

高光谱技术在无损检测火龙果可溶性固形物中的应用

罗霞^{1,2,3} 洪添胜^{2,3,4*} 罗阔^{2,3,4} 代芬^{1,2,3} 梅慧兰^{2,3,4}

¹华南农业大学电子工程学院, 广东 广州 510642

²华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642

³国家柑橘产业技术体系机械研究室, 广东 广州 510642

⁴华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642

摘要 利用高光谱技术对火龙果可溶性固形物含量(SSC)检测进行研究,为火龙果内部品质无损检测提供科学方法。以火龙果为研究对象,对光谱数据进行预处理,应用连续投影算法(SPA)进行特征变量的选择,通过偏最小二乘法(PLS)和前馈反向传播神经网络法(BPNN)建立预测模型,分析了火龙果果皮对SSC模型预测精度的影响。实验结果表明:采用平滑去噪(MAS)效果最优,PLS模型的交叉验证相关系数(R_{cv})为0.8635,交叉验证均方根误差(RMSECV)为0.6791,可提高火龙果可溶性固形物模型精度;通过SPA算法能够有效地对光谱数据进行降维处理,采用优选的15个特征变量建立的BPNN预测模型的预测相关系数(R_p)为0.8411,预测均方根误差(RMSEP)为0.8171;果皮对建模结果会产生一定的影响,完整果PLS模型的(R_p)为0.8999, RMSEP为0.7208;果肉PLS模型的 R_p 为0.9304, RMSEP为0.5291,果肉SSC模型比完整果SSC模型的预测能力略高。研究结果表明基于高光谱技术采集的火龙果漫反射光谱进行SSC无损检测具有可行性。

关键词 光谱学; 高光谱技术; 无损检测; 连续投影算法; 模型; 火龙果; 可溶性固形物

中图分类号 O657.33; S123

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.083002

Application of Hyperspectrum Technology in Non-Destructive Measurement of Soluble Solid Content in Pitaya

Luo Xia^{1,2,3} Hong Tiansheng^{2,3,4} Luo Kuo^{2,3,4} Dai Fen^{1,2,3} Mei Huilan^{2,3,4}

¹College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

²Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment of Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

³Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System, Guangzhou, Guangdong 510642, China

⁴College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract Using hyperspectrum technology to measure the soluble solid content (SSC) of pitaya can provide a scientific method for the non-destructive measurement of interior quality of pitaya. Pretreatment methods are used to process diffuse reflectance spectroscopy. The successive projections algorithm (SPA) is used to select characteristic variables. The partial least squares model (PLS) and back propagation neural network model (BPNN) are built to predict the SSC of pitaya. The influence of the pitaya peel on the SSC model prediction accuracy is also analyzed. The result of moving average smoothing (MAS) pretreatment method is best. The correlation coefficient of cross calibration (R_{cv}) of the PLS model built is 0.8635, root mean square error of cross validation (RMSECV) reaches 0.6791. Based on the 15 characteristic variables, the correlation coefficient of prediction (R_p) of the BPNN model for predicting SSC of pitaya is 0.8411, and the root mean square error of

收稿日期: 2015-01-12; 收到修改稿日期: 2015-03-20; 网络出版日期: 2015-07-11

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-27)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20124404120006)

作者简介: 罗霞(1973—),女,博士,实验师,主要从事光谱分析和农产品无损检测方面的研究。

E-mail: btxlx@scau.edu.cn

*通信联系人。E-mail: tshong@scau.edu.cn

prediction (RMSEP) is 0.8171. The peel has influence on prediction results of models, R_p of the whole pitaya model is 0.8999, and RMSEP is 0.7208; R_p of the pitaya model without peel is 0.9304, and RMSEP is 0.5291. The prediction accuracy of the pitaya model without peel is higher than the whole pitaya model. The results indicate that the non-destructive measurement for SSC of pitaya based on hyperspectrum technology is feasible.

Key words spectroscopy; hyperspectrum technology; nondestructive measurement; successive projections algorithm; models; pitaya; soluble solid content

OCIS codes 300.6320; 110.4234; 070.4340; 070.4560; 070.4790

1 引言

火龙果又称红龙果、仙蜜果等,属仙人掌科三角柱属植物的果用栽培品种,果实营养丰富,颜色鲜亮,含有丰富的糖、有机酸、氨基酸、花青素、植物性白蛋白和水溶性膳食纤维等,是深受人们喜爱的新型热带水果^[1]。其可溶性固形物(SSC)是影响火龙果内部品质的重要因素,实验室采用化学方法测量SSC,不仅检测时间长,而且对检测样本具有破坏性,因此要寻求精确、快速、无损检测火龙果SSC的方法,为火龙果内部品质检测提供科学依据^[2]。

