

## 基于太赫兹时域光谱技术的四种基原郁金的鉴别研究

饶近秋<sup>1,2</sup>, 陈李乙<sup>1,2</sup>, 白鹏鹏<sup>1,2</sup>, 张婷婷<sup>1,2</sup>, 赵启铎<sup>1\*</sup>, 邱峰<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>天津中医药大学中药学院, 天津 301617;<sup>2</sup>天津中医药大学组分中药国家重点实验室, 天津 301617

**摘要** 郁金作为行气活血、通经止痛的要药,近年来受到广泛的关注。为了对四种郁金的道地性和基原进行鉴别和质量控制,采用太赫兹时域光谱技术结合化学计量法(支持向量机法、主成分分析法)对郁金的四种基原进行分类和鉴别。构建了斜坡耗损多类支持向量机(Ramp Loss K-SVC)法、随机森林(RF)法和极限学习机算法(ELM)的三种模型对四种不同基原的郁金进行区分,并开发了 Ramp Loss K-SVC 方法,优化了模型参数,使四种郁金的鉴别率提高至 93%。该研究为容易混淆的四种基原郁金鉴别提供一种新兴的鉴别技术。

**关键词** 太赫兹技术; 太赫兹时域光谱; 郁金; 支持向量机法; 鉴定

中图分类号 O433.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2200002

## Identification of Four Origins of *Curcuma* Based on Terahertz Time-Domain Spectroscopy

Rao Jinqiu<sup>1,2</sup>, Chen Liyi<sup>1,2</sup>, Bai Pengpeng<sup>1,2</sup>, Zhang Tingting<sup>1,2</sup>, Zhao Qiduo<sup>1\*</sup>, Qiu Feng<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup> School of Chinese Materia Medica, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China;<sup>2</sup> State Key Laboratory of Component-Based Chinese Medicine, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

**Abstract** As an important traditional Chinese medicines (TCMs) for promoting qi, activating blood, and relieving pain, *Curcuma* has attracted wide attention in recent years. In order to identify and control the quality of four origins of *Curcuma*, the terahertz time-domain spectroscopy combined with chemometric method (support vector machine method and principal component analysis method) was used to classify and identify the four origins of *Curcuma*. In this study, three models of slope loss multi-class support vector machine methods (Ramp Loss K-SVC method), random forest (RF), and extreme learning machine algorithm (ELM) were constructed to distinguish *Curcuma* with four different origins. It was developed the Ramp Loss K-SVC method and optimized the model parameters that the identification rate of the four types of *Curcuma* were increased to 93%. This paper provides a new identification technique for the identification of four easily confused origins.

**Key words** terahertz technology; terahertz time-domain spectroscopy; *Curcuma*; support vector machine; identification

**OCIS codes** 140.1040; 300.6300; 300.6495

## 1 引 言

中药是在传统中医药的理论指导下,用于预防、

治疗、诊断疾病并具有康复与保健作用的天然药物和其加工代用品<sup>[1]</sup>,中药作为我国传统的文化瑰宝,被广泛应用于各种疾病的防治。近年来,随着中药

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2020-12-16; 录用日期: 2021-01-22

基金项目: 国家高层次人才特殊支持计划领军人才

通信作者: \*121213358@qq.com; \*\*fengqiu20070118@163.com

的大量使用,中药材以次充好、以假乱真、滥用农肥的现象屡见不鲜,中药品质是中药质量标准的关键环节,中药质量控制一直是中药现代化急需解决的关键问题。郁金是姜科植物温郁金、姜黄、广西莪术或蓬莪术的干燥块根,主产于四川、福建、浙江、广西等地,郁金性寒、味辛、苦,具有活血止痛和利胆退黄的功效<sup>[2]</sup>,并且具有抗肿瘤<sup>[3]</sup>、保肝<sup>[4]</sup>、抗菌抗炎<sup>[5]</sup>、保护心血管系统<sup>[6]</sup>、抗氧化<sup>[7]</sup>等药理作用。然而,郁金的四种基原药材外观相似度很高,肉眼难以鉴别<sup>[8]</sup>,并且不同基原郁金的主要成分和治疗功效差异明显<sup>[9]</sup>。鉴别四种基原郁金的常见方法为薄层色谱法(TLC)<sup>[10]</sup>、紫外光谱法(UV)<sup>[11]</sup>、红外光谱法<sup>[12]</sup>、高效液相色谱法(HPLC)<sup>[13]</sup>、气相色谱法(GC)<sup>[14]</sup>、DNA 条形码技术<sup>[15]</sup>等,但是以上方法存在操作复杂、耗时长、成本高的问题。

