

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.028

基于生物阻抗特性的苹果新鲜度无损测定*

蔡 骋¹ 李晓龙² 马惠玲³ 任小林⁴ 黄良妹³ 曾燕春³

(1. 西北农林科技大学信息工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 宁夏农科院种质资源研究所, 银川 750021;
3. 西北农林科技大学生命科学院, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 以红富士苹果为试材, 在室温下贮存得到失重率 0、5%、10%、15% 和果心褐变果实, 分别定义为 1、2、3、4、5 级新鲜度, 采用 LCR 阻抗仪测定各等级共 424 个果实的 14 个生物阻抗参数在 9 个频率点下的 126 个特征值。通过稀疏主元分析-线性分类器 (SPCA-LDC) 模型试验, 得出适宜的选样比例 (训练样本数与测试样本数之比) 为 9:1, 主元数达到前 39~45 个时分级正确率达到最大值; 构成至少 39 个主元的生物阻抗特征参数为 44 个; 50 次重复试验的分级正确率平均值为 87.90%。

关键词: 苹果 新鲜度 生物阻抗 无损测定 稀疏主元分析 线性分类器

中图分类号: S183; S661.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)02-0147-06

Non-destructive Detection of Freshness Grade for Apple Fruit Based on Bio-impedance Properties

Cai Cheng¹ Li Xiaolong² Ma Huiling³ Ren Xiaolin⁴ Huang Liangmei³ Zeng Yanchun³

(1. College of Information and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Germplasm Resources, Ningxia Academy of Agricultural Science, Yinchuan 750021, China

3. College of Life Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Bioimpedance properties of Fuji apple fruit with different freshness were investigated. Fruit with weight loss of 0, 5%, 10%, 15% and core-browning under room temperature were chosen as samples corresponding to descending freshness grades of 1, 2, 3, 4, 5, respectively. 126 observations of 14 bio-impedance parameters under nine frequencies of total 424 fruit from each grade were measured fruit by fruit with LCR impedance meter. Data were computed by using the sparse principal component analysis - linear classifier (SPCA-LDC) model. Results indicated that classification accuracy reached to maximum stably when the ratio of training sample to test sample of 9:1 and former 39~45 principal component (PC) were adopted. The least 39 PCs were consisted of 44 from the 126 observations. Average rate of classification accuracy reached to 87.90% within 50 test repeats.

Key words: Apple Freshness Bio-impedance Non-destructive detection Sparse principal component analysis Linear classifier

引言

生物阻抗特性是指生物体在低于引起其兴奋的

低频电场中电导、阻抗、介电常数等电参数的特征变化。由测定的阻抗参数提取生物体生理、物理化学信息的技术称为生物阻抗技术。该技术灵敏、操作

收稿日期: 2012-02-25 修回日期: 2012-03-28

* 国家自然科学基金资助项目 (61202188)、农业部现代农业产业技术体系建设专项资助项目和陕西省自然科学基金资助项目 (2010JQ8019)

作者简介: 蔡骋, 副教授, 博士, 主要从事农业科学试验中数据处理与信息分析研究, E-mail: chengcai@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 马惠玲, 教授, 博士生导师, 主要从事果实采后生理与技术研究, E-mail: ma_huiling65@hotmail.com

简便、仪器成本低,被广泛应用于医学无创检测^[1]。由于阻抗特性测定能够穿透生物材料,综合反映果实内部品质,较光谱检测、图像处理等技术具有不同的优势,在果实无损检测领域具有应用前景。已报道的一些研究成果表明^[2~13],并非所有阻抗参数都与果实品质的变化间存在关联性;而同一阻抗参数在不同品种果实上表现出与内部品质的相关性也不相同。如果锁定1~2个参数为指标,其与品质变化之间的相关关系很难代表阻抗特性与品质之间的真实关联性。因此,本文测定不同等级新鲜度苹果的14个阻抗参数在9个频率点下的特征值,通过稀疏主元分析和分类效果测试,全面筛选准确用于苹果新鲜度分类的敏感阻抗参数,并建立分类实现方法,为生物阻抗法尽快应用于果实品质的无损测定提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 苹果试材

