

# 激光与光电子学进展

## 太赫兹光谱检测技术对农产品品质检测的研究进展

刘燕德\*, 徐振, 胡军, 李茂鹏

华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013

**摘要** 太赫兹时域光谱技术 (THz-TDS) 是近几年迅速发展起来的新兴检测技术, 具有超强的透视性、强大的安全性以及高效的波谱分辨能力, 在农业、化工、制药等检测领域得到了广泛应用。本文针对近年来太赫兹光谱技术在伪劣农产品检测、农药残留检测、违禁添加剂检测、转基因农作物鉴别、农产品含水量检测方面的国内外研究现状进行了介绍, 总结了太赫兹光谱技术在农产品检测方面存在的主要技术难题, 并对太赫兹光谱技术未来的发展前景进行了展望。随着科技的发展, 太赫兹光谱检测技术必将具有更大的应用潜力。

**关键词** 光谱学; 太赫兹光谱; 农产品; 农药残留; 食品添加剂; 转基因农作物

**中图分类号** Q439; O433.4

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP202158.0100005

### Research on Quality of Agricultural Products by Terahertz Spectroscopy

Liu Yande\*, Xu Zhen, Hu Jun, Li Maopeng

*School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University,  
Nanchang, Jiangxi 330013, China*

**Abstract** Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS), as an emerging detection technology developed rapidly in recent years, has been widely used in the agriculture, chemical industry, pharmacy, and other detection fields due to its powerful perspectivity, high security, and efficient spectral resolution. In this paper, we introduced the recent research status of terahertz spectroscopy in the detection of inferior agricultural products, the detection of pesticide residues, the detection of banned additives, the identification of genetically modified crops, and the detection of moisture content in agricultural products. Furthermore, we summarized the main technical problems of terahertz spectroscopy in the detection of agricultural products and forecasted the development prospects of this technology. As science and technology develop forwards, terahertz spectroscopy will have more bright application prospects in the future.

**Key words** spectroscopy; terahertz spectroscopy; agricultural products; pesticide residues; food additive; genetically modified crops

**OCIS codes** 300.6495; 300.6170; 000.4930

## 1 引言

随着我国经济的高质量发展, 人们的生活水平

大幅提升, 食物的作用不再仅仅是果腹, 其品质成为人们关注的焦点。传统的食物品质的检测方法操作简单且费用低廉, 但或多或少都存在一定的不

收稿日期: 2020-04-08; 修回日期: 2020-04-20; 录用日期: 2020-05-27

基金项目: 国家 863 计划 (2012AA101906)、南方山地果园智能化管理技术与装备协同创新中心项目 (赣教高字 [2014] 60 号)、江西省优势科技创新团队建设计划 (20153BCB24002)、江西省教育厅科学技术研究青年项目 (GJJ190348)、江西省博士研究生创新基金项目 (YC2019-B106)。

\*E-mail: jxliuyd@163.com

足或者缺陷;而现代检测技术(光谱技术、色谱技术等)虽然能够解决不少形态组织学难以解决的问题,但有些方法(紫外光谱法、液相色谱法)需要经过复杂的提取分离或者预处理过程,测定成本过高,且效率太低<sup>[1-4]</sup>。因此,开发一种新型的无损检测技术对老旧技术缺陷进行弥补就显得尤为重要。

目前,我国正由农业大国向农业强国转变。在迈向农业现代化的征程中,农业的高质量发展必不可少,而农产品的品质检测是目前急需解决的一大问题。近些年来,许多研究者将太赫兹光谱检测技术这种新型的无损检测技术应用在农产品品质检测领域,并取得了重大突破<sup>[5-7]</sup>。不同的化学物质对太赫兹波具有不同的吸收特点,分析物质在太赫兹波段独特的信息,就可以对不同的物质进行鉴别与区分<sup>[8]</sup>。本文主要对太赫兹光谱检测技术在农产品

品质检测领域的应用进行了介绍,例如伪劣农产品检测、农药残留检测、食品添加剂检测、转基因和非转基因农作物的鉴别、农产品中水分含量的测定等。最后,本文对太赫兹光谱检测技术目前存在的主要问题和关键技术难点进行了总结,并对其未来的发展前景进行了展望。

## 2 太赫兹光谱技术的原理

太赫兹光谱技术曾被美国评为“改变世界的十大技术”之一。在生命科学、电子信息、材料科学、国家安全等重要领域,太赫兹光谱技术以其独特的优越性和巨大的应用潜力受到各国政府的高度重视。太赫兹波的高频段与光学领域的远红外频段重叠,低频段与电子学领域的毫米波频段重叠,其频率范围位于 0.1~10 THz 之间,波长为 3~30 mm,如图 1 所示。

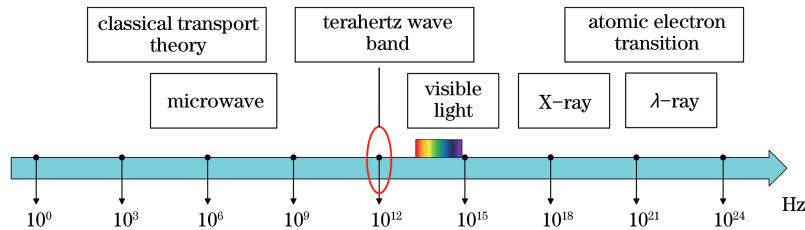


图 1 电磁波中的太赫兹波段

Fig. 1 Terahertz band of electromagnetic waves

各种有机分子之间弱相互作用的低频振动和吸收频率均位于太赫兹波段,此频段不仅能反映分子内的振动模式,还能提供分子间的振动模式和声子模式<sup>[5]</sup>。这些分子间作用力对检测各类分子具有不可替代的重要性。太赫兹光谱可以反映出不同分子的构型、构象等信息,进而被广泛应用于蛋白质、氨基酸、农药、水分子等各类生物及化学分子的构型分析和定量检测中,甚至被用于对异物进行检测分类<sup>[9-10]</sup>。在各类光谱中,太赫兹光谱以良好的穿透性、瞬态性、低能性、安全性,以及较强的光谱分辨本领和无需复杂预处理等一系列突出优势,得到了无损检测领域研究者的广泛关注。

图 2 为太赫兹时域光谱检测系统原理图。激光产生器产生的激光分为两路——强度较大的泵浦光和强度较弱的探测光。泵浦光通过发射单元激发太赫兹脉冲,太赫兹脉冲作用于实验样品上;探测光通过分束器进入时间延迟单元,时间延迟单元通过实时改变探测光与泵浦光之间的光程,即可实时测量太赫兹脉冲的瞬时电场,从而获得样品完整信息的太赫兹时域图谱<sup>[11]</sup>。对样品的太赫兹图谱

