



食品工业科技

Science and Technology of Food Industry

ISSN 1002-0306, CN 11-1759/TS

《食品工业科技》网络首发论文

题目：基于太赫兹时域光谱的芝麻油品种识别研究
作者：武国芳，张元，蒋玉英，葛宏义，廉飞宇
网络首发日期：2019-10-28
引用格式：武国芳，张元，蒋玉英，葛宏义，廉飞宇. 基于太赫兹时域光谱的芝麻油品种识别研究. 食品工业科技.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20191028.1033.008.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于太赫兹时域光谱的芝麻油品种识别研究

武国芳¹ 张元^{1,2,*} 蒋玉英^{1,2} 葛宏义^{1,2} 廉飞宇^{1,2}

(1.河南工业大学信息科学与工程学院, 河南郑州 450001 ;

2.河南工业大学粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 河南郑州 450001)

摘要：为了实现对芝麻油品种的快速鉴别, 本文基于太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 提出一种芝麻油品种识别的方法。选取 0~2.5 THz 范围内的光谱进行分析, 通过主成分分析法(PCA)对时域光谱数据进行降维, 选择前 4 个主成分 (累计贡献率大于 99%) 代表原始数据, 然后利用支持向量机(SVM)方法对不同品种芝麻油进行分类识别, 分类时使用 3 种不同的核函数建模, 并采用网格搜索算法获得最优模型及其模型参数。使用径向基核函数 (参数为惩罚函数 $C=0.01$, 核函数系数 $\gamma=0.1$) 的模型识别率最高, 达到 100%, 说明太赫兹时域光谱技术结合 PCA 和 SVM 方法可以快速可靠的进行食用油的识别, 为食品安全的识别提供一种新的技术手段。

关键词：太赫兹时域光谱, 芝麻油, 支持向量机, 主成分分析

中图分类号：TS225 文献标识码：A

Identification of Sesame Oil Varieties Based on Terahertz Time Domain Spectroscopy

WU Guo-fang¹ ZHANG Yuan^{1,2,*} JIANG Yu-ying^{1,2} GE Hong-yi^{1,2}
LIAN Fei-yu^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology,
Zhengzhou 450001, China;

2. Key Laboratory of Grain Information Processing and Control, Ministry of
Education, Zhengzhou 450001, China)

基金项目：国家自然科学基金项目(61705061)；“十三五”国家重点研发计划项目 (2017YFD00003)；
中原学者项目 (172101510005)

作者简介：武国芳 (1996-) ,女, 硕士研究生,研究方向：太赫兹波检测, Email : wuguofangwy@163.com。

*通讯作者：张元 (1961-) ,男, 博士,教授, 研究方向：粮食信息处理, Email : zhangyuan@haut.edu.cn。

Abstract: In order to realize the rapid identification of sesame oil varieties, this paper proposed a method for sesame oil variety identification based on terahertz time domain spectroscopy. The spectrum in the range of 0~2.5 THz was selected for analysis, and the time domain spectral data was reduced by principal component analysis (PCA). The first four principal components (cumulative contribution rate greater than 99%) were selected to represent the original data, and then the support vector machine (SVM) method was used to classify and identify different varieties of sesame oil. Three different kernel functions were used for classification, and the grid model was used to obtain the optimal model and its model parameters. Using the radial basis kernel function (parameter penalty function $C=0.01$, kernel function coefficient $\gamma=0.1$), the model recognition rate was the highest, reaching 100%, indicating that the terahertz time domain spectroscopy technology combined with PCA and SVM methods can be quickly and reliably consumed, providing a new technical means for the identification of food safety.

Keywords: terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS); sesame oil; support vector machine (SVM); principal component analysis (PCA)

芝麻油是通过加工芝麻得到的一种食用油，可以加入菜肴中进行调味，也可进行烹饪、煎炸，香味浓郁，并且含有丰富的微量元素，以及人体所需的脂肪酸和氨基酸等，日益受到人们的广泛关注^[1,2]。由于芝麻油的良好市场价值，个别制造商为了从中牟取利益，将其它成本低的植物油参杂到芝麻油中，有的甚至将使用剩下的油渣中提取出来的油（如地沟油等）和芝麻油进行勾兑，这不仅损害了消费者的利益，还有可能会对消费者造成一定的身体伤害^[3,4]。

传统的识别芝麻油的方法主要有电导法和色谱法，其中色谱法可以分为气相色谱法、液相色谱法和薄层色谱法等^[5]，传统方法有很多局限性，如样品需要预处理、耗时长、操作复杂、损害样品等。近年来光谱法成为一种新兴的识别食用油的方法，光谱法可以不破坏样品从而实现无损检测，主要有近红外光谱法、拉曼光谱法和荧光光谱法等^[6]。冯苏敏等^[7]使用荧光光谱法结合化学计量法鉴别食用油和煎炸油，张严等^[8]采用近红外光谱法对花生油、芝麻油等五种油进行了定性分析，结果显示可以很好的鉴别出不同的食用油。但由于光谱信号重叠或光谱中包含有用信息较少，这些方法有一定的局限性。

