

基于生物阻抗特性分析的苹果霉心病无损检测

李芳¹, 蔡骋², 马惠玲^{3,*}, 王思玲³, 王媛³

(1.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学信息工程学院, 陕西 杨凌 712100;
3.西北农林科技大学生命科学学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为建立一种苹果霉心病的无损检测方法, 运用LCR测试仪在100Hz~3.98MHz频率、1V电压、(20±1)℃恒温条件下测定和比较富士苹果霉心病果和好果的7个阻抗参数变化规律及3个理化品质指标。结果表明: 随着频率的增加, 果实的复阻抗 Z 和并联电阻 R_p 下降, 电纳 B 和电导 G 增加, $\lg Z$ 、 $\lg B$ 分别与 $\lg f$ 呈极显著($R^2 > 0.99$)线性关系, 果实的复阻抗相角 θ 、并联电容 C_p 的对数值和损耗系数 D 的对数值均呈起伏式变化, 并依次有1、2、3个转折点。霉心病未改变果实各阻抗参数随频率的变化趋势, 却使果实复阻抗 Z 减少, B 和 C_p 增大。采用稀疏主元分析(SPCA)筛选出组成14个有效主元的27个非零加载系数的阻抗参数, 分别选取支持向量机(SVM)和人工神经网络(ANN)作为分类器, 以SVM对霉心病的识别效果更稳健, 经过10轮交叉验证的分类实验对霉心病果和好果的正确识别率达到94%, 确定了所筛选特征阻抗参数的有效性和SPCA-SVM信息分析软件用于霉心病识别的可行性。同步理化品质测定表明, 霉心病果的密度和可溶性固形物含量较好果下降, 这是霉心病果阻抗特性改变的理化基础。

关键词: 苹果; 霉心病; 阻抗特性; 稀疏主元分析-支持向量机; 稀疏主元分析-人工神经网络

Nondestructive Detection of Apple Mouldy Core Based on Bioimpedance Properties

LI Fang¹, CAI Cheng², MA Hui-ling^{3,*}, WANG Si-ling³, WANG Yuan³

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
2. College of Information and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
3. College of Life Science, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to explore and establish a non-destructive method for the detection of mouldy core in apples, the changes of seven impedance parameters with frequency and three physiochemical quality properties were measured on normal fruits and mouldy-core fruits of Fuji apple using LCR instrument under 100 Hz to 3.98 MHz, 1.0 voltage and constant temperature of (20 ± 1) °C. The results showed that with increasing frequency, complex impedance (Z) and parallel resistance (R_p) of apples revealed a decrease whereas susceptance (B) and conductance (G) exhibited an increase. Significant linear relationship between $\lg f$ and $\lg Z$ or $\lg B$ was observed, respectively ($R^2 > 0.99$); phase angle (θ), logarithm of parallel capacitance ($\lg C_p$) and logarithm of loss coefficient ($\lg D$) revealed a fluctuating trend, with 1, 2 and 3 turning points, respectively. Mouldy-core incidence did not change the trend of each impedance parameter-frequency curve in fruits, but the values of some parameters were altered, for example, Z decrease, B and C_p increased. Totally 27 specific impedance parameters with non-zero loading coefficient for the construction of 14 effective principal components were screened through sparse principal component analysis (SPCA). When recognizing mouldy-core fruits using classifiers of support vector machine (SVM) and artificial neural network (ANN), SVM provided higher accuracy. In addition, in 10 cross-validation classification tests, mouldy core fruits could be discriminated with an accuracy of 94%, confirming the validity of impedance parameters screened and the feasibility of SPCA-SVM analysis software for discriminating mouldy-core from normal fruits. Moreover, the incidence of mouldy-core fruits presented a decrease in density and soluble solid contents in comparison to normal fruits, which provided a physiochemical basis for changes in bio-impedance properties.