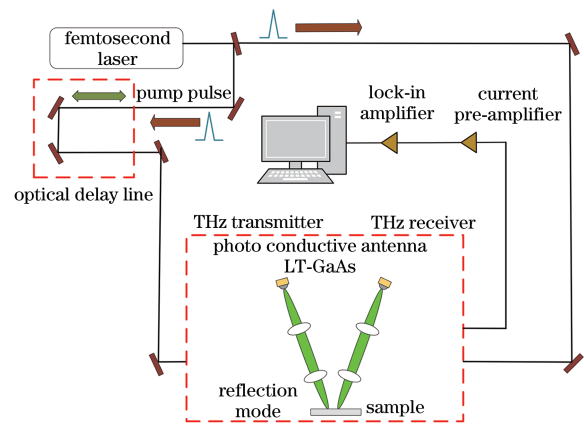


图 2 太赫兹时域光谱检测系统原理图

Fig. 2 Schematic of terahertz time-domain spectral system

进行傅里叶变换就可以直接得到吸收系数、折射率、透射率等一系列物理信息和光学信息,从而掀起了太赫兹光谱技术在无损检测领域的研究热潮<sup>[12]</sup>。

图 3 为 TAS7500SU 太赫兹时域光谱系统实物图,该系统包括飞秒激光器、光电导天线、时间延迟控制系统、数据采集与处理系统等。



图3 TAS7500SU太赫兹时域光谱系统实物图

Fig. 3 Photo of TAS7500SU terahertz time-domain spectral system

### 3 太赫兹光谱技术在伪劣农产品检测分析中的应用

农产品是广大农业劳动者辛勤劳动的成果,不仅仅是劳动人民汗水的结晶,更是人民生活必不可少的物质。农产品在生产储存过程中难免会因为温度、湿度等原因而出现生长畸形或者霉变,也有少数不法商家将掺假伪劣农产品进行售卖,所以对农产品进行检测是保障食品安全的重要措施。

2014年,李斌等<sup>[13]</sup>为了研究病虫害对美洲山核桃的影响,选取适量的美洲山核桃切片、活体烟草天蛾切片、干燥山核桃虫害切片作为样本,采集了它们在0~2 THz波段的太赫兹吸收光谱;他们将后两者与山核桃切片进行对比后发现,活体虫害切片呈现出非常明显的光谱吸收特性。2015年,王冬等<sup>[14]</sup>使用太赫兹波谱仪结合衰减全反射附件(ATR)采集了劣质花生和非劣质花生的太赫兹波谱数据,然后根据采集到的波谱信息,计算了吸收系数与波谱数据之间的相关系数以及相关系数的分布,并采用化学计量学方法对实验数据进行建模分析处理,结果显示:采用一阶导数对光谱数据进行预处理后,劣质花生和非劣质花生的相关系数的样本标准差更大;小样本容量的偏最小二乘判别(PLS-DA)模型的正确率可达100%,劣质花生、非劣质花生的交互验证正确率分别为80%、90%。同样,为了对市售花生的质量有更好的检测,2019年,刘翠玲等<sup>[15]</sup>利用太赫兹光谱技术结合误差反向传播神经网络(BPNN)算法与支持向量机(SVM)等化学计量学方法对4种霉变程度不同(严重霉变、中度霉变、轻度霉变、正常)的花生仁进行了识别与定性分析,实验样品如图4所示。他们首先采集了花

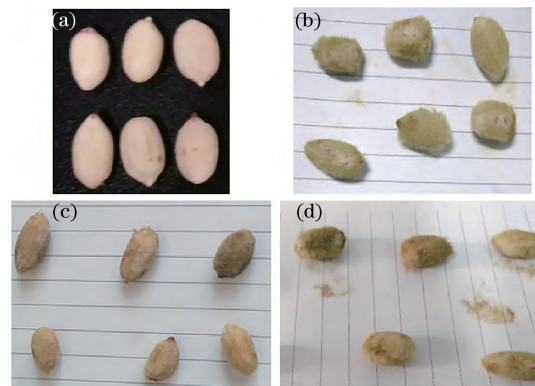


图4 霉变程度不同的花生仁<sup>[15]</sup>。(a)正常花生仁;(b)轻度霉变的花生仁;(c)中度霉变的花生仁;(d)严重霉变的花生仁

Fig. 4 Groundnut kernel with different degrees of mildew<sup>[15]</sup>. (a) Normal groundnut kernel; (b) groundnut kernel with mild mildew; (c) groundnut kernel with moderate mildew; (d) groundnut kernel with severe mildew

生仁样本在0.3~3.6 THz波段的太赫兹光谱,然后利用傅里叶变换法对采集的光谱数据进行频域变换和加窗处理,再提取频域信号的吸光度和吸收系数,得到样本的光学常数信号,最后进行了特征波段的筛选。分析结果表明,应用太赫兹时域光谱技术结合支持向量机算法对霉变花生仁的检测效果良好,可行性程度高<sup>[15]</sup>。

笔者所在研究团队也多次利用太赫兹光谱技术对农产品的掺假问题进行了相关研究,如:2019年,李斌等<sup>[16]</sup>在实验室对葛粉中掺杂薯粉的含量进行了测定分析,并分别利用偏最小二乘法(PLS)和最小二乘支持向量机(LS-SVM)算法建立了分析模型,用以判断样品中是否含有薯粉,最终结果如表1所示。由表1可以看出,利用LS-SVM建立的分析模型能够更加准确地鉴定样品中是否掺有薯粉。

表1 薯粉掺假实验结果的对比<sup>[16]</sup>

Table1 Comparison of experimental results of adulteration of potato powders<sup>[16]</sup>

Method	Root-mean-square error/%	Coefficient of determination $R^2$
PLS	2.6	0.932
LS-SVM	1.6	0.957

### 4 太赫兹光谱技术在农产品农药残留检测中的应用

为了避免病虫害对农作物产量及质量造成影响,人们通常会在农作物种植期间喷洒农药,尽管会



有雨水的冲刷,但农作物成熟收获之后依旧会有微量农药残留。检测微量农药残留的常见方法主要有气相色谱法、高效液相色谱法、气质联用法、液质联用法、免疫法、生物传感器法等化学检测法或生物检测法,但这些方法大多存在样品预处理程序繁杂、检测耗费时间长、检测成本过高,以及需要专业检测人员等问题<sup>[17-19]</sup>。在太赫兹光谱波段范围内,很多有机分子的吸收峰蕴含着低频振动、转动等物理信息和化学信息,因此,众多研究者根据农药分子在太赫兹波段的特征光谱信息进行定性或定量测定<sup>[8]</sup>。

