

介电谱无损检测梨内部品质方法研究*

郭文川 房丽洁 董金磊 王转卫
(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了探索利用介电谱无损检测采后梨内部品质的潜力,采用同轴探头技术测量了采摘于4个果园的310个“砀山酥”梨在采后8周贮藏期间20~4500 MHz间201个频率点下的相对介电常数和介质损耗因数;分别以可溶性固形物含量(SSC)、硬度和含水率作为内部品质指标,基于 $x-y$ 共生距离的样本划分法确定了校正集样本233个和预测集样本77个。采用连续投影选法(SPA)从全介电谱中分别提取出了15个、14个和15个用于预测SSC、硬度和含水率的特征变量;建立了基于全介电谱和SPA提取的特征变量预测SSC、硬度和含水率的最小二乘支持向量机(LSSVM)、极限学习机和BP神经网络模型。结果指出,基于全介电谱的LSSVM模型具有最好的SSC决定性能和良好的预测能力,其校正集和预测集相关系数分别为0.974和0.931,校正集和预测集均方根误差分别为0.592°Brix和0.868°Brix,剩余预测偏差为2.65;基于SPA的LSSVM模型可粗略预测含水率;但是所有模型对硬度的预测能力很差。研究结果表明,介电谱结合LSSVM可用于无损检测梨的SSC和含水率,但尚难用于检测梨的硬度。

关键词: 梨 内部品质 介电特性 无损检测
中图分类号: S183; TS207.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0233-07

Nondestructive Detection of Internal Qualities for Pears Using Dielectric Spectra

Guo Wenchuan Fang Lijie Dong Jinlei Wang Zhuanwei
(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To explore the potential of dielectric spectra in predicting internal qualities of pears, the dielectric constants and loss factors were measured by using open-ended coaxial-line probe technology at 201 discrete frequencies from 20 MHz to 4500 MHz on 310 pears, picked from four different orchards, during 8-week storage. Soluble solids content, firmness, and moisture content were considered as internal qualities. Sample set partitioning based on joint $x-y$ distances was used to subset partitioning, and 233 samples were used in calibration set and 77 samples were used in prediction set. To simply establish model, successive projection algorithm method was applied to extract characteristic variables (CVs), and 15, 14 and 15 CVs were extracted for soluble solids content, firmness and moisture content, respectively. The modeling methods, such as least square support vector machine (LSSVM), extreme learning machine (ELM) and back propagation (BP) network were used to establish soluble solids content, firmness and moisture content determination models based on full dielectric spectra and extracted CVs by SPA. The results showed that the LSSVM model based on full dielectric spectra had the best soluble solids content determination performance and good prediction ability, with the correlation coefficient of calibration set of 0.974 and prediction set of 0.931, the root-mean-square error of calibration set of 0.592°Brix and prediction set of 0.868°Brix, and the highest residual prediction deviation of 2.65. The LSSVM model based on SPA could be used to predict the moisture content

收稿日期: 2015-04-23 修回日期: 2015-06-24
* 国家自然科学基金资助项目(31171720)
作者简介: 郭文川,教授,博士,主要从事农产品和食品品质无损检测技术研究, E-mail: guowenchuan69@126.com

roughly. However, all models had poor prediction ability on firmness. The study indicates that dielectric spectra combined with LSSVM could be used to predict soluble solids content and moisture content of pears, but it is difficult to predict firmness using dielectric spectra. The study provides a method for nondestructive determination of soluble solids content and moisture content of pears.

Key words: Pears Internal qualities Dielectric properties Nondestructive detection

引言

梨在成熟及采后衰老阶段,果皮颜色变化很小,很难根据果皮颜色判断梨的内部品质。“砀山酥”梨是我国广泛种植的主要梨品种之一。现有研究表明,“砀山酥”梨在采后储藏期间的 pH 值变化很小(4.94 ~ 5.16)^[1],因此,通常将可溶性固形物含量(Soluble solids content, SSC)、硬度和含水率作为评价“砀山酥”梨内部品质的主要指标。传统的 SSC 检测方法是采用折射仪测量被挤出果汁的 SSC,由于果汁中 80% 以上的 SSC 是糖分,因此,通常以 SSC 作为糖度测量结果;采用探头压入到果肉中一定深度时所受压力的方法检测硬度;采用烘干法测量含水率。这些方法均属于有损检测。研究无损、高效的梨内部品质检测方法对于指导梨的采收和采后分选具有重要的意义。国内外众多学者将近红外光谱技术或高光谱技术应用于预测采后梨的内部品质^[2-9],并取得了较好的研究成果。