Key words: apple; mouldy core; impedance property; Sparse principal component-SVM; SPCA-ANN

中图分类号: S183; S661.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)18-0197-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201318040

收稿日期: 2012-09-24

基金项目: 农业部现代农业(苹果)产业技术体系建设专项; 国家自然科学基金青年科学基金项目(6120218)

作者简介: 李芳(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事果实采后技术研究。E-mail: xiaooshenghuo1986@163.com

*通信作者: 马惠玲(1965—), 女, 教授, 博士, 主要从事果实采后生理与技术研究。E-mail: ma_huilin65@hotmail.com

苹果霉心病又称霉腐病、心腐病。霉心病果主要表现为心室霉变(霉心型)和果心腐烂(心腐型),果面不出现明显相关症状。因此,霉心病果实较难识别,不易被发现^[1],其混在好果中流入市场,不仅损害了消费者权益,也会影响果商和产地的声誉,甚至在国际市场上影响国家的声誉。研究者们非常重视霉心病发病原因及防治措施的研究^[2-3],努力从源头上控制病果的出现^[4],却因缺乏有效的检测手段,无法在果实分级流水线上准确剔除已经发病的果实,霉心病的检测成为困扰苹果采后产业的一大难题。阻抗特性是由生物组织的物质成分、分子结构所决定的,是生物固有特性,实践中可以在不干扰生物代谢的微弱电场中较容易地对其进行无损测量^[5],生物阻抗特性检测具有设备简单、投资费用低、对材料变化反应灵敏等特点^[6]。已有研究发现,果实的成熟度、含水率等一些生理指标与其阻抗特性具有一定的相关关系^[7],苹果表面红点病、机械损伤以及虎皮病可以通过某些特征阻抗参数的变化表现出来^[8-9]。苹果新鲜度分级也可通过多个阻抗参数特征值构建的主成分结合数学分类器实现^[10]。利用阻抗特性这一物理指标对果实进行无损检测具有广阔的应用前景,而目前对苹果阻抗特性与霉心病的关系尚未见报道。本实验选用采收期的富士苹果霉心病果和好果为材料,测试分析二者阻抗参数特征值变化的不同规律,以期建立一种基于生物阻抗特性的苹果霉心病无损检测方法。

1 材料与方 法

1.1 材料

供试苹果品种为富士,采自陕西省宝鸡市扶风县召公镇农家果园。于商品成熟期,选取大小均匀、成熟度一致、无机械伤的疑似霉心病果(根据有经验的果农对果实进行判断)和好果采收,采后当天运回西北农林科技大学实验室,置于(20±1)℃、相对湿度80%~85%的室内摊放一昼夜,充分散发田间热,保持温度平衡,再次挑选确定均匀一致的霉心病果和好果各260个,备用。

1.2 仪器与设备

3532-50 LCR测试仪 日本Hioki E.E.公司;铜制正方形平行板电极(6cm×6cm) 自制;FT-327水果硬度计意大利Breuzzi公司;LH-T32糖度计 杭州路恒生物科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 阻抗参数和密度测定

对选取的疑似霉心病果和好果逐一编号,逐果测定复阻抗 Z 、复阻抗相角 θ 、并联电容 C_p 、并联电阻 R_p 、介电损耗系数 D 、电导 G 及电纳 B ,共7个阻抗参数值。测试频率为100Hz~3.98MHz。其他测试条件主要参照文献[11]。每

个果实的测定值均取沿其赤道两个垂直方向重复测定2次的平均值。同时采用排水法逐果测定密度。

1.3.2 样品果实及其阻抗特性数据库的选定

阻抗参数测试及密度测定后沿横径切开,观测果实发病情况,从260个疑似病果中选出48个真实发生霉心病的果实,挑取相同数量的好果,分别将好果和病果的各阻抗参数测定值与果实编号对应列表,建立分析数据库。

1.3.3 品质指标的测定

对挑取的霉心病果和好果各48个果实进行密度测定后,再逐一测定其硬度及可溶性固形物含量。

1.3.4 数据处理

测定数据用SPSS 17.0进行分析,同时对霉心病果和好果各48个果实的阻抗参数值取其平均值,用Excel软件作图,用稀疏主元分析-支持向量机联合运算(sparse principal component analysis-support vector machine, SPCA-SVM)和稀疏主元分析-神经网络联合运算(sparse principal component analysis-artificial neural network, SPCA-ANN)建立阻抗参数识别霉心病的数据处理模型,确定识别率。

