

太赫兹技术融合人工智能在中药质量控制中的应用和展望

蒲俊伶, 陶 益*

(浙江工业大学 药学院 智能制造组, 浙江 杭州 310014)

摘要: 中药是中华民族瑰宝, 中药的质量控制对于确保中药安全性和有效性至关重要。传统的中药质量控制方法费时费力, 需要对样品进行复杂的前处理。太赫兹技术是一种新兴的无损检测技术, 具有高分辨率、非接触、非破坏等优点, 与人工智能算法结合, 能够实现对中药生产全过程的质量控制。该文首先介绍了太赫兹技术的原理、太赫兹光谱预处理方法、特征数据提取方法、人工智能算法建模以及模型的评估与优化; 并在此基础上, 对近年来太赫兹技术在中药鉴别、含量测定和制药生产过程质量控制中的应用进行了综述。最后, 对太赫兹技术的发展趋势及其在中药智能制造中的应用进行了展望。

关键词: 太赫兹技术; 中药; 人工智能; 过程分析技术; 制药工业

中图分类号: O657.3; R284 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2023)08-1079-06

Application and Prospect of Terahertz Technology Combined with Artificial Intelligence in Quality Control of Traditional Chinese Medicine

PU Jun-ling, TAO Yi*

(Group of Intelligent Manufacturing, College of Pharmacy, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Traditional Chinese medicine (TCM) is a precious cultural heritage in China, and its quality control during the production process is crucial to ensure the safety and efficacy of TCM. Nevertheless, traditional detection methods are time-consuming and may cause damage to samples. Terahertz technology is an emerging non-destructive detection method with high resolution, non-contact, and non-destructive advantages. Combined with artificial intelligence algorithms, this method could be used to achieve the quality analysis on the entire process of TCM production. The principles of terahertz technology, terahertz spectral preprocessing methods, feature data extraction methods and artificial intelligence algorithm modeling, as well as evaluation and optimization of the model are firstly introduced in this article. Based on this, the applications of terahertz technology in TCM identification, content determination, and pharmaceutical process control in recent years are summarized. Finally, the development trend of terahertz technology and its application in intelligent manufacturing of TCM are expected.

Key words: terahertz technology; traditional Chinese medicine; artificial intelligence; process analytical technology; pharmaceutical industry

太赫兹(Terahertz, THz)是宽带电磁辐射的统称, 频率范围为0.1~10 THz(1 THz = 10^{12} Hz), 波长范围为0.03~3 mm, 介于微波终点与红外起点之间, 能量处于电子和光子之间, 其光谱(包括透射谱和反射谱)包含丰富的物理和化学信息。近年来, 随着太赫兹技术的快速发展及其在生物医学中日益广泛的应用, 其在中医药研究领域也崭露头角^[1]。本文首先阐述了太赫兹技术的原理, 并介绍了太赫兹融合人工智能的算法; 随后, 总结了太赫兹技术在中药质量控制方面的实际应用; 最后, 对太赫兹技术未来的发展趋势进行了展望, 探讨了其在中药智能制造中的潜在应用。

收稿日期: 2023-05-09; 修回日期: 2023-05-28

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y21H280036)

* 通讯作者: 陶 益, 博士, 副教授, 研究方向: 制药工业感知智能技术, E-mail: taoyi1985@zjut.edu.cn

1 太赫兹技术的原理

太赫兹光谱技术和太赫兹成像技术是太赫兹技术在实际应用中的重要方法和手段。太赫兹光谱分为太赫兹时域光谱(THz-TDS)、时间分辨太赫兹光谱(TRTS)和太赫兹发射光谱(TES), 本文重点介绍应用最多的 THz-TDS^[2]。一个典型的 THz-TDS 系统由飞秒激光发生器、延时控制器、太赫兹发射器和太赫兹探测器组成^[3]。飞秒激光发生器发出飞秒激光脉冲, 被分光器分成抽运光和探测光两路光, 其中抽运光通过延时控制器激发太赫兹发射器产生 THz 脉冲, THz 脉冲与探测模块中的样品相互作用(投射、反射)之后, 携带样品信息的 THz 脉冲和探测光共线通过太赫兹探测器。通过控制延时控制器改变探测光与抽运光之间的光程差, 使探测光对不同时刻 THz 脉冲的电场强度进行采样测量, 即可获得 THz 脉冲电场强度的时域波形^[4]。分别测量通过试样前后的 THz 脉冲时域波形, 经傅里叶变换后即得到 THz 脉冲频谱, 进一步分析处理后可获得包含样品厚度信息的透射率, 最后经运算得到折射率(色散曲线)、吸收系数(吸收曲线)、消光系数、介电常数等一系列光学参数^[5]。

