

太赫兹衰减全反射技术对板栗果仁霉变程度 判别研究

孙晓荣^{1,2}, 田 密^{1,2*}, 刘翠玲^{1,2}, 吴静珠^{1,2}, 郑冬钰^{1,2}, 靳佳蕊^{1,2}

(1. 北京工商大学人工智能学院, 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: **目的** 建立基于太赫兹衰减全反射光谱法(terahertz attenuated total reflection spectroscopy, THz-ATR)快速检测板栗果仁霉变程度判别方法。**方法** 实验选取迁西板栗、沂蒙短枝、怀柔板栗 3 个品种的 60 颗饱满果仁进行霉变培养, 并依据 GB/T 22346—2008《板栗质量等级》将板栗果仁分为正常、轻度霉变、重度霉变 3 类, 采集板栗果仁样本太赫兹时域光谱(波段 0.3~3.6 THz)后进行光学常数提取, 从而得到样本的吸收系数谱图和折射率谱图, 并结合基于遗传算法(genetic algorithm, GA)寻优和基于粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)寻优的支持向量机算法(support vector machine algorithm, SVM)建立定性判别模型。**结果** PSO-SVM 算法模型对板栗果仁霉变程度的预测集识别正确率为 91.6667%, GA-SVM 算法模型对板栗果仁霉变程度的预测集识别正确率为 100%。**结论** 本研究所建立的定性判别模型准确率高, 利用太赫兹时域光谱技术可以实现对板栗果仁霉变程度的区分识别, 为太赫兹技术在食品检测领域的应用提供了现实基础。

关键词: 板栗; 太赫兹衰减全反射; 遗传算法; 粒子群算法; 支持向量机算法; 定性识别

Identification of moldy degree of Chinese chestnut kernel by terahertz attenuated total reflection technique

SUN Xiao-Rong^{1,2}, TIAN Mi^{1,2*}, LIU Cui-Ling^{1,2}, WU Jing-Zhu^{1,2}, ZHENG Dong-Yu^{1,2}, JIN Jia-Rui^{1,2}

(1. College of Artificial Intelligence, 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: Objective To establish a method for the rapid detection of moldy degree of chestnut kernel based on terahertz attenuated total reflection spectroscopy (THz-ATR). **Methods** Sixty plump kernels of Qianxi Chestnut, Yimeng short branch and Huairou District Chestnut were randomly selected for mouldy culture, according to GB/T 22346—2008 *Quality grade of Chinese chestnut*, the Chinese chestnut kernel was divided into 3 categories: Normal, mild moldy and severe moldy. Terahertz spectrum (band 0.3-3.6 THz) was collected and optical constants were extracted. The absorption coefficient spectrum and refractive index spectrum of the sample were obtained, and the qualitative discrimination model was established by combining the support vector machine algorithm (SVM) based on genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO). **Results** The experimental results showed that

基金项目: 北京市自然科学基金项目(4222043)、2021 年教育部高教司产学研合作协同育人项目(202102341023)

Fund: Supported by the Beijing Natural Science Foundation Project (4222043), and the 2021 Production University Cooperation Collaborative Education Project of the Department of Higher Education of the Ministry of Education (202102341023)

*通信作者: 田密, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全检测技术。E-mail: 1761091160@qq.com

*Corresponding author: TIAN Mi, Master Degree, Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China. E-mail: 1761091160@qq.com

the recognition accuracy of PSO-SVM algorithm model on the prediction set of chestnut kernel mildew degree was 91.6667%, and the recognition accuracy of GA-SVM algorithm model on the prediction set of chestnut kernel mildew degree was 100%. **Conclusion** The established model is accurate and terahertz time-domain spectroscopy can be used to distinguish the degree of moldy in chestnut kernel, which provides a theoretical basis for the application of terahertz technology in food detection.

KEY WORDS: Chinese chestnut; terahertz attenuated total reflection; genetic algorithm; particle swarm optimization; support vector machine algorithm; qualitative recognition

0 引言

板栗是中国传统的农副产品,同时也是一种非常重要的经济作物^[1-2]。板栗中含有丰富的蛋白质、碳水化合物、维生素等营养物质,是一种广受消费者喜爱的食材,并且具有强筋健骨、止血消肿、延年益寿等诸多功效^[3-5]。据联合国粮农组织数据表明,2019年中国板栗产量约为219.81万t,约占世界板栗总产量的90%以上。但板栗在采摘后极易发生霉烂、虫害、失水、发芽等情况,这些缺陷板栗造成的损失高达总产量的35%~50%,为国内贮藏加工、销售带来困难和巨大的经济损失^[6-7]。根据GB/T 22346—2008《板栗质量等级》,缺陷板栗的筛选主要依靠人工拣出,不仅效率低,而且主观性强,不能够满足现代化生产快速、准确的检测要求。因此,寻找一种便捷、无损检测板栗品质的方法具有重要的现实意义。