在番茄、黄瓜、梨、苹果等的生长过程中,喷洒吡虫灵可以防止烟粉虱的危害。Hua等<sup>[20]</sup>利用太赫兹光谱技术结合化学计量学方法,对农药吡虫林和聚乙烯的混合物以及吡虫林和面粉的混合物进行研究,并对光谱数据进行了分析处理。为了解决目前普遍存在的农药分类困难的问题,2012年,马治浩等<sup>[21]</sup>以常见农药(福美铁、多菌灵、克菌丹、噻菌灵)为实验对象,采集了它们的太赫兹光谱,然后利用小波变换进行特征提取,并结合聚类分析以及欧氏距离法对实验数据进行处理,取得了良好的效果。2015年,李健等<sup>[22]</sup>采集了常见农药氟氯氰菊酯的太赫兹时域光谱,对其进行了定量检测,结果表明,太赫兹光谱技术能够检测出质量浓度低至 $0.20\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 的氟氯氰菊酯。农药西维因是氨基甲酸酯类杀虫剂,会对人体免疫系统造成危害,且会使神经中枢受到损害。2014年,陈泽炜等<sup>[23]</sup>用大米替代聚乙烯与西维因进行混合,在 $2.0\sim 6.0\ \text{THz}$ 范围内测得了西维

因的太赫兹光谱,计算得到了样品的吸收系数;然后结合支持向量机回归建立模型,利用网格搜索法与留一法进行交叉验证,对支持向量机参数进行优化,最终的实验结果表明:当西维因的质量分数在 $0\sim 20\%$ 范围内时,模型的预测均方误差(MSEP)能够达到最理想的结果,即MSEP为 $4.48\times 10^{-5}$ 。马吉祥<sup>[24]</sup>同时对4种常见农药(三氯杀螨砜、敌百虫、亚胺硫磷及六氯苯)和3种常见蔬菜(菠菜、西兰花、胡萝卜)的太赫兹光谱进行了测量,然后结合化学计量学方法对7组样品的太赫兹时域谱、频域谱以及吸收谱进行分析处理,结果表明,在鉴别安全蔬菜及含农药蔬菜方面,太赫兹光谱技术可以达到良好的效果。

2015年,黄翼虎等<sup>[25]</sup>在室温 $20\ ^\circ\text{C}$ 和氮气环境下使用太赫兹时域光谱技术对三氯杀螨砜和敌百虫的太赫兹光谱进行测量,光谱信息显示三氯杀螨砜有7个明显的吸收峰,敌百虫有3个明显的吸收峰,但是两种农药的吸收峰位置和峰值明显不同。他们根据Dorney等<sup>[26]</sup>和Duvillaret等<sup>[27]</sup>提出的模型结合化学计量学方法,计算出了 $0.3\sim 2.3\ \text{THz}$ 频段内三氯杀螨砜和敌百虫的折射率和吸收系数,得到了两种药品的平均折射率分别为1.02和1.04。为了验证实验结果的准确性,黄翼虎等还使用密度泛函理论对三氯杀螨砜和敌百虫的振动频率进行了理论计算,两种实验对象的实验吸收系数以及在相应频率下经过理论计算得到的吸收系数如图5所示。可见,最终计算得到的理论结果与实验结果具有高度的重复性。

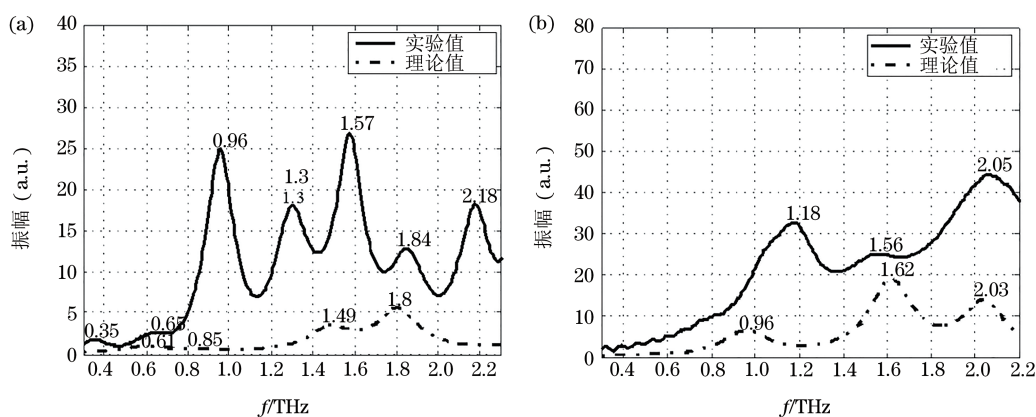


图5 实验及理论计算得到的三氯杀螨砜和敌百虫的吸收系数<sup>[25]</sup>。(a)三氯杀螨砜;(b)敌百虫

Fig.5 Experimental and theoretically calculated absorption efficient of chlorodifon and dipterex<sup>[25]</sup>. (a) Chlorodifon; (b) dipterex

2017年,Xu等<sup>[28]</sup>利用太赫兹光谱技术结合超材料对毒死磷甲基(CM)进行了检测,结果发现,超材料的使用极大地提高了太赫兹光谱技术的检测灵敏度,检测极限(LOD)达到 $0.204\ \text{mg}/\text{L}$ 。2018年,覃

斌毅<sup>[29]</sup>结合化学计量学方法,从解析农药太赫兹光谱、定性识别农药、定量分析农药、比较检测方法、探索混合光谱分离的方法入手,探究了利用太赫兹光谱技术检测农药残留的可行性,取得了良好成效。



还有很多研究者将太赫兹时域光谱技术应用与其他种类农药<sup>[30-34]</sup>的检测,如丁草胺(butachlor)、异丙甲草胺(metolachlor)、灭多威(methomyl)、乙氧氟草醚(oxyfluorfen)、高效氯氟菊酯(beta-cypermethrin)、高效氯氟氰菊酯(lambda-cyhalothrin)、溴氰菊酯(deltamethrin)、噻苯咪唑(thiabendazole)、顺式氯菊酯(cis-permethrin)。

## 5 太赫兹光谱技术在农产品添加剂检测中的应用

随着我国农产品加工产业的高速发展,食品添加剂在口感、观感上扮演着越来越重要的角色,并逐渐成为农产品加工产业的灵魂。虽然适量的添加剂能在一定程度上起到延长保质期、提升口感、增加农产品视觉质量的作用。但是近年来,很多不法生产者和商家为了牟取暂时的经济利益,在农产品中添加违禁添加剂或超标使用添加剂,致使危害公众健康和生命的重大食品安全事故时有发生。过量或违禁使用食品添加剂、用化工添加剂替代食品添加剂等违法行为,在源头上难以彻底杜绝,给农产品质量安全带来了诸多负面影响,因此对农产品中添加剂含量的检测刻不容缓<sup>[35]</sup>。

