

基于特征融合的减肥药太赫兹时域光谱模式识别

接昭玮¹, 王之宇¹, 王继芬^{1*}, 孙一健¹, 张震¹, 李文凭², 孔艺青³¹中国人民公安大学侦查学院, 北京 100038;²青岛青源峰达太赫兹科技有限公司, 山东 青岛 266100;³国家体育总局反兴奋剂中心, 北京 100029

摘要 为打击不法分子利用寄递渠道运输掺杂有毒有害等非食品原料的减肥药的现象, 提出一种基于太赫兹时域光谱技术的减肥药模式识别方法。与传统方法相比, 太赫兹光谱的时域频谱信噪比高, 具有快速、省时和无损等特点。选用 7 种减肥药作为实验样品, 采集样品的太赫兹时域光谱, 用自动寻峰器找到 0~0.19 THz、1.75~2.14 THz、2.23~2.5 THz 三个特征频率区间; 采用希尔伯特变换、巴特沃思低通滤波器、快速傅里叶变换低通滤波器、标准正态变换后的一阶导数处理特征频率区间, 并对处理结果与原始光谱进行特征数据融合; 采用粒子群优化最小二乘支持向量机和随机森林模型对原始数据和四种方法融合的数据进行分类识别。实验结果表明, 粒子群优化最小二乘支持向量机模型对经过希尔伯特变换的光谱特征融合数据具有最佳的识别效果, 准确率可达到 100%, 对法庭科学中减肥药的鉴别有一定借鉴意义。

关键词 太赫兹时域光谱技术; 减肥药; 特征数据融合; 粒子群优化最小二乘支持向量机; 随机森林

中图分类号 O657.37

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220773

Terahertz Time-Domain Spectral Pattern Recognition for Weight Loss Drugs Based on Feature Fusion

Jie Zhaowei¹, Wang Zhiyu¹, Wang Jifen^{1*}, Sun Yijian¹, Zhang Zhen¹, Li Wenping², Kong Yiqing³¹School of Investigation, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;²Qingdao Qingyuanfengda Terahertz Technology Co., Ltd., Qingdao 266100, Shandong, China;³Anti-Doping Center of the State Administration of Sports, Beijing 100029, China

Abstract To prevent criminals from using various delivery channels to transport weight loss drugs doped with toxic and harmful non-food raw materials, a pattern recognition method for weight loss drugs based on terahertz time-domain spectroscopy is proposed in this study. Compared with traditional methods, terahertz spectrum has a high signal-to-noise ratio in time-domain, which is fast, time-saving, and lossless. In this study, seven weight loss drug types were selected as experimental samples. The terahertz time-domain spectra of the samples were collected; accordingly, three characteristic frequency intervals of 0~0.19 THz, 1.75~2.14 THz, and 2.23~2.5 THz were detected by the automatic peak finder. The characteristic frequency intervals were processed using the Hilbert transform, Butterworth low-pass filter, fast Fourier transform low-pass filter, and first derivative after standard normal transform. Subsequently, the obtained feature data was fused with the original spectrum. The original data and the data fused by the four methods were classified and recognized using particle swarm optimization least squares support vector machine and random forest models. The experimental results demonstrate that the particle swarm optimization least squares support vector machine model has the best recognition effect on the spectral feature fusion data after Hilbert transform, whose accuracy can reach 100%. This approach can be used as a reference for the identification of weight loss drugs in forensic science.

Key words terahertz time-domain spectroscopy; diet pill; feature data fusion; particle swarm optimization least squares support vector machine; random forest

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-03-25; 录用日期: 2022-04-19; 网络首发日期: 2022-04-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2021JKF208)

通信作者: *wangjifen58@126.com

1 引言

近年来,利用快递渠道实施违禁品犯罪的案件高发。据统计,2017年至2020年,全国各级检察机关起诉寄递违禁品犯罪案件共计11890件20170人^[1]。此类犯罪行为使用他人身份证件收取快递,编造虚假的寄递物品名称,犯罪方式隐蔽,严重危害社会安全^[2]。快递中的违禁品不仅仅包含违禁药物,还可能有易燃易爆品,利用传统的拉曼光谱技术对快递内的违禁品进行检测时,拉曼光谱光源具有能量集中且功率密度高等特点^[3-5],可能会导致快递内的易爆品爆炸,造成严重的社会危害。

太赫兹(THz)波通常指频率为0.1~10 THz的电磁波,属于微光电子学与宏观电子学的交叉领域^[6]。太赫兹时域光谱具有独特的相干性、宽带、高瞬态透过率和低性能,在相关领域有着重要的研究价值与应用价值^[7-9]。针对寄递领域内的违禁品,太赫兹时域光谱具有良好的穿透性,可用于对不透明物体的透视成像。太赫兹技术通过测量目标物的太赫兹透射和反射光谱响应,有效地获取目标物在太赫兹波段的折射率和介电常数等色散特性信息。太赫兹电磁波具有较高的时空相干性和较低的光子能量。使用太赫兹脉冲,可以更好地分析样品中材料的微观变化,而不会损坏样品^[10]。由于大多数极性分子和生物大分子的振动和转动能级都处于太赫兹波段,这些分子的指纹特征光谱可以通过宽带太赫兹光谱检测到,进一步结合化学计量学计算和分析,可以确定分子结构和分析材料成分,从而实现快速无损检测^[11-12]。饶近秋等^[13]利用太赫兹时域光谱技术结合化学计量学的方法对郁金香的4种基原进行了分类鉴别,构建支持向量机、随机森林和极限学习机三种模型对不同基元的郁金香进行区分,对4种郁金香的鉴别率提高至93%,为易混淆的基元郁金香鉴别提供参考。殷贤华等^[14]利用太赫兹时域光谱技术结合化学计量学对硫化橡胶及助剂进行光谱分类识别,构建粒子群优化支持向量机模型,模型综合分类正确率达81.25%,与传统支持向量机模型相比,耗费时间整体小于9.40 s,该方法为硫化橡胶及其助剂的定性分析提供新思路。