太赫兹成像技术(TIT)是基于 THz-TDS 技术实现的, TIT 系统由飞秒激光发生器、延时控制器、太赫兹发射器、聚焦元件、收集元件、太赫兹探测器和图像处理元件组成, 示意图如图 1 所示。THz 脉冲被聚焦元件聚焦到样品的某一点上, 收集元件则将携带样品信息的 THz 脉冲强度和相位二维信息收集后, 聚焦到太赫兹探测器上, 太赫兹探测器将含有位置信息的 THz 信号转化为相应的电信号, 随后图像处理元件将此信号转换为图像。

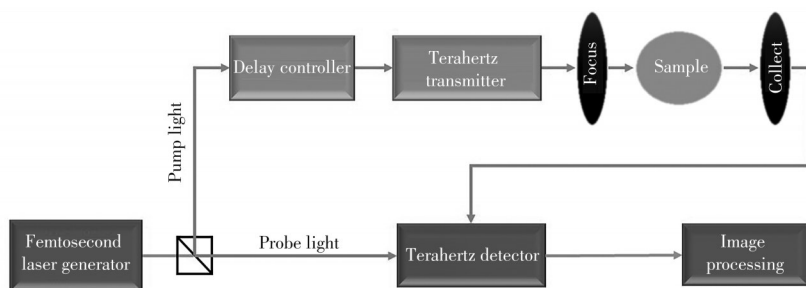


图 1 TIT 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TIT system

2 太赫兹技术融合人工智能算法

太赫兹谱图和数据中包含许多干扰信号, 如仪器噪声、背景噪声以及由温度变化和样品摆放位置不同引入的无关信号等。通常融合人工智能算法对实验数据进行深度分析, 通过预处理、特征数据提取、数据建模、评估与优化模型 4 个步骤, 全面分析样品信息。

2.1 太赫兹光谱预处理方法

得到 THz 脉冲时域波形后, 在进行傅里叶变换前需先进行切趾和零填充处理, 以提高数据的准确性和重复性。切趾可降低噪声、排除信号伪影, 改善傅里叶变换后频谱的质量; 零填充则可增加光谱数据点, 平滑光谱特征^[5]。太赫兹光谱需要进行预处理, 消除随机噪声、基线漂移、样品密度不均匀、光散射等干扰, 常用的预处理方法有(1)平滑处理, 包括 Savitzky-Golay 卷积平滑法(S-G 平滑)、均值偏移平滑方法、均值中心滤波法和小波去噪法; (2)数据校准, 包括多元散射校正(MSC)、标准正态变量校正(SNVC)、导数处理和峰谷点平坦化。

2.2 特征数据提取

当样品的太赫兹谱图缺乏特征吸收峰或光谱特征几乎无法区分时, 需要对太赫兹光谱数据进行特征提取, 提高数据的质量和准确性, 以保证后续模型构建的有效性和可靠性。主要方法有: (1)数据降维, 包括主成分分析(PCA)^[2]、多维定标(MDS)和线性判别分析(LDA); (2)自编码器, 用于非线性特征; (3)独立成分分析(ICA)。

2.3 建模方法

人工智能算法作为一种流行的建模技术, 可以对太赫兹光谱的特征数据进行建模和分类, 主要包

括:(1)支持向量机(SVM)算法,是目前用于太赫兹鉴定最为广泛的分类器;(2)随机森林(RF)算法,可以通过一系列决策树估计最后的结果,避免过拟合;(3)深度学习算法,代表方法有误差反传神经网络(BPNN)、卷积神经网络(CNN)和深度神经网络(DNN)等^[6],能自动提取,因此适用于大样本、非线性的数据运算。