滑石粉是白色无味粉末,其主要成分是水硅酸镁,在工业、医药、日用品等领域被广泛应用,在食品加工领域也常作为增白剂使用。张宝月等<sup>[36]</sup>在 0.2~3.0 THz 频率范围内测得了小麦粉与滑石粉混合样品的太赫兹波时域谱,通过数据处理提取到了样品的吸收系数和折射率,分析后发现:随着滑石粉含量增多,样品的吸收系数逐渐增大。这表明,太赫兹时域光谱技术可以对小麦粉、滑石粉以及两者的混合物进行定性或者定量识别。同样,为了检测滑石粉在小麦粉中的含量,2013年,付秀华等<sup>[37]</sup>在室温下分别测得了小麦粉、滑石粉以及两者混合物的太赫兹光谱,结果发现:滑石粉在 0.2~1.5 THz 波段内存在明显的特征吸收峰,该波段甚至可以作为滑石粉在太赫兹波段的指纹特征;滑石粉的含量不同时,特征吸收峰的峰值不同。他们认为,获得的样品的吸收谱和折射率谱可以用于定量测定该样品中各组分的含量<sup>[37]</sup>。上述两位研究者都针对面粉和滑石粉进行了鉴定识别,且都取得了理想的实验结果,这说明太赫兹时域光谱技术在面粉中滑石粉含量的检测方面具有潜在的实用价值。过氧化苯甲酰虽然能够对面粉起到漂白和防腐的作

用,但是对人体也存在一定的负面作用。2013年,秦建平等<sup>[38]</sup>在 0.2~1.5 THz 频段内利用太赫兹时域光谱技术对面粉中的过氧化苯甲酰进行检测,得到了样品的太赫兹时域谱、频域谱吸收系数及折射率;对实验数据进行分析后发现,面粉样品中是否含有增白剂以及增白剂的含量都会对样品的吸收系数和折射率具有显著影响。Feng 等<sup>[39]</sup>利用太赫兹技术对面粉中的增白剂进行了检测,建立了面粉中掺杂浓度为 20%、50% 和 80% (质量分数)的过氧化苯甲酰的太赫兹光谱,验证了太赫兹光谱技术检测面粉中增白剂的可行性。明矾又叫白矾,无色有毒,具有抗菌作用,可作中药。2018年,管爱红等<sup>[40]</sup>以红薯淀粉中的明矾为实验对象,获得了红薯淀粉、明矾以及两者混合物的太赫兹时域光谱和频域光谱,分析后发现:明矾在太赫兹波段存在特别明显的特征吸收峰;随着样品中明矾含量的增加,样品的吸收峰和折射率都大幅下降,这说明混合物的折射率与明矾含量具有相关性。2019年,管爱红等<sup>[41]</sup>同样是以明矾为实验对象,应用太赫兹光谱技术对淀粉中的添加剂含量进行了相关研究,结果发现,样品的太赫兹光谱吸收系数与明矾的质量分数能够达到 99.1% 的相关性,预测的准确性高达 98.2%,预测值与实际值的拟合曲线如图 6 所示。这说明,太赫兹时域光谱技术可以用于淀粉中明矾的定性识别和定量检测,并具有较好的分析效果。

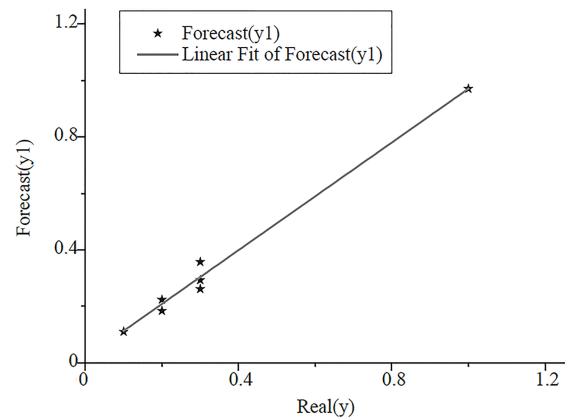


图 6 面粉中明矾含量预测值与实际值之间的拟合曲线<sup>[41]</sup>  
Fig. 6 Fitted curve between predicted and actual alum contents in flour<sup>[41]</sup>

笔者所在研究团队多年来利用实验室现有的太赫兹设备进行了多种农产品添加剂的相关检测研究,并取得了一定成果。

苯甲酸常用作防腐剂和抑菌剂,对皮肤和呼吸道具有刺激作用。本团队多次利用太赫兹光谱技

术结合化学计量学方法对农产品中的苯甲酸含量进行了测定分析。如:2018年,本团队<sup>[42]</sup>使用太赫兹时域光谱技术对散装和预包装葛粉样品中的苯甲酸进行了测定,然后使用多种化学计量学方法(多元散射校正、基线校正、一阶导数、二阶导数)对原始光谱数据进行预处理,再利用偏最小二乘法对样品中苯甲酸的含量建立预测模型;模型结果显示,散装和预包装葛粉模型的决定因子分别为0.975和0.976,预测集均方根误差分别为1.126%和1.356%。为测定面粉中苯甲酸的含量,胡军<sup>[43]</sup>探索了不同的光谱预处理方法(平滑、多元散射校正、基线校正和归一化)对太赫兹光谱的影响,然后根据偏最小二乘模型选择最优预处理方法,建立了检测面粉中苯甲酸含量的PLS、LS-SVM和反向传播神经网络(BPNN)模型。进行分析后发现,BPNN模型的预测相关系数( $R_p$ )为0.9945,预测集均方根误差为0.66%,效果最优。由实验系统获得的样品的太赫兹时域光谱可以发现,吸收峰幅度随着苯甲酸含量的增加而变大。此外,胡军等<sup>[44]</sup>建立了苯甲酸浓度和太赫兹吸收系数的多元线性回归(MLR)、PLS和LS-SVM回归模型,并对比分析了不同模型的优劣。结果表明:将光谱数据归一化后建立的PLS模型更具优势;与PLS和MLR模型相比,LS-SVM模型的预测相关系数 $R_p$ 为0.987,预

测均方根误差RMSEP为1.10%,识别分析效果更好。

本团队其他成员也做过大量添加剂的相关研究。为了检测玉米粉中苯甲酸的含量,控制苯甲酸在玉米粉加工过程中的使用量,提高食品安全等级,2019年,欧阳爱国等<sup>[45]</sup>采用太赫兹光谱技术对玉米粉中的苯甲酸含量进行了研究,获得了玉米粉中不同质量分数的苯甲酸在0.5~3 THz的太赫兹光谱数据。在进行数据分析时,他们主要采用PLS、LS-SVM和MLR等化学计量学方法构建光谱模型,同时利用随机抽取的预测集对建立的模型进行评估分析,得到的预测集相关系数高达0.9958, RMSEP为0.0057,LS-SVM模型预测结果如表2所示(其中 $\gamma$ 和 $\sigma^2$ 是建立模型时采用的径向基核函数主要考虑的两个重要参量)。这表明,太赫兹技术结合化学计量学方法可以用于定量检测玉米粉中苯甲酸的含量,而且LS-SVM模型的评价能力最强<sup>[45]</sup>。Sun等<sup>[46]</sup>将太赫兹技术与广义回归神经网络(GRNN)、BPNN的机器学习方法相结合用于测定小麦粉中苯甲酸的含量,实验数据分析结果显示:与BPNN模型相比,GRNN模型对样品的预测相关系数为0.85,预测均方根误差为0.10%。这表明太赫兹光谱技术与GRNN结合能够更准确地定量分析小麦粉中苯甲酸的含量。