1.3.5 稀疏主元分析的原理

主元分析(principal component analysis, PCA)是模式识别、机器学习和数据分析中一种常用的数据降维或特征提取技术^[12],设D维的原始信号为 x ,经过主元投影向量 w ,得到新的变量 $y=w^T x$ (T 代表转置),对于训练样本集合 $X=\{x_i\}$, $1\leq i\leq N$,主元投影向量 y 的求解如公式(1)所示:

$$w = \operatorname{argmin}_{w \in R^D} \frac{\|w\|_2}{\|xw\|_2} \quad (1)$$

稀疏主元分析(sparse principal component analysis, SPCA)通过加入稀疏约束,使得计算得到的主元方向既能够保持数据的分布特性,又能够筛选出更稀疏的投影方向,加入稀疏约束的求解方程由公式(1)演变为公式(2):

$$w = \operatorname{argmin}_{w \in R^D} \frac{(1-\alpha)\|w\|_2 + \alpha\|w\|_1}{\|xw\|_2} \quad (2)$$

式中: α 为加权系数,取值范围为[0,1],权衡主元稀疏性的权重,当 α 取0时,退化为传统的PCA。

1.3.6 支持向量机分类器的选择

支持向量机(support vector machine, SVM)基于超平面线性可分假设,寻找一个超平面映射,使得类别中最近的点到该超平面的几何间隔最大。如果训练集在原始空间中线性不可分,则SVM将样本点通过核函数映射到高维空间使其线性可分。本实验选用径向基(RBF)核函数,性能较稳定,参数容易筛选。

1.3.7 神经网络分类器的选择

人工神经网络(artificial neural network, ANN)通过模拟自然神经网络的连接模型,可以逼近复杂的非线性分布,由于所有定量或定性的信息都等势分布存储于网络内的各个神经元,对于高维空间中的数据分类具有较强的鲁棒性。本实验选取前向反馈神经网络,具有较强的容错性能。

2 结果与分析

2.1 霉心病对果实各阻抗参数随频率变化规律的影响

2.1.1 果实复阻抗Z和并联电阻R_p

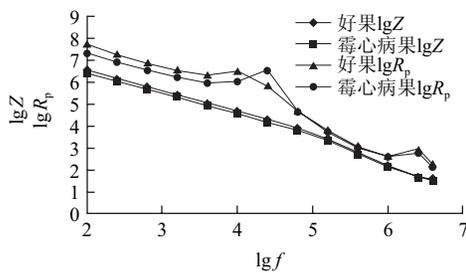


图1 果实复阻抗Z和并联电阻R_p随频率的变化

Fig.1 Change in impedance (Z) and parallel resistance (R_p) of fruits with frequency

由图1可知,两种果实的lgZ和lgR_p均随着lgf的增大而总体下降,这一结果与同一频率段内测定的富士苹果好果和虎皮病果^[9]、嘎啦苹果^[14]、番茄^[15]、红巴梨^[16]、火柿^[17]上表现一致。说明100Hz~3.98MHz范围内,Z与R_p在不同种类、不同品种苹果果实中均随频率增加而下降,苹果果实发生霉心病不改变这一趋势。lgZ与lgf之间具有很好的线性相关关系,二者在好果上的拟合方程为lgZ=-1.091lgf+8.914, R²=0.991,在霉心病果上的线性拟合方程为lgZ=-1.074lgf+8.733, R²=0.992;lgR_p随lgf增大而下降的过程中,在10~63.1kHz和1.0~3.98MHz区间出现向上振荡,此时lgR_p与lgf不呈现严格的线性关系。频率是影响阻抗特性的最主要因素之一,低频条件下细胞壁容抗较大,交流电只能通过细胞壁。随着频率的增加,细胞膜的容抗降低,导电性增强^[18]。因此,反映电阻特性的复阻抗Z和并联电阻R_p表现出随频率增大而增大的总体趋势。但是,某些频率条件下离子和水分子会因运动取向调整而发生传导性和松弛性的改变^[19],使各阻抗参数的取值受到干扰,R_p在两频率区间内的波动正是这种干扰的表现,而Z受到的干扰不明显,说明Z受离子和分子电阻特性转换的影响不大。