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz、波长在 0.03~3 mm 之间的电磁波<sup>[16]</sup>。太赫兹时域光谱(THz-TDS)对分子的集体骨架振动及氢键、范德瓦耳斯力等弱的分子间作用力具有较强的敏感性,尤其对大部分的极性分子,如水分子会呈现出更为强烈的吸收特性<sup>[17]</sup>。太赫兹波段可以作用于有机分子的氢键和晶体低频的振动等,也可以用于中药的一级和二级代谢产物<sup>[18-19]</sup>。传统的四大鉴定法(基原、形状、显微和理化)是鉴别中药材最基础的方法,但是鉴定者必须具备专业的鉴定知识和丰富的实践经验,薄层色谱法、气相色谱法、高效液相色谱法、紫外光谱法、X 射线衍射法、DNA 条形码技术等鉴别技术需要对药材的鉴定部位进行化学提取,操作步骤复杂,且会对原药材造成一定的浪费。而太赫兹鉴定中药步骤相对简单,且已鉴定过的药材可重复使用,此技术具有快速无损的优点<sup>[20-21]</sup>。近年来,太赫兹在中草药的鉴别中,发挥了很好的鉴定作

用。章龙等<sup>[22]</sup>采用 THz-TDS 技术结合化学计量学方法对牛黄及其易混品进行鉴别,该技术为稀缺中药的鉴别研究提供了一种新方法。刘陵玉等<sup>[23]</sup>在光谱分析的基础上分别建立了基于支持向量机(SVM)和偏最小二乘法(PLS)的定量分析模型来测试黄芩苷混合物的光谱,以实现黄芩苷的定量检测。THz-TDS 技术可以对中药的基原、真伪、炮制品、农药残留等方面进行快速准确无损的检测<sup>[21]</sup>。本文采用 THz-TDS 技术结合化学计量法,如支持向量机法和主成分分析法(PCA)对郁金的四种基原进行快速无损的分类和鉴别。

## 2 实验方法

### 2.1 测量实验装置

实验样品的测试是采用 Advantest 7400SU 系统透射模块进行测量,飞秒光纤激光器作为光源,中心波长为 780 nm,重复频率为 80 MHz,脉冲宽度为 100 fs, THz-TDS 的相关系统如图 1 所示,样品光谱数据的采集模式为透射模式<sup>[24]</sup>。飞秒激光器产生的飞秒激光脉冲聚焦到太赫兹发射器产生太赫兹辐射,太赫兹辐射通过光学准直和会聚系统作用于样品,再利用控制器控制相位调制器和飞秒激光器,通过检测器获得太赫兹脉冲时域波形,利用快速傅里叶变换和计算机处理获取的太赫兹光谱信息<sup>[25]</sup>。THz-TDS 技术获得样品信息是通过 THz 脉冲透射穿过样品或者在样品上发生反射并测量得到电场,THz-TDS 光路分为反射型和透射型。参数提取第一步是由傅里叶变换来实现时域到频域的转换,传输函数是待测样品频域谱与参考(如:空气)频域谱的比值,传输函数同样可测得样品厚度值,折射率、吸收系数等也是通过传输函数和样品的厚度来获得。通过测定透过率的样品厚度值和相位谱可计算

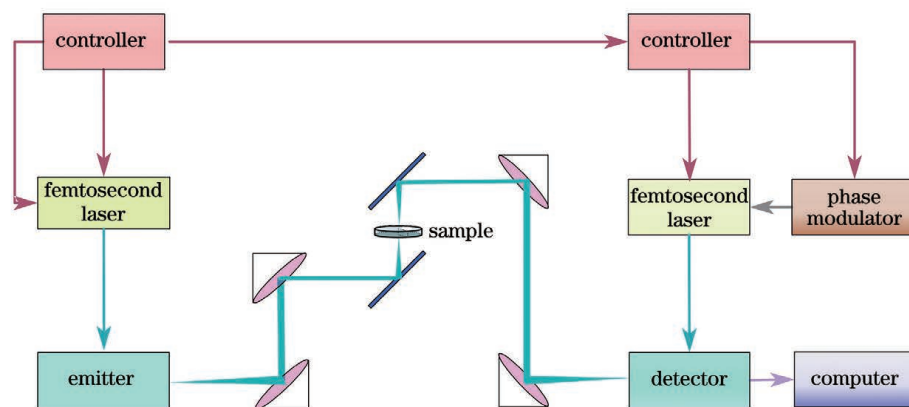


图 1 THz-TDS 的示意图

Fig. 1 Schematic of THz-TDS

出折射率,再通过样品复折射率的虚部消光系数可计算出吸收系数。样品的传输函数是实测信号和参考信号的比值(待测样品所得光谱为实测信号,测得空气的光谱为参考信号<sup>[21]</sup>)。

## 2.2 样品准备及测试

实验选用的中药样品温郁金、姜黄、广西莪术、蓬莪术,均购于天津同仁堂中药店(如图 2 所示),由天津中医药大学中药资源教研室张坚副教授鉴定为正品。在粉碎药材之前,为了保证测量的稳定性,将样品放置于 VOS-310C 型的真空干燥箱内干燥 6 h,温度为 30 °C,对四种基原的郁金进行干燥,明确各药材的含水量均符合 2020 版《中国药典》的含水量。采用粉碎机粉碎药材,选择 200 目进行过筛,其原因