太赫兹波是一种介于微波和红外之间的电磁波，频率范围在 0.3~10 THz，太赫兹辐射具有良好的透视性、安全性和光谱分辨率^[9,10]。已经在安全检查、对化学和生物制剂的检测、环境控制、医疗诊断等领域得到了广泛的应用^[11,12]。目前在农产品和食品安全领域的应用也

在不断增多，如农产品和食品含水量检测、食品内部品质检测和种子识别等^[13]。廉飞宇等^[14]采用 THz-TDS 对 4 种食用油进行鉴别，结合化学计量法对太赫兹光谱进行分析，实验结果表明太赫兹技术可以很好的应用在食用油鉴别上。李杰等^[15]将太赫兹技术应用于成品油的混油识别，不同混油比例的油品折射率谱和吸收系数谱有所差异。殷明等^[16]采用宽频太赫兹时域光谱仪结合化学计量法对食用油进行定量和定性分析，实验结果显示模型分类准确率可以达到 100%。余俊杰等^[17]利用太赫兹时域光谱技术对掺假橄榄油进行定性和定量分析，最终模型预测精度高，能够快速检测橄榄油的品质。太赫兹光谱技术在油类鉴别上已经有了很好的应用，因此本文选用该方法进行芝麻油的鉴别研究。

本文采用太赫兹时域光谱技术结合主成分分析和支持向量机来区分不同品种的芝麻油，分析了芝麻油在太赫兹时域光谱技术的作用下的特性，建立了一种快速鉴别芝麻油品种的定性分析模型，对比了不同核函数模型下的鉴别的准确性，为不同品种芝麻油的鉴别提供了一种快速准确的方法。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

本次实验的样品选自市面上四种不同品种芝麻油，分别购于京东网上商城，其具体参数如表 1 所示。

表 1 样品信息

Table 1 Sample information

品种	加工工艺	脂肪含量	能量	生产日期	标签
正道	水代法	99.9%	44%	2019/1/19	A ₁
福临门	水代法	99.9%	44%	2018/12/25	A ₂
蔡林记	水代法	99.7%	44%	2019/1/24	A ₃
南阳	水代法	99.7%	44%	2018/12/28	A ₄

本实验采用的是大恒光电的 CIP-TDS 时域光谱仪，系统基本光路结构如图 1 所示。飞秒激光被分为两束，一束为泵浦光，一束为探测光，泵浦光用来激发发射器产生太赫兹波，探测光则用来激发探测器来检测太赫兹光。泵浦脉冲和探测脉冲出自于同一束激光，所以存在一定的时间关系，其中延迟线用来调节泵浦脉冲和探测脉冲之间的相对时间关系，具体实验原理可见参考文献^[18,19]。为了防止空气中水分含量对实验结果的影响，测试时需要充氮气，

将仪器内部湿度保持在 5%以内。

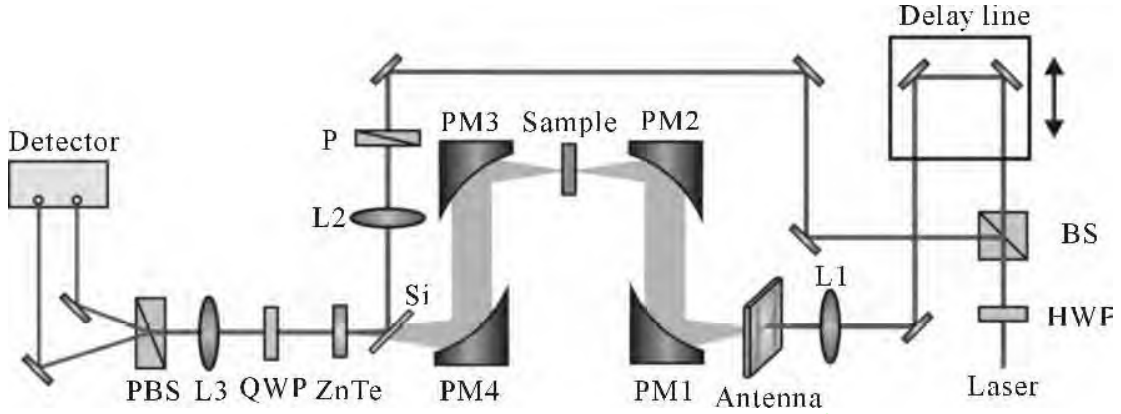


图 1 太赫兹系统结构图

Figure 1 Terahertz system structure diagram

1.2 实验方法

测量时使用光程为 1 mm 的标准比色皿，容量为 0.35 mL，每种品种制备 20 组样品。太赫兹仪器以钛宝石飞秒激光器作为发射激光的光源，光谱范围为 0.1~3.5 THz，扫描范围大于 500 ps，扫描方式为透射式扫描。