SVM和RF是传统的机器学习算法,均属于监督学习算法。SVM通过构建最优超平面使所有数据点均可被正确分类,并使超平面到最近数据点之间的距离最大化,可以使用不同的核函数处理非线性分类问题,并可通过调整正则化参数控制模型的复杂度。RF通过采用随机特征选择和自助采样技术构建多个决策树,以投票或平均方式得到最终分类或回归结果,能提高模型的泛化能力和鲁棒性。深度学习算法则是近年来发展起来的一种新型机器学习算法,通过数据构建模型并进行预测或分类,适用于监督学习、无监督学习和强化学习等多种场景。

2.4 模型的评估与优化

模型构建后,需要对其进行评估和优化,方法主要包括混淆矩阵和K交叉验证^[7]。混淆矩阵是一种误差矩阵,可以观察每个类别的预测准确率与混淆的错误类别;除准确率外,还可将精准率和召回率作为其指标,以更为准确地衡量分类器的准确度。K交叉验证法作为聚类分析的算法之一,适用于检验模型的泛化能力。

3 中药质量控制

中药是新药研究和发现的资源宝库,包括中药材、中药饮片和中药制剂。但是由于成分复杂和环境影响、质量标准不健全以及与市场相关的掺假行为等因素,导致其整体质量难以保证。现代中药质量评价技术主要包括色谱、光谱、质谱以及DNA条形码等分子生物技术,但是步骤繁琐、耗时耗力,且检测时样品会遭到破坏。相较于红外、拉曼、高光谱等其他光谱技术,太赫兹辐射穿透性强且能量衰减小,可以进行带包装或外壳的直接检测;此外太赫兹光谱辐射的光子能量低,不会伤害中药,可以进行无损检测;同时中药化学成分在太赫兹波段的低频振动和转动模式,使得不同中药具有不同的太赫兹指纹图谱^[4],为中药研究提供了新的光谱特征。这些独特优势使太赫兹技术成为中药质量评价的首选方法。

3.1 中药鉴别

中药的疗效取决于药材质量,而市场掺假行为是导致中药质量参差不齐的主要原因。中药掺假可能发生在生产的多个方面,包括将假冒、异物或非药用成分掺入道地药材、中药饮片或中药提取物中等,不仅影响制药行业的声誉,还可能导致相关的科学研究、生产、制药和临床研究失败,严重危害患者安全和治疗效果。面对各种各样的掺假行为,先进的太赫兹技术为中药的质量保证提供了新的可能性。

3.1.1 鉴别不同种类的中药 众所周知,不同种类的中药具有不同治疗效果,正确的药物种类是保证临床疗效的首要条件。张蕾^[8]利用THz-TDS发现当归、茯苓、枳实和板蓝根药材相应的太赫兹吸收系数曲线和折射率曲线(色散曲线)具有明显差异,表明利用太赫兹光谱鉴定不同种类的中药材具有一定可行性。三七的太赫兹吸收曲线有3个特征吸收峰,分别位于1.29、1.40、1.51 THz,而甘草在1.56 THz有一个特征吸收峰值,可基于此鉴别三七和甘草^[9]。

中药化学成分复杂,大部分中药的太赫兹光谱图并没有明显的特征吸收峰,需要结合其他学科方法进行鉴定。黄郁金、绿郁金、桂郁金和温郁金的THz-TDS吸收曲线在0.2~1.6 THz没有强的特征吸收峰,但结合SVM可以对这4种相似中药进行准确判别^[10]。陈艳江等^[11]通过测量得到南柴胡和北柴胡、山豆根和北豆根两组易混淆中药饮片的太赫兹时域光谱,进行归一化预处理后,将检测数据分别输入SVM和BP神经网络进行识别和鉴定,发现SVM的鉴别正确率均达到100%,明显高于BP神经网络,且运行时间更短。杜仲、连翘、黄连、天麻、五倍子的太赫兹投射吸收光谱相似度极高,赵峰等^[12]提出了一种鉴别中药的新方法,即将每种药材看作二阶阻尼振子系统,以二阶阻尼振子的阻尼系数 α 、固有振动频率 β 、放大系数 γ 3个参数作为指纹数据对不同种类的中药进行区分。此外,还可将原始太赫兹吸收系数数据与其一阶导数相结合,再用K-均值、K-中心点和模糊C均值(FCM)3种无监督聚类算法对不同种类的中药进行判别^[13],其判别准确度均在93%以上,并具有良好的抗误差能力。鸡血藤和大血藤的太赫兹吸