表2 玉米粉中苯甲酸含量检测使用的LS-SVM模型的预测结果<sup>[45]</sup>

Table 2 Prediction results of LS-SVM model used for detecting benzoic acid content in corn flour<sup>[45]</sup>

Input data	Kernel function			$R_p$	RMSEP
	Type	Parameter	Time/s		
Original spectrum	Lin_kernel	$\gamma=2.4123$	0.0468	0.9850	0.0104
	RBF_kernal	$\gamma=1980.3968, \sigma^2=51.8468$	0.0468	0.9958	0.0057
Moving average smoothing size 5	Lin_kernel	$\gamma=2.7239$	0.0468	0.9844	0.0106
	RBF_kernal	$\gamma=192721.9293, \sigma^2=852.7071$	0.0312	0.9917	0.0082

## 6 太赫兹光谱技术在鉴别转基因农作物中的应用

转基因技术是将供体生物体中筛选的理想基因序列插入到受体的基因序列中,从而赋予受体新的特性,如抗病性、除草剂耐受性以及其它新的特性<sup>[47]</sup>。但是,转基因农作物并不会因此而赢得所有消费者的青睐,有一部分消费者对传统作物有着更大的倾向性。随着转基因作物的广泛种植,对此类作物的检测识别也被越来越多的研究者关注。在转基因农作物的检测方面,太赫兹光谱技术以其独特的优势得到了众多研究者的关注。

2016年,Chen等<sup>[48]</sup>将太赫兹光谱技术与化学计量学方法相结合用于鉴别转基因甜菜和非转基因甜菜,他们在0.2~1.2 THz频率范围内得到了36个转基因甜菜和48个非转基因甜菜共84个样品的太赫兹时域光谱。在对实验数据进行分析时,他们主要采用主成分分析(PCA)、判别分析和判别偏最小二乘法(DPLS)这三种化学计量学方法对实验样品进行分类,最终发现DPLS的分类结果最好,成功率可达100%。转基因棉花比普通棉花具有更高的产量以及更强的抗虫害性。2017年,沈晓晨等<sup>[49]</sup>利用太赫兹光谱技术对3种转基因棉花种子和1种非转基因棉花种子进行了探索研究,得到了4种样品的光

谱,如图 7 所示。他们根据测得的光谱探讨了样品对太赫兹波的吸收特性,结果发现:3 种转基因棉花种子在 1.21, 1.23, 1.41 THz 处对太赫兹呈现明显

的吸收,而非转基因棉花种子却呈现微弱的吸收或不吸收。这些明显的差异表明太赫兹光谱技术可以成为鉴别转基因和非转基因棉花种子的有力手段。

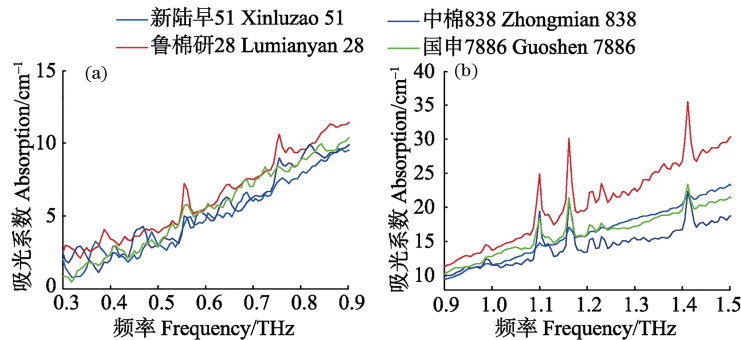


图 7 转基因和非转基因棉花种子在太赫兹低频与高频波段的吸收光谱<sup>[49]</sup>。(a) 0.3~0.9 THz 波段;(b) 0.9~1.2 THz 波段  
Fig. 7 THz absorption spectra of transgenic and non-transgenic cotton seeds at low frequency and high frequency bands<sup>[49]</sup>.

(a) 0.3-0.9 THz band; (b) 0.9-1.2 THz band

为了鉴别转基因大豆,聂君扬等<sup>[50]</sup>首先利用太赫兹光谱分析技术结合主成分特性分析与反向前馈神经网络建模等化学计量学方法,得到了 8 种主成分因子,其累计方差贡献率高达 97.582%;然后利用神经网络模型剔除冗余数据,进而降低数据维数,建立了神经网络模型,该模型能准确识别校验集。同样,为了鉴别转基因大豆,2017 年,陈涛等<sup>[51]</sup>提出利用布谷鸟搜索(CS)算法结合优化的 SVM 对三种转基因大豆种子及其亲本在 0.2~1.2 THz 波段的太赫兹时域光谱进行分析处理,结果发现,应用太赫兹光谱技术结合 CS-SVM 方法可以对转基因和非转基因大豆进行快速、无损、可靠的检测<sup>[51]</sup>。虽然目前杂交水稻的种植面积广阔,但是转基因水稻也有种植,为了鉴别转基因水稻和非转基因水稻,2017 年,胡晓华<sup>[52]</sup>在 0.1~1.2 THz 频率范围内利用太赫兹光谱成像系统对转基因和非转基因水稻种子进行了光谱扫描,分别从获取的两类光谱数据中随机选取一定数目的样本光谱构成初始字典,然后对初始字典进行优化,构建超完备字典;之后,他们针对训练样本和测试样本,基于超完备字典通过正交匹配追踪(OMP)算法分别求解稀疏系数,最终将训练样本和测试样本的稀疏表示系数输入到随机森林(RF)模型中,进行分类识别<sup>[52]</sup>。2019 年,周月等<sup>[53]</sup>利用朴素贝叶斯算法、主成分分析法、RF 算法等对两种转基因油菜进行分类识别,其中,基于朴素贝叶斯的自适应算法的检测准确率高达 96.6%。Ju 等<sup>[54]</sup>对转基因水稻进行了研究,他们在所采集到的样品的太赫兹时域光谱中选取 4 个主成分,使用径向基函数

(RBF)神经网络对模型进行训练,将反向传播(BP)神经网络、SVM、主成分分析-径向基函数(PCA-RBF)三种方法进行了比较。结果发现,PCA-RBF 方法的准确率较高,达到了 92%。

## 7 太赫兹光谱技术在农产品含水量检测中的应用

农产品中的含水量对其生长情况、储存周期以及口感都有十分重要的意义,所以对农产品的含水量的研究显得十分重要。目前,太赫兹光谱技术正逐步被应用在农产品的品质研究上。大量实验证明,虽然水对太赫兹光谱的吸收较为严重,但是也可以将此劣势转化为优势,将化学计量学方法与太赫兹光谱检测技术结合,可以实现对农产品含水量的检测与分析。