采用75 mm级“长富二号”红富士苹果,2010年10月18日采于陕西省白水西北农林科技大学苹果试验基地。果实去梗,套发泡网并装于瓦楞纸箱中,采摘当天运回学校实验室,室温(20℃)下平衡24 h后,挑选果形一致、无伤、无病果1 200个,18~20℃下裸果贮存。另外120个果实装入60 μm厚PVC袋内,高CO₂条件(7 d内CO₂体积分数升至6%~10%)下同温贮存,至袋内出现第一个可见病果时终止(74 d)。

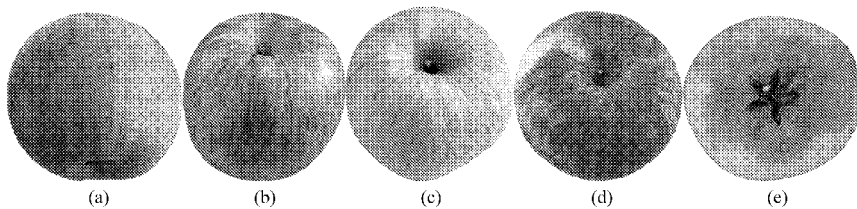


图1 各等级果实外观图

Fig. 1 Appearance of fruit under each freshness grade

(a) 失重率0(1级) (b) 失重率5%(2级) (c) 失重率10%(3级) (d) 失重率15%(4级) (e) 果心褐变果(5级)

1.3 数据分析原理

1.3.1 SPCA 原理

尽管相对于破坏性测试而言,阻抗参数的测定简便、快速、高效,但如果每次都测定14种阻抗参数及其从低频到高频的9种频率下的共126个特征值,依然大量消耗人力、物力,也影响测定效率。另外,126个阻抗参数里并非所有都会对苹果等级的划分有不可替代的作用。一些潜在的冗余信息很有可能不但对等级区分没有贡献,而且还会混淆等级划分。而稀疏主元分析(SPCA)能够用稀疏的加载系数构造主元,从而将有用的苹果指标信息从庞杂

1.2 测定项目及方法

1.2.1 果实阻抗参数值测定

贮存期间跟踪测定裸果组果实失重率,分别于失重率0、5%、10%、15%时随机抽取各100个外表无伤、无病果,编号并逐果测定其阻抗参数值;同时观察包装组病变情况,至出现病变时终止贮存,用X光照射选出果心褐变果24个,对病果亦逐果进行阻抗参数值的测定。阻抗参数值采用日本日置3532-50LCR型电子测量仪和平板电极系统测定,同文献^[6]相同条件下测定果实在158、251、398、15 800、25 100、39 800、1 580 000、2 510 000、3 980 000 Hz共9个频率点下的复阻抗 Z 、串联电容 C_s 、串联电阻 R_s 、串联电感 L_s 、并联电容 C_p 、电导 G 、并联电阻 R_p 、并联电感 L_p 、导纳 Y 、损耗角 θ 、损耗角正切 $\tan\theta$ 、品质因子 Q ,每个果实沿其横径东西和南北走向重复测定2次,取平均值即得各个果实各阻抗参数的测定值,通过公式求得介电常数 ϵ' 、相对介质损耗因子 ϵ'' ^[14],各样品共测得126个阻抗特征值(14个阻抗参数、9个频率点)。

1.2.2 果实感观品质评价

逐果测定各阻抗参数特征值后,随机抽取10个果实,请10位专业品尝员分别对感观品质打分,评价指标及权重组成为:外观鲜度0.4、口感脆度0.2、酸甜适口度0.2、肉质粗细0.1、香气0.1,每项指标以百分制打分,以5项指标的加权平均值为每个果实的得分值,计算10个果实得分的平均值为各等级果实感观品质的总分值。

