doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.038

基于太赫兹衰减全反射技术的花生霉变程度判别

刘翠玲[1,2]　胡　莹[1,2]　吴静珠[1,2]　邢瑞芯[1,2]　王少敏[1,2]

(1.北京工商大学计算机与信息工程学院,北京 100048;
2.北京工商大学食品安全大数据技术北京市重点实验室,北京 100048)

摘要:为了能够可靠、快速、便捷地检测花生仁不同程度的霉变,研究了一种基于太赫兹时域光谱技术、分别结合误差反向传播(Back propagation,BP)神经网络算法与支持向量机算法(Support vector machine,SVM)的霉变花生定性分析方法。为排除不同样本带来的偶然性,实验随机采集花育 36 号、鲁花 9 号两个花生品种进行霉变培养。依据花生的感官特征与前人的研究经验,将花生分为正常、轻度霉变、中度霉变与严重霉变 4 类,采用太赫兹衰减全反射技术采集花生仁样本光谱(波段 0.3~3.6 THz)。利用傅里叶变换方法对时域光谱信号进行频域变换并进行加窗处理,然后对所得频域信号进行光学常数吸光度与吸收系数的提取,得到样本的光学常数信号,并进行特征波段筛选。在此基础上分别建立 BP 神经网络定性分析模型与 SVM 定性分析模型。实验表明,BP 神经网络模型对花育 36 号花生霉变模型的预测集识别正确率为 88.57%,对鲁花 9 号花生霉变模型的预测集识别正确率为 91.40%;Lib-SVM 模型对两个品种花生霉变的二分类模型、3 类霉变花生的三分类模型的预测集识别正确率均为 100%。应用太赫兹时域光谱技术结合 SVM 算法检测霉变花生仁效果良好,具有一定的可行性。

关键词:霉变花生;太赫兹衰减全反射技术;误差反向传播神经网络;支持向量机;定性分析

中图分类号:O657.3;TS207.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)04-0333-06

Discrimination of Peanut Mildew Degree Based on Terahertz Attenuated Total Reflection Spectroscopy

LIU Cuiling[1,2]　HU Ying[1,2]　WU Jingzhu[1,2]　XING Ruixin[1,2]　WANG Shaomin[1,2]

(1. *School of Computer and Information Engineering*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*
2. *Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety*, *Beijing Technology and Business University*, *Beijing* 100048, *China*)

Abstract: In order to detect the different degrees of mildew of peanut kernels in an efficient, convenient and reliable way, a qualitative analysis method of mildew peanut based on back propagation (BP) neural network algorithm and support vector machine based on Terahertz (THz) time-domain spectroscopy was studied. In order to eliminate the contingency brought by different peanut samples, two peanut varieties, Huayu 36 and Luhua 9, were randomly collected for mildew culture. According to the sensory characteristics of peanut and the existing research foundation, the peanut samples were divided into four categories: normal, mild mildew, moderate mildew and severe mildew. The spectrum of peanut kernel samples (band 0.3~3.6 THz) was collected by THz total reflection. The Fourier transform method was used to perform frequency domain transformation on the time domain spectral signal and window processing. Then the optical constant absorbance and absorption coefficient of the obtained frequency domain signal were extracted, and the optical constant signal of the sample was obtained and the characteristic band was screened. On this basis, BP neural network qualitative analysis model and SVM qualitative analysis model were established respectively. Experiment results showed that the BP neural network model had a prediction set recognition rate of 88.57% for the Huayu 36 peanut mold model, and the prediction set recognition rate of the Luhua 9 peanut model was 91.40%; the Lib-SVM model for two varieties of peanut mold whether or not the two-class model, the three-class model of the three types of mildew peanuts had a prediction set recognition rate of 100%. It was shown that the application of Terahertz time-domain spectroscopy combined with BP neural network algorithm and SVM algorithm had a

收稿日期:2018-10-15　修回日期:2018-12-21
基金项目:北京市自然科学基金项目(4182017)
作者简介:刘翠玲(1963—),女,教授,博士,主要从事智能测量技术与数据处理研究,E-mail:liucl@btbu.edu.cn

good effect on detecting mildewed peanut kernels.