小麦种子中的含水量会对小麦的储存周期及品质有巨大影响。Chua 等<sup>[55-56]</sup>为了实现对小麦中含水量的准确测定,在 0.1~4 THz 频域范围内,分别测得了不同含水量的完整小麦与碾碎小麦的太赫兹时域光谱;然后将测得的含水小麦粉与干燥小麦粉的时域光谱相减,建立了含水量预测模型。结果显示:样品的吸收光谱出现了明显的波峰,但是样品本身以及光源散射会对整个麦粒中含水量的预测造成极大影响。为了测定大豆叶片中的含水量,2018 年,步正延等<sup>[57]</sup>利用太赫兹光谱成像系统对 96 份大豆叶片进行了图像采集,并采用 PCA 方法提取出对水分敏感的特征波段(0.557, 1.098, 1.163 THz),然后采用自适应阈值分割法将这 3 个特征波段下的叶



片图像分为叶脉图像与叶肉图像;经过分析比对采集的图像的灰度特征,他们将叶片特征依次分为叶片特征组(G1)、叶脉特征组(G2)和叶肉特征组(G3),然后采用MLR、BPNN和LS-SVM等化学计量学方法,构建了9种大豆叶片水分预测模型。他们通过计算分析发现,基于G3的LS-SVM模型的预测结果最好,校正集和预测集的决定系数分别为0.9678和0.9632,校正集和预测集的均方根误差分别为0.0578和0.0465。

同样以大豆叶片为实验对象,2018年,赵旭婷等<sup>[58]</sup>采用太赫兹光谱技术实时监测了田间大豆的健康状况。实验样品为黄13号大豆。为模拟大豆最真实的生长环境,他们将处于开花阶段的大豆划分为5个梯度:供水正常(田间最大持水量的80%)、轻度缺水(田间最大持水量的65%)、中度缺水(田间最大持水量的50%)、重度缺水(田间最大持水量的35%)、严重缺水(田间最大持水量的20%),每个梯度设置3个重复。他们分别摘取生长在每个梯度的大豆植株的冠层叶片各18片,共90个样本,然后采集各样本的太赫兹光谱数据,如图8所示,并以2:1的比例将其随机分为校正集和预测集,进行建模和预测。

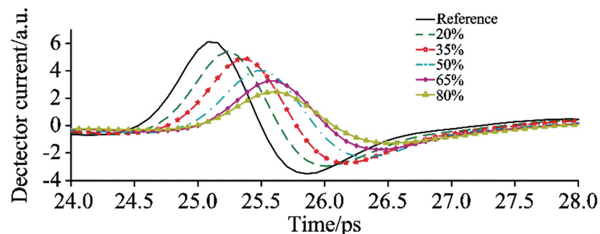


图8 不同干旱胁迫梯度的大豆叶片的平均太赫兹时域光谱<sup>[58]</sup>

Fig. 8 Average terahertz time-domain spectra of soybean leaves under different drought stress gradients<sup>[58]</sup>

赵旭婷等<sup>[58]</sup>根据Dorney等<sup>[26]</sup>和Duvillaret等<sup>[27]</sup>提出的模型对光谱数据进行分析,得到了各样品的吸收系数谱以及折射率谱,进而对不同缺水程度的大豆叶片的太赫兹时域光谱吸收系数、折射率进行了定性分析。结果发现:时域光谱的峰值随着干旱胁迫程度的降低而呈现不断衰减的趋势,且均低于空白参考峰值,同时有明显的延迟;吸收系数值随干旱胁迫程度的加剧而逐渐降低;折射率值与吸收系数的变化趋势一致。他们采用化学计量学方法处理后发现,太赫兹波对大豆叶片中水分的差异十分敏感,基于时域光谱最大值和最小值的MLR模型的预测精度最高,预测集相关系数高达

0.9393, RMSEP为0.0495。这说明,太赫兹光谱技术可以用于大豆叶片中含水量的检测<sup>[58]</sup>。

以上实验结果表明,虽然水对太赫兹时域光谱具有显著影响,但可以通过太赫兹技术检测农产品中水分含量的微小变化,从而达到对农产品含水量进行即时检测的目的。这使得太赫兹光谱技术成为日常控制农产品在加工过程中干燥程度的新方法以及实时监测农产品在储存期间含水量变化的新手段,对保障农产品的质量,提高经济效益具有相当重要的意义<sup>[59]</sup>。

## 8 结束语

近些年来,太赫兹光谱技术以其独特的优势,在无损伤检测领域得到了研究者的广泛关注。太赫兹光谱检测技术在食品、化工、农业、医疗、安检等领域得到了广泛应用,但依旧存在一些技术难点,从而在一定程度上限制了该技术的发展。

结合本研究团队利用太赫兹光谱技术对玉米粉、面粉、葛粉、小麦粉等进行的一系列检测可知,虽然实验前预设了周密的实验方案,并达到了预期的实验目的,但该技术也存在一些不足,如:1)样品的制备比较复杂,流程繁琐,大多只能在实验室条件下完成,不利于其在实际生产生活中的应用;2)理论基础研究较为薄弱,提取样品光谱参数的方法不太成熟,数据处理方法还有待进一步发展;3)水分对太赫兹波的吸收比较严重,对物质的含水量进行检测较为困难;4)温度、湿度等外界因素会对检测精度有较大影响,难以保证不同实验环境下实验结果的重复性。

正因为太赫兹光谱技术无损检测领域存在技术层面及理论层面的不足,所以针对农产品及食品的研究还处于探索阶段,比如,直接对完整的农产品进行无损检测的相关报道还较为少见。在以后的研究中,不仅要关注太赫兹光谱技术在理论层面的探索,更要注重其在技术层面的创新,进而突破太赫兹光谱技术目前的壁垒。在利用太赫兹光谱技术对农产品进行品质检测时,不仅要拓宽农产品的种类,还要对农产品的成分检测进行进一步研究,以完善更多的农产品成分在太赫兹波段的光学特征及图谱数据,推动太赫兹光谱技术在实际生产生活中的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou Y J, Liu J S, Wang K J, et al. Identification

