

# 太赫兹科学技术在食品质量安全领域的应用研究进展

马微<sup>1</sup>, 程丽<sup>2</sup>, 单艺<sup>3</sup>, 王海波<sup>1</sup>, 魏书娟<sup>1</sup>, 杨春雨<sup>1</sup>

(1. 东宁出入境检验检疫局, 黑龙江 东宁 157299; 2. 黑龙江大学生命科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
3. 国家乳业工程技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:** 食品安全问题日益引起人们的关注, 而常规的分析技术存在操作过程复杂、检测时间长、污染环境等缺点, 因此迫切需要开发操作简便、检测时间短、可以实施现场检验的无损检测技术来完成食品质量安全检测。太赫兹光谱技术提供了一种新型的食品安全检测手段。本文简要概述了太赫兹波的特点, 详细介绍了太赫兹辐射技术在食品安全领域的最新应用进展, 并探讨了太赫兹光谱技术在食品安全领域应用存在的问题。

**关键词:** 太赫兹技术; 食品质量; 食品安全; 应用

## Application of Terahertz Science and Technology in Food Quality and Safety Research

MA Wei<sup>1</sup>, CHENG Li<sup>2</sup>, SHAN Yi<sup>3</sup>, WANG Haibo<sup>1</sup>, WEI Shujuan<sup>1</sup>, YANG Chunyu<sup>1</sup>

(1. Dongning Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Dongning 157299, China; 2. College of Life Science, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 3. National Dairy Food State Supervision and Inspection Center, Harbin 150086, China)

**Abstract:** The problem of food safety has aroused people's attention increasingly. The conventional analytical techniques have such disadvantages as complex operation process, long detection time and environmental pollution. Therefore, it is urgently needed to develop simple and time-saving methods that enable on-site nondestructive detection for food safety. Terahertz (THz) science and technology provides a new solution to the problem. In the present paper, a brief overview of the features of THz science and technology is given. In addition, the latest progress in the application of THz technology in food quality and safety detection is summarized. Problems encountered in its application in the field of food safety are also discussed.

**Key words:** terahertz technology; food quality; food safety; application

中图分类号: TS207.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2015) 11-0039-05

doi: 10.15922/j.cnki.rlyj.2015.11.009

太赫兹 (terahertz, THz) 辐射通常是指频率在 0.1~10 THz (波长在 30  $\mu\text{m}$ ~3 mm) 之间的电磁辐射, 其波段介于微波与红外光之间, 在电磁波谱中占有很特殊的位置, 处于电子学向光子学的过渡区域, 具有非常重要的学术价值和应用前景。

THz波具有非破坏性、穿透性、低能性、指纹特性、宽带性等主要特性, 这些特性决定了THz技术在材料科学、生物医学、无损检测、食品安全、通信以及军事领域具有巨大的应用潜能<sup>[1-3]</sup>。由于许多生物分子的振动和转动能级对应太赫兹波段, 因此使用太赫兹光谱技术能够更好地探究这些生物分子 (糖类、氨基酸、蛋白质等) 的振动情况<sup>[4-6]</sup>, 在食品安全检测方面起到重要作用。