收光谱均无明显吸收峰,通过结合二阶导数预处理放大二者吸收光谱的微小差异,并在0.2~1.3 THz范围结合光谱角算法进行识别分类,准确率达95%^[14]。低波数拉曼光谱(0~300 cm⁻¹)可以区分晶格结构明显不同的珊瑚骨架、芒硝、石膏和明矾,但无法区分晶格结构相似的蛇纹石和炉甘石,且无法鉴别不同加工方法制备的矿物中药。而基于太赫兹吸收光谱的方法则能区分蛇纹石和炉甘石,以及鉴别不同加工方法的蛇纹石和芒硝^[15]。

3.1.2 鉴别中药的产地或品质 由于不同地区的种源、栽培技术、生态环境等不同,使得特定地域出产的药材相较于其他产地的同种药材的临床疗效更好^[16]。太赫兹技术可以为中药的产地区分提供参考。如浙贝母在1.611 THz出现特有吸收峰^[17],可以作为区分川贝母和浙贝母的依据。采用THz-TDS分别测量牛膝和川牛膝3次,得到6列吸收系数值,将吸收系数作为特征数据,采用SPSS软件进行分层聚类,以组间平均距离为聚类方法,以欧式平方距离为度量标准,可使中药样本得到很好的区分和聚集^[18],表明分层聚类方法能对未知中药样品进行准确鉴定。基于THz-TDS吸收光谱,结合SVM和粒子群优化(PSO),可以有效识别黄芩的不同产地,其识别率达95.56%^[19]。相比于S-G平滑、一阶求导、二阶求导和MSC预处理,采用SNVC预处理,结合S_Kohonen神经网络模型对不同产地天麻的识别准确率最高,达到94%^[20]。

在鉴别同种中药的品质方面,1.62~1.66 THz频率范围内吸收系数的平均斜率可以用来粗略衡量中药压片含水量大小^[21],避免中药压片因厚度不一导致的吸收系数不准确。THz-TDS结合化学计量学可作为鉴别大黄真伪的新型无损检测方法。文献显示^[22],在众多THz-TDS结合的机器学习算法中,PCA-LDA以及应用线性核函数建立的SVM模型是唯一鉴别大黄真伪的正确率达到100%的模型。采用无监督和低维可视化的自编码提取光谱特征并结合LargeVis算法,可以在降维散点图中区分不同采收期的川芎,分类正确率接近100%^[23]。改进搜索步长和发现概率后的布谷鸟算法(SPCS)融合SVM算法模型对不同年份人参的分类准确率高达98.89%^[24]。阿胶是一种由驴皮制成的名贵中药材,牛皮或猪皮制成的明胶常被用作其低成本替代品,采用THz-TDS获得消光系数,经PCA提取特征数据后,以线性SVM识别阿胶及其明胶类似物的准确率达到95%,证明了THz-TDS快速鉴别明胶的可行性^[25]。

3.1.3 鉴别中药的天然品和人工品 天然牛黄和人工牛黄的THz吸收谱图经PCA处理后具有良好的区分度,章龙^[20]使用网格搜索法寻找出SVM算法的最佳参数(c, g)为(1, 2.83),以此参数建立的SVM模型和RF模型对天然牛黄、人工牛黄的识别准确率均为95%,但RF模型的训练时间更少。

3.1.4 鉴别不同炮制品 生大黄、酒大黄和熟大黄的太赫兹光谱无明显的吸收峰,而用训练好的BP神经网络对三者进行识别和鉴定,识别率均高达100%^[26],表明太赫兹时域光谱结合BP神经网络可以对不同的中药炮制品进行鉴别。采用投射式THz-TDS对生大黄、酒大黄、熟大黄和大黄炭进行光谱采集,得到不同炮制方法的大黄的吸收系数谱图,预处理后进行PCA分析和欧氏距离分析,通过绘图可发现4种大黄的差异性^[27],为基于物质基础成分含量变化规律的中药炮制品的鉴定提供了一种新方法。陈艳江等^[11]通过实验发现SVM的识别效果在准确率、快速性及抗噪能力等方面均明显优于BP神经网络,能更准确、快速地鉴别生甘草和炙甘草。研究发现,附子不同炮制品的THz-TDS折射率有明显差异,盐附子、黑顺片、白附片和黄附片的折射率分别为1.98、1.86、1.77、1.71^[11],可以此鉴别附子炮制品。