霉心病减少了果实各频率条件下的Z,与好果的差异在频率100Hz~1MHz区间达显著水平(P≤0.05);霉心病果R_p在100Hz~10kHz范围内小于好果,差异显著

(P≤0.05)。由于霉心病加速果实衰老^[2],衰老使细胞膜透性增大,细胞膜容抗下降,因此,霉心病引起电阻抗类参数下降。但是,当频率大于10kHz后,霉心病果与好果的R_p大小有交替现象,如在25.1kHz时病果R_p极显著高于好果(P≤0.01),在2.51MHz时又显著低于好果(P≤0.05),这与霉心病引起膜容抗下降,可能在某些频率时引发了其他对R_p有影响的理化性质变化有关,其综合作用使R_p在不同频率条件下与好果的R_p不同。可见,Z和R_p两参数中,只有Z可在宽泛的频率区间对苹果霉心病作出一致的响应,其变化预示着霉心病的发生,是可能预告该病的阻抗参数之一。

2.1.2 果实电纳B和电导G

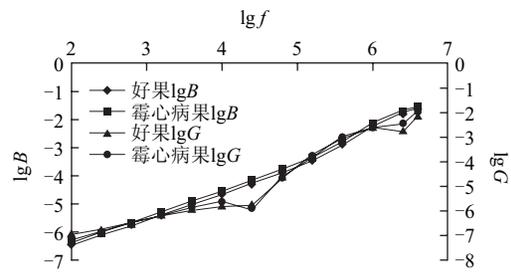


图2 果实电纳B和电导G随频率的变化

Fig.2 Change in susceptance (B) and conductance (G) of fruits with frequency

从图2可以看出,霉心病果与好果的电纳B对数值和电导G对数值均随着频率对数值的增大而增大,这与迄今测定的同一频率段内红富士苹果的好果与虎皮病果^[9]、红巴梨^[16]、火柿^[17]上的表现一致。说明100Hz~3.98MHz范围内,B与G在不同种类果实中均随频率的增大而增大,果实发生霉心病不改变这一变化趋势。其中,lgB与lgf呈现良好的线性关系,在好果上的线性拟合方程为lgB=1.069lgf-8.804, R²=0.990,在霉心病果上的线性拟合方程为lgB=1.061lgf-8.660, R²=0.991,几乎是两条平行的直线。lgG随lgf增大而增大的过程中在25.1kHz、2.51MHz条件下出现了两次向下振荡,此时lgG和lgf不呈现严格的线性关系。与电阻类参数变化原因相同,随着频率的增大,交流电逐渐能通过整个原生质体^[18],导电性增强,反映导电性的B与G均呈增大的总趋势。可是,由于不同频率下离子传导性和水分子松弛性不同^[19],又使G在一定频率段出现向下浮动,而B受离子和分子导电特性转换的影响不明显,持续下降。

各频率下霉心病果的B值均大于好果,并在1580Hz~1MHz区间均达到差异显著水平(P≤0.05);霉心病果与好果的G值却在总体接近水平上大小交替。霉心病有减少果实细胞容抗,增大电导的趋势,但是这一趋势只表现在电纳B上,电导G可能还受到其他同步理化变化的干扰而没有出现净增加。因此,B是可能预告苹果霉心病发生的另一阻抗参数之一。