机器学习是一类算法的总称,它从大量数据中挖掘隐藏规则,并将其用于分类或预测^[15]。针对大规模样本训练和多元分类问题,研究人员提出了机器学习中粒子群算法优化的最小二乘支持向量机(PSO-LSSVM)模型,改进了支持向量机中不等式约束问题,将其转换为等式约束,从而使模型的收敛速度和精度得到提高。成甜甜等^[16]利用PSO-LSSVM模型对多光谱仪器采集的掺假羊肉进行快速检测,得到的预测集决定系数为0.9204,为快速无损检测提供了参考。随机森林(RF)模型以精度高、训练速度快和抗过拟合能力强等特点被广泛应用于多分类问题。魏曼曼

等^[17]曾在拉曼光谱采集到的人类和非人类血液基础上建立随机森林模型进行种属鉴别,实验结果表明,该模型分类精度高,识别准确率达100%,为血液识别工作提供了参考。

鉴于此,本文提出太赫兹时域光谱结合机器学习的方法对减肥药进行分类识别处理。采用快速太赫兹时域光谱系统获得7种减肥药的太赫兹光谱数据,基于不同物质结构的太赫兹光谱特性,对特征区间分别采用希尔伯特变换、快速傅里叶变换低通滤波器、巴特沃思低通滤波器、标准正态变换后的一阶导数进行处理,并对处理结果与原始光谱数据进行特征融合,采用PSO-LSSVM和RF模型对特征融合前后的数据开展快速分类识别工作。该研究可为公安机关在搜集涉及寄递领域内的运输有毒有害减肥药产品案件方面提供侦查方向和完整的证据链。

2 实验部分

2.1 样本与设备

结合实际案例,从海关缉私部门收集7种涉及西地那非等违禁药品的减肥药,减肥药样本共计140份,如表1所示。经传统Nicolet is10型傅里叶变换红外光谱仪检测发现:序号为1~6的减肥药中含有西地那非成分,序号为7的样本中不含西地那非成分,但是在检测过程中发现传统的红外谱图相邻峰重叠较多,实验花费了大量时间去寻找合适的检测峰,这不利于相关行业在实际应用中对违禁药品进行快速检验。此外,由于传统红外光谱检测器的低灵敏度,仪器得到的红外谱图峰型较窄,最终结果可能导致比尔定律的偏离。在仪器构造方面,实验过程中发现传统红外光谱仪的吸收池厚度难以确定,参比池难以消除对吸收池、溶剂的影响,这使测量结果的精密度降低。太赫兹时域光谱技术可以保证材料的完整性,产生复杂精密的光学响应,从而避免传统光谱检测对宽带光谱的依赖;且不需对太赫兹时域光谱进行Kramers-Kronig变换,能够通过电光采样稳定捕获THz场的完整相位和幅度信息,具有较高的灵敏度和稳定性,有效弥补了传统Nicolet is10型傅里叶变换红外光谱仪的不足。

实验采用型号为QT-TS2000的快速太赫兹时域

表1 减肥药样本统计

Table 1 Statistics of weight loss drug samples

Serial No.	Brand	Number of samples
1	Co founder of Star Coffee	20
2	Real owner's representative	20
3	Star brand counter	20
4	Weiyun coffee shop	20
5	Star Coffee head office	20
6	My name is Xiao Ji	20
7	Zhao SiSi XiaoLe shop	20

光谱系统对 7 种减肥药样品进行扫描,仪器的性能参数如表 2 所示。

表 2 设备及参数的基本信息
Table 2 Basic information of equipment and parameters

Name	Content
Model	QT-TS2000
Spectral width	0.1-4 THz
Spectral resolution	8 GHz
Dynamic range	>70 dB
Working mode	Reflex/Transmission
Working power supply	24 V/DC
Equipment quality	13 kg

2.2 数据预处理方法

经过快速太赫兹时域光谱系统工作模式中的透射方法处理后,7种减肥药的原始光谱如图 1 所示。利用自动寻峰器寻峰,发现 7 种减肥药的特征峰集中在 0~0.19 THz、1.75~2.14 THz、2.23~2.5 THz 三个频率区间内,如图 2 所示。分析可知:7 种减肥药在 0.1 THz 附近均出现吸收峰,推测该吸收峰不能有效地反映减肥药中西地那非的结构信息;在 1.6, 1.8, 2.4 THz 处,含有西地那非的 6 种样品均出现了强吸收峰,而不含有西地那非成分的样品没有出现强吸收峰,故分析在 1.75~2.14 THz 和 2.23~2.5 THz 两个频率区间内出现的吸收峰,能够有效反映西地那非的结构信息。为更加准确地对减肥药进行光谱模式识别研究,对三个特征峰频率区间进行不同的信号学方法处理,然后结合原始光谱进行光谱数据的特征融合。

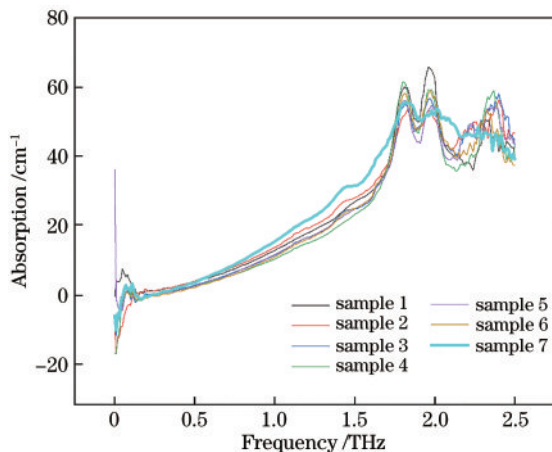


图 1 7 种减肥药的原始光谱

Fig. 1 Original spectra of seven weight loss drugs

为消除谱图噪声干扰和丰富谱图信息,采用希尔伯特变换滤波器对 7 种减肥药样品的特征频率区间进行处理,张魁星等^[18]采用希尔伯特变换对用近红外光谱方法采集的肝损伤小鼠的血液指标的光谱信号进行研究,实验发现,小鼠血液光谱信号经过希尔伯特变换处理后能够更加精确地显示小鼠健康情况,为未来血