随机选择样品使用 THz-TDS 系统采集时域光谱，移动样品改变测量点，重复操作三次，每个样品得到三组光谱信息，取三次测量的平均值得到最终的样品光谱，记为信号波形。扫描样品之前测量不装样品的空比色皿的光谱作为参考信号，称为参考波形。

对样品信号和参考信号进行快速傅里叶变换，得到样品的频谱 $A_s(\omega)\exp[-i\varphi_s(\omega)]$ 和参考信号的频谱 $A_r(\omega)\exp[-i\varphi_r(\omega)]$ 。本次实验使用的光谱仪采用的是透射式的扫描方式，样品的吸收系数和折射率可以通过与参考光谱的比较中得出来：

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{A_r}{A_s} \quad (1)$$

$$n = 1 + \frac{[\varphi_s(\omega) - \varphi_r(\omega)]c}{d\omega} \quad (2)$$

其中 α 为吸收系数， n 为折射率， d 为样品厚度， c 为真空中的光速。利用上述公式可以计算出样品的吸收系数和折射率^[9,20]。

1.3 模型与方法

1.3.1 主成分分析

主成分分析法(PCA)是一种常用的降维方法，可以在信息损耗很低的情况下减少数据集的维数，使用较少的数据保留最大的原始数据的特性^[21]。它的目标是通过线性投影将高维数据映射到低维空间中，在高维数据中找到方差最大的方向，将数据映射到比原始数据维数低的空间中去^[22]。

PCA 的实现步骤包括以下几点：

假设数据为 m 条 n 维。

a. 原始数据组成矩阵 $X = \{X_1, \dots, X_m\}$, $X_i = \{x_{i1}, \dots, x_{in}\} \in \mathcal{R}^n, i = 1, \dots, m$ 将样本去中心化，为了方便表示仍用 X 表示去中心化后的矩阵。

b. 计算协方差矩阵

$$C = \frac{1}{m}XX^T = \begin{pmatrix} \frac{1}{m}\sum_{i=1}^m x_{1i}^2 & \dots & \frac{1}{m}\sum_{i=1}^m x_{1i}x_{ni} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{m}\sum_{i=1}^m x_{1i}x_{ni} & \dots & \frac{1}{m}\sum_{i=1}^m x_{ni}^2 \end{pmatrix}$$

c. 计算协方差矩阵的特征值和特征向量

构造特征方程：

$$(C - \lambda I)\vec{v} = 0$$

计算得特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 和特征向量 $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$ 。

d. 将特征值降序排序得

$$\lambda_a > \lambda_b > \dots > \lambda_r$$

e. 选择 k 个最大的特征值对应的特征向量构建到新空间中

前 k 个特征值对应得特征向量为 $\vec{v}_a, \vec{v}_b, \dots, \vec{v}_k$ 组成矩阵 $P = (\vec{v}_a, \vec{v}_b, \dots, \vec{v}_k)$, 新的样本矩阵为 $Y = PX$ 。

1.3.2 支持向量机

支持向量机 (SVM) 是一种分类器，适合小样本的分类，它的工作原理是找到一个超平面，这个超平面可以将数据集分隔出来，使不同类别的数据到超平面的距离最短^[23]。因为支持向量机是一种典型的二分类器，而实际应用过程中遇到的问题一般都是多分类问题，因此需要使用间接的方法将支持向量机拓展应用到多分类问题上。主要的方法有一对一法，一对多法和分层支持向量机的方法^[24,25]。

一对一 (one versus one) 主要的思想是分别在两个不同的类别之间和建立一个分类器，n 个样本需要建立 $n(n-1)/2$ 个分类器。一对多 (one versus rest) 主要的思想是将一个类别作

为一个类，其余的类别作为另一个类， n 个样本需要 n 个分类器。分层支持向量机主要的思想是将所有的数据分为两个类，然后分别对这两个类进行二分类，直到子类中只剩下一个类为止^[26,27]。

当数据集线性不可分时，需要引用核函数来进行分类。常用的核函数有线性核函数 (linear)、径向基核函数 (rbf)、多项式核函数和 (poly) 双曲正切核函数 (sigmoid)，实验时需要调节惩罚系数 C 和核函数系数 γ (线性核函数只需调节惩罚系数 C)，使分类正确率达到最大。