2.1.3 果实复阻抗相角 θ 、并联等效电容 C_p 和介电损耗系数 D

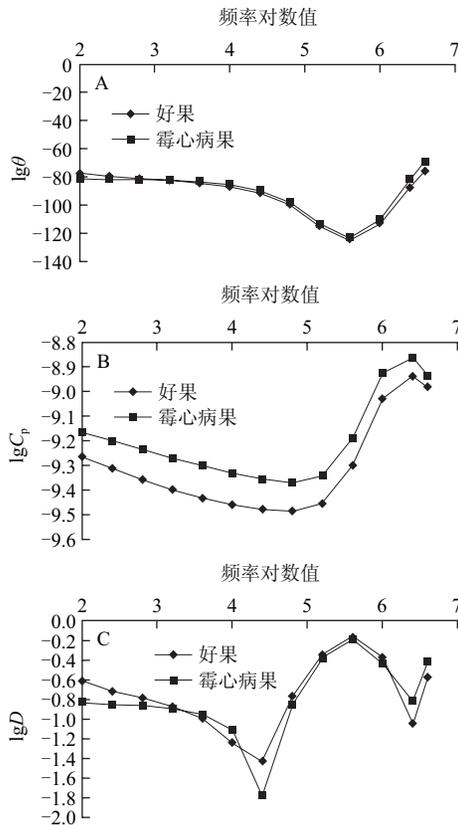


图3 果实复阻抗相角 θ (A)、并联电容 C_p (B)、介电损耗系数 D (C)随频率的变化

Fig.3 Change in impedance phase angle (θ) (A), parallel capacitance (C_p) (B) and loss coefficient D (C) of fruits with frequency

由图3可知,霉心病果和好果复阻抗相角 θ 、并联电容 C_p 和介电损耗系数 D 这三种参数的对数值均随频率对数的增加呈现先由慢到快下降,再快速上升的起伏式变化。3种参数出现第1个下伏波谷的频率依次减少,分别为398、63.1、25.1kHz。在红巴黎上测定 C_p 也出现了相似的波谷^[16],说明不同种类果实 C_p 随频率的变化趋势趋于一致, θ 和 D 方面还有待在其他果实上进一步观测。 θ 、 C_p 和 D 中,波谷出现最晚的 θ 只有1次拐点;第1波谷出现较早的 C_p 和出现最早的 D 分别在较高频率区又出现了第2个、第3个变化拐点。霉心病果实在各个频率条件下的 C_p 对数值均大于好果,并在631Hz~1.0MHz区间内差异显著($P \leq 0.05$)。霉心病果的 θ 和 D 在低频端有低于好果的趋势,在高频端又有高于好果的趋势,大部分频率条件下与好果相同,说明霉心病使果实的复阻抗相角 θ 和损耗系数 D 对频率变化的响应延迟,而对 C_p 的影响在各频率下趋于一致, C_p 被选为第3个可能预告霉心病发生的参数。

根据谐振点前介电损耗系数 D 减小,电容容量随频率的增加而减小,谐振点后介电质无序运动活跃, D 增大,

电容容量随频率的增加而增加的原理,和本实验中观测到 D 在10~63.1kHz和1~3.98MHz两个频段内各跃变性增大1次(图3C)的现象推知,在本实验测定频率范围内存在2个谐振点,由于谐振点处电损耗加大引起电阻增大和电导下降,因此 R_p 和 G 在对应频段内出现随频率增大而下降和上升方向上的相反浮动。但是,复阻抗 Z 和电纳 B 受频率和果实发生霉心病的影响大于受谐振的影响,这为霉心病的无损检测提供了可能。

2.2 基于SPCA-SVM和SPCA-ANN对霉心病果与好果的区分

综合上述7个阻抗参数的测定结果,3个参数都在各频率区段可能预告霉心病的发生,其他参数也偶尔在几个频率点处在好果与病果间有所差异,因此具有选取特征参数、构建识别霉心病模型的实际依据。采用稀疏主元分析进行有效特征参数的筛选,再分别通过SVM分类器和ANN分类器试着区分两类果实。

2.2.1 SPCA主元数对霉心病识别准确率的影响

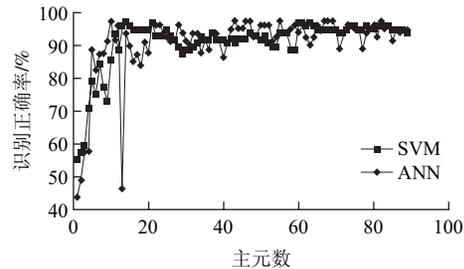


图4 不同主元数对霉心病的SPCA-SVM和SPCA-ANN识别准确率的影响

Fig.4 Discrimination accuracy with SPCA-SVM and SPCA-ANN under different sparse principal component numbers