Key words: mildew peanut; THz attenuation total reflection technique; back propagation neural network; support vector machine; qualitative analysis

0 引言

花生富含大量的蛋白质、脂肪、糖类以及钙、磷、铁矿物元素等,可直接食用或者进行烘培等后续加工后食用,已成为人们喜爱的休闲食品;同时花生也是食用油的重要原材料之一,丰厚的营养价值使花生成为人们生活中的必需品[1]。但收获后的花生在储藏期间易受到温、湿度的影响而引起花生霉变[2]。霉变花生极有可能含强致癌物质——黄曲霉素,快速识别并分离霉变花生可从源头上阻止其进入食物链,降低人类摄入黄曲霉素的风险[3]。因此,对花生的霉变检测尤为重要。目前,绝大多数花生生产企业,主要依靠人工观测判断花生是否发生霉变,该检测方法易受主观心理、视觉疲劳等因素影响[4]。在农业行业标准 NY/T 1068—2006 和国标 GB/T 5494—2008 中,规定了对于花生中霉素的检验,采用同位素稀释液相色谱-串联质谱法、酶联免疫吸附法等检测方法。这些传统检测方法具有前处理复杂、费时费力,且易对样品造成破坏、产生二次污染等问题[5-6]。因此,亟需寻找一种可靠、快速、便捷的方法来检测花生仁的霉变程度。

光谱检测技术具有绿色环保、耗时短、成本低、可靠性高的特点,弥补了传统理化检测方法的不足[7-9],近年来在食品检测领域发展较快。HIRANO 等[10]通过分析花生油脂短波近红外(700 ~ 1 100 nm)的透射比对表面良好、内部霉变的花生进行了检测,但该方法对样本具有破坏性,且油脂提取程序相对繁琐。LEE 等[11]采用了拉曼光谱、近红外光谱技术(Near infrared,NIR)与中红外光谱技术(Mid infrared,MIR)3 种光谱技术对玉米受黄曲霉毒素污染进行了对比分析,结果显示,拉曼光谱与 MIR 对玉米中黄曲霉毒素的预测精度优于 NIR 光谱技术。这些研究均表明,光谱技术在农产品的霉变检测领域取得了较好的研究进展[12-14]。新兴的太赫兹光谱技术与其他光谱技术相比,具有承载更多信息、能量低、不会对被检物质造成光电离破坏、并具有一定的穿透性等特点[15-17],在农产品检测领域具有巨大的潜力[18-19]。因此,本文采用太赫兹光谱技术中的衰减全反射方式进行光谱扫描,通过光谱预处理与变量优化后分别结合 BP(误差反向传播)神经网络算法与支持向量机(Support vector machine,SVM)算法,建立不同霉变程度花生的定性分析模型。

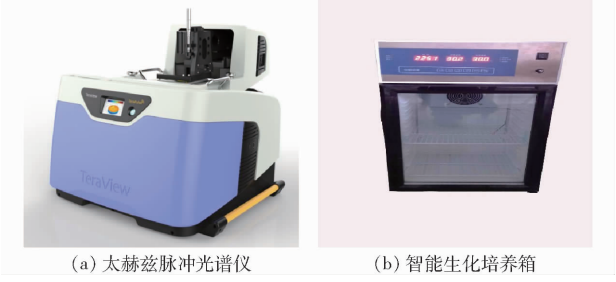
1 实验及方法

1.1 材料与仪器

材料:不同品种的带壳花生 1 000 g(购于某种子公司)。

主仪器:英国 Tera View 公司生产的 TeraPulse 4000 型太赫兹脉冲光谱仪,如图 1a 所示,可发射频率从 60 GHz 到 4 THz(2 ~ 133 cm^{-1})的太赫兹波,信噪比最高达到 70 dB。光谱采集部分选择入射角为 35°的单晶硅衰减全发射(ATR)模块,工作范围为 10 ~ 120 cm^{-1}(0.3 ~ 3.6 THz)。

辅助仪器:SPX-80 型智能生化培养箱,购自杭州硕联仪器有限公司,温度波动 ±0.5℃,如图 1b 所示。



(a) 太赫兹脉冲光谱仪 (b) 智能生化培养箱

图 1 实验仪器

Fig. 1 Experimental apparatus

1.2 实验方法

实验选取的花生品种为花育 36 号;为排除不同品种给实验带来的偶然性,选取鲁花 9 号花生品种作为参考样本进行培育。两种花生品种样本共计 80 枚,大小、颜色均匀一致,吹扫干净。预留 20 枚视为正常花生样本,其余 60 枚作为发霉培育对象。花生在高温、高湿、封闭环境下最易发生霉变[20],因此实验时,按照水分与花生样本质量比 0.2 左右在花生壳表面均匀喷洒去离子水,并置于 28℃的生化培养箱里培养。同时利用温湿度检测仪确保花生所处环境温度在 28℃左右、相对湿度 80% ~90%。实验方案如表 1 所示。