是 200 目可以充分减小散射的影响,避免基线的干扰。将样品与聚乙烯按照 1:1 的质量比例混合,充分研磨,在 10 MPa 压力下,压制 5 min,压成厚度为  $(1.2 \pm 0.1)$  mm、直径为 13 mm 的样品片,将 4 种基原的郁金分别压制 167 片,为了保证测量的准确性,在测完第一次样品之后,放入干燥箱进行真空干燥至恒重后进行复测,每片样品分别在不同的位置测量三次,在实验中,以干燥空气作为参考信号,得到每片样品的吸收谱。为了减小系统噪声和实验因素导致的噪声,提高光谱的平滑性,使用 savitzky Golay 进行平滑预处理,选取 0.5~2 THz 范围内的 167 个光谱数据进行分析,其过程包括数据预处理、特征提取、数据建模和物质识别。

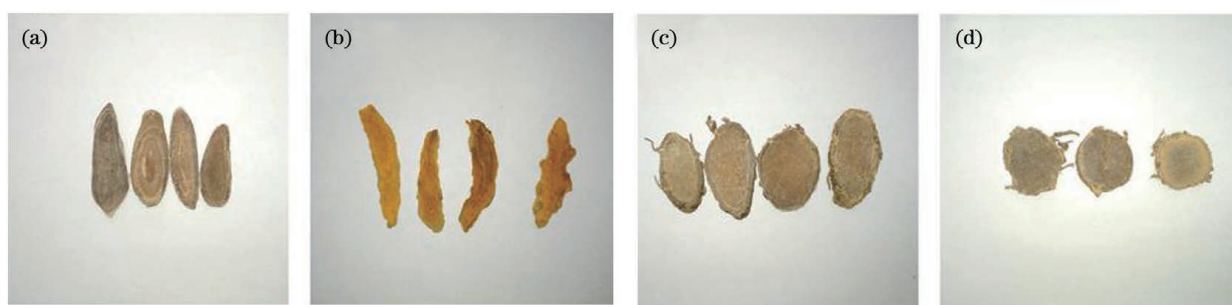


图 2 郁金的外观图。(a)温郁金;(b)姜黄;(c)广西莪术;(d)蓬莪术

Fig. 2 Appearance of *Curcuma*. (a) *Curcuma Wenyujin*; (b) *Curcuma longa*; (c) *Curcuma kwangsiensis*; (d) *Curcuma phaeocaulis*

## 3 结果与讨论

### 3.1 THz 光谱分析

图 3 为温郁金、姜黄、蓬莪术、广西莪术的典型时域光谱和参考图,可以明显看出,温郁金、姜黄、蓬莪术、广西莪术时间延迟存在明显差异。通过快速傅里叶变换方法将所有样品的时域光谱进行转换后,计算频域光谱,然后获得吸收系数谱。在本研究中,高频区域的信噪比(SNR)较低,因此太赫兹范围

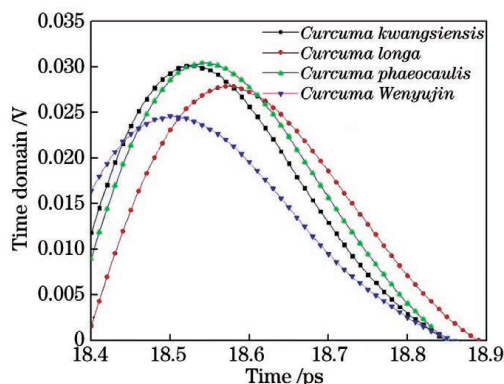


图 3 不同基原的 THz-TDS

Fig. 3 THz-TDS with different origins

选择为 0.5~2 THz。图 4 是四种基原的太赫兹吸收系数谱,这三个光谱在 0.5 THz 和 2 THz 之间显示出相似的吸收趋势。在 THz-TDS 和吸收系数谱中,温郁金、姜黄、广西莪术、蓬莪术存在明显的区别。从图中可以看出,温郁金的吸收系数最大,广西莪术吸收系数最小,姜黄和蓬莪术相互重叠,而且在 0.5~2 THz 的所有样品中都没有明显的吸收峰,这也与现有的相关文献的结果相吻合。这是因为上述样品中的化学成分复杂,可能出现峰的重叠现象,通过仔细观察其他复杂样品的光谱特征也可以证明这一原因,所以本实验可以采用化学计量学方法来鉴别四种不同基原郁金。

### 3.2 分类识别

#### 3.2.1 斜坡耗损多类支持向量机(Ramp Loss K-SVC)法

支持向量机法是结构风险最小化的近似实现,但是由于支持向量机会数据维数过大而出现了分类拟合效果不好等问题<sup>[26]</sup>。在标准 SVM 的公式中,默认情况下使用凸损失的 Hinge 损失函数,这是因为有很多凸优化技术可以解决它。在等式中铰链损