的阻抗参数里选择出来,找出其中关联密切的特征值,并建立它们与苹果等级的数学模型,进行现实情况下的等级划分。

主成分分析或主元分析(PCA)是一种常用的数据降维或特征提取技术,但是PCA的缺点是每一个主元必须是所有原始变量的线性组合,而且各个原始变量的加载系数都为非零值。这就使得解释衍生出来的主元的问题变得格外困难。SPCA是通过稀疏加载系数来获取修正主元的,其理论的建立是基于PCA能够改写成一个回归型的最优值问题。而在多元线性回归中也出现过与主元解

释相同的问题,当时的解决方案是通过预测因子的线性组合来完成预测,而这些预测模型又是由变量选择来获取的。lasso^[15]是一种优秀的变量选择技术,它能够获取既精确又保证稀疏性的模型。Zou等提出 elastic net 作为 lasso 的普遍化解决方案来进一步改进 lasso,因而可以将 lasso 直接整合到回归标准中以使得 SPCA 最终产生稀疏的加载系数^[16]。

1.3.2 线性分类器模型及原理

线性分类器(Linear discriminant classifier, LDC)是一个基于正态密度分布假设的线性 Bayes 分类器,也被称作标准线性贝叶斯分类器,可由 Matlab 外嵌工具箱 PRtools 中的相关函数实现^[17-18]。LDC 实现分类的过程分为两步进行^[19]:

(1) 计算分类器映射矩阵 \mathbf{W} 。设样本用矩阵 \mathbf{A} 表示,特征维度为 \mathbf{K} ,样本各个类连接后的协方差矩阵可由类间协方差矩阵作加权平均运算后求得,但需要提供类间初始权重系数,这里不作细述。规则化后的协方差矩阵 \mathbf{G} 计算式为

$$\mathbf{G} = (1 - R - S)\mathbf{G}_1 + R\text{diag}(\text{diag}(\mathbf{G}_1)) + S\text{mean}(\text{diag}(\mathbf{G}_1))\mathbf{E} \quad (R, S \in [0, 1]) \quad (1)$$

式中 R, S ——规则化系数 \mathbf{E} ——单位矩阵
 $\text{diag}()$ ——对角线元素构成的一个新向量
 $\text{diag}(\text{diag}())$ ——将取出的对角线元素还原为对角矩阵
 $\text{mean}()$ ——求向量均值运算

则矩阵 \mathbf{W} 满足

$$\mathbf{G} = \mathbf{W}\mathbf{W}' + \lambda^2\mathbf{E} \quad (2)$$

这里, \mathbf{W} 是 $K \times M$ 的投影矩阵, K 是列向量的维数, M 是重要主成分个数, λ^2 是这 M 个主成分对应特征值的均值。找到 \mathbf{W} 之后,只需通过 $\mathbf{A}\mathbf{W}$ 就可以将样本投影到分类器空间中。

(2) 对测试样本作投影和分类并获取系统评估结果。对于测试样本中一个待分类向量 \mathbf{x} , 构造函数

$$y = f(\mathbf{w}\mathbf{x}) \quad (3)$$

其中 \mathbf{w} 是对将 \mathbf{x} 投影到分类器空间的权重系数,由 \mathbf{W} 决定。 $f()$ 是样本分类映射关系,由程序对训练样本分布规律的学习获取。其功能为判定 \mathbf{x} 是否属于某一类,或者属于样本总体中的其他类别。

在苹果数据样本中共分 M 类 C_1, C_2, \dots, C_M , 实际上, LDC 是基于特征服从高斯分布的假设上计算最大后验概率进行分类的,即

$$f(\mathbf{w}\mathbf{x}) = \max_{i=1}^M (p_o(C_i)) \quad (4)$$

$$p_o(C_i) = \frac{p_r(C_i) \prod_{k=1}^N P(p_k | C_i)}{e_v} \quad (5)$$

$$e_v = \sum_{i=1}^M \left(p_r(C_i) \prod_{k=1}^N P(p_k | C_i) \right) \quad (6)$$