表 1 样本培养方案

Tab. 1 Sample culture program

参数	轻度霉变	中度霉变	严重霉变
培养时间/d	2	4	6
样本个数	20	20	20

将得到的轻度、中度、严重霉变花生样本作为实验待测样本,取出并放置于干燥、常温环境下 1 ~

2 d。得到的花生样本外壳表面有明显皱缩、发黑，有斑点的现象；去壳后霉变样本如图 2 所示。

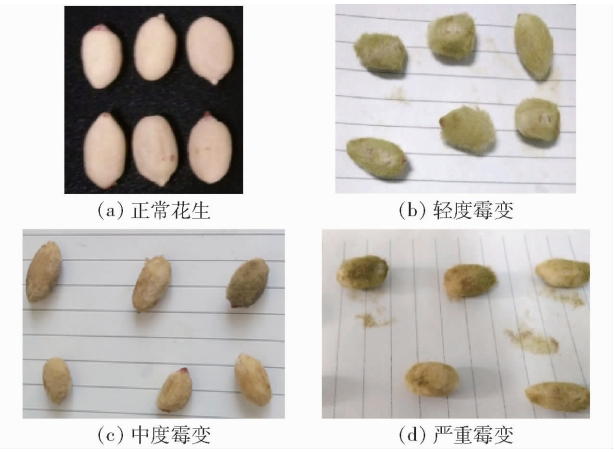


图 2　不同状态下的花生

Fig. 2　Peanuts in different states

3 类霉变花生样本表面皆有 4 mm 左右淡绿毛、白色块状斑点产生，颜色晦暗发黄，质地变软，肉眼较难区分。随机选取包括正常、轻度、中度、严重霉变花生仁各 20 粒，制作成厚度约 1 mm、尺寸约 1 cm × 1 cm 的花生仁切片，样本共计 80 个。为防止花生仁发生氧化等反应，该操作应尽可能快速准确。实验环境温度始终保持在 22℃。

1.3　光谱采集

实验采集 80 个花生样本切片的 ATR 光谱。确保 ATR 晶体未放置样品并干净无污染，采集得到参考信号（Reference signal）后进行样本的数据采集。为确保样本和 ATR 晶体之间光学接触良好，需拧紧压力螺钉，最大限度地提高吸光度[21]。ATR 采集参数设置为：分辨率 0.94 cm^{-1}，每次快速扫描的平均次数为 450。

部分样本的原始太赫兹时域光谱如图 3 所示。从图中可以看出，由于空气中的水分干扰，样本信号的波形均存在较小抖动。此外，4 种花生仁样本的脉冲波形相似，差异细微，说明了系统的稳定性；但不易直接通过太赫兹时域光谱进行不同程度霉变花生的有效鉴别，需要将采集得到的时域信号进一步处理，提取出更有效的光学常数并结合模式识别算法建立定性分析模型。

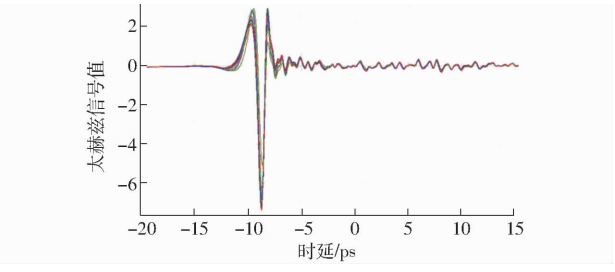


图 3　部分霉变样本的时域光谱

Fig. 3　Time-domain spectra of some mildew samples

2　结果与分析

2.1　光谱预处理

2.1.1　光学常数提取

光学常数是表征物质宏观光学性质的重要物理量，同样也是太赫兹光谱分析中建模数据的来源[22]。通常情况下更多选用的光学常数是物质的吸光度与吸收系数。提取光学常数前，需要利用快速傅里叶变换（FFT）将参考信号和样本的时域光谱进行转换。在获得信号频域谱的过程中，为避免信号数据开头和结尾不连续造成信号频谱显示的失真，需对信号进行加窗处理，减少时域信号截断所带来的误差[23]。窗函数的种类多样，比如 Boxcar 用于高分辨率，Blackman Harris 用于高信噪比，本文选择最常用的 Happ Genzel，因为其兼顾了信噪比和分辨率。

将得到样本信号与参考信号的对应频域信息作比后，利用所得比值函数的幅值 $\rho(\omega)$ 和相位 $\varphi(\omega)$ 信息计算得到所需的光学常数。样本的光学常数吸光度 $A(\vartheta)$ 与吸收系数 $\alpha(\omega)$ 计算公式为

$$A(\vartheta) = 2\lg\frac{E_1(\vartheta)}{E_0(\vartheta)} \tag{1}$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2}{d}\ln\frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)(n(\omega)+1)^2} \tag{2}$$

