.4 储粮害虫检测方面的研究

影响粮食品质变化的一个重要因素就是在储粮生态环境中出现的不同种类的储粮害虫,对粮堆不断的侵染。如习惯于在粮粒内部蛀蚀、生长、繁殖的初期性粮虫玉米象、谷蠹、米象、麦蛾等,这些害虫不易被检测和清除,还有一些能够危害粮物碎屑和粉末的食性粮虫赤拟谷盗、长角扁谷盗、锯谷盗等构成了粮虫的主要来源^[52,53]。这些粮虫在粮堆中进行取食、呼吸、排泄等生命活动时散发出热量和水分等致使粮食出现发热、发芽、霉变等品质劣变的现象,有些粮虫的代谢产物还含有毒素和致癌物质,存在着严重的健康风险问题。THz 光谱技术用于储粮品质和真菌检测的研究已经开展,用于储粮害虫检测方面的研究相对较少,但也有部分学者进行了尝试,如通过对 THz 光谱的吸收强度来检测小麦籽粒被粮虫的侵染程度;建立了稻谷样品中识别玉米象的判别模型,以及小麦粉中玉米象碎片含量的预测模型,并取得理想结果;另有研究人员通过光谱差异性对正常、霉变、虫蛀、发芽小麦进行了检测(见表 1)。由此可知,利用 THz 技术对粮虫相关信息进行检测的研究还未系统化、深入化的开展,今后可将 THz 图像与光谱特征结合分析,对粮虫与粮粒进行全面的检测。

4 讨 论

与其他光谱类检测技术相比(表 2)^[3,9,13],THz-TDS 技术以其快速、无损、频带宽、衰减性小、无电离辐射伤害等特性在检测领域已经得到了国内外学者的广泛关注。在

人体安全检查、环境监测、病变诊断、农产品质量安全监控等诸多领域取得了阶段性进展,在农业领域还没有系统化、规模化的开展研究与应用,特别是在粮食行业 THz 技术的研究还处于探索阶段,具有广阔的应用前景和发展空间。但 THz 技术也存在一定的局限性:太赫兹波普范围内的光子能量对水分具有较强的敏感性,实验过程中需严格把控环境条件,保持清洁、干燥,因此太赫兹技术不适合对高水分含量样本进行检测;散射可能会影响某些待测物质在太赫兹波段的特定吸收强度与位置,需要进一步利用算法进行提取或筛选;目前太赫兹光谱检测设备多数为高成本,大规模系统,便携式、集成化、低成本的检测仪器还处于待研发阶段,这就限制了该技术在诸多领域的应用与推广。

5 总结与展望

目前,THz 技术在储粮品质检测中以定性判别为主,多参数指标定量分析的研究还有待进一步展开,THz 技术可从以下几个方面进行突破:选择具有代表性、典型性的储粮样本是确保定性判别与定量分析准确性的前提,可根据粮食的品种、产地、储藏时间等条件,利用多元化的实验数据对储粮品质劣变状况进行更深入的机理分析,并作为 THz 光谱建模的基础数据;针对 THz 光谱信息量较弱且存在重叠和冗余的问题,应遵循数据简化与模型性能提升的原则,突破现有的常规数据建模方法,开发出一些新颖的数据处理与分析方法,能够最大限度挖掘出与储粮品质指标最为相关的特征信息,建立出储粮品质分析最为适宜的定量与定性模型;当前,THz 光谱检测系统的成本较高,多数为实验室层面大规模大尺度的仪器设备,阻碍了 THz 光谱技术实用化和产业化发展,随着激光技术、设备集成技术以及数据分析与存储技术的成熟,THz 光谱探测及其成像系统将会向小型化、集成化、便携式的方向发展,也会为储粮品质现场快速检测提供便宜式服务。

表 2 不同光谱检测技术优势与局限性比较
Table 2 Comparison of the advantages and limitations among different spectroscopy techniques

方法	优势	不足
太赫兹光谱技术	安全性,低能量,频带宽透射性好,非电离辐射	仪器成本较高,对高水分含量样本比较敏感,
近红外光谱技术	快速,无损,操作简单表征样品内部成分信息	选择性不好,灵敏度差,单点扫描,不能检测外部属性
高光谱成像技术	高分辨率,多波段,图谱合一内部成分外部属性同时表征,	仪器成本较高,数据量较大,数据降维处理复杂多变
拉曼光谱技术	可对化学信息直接表达,较高的分辨率测定分子结构,	成像扫描速度较慢,散射强度易受光学系统参数影响
X 射线荧光光谱	较强穿透性,可获取样品 2D 和 3D 断层图像	高电离辐射,图像采集与分析过程复杂,