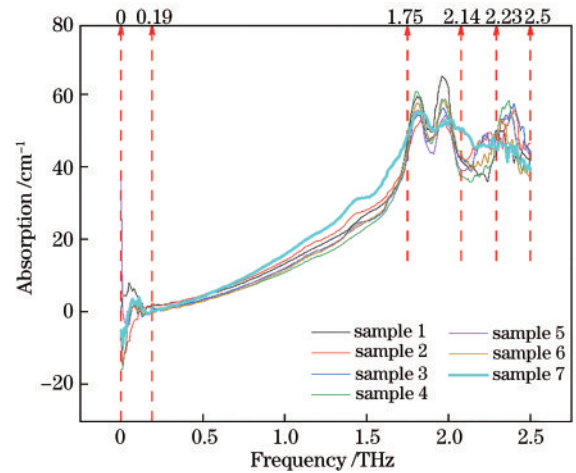


图 2 7 种减肥药的特征峰区间

Fig. 2 Characteristic peak interval of seven weight loss drugs

液无创检测提供了新的思路。为了确保通频带中的频率响应曲线尽可能平坦且没有波动,采用巴特沃思低通滤波器对 7 种减肥药样品的特征频率区间进行处理,李妍等^[19]利用巴特沃思低通滤波器对红外光谱信号进行处理,在 2100~2200 cm^{-1} 和 2500~2600 cm^{-1} 两个波长区间内仪器的信噪比是传统方法的 1.83 倍和 1.96 倍,此实验改善了仪器的性能指标。对于时间有限的信号,采用快速傅里叶变换(FFT)低通滤波器对 7 种减肥药样品的特征频率区间进行连续信号的频谱分析,陈天江等^[20]对水的普通拉曼散射光谱信号进行快速傅里叶变换低通滤波处理,以抑制干扰噪声,结果表明,噪声平滑后获得了高信噪比的拉曼光谱,取得较好的实验效果。由于收集的数据单位不一致,为了消除数据维度的影响,使数据指标具有可比性,对 7 种减肥药样品的特征频率区间采用标准正态变换(SNV)后的一阶导数进行处理,黄承伟等^[21]采用标准正态变换后的一阶导数法对煤炭近红外光谱数据进行处理,并结合最小二乘线性回归模型识别误差率,实验发现标准正态变换加一阶导数预处理后的模型传递的误差率维持在 4%,取得良好的检测效果。

3 实验建模

3.1 粒子群优化的最小二乘支持向量机模型

最小二乘支持向量机(LSSVM)是基于传统支持向量机的优化,利用结构风险最小化原则,将不等式的约束问题变成等式的约束条件,从而将问题转换成求解一组等式方程的问题^[22]。在权空间,LSSVM 可以描述为

$$\min J(\boldsymbol{\omega}, b, \boldsymbol{e}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega} + \frac{\beta}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2, \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}$ 为权向量; β 为正则化参数; \boldsymbol{e} 为误差向量; b 为偏置量。定义 LSSVM 的预测函数为

$$y(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^l a_i K(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{x}_i) + b, \quad (2)$$

式中: $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ 为 LSSVM 的核函数。核函数的选择是决定支持向量机性能的关键。常用的核函数有线性核函数、多项式核函数、径向基核函数(RBF)、Sigmoid 核函数等^[23]。为衡量样本之间的相似度并让同类样本更好地聚集在一起,使得线性不可分数据变得线性可分,采用径向基核函数作为 LSSVM 的核函数,函数表示为

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp\left\{-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{2\tau^2}\right\}, \tau > 0, \quad (3)$$

式中: τ 为核宽度。

在建立的 LSSVM 模型基础上,为更好发挥 LSSVM 的小样本学习和计算能力强等特点,由于粒子群优化(PSO)算法具有收敛速度快和全局收敛能力强的特点^[24],现用 PSO 算法对 LSSVM 的两个关键参数 β 和 τ 进行优化。利用粒子群优化最小二乘支持向量机定义的目标函数为

$$\text{fitness}(\gamma, \tau) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (4)$$

式中: y_i 和 \hat{y}_i 分别为实际值和预测值; l 为训练集样本个数。基于该目标函数,计算每次迭代 y_i 粒子的适应度值,最终找到最优适应度值,直至寻优结束,获得 LSSVM 的最优参数组合 (γ, τ) 。

3.2 随机森林模型

随机森林模型是集成学习模式中的一种,也是决策树分类器的集合,优点是具有较高的分类准确率,不易产生过拟合现象^[25]。王远等^[26]借助太赫兹时域光谱并建立随机森林分类模型对红木进行分类识别,该方法对木材太赫兹吸收系数谱的总体分类准确率达 94%,具有较好的分类性能。随机森林的建模过程如图 3 所示。

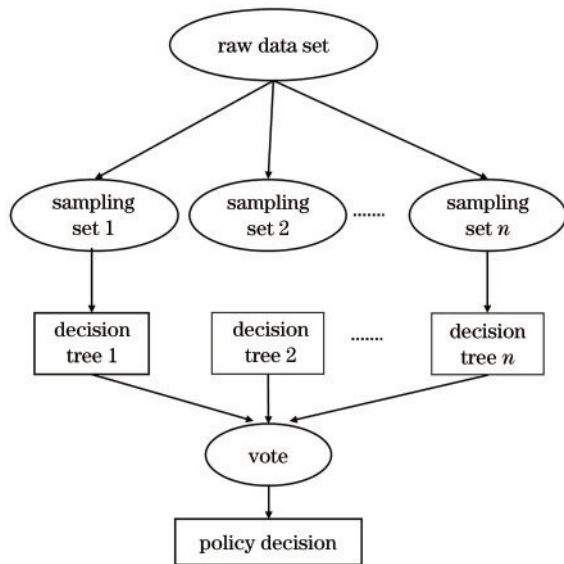


图 3 随机森林模型的流程

Fig. 3 Flow chart of random forest model

4 结果与分析

4.1 粒子群优化最小二乘支持向量机建模分析

PSO-LSSVM 模型可以通过群体中个体之间的合作和信息共享,找到群体结构的最优解。利用 PSO-LSSVM 模型,对 4 种方法特征融合后的 7 种减肥药样本进行分类识别,设置种群规模(粒子数)为 40,迭代次数为 50,在不同特征融合条件下对 7 种减肥药的识别率如图 4 所示。