由图4可见,对于SVM和ANN分类器,随着SPCA主元数的增加,霉心病识别准确率随之增大。从总体的趋势看,SVM分类器要比ANN分类器更加稳健,这是由于SVM分类器中引入了结构风险,能够取得更好的泛化性能,为了使算法模型更具普适性,建议选取SVM分类器。可以看到针对SVM分类器,当主元数从1增加至14~20时,识别准确率从55%上升到96%,而主元数在20~90之间虽然识别准确率保持在90%附近起伏变化,但整体有所下降,说明主元数过多时对分类结果有所干扰,因此,选取前14个最有效的主元为SVM分类器的向量。

2.2.2 识别霉心病果最少有效阻抗参数的选出

由表1可知,2.2.1中确定的14个有效主元(sparse principal component, SPC)依次由1~14个非零加载系数的特征阻抗参数组成,除SPC1和SPC2外,构成其他各主元的阻抗参数间有所重复,使构成所有14个最有效主元的阻抗参数只占全部观测91个参数(7个阻抗特性指标

表1 最高正确分类率所需至少14个稀疏主元的特征阻抗参数及其加载系数

Table 1 Specific impedance parameters and their loading coefficient for the least 14 SPCs required for the maximum classification accuracy

参数名称	特征频率/Hz	SPC1	SPC2	SPC3	SPC4	SPC5	SPC6	SPC7	SPC8	SPC9	SPC10	SPC11	SPC12	SPC13	SPC14	
复阻抗Z	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3004	0	0	0	
	251	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3327	0	-0.3012	0	0	0	
	631	1	0	0	0	0	0	0	0	-0.3332	0	-0.3017	0	0	0	
	1580	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3335	0	-0.3019	0	0	0	
	3980	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3336	0	-0.302	0	0	0	
	10000	0	0	-0.5773	0	-0.4471	0	0	0	-0.3337	0	-0.302	0	0	0	
	25100	0	0	-0.5774	0	-0.4473	0	0	0	-0.3336	0	-0.302	0	0	0	
	63100	0	0	-0.5773	0	-0.4473	0	0	0	-0.3335	0	-0.3019	0	0	0	
	158000	0	0	0	0	-0.4473	0	0	0	-0.3333	0	-0.3017	0	0	0	
	398000	0	0	0	0	-0.4471	0	0	0	-0.333	0	-0.3014	0	0	0	
1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3004	0	0	0		
并联电容C _p	1580	0	-0.7071	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3980	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.2883	-0.277	-0.2669	
	10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3161	0	-0.2888	-0.2775	-0.2674	
	25100	0	0	0	0	0	-0.4082	-0.3779	-0.3535	0	-0.3163	0	-0.2889	-0.2776	-0.2676	
	63100	0	0	0	-0.5	0	-0.4083	-0.378	-0.3536	0	-0.3164	0	-0.2889	-0.2776	-0.2676	
	158000	0	0	0	-0.5	0	-0.4082	-0.378	-0.3536	0	-0.3163	0	-0.2888	-0.2776	-0.2676	
	398000	0	0	0	0	0	0	-0.3778	-0.3534	0	-0.3161	0	-0.2885	-0.2773	-0.2673	
	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.2666	
	1580	0	-0.7071	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3980	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.2883	-0.277	-0.2669	
电纳B	10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.3161	0	-0.2888	-0.2775	-0.2674	
	25100	0	0	0	0	0	-0.4082	-0.3779	-0.3535	0	-0.3163	0	-0.2889	-0.2776	-0.2676	
	63100	0	0	0	-0.5	0	-0.4083	-0.378	-0.3536	0	-0.3164	0	-0.2889	-0.2776	-0.2676	
	158000	0	0	0	-0.5	0	-0.4082	-0.378	-0.3536	0	-0.3163	0	-0.2888	-0.2776	-0.2676	
	398000	0	0	0	0	0	0	0	-0.3534	0	-0.3161	0	-0.2885	-0.2773	-0.2673	
	1000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.2764	-0.2666	
非零参数个数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	

