

基于太赫兹技术的葛粉中苯甲酸的检测

刘燕德*, 杜秀洋, 李斌, 胡军, 吴建, 郑艺蕾

华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013

摘要 使用太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)对葛粉中苯甲酸含量进行了定量分析。检测样品为有塑料包装袋的葛粉。对原始数据进行多元散射校正、基线校正、一阶导数、二阶导数等预处理,利用偏最小二乘(PLS)法对葛粉中苯甲酸的含量建立预测模型。检测结果显示:无塑料包装袋样品的模型决定因子为 0.975,预测集的均方根误差(RMSEP)为 1.126%;有塑料包装袋样品的模型决定因子为 0.976, RMSEP 为 1.356%。

关键词 成像系统; 太赫兹时域光谱; 苯甲酸; 偏最小二乘法; 葛粉; 塑料包装

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.041101

Detection of Benzoic Acid in Arrowroot by Terahertz Technology

Liu Yande*, Du Xiuyang, Li Bin, Hu Jun, Wu Jian, Zheng Yilei

Institute of Optics-Mechanics-Electronics Technology and Application (OMETA),

East China JiaoTong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China

Abstract The terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) is used to quantitatively analyze the benzoic acid content in arrowroot, and the arrowroot is with a plastic bag. The original data are subjected to the pretreatments of multiple scattering correction, baseline correction, first derivative, second derivative, and so on. The partial least square (PLS) method is used to establish a prediction model for the detection of benzoic acid content in arrowroot. The detection results show that model-determining factor for samples without plastic bags is 0.975 and the predicted root mean square error (RMSEP) is 1.126%. In contrast, that for samples with plastic bags is 0.976 and the RMSEP is 1.356%.

Key words imaging systems; terahertz time domain spectroscopy; benzoic acid; partial least square method; arrowroot; plastic packaging

OCIS codes 110.6795; 120.3688

1 引言

太赫兹电磁波一般指的是频率在 0.1~10 THz (波长在 0.03~3 mm)范围内的电磁辐射,其波段处于微波和红外之间,属于远红外波段^[1]。微波空间分辨率低,红外波穿透性低且会因为热噪音而产生假象,X 射线对生命体有害且维护较复杂,故以上 3 种电磁波都不适合光谱成像。太赫兹脉冲对生命体无害、穿透性强、空间分辨率高且可以用于光谱成像,此外,太赫兹还具有瞬态性、宽带性、低能性等特

性^[2-3],故太赫兹技术在医学诊断、通信、化学和安

质量控制等方面有着极其重要的应用,得到了全世界各国研究者极大的关注^[4]。

近年来食品安全问题受到了社会的广泛关注,从含有苏丹红的鸭蛋到添加三聚氰胺的奶粉,再到地沟油和瘦肉精,人们逐渐意识到了食品安全检测的重要性^[5]。太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)是现今十分先进的无损检测技术,被看作食品安全检测的新方法。一些文献已经用 THz-TDS 对奶粉中三聚氰胺和麦当劳“麦乐鸡”中的添加剂进行了检

收稿日期: 2018-08-03; 修回日期: 2018-08-22; 录用日期: 2018-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(31760344)、江西省优势科技创新团队建设计划项目(20153BCB24002)、南方山地果园智能化技术与管理技术与装备协同创新中心(赣教高字[2014]60号)

* E-mail: jxliuyd@163.com

测,并取得了令人满意的效果。故 THz-TDS 在食品安全检测有很大的潜力^[6]。

葛根是多年生缠绕藤本植物,是一种药食两用的天然植物资源,其主要产地有陕西、湖北、江西等省份。以葛根为原料生产的葛粉是一种优质的野生植物淀粉,富含人体必需的各种氨基酸和微量元素,具有清热解毒、生津止渴等功效,是老少皆宜的名贵滋补品^[7-8]。随着人们越来越注重养生,葛粉也越来越受到大家青睐。然而,很多商家为了提升葛粉的储存时间,在葛粉中加入过量的防腐剂。苯甲酸就是常用的防腐剂之一,在食品中添加少量苯甲酸对人体并无毒害。但是对于敏感人群或摄入大量的人,苯甲酸会引起过敏反应,例如哮喘、荨麻疹、代谢性酸中毒和抽搐等症状^[9-10],因此检测葛粉中苯甲酸的含量是很重要的。