采收后的果品仍然是有生命活动的有机体,通过呼吸作用,使淀粉、糖和有机酸等呼吸底物分解为 CO₂ 和水。水以及其他物质成分的变化导致果品内部空间电荷分布的变化。生物电场的分布和强度在宏观上影响果品的介电特性^[10]。因此,采后果品的内部品质与宏观的介电特性之间有必然的联系。

介电谱是在宽频范围内描述相对介电常数 ϵ' 和介质损耗因数 ϵ'' 变化的曲线。作为一种快速、无损检测技术,介电谱技术已被广泛应用于各类农产品的品质检测中。但在果品品质研究方面,目前主要是分析单一频率下的果肉或果汁的介电参数值与内部品质的线性关系^[11-16],或者定性地描述完整无损果品的介电特性与生理特性或内部品质的关系^[17-18]。Nelson 等^[11] 和 Guo 等^[12] 的研究结果表明甜瓜果肉的介电特性与 SSC 之间具有较好的线性关系,可基于单一频率下的介电参数值预测甜瓜的 SSC,但其对象是果肉。无论是西瓜^[13-14]、苹果^[15] 和桃^[16] 的果肉或果汁,还是完整无损果品,目前均未发现介电参数和果品内部品质之间具有明显的线性关系。为此,郭文川等^[19] 将介电谱与化学计量学方法相结合应用于预测苹果的 SSC,商亮等^[20] 将介电谱应用于预测油桃的糖度,并取得了较好的

预测效果。

为了探索介电谱技术在预测梨内部品质方面的潜力,本文以我国北方地区广泛种植的“砀山酥”梨为对象,基于 20 ~ 4 500 MHz 范围间的介电谱,建立预测梨 SSC、硬度和含水率的最小二乘支持向量机、极限学习机和误差反向传播神经网络模型,并比较全介电谱与连续投影算法提取的特征变量对各模型预测性能的影响,旨在寻找梨内部品质无损检测的新方法。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用“砀山酥”梨于 2013 年 9 月 28 日采摘于杨陵区 and 武功县内 4 个不同的果园,每个果园采样 100 ~ 120 个。将每 10 ~ 15 个样品装于保鲜袋内,袋口微敞置于自然环境下存放。选用无病虫害和无机械损伤、形状规则的梨作为试验样品,不同来源每次用样 9 ~ 11 个,每隔 1 周采样一次,共采样 8 次,共用样品 310 个。

1.2 测量方法

1.2.1 介电参数的测定

介电参数测试系统由 E5071C 型网络分析仪、85070E 型末端开路同轴探头和 85070 软件(Agilent Technology, 马来西亚)组成。在对网络分析仪进行开路、短路和 50 Ω 负载校准之后,设定网络分析仪的测量频率为 20 ~ 4 500 MHz,设定对数坐标下的等间距采集点数为 201。随后用开路、短路及 25℃ 去离子水校准 85070E 型探头。将完好无损的梨横放在一小型支架上,提升支架使探头与梨的赤道部位紧密接触,测量该处 20 ~ 4 500 MHz 间 201 个频率下的 ϵ' 和 ϵ'' 。随后在梨赤道上间隔约 90° 处选取另外 3 点进行测量。4 点处介电参数的平均值作为该样品介电参数的测量结果。

1.2.2 硬度测定

用水果削皮刀削去介电参数测量点处的果皮,然后用 GY-3 型果实硬度计(艾德堡仪器有限公司,中国)测量果肉硬度。4 点处硬度的平均值作为该样品的测量结果。

1.2.3 SSC 的测定

在每个硬度点附近,取适量果肉放于家用压蒜

器中,用 PR101 α 型数字折射仪(Atago Co. Ltd., 日本)测量挤出梨汁的 SSC。4 点 SSC 的平均值作为该样品的测量结果。

1.2.4 含水率测定

在硬度点附近,切取约 3 g 的无损果肉,用 FA2104 型电子天平(精度 0.000 1 g,上海精密科学仪器公司)测量干燥前果肉的质量,随后置于直径 60 mm 的铝盒中,于 70℃ 的热风干燥箱(101-1AB 型,天津市泰斯特仪器)中干燥 24 h 后取出,放于装有 CaSO₂ 的干燥器中冷却至室温后称其质量,根据干燥前后果肉的质量计算其含水率。4 点含水率的平均值作为该样品含水率的测量结果。