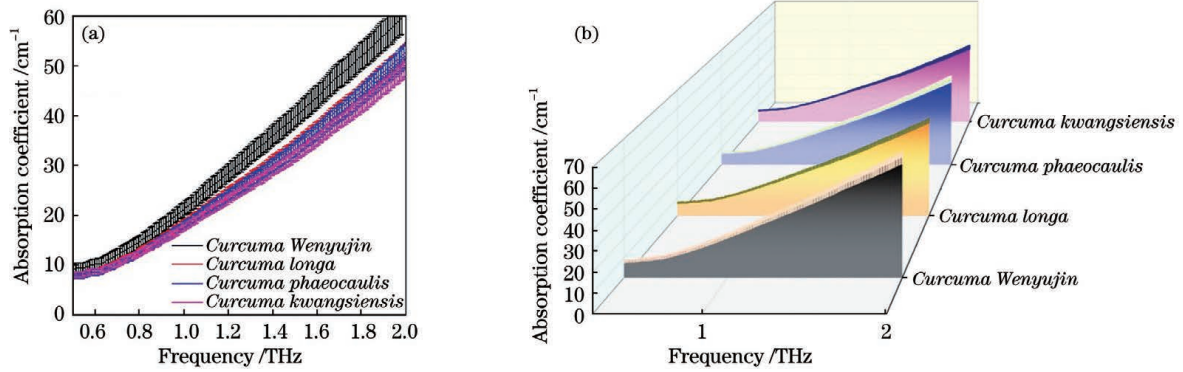


图 4 四种基原的郁金 THz 吸收系数图。(a)一维吸收系数图;(b)三维吸收系数图

Fig. 4 THz absorption coefficients of *Curcuma* with four origins. (a) One-dimensional absorption coefficient; (b) three-dimensional absorption coefficient

失函数定义为

$$H(s) = \max(0, s - z), \quad (1)$$

式中: $H$  损失函数; $s$  表示铰链点的位置; $z$  表示样本真实标签。标准 SVM 的主要问题为

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_i^l H_1[y_i f(x_i)], \quad (2)$$

式中: $w$  表示参数向量; $b$  表示截距; $c$  表示惩罚因子; $x$  表示样本; $y$  表示类别; $l$  表示起始样本数和  $i$  表示终止样本数。

由于凸损失函数的性质,传统的支持向量机对噪声和离群点的存在很敏感。这意味着这些数据点以不适当的方式使决策超平面朝自己移动。由于离群值将获得最大的边际损失,因此 SVM 的泛化能力将降低。此外,由于支持向量(SV)的数量受到样

本数量的影响,具有铰链损失的 SVM 需要更多的计算成本。因此,在大规模问题中,传统的 SVM 具有更多的 SV,需要更长的训练和预测时间。为了解决这个问题并构建一个稀疏而强大的 SVM,将一些非凸面的损失引入到 SVM 中,例如标准化的 S 型损失、 $\psi$  学习损失、弹球损失和如图 5 所示的 Ramp 损失,其中 Ramp 损失表现出更好的性能,并引起更多对自身的关注。

铰链损失是凸损失函数,而学习损失、归一化 S 型损失和斜坡损失是稳健的函数,但不属于凸损失。基于图 2,斜坡损失函数定义为

$$R_s(z) = \begin{cases} 0, & z > 1 \\ 1 - 2s, & s \leq z \leq 1. \\ 1 - s, & z < s \end{cases} \quad (3)$$

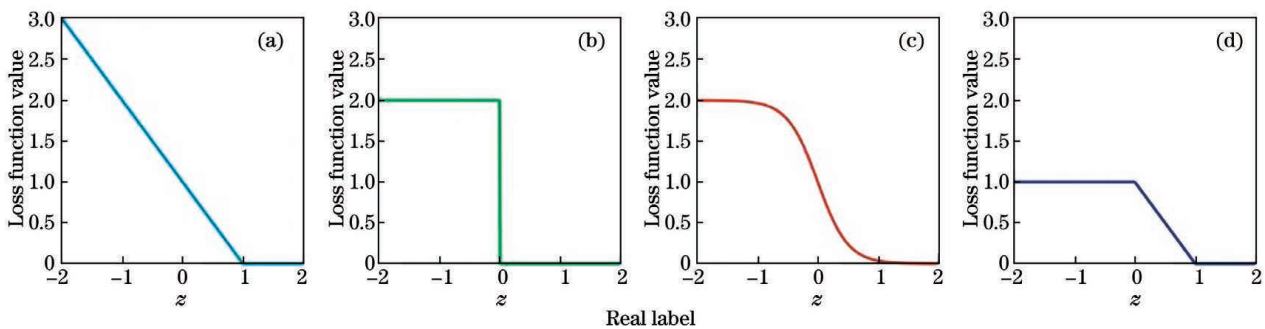


图 5 用于 SVM 分类器的损耗图。(a)铰链损耗;(b) $\psi$  学习损耗;(c)归一化 Sigmoid 损耗;(d)斜坡损耗

Fig. 5 Loss diagrams of SVM classifier. (a) Hinge loss; (b)  $\psi$  learning loss; (c) normalized Sigmoid loss; (d) ramp loss