其中 $p_k (k=1, 2, \dots, M)$ 是 \mathbf{x} 投影到分类器空间的向量分量,即投影后的特征分量。分类器选择测试样本 \mathbf{x} 在各个类 C_i 上最大的后验概率,并将其所在类别 i 作为判定类别,如式(4)所示。后验概率 p_o 的计算可由式(5)通过先验概率 p_r 得出,因为 e_v 对于不同的类别来说是一个正常量(式(6)),故只需比较分子即可。

$p_r(C_i)$ 是某一个类别的先验概率,如果没有事先指明,将由样本结构决定,即按类别样本在样本总体中出现的频率计算。 $P(p_k | C_i)$ 是指特征分量 p_k 在类别 C_i 下的条件概率。这些概率的计算都是在将样本特征假设为服从高斯分布的随机变量的情况下计算出来的,即只需平均值和标准差就能决定该随机变量的概率密度分布曲线。

给出训练样本和待测样本之后,利用 Matlab 中 PRtools 工具箱计算其后验概率的相应解决方案是

```
W = ldc(training_sample);
probability = testing_sample * W;
posterior = probability * class;
```

判定结果的评估标准可以是错误分类的测试样本的个数,也可以用能直观反映试验效果的正确分类率,即分类正确的样本占测试样本总数的百分比。

1.3.3 基于生物阻抗特性的果实新鲜度分级思路

要建立对果实新鲜度无损分级的准确模型,首先须逐个对样品果实的等级作出精准评判,并抽取一定比例建模,再以新建模型对余下比例已知样品进行验证,确定模型的准确度和可行性。为此构建了如图2所示的工作框架。

2 试验设计及结果

2.1 试验预处理

依据苹果失重率 5% 左右时表面没有明显征兆, 10% 左右时皮部明显可见轻微皱缩、达到 15% 时表皮严重皱缩(图1)和内部病变时不可食用的经验,分别对新鲜果、失重 5%、10%、15% 左右、内部褐变果实进行外观品质和食用风味品尝评价,各组果实的感观品质综合分值依次下降(表1),故认定它们的品质依次为 1、2、3、4、5(末等)5个固定等级,作为苹果新鲜度等级预测模型建立和预测准确性评判的依据。

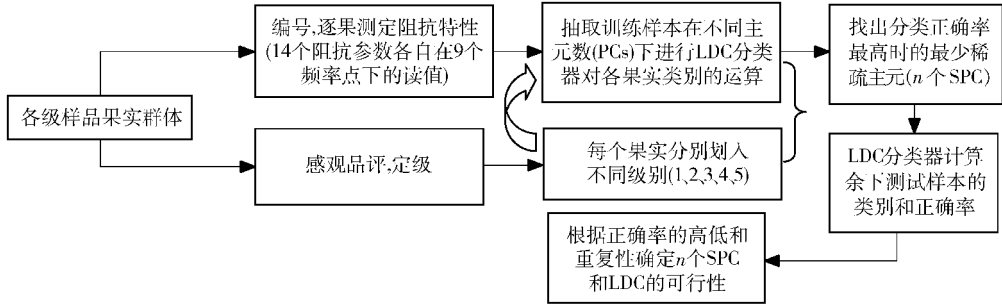


图2 果实新鲜度分级原理框图

Fig. 2 Principle diagram of fruit freshness classification

表1 不同等级果实的划分依据

Tab. 1 Basis for classification of fruit freshness grade

参数	1级	2级	3级	4级	5级
实际失重率/%	0	4.93	9.86	14.75	0
感官品质得分	91.56	86.67	79.67	59.56	48.76