1.3 数据分析与处理方法

1.3.1 连续投影算法

为了简化模型,本文利用连续投影算法(Successive projection algorithm, SPA)从全介电谱(FS)中提取特征变量。SPA 是由 Araújo 等^[21]提出的一种前向循环的变量选择方法,其能有效地消除各变量之间的线性相关影响,从而降低模型的复杂度。该算法的思想是先选定一个变量,然后每次叠加一个新的变量,直至达到指定变量数为止。进而在矩阵中寻找含有最低限度冗余信息的变量组,以获得变量之间最小的共线性。同无信息变量消除法相比,SPA 能选出较少的特征变量,大大提高了建模的速度。此外,众多研究表明,SPA 所建模型具有良好的预测精度。

1.3.2 最小二乘支持向量机

最小二乘支持向量机(Least square support vector machine, LSSVM)是由 Suyken 和 Vandewalle^[22]提出的用于解决模式分类和函数估计问题的支持向量机。LSSVM 采用最小二乘线性系统作为损失函数,代替传统的支持向量机采用的二次规划方法,有效地简化了计算的复杂性,提高了运算速度。

1.3.3 极限学习机

极限学习机(Extreme learning machine, ELM)是由 Huang 等^[23]提出的一种针对单隐含层前馈神经网络的算法。同传统的学习算法相比,其具有学习速度快、泛化性能好等特点。对于单隐含层神经网络,ELM 可以随机初始化输入权重和偏置并得到相应的输出权重。因此只需设置各层神经元的个数便可以经校正集训练后获得最优解。

1.3.4 误差反向传播网络

误差反向传播(Error back propagation, BP)网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络,是目前应用最广泛的神经网络模型之一。它基于最

速下降法的学习规则,通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值,使网络的误差平方和最小,从而使 BP 神经网络的预测输出无限逼近期望输出。BP 神经网络模型拓扑结构包括输入层、隐含层和输出层。

1.4 模型评价

以校正集样品的相关系数(R_c)、校正集样品的均方根误差(RMSEC)、预测集样品的相关系数(R_p)和预测集样品的均方根误差(RMSEP)反映模型的校正和预测性能,以剩余预测偏差 D_{RPD} 作为评价模型预测性能的指标。Nicolai 等^[24]指出当某一模型的 D_{RPD} 值小于 1.5 时,该模型的预测性能很差;当 $1.5 < D_{RPD} < 2.0$ 时,模型仅能够给出预测值的大小情况;当 $2.0 < D_{RPD} < 2.5$,模型可用于粗略地预测;而当模型的 D_{RPD} 大于 2.5 和 3.0 时,模型分别具有良好的和极好的预测准确性。

2 试验结果与分析

2.1 梨的介电谱

图 1 是室温下某一梨样品的 ϵ' 和 ϵ'' 在 20 ~ 4 500 MHz 频率范围内的介电谱。图 1 说明,在整个频率范围内, ϵ' 随频率的增大而减小,尤其在低频下减小迅速; ϵ'' 以类似正弦曲线的形式随频率而变,其最大值出现在 28 MHz,最小值出现在 1 800 MHz 附近。本文以 201 个频率点下的 ϵ' 值作为每个样本的前 201 个变量,201 个 ϵ'' 值作为样本的后 201 个变量,因此样本的总变量数为 402 个。

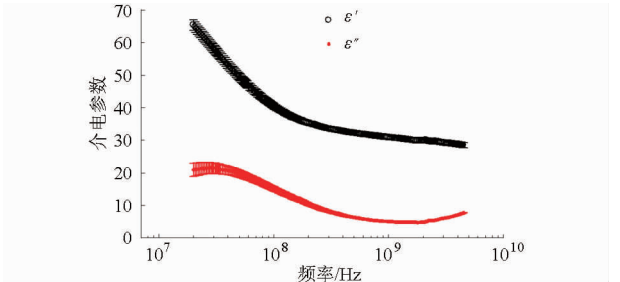


图 1 室温下某一梨样品的 ϵ' 和 ϵ'' 在 20 ~ 4 500 MHz 间的介电谱

Fig. 1 Dielectric spectra of ϵ' and ϵ'' of a pear over frequency range of 20 ~ 4 500 MHz at room temperature

2.2 梨的介电特性与内部品质的线性关系分析

为了探索介电参数与梨内部品质的线性关系,本文建立了 201 个频率点下的 ϵ' 和 ϵ'' 分别与 SSC、硬度和含水率的线性关系式 $y = ax + b$, 其中 y 代表 ϵ' 或 ϵ'' , x 代表 SSC、硬度或含水率, a 和 b 为拟合系数。如图 2 所示, $R_{s\epsilon'}$ 、 $R_{f\epsilon'}$ 和 $R_{m\epsilon'}$ 分别表示 201 个 ϵ' 与 SSC、硬度和含水率间的线性相关系数; $R_{s\epsilon''}$ 、 $R_{f\epsilon''}$ 和 $R_{m\epsilon''}$ 分别表示 201 个 ϵ'' 与 SSC、硬度和含水率间的线性相关系数。由图 2 可知,大多数频率下的 ϵ'