3.1.5 鉴别中药成分及其衍生物 太赫兹光谱测量方法对分子的化学结构敏感,可以根据特征吸收峰鉴别青蒿素及其3种衍生物^[8],包括双氢青蒿素、蒿甲醚和青蒿琥酯^[28],有利于研究与抗疟活性相关的分子结构,为活性更高的衍生物的进一步研究提供了理论基础。

3.2 含量测定

水分检测的一般方法耗时长、效率低,但水对太赫兹敏感且具有强吸收,为使用太赫兹技术进行水分测定提供了基础。马品等^[29]利用THz-TDS得到不同已知含水量的中药的吸收系数谱图,通过提取不同含水量中药在0.5、1.0 THz相应的吸收峰强度,作含水量-吸收系数曲线。结果显示含水量与吸收系数呈线性正相关关系,根据线性拟合数据,测量得到吸收系数后可反向推测出对应的含水量,该方法大大缩短了检测时间,提高了工作效率。

金胺O是一种常被添加到蒲黄中的有害工业染料,在建立金胺O吸光度和浓度相关性的多元回归

分析方法中,相比于偏最小二乘法(PLS)和堆积偏最小二乘法(SPLS),基于可变贡献排序的堆积偏最小二乘法(VIP-SPLS)表现出优异的性能^[30],可以实现对中药有害添加剂的定量分析。Yin等^[31]对THz-TDS数据进行归一化预处理后,将木黄酮、柚皮素和大豆黄酮三元混合物的数据输入神经网络中进行定量分析,预测结果的相关系数(r^2)均达到0.99,均方根误差(RMSE)均低于2%。盘书宝^[24]创造性地采取蒙特卡洛校验无信息变量消除(MCUVE)融合支持向量回归(SVR)的组合方法,解决了含量测定非线性、信息提取与无效信息消除难以平衡的问题。

利用深度学习算法CNN驱动的智能拉曼光谱,可以实现物质的快速定量分析^[32]。但有学者通过将不同纯度艾草的吸收峰强度数据输入PLS回归预测模型,发现太赫兹技术的精度($r^2 > 0.99$)明显比拉曼技术($r^2 = 0.852$)更高,准确率达93.9%^[33]。高光谱成像技术亦可对样品进行快速、无损的定量分析^[34],使用哪种技术要结合具体分析需求和实际情况综合考虑。

3.3 中药生产过程质量控制

德国生产的金纳多银杏叶提取物被认为是银杏叶提取物的行业标准,通过比较其与5种国内不同厂家生产的银杏叶提取物的太赫兹吸收谱和色散曲线^[8],可以鉴别不同银杏叶提取物的质量,辨识不同提取工艺的优劣。太赫兹反射光谱可用于厚度至少 ≤ 5.0 mm片剂中的药物定量(含量均匀性测试等),其中下冲头的表面可以代替实验中的铝板,发挥镜子的作用^[35],因此可以用作压片过程的在线监测工具,相比传统的终制剂测试可获得更高的质量保证。高光谱成像技术已经被开发用于流化床制粒过程中制粒水分含量和颗粒尺寸的监测^[36]。相比而言,太赫兹技术在中药制药过程中的系统监测方法有待深入研究。

4 结 语

太赫兹技术凭借高穿透性、低能量和指纹图谱等独特优势,已经逐渐发展成一种新的中药质量评价方法。但是太赫兹波容易被空气、水汽等物质吸收和散射,需要在低温、氮气或真空中工作以避免波衰减。另外,其设备复杂、成本较高,需要专业的技术人员操作维护。因此,现在的太赫兹系统基本只能在实验室运作,如何实现太赫兹仪器“走出实验室”,便携式太赫兹脉冲光谱设备的研发是其中一个重要趋势。由于太赫兹传输距离较短,可以考虑将太赫兹仪器设计为可折叠式或可拆卸式,方便在不同场合使用。还可采用集成化和模块化设计降低设备的制造成本。此外,由于太赫兹波在发射器、探测器和样品中的多次反射,导致光谱测量的分辨率降低,因此与太赫兹兼容性更好的人工智能算法模型亟待开发。目前只对部分中药进行了太赫兹研究,而建立中药太赫兹指纹图谱数据库,将是未来太赫兹技术在中药质量控制中的研究热点。随着科学的进步和光谱学技术的深入研究,太赫兹技术将会在中药领域具有更加广阔的发展前景,为保证中药质量提供广泛的技术支持。