参考文献

- [1] Orina I, Manley M, Williams PJ. Non-destructive techniques for the detection of fungal infection in cereal grains [J]. *Food Res Int*, 2017, 100(1): 74–86.
- [2] Zhang X, Lu S, Liao Y, *et al.* Simultaneous determination of amino acid mixtures in cereal by using terahertz time domain spectroscopy and chemometrics [J]. *Chemometr Intell Lab*, 2017, 164: 8–15.
- [3] 褚璇. 谷物霉菌的高光谱成像辨识方法和霉变玉米籽粒检测方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- Chu X. Hyperspectral imaging identifications for cereal fungi and detection methods for moldy maize kernels [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [4] 陈锡爱. 太赫兹时域光谱及其成像检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Chen XA. Research on measurement technology based on terahertz time-domain spectroscopy and imaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [5] 曹阳, 魏雷, 赵会义, 等. 我国绿色储粮技术现状与展望[J]. *粮油食品科技*, 2015, 23(S1): 11–14.
- Cao Y, Wei L, Zhao HY, *et al.* Status and prospect of technology of green grain storage in China [J]. *Sci Technol Cereal Oil Food*, 2015, 23(S1): 11–14.
- [6] 葛宏义, 蒋玉英, 马海华, 等. 小麦新陈度的 THz 快速无损检测研究[J]. *光散射学报*, 2015, 27(2): 191–194.
- GE HY, Jiang YY, Ma HH, *et al.* Study on rapid nondestructive evaluation of the freshness wheat using Terahertz time domain spectroscopy [J]. *Chin J Light Scatt*, 2015, 27(2): 191–194.
- [7] 吴子丹, 赵会义, 曹阳, 等. 粮食储藏生态系统的仿真技术应用研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2014, 22(1): 1–6.
- Wu ZD, Zhao HY, Cao Y, *et al.* Research progress on the application of simulation technology in grain storage ecosystem [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2014, 22(1): 1–6.
- [8] 胡丽华, 郭敏, 张景虎, 等. 储粮害虫检测新技术及应用现状[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 286–290.
- Hu LH, Guo M, Zhang JH, *et al.* New detection technology and application status of stored-grain insects [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2007, 23(11): 286–290.
- [9] Wang KQ, Sun DW, Pu HB. Emerging non-destructive terahertz spectroscopic imaging technique: Principle and applications in the agri-food industry [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2017, 67: 93–105.
- [10] Lu SH, Li BQ, Zhai HL, *et al.* An effective approach to quantitative analysis of ternary amino acids in foxtail millet substrate based on terahertz spectroscopy [J]. *Food Chem*, 2018, 246: 220–227.
- [11] 王秀芹, 张敏, 颜萍. 食品微生物检测技术研究进展[J]. *微生物学杂志*, 2012, 32(6): 77–79.
- Wang XQ, Zhang M, Yan P. Advanced in food microbiological determination technology [J]. *J Microbiol*, 2012, 32(6): 77–79.
- [12] 王若兰, 白栋强, 姚玮华. 主要储备粮种在不同温度状态下储藏品质的研究[J]. *郑州工程学院学报*, 2003, 24(4): 5–8.
- Wang RL, Bai DQ, Yao WH. Storage qualities of staple grains change in different temperature [J]. *J Zhengzhou Grain Coll*, 2003, 24(4): 5–8.
- [13] 李芳, 陆安祥, 王纪华. 拉曼光谱在粮食检测中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(11): 4408–4414.
- Li F, Lu AX, Wang JH. Application of Raman spectroscopy in grain detection [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7(11): 4408–4414.