和 ε'' 分别与 SSC 呈负相关,与含水率呈正相关,线性相关系数的绝对值均小于 0.5;所有 ε' 和 ε'' 与硬度均呈正相关,线性相关系数小于 0.4。结果表明,单一频率下的 ε' 和 ε'' 与 SSC、硬度和含水率间的相关性较弱。

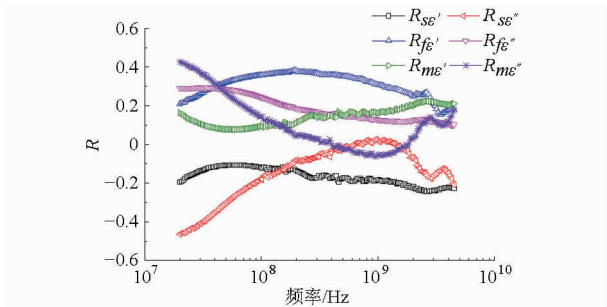


图2 20~4 500 MHz 范围内 ε' 和 ε'' 与 SSC、硬度和含水率在 201 个频率点下的线性相关系数

Fig.2 Linear correlation coefficients between permittivities and SSC, firmness and MC at 201 discrete frequencies from 20 MHz to 4 500 MHz

综上可知,单一频率下的介电参数值很难用于预测梨的 SSC、硬度和含水率,因此,有必要探讨是否能用更多的介电参数值甚至全介电谱预测梨的内部品质。为此本文将介电谱与人工神经网络方法相结合用于预测梨的 SSC、硬度和含水率。

2.3 样本划分结果

经前期对本研究中采摘于 4 个果园梨的 SSC、硬度和含水率的显著性分析表明,不同果园梨的 SSC、硬度和含水率在 5% 的显著性水平下均无显著差异,因此,本文将所用的 310 个样品放在一起,采用基于 $x-y$ 共生距离的样本划分法按照校正集与预测集样本数 3:1 划分样本集,得到 233 个校正集和 77 个预测集样品。所有样品及各样本集中梨 SSC、硬度和含水率的统计结果见表 1。由表 1 可看出,SSC、硬度和含水率都有较宽的范围,说明选用的样本有代表性。此外,测试集样本 SSC、硬度和含水率的最小值均小于预测集,而最大值又大于预测集,表明样本划分合理。

2.4 连续投影算法提取特征变量

设定提取的特征变量数的范围为 2~25,计算各特征变量数下的 RMSEC,根据最小的 RMSEC 确定最佳特征变量数。不同特征变量数下 RMSEC 的计算结果如图 3 所示。由图 3 可知,对于 SSC,当特征变量数大于 15 时,RMSEC 基本保持不变。由于特征变量数的增多会增加模型的复杂性,为此以 15 作为 SPA 提取的用于预测 SSC 的特征变量数。对于硬度和含水率,RMSEC 的最小值分别出现在 14 和 15,因此分别以 14 和 15 作为预测硬

度和含水率的特征变量数。提取的特征变量见表 2。

表 1 梨的 SSC、硬度和含水率的统计结果

Tab.1 Statistics for soluble solids content, firmness and moisture content of pears

品质参数	样本集	样品数	最小值	最大值	平均值 $\pm$ SD
SSC/ $^{\circ}$ Brix	总样本	310	6.9	18.4	11.6 $\pm$ 2.6
	校正集	233	6.9	18.4	11.5 $\pm$ 2.6
	预测集	77	8.0	16.0	11.9 $\pm$ 2.3
硬度/($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	总样本	310	2.7	8.6	4.5 $\pm$ 0.5
	校正集	233	2.7	8.6	4.5 $\pm$ 0.6
	预测集	77	3.6	5.2	4.3 $\pm$ 0.3
含水率/%	总样本	310	79.3	91.8	87.1 $\pm$ 2.8
	校正集	233	79.3	91.8	87.1 $\pm$ 2.9
	预测集	77	81.4	90.9	86.9 $\pm$ 2.5