目前,针对板栗品质进行的深入研究较少。展慧等^[8]提出基于近红外光谱和机器视觉的多源信息融合技术的板栗缺陷检测方法,利用误差反向传播(back propagation, BP)神经网络方法建立多源信息融合技术的板栗分级检测模型,3种识别模型对于测试集板栗的识别率均达到83%以上。周竹等^[9]利用近红外光谱检测带壳板栗的品质,采用近红外漫反射法采集了合格板栗和霉变板栗的光谱,比较不同预处理方法下所建模型的识别率,实验结果表明经矢量归一化预处理所建模型识别效果最好,预测正确率可达92.31%。

太赫兹光谱检测技术作为近年来新兴的检测技术,因其具有承载信息量多、蕴含能量低、穿透性强等突出优点,与近红外光谱、高光谱等检测技术形成鲜明互补^[10-12]。王远等^[13]提出了一种利用太赫兹时域光谱技术(terahertz time domain spectroscopy, THz-TDS)进行红木分类识别方法,基于木材太赫兹吸收系数谱和折射率谱建立随机森林分类模型对于红木种类有着较好的分类性能,总体分类准确率分别达到94%和96%,能够准确对红木种类进行分类识别。李斌等^[14]利用太赫兹时域光谱设备采集不同虫害程度的山核桃切片太赫兹时域光谱,并对比不同光谱的吸收特性,研究表明,太赫兹光谱技术在检测山核桃内部虫害方面具有较好的应用潜力。戚淑叶等^[15]探讨太赫兹时域光谱技术对核桃变质情况进行研究,分别采集不同品种核桃的太赫兹时域光谱,

比较分析变质与正常核桃谱图及吸收谱差异,为剔除变质核桃打下基础。通过上述研究可以发现太赫兹光谱技术在农业和食品领域有着良好的研究潜力和应用前景。

本研究利用太赫兹衰减全反射光谱法(terahertz attenuated total reflection spectroscopy, THz-ATR)对板栗果仁的正常粒、轻度霉变粒、重度霉变粒分别进行光谱采集,经过预处理后分析两种光谱数据的特点,并结合基于粒子群寻优的支持向量机算法(particle swarm optimization-support vector machine algorithm, PSO-SVM)、基于遗传算法寻优的支持向量机算法(genetic algorithm-support vector machine algorithm, GA-SVM)建立板栗果仁霉变程度定性识别模型,从而对于太赫兹光谱技术在板栗品质检测方面的可行性进行研究,实现对板栗果仁霉变程度的区分识别,为板栗果仁品质检测提供新思路和技术方案,同时为太赫兹技术在食品检测领域的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

不同品种的带壳板栗3000g,购于淘宝。

TeraPulse 4000型太赫兹脉冲光谱仪(英国剑桥TeraView公司),其可发射频率范围0.06~4THz的太赫兹波,信噪比最高可达到70dB。光谱采集部分应用单晶硅衰减全反射(ATR)模块,其入射角为35°。ATR模块的工作电磁频谱为10~120cm⁻¹,能够测量固体和液体样本,并具有采样面积小、样品用量小(固体样本一般为1mg)、样品制备简单及采集方式便捷等特点^[16-17]。

SPX-80型智能生化培养箱(温度波动±0.5°C,杭州硕联仪器有限公司)。

1.2 实验方法

为排除不同产地板栗给实验带来的偶然性,本研究选取3种不同产地的板栗进行霉变培养,分别为:迁西板栗、沂蒙短枝、怀柔板栗。3种板栗样本总计60颗,去壳,选取大小、颜色均匀一致的果仁,吹扫干净。预留20颗视为正常板栗果仁样本,其余40颗作为发霉培养对象。板栗在封闭的高温、高湿环境中极易发生霉变反应^[18-21],因此霉变培养环境的建立应按照水分与板栗果仁样本质量比0.2左右在板栗果仁表面均匀喷洒去离子水,并置于28°C的生化培养箱中进行培