在13个频率点处的观测值, 7×13=91)中的27个, 而且这27个特征参数只涵盖Z、C_p和B这3种阻抗参数, 与霉心病果与好果的Z、C_p和B在各个频率点处观测值普遍有所差异的直观结果一致, 并使这3个指标的有效观测频率和用于区分霉心病果和好果的方法具体化。其他阻抗特性指标以及Z、C_p和B的非入选频率区均可省去不测, 达到了精简测定指标数的效果。采取这14个主元用于霉心病果与好果区分, 选取支持向量机作为分类器, 10轮交叉验证的分类实验表明, 霉心病果正确识别率达到94%, 验证了所筛选阻抗参数的有效性, 也确定了SPCA-SVM用于识别霉心病的可行性。

2.3 霉心病对果实理化品质的影响

表2 不同果实的3个理化品质值

Table 2 Three physicochemical attributes of different fruits

果实种类	密度/(g/cm ³)	硬度/(kg/cm ²)	可溶性固形物含量/%
好果	0.654±0.015 ^a	12.15±1.78 ^a	7.13±0.51 ^a
霉心病果	0.613±0.017 ^b	10.78±1.21 ^a	6.66±0.89 ^b

注: 观测值=均值±标准差; 同列不同肩标小写字母表示差异显著(P≤0.05)。

从表2可以看出, 霉心病造成果实密度和可溶性固形物含量显著减少(P≤0.05)。霉心病果的硬度虽然小于好果, 但是差异未达显著水平。有报道^[20]称霉心病果的可滴定酸显著下降, 说明霉心病的发生促进了果实衰老, 表现为固形物消耗增大, 密度下降等。

3 讨论与结论

苹果霉心病果是由真菌感染引起的病害, 灰绿、灰白、灰黑等颜色的霉菌在果心滋生, 进而导致果心区果肉从心室向外腐烂, 果肉味苦^[1-2]。随着霉心病的发生, 果实内部特别是近心室部分的细胞形状产生变化, 可滴定酸减少^[19], 可溶性固形物含量降低, 可推知病果较好果电解质减少, Z和R_p增大, B和G减小, 可是实际结果却相反; 是因为病果内多酚氧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶活性和总酚含量较高, 促进细胞膜透性增大的丙二醛含量也大大增加^[21], 电解质向胞间渗漏较多, 组织疏松度大于好果, 自由空间比例高。病果中电流通过外质体传导较好果中更加通畅, 运行障碍减少, 阻力小, 抵消了糖、酸等电解质减少的影响, 表现出电阻减少,

电导增大的现象。可见,果实阻抗特性的改变是内部化学组分、组织结构变化的综合结果,二者之间既相互依赖,又相对独立,各自遵循着不同的变化规律。

本课题组在前期工作得出,果实新鲜度(综合内在品质)的下降与多个阻抗参数的特征值有关,揭示了阻抗特性与果实内在品质变化相关关系的复杂性^[8],本实验得出霉心病的发生主要改变了苹果果实3种阻抗参数的27个特征值的大小,进一步支持了果实阻抗特性对内部品质改变的响应是多对多的关系,而非多对一,即非个别1~3个敏感特征值所能反映。因为病害或品质改变往往以多项理化和生理指标的共同变化表现出来,相应地,阻抗特性改变也会以一整套参数观测值的变化表现出来。另外,不同的果实性状变化引起同步变化的阻抗参数会有所不同,找出一种快速筛选敏感参数的方法是利用阻抗特性进行果实无损检验的关键。本实验通过稀疏主元(SPCA)分别结合两种分类器的分析方法比较得出,采用SPCA-SVM可快速筛选出用于识别苹果霉心病的特征阻抗参数,它们涉及了3个阻抗参数不同频率下的观测值,比较全面而且准确地锚定了特征参数,是比较稳妥的数据分析方法。