1.3.3 PCA-SVM

原始数据集的维数如果很大，直接使用 SVM 进行分类处理的速度会比较慢，因此可以采用 PCA 和 SVM 联用的方法，即先采用 PCA 进行降维，选择前几个基本可以代替原始数据集的主成分，使用这几个主成分作为 SVM 的输入，然后进行分类^[28]。本次实验中原始太赫兹数据的维数为 580，所以选择 PCA-SVM 联用，即采用 PCA 将原始数据的维度降到 4 维，再使用前四个主成分作为 SVM 的输入。

1.3.4 数据处理

将所有样品使用太赫兹仪器进行检测之后得到样品的时域数据，选取 0~2.5THz 范围内的数据作为本次实验的原始数据，使用 Origin 软件处理原始数据，将光谱数据导入到 Origin 中，画出时域图，然后进行傅里叶变换得到频谱图，输入吸收系数和折射率的公式进行计算得到相应的吸收系数和折射率；对光谱数据进行预处理，并对处理结果进行比较，选取最优的预处理方法；使用 Spyder 软件进行建模分析，将 Origin 中处理得到的数据输入到 PCA-SVM 模型中，使用网格搜索算法寻取最优参数，得到最终的最优模型。

2 结果与分析

2.1 频谱分析

2.1.1 时域和频域

通过太赫兹时域光谱系统获得样品的 0~2.5 THz 时域波形如下图 2 所示。参考信号与样品信号波形间有一定的时间延迟容易区分，但样品信号之间的差异不明显，样品的太赫兹时域光谱可以反映不同的脂肪酸分子对太赫兹辐射的响应。芝麻油中一般含有 6 种主要的脂肪酸，包括棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、二十碳烷酸、亚麻酸。不同品种的芝麻油中含有的 6 中脂肪酸的组成比例没有太大的差别，但是含量会有差异，如正道脂肪酸的含量为 99.9%，蔡林记脂肪酸含量为 99.7%，福临门的脂肪酸含量虽然与正道的含量相同，南阳脂肪酸含量

与蔡林记相同,但是由于原料的来源不同,会有细微的差别,所以需要借助仪器来进行区分。直接观测波形不能直接看出不同品种的差别,局部放大后可以观测到在部分区间不同品种的波形相互分离,可以直接区分出来。

对时域数据进行傅里叶变换后得到样品的频谱图如下图 3 所示,因为后面波段受到的干扰较大,所以选取 0~2.5 THz 范围内的波形进行观测。正道黑芝麻油的频谱与其它三种品种芝麻油的频谱有明显的区分,蔡林记芝麻油、福临门芝麻油和南阳芝麻油三条频谱图混叠在一起不能明显的区分。