养。同时利用温湿度检测仪器确保板栗所处环境温度在 28℃ 左右、相对湿度 80%~90%。实验样本如表 1 所示。

表 1 实验样本
Table 1 Experimental sample

参数	正常样本	轻度霉变	重度霉变
培养时间/d	0	2	6
样本个数	20	20	20

正常样本和霉变样本如图 1 所示。



图 1 不同状态下的板栗果仁

Fig.1 Chestnut flesh in different states

两类霉变板栗果仁样本表面产生明显褐变斑点, 整颗果仁颜色晦暗发黄, 质地变软。随机选取正常果仁、轻度霉变果仁、重度霉变果仁各 20 颗, 将共计 60 颗样本制作成为厚度约 1 mm、尺寸约 1 cm×1 cm 的切片。为防止板栗果仁发生氧化等一系列反应, 该操作应尽可能快速完成且始终保持实验环境温度在 22℃ 左右。

1.3 光谱采集

实验采集 60 颗板栗果仁样本切片的 ATR 光谱。采集方法为: 首先, 确保 ATR 晶体上无任何样品并保持洁净, 进行 ATR 参考信号采集。第二步, 将板栗果仁样本切片放置于 ATR 采集部位, 拧紧压力螺钉确保样品与 ATR 晶体之间有良好的光学接触, 最大限度地提高采集样本光谱的吸光度^[22]。逐一采集所有板栗果仁样本切片的 ATR 光谱。ATR 采集模块参数设置: 分辨率 0.94 cm⁻¹, 每次快速扫描的平均次数为 150 次。

1.4 数据处理

1.4.1 光学常数提取

光学常数是表征物质宏观光学特性的重要物理量。从采集到的太赫兹时域光谱波形中提取光学常数前, 需要利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)将参考信号及样本的时域光谱转换得到相应的频域光谱, 进而再利用频域信号的幅值及相位信息计算得到所需的光学常数^[23]。此外, 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, 必须对信号执行一个切趾(加窗)的过程^[24-26]。切趾函数的种类很多, 其根本作用在于提高信噪比。在本研究过程中选择应用最常用的 Happ Genzel 函数, 因为其可以同时兼顾信噪比与分辨率。

在 THz 光谱分析过程中, 吸收系数和折射率为最常用的光学常数。吸收系数被定义为该样本单位厚度的吸光度。折射率被定义为光在真空中的传播速度与光在该介质中的传播速度之比, 可以通过不同样本在时域信号上的延

迟反应出来。

吸收系数公式为式(1):

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

折射率公式为式(2):

$$n(\omega) = \frac{\varphi(\omega)c}{\omega d} + 1 \quad (2)$$

其中, d 为样品的厚度, c 为太赫兹波在真空中传播的速度, ω 为角频率, $\rho(\omega)$ 为样品信号和参考信号的振幅比, $\varphi(\omega)$ 为样品信号和参考信号的相位差^[13]。

1.4.2 分析模型构建

在模式识别的研究中, 通常需要分类高维度数据, 而分类器的分类效率及精度是由分类器的参数及待分类数据二者相互结合共同决定的。因此, 同时获得待分类数据集和优化分类器参数对获得更好的分类效果有很大帮助。ZENG 等^[27]和 HUANG 等^[28]对分类器分类性能最佳时刻进行研究, 研究结果证明待分类数据最优子集和分类器最优参数可同时获得。本研究分别结合粒子群算法寻优和遗传算法寻优的支持向量机定性分析算法, 建立基于全波段-折射率的板栗果仁霉变程度判别模型。

粒子群算法^[29]是计算智能领域中的一种群体智能型优化算法, 其源自于对鸟类捕食问题的研究。粒子群算法的工作过程: 首先初始化一群粒子在可行解空间中, 这些粒子每一个都代表了待极值优化问题的一个潜在最优解, 通常用位置、速度、适应度值这 3 项指标表示该粒子特征。在每一次的迭代寻优过程中, 每个粒子都通过个体极值和群体极值来更新自身的速度、位置指标, 在若干次迭代后使得相邻两次误差小于一定值后停止迭代, 最终达到最优解。

遗传算法是一种模仿生物进化过程的随机方法, 其主要任务和目的是设法产生或有助于产生能够充分体现解空间中解的优良新个体, 从而提高算法的效率并避免早熟收敛现象的产生。遗传算法主要包括选择、交叉、变异这 3 个基本操作, 且每个操作又有不同的方法, 可以看出遗传算法对问题的具体领域没有产生依赖, 并对问题的种类有很强的鲁棒性, 因此被广泛应用于函数优化、规划设计等领域^[30-31]。

支持向量机 SVM^[32-35]是一种常见的二分类模型, 其分类原理是在线性可分的情况下寻找最优超平面, 使其在误判率最低的前提下达到最优分类效果。SVM 分类器有多种核函数, 其中径向基核函数(radial basis function, RBF)应用最为广泛, 受正则化参数及核函数参数共同影响。