## 1 太赫兹光谱在食品成分检测的应用

### 1.1 太赫兹光谱在蛋白质检测的应用

自2000年Markelz等<sup>[7]</sup>首次将太赫兹时域光谱应用于

蛋白质研究以来, 太赫兹技术已经在检测蛋白质构象变化、分子间相互作用以及对蛋白含量的定量等方面得到了广泛应用。Castro-Camus等<sup>[8]</sup>研究了对蓝光敏感的光敏黄色蛋白 (photoactive yellow protein, PYP) 对太赫兹波的吸收情况, 结果表明, 在0.25~2.0 THz范围内, 稳定态蛋白的太赫兹波吸收明显高于中间态蛋白状态, 且吸收缺乏特征峰。Yoneyama等<sup>[9]</sup>研究了牛血清蛋白 (bovine serum albumin, BSA) 的天然构象与热变性构象的不同。研究者又通过检测分子集体振动模式的变化发现, 太赫兹技术可以进行分子构象变化的研究, 并对溶液中蛋白质的集体振动模式、水化性质以及介电性质等方面做了许多研究<sup>[10-12]</sup>。Jones等<sup>[13]</sup>研究了抗原抗体复合物与纯抗体的太赫兹光谱, 这种载体兼具高度的结合力与太赫兹透明度, 两者之间的太赫兹波吸收存在明显差异, 这说明太赫兹技术可以用于无标记的蛋白质复合物检验。近些年来, 人们尝试使用太赫兹技术对蛋白质含量进行

收稿日期: 2015-05-13

基金项目: 国家质检总局科技计划项目 (2013IK155); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31101288)

作者简介: 马微 (1978—), 女, 高级工程师, 博士, 研究方向为食品安全。E-mail: mawei1599@126.com

检测。滕学明等<sup>[14]</sup>利用太赫兹时域光谱对3种奶粉、1种杏仁粉样品进行了分析,结果表明,蛋白质含量较高的样品吸收率和折射率均较高。由于奶粉的重要成分是蛋白质,蛋白质由于其肽键、分子间氢键的作用更容易受到电磁场影响,因而在THz波段吸收更强烈,并且与含量相关。由此可见,利用太赫兹技术进行蛋白质定量测定是可行的。

### 1.2 太赫兹光谱在糖类检测的应用

尽管糖类在太赫兹波段无明显特征吸收峰存在,但结合量子化学理论糖类已成为开展研究蛋白质之后的又一大生物分子。最初人们研究了单糖和二糖的太赫兹波段的光谱特性<sup>[15-16]</sup>。张同军等<sup>[17]</sup>运用密度函数理论计算了孤立 $\beta$ -D-吡喃半乳糖分子的结构及其在THz波段的振动频率,并据此对半乳糖分子在THz波段的特征吸收峰进行了指认。随着THz时域光谱技术的进一步发展应用,2011年梁承森等<sup>[18]</sup>利用太赫兹时域光谱技术对木糖醇和D-木糖进行了了光谱测量,结果表明,在0.3~2.6 THz波段内,木糖醇在1.62、1.87、2.51 THz位置处出现吸收峰,而D-木糖的吸收峰位于1.67、1.96、2.46 THz。2015年Shiraga等<sup>[19]</sup>采用太赫兹时域光谱衰减全反射测量了单糖(葡萄糖和果糖)和双糖(蔗糖和海藻糖),研究了氢键在水合状态和解构中的作用。但目前国际上对于糖类分子在THz波段的研究仍处于探索阶段,尤其对于复杂基体中糖类的研究更是亟需开展的课题研究<sup>[20-21]</sup>。

### 1.3 太赫兹光谱在氨基酸检测的应用

人们最早采用太赫兹光谱在食品安全领域的研究,主要是针对氨基酸方向的应用。Taday等<sup>[22]</sup>首次报道了室温下L-谷氨酸的太赫兹吸收光谱及吸收谱随温度变化的特性。接着Yu等<sup>[23]</sup>报道了用THz技术研究室温下色氨酸在0.2~2.0 THz波段的折射率、吸收系数及其扭曲振动模式的弛豫时间,并利用密度泛函理论(density functional theory, DFT)进行了模拟计算,认为色氨酸分子的扭曲振动模式与其链状和环状结构有关。以上研究都进行了理论峰值的比较,为THz光谱的实验研究提供了科学依据。Yamaguchi等<sup>[24]</sup>又进一步研究了室温下丙氨酸对映异构体及其外消旋化合物在0.3~2.7 THz范围内的吸收谱,结果显示对映异构体和外消旋化合物之间存在明显差异,得到了各自明显的吸收峰,表明了THz时域光谱技术可以鉴别化合物的微小差别,因而可以用于物质检测与分析。Ueno等<sup>[25]</sup>又进一步研究了L-谷氨酸、L-谷氨酸酸钠、谷氨酸盐、L-半胱氨酸和组氨酸的太赫兹光谱吸收系数,它们的光学密度与其浓度成线性相关。这些结果为氨基酸分子的鉴别及认识分子对THz波的吸收动力学特征提供了依据。