注:SD 表示标准偏差。

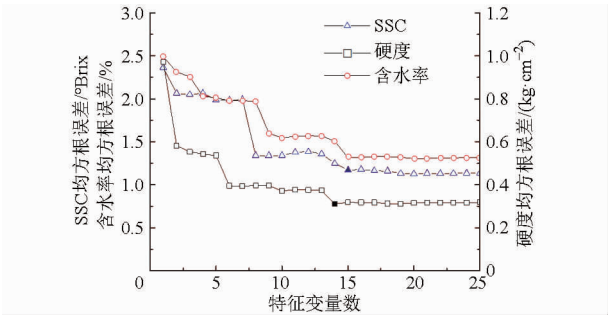


图3 对于不同品质,SPA 在不同特征变量数下的均方根误差

Fig.3 Calculated root mean square error at different characteristic variables of SPA for different qualities

表 2 应用 SPA 提取的特征变量及其所在的频率

Tab.2 Selected characteristic variables by SPA and frequencies in where the variables located

品质参数	介电变量	频率/MHz
SSC	ε'	20.0, 27.2, 174.5, 2 453.9
		21.4, 55.4, 174.5, 867.8, 1 687.5,
	ε''	2 125.5, 2 399.2, 25 08.7, 2 712.2, 4 123.6, 4 500.0
硬度	ε'	23.6, 88.8, 180.8, 4 405.9
		20.0, 55.4, 193.4, 268.6, 645.3,
	ε''	1 300.3, 2 180.2, 2 618.1, 3 370.9, 4 123.6
含水率	ε'	23.6, 78.2, 2 453.9, 3 935.4
		25.1, 55.4, 174.5, 287.5, 386.3,
	ε''	1 300.3, 2 180.2, 2 399.2, 2 618.1, 3 370.9, 3 841.4

2.5 LSSVM 模型建模结果

以径向基函数作为 LSSVM 的核函数,通过二步网格搜索法与 L 折交互验证($L=10$)相结合的粗选和精选 2 个步骤确定最佳的核宽 σ^2 和正规化参数 γ ,确定的参数值见表 3。分别以全介电谱和 SPA 提

取的特征变量作为输入变量,所建立的用于预测 SSC、硬度和含水率的 LSSVM 模型的预测结果分别见表 4~6。表 4 中,基于全介电谱的 LSSVM 模型 (FS-LSSVM) 的 R_c (0.974) 和 R_p (0.931) 均高于基于 SPA 提取的特征变量所建立的 LSSVM (SPA-LSSVM),且 FS-LSSVM 比 SPA-LSSVM 具有较小的 RMSEC 和 RMSEP,说明 FS-LSSVM 具有较好的校正性能和预测性能。FS-LSSVM 的 D_{RPD} 为 2.65,大于 2.5,说明 FS-LSSVM 具有良好的 SSC 预测能力。而 SPA-LSSVM 的 D_{RPD} 为 2.24,在 2.0 与 2.5 之间,表明 SPA-LSSVM 可用于粗略地预测梨的 SSC。

表 3 LSSVM 和 ELM 模型参数

Tab.3 Parameters of LSSVM and ELM					
品质参数	特征变量选择方法	LSSVM		ELM	
		σ^2	γ	隐含层节点数	
SSC	FS	11 435. 8	39 854. 2	70	
	SPA	93. 9	9 972. 8	60	
硬度	FS	8 484. 2	744. 4	54	
	SPA	2029. 9	1 169. 8	57	
含水率	FS	7 170. 8	1 927. 9	59	
	SPA	5 006. 8	1 512. 6	56	

表 4 不同的特征变量选择方法下 LSSVM、ELM 和 BP 模型对 SSC 的建模结果

Tab.4 Soluble solids content determination results of LSSVM, ELM and BP models based on different variables selection methods						
建模方法	特征变量选择方法	校正集		预测集		D_{RPD}
		R_c	RMSEC / $^{\circ}$ Brix	R_p	RMSEP / $^{\circ}$ Brix	
LSSVM	FS	0.974	0.592	0.931	0.868	2.65
	SPA	0.946	0.850	0.901	1.027	2.24
ELM	FS	0.924	0.997	0.875	1.187	1.94
	SPA	0.933	0.940	0.909	0.973	2.36
BP	FS	0.934	0.985	0.910	1.002	2.30
	SPA	0.931	0.967	0.902	1.068	2.15

表 5 不同的特征变量选择方法下 LSSVM、ELM 和 BP 模型对硬度的建模结果

Tab.5 Firmness determination results of LSSVM, ELM and BP models based on different variables selection methods						
建模方法	特征变量选择方法	校正集		预测集		D_{RPD}
		R_c	RMSEC / ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	R_p	RMSEP / ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	
LSSVM	FS	0.624	0.454	0.498	0.345	0.870
	SPA	0.789	0.362	0.505	0.321	0.945
ELM	FS	0.663	0.431	0.579	0.346	0.867
	SPA	0.782	0.359	0.631	0.286	1.049
BP	FS	0.570	0.476	0.513	0.325	0.923
	SPA	0.585	0.468	0.494	0.338	0.888