其中

$$n(\omega) = 1 + \frac{\varphi(\omega)c}{\omega d} \tag{3}$$

式中　$E_0(\vartheta)$——入射的太赫兹波强度

$E_1(\vartheta)$——透过物质的太赫兹波强度

d——样本的厚度

ω——角频率

$\rho(\omega)$——比值函数的幅值

$\varphi(\omega)$——比值函数的相位

$n(\omega)$——样本的折射率

c——太赫兹波在空气中的传播速度

其中吸光度与吸收系数谱图如图 4 所示。

2.1.2　光谱范围选取

在 10 ~ 120 cm^{-1} 频域内，观察图 4a 实验数据发现，随着频率的增加，样品吸光度整体呈现先上升后下降趋势，但无明显特征峰存在；而图 4b 中所有样本的吸收系数光谱特征峰明显，所以本实验选择吸收系数作为建模数据。但吸收系数谱线整体呈差异较小、重叠度较高、难以分辨的特点。

为了解决这个问题，进一步对每个类别的所有样本取平均处理。处理后可以发现在一定波段内正常样本与霉变样本的差异十分显著。图 5a 为正常、严重霉变花育 36 号各自类别在 5 ~ 44 cm^{-1} 的平均

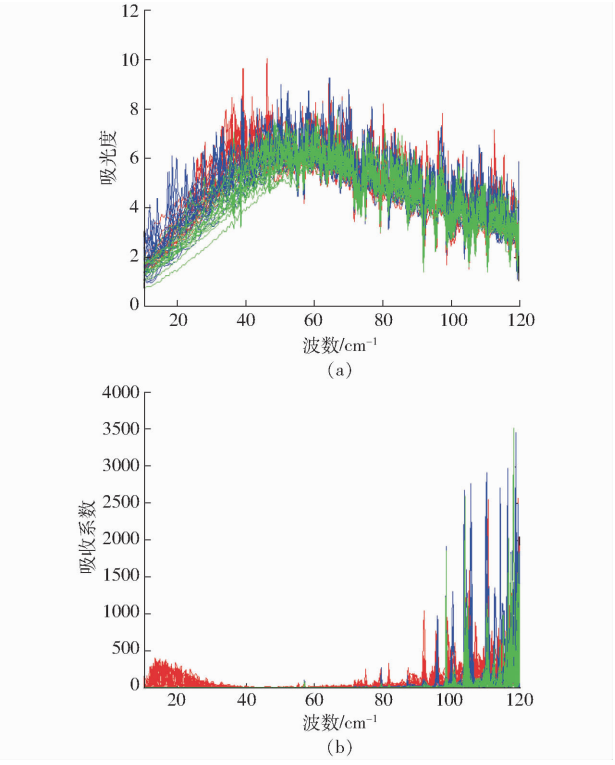


图 4 吸光度谱图和吸收系数谱图

Fig. 4 Absorption and absorbance spectra

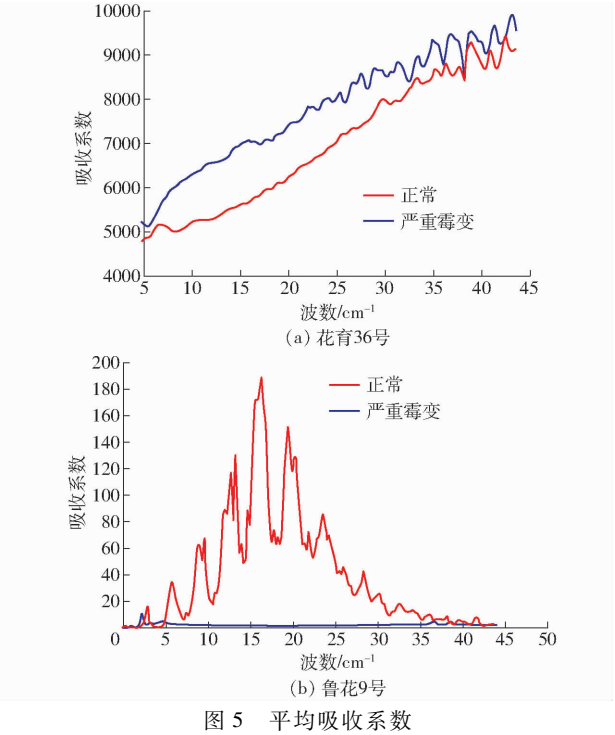


图 5 平均吸收系数

Fig. 5 Average absorption coefficient

吸收系数,可以看到两条曲线相离甚远,并且随着频率增加,吸收系数越来越高。图 5b 为正常、严重霉变鲁花 9 号各自类别在 0 ~ 50 cm^{-1} 的平均吸收系数,同样两条曲线差异也是十分显著,为后期模型建立提供了可能性。