- of Chinese herbal medicines based on terahertz spectroscopy analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(7): 1840-1843.
- 周永军, 刘劲松, 王可嘉, 等. 基于太赫兹谱分析中药材鉴别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(7): 1840-1843.
- [2] Li P P, Zhang Y, Ge H Y, et al. Research advances in terahertz spectroscopy detection of harmful substances in food[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(3): 372-375.
- 李鹏鹏, 张元, 葛宏义, 等. 太赫兹光谱技术在食品安全检测中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(3): 372-375.
- [3] Liu L Y, Chang T Y, Li K, et al. Spectral analysis and quantitative detection of baicalin based on terahertz radiation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0314001.
- 刘陵玉, 常天英, 李珂, 等. 基于太赫兹辐射的黄芩苷光谱分析及定量检测[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0314001.
- [4] Dinovits A, Valchev D G, Abbott D. Terahertz time-domain spectroscopy of edible oils[J]. *Royal Society Open Science*, 2017, 4(6): 170275.
- [5] Xie L J, Xu W D, Ying Y B, et al. Advancement and trend of terahertz spectroscopy technique for non-destructive detection[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 246-255.
- 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.
- [6] Leili A H, Elnaz A, Arash T, et al. Terahertz spectroscopy and imaging: a review on agricultural applications[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 177: 105628.
- [7] Hu Y, Wang X H, Guo L T, et al. Absorption and dispersion of vegetable oil and animal fat in THz range[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(9): 4124-4128.
- 胡颖, 王晓红, 郭澜涛, 等. 植物油和动物脂肪在 THz 波段的吸收和色散[J]. *物理学报*, 2005, 54(9): 4124-4128.
- [8] Liu J X, Du B, Deng Y Q, et al. Terahertz-spectral identification of organic compounds based on differential PCA-SVM method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614039.
- 刘俊秀, 杜彬, 邓玉强, 等. 基于差分-主成分分析-支持向量机的有机化合物太赫兹吸收光谱识别方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614039.
- [9] Liu X Q, Yao J L, Huang F, et al. Study on detection of penicillin drugs based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0630001.
- 刘晓庆, 姚嘉丽, 黄凡, 等. 基于太赫兹时域光谱的青霉素类药物检测研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0630001.
- [10] Shin H J, Choi S W, Ok G. Qualitative identification of food materials by complex refractive index mapping in the terahertz range[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 282-288.
- [11] Zhang J Y, Ren J J, Chen S H, et al. Application of wavelet denoising in terahertz nondestructive detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0114001.
- 张霁阳, 任姣姣, 陈思宏, 等. 小波去噪在太赫兹无损检测中的应用[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0114001.
- [12] Wang Y Y, Wang L P, Li T, et al. Terahertz characteristic absorption spectrometric analysis of homocysteine[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1030003.
- 王莹莹, 汪丽平, 李恬, 等. 同型半胱氨酸的太赫兹特征吸收光谱分析[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1030003.
- [13] Li B, Wang N, Zhang W L, et al. Preliminary research on insect damage detection in pecans using terahertz spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1196-1200.
- 李斌, Wang Ning, 张伟立, 等. 基于太赫兹光谱技术的山核桃内部虫害检测初步研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1196-1200.
- [14] Wang D, Pan L G, Liu L H, et al. Study on terahertz spectrum of degraded peanut[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2015(6): 57-59, 62.
- 王冬, 潘立刚, 刘龙海, 等. 劣变花生的太赫兹波谱研究[J]. *农产品质量与安全*, 2015(6): 57-59, 62.
- [15] 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.
- 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.
- [16] Li B, Du X Y, Liu Y D, et al. Detection research of seed potato starch in kudzu using terahertz time-

- domain spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 203001.
- 李斌, 杜秀洋, 刘燕德, 等. 太赫兹时域光谱葛粉掺薯粉检测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 203001.
- [17] Sun T, Zhang Z Y, Xiang Y H, et al. Determination of carbaryl in rice by using FT far-IR and THz-TDS techniques [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(2): 541-544.
- 孙彤, 张卓勇, 相玉红, 等. 利用 Far-IR 和 THz-TDS 光谱法测定大米中西维因[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(2): 541-544.
- [18] Li G L, Deng H, Liu Q C, et al. Terahertz characteristic absorption spectrum analysis of metronidazole [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 173001.
- 李桂林, 邓璇, 刘泉澄, 等. 甲硝唑的太赫兹特征吸收光谱分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 173001.
- [19] Li B, Zhao C J. Preliminary research on heavy metal Pb detection in soil based on terahertz spectroscopy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(S1): 291-296.
- 李斌, 赵春江. 基于太赫兹光谱的土壤重金属铅含量检测初步研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(S1): 291-296.
- [20] Hua Y F, Zhang H J. Qualitative and quantitative detection of pesticides with terahertz time-domain spectroscopy [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(7): 2064-2070.
- [21] Ma Y H, Wang Q, Wang X W, et al. Terahertz spectroscopy cluster analysis of four kinds of bactericide [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 27(1): 107-111.
- 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(1): 107-111.
- [22] 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.
- 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.
- [23] Chen Z W, Zhang Z Y, Sun T, et al. Quantitative analysis of pesticide in rice using terahertz far-infrared spectroscopy [C]// *Proceedings of the 29th Annual Conference of the Chinese Chemical Society*. Beijing: [s.n.], 2014: 45.
- 陈泽伟, 张卓勇, 孙彤, 等. 应用太赫兹频段远红外光谱定量分析大米中的农药西维因 [C]// *中国化学会第 29 届学术年会论文集*. 北京: [出版者不详], 2014: 45.
- [24] Ma J X. Research on THz detection of pesticide [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2014.
- 马吉祥. 农药的 THz 检测研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
- [25] Huang Y H, Liu S Q, Luan H J, et al. Terahertz spectroscopic investigation on dipterex and chlorodifon [J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 36(3): 291-296.
- 黄翼虎, 刘淑泉, 栾浩杰, 等. 三氯杀螨砜和敌百虫的太赫兹光谱研究[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(3): 291-296.
- [26] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(7): 1562-1571.
- [27] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J L. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(2): 409-415.
- [28] Xu W D, Xie L J, Zhu J F, et al. Terahertz sensing of chlorpyrifos-methyl using metamaterials [J]. *Food Chemistry*, 2017, 218: 330-334.
- [29] Qin B Y. Rapid detection of pesticide residue in crops base on combined terahertz spectroscopy with chemometrics [D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- 覃斌毅. 太赫兹光谱结合化学计量在农作物农药残留快速检测中的应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [30] Wang X W, Wang Q, Wang H L. Determination of 2 amides pesticide residues in agricultural products by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(32): 18184-18186.
- 王孝伟, 王强, 王花丽. 利用太赫兹时域光谱检测农产品中 2 种酰胺类农药残留 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(32): 18184-18186.
- [31] Cao B H, Hou D B, Yan Z G, et al. Method for detection of pesticide residue based on terahertz time domain spectroscopy [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(6): 429-432.