2.2 试验结果

2.2.1 主元数、测试样本比例对预测结果的影响

以固定级别为基准进行测试样本比例的优化选择,选择固定的算法参数设置,即稀疏度为1,稀疏主元个数为自变量,对应等级预测的划分正确率为因变量。对424个果实的试验结果如图3所示。训练样本占全部样本比例为90%时较70%时对样本级别的划分正确率普遍提高,考虑到在实际测试中将不是只选取整个数据集的70%或80%作为训练样本,而是将整个数据集作为训练本来划分等级,因此,选取90%的数据作训练样本、10%作测试样本。由图3还可知,随着主元数的增加,对测试样本划分的正确率增大,当主元数达到39后,两种取样比例下划分正确率均达到稳定的高水平,其中训练样本比例90%的试验划分正确率在90%以上,证实

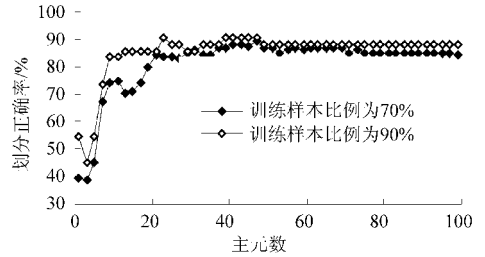


图3 训练样本选取比例对单次试验预测结果的影响

Fig. 3 Influence of training sample ratio on predict result in one test

所用分类模型对苹果新鲜度分级可行。主元数多于47以后,正确率反而有所下降,反映出主元数过多时会增加一些噪声值干扰分类结果。

2.2.2 重复试验中分类正确率的稳定性

采取以上选取的39个稀疏主元,以9:1的训练样本与测试样本比例进行50次重复试验探测,各次试验的正确分类率在一定范围内变动(表2)。最大值92.91%,最小值83.46%。为了抵消随机性对试验结果造成的影响,这里取50次试验结果的平均值87.90%作为SPCA-LDC法对苹果新鲜度分类准确性的评价价值。

表2 50次重复试验中划分正确率

Tab. 2 Classification accuracy for 50 test repeats

试验号	<i>i</i>									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0 + <i>i</i>	92.13	85.04	92.91	85.83	91.34	88.19	88.19	91.34	90.55	88.98
10 + <i>i</i>	84.25	83.46	85.83	85.83	87.40	87.40	83.46	85.04	86.61	85.83
20 + <i>i</i>	88.19	86.61	84.25	85.83	91.34	90.55	88.19	92.13	83.46	90.55
30 + <i>i</i>	91.34	87.40	89.76	88.19	88.98	87.40	86.61	87.40	88.19	86.61
40 + <i>i</i>	90.55	88.98	85.04	87.40	85.83	90.55	88.19	88.98	89.76	85.83

2.2.3 新鲜度分级相关阻抗参数的确定

图4为新鲜度预测达最大值所需的至少39个主元的稀疏图。该图显示,主元1由加载系数为0.4的6个阻抗参数组成,它们依次为: $Y_{158\text{ Hz}}$ 、 $Y_{251\text{ Hz}}$ 、 $Y_{398\text{ Hz}}$ 、 $Y_{15.8\text{ kHz}}$ 、 $Y_{25.1\text{ kHz}}$ 、 $Y_{39.8\text{ kHz}}$ 。主元2至39均各由一个加载系数为1.0的阻抗参数组成,它们