以上所有数据分析处理均应用 MATLAB 程序(R2016b)平台完成。

2 结果与分析

2.1 预处理分析

由于在采集实验样本与参考信号的时域光谱过程中,

实验仪器存在噪声及空气中水分对太赫兹波存在一定程度吸收作用,故初步采集得到的样本信号存在一定幅度范围波动,很难达到实验仪器理想的信噪比,故不能直接通过太赫兹特征光谱来对样品的某一特征进行有效鉴别。因此,在采集得到时域信号后需要进一步处理,提取出更加有效的光学常数进行分析,并通过恰当的模式识别算法建立针对样本某一特征的鉴别模型^[36-37]。

图 2、3 为不同霉变程度板栗果仁样品的太赫兹时域光谱图经过光学常数提取后得到的吸收系数谱图和折射率谱图。从图 2、3 中可以看出,不同霉变程度板栗果仁样品的谱图波形趋势大致相同且光谱特征峰的位置基本一致。总体上,不同霉变程度板栗果仁样品的光谱相似性较高,通过肉眼很难直接鉴别板栗果仁的霉变程度,因此需要通过结合化学计量学模型对板栗果仁霉变程度进行鉴别区分。

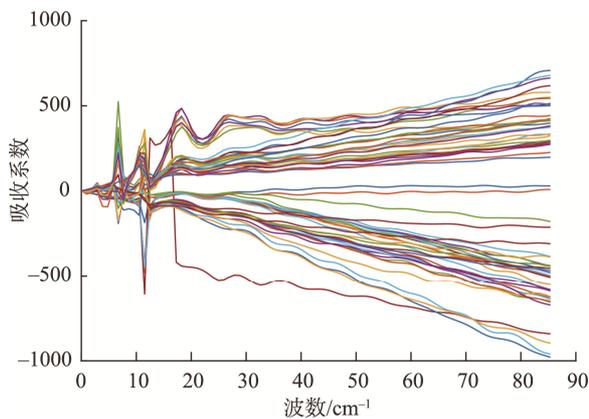


图 2 吸收系数谱图

Fig.2 Absorption coefficient diagram

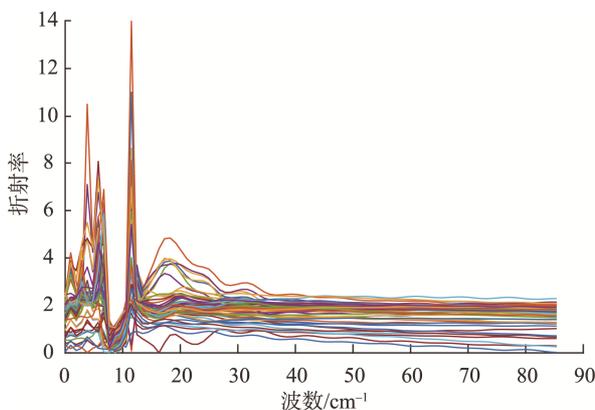


图 3 折射率谱图

Fig.3 Refractive index diagram

本研究中所应用的太赫兹时域光谱仪 ATR 附件的工作范围为 10~120 cm^{-1} ,且在 85 cm^{-1} 以后样本信号受高频噪声影响波动严重,所以仅针对 10~85 cm^{-1} 这一范围内的样本太赫兹光谱信号进行研究。从样本的吸收系数谱图(图

2)和折射率谱图(图 3)可以看出,在 10~85 cm^{-1} 这一范围内,样本的吸收系数谱图不存在明显的特征峰,但样本的折射率谱图在 10~85 cm^{-1} 这一范围内整体呈现出下降趋势,且存在明显的特征峰,故选择在 10~85 cm^{-1} 这一范围内对样本的折射率数据进行分析处理。

因为在样本光谱采集的过程中噪声等因素的影响,所以在折射率谱图中的特征峰区分不明显,不能够直观地看出样本间的差异。因此,为减少噪声等因素对样本光谱信号的影响,方便分析,从而减小建模误差,对原始的样本折射率光谱进行标准正态变量变换(standard normal variable transformation, SNV)预处理和求平均预处理,结果如图 4、5 所示。对所有样本的折射率光谱图进行 SNV 预处理后,谱图的特征峰逐渐明显,在进一步求平均值后可以看出,在 10~30 cm^{-1} 这一范围内,不同品质的板栗果仁的太赫兹谱图均存在特征峰,且 3 种品质的谱线呈现整体向下平移趋势,谱图差异明显,由此为后续建立板栗果仁品质定性判别模型提供了可能性。