如果  $z$  小于预定义值  $s$  且小于 1,则损失函数将是平坦的。 $R_s(z)$  可分解为凸铰链损耗和凹损耗

的总和,这意味着  $R_s = H_1(z) - H_s(z)$ 。斜坡损耗 SVM 的主要问题公式为

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_i^l R_s[y_i f(x_i)] = \min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C [y_i f(x_i)] - C \sum_{i=1}^l H_s[y_i f(x_i)]. \quad (4)$$

为了提高 K-SVCR 的鲁棒性并避免将异常值

视为支持向量,实现了 Ramp 损失函数  $R_s(z)$  而不

是 Hinge 损失函数,

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C_1 \sum_{i \in I} I_e[f(x_i)] + C_2 \sum_{i \in I} R_1[\tilde{y}_i f(x_i)] - C_1 \sum_{i \in I} I_i[f(x_i)] - C \sum_{i=1}^l H_s[y_i f(x_i)], \quad (5)$$

式中:  $I_i$  为凹的损失函数;  $I_e$  为凸的不敏感损失函数。

(5)式由凸部和凹部组成,为使非凸成本函数最小化,使用“凸凸过程”(CCCP)过程来解决该优化问题。CCCP 算法与“凸差”(DC)方法有关,其引入时间可以追溯到 1990 年。然而,由于其调整的简单性和迭代的特性(在每次更新中解决一系列凸程序的问题),CCCP 程序成为解决不可微非凸优化问题的成功算法。

为了使本文模型更适用于大规模设置并减少训练时间,采用乘数交替方向法(ADMM)来解决 CCCP 每次迭代中的次二次编程问题,ADMM 是一种强大的大规模结构优化技术,该技术在 1980 年提出,因乘法器方法的收敛性和双重上升的可分解性而成为处理大规模和大数据问题的强大工具。

### 3.2.2 随机森林(RF)

RF 是利用多棵树对样本进行训练并预测的一种分类器,是决策树的集合<sup>[27]</sup>。RF 较单一的决策树分类器具有更高的分类能力,一般不需要额外的修枝,就可以取得较好的泛化能力和抗过拟合能力<sup>[28]</sup>。但如果正样本和负样本的数量相差太大,存储在 RF 分类器树叶节点上的训练数据不平衡,则会导致树不平衡,进而降低 RF 分类器的泛化能力<sup>[29]</sup>。RF 的采样方法基于自主抽样法(Bootstrap),从集合中提取替换样本,然后重复  $n$  次以获得新集合。这种采样方法使得 RF 对噪声或过度训练不敏感,RF 的应用需要遵循以下步骤:

1) 通过 Bootstrap 方法从具有  $N$  个样本的训练数据中获得  $N$  个训练集。训练集标记为  $S_1, S_2, \dots, S_N$ 。

2) 从每个节点的特征空间中随机选择  $m$  个特征。然后,通过使用诸如决策树(C4.5)之类的方法找到最佳的分割特征。

3) 重复步骤 2,为训练集生成 C4.5。

4) 使用决策来预测测试集的样本。

5) RF 对所有树木预测进行平均或多数表决,以获得最佳分类。在第 3 步中,需要设置树木的数量,通过不断运行,得出 450 为最优解,将其设置为 450。

### 3.2.3 PCA 法

PCA 法的特征提取是通过将多个变量转化为少数几个变量来实现的。每个主成分都是原始变量的线性组合,并且足够表示原始变量的大部分信息<sup>[30]</sup>。变量太多往往会增加主题的复杂性,而且变量之间可能存在相关性,因此可以看出变量具有一些重叠的信息。但当主成分的因子负荷的符号有正有负时,评价函数的意义就不明确。PCA 用于将一组可能相关的变量转换为一组线性不相关的变量,称为主成分(PC)。PC 是正交的,第  $k$  主成分(PC $k$ )占第  $k$  个最大变异性,PC 的数量小于或等于原始变量的数量,这意味着可以获得较小的尺寸。

### 3.2.4 极限学习机算法(ELM)

ELM 在极快的学习速度下具有良好的泛化性能,基于一些人工和真实的基准函数逼近和分类问题(包括非常复杂的应用)的实验结果表明,新算法在大多数情况下都能产生良好的泛化性能,并且比传统的常用学习算法学习速度快,是一种新型的单隐含层神经网络快速学习算法<sup>[31]</sup>。极限学习机用于回归预测时,输入层与隐含层的连接权值是随机给定的,但所建立的模型容易出现泛化能力和稳定性不理想等问题<sup>[32]</sup>。

### 3.2.5 实验结果

利用 THz-TDS 吸收数据分别建立了 Ramp Loss K-SVC 分类模型、ELM 分类模型和 RF 分类模型。将每种中药 500 个样本中随机选择 200 个样本作为测试集,随机选择 300 个样本作为训练集,创建用于区分草药的分类模型(Ramp Loss K-SVC 模型、ELM 模型和 RF 模型),并利用训练的模型和对测试的数据使用 PCA 进行特征选取和分类,使用 PCA 进行特征提取和选择,通过比较准确性,接收器工作特性(ROC)曲线和接收工作特性曲线下面积(AUC)值来评估分类模型。针对数据不平衡的原因,建立基于 Ramp Loss K-SVC 分类模型。