2.2 建模及定性分析

BP 神经网络算法是当前工业领域应用较多的一种前馈式学习算法与反向传播算法的神经网络,可对样本进行有效分类,故采用 BP 神经网络进行不同霉变程度样本的分类处理;同时,为了探究处理此类数据更优的算法,尝试采用同样经典的 SVM 方法进行霉变样本分类的定性分析。支持向量机库 Lib - SVM,能够解决小样本情况下的机器学习问题,提高泛化能力,解决高维问题、非线性问题,适于处理光谱数据[24-25],故同时采用 Lib - SVM 进行花生霉变程度鉴别模型的建立。

2.2.1 基于 BP 神经网络的定性分析

全波段 10 ~ 120 cm^{-1} 共计 110 个点,若采用全光谱计算量过大。故在保证输入节点信息尽可能代表整条吸收系数谱线中所包含信息的基础上,等间隔提取合适数量的光谱点作为网络输入。经多次实验确定在所选频域范围内对两种花生样本的太赫兹吸收系数谱线提取间隔 10 cm^{-1} 的 10 个光谱点作为输入样本,依据网络的隐含层节点数经验公式:$m = \sqrt{n+l} + a$(a 为 1 ~ 10 的整数,n 为输入层节点数,l 为输出层节点数)设为 15,输出层节点数为 2,随机选取 2/3 样本作为训练样本,其余 1/3 样本作为校验样本;表 2 为输出节点所代表的样本分类编码;图 6 为分析结果,其中横轴为样本数,纵轴中 x、y 分别表示表 2 中编码值;蓝线代表正确输出编码,红线代表实际输出编码,箭头所指为错误分类样本。结果表明花育 36 号样本分类的识别正确率为 88.57%;鲁花 9 号样本分类的识别正确率为 91.40%,建模效果较为理想,证实了模型具有一定可靠性。

表 2 BP 网络输出节点编码

Tab. 2 BP network output node coding

	正常	轻度霉变	中度霉变	严重霉变
x	0	0	1	1
y	0	1	0	1

2.2.2 基于 Lib - SVM 的定性分析

首先建立正常与霉变花生的二分类模型。采用基于网格搜索及交叉验证方法进行参数寻优的支持向量机多分类算法,建立两类品种样本霉变的二分类模型。按 3∶1 的比例随机划分建模集和测试集,即得到 20 个样本作为测试集,其余 60 个样本作为建模集。对经过归一化预处理后的样本建立基于特征波段-吸收系数的正常、霉变样本二分类模型。模型结果如图 7 所示,蓝色标识代表样本的实际类别,红色标识代表样本的预测类别,可以看出,两类测试样本都准确地被划分到自身所属类别当中,模型预测正确率为 100%。