依次为: $C_{s2.51\text{ MHz}}$ 、 $R_{s3.98\text{ MHz}}$ 、 $Q_{158\text{ Hz}}$ 、 $C_{2.51\text{ MHz}}$ 、 $L_{s158\text{ Hz}}$ 、 $Q_{25.1\text{ kHz}}$ 、 $G_{1.58\text{ MHz}}$ 、 $\theta_{158\text{ Hz}}$ 、 $R_{s15.8\text{ kHz}}$ 、 $Q_{1.58\text{ MHz}}$ 、 $R_{s25.1\text{ kHz}}$ 、 $\varepsilon'_{158\text{ Hz}}$ 、 $G_{3.98\text{ MHz}}$ 、 $L_{p251\text{ Hz}}$ 、 $\tan\theta_{39.8\text{ kHz}}$ 、 $C_{s158\text{ MHz}}$ 、 $G_{39.8\text{ Hz}}$ 、 $Q_{3.98\text{ MHz}}$ 、 $R_{s2.51\text{ MHz}}$ 、 $R_{p39.8\text{ Hz}}$ 、 $R_{p158\text{ Hz}}$ 、 $Q_{2.51\text{ MHz}}$ 、 $Z_{158\text{ Hz}}$ 、 $R_{s15.8\text{ kHz}}$ 、 $R_{p25.1\text{ kHz}}$ 、 $Q_{15.8\text{ kHz}}$ 、 $R_{p1.58\text{ MHz}}$ 、 $R_{p15.8\text{ kHz}}$ 、 $L_{s251\text{ Hz}}$ 、 $R_{s39.8\text{ kHz}}$ 、 $Q_{398\text{ Hz}}$ 、 $R_{p2.51\text{ MHz}}$ 、 $C_{p3.98\text{ MHz}}$ 、 $\varepsilon''_{3.98\text{ MHz}}$ 、 $\varepsilon''_{39.8\text{ kHz}}$ 、

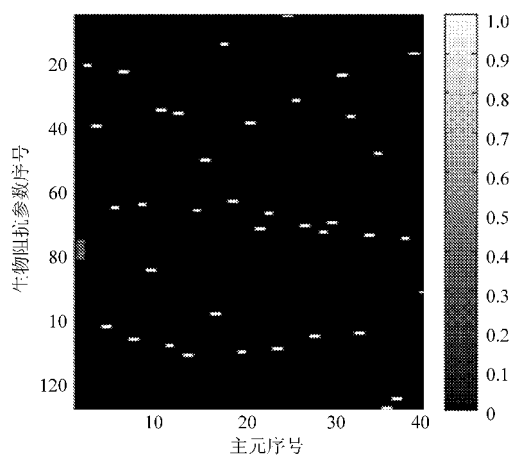


图4 最高正确分类率所需至少39个稀疏主元的加载系数图

Fig. 4 Load coefficient images of the least 39 SPCs required for the maximum classification accuracy

$R_{p3.98\text{ MHz}}, C_{s15.8\text{ kHz}}, \theta_{2.51\text{ MHz}}$ 。这样,在126个阻抗特征值中只需测定这相关的44个参数就可进行苹果果实新鲜度的等级预测。

3 讨论

苹果果实失水和内部病变引起新鲜度总体下

降,可是当这种下降未达到肉眼可识程度时,传统检测方法中难以用来准确区分新鲜度变化,因为失水也会产生浓缩效应,使固形物浓度、硬度等理化指标出现临时增大现象。除果实的呼吸强度随新鲜度的下降先下降又复升再下降、乙稀释放率随新鲜度的下降先上升再下降外,可溶性固形物含量、硬度亦同步起伏变化;虽然可滴定酸和维生素C含量总体呈线性下降趋势,可是后3个或2个级别间差异不显著。因此,果实失水过程中各理化、生理指标观测值并不随新鲜度的下降呈现线性变化,难以用来判断果实新鲜度的级别。况且,这两类指标须采取破坏法测定,不能用以探测待上市果实。试验中选出了44个阻抗特征值可以用来较为准确地预测果实的新鲜度,证实阻抗特性是能够综合反映生物组织综合品质变化的一个固有物理特性^[1],由于该特性可通过无损的方法测定,故为果实采后在线检测开辟了新的途径。

徐保江等测定蔬菜种子^[20]、尤田束测定谷物种子^[21]时均发现,物料的含水率与测试频率对种子电传导和介电特性有影响,水分与阻抗参数之间存在着较强的相关性。张道德也建立了苹果含水率、可