### 1.4 太赫兹光谱在食品中水分检测的应用

THz光谱无损检测技术是建立在生物样品THz波段

独特光谱性质的基础之上,特别是由于水对THz波段有非常高的吸收系数(1 THz约 $230\text{ cm}^{-1}$ ,为可见光的105倍)<sup>[26]</sup>,THz波对水分含量非常敏感。农作物在成熟和贮藏阶段,水分的蒸发对其新鲜度和表面光泽有很大影响,目前尚没有合适的农产品表面湿度变化检测技术。由于THz电磁波对水分极其敏感,以及相对近红外和可见光波段小的散射效应,使得水分测量和基于微小水分差异的其他检测在该波段成为可能。Chua等<sup>[27]</sup>利用THz波对水分的敏感性测量了小麦粉中的水分;对于碾碎的小麦粉,在0.1~2.0 THz范围内运用不同含水量(干燥、12%、14%、18%)的小麦粉引起的THz波的衰减建立预测模型,可以测量样品的水分含量;但由于散射和样品取向的影响,THz光谱无法预测整个麦粒的水分含量。Yokoyama等<sup>[28]</sup>在低频THz波段(约0.3 THz)采用总溶解性固体物质(total dissolved solids, TDS)方法进行非接触式精确测量脱水食品(速溶咖啡)的含水量,研究了水分的厚度和THz吸收光谱的关系,以及如何改进水分测定的灵敏度。刘欢等<sup>[29]</sup>选取表面平整的薄片饼干样品,利用透射模式,通过对测得的时域谱、频域谱以及菲涅尔公式计算得到的折射率和吸收谱,与饼干水分含量化学值建立线性关系及数学模型,进而对饼干中的水分含量进行了测定。

### 1.5 太赫兹光谱在脂肪检测的应用

研究者利用瘦肉与脂肪对THz波的不同吸收特性对肉制品进行了一系列品质检测<sup>[30-32]</sup>。康旭升等<sup>[33]</sup>利用THz时域光谱技术研究了反式油酸THz波段的光学特性,在此波段内存在多个特征吸收峰,样品的平均折射率为1.43,主要是由于分子内振动和分子间振动共同引起的吸收。2010年Li等<sup>[34-35]</sup>又对植物油品质进行了THz光谱分析研究。随着这种无损检测技术的快速发展,此技术将越来越多地被应用到掺假检验中。廉飞宇等<sup>[36]</sup>利用太赫兹波谱技术测量了大豆油及一种地沟油在0~3.0 THz范围内的时域谱和频域吸收谱,并通过实验得到两种油的折射率、吸收系数等重要光学参数,结果表明,两种油在此波段的特性显著不同,并且会随着频率的增加而变化。由此可见,太赫兹光谱技术应用到脂肪检测中指日可待。

### 1.6 太赫兹光谱在维生素检测的应用

各种维生素分子对太赫兹辐射的响应主要来自于分子的低频集体振动模式,其位置和强度不仅与分子结构有关,而且还对分子构象、所处环境及分子间的相互作用等因素非常敏感。于斌等<sup>[37]</sup>研究了室温条件下结构相似的烟酸和烟酰胺以及烟碱的太赫兹光谱,测定了3种物质的时间分辨率,得到了频率响应和折射率色散关系。颜志刚等<sup>[38]</sup>又进一步利用以飞秒激光为基础的太赫兹时域光谱技术(THz time-domain spectroscopy, THz-TDS)