检测苯甲酸的方法有很多,但各种方法的缺点都十分明显。紫外分光光度法简单快速但准确度较低,需要较繁琐的前处理。毛细管电脉冲法进样密度较低,需要采用内标法才能进行定量测量。薄层色谱法在测定苯甲酸时难以实现定量检测。气相色谱法是国内外普遍采用的一种分析方法,具有灵敏度高、选择性可靠等特点,但其检测成本高,操作较复杂^[11]。THz-TDS 对大分子结构和空间构型十分敏感,能鉴别出分子结构差别小的物质,具有独特的优势^[12]。

本文利用 THz-TDS 对葛粉中的苯甲酸进行定

量检测。为了验证利用 THz-TDS 进行无损检测的可行性,增加了一组干扰实验,即在塑料袋的干扰下对样品进行再次测量,并将两组实验(无塑料袋组和有塑料袋组)的结果进行对比。最后利用偏最小二乘(PLS)法建立了葛粉中苯甲酸含量的模型,实现了葛粉中苯甲酸含量的快速准确无损检测。

2 实验系统

本实验采用日本爱德万(Advantest)公司的 TAS7500SU 太赫兹时域光谱仪进行实验,配套使用该设备自带的 Spectroscopic Measurement 光谱采集软件。

太赫兹时域光谱测量系统的装置如图 1 所示。激光光束被分为抽运光和探测光,实验用的光谱仪是透射式时域光谱仪,下面对透射式时域光谱仪的原理作简单的介绍。透射式 THz-TDS 系统由飞秒激光器、太赫兹脉冲产生装置、探测装置和时间延迟系统组成,图 1 是透射式太赫兹时域光谱检测系统原理图^[13],A~H 为反射透镜。检测系统的原理是:飞秒激光发射脉冲到光导天线上激发出载流子,该载流子在外加电场作用下定向运动并发射出太赫兹电磁波。探测光透过探测晶体(ZnTe)后偏振状态发生改变^[14]。通过偏振检测,扫描激发和探测脉冲的相对时间延迟,利用差分探测技术,即可得 THz 波的时域波形^[15]。

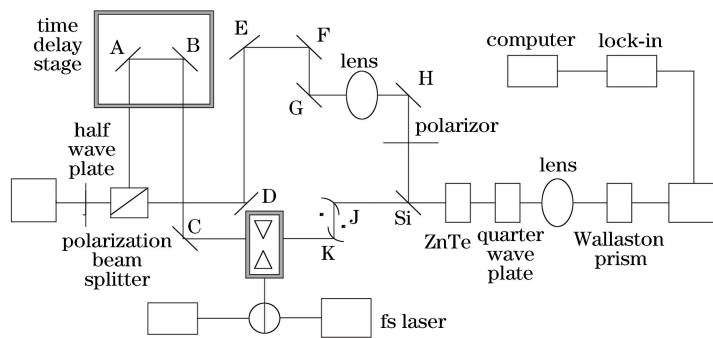


图 1 太赫兹时域光谱仪结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of terahertz time domain spectrometer

3 材料与方 法

3.1 实验样品

实验中所用的葛粉是农家纯天然葛粉;苯甲酸由北京嘉世玉禾化工技术研究院提供,分析纯度(质量分数)大于等于 99%。按照实验方案设计好的质量分数梯度,对葛粉和苯甲酸分别进行称重,并进行混合配样。实验设计了 36 组不同质量分数的样品,