表3 5个级别果实生理品质指标的测定值

Tab.3 Data for postharvest physiology and trait of five grade fruits

失重率/%	可溶性固形物 /%	硬度/ $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$	可滴定酸/%	维生素C $/\text{mg}\cdot(\text{100 g})^{-1}$	呼吸强度 $/\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$	乙烯释放率 $/\mu\text{L}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$
0(1级)	16.46 ± 2.01^a	7.54 ± 0.67^a	0.34 ± 0.05^a	6.38 ± 0.28^a	10.03 ± 2.55^b	0.68 ± 0.31^a
5(2级)	15.26 ± 1.63^b	6.99 ± 0.60^b	0.25 ± 0.02^b	4.40 ± 0.52^b	7.84 ± 3.70^a	0.90 ± 0.38^a
10(3级)	16.21 ± 1.74^a	7.38 ± 0.98^a	0.20 ± 0.02^d	3.88 ± 0.65^c	12.90 ± 3.90^b	1.28 ± 0.57^b
15(4级)	16.58 ± 2.00^a	5.80 ± 0.93^c	0.19 ± 0.03^d	2.84 ± 0.44^d	23.20 ± 7.57^d	1.41 ± 0.53^{bc}
0(5级)	14.84 ± 1.53^c	5.97 ± 1.24^c	0.22 ± 0.03^c	2.48 ± 0.34^d	14.43 ± 3.26^{bc}	0.69 ± 0.20^a

注:表中同列间不同小写字母表示数据差异达到极显著水平($p \leq 0.01$)。

溶性固形物含量及有机酸含量与苹果宏观介电特性参数串联电容 C_s 、复阻抗 Z 及电感 L_s 之间关系的数学模型^[22]。说明本文得出生物阻抗特性能够用于由失水引起新鲜度下降的判断,即阻抗参数变化与失水相关的结果与前人趋于一致。可是,本研究选取的与苹果果实新鲜度相关的阻抗特性涉及了所测14个阻抗参数的全部,各参数与新鲜度变化相关的特征频率却有所不同,说明各频率下阻抗参数间随失重率变化的敏感性不一致,果实的阻抗特性是由细胞膜透性、胞壁和胞内组织含水量、电解质浓度等所决定的^[1],水分减少或腐烂引起的新鲜度下降亦

引起各项参数的变化,难以用一或几个参数的变化来标识,这种全面测定的方法更为稳妥。

4 结束语

基于100 Hz ~ 3.98 MHz频率下生物阻抗参数特征值的测定能够对红富士苹果的新鲜度进行较为准确的无损测定。在14个生物阻抗参数、9个频率点下的126个特征值中提取44个构建了果实新鲜度分级主元阻抗参数组。采用这组参数值和LDC分类器对424个样品果的10%测试样本的级别划分正确率达到87.90%。

参 考 文 献

- 1 王文庭,钟季康,马俊,等.生物阻抗技术概述[J].上海生物医学工程,2005,26(2):119~123.
Wang Wenting, Zhong Jikang, Ma Jun, et al. An overview of the bioimpedance technologies[J]. Shanghai Journal of Biomedical Engineering, 2005,26(2):119~123. (in Chinese)