苹果霉心病果与好果的复阻抗 Z 、并联电容 C_p 、电纳 B 在100Hz~3.98MHz频段内各个频率点下的观测值均具有一致性差异,并联电容 R_p 、电导 G 、复阻抗相角 θ 和介电损耗因子 D 的规律性差异不明显。通过稀疏主元分析(SPCA)从7种阻抗参数13个频率点下的共91个特征值中提取了 $Z_{100\text{Hz}\sim 1\text{MHz}}$ 、 $C_{p1580\text{Hz}\sim 1\text{MHz}}$ 、 $B_{1580\text{Hz}\sim 1\text{MHz}}$ 范围内的27个特征值构成14个有效主元,采用SPCA-SVM对霉心病及好果分类识别率达到94%。

参考文献:

- [1] 李晓荣,陈小飞,李晓萍. 苹果霉心病发生原因及防治措施[J]. 果农之友, 2009, 9(11): 26-27.
- [2] 刘秀玲. 苹果霉心病的发生及防治技术[J]. 北京农业, 2009, 28(16): 37-38.
- [3] REUVEN M, PRUSKY D. Improved control of moldy-core decay (*Alternaria alternata*) in red delicious apple fruit by mixtures of DMI fungicides and captan[J]. European Journal of Plant Pathology, 2007, 118(4): 349-357.
- [4] XIN Yucheng, QIN Shulian, LI Baodu, et al. Control efficacy and inhibitory action of *Bacillus subtilis* XM16 strain on disease and pathogens of apple mould core[J]. Acta Phytopathol Sin, 2000, 30(1): 66-70.
- [5] 王文艇, 钟季康, 马骏, 等. 生物阻抗技术概述[J]. 上海针灸杂志, 2005, 24(11): 40-44.
- [6] 郭文川, 郭康权, 朱新华. 介电特性在番茄和苹果品种识别中的应用[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 130-132.
- [7] 郭文川, 郭康权, 王乃信. 电激励信号的频率和电压对果品电特性的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 62-65.
- [8] 马海军, 宋长冰, 张继澍, 等. 电激励信号频率对红点病苹果采后电学特性影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 97-101.
- [9] 马海军, 冯美, 张继澍. 100Hz~3.98MHz下苹果虎皮病果实电特性研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 105-108.
- [10] 蔡骋, 李晓龙, 马惠玲, 等. 基于100Hz~3.98MHz下生物阻抗特性无损测定的苹果新鲜度SPCA-LDC法分级[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 147-152.
- [11] 马海军. 用电学参数标志苹果采后病害和机械损伤响应机制的研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2010.
- [12] WOLD S. Principal component analysis[M]. Proceedings of the Multivariate Statistical Workshop for Geologists and Geochemists, 1987: 3-752.
- [13] HEIN M, BÜHLER T. An inverse power method for nonlinear eigenproblems with applications in 1-spectral clustering and sparse PCA[M]. NIPS, 2010: 847-855.
- [14] 王玲, 黄森, 张继澍, 等. “嘎拉”苹果果实品质的电学特性研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2): 402-407.
- [15] 陈志远, 张继澍, 刘亚龙, 等. 番茄成熟度与其电学参数关系的研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(4): 826-830.
- [16] 王瑞庆, 张继澍, 马书尚. 基于电学参数的货架期红巴梨无损检测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 243-247.
- [17] 周永洪, 黄森, 张继澍, 等. 火柿果实采后电学特性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 117-122.
- [18] 郭文川, 朱新华, 郭康权. 采后苹果电特性与生理特性的关系及其应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 136-139.
- [19] 朱新华, 郭文川, 郭康权. 电激励信号对果品电参数的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(11): 125-128.
- [20] 辛玉成, 秦淑莲, 李宝笃, 等. 苹果品种霉心病发生与果实糖和酸含量的相关性研究初报[J]. 青岛农业大学学报: 自然科学版, 1996, 13(4): 286-287.
- [21] LI Shunfeng, ZHANG Lihua, LIU Xinghua. Effects of mouldy core and core rot on physiological and biochemical responses of apple fruit[J]. Food Agriculture, 2011, 91(14): 2674-2678.