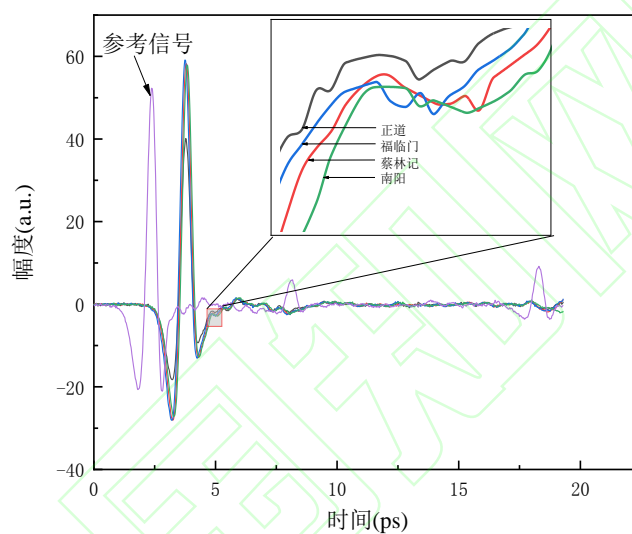


图 2 四种芝麻油的时域波形

Figure 2 Time domain waveform of four kinds of sesame oil

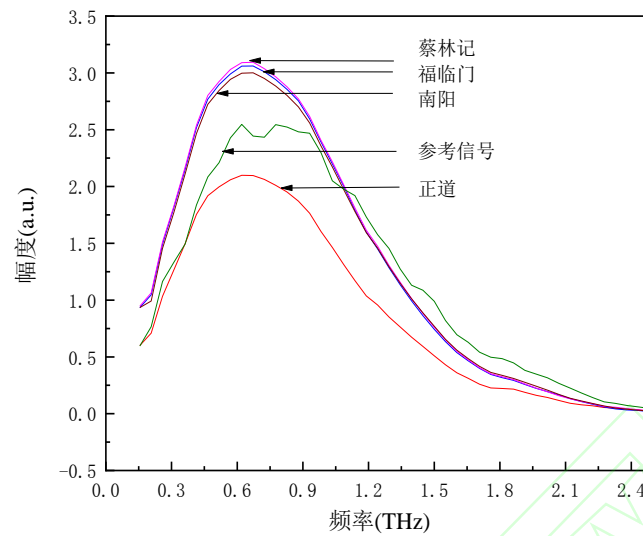


图 3 四种芝麻油的频域波形

Figure 3 Frequency domain waveform of four kinds of sesame oil

2.1.2 折射率和吸收系数

因为太赫兹时域数据中包含振幅和相位的信息，太赫兹时域光谱可以直接的计算样品的吸收系数和折射率，不需要使用 Kramers-Kronig 关系进行变换得到。所以直接使用公式 (1) 和公式 (2) 进行计算得到折射率和吸收系数如下图 4 和图 5 所示。折射率谱在 0~2.5 THz 几乎完全重叠，在 2.5 THz 之后开始波动分离。吸收光谱正道与其它品种相分离，其它三个品种吸收光谱相近。折射率与吸收系数相比，吸收系数的区分度相对较大，因此选用吸收系数作为后面分类的数据源。

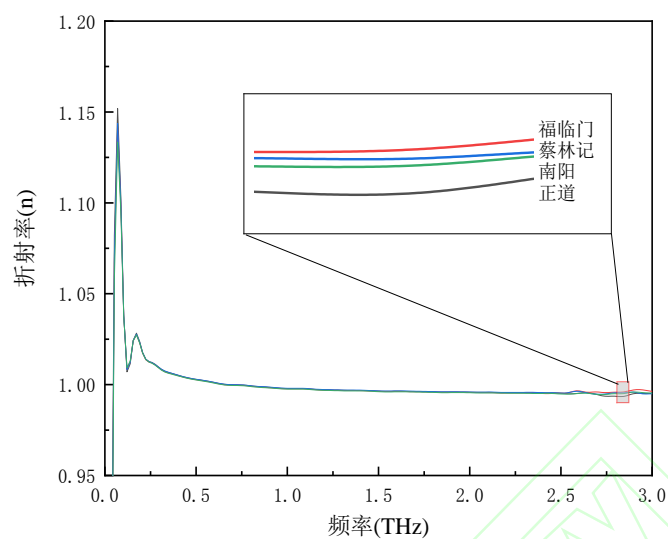


图 4 四种芝麻油的折射率波形

Figure 4 Refractive index waveforms for four types of sesame oil

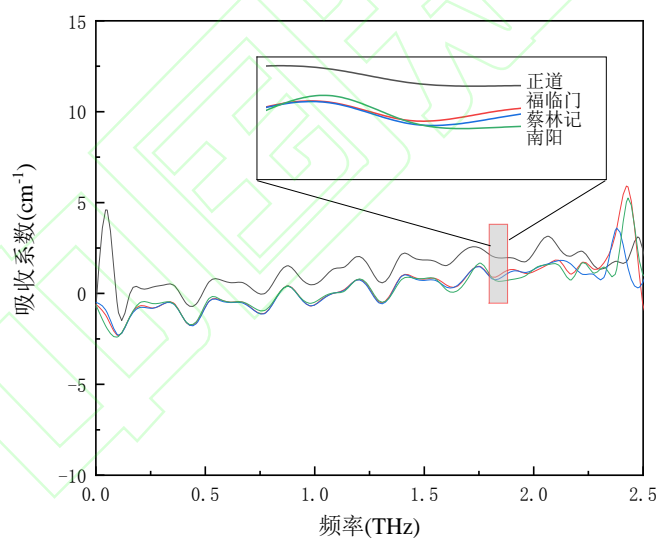


图 5 四种芝麻油的吸收系数波形

Figure 5 Absorption coefficient waveform of four sesame oils

2.1.3 数据预处理

吸收系数谱中正道可以明显区分，其它三种接近重叠，因此为了更好的区分不同品种的芝麻油需要对数据进行预处理。本次实验采用了微分、积分和归一化三种方法分别对数据进行预处理，处理后的结果如下图 6~图 8 所示，由图可知采用微分和积分处理后的数据依旧

不容易区分，采用归一化处理后的数据可以比较明显的区分出不同品种的芝麻油，所以选择归一化处理作为最终的预处理方法，然后对预处理后的数据继续采用机器学习的算法进一步分类。