例如其他 SVM 模型,Ramp Loss K-SVC 的泛化能力、鲁棒性和稀疏性极大地取决于模型参数的调整。在本研究中,RBF 内核为

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\lambda) \|x_i - x_j\|^2, \quad (6)$$

式中: $\lambda$  为拉格朗日因子向量。

用  $\varphi$  函数将数据样本从原始输入空间映射到

高维特征空间。总体而言,所提出的模型包括  $C$  作为惩罚因子,  $\gamma$  作为 RBF 内核参数,  $\epsilon$  作为不敏感参数,  $s$  作为斜坡损耗向量,  $t$  作为斜坡损耗向量和  $\rho$  为 ADMM 参数。为了确定模型参数值,使用了具有 5 倍交叉验证的网格搜索技术。将  $C_1$  设置为等于  $C_2$ , 其中,  $C$  和  $\gamma$  的搜索范围为  $[10^{-3}, 10^{-2}, \dots, 10^3]$ , 另外,  $\gamma \& \text{Element}$ :  $[10^{-3}, 10^{-2}, \dots, 10^3]$ 。  $\epsilon$  是影响模型的稀疏性和整体性能的有影响力的参数, 用于控制不敏感边距的宽度。如图 7 可知,  $\epsilon$  值为  $0 \sim 0.05$  时最好。

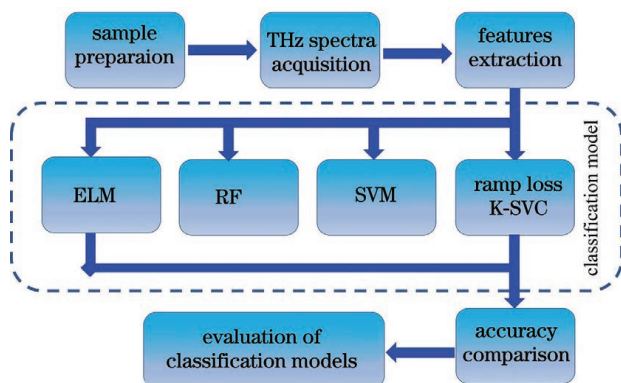


图 6 不同基原的太赫兹识别流程图

Fig. 6 Flow chart of terahertz identification of different origins

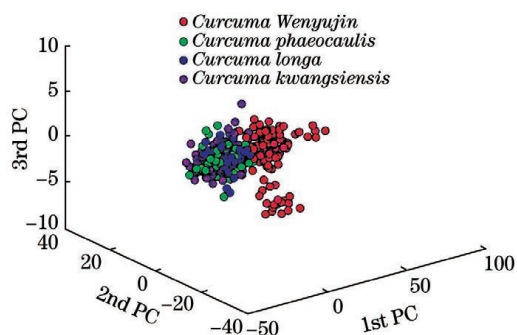


图 7 四种基原的 PCA 分类

Fig. 7 PCA classification of four origins

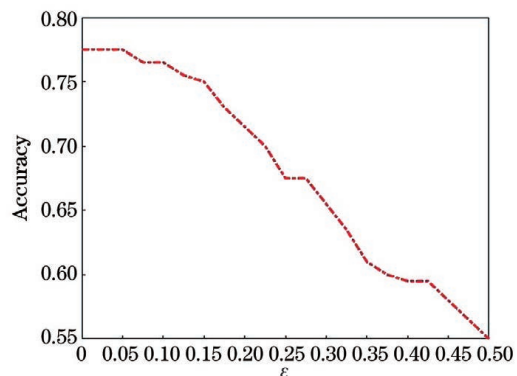


图 8 Ramp Loss K-SVC 参数选择

Fig. 8 Parameter selection of Ramp Loss K-SVC

ROC 分析始终用于描述一种检测方法的性能, 该检测方法通过图形方法在两个互斥条件之间进行区分。在分类中, ROC 分析是评估样品区分程度的有效工具, 因为它可以测量每个类别的正确比率。如表 1 所示, 可以通过两类分类获得四个结果。正确的阳性率 (TPR) 定义为真阳性 (TP) 除以 TP 与假阴性 (FN) 的和, 并用于测量正确识别的阳性比例。误报率 (FPR) 定义为真阴性 (TN) 除以假阳性 (FP) 与 TN 的和。如图 8 所示, ROC 曲线由 TPR (垂直轴) 和 FPR (水平轴) 描述, AUC 表示 ROC 曲线下的面积。它是 ROC 分析的指标, 在  $0.5 \sim 1$  的范围内, AUC 的值越大, 分类越好。如果 AUC 的值等于 1, 则所有样本均已正确分类, 但是, 如果 AUC 的值不大于 0.5, 则分类是没有意义的。根据表 1 可知, 优化后 Ramp Loss K-SVC 法对药材的鉴别率达到了 93%, 远远超过了其他三种鉴别方法。