高光谱技术作为新型农产品无损检测技术,提供了丰富的光谱和图像信息,在光谱数据处理上也提供了更加合理有效的处理手段^[3]。国内外学者运用高光谱成像技术和数理统计学等相关技术,建立了光谱数据与水果内部品质(如可溶性固形物、酸度、水分含量、坚实度等)实测值对应关系的数学模型,以此预测新样本的含量值^[4]。例如,Rajkumar等^[5]利用可见/近红外高光谱反射成像技术(400~1000 nm)对香蕉的水分、硬度、可溶性固形物含量进行检测;Baiano等^[6]利用高光谱图像技术对7个品种的鲜食葡萄的理化和感官指标建立预测模型。洪添胜等^[7]利用高光谱成像对雪花梨品质无损检测的可行性进行了研究,利用神经网络建立了雪花梨含糖量和含水率的预测模型。李锋霞等^[8]利用高光谱对哈密瓜坚实度进行检测的方法,对比分析了不同波段范围、不同预处理方法、不同光程校正法和不同定量校正算法对哈密瓜坚实度预测模型准确度的影响。黄文倩等^[9]采用遗传算法(GA)、连续投影算法(SPA)和GA-SPA算法分别从400~1000 nm的苹果高光谱图像中提取特征波长,利用偏最小二乘法(PLS)、最小二乘支持向量机(LS-SVM)和多元线性回归(MLR)建模进行苹果SSC含量的定量分析并进行了综合比较,比较发现SPA-MLR模型结果较好。

近年来越来越多的研究人员运用高光谱技术、化学计量学和建立数学模型等技术对待测水果的内部品质进行无损预测研究^[10-20],研究对象主要集中在苹果、梨、香蕉、哈密瓜、葡萄、脐橙等水果,但是对火龙果可溶性固形物的无损检测研究鲜有报道。

火龙果果肉细腻,本文以128个火龙果为实验样本,采用漫反射法高光谱技术,应用连续投影算法优选特征变量,通过偏最小二乘法和前馈反向传播神经网络(BPNN)建立预测模型,实现火龙果可溶性固形物含量无损检测研究,并分析了果皮对可溶性固形物含量检测结果的影响,为火龙果内部品质在线检测和分级提供科学方法。

2 材料与方 法

2.1 材 料

实验用火龙果是产于广东省湛江的白肉火龙果,实验样本数为128个,其中火龙果样本单果质量均值为424 g,鳞片数均值为19片,果皮厚度均值为4.48 mm,火龙果的最大高度(纵经)均值为123.79 mm,火龙果赤道部位的直径(横径)均值为81.38 mm。采集高光谱数据前,将其洗净擦干,剔除有损伤的样本,将样品依次进行编码,并粘贴标签。

2.2 实验设备

实验所使用的设备为北京卓立汉光公司研发的HyperSIS高光谱成像系统,硬件主要由成像光谱仪(含CCD摄像头)、光源、暗箱、电移动载物台、驱动电机和装有图像采集卡的计算机等组成^[21],如图1所示。光谱仪的测量范围为369.82~987.51 nm,采样间隔为1.21 nm,利用HyperSIS高光谱成像系统配套的SpectraSENS-V3.0软件采集并校正高光谱数据。研究中用到的数据分析软件为Unscrambler 9.8, Excel2007, Matlab 2009a(Mathsworks, 美国)。

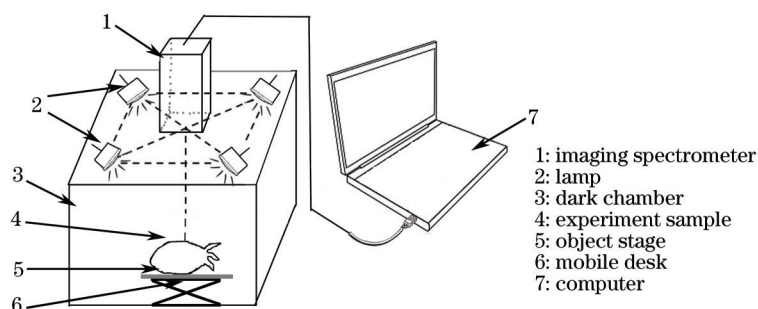


图1 高光谱成像系统示意图

Fig.1 Schematic of hyperspectrum imaging system

2.3 方法

2.3.1 光谱数据采集方法

采集高光谱数据时,室内温度控制在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$,在华南农业大学工程学院北302实验室进行。为使样本各个部位均匀接收到光,在样本上方布置4个卤钨灯均匀光源,并通过正反两面采集高光谱数据。经过高光谱成像系统调整及优化,系统参数设置如下:曝光时间为20 ms,传送带的传输速度为5.128 mm/s,扫描距离为200 mm。将样品平稳放在反射率接近零的黑色载物台上,在电机驱动下,载物台垂直于成像光谱仪纵向移动,成像光谱仪同时进行横向扫描,获取的是对象在条状空间中每个像素在各波长下的图像信息,达到预先设定的扫描距离,探测器扫出一条带状轨迹从而完成纵向扫描。为减小光源强度的不均匀和扫描中暗电流带来的图像噪声影响,采集高光谱数据前要进行黑白板校正^[22-24]。