表 6 不同的特征变量选择方法下 LSSVM、ELM 和 BP 模型对含水率的建模结果

Tab.6 Moisture content determination results of LSSVM, ELM and BP models based on different variables selection methods						
建模方法	特征变量选择方法	校正集		预测集		D_{RPD}
		R_c	RMSEC / %	R_p	RMSEP / %	
LSSVM	FS	0.905	1.258	0.869	1.242	2.013
	SPA	0.918	1.174	0.873	1.221	2.048
ELM	FS	0.901	1.286	0.863	1.264	1.978
	SPA	0.914	1.197	0.872	1.223	2.044
BP	FS	0.889	1.358	0.852	1.315	1.921
	SPA	0.907	1.246	0.849	1.324	1.889

表 5 中,所建立的预测硬度的 FS-LSSVM 和 SPA-LSSVM 模型的 R_c 和 R_p 小于 0.8, D_{RPD} 均小于 1.5,说明 LSSVM 对硬度的预测性能很差,不管是基于全介电谱还是基于 SPA 提取的特征变量,都很难用于预测梨的硬度。

表 6 中,对于含水率,预测模型 FS-LSSVM 和 SPA-LSSVM 的 R_c 均大于 0.9,且 R_p 均在 0.85 以上, D_{RPD} 在 2.0 与 2.5 之间。同时经 SPA 变量提取后的模型预测效果较 FS 有所提高,故 SPA-LSSVM 模型可用于粗略预测梨的含水率。

2.6 ELM 的建模结果

将 ELM 网络的激励函数设为 sigmoidal 函数。隐含层节点数是 ELM 模型中的一个关键参数。在此,设定隐含层节点数的范围为 5~100,步长为 1,计算每个隐含层节点数下的 RMSEC,以最小的 RMSEC 或 RMSEC 开始缓慢变化所在处的节点数作为 ELM 的隐含层节点数,结果见表 3。所建的 ELM 模型对 SSC、硬度和含水率预测结果分别见表 4~6。

表 4 说明,同 FS-ELM 模型相比,SPA-ELM 具有较高的 R_c (0.933)、 R_p (0.909) 以及较小的 RMSEC (0.940 $^{\circ}$ Brix) 和 RMSEP (0.973 $^{\circ}$ Brix)。SPA-ELM 模型的 D_{RPD} 为 2.36,说明该模型可用于粗略地预测梨的 SSC。FS-ELM 模型的 D_{RPD} 为 1.94,说明 FS-ELM 只能预测 SSC 是大还是小。表 5 中,2 种 ELM 硬度预测模型的 D_{RPD} 都小于 1.5,表示 ELM 也很难用于预测梨的硬度。由表 6 可知,SPA-ELM 的含水率预测模型的 R_c 为 0.914, R_p 为 0.872, D_{RPD} 为 2.044,故可粗略预测梨的含水率;而 FS-ELM 模型的预测结果虽与 SPA-ELM 相近,但是建模过程中变量太多,模型较复杂,故可采用 SPA-ELM 模型对梨的含水率进行粗略预测。

2.7 BP 网络建模结果

本研究中,BP 网络的输入层、隐含层和输出层

的传递函数分别为 tansig、logsig 和 trainseg。设定目标均方差为 0.000 04,迭代次数为 1 000。分别以全介电谱下的 402 个介电变量和 SPA 提取的特征变量作为网络输入,以样品的 SSC、硬度和含水率分别作为网络输出建立 BP 网络模型。对于 BP 网络,很关键的一个参数是隐含层节点数。Kolmogorov 理论表明,对于单隐含层的神经网络可以以任意精度逼近任意函数。本文建立的 3 层 BP 网络模型中隐含层节点数的选取参考经验公式^[25]近似确定。

$$h = (mn)^{0.5} \quad (1)$$

$$h = (m + n)^{0.5} + d \quad (2)$$

$$h = lbm \quad (3)$$

式中 h ——隐含层节点数

m ——输入层节点数

n ——输出层节点数

d ——0~10 之间的常数

经反复试验发现隐含层节点数为 7 时各模型具有良好的综合性能。所建立的 SSC、硬度和含水率的 BP 模型的结果分别见表 4~6。由表 4 可见,FS-BP 的 R_c 、 R_p 和 D_{RPD} 略优于 SPA-BP,FS-BP 的 RMSEC 和 RMSEP 略小于 SPA-LSSVM。2 种模型的 D_{RPD} 均大于 2.0 但小于 2.5,说明所建立的 BP 模型可以粗略地预测梨的 SSC。表 5 中,所建立的 2 种预测硬度的 BP 模型的 D_{RPD} 也均小于 1.5,表示 BP 模型也很难用于预测梨的硬度。由表 6 可知,所建立的预测含水率的 FS-BP 和 SPA-BP 模型的 D_{RPD} 均小于 2.0,表明 BP 模型仅能够给出梨的含水率预测值是大还是小。