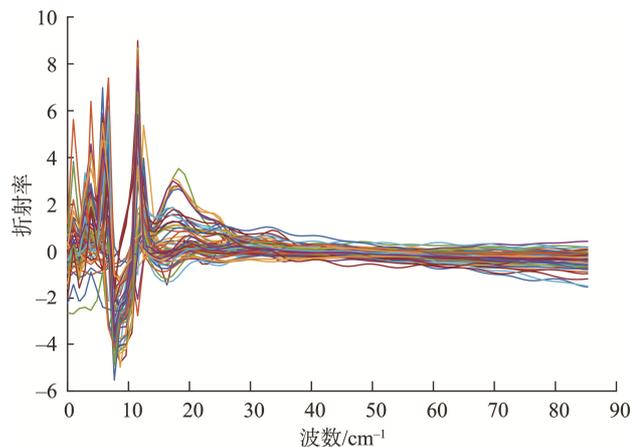
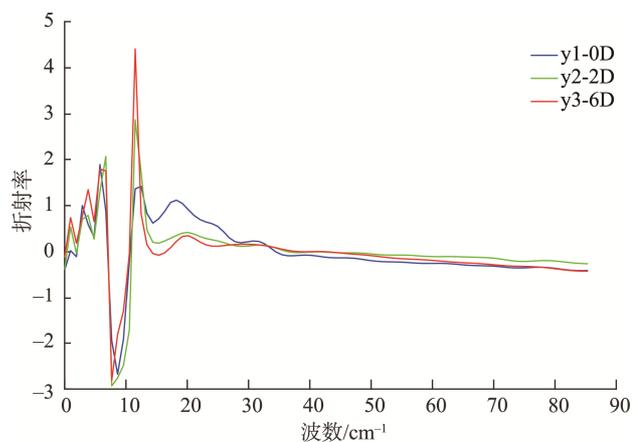


图 4 SNV 预处理后折射率谱图

Fig.4 SNV pretreated refractive index diagram



注: y1-0D: 霉变培养 0 d; y2-2D: 霉变培养 2 d; y3-6D: 霉变培养 6 d。

图 5 SNV 预处理折射率平均谱图

Fig.5 SNV pretreated refractive index average diagram

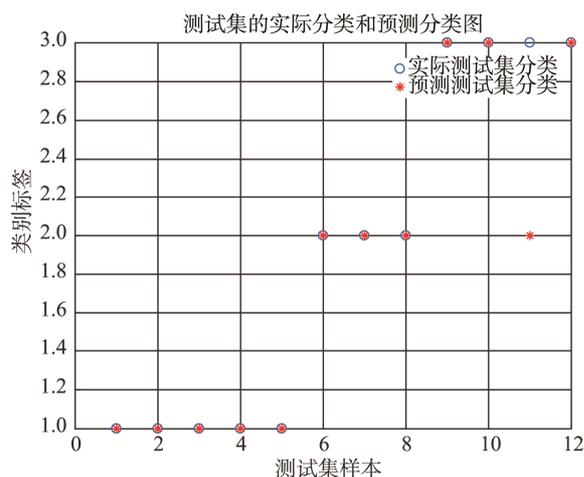
2.2 建模分析

2.2.1 PSO-SVM 算法的实现及分析

为进一步探索太赫兹时域光谱技术在板栗果仁霉变程度鉴别研究中的可行性, 对正常、轻度、重度霉变果仁样本建立基于全波段-折射率的板栗果仁霉变程度判别模型。

在建立三分类模型时, 选择采用基于粒子群算法进行参数寻优的 SVM 多分类算法。实验时, 按照 4:1 的比例划分训练集与测试集, 即 48 个样本作为训练集, 剩余 12 个样本作为测试集。在建模过程中, SVM 的核函数选择 RBF 核函数, 其惩罚系数 c 设定为 4, 以此参数结合样本数据建立基于折射率的板栗果仁霉变程度定性分类模型。

模型结果如图 6 所示, 圆圈表示实际测试集分类, 星号表示经 PSO-SVM 模型预测测试集分类。测试集 12 个样本, 11 个分类正确, 故模型正确率为 91.6667%, 模型可靠性较高。