如表 1 所示。将配制好的样品依次放在涡旋搅拌器上振荡 2~3 min,使葛粉和苯甲酸完全混合。

将配制好的样品转移到压片机上进行压片。课题组之前研究过压片厚度对太赫兹光谱检测效果的影响,实验结果表明 THz-TDS 对厚度在 1 mm 左右压片的检测效果是最好的。故本次实验中采用游标卡尺对每个压片的厚度进行测量,选出厚度接近 1 mm 的压片备用。每一个编号的样

表1 36组样品中苯甲酸质量分数

Table 1 Mass fractions of benzoic acid in 36 groups of samples

Sample No.	Mass fraction / %	Sample No.	Mass fraction / %	Sample No.	Mass fraction / %
1	0	13	7.0	25	14.5
2	0.5	14	7.5	26	15.0
3	1.0	15	8.0	27	15.5
4	1.5	16	8.5	28	16.0
5	2.0	17	9.0	29	16.5
6	2.5	18	10.0	30	17.0
7	3.0	19	11.0	31	17.5
8	3.5	20	12.0	32	18.0
9	4.0	21	12.5	33	18.5
10	4.5	22	13.0	34	19.0
11	5.0	23	13.5	35	19.5
12	6.0	24	14.0	36	20.0

品采用两个压片,用于应对可能出现的意外情况,如压片破碎等。

接下来用同样的样品进行另一组实验,将透明塑料袋剪成两片直径为1 cm的圆片,测量时在样品的上下各放置一片,用来模拟有塑料包装袋的情形。

3.2 光谱采集

在测量时,室温保持20℃左右,相对湿度保持25%以下。利用空气干燥剂使空气干燥,在开机后利用空气压缩机往设备中通入干燥的空气,预热30 min后,待样品仓内部空气相对湿度小于5%时,仪器方可使用。将压片放置在太赫兹时域光谱仪上进行光谱测量,在每次测量前对压片厚度的参数进行重新设置,以确保测量的准确性。每个样品扫描4次,计算平均光谱作为样品最终的光谱。测量范围为扫描范围:0~5.0 THz,分辨率为7.6 GHz,扫描次数设置为8192次。本次实验共有36个不同质量分数的样品,测得144条光谱,按照3:1的比例随机划分,用于建模集的光谱有108条,用于预测集的光谱有36条。

3.3 算法原理

PLS法是光谱检测分析中最成熟且应用最广泛的一种基于因子分析的多变量校正算法,是一种多因变量对多自变量的回归建模方法,可以较好地解决许多以往用普通多元回归法无法解决的问题^[16-17]。

PLS法是一种新型的多元统计数据分析方法,和主成分回归相似,但它相对于主成分回归更近一步。两者的区别在于PLS法将质量分数矩阵 Y 和

相应的矩阵 X 同时进行主成分分解^[18],其中 X 是光谱中的信息矩阵, Y 是光谱对应的样本的真值矩阵。总的来说,偏最小二乘回归即为多元线性回归、典型相关分析以及主成分分析的综合应用。偏最小二乘回归的数学模型为

$$X = TP + E, \quad (1)$$

及

$$Y = UQ + F, \quad (2)$$

式中: T 和 U 的矩阵元分别为 X 和 Y 的得分; P 和 Q 的矩阵元分别为 X 和 Y 的装载; E 和 F 分别为运用偏最小二乘模型去拟合 X 和 Y 所引进的误差。

在理想的情况下, X 中误差的来源和 Y 中的误差的来源完全相同,而实际上, X 中误差与 Y 中误差并不相关,因而 t 和 u 就是矩阵 T 和 U ,但当两个矩阵同时用于确定因子时,则 X 和 Y 满足^[19-20]