由图 4 可知: PSO-LSSVM 模型对原始光谱数据的分类准确率可达 66.67%; PSO-LSSVM 模型对在特征波长区间经希尔伯特变换后的特征融合光谱数据的分类准确率可达 100%; PSO-LSSVM 模型对在特征波长区间经 SNV 和 DT 处理后的特征融合数据的分类准确率可达 84.375%; PSO-LSSVM 模型对在特征波长区间经 FFT 低通滤波器处理后的特征融合数据的分类准确率可达 80.9524%; PSO-LSSVM 模型对在特征波长区间经 Butterworth 低通滤波器处理后的特征融合数据的分类准确率可达 90.4762%。对比可以看出, PSO-LSSVM 模型对经过希尔伯特变换处理后的特征融合光谱的分类识别准确率最高,对原始光谱数据的分类识别准确率最低,分析可知,原始光谱数据受噪音和背景干扰较大,模糊了谱图的精确信息并且降低了模型分类识别的精度。

4.2 随机森林建模分析

随机森林模型是一种监督式学习的算法模型,属于集成学习算法的范畴,由于模型不使数据陷入过拟合且对数据的适应能力强,在训练过程中能够检测到特征点间的相互影响,使结果呈现出高精度。利用随机森林模型对 7 种经 4 种不同特征融合方法处理后的减肥药样本进行训练识别,按 7:3 比例设置训练集个数为 98,采用随机序列方法对测试集进行分类识别,得到的分类识别后的混淆矩阵如图 5 所示,测试集中分类识别的准确率如图 6 所示。

由图 5 和图 6 可知: 随机森林模型对原始数据的分类识别准确率达 72%,对经希尔伯特变换后的特征融合光谱数据的分类识别准确率达 76%,对 SNV 和 DT 处理后的特征融合光谱数据的分类识别准确率达 76.67%,对经 FFT 低通滤波器处理后的特征融合光谱数据的分类识别准确率达 95.83%,对经 Butterworth 低通滤波器处理后的特征融合光谱数据的分类识别准确率达 91.67%。对比看出: 随机森林模型对太赫兹光谱视域下经 FFT 低通滤波器方法处理的特征融合数据的分类识别准确率最高,对原始数据的分类识别准确率最低,原因在于原始光谱受环境噪声影响较大,损失了部分结构信息;另外,对经希尔伯特变换和 SNV+DT 变换处理后的特征融合光谱数据的分类识别准确率较低,原因在于模型未能有效识别部分信息区域,造成了信息冗余。