研究了室温下核黄素和烟酸在0.2~2.0 THz范围内的光学特性,结果表明,核黄素和烟酸在此波段有明显的特征吸收峰且吸收谱存在显著差异。两种样品的平均折射率分别为1.70和1.65。目前,更多的学者正在探讨L-抗坏血酸的太赫兹光谱吸收特性以及温度变化所带来的影响,试图通过温度补偿校正来建立适用模型<sup>[39-41]</sup>。

## 2 太赫兹光谱在食品安全检测的应用研究

### 2.1 太赫兹光谱在添加剂检测的应用

太赫兹光谱在添加剂检测领域的应用是近几年来研究的热点。Zhao等<sup>[42]</sup>研究了对羟基苯甲酸甲酯的太赫兹透射光谱,对羟基苯甲酸丁酯在7.8 K时能观察到明显的THz吸收峰,并根据密度函数理论模拟太赫兹光谱振动。张曼等<sup>[43]</sup>针对麦当劳“麦乐鸡”添加剂中含有的一种化学成分——特丁基对苯二酚(*tert*-butyl hydroquinone, TBHQ)含量超标,应用太赫兹无损检测技术对其作定性识别。测得该种化学成分在0.2~2.2 THz的吸收谱和折射率曲线,并将其以不同比例与面粉均匀混合,测得混合物和面粉在0.2~2.2 THz的吸收谱,同时对TBHQ进行理论模拟作为对比。结果表明,通过太赫兹波段吸收曲线的特征差异检测TBHQ是可行的,为无损食品添加剂的检测提供一种新型的方法。夏焱等<sup>[44]</sup>利用THz-TDS技术在室温下分别对吊白块(甲醛次硫酸氢钠)、增白剂(过氧化苯甲酰)及其混合物进行了光谱测量,并获得三者在此0.2~1.5 THz波段的吸收谱和折射率谱。结果表明,增白剂在太赫兹波段存在明显的特征吸收峰,这可以作为其在太赫兹波段的指纹特征用于物质识别;另外,混合物中吊白块含量越高,吸收系数越小,折射率越大;采用偏最小二乘(partial least squares, PLS)法对增白剂中掺杂吊白块的含量进行了定量分析。这些研究结果都表明太赫兹技术在食品添加剂检测中的应用会越来越广泛。

### 2.2 太赫兹光谱在农药检测的应用

太赫兹光谱技术在国内食品安全和化学分析领域被广泛研究,有许多学者都将其应用于农药检测领域。Hua等<sup>[45]</sup>采用太赫兹时域光谱仪,在0.5~1.6 THz频率范围检测了吡虫啉等4种农药,这只是纯品药物的检测。还有学者采用THz-TDS技术定量分析米粉样品中吡虫啉,得到的样品吸收系数在0.3~1.7 THz,并通过PLS法、支持向量回归(support vector regression, SVR)、间隔偏最小二乘(interval partial least square, IPLS),和反向区间偏最小二乘法(backward interval partial least square, BiPLS)建立与预测该定量模型<sup>[46]</sup>。又有一些学者将太赫兹光谱技术应用到其他种类农药的检测上,例如丁草胺和异丙甲草胺<sup>[47]</sup>、灭多威和乙氧氟草醚<sup>[48]</sup>、高效氯氟酯

酯、高效氯氟氰菊酯及溴氰菊酯<sup>[49]</sup>、噻苯咪唑<sup>[50]</sup>、顺式氯菊酯<sup>[51]</sup>等。2012年马治浩等<sup>[52]</sup>提出一种新的针对杀菌剂类农药太赫兹光谱的分类方法,即用小波变换来对杀菌剂太赫兹光谱进行特征提取,并把能量谱作为聚类分析的特征向量,然后用欧式距离法对福美铁、多菌灵、克菌丹、噻菌灵进行了分类。现今有学者尝试了太赫兹光谱技术在液体农药中的检测<sup>[45]</sup>。李健等<sup>[53]</sup>以THz-TDS系统为手段,以常见农药氟氯氰菊酯为研究对象,探讨了利用液体农药在太赫兹波段的光谱特征对其进行定量检测的方法。该方法能够检测出质量浓度为0.20 μg/mL的氟氯氰菊酯溶液,满足国家标准检测要求。