表 1 四种识别模型的准确性

Table 1 Accuracy of four kinds of identification models

Type	Classification results (true/total)			
	Ramp Loss K-SVC	SVC	RF	ELM
<i>Curcuma Wenyujin</i>	50/50	50/50	50/50	47/50
<i>Curcuma phaeocaulis</i>	42/50	11/50	30/50	25/50
<i>Curcuma longa</i>	44/50	46/50	36/50	25/50
<i>Curcuma kwangsiensis</i>	50/50	45/50	43/50	40/50
Accuracy / %	93	76	79.5	68.5

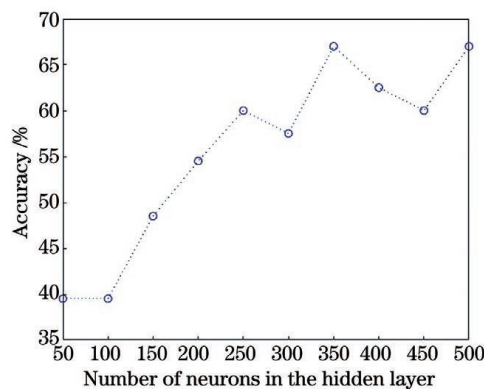


图 9 隐藏层的神经元数量

Fig. 9 Number of neurons in the hidden layer

## 4 结 论

本文使用  $0.5 \sim 2$  THz 范围内的 Ramp Loss K-SVC 法可以快速区分四种不同基原, 并达到 93% 以上的预测准确性。这种方法解决了对传

统中草药检测方法的人为经验和化学分析中试剂消耗的问题。本文容易混淆的四种基原的郁金提供了一种新的鉴别方法,也为其他中药材的鉴别提供了参考方法。随着 THz-TDS 技术的不断发展与成熟,该技术势必成为鉴别中药的重要手段,该方法对补充和完善中药质量标准,保证中药安全合理运用具有重要的理论和现实意义。

**致谢** 感谢莱仪特大赫兹(天津)科技有限公司对本实验提供的仪器设备,感谢天津大学精密仪器学院王璞同学对本实验的大力辅助。

### 参 考 文 献

- [1] Zhong G S. Traditional Chinese medicine[M]. Beijing: Chinese Medicine Press, 2012.  
钟赣生. 中药学[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2012.
- [2] Chinese Pharmacopoeia Commission. China pharmacopoeia [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Association, 2010.  
国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010.
- [3] Shen Y, Lu B, Zhang S, et al. Diterpenoid C of Radix Curcumae: an inhibitor of proliferation and inducer of apoptosis in human colon adenocarcinoma cells acting via inhibiting MAPK signaling pathway [J]. *Pharmaceutical Biology*, 2014, 52(9): 1158-1165.
- [4] Zhang W X, Zhu T T, Lu Y M, et al. Influence of Curcumae Decoction in p53 and caspase-3 expressions in hepatocytes of mice with acute hepatic injury induced with carbon tetrachloride and its protective effect on liver injury[J]. *Journal of Jilin University (Medicine Edition)*, 2014, 40(1): 82-86, 221.  
张婉娴, 朱彤彤, 鲁育铭, 等. 郁金水煎剂对四氯化碳致急性肝损伤小鼠肝细胞 p53 和 caspase-3 表达的影响及其对肝损伤的保护作用[J]. *吉林大学学报(医学版)*, 2014, 40(1): 82-86, 221.
- [5] Sharmin S A, Alam M J, Sheikh M M I, et al. Micropropagation and antimicrobial activity of *Curcuma aromatica* Salisb., a threatened aromatic medicinal plant [J]. *Turkish Journal of Biology*, 2013, 37: 698-708.
- [6] Xia Q, Wang X, Xu D J, et al. Inhibition of platelet aggregation by curdione from curcuma Wenyujin essential oil [J]. *Thrombosis Research*, 2012, 130(3): 409-414.
- [7] Ak T, Gülçin İ. Antioxidant and radical scavenging properties of curcumin[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2008, 174(1): 27-37.
- [8] Xiao X H, Zhao X J, Zhao Q G, et al. Histological and morphological studies on the tuberous roots of curcuma l. in China [J]. *Pharmaceutical Journal of Chinese PLA*, 2004, 20(2): 84-87.  
肖小河, 赵祥军, 赵庆国, 等. 郁金类中药材的显微鉴别[J]. *解放军药学学报*, 2004, 20(2): 84-87.
- [9] Wang L Y, Zhang M, Zhang C F, et al. Diaryl derivatives from the root tuber of *Curcuma longa* [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2008, 36(5/6): 476-480.
- [10] Lin Q Y, Zhang N, Fang D S, et al. Identification of different varieties of radix curcumae by TLC [J]. *Journal of Sichuan of Traditional Chinese Medicine*, 2008, 26(5): 34-35.  
林琪宇, 张娜, 方道硕, 等. 不同品种郁金的薄层鉴别[J]. *四川中医*, 2008, 26(5): 34-35.
- [11] Wang L Y, Wang Y L. Identification of radix curcumae from different species by ultraviolet spectra [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2012, 29(6): 3536-3538.  
王丽瑶, 王永禄. 不同基原郁金的紫外光谱鉴别[J]. *光谱实验室*, 2012, 29(6): 3536-3538.
- [12] Huang M A, Chen X L, Xiao L P, et al. Application of FTIR cluster analysis and DTA on quality of different varieties of radix curcumae [J]. *Chinese Journal of Hospital Pharmacy*, 2008, 28(14): 1156-1159.  
黄美爱, 陈晓龙, 肖丽萍, 等. 红外光谱法结合热差分析法用于郁金品种的鉴定[J]. *中国医院药学杂志*, 2008, 28(14): 1156-1159.
- [13] Sun Y, Wang J, Ye Z H. Turmeric, turmeric, rhizoma zedoariae identification and high performance liquid chromatography determination of curcumin content [J]. *Journal of Practical Traditional Chinese Internal Medicine*, 2013, 27(9): 85-86.  
孙瑜, 王健, 叶志华. 姜黄、郁金、莪术鉴别及高效液相色谱法测定姜黄色素含量[J]. *实用中医内科杂志*, 2013, 27(9): 85-86.
- [14] Liu Y H, Liu Q L, Huang Z F, et al. Comparison study on GC fingerprints of curcumae radix volatile oil [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2012, 18(24): 166-170.  
刘玉红, 刘倩伶, 黄志芳, 等. 不同基原郁金挥发油 GC 指纹图谱的比较[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2012, 18(24): 166-170.
- [15] Shi L C. Use of DNA barcoding to identify Chinese medicinal plants of zingiberaceae [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009.