- [14] 谢丽娟, 徐文道, 应义斌, 等. 太赫兹波谱无损检测技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 246–255.
- Xie LJ, Xu WD, Ying YB, *et al.* Advancement and trend of Terahertz spectroscopy technique for non-destructive detection [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2013, 44(7): 246–255.
- [15] 张栋文, 袁建民. 太赫兹技术概述[J]. *国防科技*, 2015, 36(2): 12–16.
- Zhang DW, Yuan JM. Introduction to terahertz technology [J]. *Natl Def Sci Technol*, 2015, 36(2): 12–16.
- [16] Xu JZ, Zhang CL, Zhang XC. Recent progress in terahertz science and technology [J]. *Prog Nat Sci-Mater*, 2002, 12(10): 729–736.
- [17] Shin HJ, Choi SW, Ok G. Qualitative identification of food materials by complex refractive index mapping in the terahertz range [J]. *Food Chem*, 2018, 245: 282–288.
- [18] 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 Chem*, 2018, 251: 86–92.
- [19] 李斌, 龙园, 刘欢, 等. 太赫兹技术及其在农业领域的应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2): 1–9.
- Li B, Long Y, Liu H, *et al.* Research progress on Terahertz technology and its application in agriculture [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2018, 34(2): 1–9.
- [20] 蒋玉英, 葛宏义, 廉飞宇, 等. 基于THz技术的农产品品质无损检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(8): 2047–2052.
- Jiang YY, Ge HY, Lian FY, *et al.* Application of THz technology to nondestructive detection of agriculture product quality [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2014, 34(8): 2047–2052.
- [21] Jansen C, Wietzke S, Peters O, *et al.* Terahertz imaging: Applications and perspectives [J]. *Appl Optics*, 2010, 49(19): 48–56.
- [22] Gowen AA, O'Sullivan C, O'Donnell CP. Terahertz time domain spectroscopy and imaging: Emerging techniques for food process monitoring and quality control [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2012, 25(1): 40–46.
- [23] Thrane L, Jacobsen RH, Jepsen PU, *et al.* THz reflection spectroscopy of liquid water [J]. *Chem Phys Lett*, 1995, 240(4): 330–333.
- [24] Wallace VP, Cole BC, Woodward RM, *et al.* Biomedical applications of terahertz technology [J]. *Proc Spie*, 2002, 1(17): 73–81.
- [25] Auston DH, Cheung KP, Valdmanis JA, *et al.* Cherenkov radiation from femtosecond optical pulses in electro-optic media [J]. *Phys Rev Lett*, 1984, 53: 1555–1558.
- [26] Fittinger C, Grischowsky D. Point source terahertz optics [J]. *Appl Phys Lett*, 1988, 53(16): 1480–1482.
- [27] Baxter JB, Guglietta GW. Terahertz spectroscopy [J]. *Anal Chem*, 2011, 83(12): 4342–4368.
- [28] 沈飞, 应义斌. 太赫兹光谱和成像技术在食品安全检测中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(6): 1445–1449.
- Shen F, Ying YB. Application of Terahertz spectroscopy and imaging technology in food safety inspection [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2009, 29(6): 1445–1449.
- [29] Dorney TD, Baraniuk RG, Mittleman DM. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy [J]. *J Opt Soc Am A*, 2001, 18(7): 1562–1571.