- 2 郭文川. 果蔬介电特性研究综述[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 284 ~ 289.
Guo Wenchuan. Review of dielectric properties of fruits and vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 284 ~ 289. (in Chinese)
- 3 胥芳, 计时鸣, 张立彬, 等. 水果电特性的无损检测在水果分选中的应用[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 53 ~ 60.
Xu Fang, Ji Shiming, Zhang Libin, et al. Nondestructive inspection of dielectric property of fruit and its application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(2): 53 ~ 60. (in Chinese)
- 4 胥芳, 张立彬, 计时鸣, 等. 介电式水果品质分级机的原理及实现[J]. 浙江大学学报, 2002, 28(3): 325 ~ 330.
Xu Fang, Zhang Libin, Ji Shiming, et al. Principle and implement of automatic grader for fruit internal quality based on dielectric property [J]. Journal of Zhejiang University, 2002, 28(3): 325 ~ 330. (in Chinese)
- 5 马海军, 冯美, 张继澍. 100 Hz ~ 3.98 MHz 下苹果虎皮病果实电特性研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 105 ~ 109.
Ma Haijun, Feng Mei, Zhang Jishu. Dielectric properties of Fuji apple superficial scald in the 100 Hz ~ 3.98 MHz range [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 105 ~ 109. (in Chinese)
- 6 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): 96 ~ 97.
Ma Haijun, Song Changbing, Zhang Jishu, et al. Influence of frequency of electric excitation signal on dielectric property of Fuji apples with red-dot disease [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 96 ~ 97. (in Chinese)
- 7 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.
Guo Wenchuan, Zhu Xinhua, Guo Kangquan. Relationship between electrical properties and physiological properties of postharvest apples and its applications [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 136 ~ 139. (in Chinese)
- 8 郭文川, 朱新华, 邹养军. 苹果果实成熟期间电特性的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 264 ~ 268.
Guo Wenchuan, Zhu Xinhua, Zou Yangjun. Electrical properties of apples during ripening [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 264 ~ 268. (in Chinese)
- 9 Guo W, Nelson S O, Trabelsi S, et al. 10 ~ 1 800 MHz dielectric properties of fresh apples during storage [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(4): 562 ~ 569.
- 10 Guo W, Zhu X, Nelson S O, et al. Maturity effects on dielectric properties of apples from 10 to 4 500 MHz [J]. LWT - Food Science and Technology, 2011, 44(1): 224 ~ 230.
- 11 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.
Wang Ling, Huang Sen, Zhang Jishu, et al. Electric properties of Gala apple fruit quality [J]. Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica, 2009, 29(2): 402 ~ 407. (in Chinese)
- 12 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.
Wang Ruiqing, Zhang Jishu, Ma Shushang. Nondestructive determination of the quality of red bartlett pear during shelf life by electrical characteristics [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 243 ~ 247. (in Chinese)
- 13 刘亚平, 刘兴华, 李红波. 葡萄冷藏中电学参数与质地特性变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 343 ~ 348.
Liu Yaping, Liu Xinghua, Li Hongbo. Law of dielectric parameters and texture properties for grape during cold storage [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 343 ~ 348. (in Chinese)
- 14 柯大观, 张立彬, 胥芳. 基于介电特性的水果无损检测系统研究[J]. 浙江工业大学学报, 2002, 30(5): 446 ~ 450.
Ke Daguan, Zhang Libin, Xu Fang. Study of a fruit non-destructive detection system based on dielectric properties [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2002, 30(5): 446 ~ 450. (in Chinese)
- 15 Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the lasso [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 1996, 58(1): 267 ~ 288.
- 16 Zou H, Hastie T. Regression shrinkage and selection via the elastic net with applications to microarrays [R]. Department of Statistics, Stanford University, 2003.
- 17 Liu C, Wechsler H. Robust coding schemes for indexing and retrieval from large face databases [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(1): 132 ~ 136.
- 18 Webb A. Statistical pattern recognition [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002: 441 ~ 506.
- 19 Duda R O, Hart P E, Stork D G. Pattern classification [M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1997: 13 ~ 35.
- 20 徐保江, 张本华, 张淑珍, 等. 根据物料的电特性快速测定含水率的试验研究[J]. 沈阳农业大学学报, 1998, 29(1): 65 ~ 68.
Xu Baojiang, Zhang Benhua, Zhang Shuzhen, et al. Quick determination on water content of agricultural products [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1998, 29(1): 65 ~ 68. (in Chinese)
- 21 尤田束, 王春山, 王艳. 生物物料介电特性系统的研究[J]. 科技通报, 1996, 12(5): 273 ~ 278.
You Tianshu, Wang Chunshan, Wang Yan. Study on measuring system of dielectric properties on biological material [J]. Bulletin of Science and Technology, 1996, 12(5): 273 ~ 278. (in Chinese)
- 22 张道德. 金冠苹果果实的介电特性与无损检技术的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2007.
Zhang Daode. Study on the dielectric property and the non-destructive testing technology of *Malus pumila* Mill. CV [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2007. (in Chinese)