注: 横坐标表示测试集样本编号, 纵坐标表示类别标签, 1 表示正常板栗果仁, 2 表示轻度霉变板栗果仁, 3 表示重度霉变板栗果仁, 下同。

图 6 PSO-SVM 模型预测结果

Fig.6 PSO-SVM model prediction results

2.2.2 GA-SVM 算法的实现及分析

为进一步提高鉴别模型的准确率, 尝试选用不同的参数寻优算法对正常、轻度、重度霉变果仁样本建立基于全波段-折射率的板栗果仁霉变程度判别模型。

在建立三分类模型时, 选择采用基于遗传算法进行参数寻优的 SVM 多分类算法。实验时, 按照 4:1 的比例划分训练集与测试集, 即 48 个样本作为训练集, 剩余 12 个样本作为测试集。在建模过程中, SVM 的核函数选择 RBF 核函数, 其惩罚系数 c 设定为 4, 以此参数结合样本数据建立基于折射率的板栗果仁霉变程度定性分类模型。

模型结果如图 7 所示, 圆圈表示实际测试集分类, 星号表示经 GA-SVM 模型预测测试集分类。测试集 12 个样

本, 12 个分类正确, 3 类测试样本都准确地被划分到自身所属类别当中, 模型正确率为 100%, 建模效果较为理想, 证实了模型具有一定可靠性。

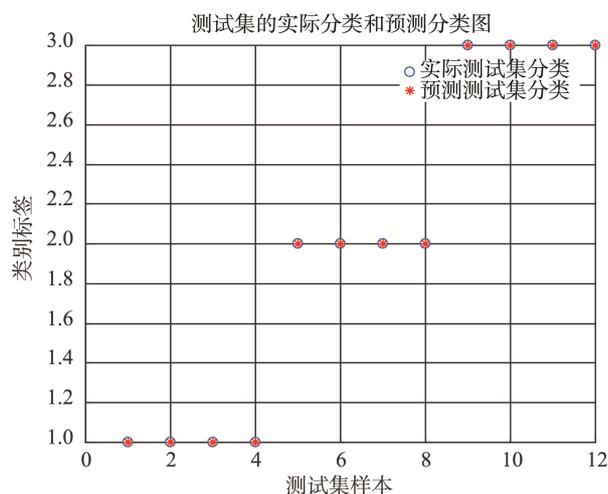


图 7 GA-SVM 模型预测结果

Fig.7 GA-SVM model prediction results

3 结论

本研究基于太赫兹时域光谱技术对板栗果仁的霉变程度进行探索研究。首先获得样本的时域光谱信息, 再经过快速傅里叶变换, 加窗(切趾)操作等处理后获得样本的吸收系数谱图和折射率谱图, 分析对比两种谱图特点后, 选择折射率谱作为建模数据, 结合 PSO-SVM、GA-SVM 算法建立板栗果仁霉变程度的定性分类模型, 其分类识别正确率分别为 91.6667%、100%。由此可得, 利用太赫兹时域光谱技术实现了对板栗果仁霉变程度的区识别, 为板栗果仁品质检测提供了一个新思路和技术方案, 同时为太赫兹技术在食品检测领域的应用提供了理论基础。

本研究中判别模型的准确率还存在一定的提升空间, 因此为加强模型的可行性和稳健性, 在后续实验中可持续改进, 如: 样本数量可以增多; 使用特征提取算法进行特征筛选, 减小数据冗余, 提高模型的判别速度; 研究更优的模式识别算法, 提升预测准确率。

参考文献

- [1] 胡嘉琪. 近红外漫反射法快速测定板栗的品质[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
HU JQ. Rapid determination of chestnut quality by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [2] 展慧. 基于多源信息融合技术的板栗分级检测方法研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
ZHAN H. Detecting of chestnut classification based on multi-source information fusion technique [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.