- 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.
- [32] Hao G H, Guo C S, Liu J J, et al. Qualitative and quantitative detections of pyrethroid pesticides by terahertz time-domain spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(5): 1184-1188.  
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.
- [33] Ma Y H, Wang Q, Li L Y. PLS model investigation of thiabendazole based on THz spectrum [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 117: 7-14.
- [34] Suzuki T, Ogawa Y, Kondo N. Characterization of pesticide residue, cis-permethrin by terahertz spectroscopy [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2011, 4(4): 90-94.
- [35] Xu B C. Enhancement of basic research on food additives for food quality and security[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(1): 113-114.  
徐宝财. 加强食品添加剂基础研究 保障食品安全[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(1): 113-114.
- [36] Zhang B Y, Li J S. Diagnostic techniques of talc powder in flour using terahertz spectrum[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(7): 113-116.  
张宝月, 李九生. 基于太赫兹光谱的小麦粉中滑石粉测定技术[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(7): 113-116.
- [37] Fu X H, Li W D, Xia Y, et al. The detection of talc in wheat powder based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(3): 110-112, 122.  
付秀华, 李闻达, 夏焱, 等. 小麦粉中掺杂滑石粉的太赫兹光谱检测[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(3): 110-112, 122.
- [38] Qin J P, Niu B, Zhang Y, et al. Research on detecting flour brightener by terahertz spectrum[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2013, 21(2): 39-41.  
秦建平, 牛波, 张元, 等. 太赫兹波谱检测面粉增白剂的研究[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(2): 39-41.
- [39] Feng L, Cai J H, Zhang G X, et al. Research of benzoyl peroxide residues in flour by terahertz spectroscopy technology [J]. Advanced Materials Research, 2013, 712/713/714/715: 2039-2042.
- [40] Guan A H, Li Z, Ge H Y. The qualitative and quantitative detection of potassium alum in sweet potato starch based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(1): 267-270.  
管爱红, 李智, 葛宏义. 红薯淀粉中添加剂明矾的定性和定量太赫兹时域光谱技术检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(1): 267-270.
- [41] Guan A H, Chao Y Y, Li Z. Application of THz-TDS technology in quantitative analysis of alum content in starch [J]. China Food Additives, 2019 (1): 149-155.  
管爱红, 晁永阳, 李智. THz-TDS技术在淀粉中明矾含量的定量分析应用研究[J]. 中国食品添加剂, 2019(1): 149-155.
- [42] Liu Y D, Du X Y, Li B, et al. Detection of benzoic acid in arrowroot by terahertz technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 041101.  
刘燕德, 杜秀洋, 李斌, 等. 基于太赫兹技术的葛粉中苯甲酸的检测[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 041101.
- [43] Hu J. Quantitative determination of benzoic acid in flour based on terahertz time-domain spectroscopy and BPNN model [J]. Modern Flour Milling Industry, 2019, 33(6): 51.  
胡军. 基于BP神经网络的太赫兹时域光谱对面粉中苯甲酸定量检测研究[J]. 现代面粉工业, 2019, 33(6): 51.
- [44] Hu J, Liu Y D, Sun X D, et al. Quantitative determination of benzoic acid in flour based on terahertz time-domain spectroscopy and LS-SVM [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(11): 3566-3570.  
胡军, 刘燕德, 孙旭东, 等. 基于LS-SVM和THz光谱技术的面粉中苯甲酸检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(11): 3566-3570.
- [45] Ouyang A G, Cai H Z, Li B, et al. Quantitative detection of benzoic acid in corn flour by terahertz spectroscopy [J]. Laser Technology, 2020, 44(4): 478-484.  
欧阳爱国, 蔡会周, 李斌, 等. 玉米粉中苯甲酸的太赫兹光谱定量检测研究[J]. 激光技术, 2020, 44(4): 478-484.
- [46] Sun X D, Liu J B, Zhu K, et al. Generalized regression neural network association with terahertz spectroscopy for quantitative analysis of benzoic acid additive in wheat flour [J]. Royal Society Open Science, 2019, 6(7): 190485.
- [47] Tu S. Methods for nondestructive identification of transgenic agricultural products based on terahertz

- spectroscopy [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2015.
- 涂闪. 基于太赫兹光谱技术的转基因农产品无损鉴别方法研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2015.
- [48] Chen T, Li Z, Yin X H, et al. Discrimination of genetically modified sugar beets based on terahertz spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2016, 153: 586-590.
- [49] Shen X C, Li B, Li X, et al. Identification of transgenic and non-transgenic cotton seed based on terahertz range spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(S1): 288-292.
- 沈晓晨, 李斌, 李霞, 等. 基于太赫兹时域光谱的转基因与非转基因棉花种子鉴别[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(S1): 288-292.
- [50] Nie J Y, Zhang W T, Xiong X M, et al. Recognition of transgenic soybeans based on terahertz spectroscopy and PCA-BPN network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(5): 0530001.
- 聂君扬, 张文涛, 熊显名, 等. 基于太赫兹时域光谱技术与 PCA-BPN 网络的转基因大豆鉴别[J]. *光子学报*, 2016, 45(5): 0530001.
- [51] Chen T, Li Z, Hu F R, et al. Discrimination of GMOs using terahertz spectroscopy and CS-SVM[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(2): 618-623.
- 陈涛, 李智, 胡放荣, 等. 基于太赫兹光谱技术与 CS-SVM 的转基因产品鉴别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(2): 618-623.
- [52] Hu X H. A preliminary study on the identification of transgenic crops based on terahertz time domain spectroscopy and imaging technology [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- 胡晓华. 基于太赫兹时域光谱及成像技术对转基因作物鉴别分析的初步研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [53] Zhou Y, Sun J, Yang S G, et al. Terahertz spectral analysis and recognition based on machine learning[J]. *Radio Engineering*, 2019, 49(12): 1031-1036.
- 周月, 孙霁, 杨四刚, 等. 基于机器学习的太赫兹光谱分析与识别[J]. *无线电工程*, 2019, 49(12): 1031-1036.
- [54] Ju X G, Zhang Y, Lian F Y, et al. Quick test for transgenic components in rice using terahertz spectra[J]. *Applied Spectroscopy*, 2019, 73(2): 171-181.
- [55] 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*, 2005, June 17-17, 2005, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 4.
- [56] Chua H S, Upadhyya P C, Haigh A D, et al. Terahertz timedomain spectroscopy of wheat grain [C]//*2004 Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics*. [S.l.: s.n.], 2004: 399-400.
- [57] Bu Z Y, Li Z F, Song F H, et al. Determination of moisture content in soybean leaves based on terahertz imaging[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(8): 1420-1426.
- 步正延, 李臻峰, 宋飞虎, 等. 基于太赫兹成像技术的大豆叶片水分含量测定[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(8): 1420-1426.
- [58] Zhao X T, Zhang S J, Li B, et al. Study on moisture content of soybean canopy leaves under drought stress using terahertz technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(8): 2350-2354.
- 赵旭婷, 张淑娟, 李斌, 等. 太赫兹光谱技术用于干旱胁迫下大豆冠层含水量检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(8): 2350-2354.
- [59] Jiang Y Y, Ge H Y, Lian F Y, et al. Application of THz technology to nondestructive detection of agricultural product quality [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(8): 2047-2052.
- 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.