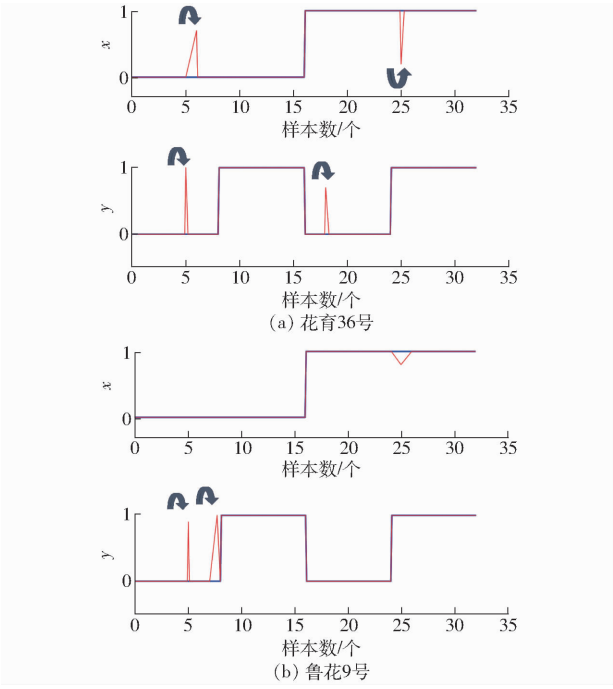


图 6　BP 算法分类结果

Fig. 6　BP algorithm classification results

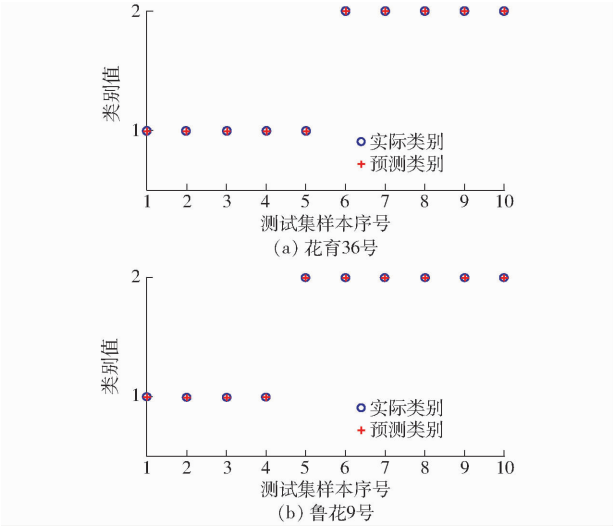


图 7　霉变程度二分类模型预测结果

Fig. 7　Prediction result of mildew degree two-class model

为进一步探索太赫兹光谱技术在花生霉变情况检测研究中的可行性，对轻度、中度、严重霉变样本建立基于特征波段-吸收系数谱的霉变程度三分类模型。

在建立三分类模型时，同样选择采用基于网格搜索法及交叉验证方法进行参数寻优的 SVM 多分类算法，按 3∶1的比例随机划分建模集和测试集，即得到 15 个样本作为测试集，其余 45 个样本作为建模集。对经过归一化预处理后的所有样本建立 SVM 模型，并分别建立花育 36 号、鲁花 9 号霉变样本的三分类模型，结果如图 8 所示。可以看出，3 类测试样本都准确地被划分到自身所属类别当中，模型预测正确率为 100%，可靠性较高。所有模型参数及预测结果如表 3 所示。

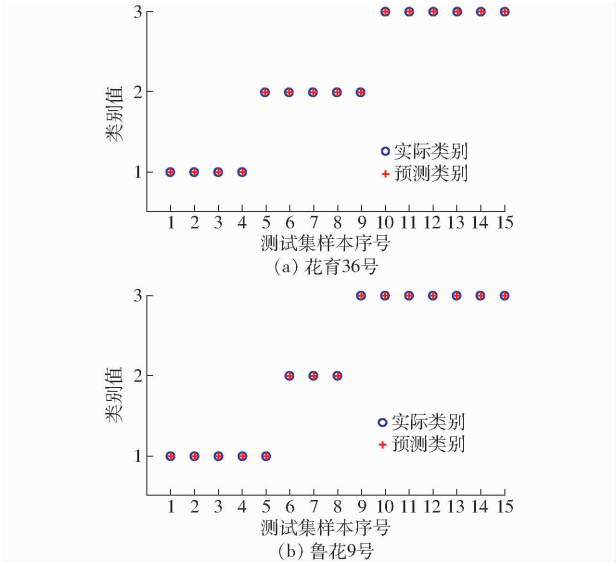


图 8　霉变程度三分类模型预测结果

Fig. 8　Prediction result of mildew degree three-class model

表 3　模型参数及结果

Tab. 3　Model parameters and results

分类模型	光谱范围/ cm^{-1}	总预测正确率/%	惩罚参数	Gamma 参数
花育二分类模型	5～44	100	-2.5	-5
鲁花二分类模型	0～50	100	-4.0	-4.5
花育三分类模型	5～44	100	-1.5	-6
鲁花三分类模型	0～50	100	0	-7

3　结束语

应用太赫兹衰减全反射技术对不同霉变程度的花生样本进行了定性分析研究。通过对比发现，不同霉变程度的花生样本在太赫兹波段的时域谱、吸光度谱以及吸收系数谱均存在一定的差异。进一步使用归一化对数据进行处理，并分别结合 BP 神经网络算法与 SVM 算法，建立了花生霉变程度鉴别的定性分析模型。其中，基于 BP 神经网络算法的模型对花育 36 号霉变样本的识别正确率为 88.57%，对鲁花 9 号样本的识别正确率为 91.40%；基于 SVM 算法的二分类、三分类模型对花育 36 号、鲁花 9 号霉变样本的识别正确率均达到 100%。结果表明，相比于 BP 神经网络算法，SVM 算法能够解决小样本情况下的机器学习问题，可提高泛化能力，更适合处理光谱数据，并进行建模分析；作为一种便捷、可靠的方式，采用太赫兹衰减全反射光谱技术对贮藏期间的花生进行检测，在判断花生霉变程度方面具有一定的可行性。

参 考 文 献

[1] 厉广辉, 王兴军, 石素华,等. 我国鲜食花生研究现状及展望[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(4):604 - 607.
LI Guanghui, WANG Xingjun, SHI Suhua,et al. An overview of research progress and prospect for fresh peanut in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(4):604 - 607. (in Chinese)

[2] 袁贝, 邵亮亮, 张迪骏,等. 储藏条件对花生的氨基酸和脂肪酸组成及风味的变化影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(8):318 - 322.
YUAN Bei, SHAO Liangliang, ZHANG Dijun,et al. The difference of amino acids, fatty acids and flavor of peanut stored in different conditions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(8):318 - 322. (in Chinese)