参考文献:

- [1] Bai S S, Yang H Y. *Chin. J. Integr. Med.*, **2022**, 28(4): 366–373.
- [2] Han C Y, Qu F F, Wang X H, Zhai X D, Li J M, Yu K Q, Zhao Y R. *Crit. Rev. Anal. Chem.*, **2023**, 1: 1–15.
- [3] Tu M J, Meng J P, Tang Y, Zhang J, Xu D. *Chin. Tradit. Herb. Drugs*(涂铭旌, 孟江平, 唐英, 张进, 徐迪. 中草药), **2014**, 45(22): 3213–3218.
- [4] Li F L, Ren R D, Wang X K, Zhou B Q. *Laser Infrared*(李福利, 任荣东, 王新柯, 周斌权. 激光与红外), **2006**, 36(1): 785–791.
- [5] Yang H Z, Yang T, Sun W Y, Guo P, Sun G X, Li Q, Li X H. *Cent. South Pharm.*(杨惠智, 杨婷, 孙万阳, 郭萍, 孙国祥, 李茜, 李晓辉. 中南药学), **2022**, 20(7): 1478–1486.
- [6] Tao Y, Chen L, Zhu F, Pan M L. *Mod. Chin. Med.*(陶益, 陈林, 朱菲, 潘美玲. 中国现代中药), **2022**, 24(1): 176–180.
- [7] Rao J Q, Zhao Q D, Qiu F. *China J. Chin. Mater. Med.*(饶近秋, 赵启铎, 邱峰. 中国中药杂志), **2020**, 45(4): 825–828.
- [8] Zhang L. *Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Traditional Chinese Medicine*. Beijing: Capital Normal University(张蕾. 中草药太赫兹(THz)谱. 北京: 首都师范大学), **2004**.
- [9] Zhao X L, Li J S. *J. Phys. Conf. Ser.*, **2011**, 276(1): 1–4.
- [10] Li H, Du X Q, Xie L, Chen L, Peng Y, Zhu Y M, Wu T, Li H, Dong P, Wang J T. *Optik-Int. J. Light Electron. Opt.*, **2012**, 123(13): 1129–1132.