$$U = bT + E, \quad (3)$$

式中: b 表征 T 和 U 的内在关系。

4 实验结果及分析

4.1 无塑料包装袋组的结果分析

无塑料包装袋情况下5种不同质量分数的样品对应的吸收系数光谱如图2所示。选取0~4.0 THz波段的光谱作为分析对象,高于4.0 THz波段光谱的噪声影响较大,信号基本被淹没,其结果是没有意义的。在0~0.5 THz波段的光谱有明显且剧烈波动,同样也是由于噪声的影响。苯甲酸质量分数为1%的葛粉压片的光谱近似呈一条斜线,没有出现特征峰。苯甲酸质量分数为20%的葛粉压片的光谱在2.0 THz处有一个明显的特征峰。再对比苯甲酸质量分数为12%、15%的光谱,在2.0 THz处峰值随着苯甲酸质量分数的增大而增大,可以断定2.0 THz的特征峰是由苯甲酸造成的。

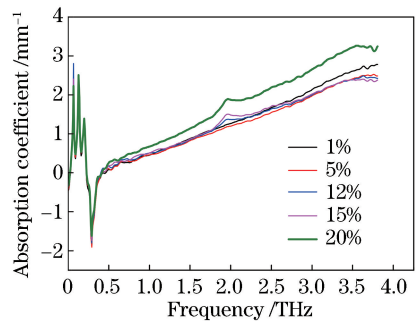


图2 葛粉中苯甲酸的部分吸收系数
Fig. 2 Partial absorption coefficients of benzoic acid in arrowroot

图 3 为所有 36 个样品的吸收系数光谱图,随着光谱条数的增多,2.0 THz 处的特征峰的增长趋势越来越明显。

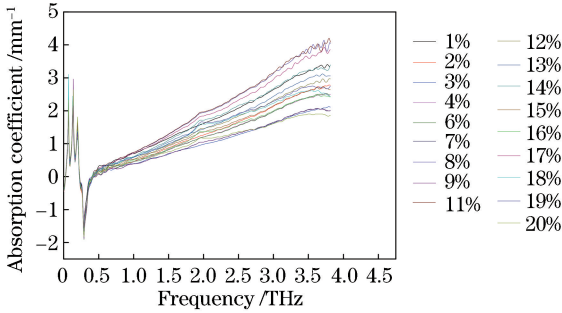


图 3 葛粉中苯甲酸不同质量分数下的吸收系数
Fig. 3 Absorption coefficients of benzoic acid in arrowroot with different mass fractions

将数据转变为文本格式,并依次进行预处理和 PLS 建模分析。为了减少外界因素的影响,实验采用的预处理方法有多元散射校正(MSC)、基线校正(Baseline)、一阶导数(1st derivative)、二阶导数(2nd derivative)^[21]。对比各种预处理方法得到的相关系数 R^2 和预测集均方根误差(RMSEP)可知,用 MSC 进行预处理的效果最好,预测集相关系数达到 0.978, RMSEP 达到 1.267,如表 2 所示,其中 RMSEC 为建模集的均方根误差。由于 THz-TDS 为静态检测,环境造成的干扰较少,误差也较小,用多元散射校正之后的实验数据进行建模分析,其拟合效果与无预处理相比更好。

表 2 基于 PLS 的葛粉中苯甲酸含量的模型结果
Table 2 Model results of benzoic acid content in arrowroot based on PLS

Pretreatment method	Calibration set		Prediction set	
	R^2	RMSEC /%	R^2	RMSEP /%
Original spectrum	0.978	1.121	0.973	1.356
MSC	0.983	1.051	0.978	1.267
Baseline	0.975	1.188	0.968	1.284
1st derivative	0.969	1.062	0.962	1.305
2nd derivative	0.981	1.050	0.973	1.269

经过预处理和 PLS 建模分析后,建模集的相关系数为 0.983,预测集的相关系数为 0.975。真实值和预测值的相关性如图 4 所示,这表明了预测的准确性。

经过 PLS 建模分析,建模集的均方根误差为 0.010,预测集的均方根误差为 0.012。图 5 为均方根误差(RMSE)随主成分因子变化的曲线图,cal line 为建模集均方根误差随主成分因子变化的曲线,val line 为预测集均方根误差随主成分因子变