- [3] 江锡兵, 龚榜初, 汤丹, 等. 中国部分板栗品种坚果表型及营养成分遗传变异分析[J]. 西北植物学报, 2013, 33(11): 2216–2224.
JIANG XB, GONG BC, TANG D, *et al.* Genetic variation of nut phenotype and nutrient of some of Chinese chestnut cultivars [J]. Acta Botanica Boreali Occident Sin, 2013, 33(11): 2216–2224.
- [4] 回瑞华, 侯冬岩, 李铁纯, 等. 板栗中脂肪酸的气相色谱-质谱分析[J]. 食品科学, 2008, (8): 541–542.
HUI RH, HOU DY, LI TC, *et al.* Analysis of fatty acids in chestnut by GC-MS [J]. Food Sci, 2008, (8): 541–542.
- [5] 林顺顺, 庞凌云, 祝美云. 板栗的淀粉复合物与糯性关系综述[J]. 食品科学, 2012, 33(11): 308–311.
LIN SS, PANG LY, ZHU MY. Correlation between chestnut starch complex and glutinous characteristics [J]. Food Sci, 2012, 33(11): 308–311.
- [6] 韩元顺, 许林云, 周杰. 中国板栗产业与市场发展现状及趋势[J]. 中国果树, 2021, (4): 83–88.
HAN YS, XU LY, ZHOU J. Current situation and trend of Chinese chestnut industry and market development [J]. Chin Fruit, 2021, (4): 83–88.
- [7] 周明欣, 桂琳. 京津冀板栗出口现状及发展趋势[J]. 农业展望, 2020, 16(12): 135–138.
ZHOU MX, GUI L. Current situation and development trend of chestnut export in Beijing, Tianjin and Hebei [J]. Agric Outlook, 2020, 16(12): 135–138.
- [8] 展慧, 李小昱, 周竹, 等. 基于近红外光谱和机器视觉融合技术的板栗缺陷检测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 345–349.
ZHAN H, LI XY, ZHOU Z, *et al.* Detection of chestnut defect based on data fusion of near-infrared spectroscopy and machine vision [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2011, 27(2): 345–349.
- [9] 周竹, 刘洁, 李小昱, 等. 霉变板栗的近红外光谱和神经网络方法判别[J]. 农业机械学报, 2009, 40(S1): 109–112.
ZHOU Z, LIU J, LI XY, *et al.* Discrimination of moldy Chinese chestnut based on artificial neural network and near infrared spectra [J]. Trans Chin Soc Agric Machin, 2009, 40(S1): 109–112.
- [10] 张栋文, 袁建民. 太赫兹技术概述[J]. 国防科技, 2015, 36(2): 12–16.
ZHANG DW, YUAN JM. Overview of terahertz technology [J]. Nat Defen Technol, 2015, 36(2): 12–16.
- [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.
CAO C, ZHANG ZH, ZHAO XY, *et al.* Review of terahertz time domain and frequency domain spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2018, 38(9): 2688–2699.
- [12] 司黎明, 徐浩阳, 董琳, 等. 2020年太赫兹科学与技术热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 201–211.
SI LM, XU HY, DONG L, *et al.* Review on the hot spots of terahertz science and technology in 2020 [J]. Sci Technol Rev, 2021, 39(1): 201–211.
- [13] 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]. Spectrosc Spect Anal, 2019, 39(9): 2719–2724.
- [14] 李斌, WANG NING, 张伟立, 等. 基于太赫兹光谱技术的山核桃内部虫害检测初步研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1196–1200.
LI B, WANG N, ZHANG WL, *et al.* Preliminary research on insect damage detection in pecans using terahertz spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2014, 34(5): 1196–1200.
- [15] 戚淑叶, 张振伟, 赵昆, 等. 太赫兹时域光谱无损检测核桃品质的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(12): 3390–3393.
QI SY, ZHANG ZW, ZHAO K, *et al.* Study on nondestructive detection of walnut quality by terahertz time-domain spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2012, 32(12): 3390–3393.
- [16] DAVID A, NEWNHAM, TADAY PF. Pulsed terahertz attenuated total reflection spectroscopy [J]. Appl Spectrosc, 2008, 62(4): 394.
- [17] 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]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 361–366.
LIU CL, XING RX, WU JZ, *et al.* Rapid discrimination of peanut varieties using terahertz attenuated total reflection spectroscopy [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2018, 49(3): 361–366.
- [18] 张时馨, 耿阳阳, 刘亚娜, 等. 板栗贮藏失水过程对淀粉及其加工特性的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(14): 5786–5792.
ZHANG SX, GENG YY, LIU YN, *et al.* Study on the effect of dehydration on starch and processing characteristics of chestnut during storage [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(14): 5786–5792.
- [19] 聂东梅, 段双平. 热风干燥温度对丹东板栗感官品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(23): 8931–8935.
NIE DM, DUAN SP. Effect of hot air drying temperature on sensory quality of Dandong chestnut [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(23): 8931–8935.
- [20] 郭玉曦, 陈雪峰, 龚频. 板栗褐变控制方法研究现状[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 264–271.
GUO YX, CHEN XF, GONG P. Advance in control methods in browning of chestnut kernel [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(18): 264–271.
- [21] 龚方, 刘小菁, 康秋燕, 等. 傅立叶变换红外光谱技术对常见食源性致病菌和真菌快速分类鉴别[J]. 食品工业科技, 2022. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100062
GONG F, LIU XQ, KANG QY, *et al.* Rapid differentiation and identification of foodborne pathogenic bacteria and fungi by FT-IR spectroscopy [J]. Sci Technol Food Ind, 2022. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021100062
- [22] 刘翠玲, 胡莹, 吴静珠, 等. 基于太赫兹衰减全反射技术的花生霉变程度判别[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 333–338, 355.
LIU CL, HU Y, WU JZ, *et al.* Discrimination of peanut mildew degree based on terahertz attenuated total reflection spectroscopy [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2019, 50(4): 333–338, 355.
- [23] 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 XH, ZHANG J, YANG Y, *et al.* Research progress of optical parameter extraction methods based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2016, 36(11): 3449–3454.
- [24] 张娣. 基于太赫兹时域光谱的生物小分子检测与分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
ZHANG D. Detection and analysis of small biomolecules based on Terahertz time-domain spectroscopy [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2015.
- [25] TU S, WANG ZG, LIANG GL, *et al.* A novel approach to discriminate