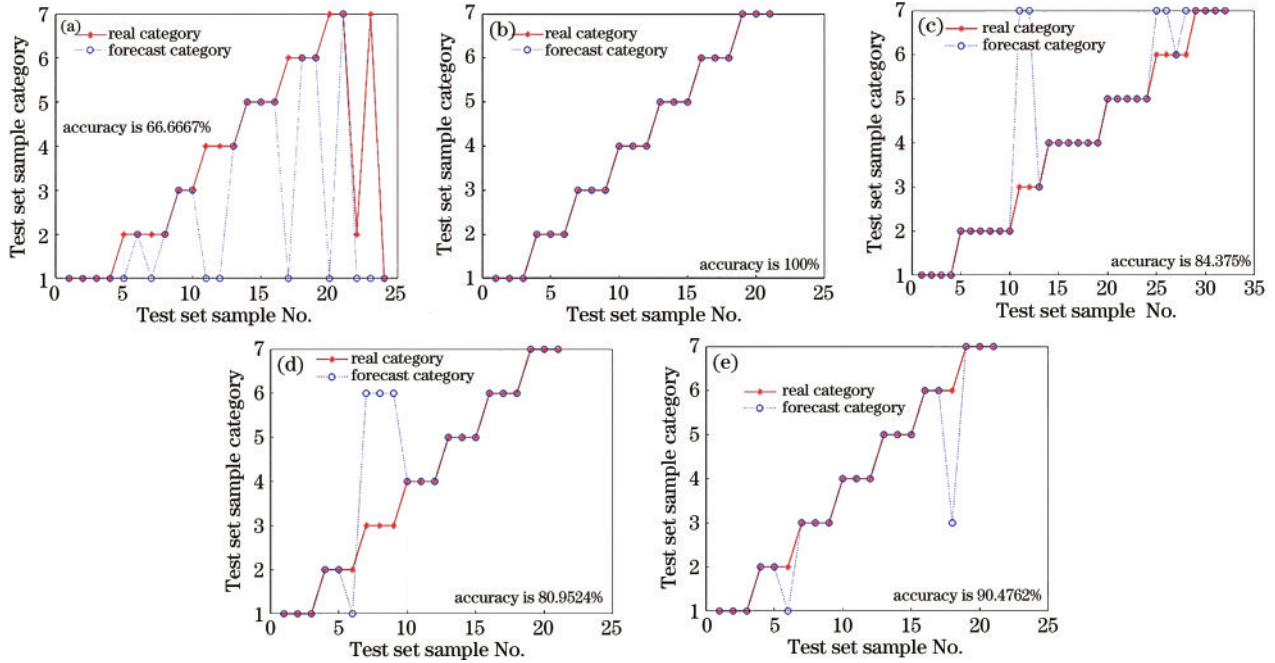


图 4 不同特征融合方法处理下, PSO-LSSVM 对 7 种减肥药的识别准确率。(a) 原始谱图; (b) 经 Hilbert 变换的特征融合谱图; (c) 经 SNV+DT 变换的特征融合谱图; (d) 经 FFT 低通滤波器变换的特征融合谱图; (e) 经 Butterworth 低通滤波器变换的特征融合谱图
 Fig. 4 Recognition accuracy of PSO-LSSVM under different feature fusion methods for seven weight loss drugs. (a) Original spectra; (b) feature fusion spectra after Hilbert transform; (c) feature fusion spectra after SNV+DT transform; (d) feature fusion spectra after FFT low-pass filter transform; (e) feature fusion spectra after Butterworth low-pass filter transform

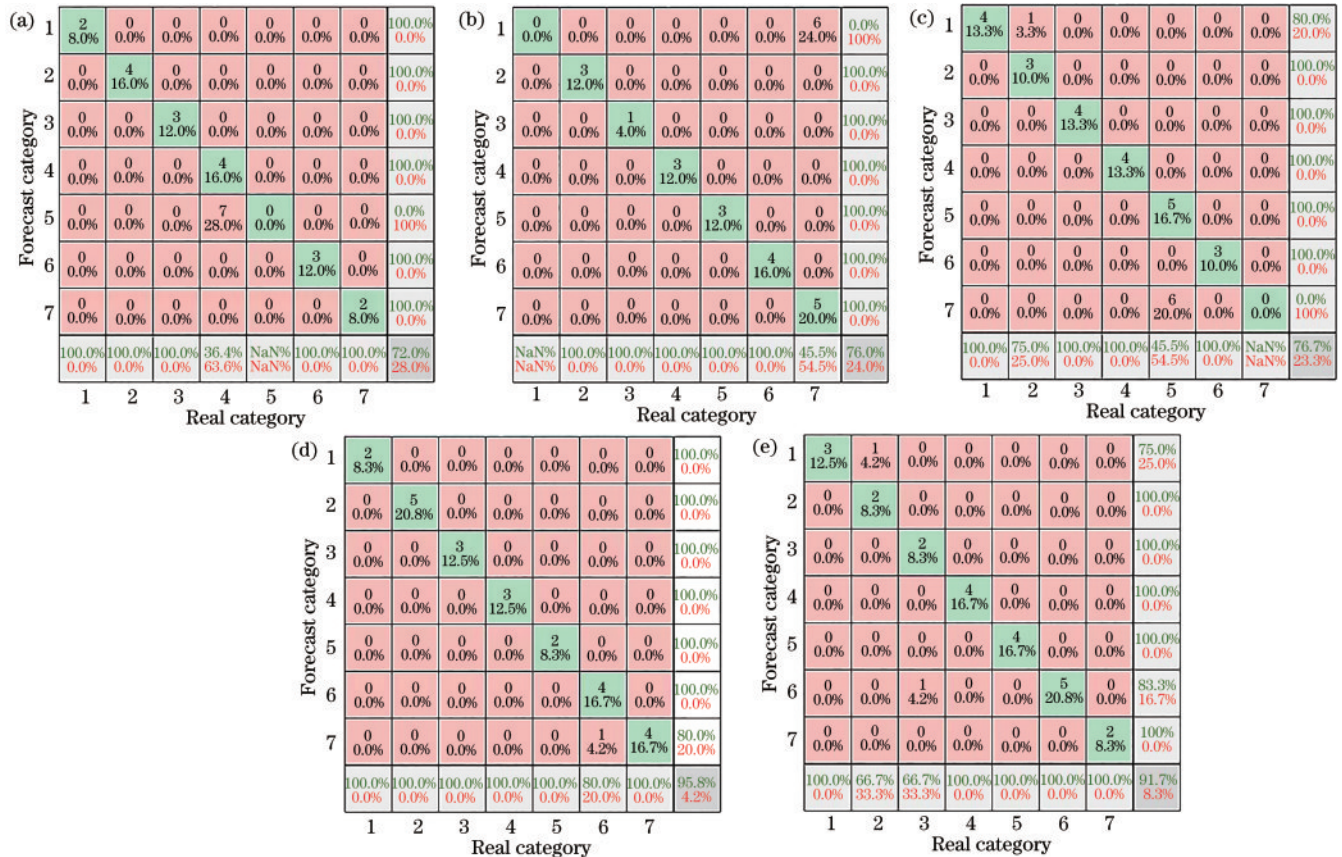


图 5 在不同特征融合方法处理下, 随机森林模型对 7 种减肥药的混淆矩阵。(a) 原始谱图; (b) Hilbert 变换; (c) SNV+DT 变换
 (d) FFT 低通滤波器变换; (e) Butterworth 低通滤波器变换
 Fig. 5 Confusion matrix of random forest model under different feature fusion methods for seven weight loss drugs. (a) Original spectra; (b) Hilbert transform; (c) SNV+DT transform; (d) FFT low-pass filter transform; (e) Butterworth low-pass filter transform