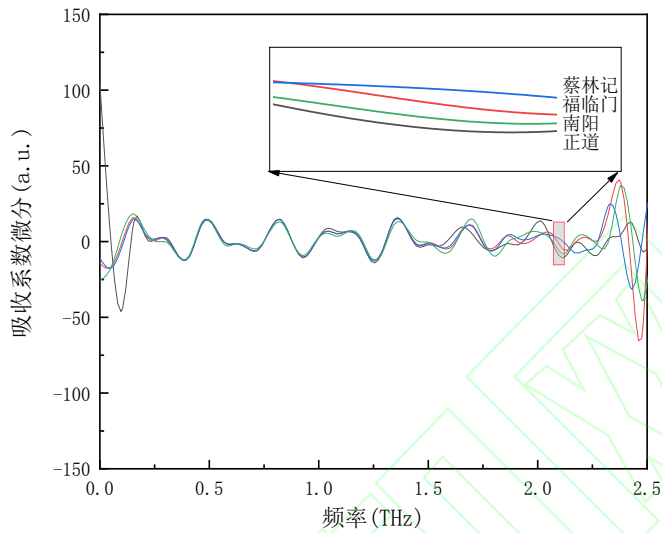


图 6 吸收系数微分预处理

Figure 6 Differential preprocessing of absorption coefficient

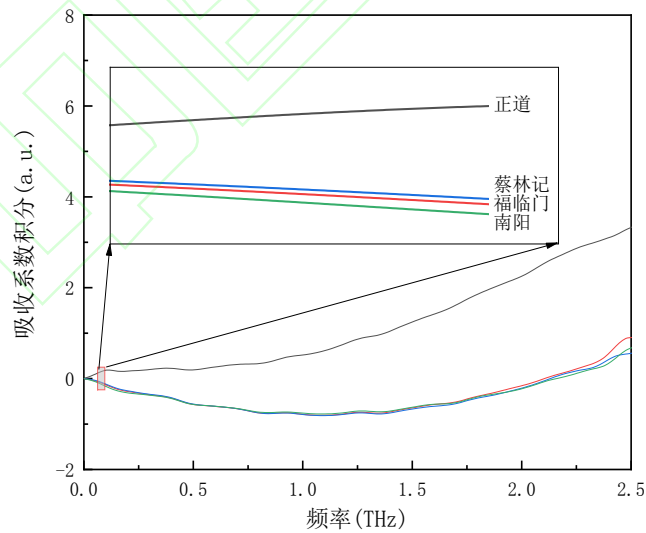


图 7 吸收系数积分预处理

Figure 7 Integral preprocessing of absorption coefficient

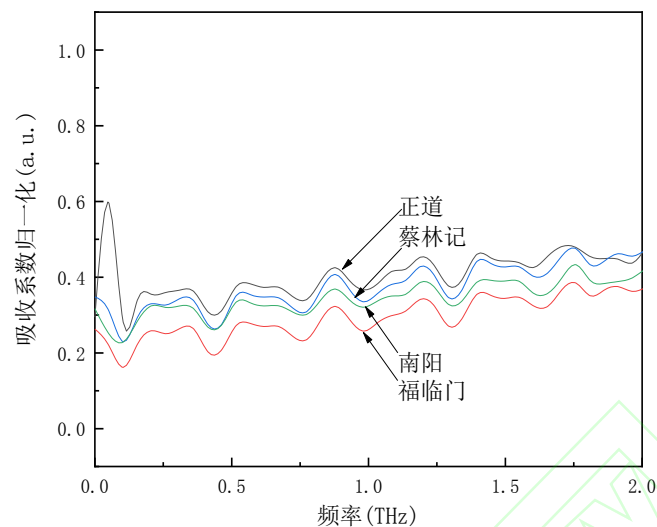


图 8 吸收系数归一化预处理

Figure 8 Normalization preprocessing of absorption coefficient

2.2 PCA 分析

本次实验原始数据为 580 维，直接使用 SVM 分类效率会比较低，所以先采用 PCA 降维，最终保留前 4 个主成分，使用前 4 个主成分代替原始数据集，作为 SVM 分类模型的输入。保留的前 4 个成分对原始数据的贡献率为 99.506%，表 1 为各成分解释总方差。为了直观的观测聚类效果，选取前两个主成分画出得分图，前两个主成分累计贡献率为 98.944%，图 9 为前两个主成分的得分图，从图中可以看出来四种不同品种的芝麻油有比较好的聚类作用，基本可以区分出不同品种的芝麻油。为了更加精确快速的区分，继续采用 SVM 进行分类。

表 2 各成分解释总方差

Table 2 Each component explains the total variance

主成分	特征值/%	累计可信度/%
PC1	60.226	60.226
PC2	38.718	98.944
PC3	0.437	99.381
PC4	0.125	99.506