[3] 乔小军, 蒋金豹, 李辉,等. 高光谱图像识别霉变花生的光谱特征分析与指数模型构建[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(2):535 - 539.
QIAO Xiaojun, JIANG Jinbao, LI Hui, et al. Spectral analysis and index models to identify moldy peanuts using hyperspectral images[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018,38(2):535 - 539. (in Chinese)

[4] 沈飞, 刘鹏, 蒋雪松,等. 基于电子鼻的花生有害霉菌种类识别及侵染程度定量检测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24):297 - 302.
SHEN Fei, LIU Peng, JIANG Xuesong, et al. Recognition of harmful fungal species and quantitative detection of fungal contamination in peanuts based on electronic nose technology[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24):297 - 302. (in Chinese)

[5] 张旻. 表面增强拉曼光谱与微萃取分析方法联用现场检测有机污染物[D]. 济南:山东大学, 2017.
ZHANG Min. Surface enhanced Raman spectroscopy combined with microextraction methods for on-site analysis organic pollutants[D]. Ji'nan: Shandong University, 2017. (in Chinese)

[6] 潘振朝. 花生及花生油中黄曲霉毒素 B_1 检测方法优化及危害分析[D]. 广州:华南农业大学, 2016.
PAN Zhenzhao. Hazard analysis and detection method establishment of aflatoxin B_1 in peanut oil and raw materials[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[7] SOURDAINE M, GUENTHER D, DOWGIALLO A M, et al. Protecting the food supply chain: utilizing SERS and portable Raman spectroscopy[J]. tm—Technisches Messen, 2015, 82(12):625 - 632.

[8] WENNING M, BREITENWIESER F, KONRAD R, et al. Identification and differentiation of food-related bacteria: a comparison of FTIR spectroscopy and MALDI - TOF mass spectrometry[J]. Journal of Microbiological Methods, 2014, 103:44 - 52.

[9] 许生陆, 高媛, 胡国梁,等. 基于有效波长选择的近红外光谱枸杞总糖含量快速检测[J]. 食品科学, 2016, 37(12):105 - 109.
XU Shenglu, GAO Yuan, HU Guoliang,et al. Rapid determination of total sugar content of Goji berries(*Lycium barbarum*) by near infrared spectroscopy with effective wavenumber selection[J]. Food Science, 2016, 37(12):105 - 109. (in Chinese)

[10] HIRANO S, OKAWARA N, NARAZAKI S. Near infrared detection of internally moldy nuts[J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 1998, 62(1):102 - 107.

[11] LEE K M, DAVIS J, HERRMAN T J, et al. An empirical evaluation of three vibrational spectroscopic methods for detection of aflatoxins in maize[J]. Food Chemistry, 2015, 173:629 - 639.

[12] WANG K, SUN D W, PU H. Emerging non-destructive Terahertz spectroscopic imaging technique: principle and applications in the agri-food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017,67:93 - 105.

[13] ZHAN H, XI J, ZHAO K, et al. A spectral-mathematical strategy for the identification of edible and swill-cooked dirty oils using Terahertz spectroscopy[J]. Food Control, 2016, 67:114 - 118.

[14] 王转卫,迟茜,郭文川,等. 基于近红外光谱技术的发育后期苹果内部品质检测[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):348 - 354.
WANG Zhuanwei, CHI Qian, GUO Wenchuan, et al. Internal quality detection of apples during late developmental period based on near-infrared spectral technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):348 - 354. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180541&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.041. (in Chinese)

[15] 焦丽娟. 太赫兹时域光谱技术在农药残留检测方面的应用研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
JIAO Lijuan. Study on pesticide residues detection using Terahertz time-domain spectroscopy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)

[16] 李鹏鹏, 张元, 葛宏义,等. 太赫兹光谱技术在食品质量安全检测中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(3):372 - 375.
LI Pengpeng, ZHANG Yuan, GE Hongyi,et al. Research advances in Terahertz spectroscopy detection of harmful substances in food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(3):372 - 375. (in Chinese)

[17] 谢丽娟,徐文道,应义斌,等. 太赫兹波谱无损检测技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(7):246 - 255.
XIE Lijuan,XU Wendao,YING Yibin,et al. Advancement and trend of Terahertz spectroscopy technique for non-destructive detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(7):246 - 255. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130743&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.043. (in Chinese)

[18] 张卓勇, 张欣. 太赫兹时域光谱技术应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2016,36(1):54 - 55.
ZHANG Zhuoyong, ZHANG Xin. Research development on the applications of Terahertz time domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016,36(1):54 - 55. (in Chinese)

(下转第 355 页)

12(10)：3363 – 3372.

[42] KHALDI M, BADREDDINE M, LEGROURI A, et al. Preparation of a well-ordered layered nanocomposite from zinc-aluminum-chloride layered double hydroxide and hydrogenophosphate by ion exchange[J]. Materials Research Bulletin, 1998, 33(12)：1835 – 1843.