- [11] Chen Y J, Liu Y Y, Zhao G Z, Wang W N, Li F L. *Spectrosc. Spectral Anal.* (陈艳江, 刘艳艳, 赵国忠, 王卫宁, 李福利. 光谱学与光谱分析), **2009**, 29(9): 2346 – 2350.
- [12] Zhao F, Long S M, Zhang Y Y, Wang X K, Ye J S, Zhang Y. *Acta Phys. Sin.* (赵峰, 龙姝明, 张圆圆, 王新柯, 叶佳声, 张岩. 物理学报), **2015**, 64(2): 123 – 129.
- [13] Li P F, He M X, Xu Z, Lai H B, Liu Y. *J. Meas. Sci. Instrum.*, **2017**, 8(4): 371 – 377.
- [14] Xu Z, He M X, Li P F, Wang P F. *Spectrosc. Spectral Anal.* (徐哲, 何明霞, 李鹏飞, 王鹏骥. 光谱学与光谱分析), **2017**, 37(1): 42 – 47.
- [15] Ge M L, Wang Y Y, Li H B, Wang Y, Hu C H, Zhu J F, Xu D G, Wu B, Yao J Q. *Photonics*, **2022**, 9(5): 313 – 325.
- [16] Liu J, Xiong L, Zhou Q M, Peng C, Guo L. *Acta Chin. Med. Pharmacol.* (刘杰, 熊亮, 周勤梅, 彭成, 郭力. 中医药学报), **2021**, 49(8): 110 – 115.
- [17] Guo S. *Research of Traditional Chinese Medicine Terahertz Spectroscopy and Data Management System*. Tianjin: Tianjin University(郭帅. 若干中药太赫兹光谱研究及其数据管理系统. 天津: 天津大学), **2012**.
- [18] He M X, Guo S, Qin R, Liu J Z. *Chin. J. Spectrosc. Lab.* (何明霞, 郭帅, 秦蕊, 刘嘉政. 光谱实验室), **2013**, 30(3): 1044 – 1048.
- [19] Liang J, Guo Q J, Chang T Y, Li K, Cui H L. *Optik*, **2018**, 2018(174): 7 – 14.
- [20] Zhang L. *Identification of Traditional Chinese Medicine Based on Terahertz Spectroscopy and Chemometrics*. Nanjing: Nanjing Forestry University(章龙. 基于太赫兹光谱技术与化学计量学方法的中药识别研究. 南京: 南京林业大学), **2020**.
- [21] Liu J Z. *Designed the FPcA – II THz – TDS through Instrumented Impact and Application*. Tianjin: Tianjin University(刘嘉政. FPcA – II型太赫兹时域光谱仪设计及应用. 天津: 天津大学), **2014**.
- [22] Wang J R. *Application Research of the Combination of Chemical Stoichiometry and Terahertz Time – Domain Spectroscopy in Identifying the Authenticity of Rhubarb*. Beijing: Capital Normal University(汪景荣. 化学计量学结合太赫兹时域光谱技术在大黄真伪鉴别中的应用研究. 北京: 首都师范大学), **2014**.
- [23] Zheng X X. *Study on Terahertz Spectral Techniques Applied to Study of Three Geo-authentic Traditional Chinese Medicine in Sichuan*. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine(郑潇潇. 太赫兹时域光谱技术在3种川产道地药材鉴别中的应用. 成都: 成都中医药大学), **2018**.
- [24] Pan S B. *Research Method for Rapid Identification and Content Detection of Chinese Herbs Based on Terahertz Spectroscopy*. Guilin: Guilin University of Electronic Technology(盘书宝. 基于太赫兹光谱的中草药快速识别及含量检测方法研究. 桂林: 桂林电子科技大学), **2022**.
- [25] Li Y Z, Zhang X S, Liu L Y, Li K, Xu W Q, Wang Z M, Chang T Y, Wu Y, Yang H. *Eur. Food Res. Technol.*, **2021**, 247(12): 2927 – 2933.
- [26] Zhang P. *Terahertz Spectral Identification of Chinese Herbal Medicine*. Beijing: Capital Normal University(张平. 中草药的太赫兹光谱鉴别. 北京: 首都师范大学), **2008**.
- [27] Yang S, Zuo J, Liu S J, Zhang C L. *Spectrosc. Spectral Anal.* (杨帅, 左剑, 刘尚建, 张存林. 光谱学与光谱分析), **2016**, 36(12): 3870 – 3874.
- [28] Zhou B Q, Wu F P. *Int. Symp. Instrum. Control Technol.*, **2008**, 7127(1B): 0277 – 0283.
- [29] Ma P, Yang Y P. *J. Terahertz Sci. Electron. Inf. Technol.* (马品, 杨玉平. 太赫兹科学与电子信息学报), **2017**, 15(1): 26 – 28.
- [30] Huo Z, Zhi L. *Optik*, **2018**, 2018(156): 834 – 840.
- [31] Yin M, Wang J, Huang H, Huang Q, Fu Z, Lu Y. *ACS Omega*, **2020**, 5(29): 18134 – 18141.
- [32] Tao Y, Bao J Q, Liu Q, Liu L, Zhu J Q. *Molecules*, **2022**, 27(20): 6969 – 6982.
- [33] Shao Y N, Zhu D, Wang Y T, Zhu Z, Tang W C, Tian Z G, Peng Y, Zhu Y M. *Plant Phenomics*, **2022**, 2022: 9815143 – 9815155.
- [34] Jiang E C, Chen L, Yan J Z, Tao Y. *China J. Chin. Mater. Med.* (江恩赐, 陈林, 颜继忠, 陶益. 中国中药杂志), **2022**, 47(7): 1864 – 1870.
- [35] Jin H, Tomoyuki W, Tatsuya S, Naoki W, Katsuhide T. *Chem. Pharm. Bull.*, **2012**, 60(12): 1487 – 1493.
- [36] Tao Y, Bao J Q, Liu Q, Liu L, Zhu J Q. *Spectrochim. Acta A*, **2023**, 287(2): 122083 – 122093.

(责任编辑: 盛文彦)