2.8 结果比较

在所建立的 6 种 SSC 预测模型中,FS-LSSVM 模型具有最高的 R_c 和 R_p ,最小的 RMSEC 和 RMSEP,且具有高于 2.5 的 D_{RPD} ,说明 FS-LSSVM 是预测梨 SSC 的最好模型,且具有良好的预测精度。FS-ELM SSC 预测模型的 D_{RPD} 最小,且小于 2.0,说明该模型的预测性能很差。其余 4 种 SSC 预测模型的 D_{RPD} 均在 2.0~2.5 之间,这 4 种模型能粗略地预测“砀山酥”梨的 SSC。所有建立的硬度预测模型的

D_{RPD} 均小于 1.5,表示介电谱很难用于预测“砀山酥”梨的硬度。在 6 种含水率预测模型中,SPA-LSSVM 的预测性能优于其他模型,但是 D_{RPD} 值仅为 2.048,表明该模型可粗略地预测“砀山酥”梨的含水率。

同现有的应用近红外光谱技术预测梨 SSC 的结果相比,本文得到的最高 R_p (0.931) 低于 Jiang 等^[6]给出的 $R_p^2 = 0.91$,略低于樊书祥等^[9]报道的 0.956 和 Xu 等^[25]给出的 $R_p^2 = 0.880$,但高于 Li 等^[7]给出的 $R_p = 0.9164$ 。此外,低于洪添胜等^[2]采用高光谱技术对梨 SSC 的预测结果 ($R_p = 0.966$)。本文对硬度的预测结果均劣于采用近红外光谱技术的预测结果^[3,5-8]。最好的含水率预测模型 ($R_p = 0.873$) 虽可粗略预测梨的含水率,但与洪添胜等^[2]采用高光谱预测含水率的结果 ($R_p = 0.94$) 相比,本研究得到的含水率预测性能较差。

值得一提的是,现有对梨品质的预测多是针对同一品种且同来源的样品,而本文的对象来源于不同地区的 4 个果园。不同来源样品的混合应用影响了模型精度的提高,但却使模型具有更广的适用性。

3 结束语

研究了 20~4 500 MHz 范围内 201 个频率点下采后 8 周储藏期间 310 个完整无损“砀山酥”梨的相对介电常数和介质损耗因数分别与可溶性固形物含量、硬度和含水率之间的线性关系。结果说明,介电参数和梨内部品质之间的线性关系很差,很难应用单一介电参数无损预测梨的内部品质。采用连续投影算法从 402 个介电变量中分别提取出了 15、14 和 15 个用于预测可溶性固形物含量、硬度和含水率的特征变量,建立了基于全介电谱和特征变量预测可溶性固形物含量、硬度和含水率的 LSSVM、ELM 和 BP 网络模型。结果表明,基于全介电谱的 LSSVM 模型在可溶性固形物含量预测方面具有最好的校正性能和预测性能,以及良好的预测能力;基于 SPA 的 LSSVM 模型可粗略预测含水率;但所有模型对硬度的预测能力均很差。

参 考 文 献

- 1 陈克克. 水果介电特性及其品质关系的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- 2 洪添胜,乔军, Wang Ning, 等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 151-155.
Hong Tiansheng, Qiao Jun, Wang Ning, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 151-155. (in Chinese)
- 3 Cavaco A M, Pinto P, Antunes M D, et al. 'Rocha' pear firmness predicted by a Vis/NIR segmented model[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 51(3): 311-319.
- 4 徐惠荣,陈晓伟,应义斌. 基于多元校正法的香梨糖度可见/近红外光谱检测[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 126-129, 147.
Xu Huirong, Chen Xiaowei, Ying Yibin. Multivariate approach to determinate sugar content of fragrant pears with temperature