### 2.3 太赫兹光谱在化学添加物及毒素检测的应用

因许多化合物分子的低频集体振动和转动模式(如分子间振动、晶格振动、氢键作用以及分子内振动等)处于太赫兹波段,开展太赫兹波段特征吸收峰的化合物研究也就越来越多。纯品化合物方面,2009年周小柳等<sup>[54]</sup>采用太赫兹时域光谱技术研究了纯品三聚氰胺和三聚氰酸在0.3~2.5 THz的吸收谱和折射率谱。对于混合样品中目标物的检测,李建蕊等<sup>[55]</sup>采用THz-TDS技术测量了乳粉中三聚氰胺在0.2~1.8 THz频段的吸收谱和折射率谱,同时运用密度泛函理论计算了三聚氰胺在太赫兹波段的振动频率,并据此对实验光谱吸收峰进行了指认。许多针对苏丹红I号<sup>[56]</sup>、黄曲霉毒素B<sub>1</sub><sup>[57]</sup>、黄曲霉毒素M<sub>1</sub><sup>[58]</sup>的太赫兹光学特性也被进行详细研究,这些都为建立太赫兹谱库和快速食品检测化学添加物和毒素提供了理论依据。

### 2.4 太赫兹光谱技术在转基因样品检测的应用

Liu等<sup>[59]</sup>将太赫兹光谱技术应用到识别转基因产品上,研究4种转基因食品在太赫兹波段的光学特性,得到了4种转基因食品的透射光谱和折射率。研究发现,转基因玉米(transgenic corn, TGM)、转基因水稻(transgenic rice, TGR)、转基因大豆(transgenic soybean, TGS)和转基因马铃薯(transgenic potato, TGP)都在0.2~2.5 THz频率范围内有吸收。其中,TGM和TGR在1.08、1.82 THz处分别有明显的吸收峰,TGS具有多个在该频段的吸收峰,相比于其他3个样品峰形较缓慢。4种转基因食品独特的吸收特性表明,太赫兹时间分辨光谱可以应用于检测和鉴定转基因食品。Liu等<sup>[60]</sup>又进一步研究了通过太赫兹光谱和决策支持向量机(decision support vector machine, DSVM)分类识别转基因产品。目的是构建一个分类模型,可以准确识别类和控制不平衡。一种新的自适应DSVM提出了转基因棉花种子基于太赫兹光谱的识别,并利用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)的最优参数进行选择,结果表明该方法能有效地对不同的转基因棉花种子进行分类,其识别率明显优于对照法<sup>[61]</sup>。

### 3 太赫兹光谱技术在食品质量安全领域应用目前存在的问题

THz光谱分析技术在近些年经历了迅猛的发展,在食品安全检测领域,也取得了可喜的进步,已经可以利用太赫兹特征光谱对许多食品中的多糖、氨基酸、蛋白质以及脂肪等进行探测和识别,并且对一些乳品中的违禁添加物如三聚氰胺也获得了太赫兹指纹信息。这说明太赫兹光谱技术在食品质量安全检测上的应用是可行的,并且在食品安全的各个领域具有广阔的应用前景。但直到目前为止,THz光谱仍然是一个技术尚不成熟的领域,尤其是在实用技术方面存在不少问题尚待研究,还有很多方法需要研究开发。

1) 目前太赫兹光谱技术应用在食品质量安全检测上,对纯品识别方面的研究较多,对混合物和液体样品方面研究的还很少。

2) 由于液体样品中水分对THz波的吸收很大(水的吸收系数1 THz为 $230\text{ cm}^{-1}$ ),特别是厚的样品不能进行透射成像,无法获得其他成分的THz指纹信息,大大降低了样品的灵敏度,严重限制了含水量较多的样品检测。目前为解决水的高吸收也采取了一些如反射吸收、薄层透过式等方法,都没有获得理想的THz指纹图谱,就需要我们进一步深入研究。