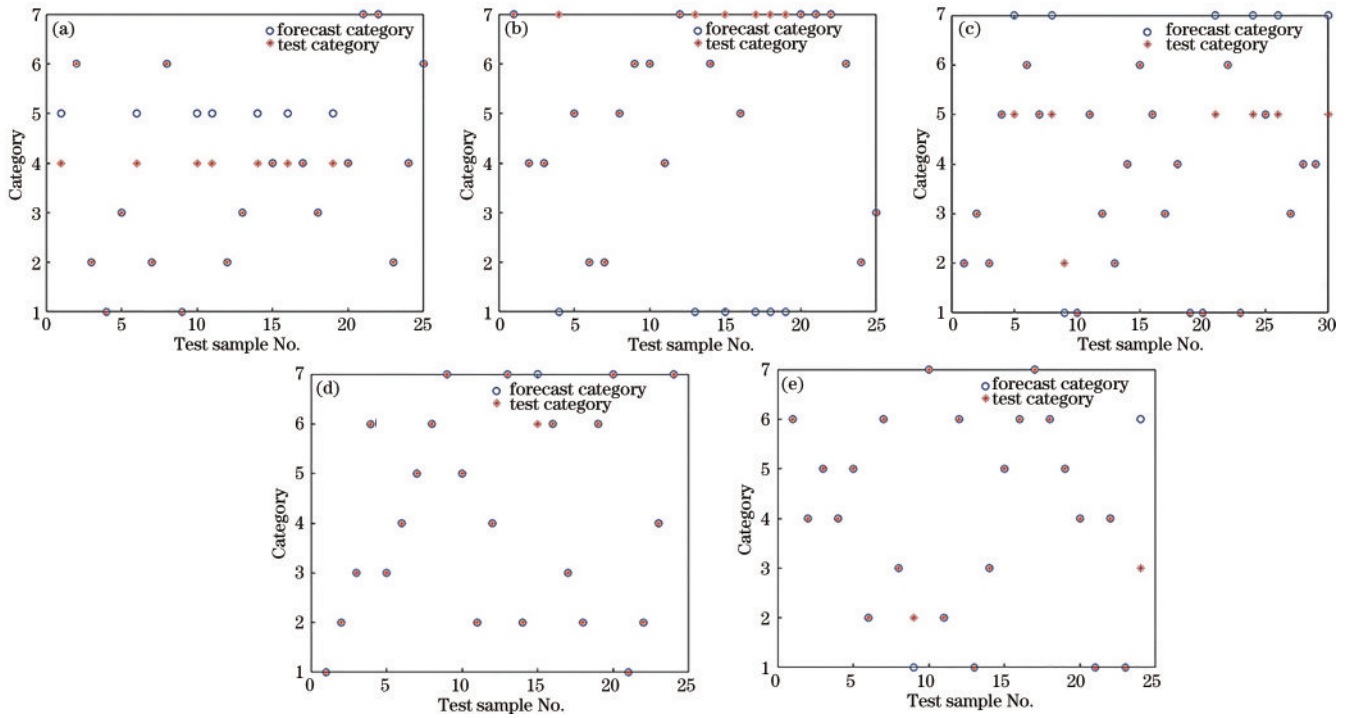


图 6 不同特征融合方法处理下,随机森林模型对 7 种减肥药的准确率。(a)原始谱图;(b) Hilbert 变换;(c) SNV+DT 变换(d) FFT 低通滤波器变换;(e) Butterworth 低通滤波器变换

Fig. 6 Accuracy of random forest model under different feature fusion methods for seven weight loss drugs. (a) Original spectra; (b) Hilbert transform; (c) SNV+DT transform; (d) FFT low-pass filter transform; (e) Butterworth low-pass filter transform

4.3 两种建模方法的比较

为直观比较 PSO-LSSVM 与 RF 模型对减肥药快速分类识别的准确率,利用两种模型对 4 种不同特征融合方法进行模式识别,识别准确率如图 7 所示。

图 7(a)和图 7(b)分别表示 PSO-LSSVM 模型和 RF 模型对减肥药的原始谱图、经希尔伯特变换后的特征融合谱图、标准正态变换后一阶求导的特征融合谱图、快速傅里叶变换低通滤波器处理后的特征融合谱图、巴特沃思低通滤波器处理后的特征融合谱图的分

类识别准确率。分析图 7 可知,在太赫兹光谱视域下,对 7 种减肥药的三个特征光谱区间采用希尔伯特变换进行特征数据融合,而后采用 PSO-LSSVM 模型进行分类识别的效果最好,识别准确率可以达 100%。若仅对原始光谱进行分类识别则效果最差,原因在于原始光谱受测定时试样状态、溶剂效应等因素影响,产生噪声,从而干扰机器学习的识别效果。对于其余特征变换后的光谱融合数据,模型识别准确率不高的原因在于,利用特征变换处理时损失了部分结构信息,模型未能有效识别物质的结构信息。

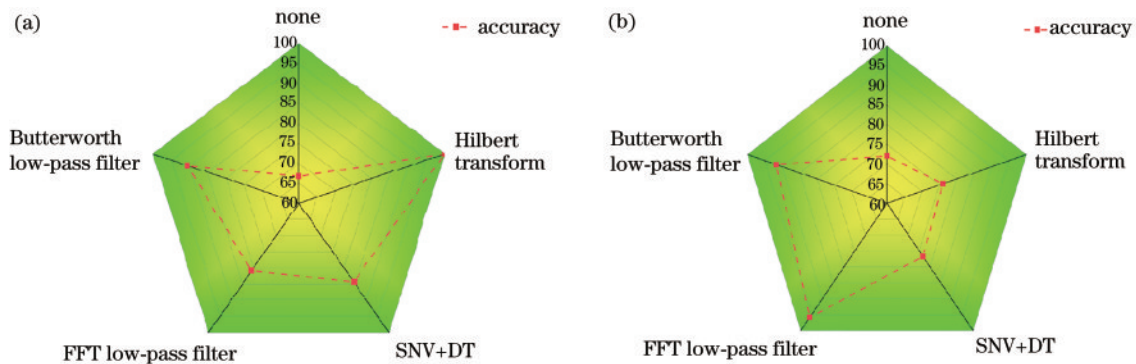


图 7 PSO-LSSVM 和 RF 的分类识别准确率。(a) PSO-LSSVM; (b) RF

Fig. 7 Classification and recognition accuracy of PSO-LSSVM and RF. (a) PSO-LSSVM; (b) RF