[43] ALJEBOREE A M, ALSHIRIFI A N, ALKAIM A F. Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2014, 150(Supp. 2)：3381 – 3393.

[44] THAWATCHAI M, JOHAN L, YANJUN D, et al. Activated carbon derived from carbon residue from biomass gasification and its application for dye adsorption：kinetics, isotherms and thermodynamic studies[J]. Bioresource Technology, 2016, 200：350 – 359.

[45] KUZAWA K, JUNG Y J, KISO Y, et al. Phosphate removal and recovery with a synthetic hydrotalcite as an adsorbent[J]. Chemosphere, 2006, 62(1)：45 – 52.

[46] LIU C C, WANG M K, LI Y S. Removal of nickel from aqueous solution using wine processing waste sludge[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44(5)：1438 – 1445.

[47] 李克超，王承明，汪雪瑞，等. 焙烧镁铝水滑石对棉粕水提液中棉酚的吸附性能及吸附机理研究[J]. 中国粮油学报，2018，33(2)：82 – 88.
LI Kechao, WANG Chengming, WANG Xuerui, et al. Adsorption properties and mechanism of gossypol in extract of cottonseed meal by Mg – Al calcined layered double hydroxide[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(2)：82 – 88. (in Chinese)

[48] 殷实，朱玲君，刘银聪，等. 柳桉快速热裂解炭改性制取多级孔道活性炭的研究[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(12)：306 – 310，326.
YIN Shi, ZHU Lingjun, LIU Yincong, et al. Upgrading of char from lauan pyrolysis for production of activated char with multilevel pore structure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12)：306 – 310, 326. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171237&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.037. (in Chinese)

[49] 刘静波，于志鹏，赵文竹，等. 蛋清肽酶解工艺及血管紧张素转化酶抑制活性研究[J]. 农业机械学报，2010，41(7)：147 – 152.
LIU Jingbo, YU Zhipeng, ZHAO Wenzhu, et al. Technology for ACE-inhibitory peptides from egg white[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7)：147 – 152. (in Chinese)

[50] BYRNE B M, VAN HET SCHIP A D, VAN DE KLUNDERT J A M, et al. Amino acid sequence of phosvitin derived from the nucleotide sequenceof part of the chicken vitellogenin gene[J]. Biochemistry, 1984, 23(19)：4275 – 4279.

(上接第 338 页)

[19] GOWEN A A, O'SULLIVAN C, O'DONNELL C P. Terahertz time domain spectroscopy and imaging：emerging techniques for food process monitoring and quality control[J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 25(1)：40 – 46.

[20] 欧阳玲花，冯健雄，朱雪晶，等. 花生原料贮藏技术研究进展与展望[J]. 食品研究与开发，2014(8)：125 – 128.
OUYANG Linghua, FENG Jianxiong, ZHU Xuejing, et al. Research progress and prediction of storage technology in peanuts [J]. Food Research and Development, 2014(8)：125 – 128. (in Chinese)

[21] 刘翠玲，邢瑞芯，吴静珠，等. 基于太赫兹衰减全反射技术的花生品种快速鉴别[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(3)：361 – 366.
LIU Cuiling, XING Ruixin, WU Jingzhu, et al. Rapid discrimination of peanut varieties using Terahertz attenuated total reflection spectroscopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3)：361 – 366. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180345&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.045. (in Chinese)

[22] 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.
HAN Xiaohui, ZHANG Jin, YANG Ye, et al. Review on the methodology for optical parameter extraction with Terahertz time-domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(11)：3449 – 3454. (in Chinese)

[23] 张浩，王建林，赵利强，等. 基于加窗插值 FFT 的加速度传感器信号处理方法[J]. 仪表技术与传感器，2016(2)：12 – 14.
ZHANG Hao, WANG Jianlin, ZHAO Liqiang, et al. Signal processing method of accelerometers based on windowed interpolation FFT[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(2)：12 – 14. (in Chinese)

[24] 张文涛，李跃文，占平平，等. 基于太赫兹时域光谱技术与 PCA – SVM 的转基因大豆油鉴别研究[J]. 红外与激光工程，2017，46(11)：149 – 154.
ZHANG Wentao, LI Yuewen, ZHAN Pingping, et al. Recognition of transgenic soybean oil based on Terahertz time domain spectroscopy and PCA – SVM[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(11)：149 – 154. (in Chinese)

[25] 齐亮，赵茂程，赵婕，等. 基于太赫兹光谱分析的猪肉 K 值无损检测方法[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(12)：346 – 353.
QI Liang, ZHAO Maocheng, ZHAO Jie, et al. Non-destructive detection method of K in pork with Terahertz spectroscopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12)：346 – 353. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171243&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.043. (in Chinese)