3) 理论研究还不透彻。物质在THz波段范围内的信号产生的原因比较复杂,目前人们尚未能从理论方面对其进行严格的推导或计算(利用一定的软件如高斯对简单的基团进行大致的估算)。因此,在今后的研究中,THz技术还需与量子化学等学科结合起来,从量子学的角度对其进行解释和研究,对物质的反应机理及分子之间的相互作用还需更深的了解。

4) 在数据处理方面,提取样品参数的方法还不太成熟,不同实验室的测试条件所得出的结果有时存在差异,还有待于进一步完善。

5) THz仪器设备还需进一步完善,目前的信息处理过程复杂,有待于进一步实用化。

### 4 结语

太赫兹光谱技术尚属新的光谱分析技术,大部分物质在THz波段的特性还有待研究,在科学界还没有形成一个完整的THz光谱数据库以供参考,因此还需进行大量的研究工作。随着太赫兹仪器技术的发展,太赫兹光谱技术在食品质量控制方面的应用已扩大,在性能方面也有了很大提高。太赫兹光谱技术将成为食品过程监测和质量控制的新兴技术。

### 参考文献:

- [1] 刘盛刚,钟任斌.太赫兹科学技术及其应用的新发展[J].电子科技大学学报,2009,38(5):481-486.
- [2] ASHISH Y P, DEEPAK D S, KIRAN B E, et al. Terahertz technology and its applications[J]. Drug Invention Today, 2013, 5(2): 157-163.
- [3] 魏华.太赫兹探测技术发展及展望[J].红外技术,2010,32(4):231-233.
- [4] MARKELZ A G, KNAB J R, CHEN J Y, et al. Tagless and universal biosensor for point detection of pathogens[J]. Terahertz for Military and Security Applications, 2004, 5411: 182-186.
- [5] PLUSQUELLIE D F, SIEGRIST K, HEILWEIL E J, et al. Applications of terahertz spectroscopy in biosystems[J]. Chemical Physics and Physical Chemistry, 2007, 8(17): 2412-2431.
- [6] MARKELZ A G. Terahertz dielectric sensitivity to biomolecular structure and function[J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008, 14(1): 180-190.
- [7] MARKALZ A G, ROITBERG A, HEILWEIL E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz[J]. Chemical Physics Letters, 2000, 320(1/2): 42-48.
- [8] CASTRO-CAMUSS E, JOHNSTON M B. Conformational changes of photoactive yellow protein monitored by terahertz spectroscopy[J]. Chemical Physics Letters, 2008, 455(4/6): 289-292.
- [9] YONEYAMA H, YAMASHITA M, KASAI S, et al. Terahertz spectroscopy of native-conformation and thermally denatured bovine serum albumin (BSA)[J]. Physics in Medicine and Biology, 2008, 53(13): 3543-3549.
- [10] ZHANG C F, DURBIN S M. Hydration-induced far-infrared absorption increase in myoglobin[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(46): 23607-23613.
- [11] WOODS K N. Solvent-induced backbone fluctuations and the collective librational dynamics of lysozyme studied by terahertz spectroscopy[J]. Physical Review E, 2010, 81(3): 031915-031929.
- [12] XU J, PLAXEO K W, ALLEN S J. Probing the collective vibrational dynamics of a protein in liquid water by terahertz absorption spectroscopy[J]. Protein Science, 2006, 15(5): 1175-1181.
- [13] JONES I, ABBOTT D, FISCHER B M. THz Spectroscopy of protein complexes[C]//2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008: 647-648.
- [14] 滕学明,田璐,赵昆.太赫兹技术对营养品中蛋白质含量的研究[J].现代科学仪器,2012(1):91-94.
- [15] WALTHER M, FISCHER B M, JEPSEN P. Noncovalent intermolecular forces in polycrystalline and amorphous saccharides in the far infrared[J]. Chemical Physics, 2002, 288(2/3): 261-268.
- [16] UPADHYA P C, SHEN Y C, DAVIES A G. Far-infrared vibrational modes of polycrystalline and amorphous saccharides in the far infrared[J]. Vibrational Spectroscopy, 2004, 35(1): 139-143.
- [17] 张同军,蔡晋辉,周泽魁. $\beta$ -D-吡喃半乳糖的太赫兹光谱研究[J].光谱学与光谱分析,2008(4):721-725.
- [18] 梁承森,赵国忠.木糖醇和D-木糖的太赫兹光谱检测与分析[J].光谱学与光谱分析,2011,31(2):323-327.
- [19] SHIRAGA K, SUZUKI, KONDO N, et al. Quantitative characterization of hydration state and destructuring effect of monosaccharides and disaccharides on water hydrogen bond network[J]. Carbohydrate Research, 2015, 406: 46-54.
- [20] YANG L M, SUN H G, WENG S F, et al. Terahertz absorption spectra of some saccharides and their metal complexes[J]. Spectrochimica Acta Part a-Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2008, 69(1): 160-166.