5 案例分析

2021年10月22日,青岛市市南区发生了一起疑似利用寄递渠道走私掺杂西地那非药物的减肥药类食品安全案件。提取从现场锁定三位嫌疑人寄递包裹内的减肥药类检材共3份,分别命名为S-1、S-2、S-3,经过技术部门检验,获得的3份检材的太赫兹时域光谱如图8~10所示。

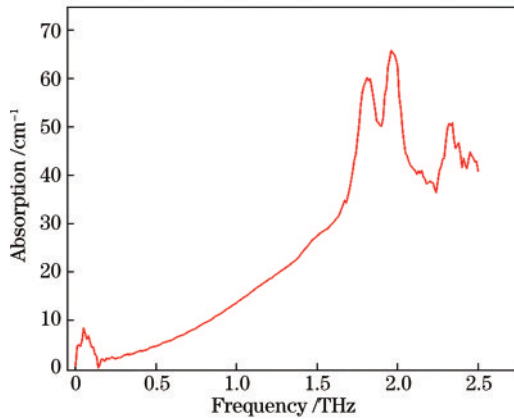


图8 检材S-1的太赫兹时域光谱

Fig. 8 THz time-domain spectrum of sample S-1

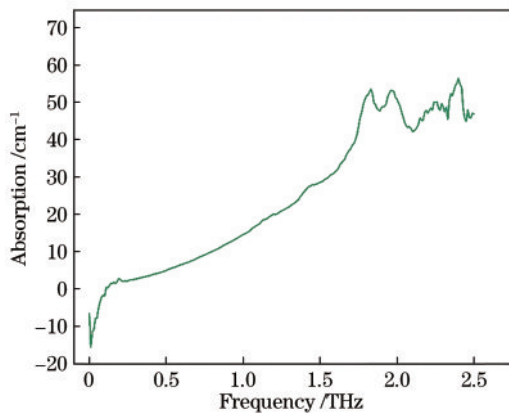


图9 检材S-2的太赫兹时域光谱

Fig. 9 THz time-domain spectrum of sample S-2

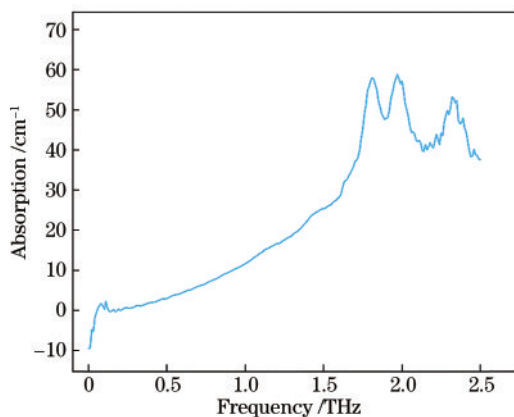


图10 检材S-3的太赫兹时域光谱

Fig. 10 THz time-domain spectrum of sample S-3

由图8~10可知,检材S-1、S-2和S-3的太赫兹光谱在0~0.19 THz、1.75~2.14 THz、2.23~2.5 THz三个频率区间内的特征峰有所差异。以140份检材为训练集,以3份未知检材为验证集,采用PSO-LSSVM分类模型对经希尔伯特变换后得到的特征融合的未知检材太赫兹光谱数据进行快速检测,检测结果如表3所示。结果判定检材S-1与S-2中含有西地那非,S-3检材中不含有西地那非,最终破案后经比对检验证实了预测结果的正确性。

表3 三种待判定检材的分类结果

Table 3 Classification result of three samples to be judged

Sample to be determined	Containing sildenafil	Sildenafil free
S-1	✓	
S-2	✓	
S-3		✓

6 结 论

利用太赫兹时域光谱对不同种减肥药进行模式识别。实验结果表明,太赫兹光谱能够有效区分不同种减肥药,不同类型减肥药对不同频率的太赫兹波的吸收效果完全不同,在太赫兹吸收系数谱上具有明显的区别。因此太赫兹光谱能够对不同种减肥药进行有效识别。利用太赫兹光谱采集7种减肥药在不同频率下的吸收率,用4种不同方法对0~0.19 THz、1.75~2.14 THz、2.23~2.5 THz三个频率区间的特征峰进行处理,对所得到的数据与原始数据进行特征融合,并利用PSO-LSSVM和RF对特征融合后的数据进行分类识别。对两种模型分类识别的效果进行比较,结果表明,PSO-LSSVM分类模型对希尔伯特变换后获得的7种减肥药特征融合数据识别效果最好,准确率可达100%。

本文探讨了太赫兹时域光谱结合机器学习对寄递物品进行分类识别的方法,太赫兹时域光谱技术可以有效地检测太赫兹波段材料的物理化学信息,从而应用于定性鉴别。同时,它可以作为一种无损检测方法,不会对待测样本造成损害,能够及时避免寄递物品中能量高、受热性差的物质受到破坏。将太赫兹时域光谱与机器学习相结合,可以对待测样本进行快速检测与分类识别,为太赫兹时域光谱技术在食药环领域的应用提供指导。

参 考 文 献

- [1] 李芳. 落实“七号检察建议”强化寄递安全监管[N]. 中国禁毒报, 2021-11-26(3).
Li F. Implement the “No. 7 procuratorial suggestion” and strengthen the supervision of delivery safety[N]. China Narcotics Control News, 2021-11-26(3).
- [2] 胡蝶飞. “IT男”跨境寄递精神药品获刑[N]. 上海法治报, 2021-12-17(A08).