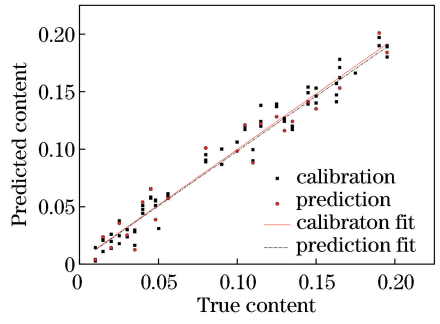


图 4 PLS 预测的苯甲酸含量的散点图
Fig. 4 Scatter plot of benzoic acid content predicted by PLS

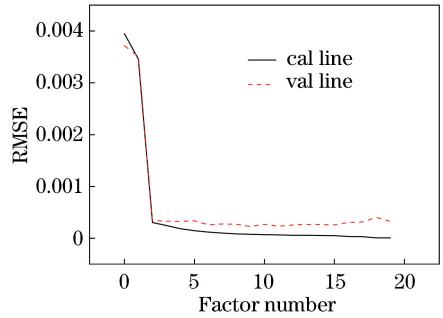


图 5 均方根误差随主成分因子的变化
Fig. 5 RMSE versus principal component factor

化的曲线。均方根误差越小,表明该模型的精确度越高。该模型的均方根误差达到 0.01,说明拟合效果较好。

4.2 有塑料包装袋组的结果分析

为了验证太赫兹技术对有塑料包装样品检测的可行性,在第一批实验的基础上加了一组有塑料包装袋的实验。该实验和上组实验的实验样品是相同的,测量的时候在压片上下各放置一个直径为 1 cm 的塑料薄片。每个样品测量两次,共得到 72 组数据。实验环境与之前的实验保持一致。图 6 是苯甲酸质量分数为 20% 的葛粉在有塑料包装袋与无包

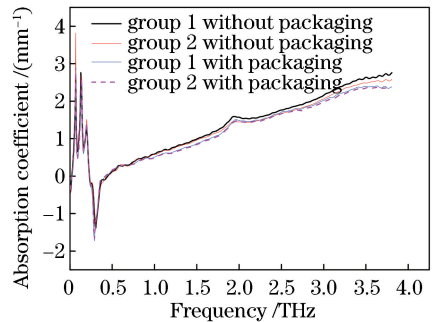


图 6 苯甲酸质量分数为 20% 时有/无塑料包装袋的光谱
Fig. 6 Spectra with or without plastic packaging when mass fraction of benzoic acid is 20%

装袋两种情况下的太赫兹吸收系数图谱,为了避免偶然性,有塑料包装袋与无塑料包装袋的数据各取2组,如图6所示。无塑料包装袋组比有塑料包装袋组的光谱在2.0 THz处的吸收系数峰值稍高,说明塑料包装袋对太赫兹脉冲有微弱的吸收作用。尽管如此,有无塑料包装袋的2组光谱差异不大,有塑料包装袋组的光谱在2.0 THz处的特征峰仍然明显。

对有塑料包装的样品数据进行无预处理的PLS建模分析,如图7和图8所示,建模集的相关系数为0.976, RMSEC为0.013。预测集的相关系数为0.968, RMSEP为0.017。可见,使用PLS法建立的模型拟合效果较好。

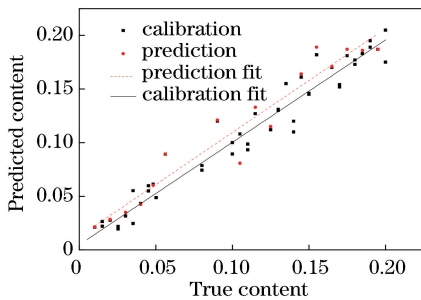


图7 PLS预测的带包装苯甲酸含量的散点图

Fig. 7 Scatter plot of benzoic acid content with plastic packaging predicted by PLS