- [21] SUHANDY D D, SUZUKI T, OGAWA Y C, et al. A Quantitative study for determination of glucose concentration using attenuated total reflectance terahertz (ATR-THz) spectroscopy[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2012, 5(3): 90-95.
- [22] TADAY P F, BRADLEY I V, AMONE D D. Terahertz pulse spectroscopy of biological materials: *L*-glutamic acid[J]. *Journal of Biological Physics*, 2003, 29(2): 109-115.
- [23] YU B, ZENG F, YANG Y. Torsional vibrational modes of tryptophan studied by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Biophysical Journal*, 2004, 86(3): 1649-1654.
- [24] YMAGUCHI M, MIYAMARU F, YAMAMOTO K. Terahertz absorption spectra of *L*-, *D*-, and *DL*-alanine and their application to determination of enantiometric composition[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86: 053903.
- [25] UENO Y, RUNGSAWANG R, TOMITA I, et al. Quantitative measurements of amino acids by terahertz time-domain transmission spectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78: 5424-5428.
- [26] KINDT J T, SCHMUTTENMAER C A. Far-infrared dielectric properties of polar liquids probed by femtosecond terahertz pulse spectroscopy[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1996, 100: 10373-10379.
- [27] CHUA H S, UPADHYA P C, HAIGH A D, et al. Conference digest of the 2004 joint 29th international conference on infrared and millimeter waves and 12th International Conference on terahertz electronics (IEEE Cat. No.04EX857)[C]//International conference on infrared & millimeter waves, & international conference on terahertz electronics, 2004: 399.
- [28] YOKOYAMA S, YOKOYAMA T, HAQIHARA Y, et al. A distance meter using a sub-terahertz intermode beat in an optical frequency comb[J]. *Opt Express*, 2009, 28(20): 17324-17327.
- [29] 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.
- [30] WANG S, FERGUSON B, ABBOTT D, et al. T-ray imaging and tomography[J]. *Journal of Biological Physics*, 2003, 29(2/3): 247-256.
- [31] SEONGSIN M K, FARIBA H, ALLISON W K. Imaging with a terahertz quantum cascade laser for biomedical applications. infrared to terahertz technologies for health and the environment[C]//Proceeding of SPIE, 2005: 1-8.
- [32] FERGUSON B, WANG S, GRAY D. Identification of biological tissue using chirped probe THz imaging[J]. *Microelectronics Journal*, 2002, 33: 1043-1051.
- [33] 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): 2629-2633.
- [34] LI J S, LI X J. Determination principal component content of seed oils by THz-TDS[J]. *Chemical Physics Letters*, 2009, 476(1/3): 92-96.
- [35] LI J S. Optical parameters of vegetable oil studied by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 2010, 64(2): 231-234.
- [36] 廉飞宇, 秦建平, 牛波, 等. 一种利用太赫兹波谱检测地沟油的新方法[J]. *农业工程*, 2012(6): 127-130.
- [37] 于斌, 黄振, 王晓燕, 等. 烟酸和烟酰胺及烟碱的太赫兹光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(9): 2334-2337.
- [38] 颜志刚, 侯迪波, 曹丙花, 等. 核黄素和烟酸的太赫兹(THz)光谱研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(5): 327-330.