- Hu D F. "IT man" was sentenced for cross-border delivery of psychotropic drugs[N]. Shanghai Rule of Law News, 2021-12-17(A08).
- [3] Beshenkov V G, Znamenskii A G, Irzhak A V, et al. Method of phase composition diagnostics of lead zirconate titanate films based on Raman spectra[J]. Applied Surface Science, 2021, 562: 149937.
- [4] Genis D O, Sezer B, Durna S, et al. Determination of milk fat authenticity in ultra-filtered white cheese by using Raman spectroscopy with multivariate data analysis[J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127699.
- [5] Blades M, Ignatova T, Ta H Q, et al. Classification of graphene Islands via confocal Raman spectra cluster analysis[J]. ECS Meeting Abstracts, 2017, (12): 817.
- [6] 赵国忠. 太赫兹科学技术研究的新进展[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 1-6, 20.
- Zhao G Z. Progress on terahertz science and technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(2): 1-6, 20.
- [7] Spies J A, Neu J, Tayvah U T, et al. Terahertz spectroscopy of emerging materials[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124(41): 22335-22346.
- [8] 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.
- Liu S G. Recent development of terahertz science and technology[J]. China Basic Science, 2006, 8(1): 7-12.
- [9] Yang S H, Jarrahi M. Navigating terahertz spectrum via photomixing[J]. Optics and Photonics News, 2020, 31(7): 36-43.
- [10] 刘燕德, 徐振, 胡军, 等. 太赫兹光谱检测技术对农产品品质检测的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0100005.
- Liu Y D, Xu Z, Hu J, et al. Research on quality of agricultural products by terahertz spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0100005.
- [11] 刘盛纲, 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.
- Liu S G, Zhong R B. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481-486.
- [12] Lian F Y, Ge H Y, Ju X J, et al. Quantitative analysis of trans fatty acids in cooked soybean oil using terahertz spectrum[J]. Journal of Applied Spectroscopy, 2019, 86(5): 917-924.
- [13] 饶近秋, 陈李乙, 白鹏鹏, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的四种基原郁金的鉴别研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 2200002.
- Rao J Q, Chen L Y, Bai P P, et al. Identification of four origins of curcuma based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 2200002.
- [14] 殷贤华, 刘昱, 贺微, 等. 基于MPSO-SVM的硫化橡胶及助剂的太赫兹光谱分类识别[J]. 激光技术, 2021, 45(1): 7-12.
- Yin X H, Liu Y, He W, et al. Classification and recognition of vulcanized rubber and its auxiliary based on MPSO-SVM[J]. Laser Technology, 2021, 45(1): 7-12.
- [15] Linardatos P, Papastefanopoulos V, Kotsiantis S. Explainable AI: a review of machine learning interpretability methods[J]. Entropy, 2020, 23(1): 18.
- [16] 成甜甜, 王克俭, 韩宪忠, 等. 基于 PSO-LSSVM 和特征波长提取的羊肉掺假检测方法[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 46-50.
- Cheng T T, Wang K J, Han X Z, et al. Detection method of mutton adulteration based on PSO-LSSVM and characteristic wavelengths extraction[J]. Food & Machinery, 2020, 36(11): 46-50.
- [17] 魏曼曼, 路皓翔, 杨辉华. 基于 RF-AdaBoost 模型的血液种属鉴别算法[J]. 高等学校化学学报, 2020, 41(1): 94-101.
- Wei M M, Lu H X, Yang H H. Research on blood species identification algorithm based on RF-AdaBoost model[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2020, 41(1): 94-101.
- [18] 张魁星, 罗菲菲, 魏本征. 基于希尔伯特-黄变换的小鼠血液光谱信号分析研究[J]. 中国医学装备, 2014, 11(9): 12-14.
- Zhang K X, Luo F F, Wei B Z. Analysis and research on spectrum signal of mice blood based on Hilbert-Huang transform[J]. China Medical Equipment, 2014, 11(9): 12-14.
- [19] 李妍, 高闽光, 童晶晶, 等. 基于巴特沃斯滤波器的傅里叶变换红外光谱处理方法研究[J]. 量子电子学报, 2021, 38(6): 780-787.
- Li Y, Gao M G, Tong J J, et al. Study on Fourier transform infrared spectrum processing method based on Butterworth filter[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2021, 38(6): 780-787.
- [20] 陈天江, 王亚丽, 普小云. 快速傅里叶变换在喇曼光谱信号噪声平滑中的应用[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2005, 27(6): 509-513.
- Chen T J, Wang Y L, Pu X Y. The application of fast Fourier transform in the noise smoothing of weak Raman spectrum[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences), 2005, 27(6): 509-513.
- [21] 黄承伟, 戴连奎, 董学锋. 结合 SNV 的分段直接标准化方法在拉曼光谱模型传递中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5): 1279-1282.
- Huang C W, Dai L K, Dong X F. The application of piecewise direct standardization with SNV in calibration transfer of Raman spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(5): 1279-1282.
- [22] 张燕君, 何宝丹, 付兴虎, 等. 拉曼光谱结合 PSO-LSSVM 算法检测三组分食用调和油含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(8): 2440-2445.
- Zhang Y J, He B D, Fu X H, et al. Raman spectra combined with PSO-LSSVM algorithm for detecting the components in ternary blended edible oil[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(8): 2440-2445.
- [23] 熊智新, 刘耀瑶, 王勇, 等. PSO-LSSVM 用于近红外光谱预测混合制浆材 Klason 木质素含量[J]. 中国造纸学报, 2020, 35(2): 45-51.
- Xiong Z X, Liu Y Y, Wang Y, et al. Application of

- particle swarm optimization based on least square support vector machine in quantitative analysis of Klason lignin of mixed wood using near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2020, 35(2): 45-51.
- [24] Yu C B, Xi Z W, Lu Y L, et al. K/S value prediction of cotton fabric using PSO-LSSVM[J]. Textile Research Journal, 2020, 90(23/24): 2581-2591.
- [25] 吴叶兰, 陈怡宇, 廉小亲, 等. 高光谱成像的柑橘病虫害叶片识别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(12): 3837-3843.
- Wu Y L, Chen Y Y, Lian X Q, et al. Study on the identification method of citrus leaves based on hyperspectral imaging technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(12): 3837-3843.
- [26] 王远, 折帅, 周南, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的红木分类识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2719-2724.
- Wang Y, Zhe S, Zhou N, et al. Classification of terahertz rosewood based on continuous projection algorithm and random forest[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9): 2719-2724.