- transgenic soybean seeds based on terahertz spectroscopy [J]. *Optik*, 2021, 242: 167089.
- [26] YANG S, LI CX, MEI Y, *et al.* Determination of the geographical origin of coffee beans using terahertz spectroscopy combined with machine learning methods [J]. *Front Nutr*, 2021, 8: 313.
- [27] ZENG DW, WANG SQ, SHEN YY, *et al.* A GA-based feature selection and parameter optimization for support tucker machine [J]. *Procedia Comput Sci*, 2017. DOI: 10.1016/j.procs.2017.06.004
- [28] HUANG CL, WANG CJ. A GA-based feature selection and parameters optimization for support vector machines [J]. *Exp Syst Appl*, 2006. DOI: 10.1016/J.ESWA.2005.09.024
- [29] 张婷慧, 宇洁, 叶张林, 等. 结合粒子群寻优的混合核函数极限学习机分类模型[J]. *测绘科学技术学报*, 2019, 36(1): 56–61.
ZHANG TH, YU J, YE ZL, *et al.* Classification model research of mixed kernel extreme learning machine based on particle swarm optimization [J]. *J Geomatics Sci Technol*, 2019, 36(1): 56–61.
- [30] 程超. 基于遗传算法改进 BP 神经网络电力系统负荷短期预测研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
CHENG C. Research on short-term load forecasting of power system based on improved BP neural network and genetic ALgorithm [D]. Zhengzhou: North China University of Water Conservancy and Electric Power, 2020.
- [31] 吕梦迪. 遗传算法及其简单应用[J]. *大众标准化*, 2020, (2): 64–65.
LV MD. Genetic algorithm and its simple application [J]. *Pop Stand*, 2020, (2): 64–65.
- [32] LIU X, WANG Y, SHI N, *et al.* GApORE: Boolean network inference using a genetic algorithm with novel polynomial representation and encoding scheme [J]. *Knowl Based Syst*, 2021. DOI: 10.1016/j.knosys.2021.107277
- [33] 陈资, 陈春雨, 张根保. 基于 GA-SVM 的数控机床装配质量预测模型[J]. *制造技术与机床*, 2021, (9): 97–100, 106.
CHEN Z, CHEN CY, ZHANG GB. Assembly quality prediction model of CNC machine tools based on GA-SVM [J]. *Manuf Technol Mach Tool*, 2021, (9): 97–100, 106.
- [34] 杨雪. 支持向量机多类分类方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
YANG X. A study of support vector machine classification [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [35] YASODA K, PONMAGAL RS, BHUVANESHWARI KS, *et al.* Automatic detection and classification of EEG artifacts using fuzzy kernel SVM and wavelet ICA (WICA) [J]. *Soft Comp*, 2020. DOI: 10.1007/s00500-020-04920-w
- [36] 刘晓欢, 刘翠玲, 孙晓荣, 等. 基于傅里叶红外光谱技术的大米产地溯源快速判别方法研究[J]. *食品科技*, 2021, 46(4): 244–249.
LIU XH, LIU CL, SUN XR, *et al.* Study on fast identification method of rice origin traceability based on Fourier transform infrared spectroscopy technology [J]. *Food Sci Technol*, 2021, 46(4): 244–249.
- [37] 苗钧魁, 张雅婷, 金永需, 等. 近红外技术在南极磷虾油关键品质指标快速检测中的应用研究[J]. *食品工业科技*, 2022. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120098
MIAO JK, ZHANG YT, JIN YP, *et al.* Application research of NIR technology on the fast quantification of the key quality indicators of antarctic krill oil [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120098

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



孙晓荣, 硕士, 教授, 主要研究方向为智能测量技术与数据处理、系统建模与仿真方法、智能控制方法研究。

E-mail: sxrchy@sohu.com



田 密, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全检测技术。

E-mail: 1761091160@qq.com