- variation by visible/NIR spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):126 – 129, 147. (in Chinese)
- 5 王加华, 陈卓, 李振茹, 等. 洋梨硬度的便携式可见/近红外漫透射检测技术[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 129 – 133.
Wang Jiahua, Chen Zhuo, Li Zhenru, et al. Evaluation of European pear (*Pyrus communis* L.) firmness based on portable vis/NIR transmittance technique [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 129 – 133. (in Chinese)
- 6 Jiang Hui, Zhu Weixing. Determination of pear internal quality attributes by Fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy and multivariate analysis[J]. Food Analytical Methods, 2013, 6(2):569 – 577.
- 7 Li Jiangbo, Huang Wenqian, Zhao Chunjiang, et al. A comparative study for the quantitative determination of soluble solids content, pH and firmness of pears by vis/NIR spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2):324 – 332.
- 8 马广, 孙通. 翠冠梨坚实度可见/近红外光谱在线检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7):170 – 173.
Ma Guang, Sun Tong. On-line detection of firmness of ‘Cuiguan’ pear using visible/near infrared spectrum[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):170 – 173. (in Chinese)
- 9 樊书祥, 黄文倩, 李江波, 等. LS-SVM 的梨可溶性固形物近红外光谱检测的特征波长筛选[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(8):2089 – 2093.
Fan Shuxiang, Huang Wenqian, Li Jiangbo, et al. Characteristic wavelengths selection of soluble solids content of pear based on NIR spectral and LS-SVM[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(8):2089 – 2093. (in Chinese)
- 10 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 application [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7):136 – 139. (in Chinese)
- 11 Nelson S O, Trabelsi S, Kays S J. Dielectric spectroscopy of honeydew melons from 10 MHz to 1.8 GHz for quality sensing[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(6):1977 – 1981.
- 12 Guo Wenchuan, Nelson S O, Trabelsi S, et al. Dielectric properties of honeydew melons and correlation with quality[J]. Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy, 2007, 41(2): 44 – 54.
- 13 Nelson S O, Guo Wenchuan, Trabelsi S, et al. Dielectric properties of watermelons for quality sensing[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(7):1887 – 1892.
- 14 郭文川, Nelson S O, Trabelsi S, 等. 蜜瓜和西瓜果汁的射频介电特性及其与糖度的关系[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5):289 – 292.
Guo Wenchuan, Nelson S O, Trabelsi S, et al. Radio frequency (RF) dielectric properties of honeydew melon and watermelon juice and correlations with sugar content[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5):289 – 292. (in Chinese)
- 15 Guo Wenchuan, Zhu Xinhua, Yue Rong, et al. Dielectric properties of Fuji apples from 10 to 4 500 MHz during storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2011, 35(6):884 – 890.
- 16 郭文川, 陈克克. 桃 10 ~ 4 500 MHz 间的介电特性与内部品质关系分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 134 – 138.
Guo Wenchuan, Chen Keke. Relationship between dielectric properties from 10 to 4 500 MHz and internal quality of peaches[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3):134 – 138. (in Chinese)
- 17 Guo Wenchuan, Zhu Xinhua, 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.
- 18 唐燕, 杜光源, 张继澍. 猕猴桃电特性与生理特性关系研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 97 – 102.
Tang Yan, Du Guangyuan, Zhang Jishu. Relationship between electrical properties and physiological characteristics of kiwifruit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3):97 – 102. (in Chinese)
- 19 郭文川, 商亮, 王铭海, 等. 基于介电频谱的采后苹果可溶性固形物含量无损检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 132 – 137.
Guo Wenchuan, Shang Liang, Wang Minghai, et al. Soluble solids content detection of postharvest apples based on frequency spectrum of dielectric parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9):132 – 137. (in Chinese)
- 20 商亮, 谷静思, 郭文川. 基于介电特性及 ANN 的油桃糖度无损检测方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 257 – 264.
Shang Liang, Gu Jingsi, Guo Wenchuan. Non-destructively detecting sugar content of nectarines based on dielectric properties and ANN[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17):257 – 264. (in Chinese)
- 21 Araújo M C U, Saldanha T C B, Galvão R K H, et al. The successive projections algorithm for variable selection in spectroscopic multicomponent analysis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 57(2):65 – 73.
- 22 Suykens J A K, Vandewalle J. Least squares support vector machine classifiers[J]. Neural Processing Letters, 1999, 9(3):293 – 300.
- 23 Huang G B, Zhu Q Y, Siew C K. Extreme learning machine: theory and applications[J]. Neurocomputing, 2006, 70(1–3): 489 – 501.
- 24 Nicolaï B M, Beullens K, Bobelyn E, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(2):99 – 118.
- 25 Xu Huirong, Qi Bing, Sun Tong, et al. Variable selection in visible and near-infrared spectra: application to on-line determination of sugar content in pears[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(1):142 – 147.