- 石林春. 姜科药用植物 DNA 条形码鉴定研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [16] 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.  
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.
- [17] Fu Y J. Terahertz time-domain spectroscopy of amino acid interaction with water [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.  
付远见. 氨基酸与水相互作用的太赫兹光谱研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
- [18] Yun S L, Li Y Z, Cui W Z. Terahertz principles of science and technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012.  
Yun-ShikLee, 李允植, 崔万照. 太赫兹科学与技术原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [19] He M X, Guo S. Research on application of terahertz technology in drugs[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(8): 663-672.  
何明霞, 郭帅. 太赫兹波技术在药理学上的应用研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(8): 663-672.
- [20] Li F L, Ren R D, Wang X K, et al. The theory and some applications of terahertz radiation[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(S1): 785-791.  
李福利, 任荣东, 王新柯, 等. 太赫兹辐射原理与若干应用[J]. *激光与红外*, 2006, 36(S1): 785-791.
- [21] Rao J Q, Zhao Q D, Qiu F. Progress on application of terahertz time-domain spectroscopy in identification of traditional Chinese medicine [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(4): 825-828.  
饶近秋, 赵启铎, 邱峰. 太赫兹时域光谱技术在中药鉴别中的应用进展 [J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(4): 825-828.
- [22] Zhang L, Li C, Li T Y, et al. Classification of calculus bovis and its confounding substances based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 233001.  
章龙, 李春, 李天莹, 等. 基于太赫兹时域光谱的牛黄及其易混品分类研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 233001.
- [23] 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.
- [24] Wu J R, Lü Z Q, Lu X, et al. Characteristics of second harmonic generation in erbium doped femtosecond fiber lasers based on quasi phase matching [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0701001.  
吴嘉瑞, 吕志强, 陆星, 等. 基于准相位匹配的掺铒飞秒光纤激光器倍频特性研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0701001.
- [25] 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.
- [26] Wang P, He M X, Li M, et al. Application of terahertz spectroscopy in the detection of bioactive peptides [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(9): 2696-2701.  
王璞, 何明霞, 李萌, 等. 太赫兹光谱技术在生物活性肽检测中应用研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(9): 2696-2701.
- [27] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Springer, 1995.
- [28] Xu H D, Lin L L, Li Z, et al. Nephrite origin identification based on Raman spectroscopy and pattern recognition algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 330001.  
徐荟迪, 林露璐, 李征, 等. 基于拉曼光谱和模式识别算法的软玉产地鉴别 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 330001.
- [29] Ma J J, Pan Q, Liang Y, et al. Object detection based on improved Grassberger entropy random forest classifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704011.  
马娟娟, 潘泉, 梁彦, 等. 基于改进 Grassberger 熵随机森林分类器的目标检测 [J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704011.
- [30] 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.
- [31] Huang G B, Zhu Q Y, Siew C K. Extreme learning machine: theory and applications [J]. *Neurocomputing*, 2006, 70(1/2/3): 489-501.
- [32] Ji R S, Chen X Y, Liu S Z, et al. Nondestructive



testing of volatile oil of zanthoxylum bungeanum based on hyperspectral technique and IRIV-FOA-ELM algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 203002.

纪然仕, 陈晓燕, 刘素珍, 等. 基于高光谱技术和 IRIV-FOA-ELM 算法的花椒挥发油无损检测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 203002.