- [30] Liu W, Liu C, Hu X, *et al.* Application of terahertz spectroscopy imaging for discrimination of transgenic rice seeds with chemometrics [J]. Food Chem, 2016, 210: 415–421.
- [31] Haddad J, Bousquet B, Canioni L, *et al.* Review in terahertz spectral analysis [J]. TrAC -Trend Anal Chem, 2013, 44: 98–105.
- [32] 刘欢, 韩东海. 基于太赫兹时域光谱技术的饼干水分定量分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(3): 725–729.
- Liu H, Han DH. Quantitative detection of moisture content of biscuits by terahertz time-domain spectroscopy [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(3): 725–729.
- [33] Hu BB, Nuss MC. Imaging with terahertz waves [J]. Opt Lett, 1995, 20(16): 1716–1718.
- [34] 逮美红, 沈京玲, 郭景伦, 等. 太赫兹成像技术对玉米种子的鉴定和识别[J]. 光学技术, 2006, 32(3): 361–363.
- Lu MH, Shen JL, Guo JL, *et al.* Identification of maize seeds using terahertz transmitted spectral imaging [J]. Opt technol, 2006, 32(3): 361–363.
- [35] 梁川, 戚淑叶, 李曦染, 等. 太赫兹时域光谱检测高油玉米油分初探[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, (3): 730–735.
- Liang C, Qi SY, Li XR, *et al.* Preliminary study on terahertz time-domain spectroscopy in oil detection of high oil maize [J]. J Food Saf Qual, 2014, (3): 730–735.
- [36] Ge H, Jiang Y, Lian F, *et al.* Characterization of wheat varieties using terahertz time-domain spectroscopy [J]. Sensors, 2015, 15(6): 12560–12572.
- [37] Liu W, Liu C, Hu X, *et al.* Application of terahertz spectroscopy imaging for discrimination of transgenic rice seeds with chemometrics [J]. Food Chem, 2016, 210: 415–421.
- [38] Hu X, Lang W, Liu W, *et al.* A non-destructive terahertz spectroscopy-based method for transgenic rice seed discrimination via sparse representation [J]. J Infrared Millimeter Terahertz Waves, 2017, 38(8): 1–12.
- [39] Chen Z, Zhang Z, Zhu R, *et al.* Application of terahertz time-domain spectroscopy combined with chemometrics to quantitative analysis of imidacloprid in rice samples [J]. J Quantit Spectrosc Radiat Trans, 2015, 167: 1–9.
- [40] Chua HS, Obradovic J, Haigh AD, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy of crushed wheat grain [C]. Microwave Symp Digest, 2005, 4: 399–400.
- [41] Lu SH, Li BQ, Zhai HL, *et al.* An effective approach to quantitative analysis of ternary amino acids in foxtail millet substrate based on terahertz spectroscopy [J]. Food Chem, 2017, 246: 220–227.
- [42] Jiang YY, Ge HY, Lian FY, *et al.* Early detection of germinated wheat grains using terahertz image and chemometrics [J]. Sci Rep, 2016, 6: 21299.
- [43] 蒋玉英, 葛宏义, 张元. 基于太赫兹成像技术的小麦麦芽糖定量检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(10): 3017–3022.
- Jiang YY, Ge HY, Zhang Y. Quantitative determination of maltose concentration in wheat by using terahertz imaging [J]. Spectrosc Spect Anal, 2018, 38(10): 3017–3022.
- [44] 廉飞宇, 杨静, 付麦霞, 等. 玉米中黄曲霉毒素 B₁ 的太赫兹时域光谱检测与识别[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(8): 111–117.
- Lian FY, Yang J, Fu MX, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy analysis for Aflatoxin B₁ solution [J]. J Chin Cere Oil Ass, 2014, 29(8): 111–117.
- [45] 李利龙, 吴磊, 向洋, 等. 黄曲霉毒素的太赫兹检测研究[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(1): 72–74.
- Li LL, Wu L, Xiang Y, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy of aflatoxin [J]. Opt Optoe Technol, 2014, 12(1): 72–74.
- [46] Ge HY, Jiang YY, Lian FY, *et al.* Quantitative determination of aflatoxin B₁ concentration in acetonitrile by chemometric methods using terahertz spectroscopy [J]. Food Chem, 2016, 209: 286–292.
- [47] Jiang YY, Ge HY, Lian FY, *et al.* Discrimination of moldy wheat using terahertz imaging combined with multivariate classification [J]. RSC Adv, 2015, 5(114): 93979–93986.
- [48] Tan Z, Lu J, Luo J, *et al.* Continuous-wave terahertz imaging applied to detect infestations caused by insects in grain [J]. Adv J Food Sci Technol, 2014, 6(2): 271–274.
- [49] 谭佐军, 陈阳, 谢静, 等. 太赫兹时域光谱检测谷粒中储粮害虫的研究[J]. 中国粮油学报, 2015, (6): 125–129.
- Tan ZJ, Chen Y, Xie J, *et al.* Detection of pests during grain storage by using terahertz time-domain spectroscopy [J]. J Chin Cere Oil Ass, 2015, (6): 125–129.
- [50] 葛宏义, 蒋玉英, 廉飞宇, 等. 小麦品质的太赫兹波段光学与光谱特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(11): 2897–2900.
- Ge HY, Jiang YY, Lian FY, *et al.* nondestructive evaluation of wheat quality using terahertz time domain spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2014, 34(11): 2897–2900.
- [51] 陈阳. 太赫兹时域光谱检测储粮害虫的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- Chen Y. Research on store-product insect by using terahertz time domain spectroscopy [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [52] 郭蕊, 王金水, 渠琛玲, 等. 电子鼻在储粮品质检测方面的研究进展[J]. 粮油仓储科技通讯, 2010, 26(5): 35–37.
- Guo R, Wang JS, Qu SL, *et al.* Research progress in grain storage quality detection using electronic nose [J]. Grain Oil Stor Technol Commun, 2010, 26(5): 35–37.
- [53] 程曦, 吴云志, 张友华, 等. 基于深度卷积神经网络的储粮害虫图像识别[J]. 中国农学通报, 2018, 34(1): 154–158.
- Chen X, Wu YZ, Zhang YH, *et al.* Image recognition of stored grain pests: based on deep convolutional neural network [J]. Chin Agric Bull, 2018, 34(1): 154–158.

(责任编辑: 武英华)

作者简介



杨东, 博士, 实习研究员, 主要研究方向为农业信息化技术。
E-mail: 965796040@qq.com



赵会义, 博士, 研究员, 主要研究方向为粮食储藏工艺及信息化技术。
E-mail: 501950375@qq.com