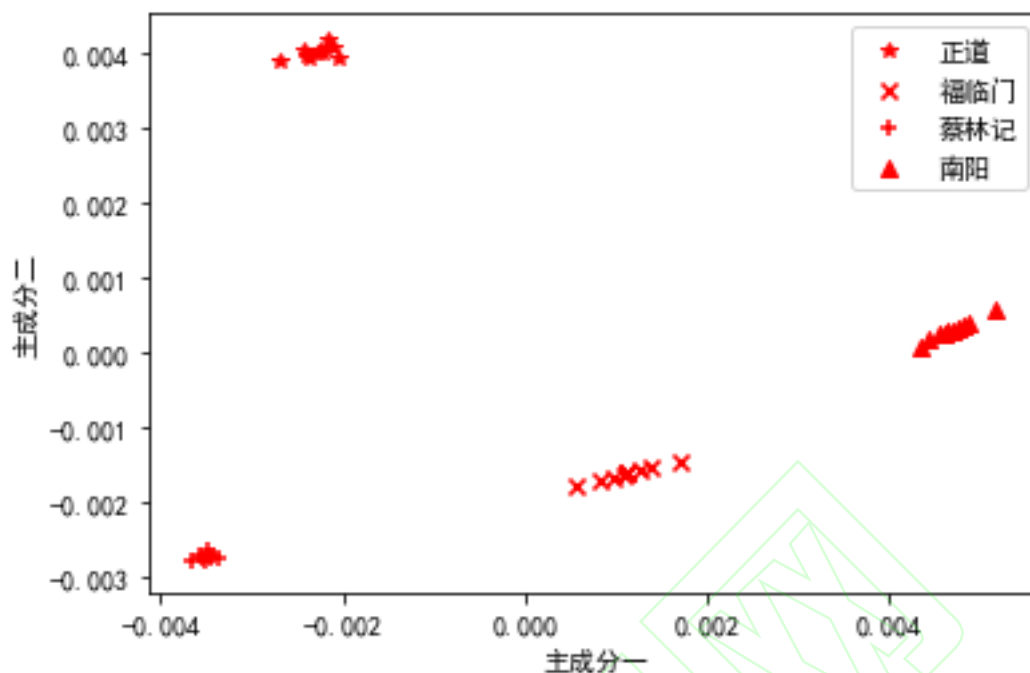


图 9 前两个主成分得分图

Figure 9 Score charts of the first two principal components

2.3 模型分析

采用 PCA-SVM 联用模型对样品进行分类, 先对原始数据集进行划分, 划分数据集使用 python 中的 `train_test_split()` 函数, 其中参数 `stratify` 可以保证按照不同种类样品的比例分配, 训练集和测试集的比例为 7:3。为了得到更好的分类效果, 实验采用网格搜索算法得出分类准确率最高的参数组合。主要对核函数 (kernel)、惩罚函数 (C)、核函数系数 (γ) 进行搜索。不同核函数的分类准确率如下表 3, 线性核函数的总分类正确率为 87.3%, 分类准确率在三类核函数中最低, 多项式核函数总分类正确率为 91.5%, 比线性核函数高, 径向基核函数分类正确率最高, 最高可以达到 100%, 即可以将全部样品分类正确, 说明在本次实验中径向基核函数是最佳的分类核函数, 最佳分类效果的参数为惩罚函数 C 为 0.01, 核函数系数 γ 为 0.1。

表 3 不同核函数的分类准确率

Table 3 Classification accuracy of different kernel functions

核函数	分类准确率/%				
	总和	正道黑	福临门	蔡林记	南阳
线性	87.3	80	91	86	92
径向基	100	100	100	100	100

多项式	91.5	100	80	100	86
-----	------	-----	----	-----	----

为了证明本文模型的性能,将本文的模型 PCA-SVM 与常见的分类模型随机森林(RF)、K 近邻法 (KNN) 和逻辑回归 (LR) 进行对比,这三种算法是常见的机器学习分类算法。如下表 4 所示,使用 PCA 对数据进行预处理后,再进行使用 SVM 进行分类效果要优于其它三种模型。对于 PCA-SVM 模型不同的核函数的分类效果会有一定的差异,由表 3 可知选择径向基作为核函数,且选取参数惩罚函数 C 为 0.01,核函数系数 γ 为 0.1 得到的模型分类效果最佳。总的来说,PCA-SVM 模型识别性能最佳。

表 4 不同模型的分类准确率

Table 4 Classification accuracy of different models

模型	识别正确率/%
RF	82.6
KNN	92.5
LR	96.4
PCA-SVM	100

3 结论

采用 THz-TDS 技术检测了四种芝麻油在 0~2.5 THz 波段的时域和频域谱,并计算得到折射率和吸收系数谱。实验结果表明太赫兹时域谱结合化学计量法在不同品种芝麻油的分类上有很好的效果。不同品种的芝麻油含有不同类型的脂肪酸分子混合物,因此使用太赫兹技术进行检测时不同脂肪酸分子的响应反应在光谱图上,虽然直接观测不明显,但是结合化学计量法,分类准确率在 87%~100%。实验同时表明太赫兹时域光谱技术在食品安全识别方面具有广阔的应用前景。