- [39] DIDING S, MEINILWITA Y, YUICHI O, et al. Prediction of *L*-ascorbic acid using FTIR-ATR terahertz spectroscopy combined with interval partial least squares (iPLS) regression[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2013, 6(3): 111-117.
- [40] MEINILWITA Y, DIDING S, YUICHI O, et al. Investigation on the influence of temperature in *L*-ascorbic acid determination using FTIR-ATR terahertz spectroscopy: calibration model with temperature compensation[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2014, 7(4): 148-154.
- [41] DIDING S, MEINILWITA Y, YUICHI O, et al. *L*-ascorbic acid prediction in aqueous solution based on FTIR-ATR terahertz spectroscopy[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2012, 5(4): 152-158.
- [42] ZHAO G Z, WANG H, LIU L M, et al. THz spectra of parabens at low temperature[J]. *Science China Information Sciences*, 2012, 55(1): 114-119.
- [43] 张曼, 蔡禾, 沈京玲. 食品添加剂特丁基对苯二酚的太赫兹光谱及其检测分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(7): 1809-1813.
- [44] 夏焱, 杜勇, 张慧丽, 等. 增白剂中吊白块含量的太赫兹光谱定性与定量检测[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(2): 103-106.
- [45] HUA X F. Qualitative and quantitative detection of pesticides with terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(7): 2064-2070.
- [46] CHEN Z W, ZHANG Z Y, ZHU R H, et al. Application of terahertz time-domain spectroscopy combined with chemo metrics to quantitative analysis of imidacloprid in rice samples[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 167: 1-9.
- [47] WANG X W, WANG Q, WANG H L. Determination of amides pesticide residues in agricultural products by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Agricultural Science and Technology*, 2010, 11(8): 53-56.
- [48] 曹丙花, 侯迪波, 颜志刚, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的农药残留检测方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(6): 429-432.
- [49] 郝国徽, 郭昌盛, 刘建军, 等. 菊酯农药的太赫兹时域光谱定性和定量检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(5): 1184-1188.
- [50] MA Y H, WANG Q, LI L Y. PLS model investigation of thiabendazole based on THz spectrum[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, 117: 7-14.
- [51] TETSUHIITO S, YUICHI O, NAOSHI K. Characterization of pesticide residue, cis-permethrin by terahertz spectroscopy[J]. *Engineering in Agriculture*, 2011, 4(4): 90-94.
- [52] 马冶浩, 王强, 王孝伟, 等. 杀菌剂类农药的太赫兹光谱分类方法[J]. *湖南科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 27(3): 107-111.
- [53] 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.
- [54] 周小柳, 唐忠锋, 王继虎, 等. 三聚氰胺和三聚氰酸的太赫兹光谱研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(31): 15120-15122.
- [55] 李建蕊, 李久生, 赵晓丽. 太赫兹时域光谱技术快速定性检测奶粉中三聚氰胺[J]. *中国计量学院学报*, 2009(2): 131-134.
- [56] 朱莉, 张光新, 曹丙花, 等. 苏丹红 I 号的太赫兹光谱研究[J]. *传感技术学报*, 2008(1): 83-87.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] LIU J J, LI Z. The terahertz spectrum detection of transgenic food[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(23): 6867-6869.
- [60] LIU J J, LI Z, HU F R, et al. Classification and recognition of transgenic product by terahertz spectroscopy and DSVM[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(23): 6914-6919.