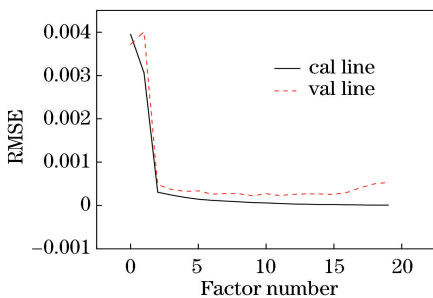


图8 有塑料包装袋样品的RMSE随主成分因子的变化

Fig. 8 RMSE of sample with plastic packaging versus principal component factor

无塑料包装袋的实验表明, MSC的预处理方法在实验中的效果是最好的,故对有塑料包装袋的样品只进行MSC预处理。如表3所示,经过MSC预处理之后的建模效果有一定的改进。建模集相关系数为0.978, RMSEC为0.012。预测集相关系数为0.976, RMSEP为0.013。

5 结论

结合PLS法,采用太赫兹技术对葛粉中苯甲酸

表3 基于PLS的有塑料包装的葛粉中苯甲酸含量的模型结果

Table 3 Model results of benzoic acid content in arrowroot with plastic packaging based on PLS

Pretreatment method	Calibration set		Prediction set	
	R^2	RMSEC / %	R^2	RMSEP / %
Original spectrum	0.976	1.135	0.968	1.799
MSC	0.978	1.128	0.976	1.356

的含量进行检测。使用太赫兹时域光谱仪测得配好样品的光谱图,并对光谱进行PLS建模。在无塑料包装袋组的实验中,相关系数 R^2 为0.975, RMSEP为1.267%。结果表明,对于葛粉中苯甲酸的检测,使用太赫兹技术与PLS相结合方案是一种快速、准确、便捷的途径。在有塑料包装袋组的实验中,相关系数 R^2 为0.968, RMSEP为1.799%。经过多元散射校正预处理之后,相关系数 R^2 达到0.976, RMSEP为1.356%。结果表明,塑料包装袋所吸收的太赫兹脉冲可以忽略不计,用THz-TDS可以检测有塑料包装袋的葛粉中苯甲酸的含量,从而达到无损检测的效果。

根据GB2760-2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》,苯甲酸在食品中的质量分数不得超过 2×10^{-4} 。受实验仪器的功率限制,目前暂时无法将样品质量分数降到国家标准之下,但是随着太赫兹源功率提升,我们相信,将葛粉中苯甲酸的质量分数的定量检测限降低到国家标准之下是可以实现的。该实验的方法更加快速并准确地探索了利用THz-TDS检测有塑料包装袋的葛粉中苯甲酸含量的可行性,并取得了很好的效果。

参 考 文 献

- [1] Fitch M J, Osiander R. Terahertz waves for communications and sensing[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2004, 25(4): 348-355.
- [2] Wang S H, Xu J Z, Wang L, *et al.* Application and prospect of THz technology[J]. Physics, 2001, 30(10): 612-615.
王少宏, 许景周, 汪力, 等. THz技术的应用及展望[J]. 物理, 2001, 30(10): 612-615.
- [3] Liu S G. Recent development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006, 8(1): 7-12.
刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.
- [4] Zhang W T, Wang S Y, Zhan P P, *et al.* Method of identifying red wood based on terahertz time-domain

- spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0230006.
- 张文涛, 王思远, 占平平, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的红木检测方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0230006.
- [5] Li J R, Li J S, Zhao X L. Terahertz time domain spectrometry for rapid qualitative detection of melamine in milk powder[J]. *Journal of China Jiliang University*, 2009, 20(2): 131-134.
- 李建蕊, 李九生, 赵晓丽. 太赫兹时域谱技术快速定性检测奶粉中的三聚氰胺[J]. *中国计量学院学报*, 2009, 20(2): 131-134.
- [6] Lu C Y, Chen G X, Piao X Y, *et al.* Comparison of physicochemical properties of Pueraria starch from different sources[J]. *Food Science*, 2009, 30(21): 50-52.
- 卢成瑛, 陈功锡, 卜晓英, 等. 不同来源葛根淀粉的理化性质比较[J]. *食品科学*, 2009, 30(21): 50-52.
- [7] Liao H B, He Z F, Wang G C, *et al.* Pueraria's research progress and prospects[J]. *Food Industry Technology*, 2003, 24(2): 81-83.
- 廖洪波, 贺稚非, 王光慈, 等. 葛根的研究进展及展望[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(2): 81-83.
- [8] Guo Z, Fu H, Li X Q, *et al.* International comparison of benzoic acid content in orange juice by APMP. QM-P23 [J]. *Chromatography*, 2013, 31(12): 1194-1200.
- 国振, 符惠, 李秀琴, 等. 橙汁中苯甲酸含量测定的国际比对 APMP. QM-P23[J]. *色谱*, 2013, 31(12): 1194-1200.
- [9] Li J, Liu S J, Huang X L. Research progress on safety and detection methods of benzoic acid and sodium benzoate[J]. *Food & Oil*, 2012, 25(9): 49-51.
- 李菊, 刘淑君, 黄雪琳. 苯甲酸和苯甲酸钠安全性与检测方法研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2012, 25(9): 49-51.
- [10] Bi S Y, Zhu H, Xie B H. Research progress on detection methods of benzoic acid in food safety[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(15): 100-103, 107.
- 毕思远, 朱海, 谢本华. 食品安全中苯甲酸检测方法的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(15): 100-103, 107.
- [11] Strickland A D, Batt C A. Detection of carbendazim by surface-enhanced Raman scattering using cyclodextrin inclusion complexes on gold nanorods [J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(8): 2895-2903.
- [12] Zhang F, Liu L P, Song M J, *et al.* Quantitative analysis of plasticizer based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 033002.
- 张放, 刘丽萍, 宋茂江, 等. 基于太赫兹时域光谱的塑化剂定量分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 033002.
- [13] Liao X L, Liu Y L, Liu X H, *et al.* Experimental analysis of fiber material property based on terahertz wave[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 100607.
- 廖晓玲, 刘延雷, 刘晓华, 等. 基于太赫兹波的纤维材料特性实验分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 100607.
- [14] Liu W T, Li J W, Sun Z H. Terahertz time domain spectroscopy and laser radar spectral detection error analysis and experimental verification [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(3): 577-581.
- 刘文涛, 李景文, 孙志慧. 太赫兹时域光谱技术及激光雷达光谱探测误差分析与实验验证[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(3): 577-581.
- [15] Jia W L. Experimental and theoretical analysis of THz generated by GaAs photoconductive switches [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- 贾婉丽. GaAs 光电导开关产生太赫兹电磁波的实验及理论分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [16] Zhang M, Cai H, Shen J L. Terahertz spectra of food additive tetrabutyl hydroquinone and its detection analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(7): 1809-1813.
- 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.
- [17] Yan Y L. Fundamentals and applications of near infrared spectroscopy [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2005: 8-39.
- 严衍禄. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 8-39.
- [18] Chu X L. Chemometrics and molecular spectroscopy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 41-53.
- 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 41-53.
- [19] Xu L, Shao X G. Methods of Chemometrics [M]. 2nd ed. Science Press, 2004.
- 许禄, 邵学广. 化学计量学方法[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2004.

- [20] Chen T. Qualitative and quantitative detection of materials based on terahertz time-domain spectroscopy[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
陈涛. 基于太赫兹时域光谱的物质定性鉴别和定量分析方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [21] Ouyang A G, Zhang Y, Cheng M J, *et al.* Determination of the content of ethanol in ethanol gasoline using mid-infrared spectroscopy[J]. Chinese Optics, 2017, 10(6): 752-759.
欧阳爱国, 张宇, 程梦杰, 等. 中红外光谱技术对乙醇汽油乙醇含量的检测 [J]. 中国光学, 2017, 10(6): 752-759.