参考文献：

- [1]王有菲.不同原料芝麻油挥发性风味成分的研究[J].粮食与食品工业, 2017, 24(2):24-27
- [2] Qingsong Luo, Yang Chen, Qiang Xu, et al. Near-infrared-based Identification of Sesame Oil Authenticity[J]. IOP Conference

Series: Materials Science and Engineering, 2018, 452(2):22-53

- [3]董悦阳, 席佳锋, 刘磊, 等.芝麻油品质检测方法的研究与分析[J].中国调味品, 2018, 43(12):178-180
- [4]孔德明, 李雨蒙, 崔耀耀, 等.结合小波压缩和的三维荧光光谱技术在掺伪芝麻油鉴别中的应用[J].光学学报, 2019, 39(3):412-422
- [5]苏蕊, 梁大鹏, 李明, 等.食用油品质的检测技术进展[J].岩矿测试, 2012, 31(1):57-63
- [6]黎远鹏.基于拉曼光谱法的食用油定性鉴别与掺伪含量检测研究[D].暨南大学, 2016.
- [7]冯苏敏, 孙淑敏, 谢岩黎.基于同步荧光光谱法对食用油和煎炸油鉴别研究[J].粮食与油脂, 2016, 29(8):71-75
- [8]张严.近红外光谱技术快速鉴别与检测食用油掺伪研究[D].河南工业大学, 2015.
- [9]许景周, 张希成.太赫兹科学技术和应用[M]. 北京大学出版社, 2007:70-71.
- [10]罗娜, 王冬, 王世芳, 等.太赫兹技术在农产品品质检测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(2):349-356
- [11]曹灿, 张朝晖, 赵小燕, 等.太赫兹时域光谱与频域光谱研究综述[J].光谱学与光谱分析, 2018, 38(9):2688-2699
- [12]张栋文, 袁建民.太赫兹技术概述[J].国防科技, 2015, 36(2):12-16
- [13]张兴宁, 陈稷, 周泽魁.太赫兹时域光谱技术[J].激光与光电子学进展, 2005, 42(7):35-38
- [14]廉飞宇, 付麦霞, 葛宏义, 等.太赫兹时域光谱识别种食用油真实性的研究[J].中国油脂, 2017, 42(7):69-73
- [15]李杰. 太赫兹时域光谱用于成品油识别的研究[D].天津大学, 2012.
- [16]殷明. 基于宽频太赫兹光谱和化学计量学的食用油脂鉴别及掺假检测研究[D].中国矿业大学, 2017.
- [17]余俊杰. 基于太赫兹光谱技术的橄榄油品质快速检测方法的研究[D].合肥工业大学, 2018.
- [18]陈立群, 高飞, 龚小竞, 等.一种利用透射式太赫兹时域光谱技术精确提取样品折射率的方法[J].红外与毫米波学报, 2013, 32(2):160-164
- [19]Zhang Y, Peng X H, Chen Y, et al.A first principle study of terahertz (THz) spectra of acephate[J].Chemical Physics Letters, 2008, 452(1-3):59-66
- [20]韩晓惠, 张瑾, 杨晔, 等.基于太赫兹时域光谱技术的光学参数提取方法的研究进展[J].光谱学与光谱分析, 2016, 36(11):3449-3454
- [21]Schweizer K, Cattin P C, Brunner R, et al.Automatic selection of a representative trial from multiple measurements using Principle Component Analysis[J].Journal of Biomechanics, 2012, 45(13):2306-2309
- [22]陈涛.基于主成分分析和模糊识别的生物分子太赫兹光谱识别[J].量子电子学报, 2016, 33(4):392-398
- [23]王芳, 郭帅, 赵景峰, 等.利用太赫兹时域光谱定性鉴别不同品种的苜蓿的研究英文[J].光谱学与光谱分析, 2018, 38(11):324-330
- [24] V Damian, M. Bojan, I. Iordache, et al.THz-TDS application on detecting organic substances[J].Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies, 2018
- [25]蒋玉英, 葛宏义, 张元.基于太赫兹成像技术的小麦麦芽糖定量检测研究[J].光谱学与光谱分析, 2018, 38(10):3017-3022
- [26]孙金海, 沈京玲, 郭景伦, 等.太赫兹时域光谱技术在玉米种子鉴定中的实验研究[J].光学技术, 2008, 34(4):541-543
- [27]YonghongZhao,ZhiLi,JianjunLiu,et al. Application of terahertz spectroscopy and theoretical calculation in dimethylurea isomers investigation[J].SpectrochimicaActa Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2018, 192(2018):336-342
- [28]聂美彤, 徐德刚, 王与焯, 等.基于衰减全反射式太赫兹时域光谱技术的食用油光谱特性研究[J].光谱学与光谱分析, 2018, 38(7):2016-2020