对校正后的高光谱图像,提取的感兴趣区域(ROI)为整个样本图像区域,如图2所示,通过SpectraSENS-V3.0软件,得到ROI在369.82~987.51 nm波长范围内的反射率组成的一条光谱曲线,取正反两面光谱曲线的均值作为一个样本的高光谱数据。实验采集到的128个样品整果漫反射光谱图如图3所示。因在369.82~453.22 nm的光谱信号噪声较大,所以实验波长范围为454.43~987.51 nm,共计442个波长变量。

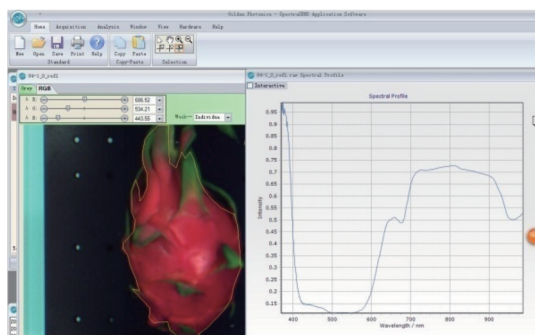


图2 高光谱成像系统光谱输出操作界面

Fig.2 Spectrum output interface of hyperspectrum imaging system

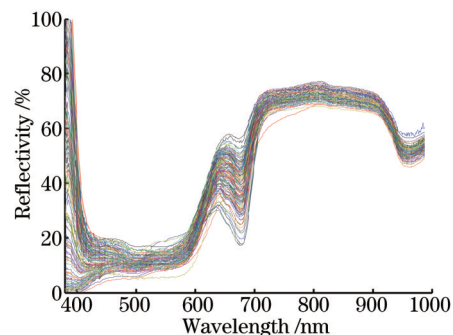


图3 128个火龙果整果漫反射高光谱图

Fig.3 Diffuse reflectance hyperspectra of 128 pitaya samples

2.3.2 可溶性固形物含量测定

火龙果可溶性固形物含量采用日本Atago公司生产的PAL-1数显手持式糖度计测量。样本光谱数据采集后,将样本果皮剥掉,剥出果肉挤汁,将汁液滴至PAL-1数显手持式糖度计的测量区域内进行读数^[2],重复三次取平均值。测定结果如表1所示。

2.3.3 连续投影算法

SPA是一种理想的变量选取方法,在光谱矩阵中寻找含有最低限度冗余信息的变量组,使得变量之间的共线性达到最小^[25],具体算法参见文献[26]。

2.3.4 建模方法和模型评价标准

对光谱预处理后,应用SPA算法提取出特征波长变量作为模型输入变量,运用PLS和BPNN建立火龙果SSC预测模型。通过校正相关系数(R_c)、预测相关系数(R_p)、校正均方根误差(RMSEC)、交叉验证均方根误差(RMSECV)以及预测均方根误差(RMSEP)对模型的性能进行评价。模型的评价标准为模型的 R_c 、 R_p 值

越大, RMSEC、RMSECV和RMSEP值越小, 模型的预测效果越好。

表1 128个火龙果样本可溶性固形物含量

Table 1 Statistics of soluble solid content in 128 pitaya samples

| Samples | Date set | Soluble solid content /°brix | | | |
|-------------|----------|------------------------------|-----------------|-------------|-------------------|
| | | Min /°brix | Maximum / °brix | Mean /°brix | Standard error /% |
| Calibration | 86 | 8.13 | 14.65 | 10.96 | 1.344 |
| Prediction | 42 | 7.8 | 14.35 | 10.88 | 1.576 |

3 结果与分析

3.1 光谱数据预处理

高光谱数据采集过程中, 光源强度分布不均匀、摄像头暗电流、样本大小不均匀等因素都会对光谱数据产生一定的影响。为了消除这些不利因素对所建模型的影响, 在建模前, 可以通过不同的光谱预处理, 消除非目标信息和仪器噪声干扰^[24]。实验采用了移动平滑(MAS)、Savitzky Golay平滑(SGS)、中值滤波平滑(MFS)、归一化、去趋势、基线校正、多元散射校正、标准正态变量校正等8种方法对原始光谱数据进行预处理, 通过Unscrambler 9.8软件建立样本PLS回归模型, 模型采用全交叉验证, 结果如表2所示。

从表2可以看出, 预测模型验证相关系数均在0.82以上, 验证均方根误差较小, 光谱经过MAS、SGS、MFS和归一化预处理后, 模型的预测能力较原始模型分别得到不同程度的提高, 其中以MAS平滑去噪建模预测最优, 其验证相关系数为0.8635, 交叉验证均方根误差为0.6791, 因此后续分析均采用经过MAS平滑去噪处理后的漫反射光谱。

表2 8种预处理光谱PLS建模预测结果

Table 2 Prediction results of spectra after 8 pretreatment methods

| No. | Pretreatment methods | Wave band /nm | PCs | R_{cv} | RMSECV |
|-----|----------------------|---------------|-----|----------|--------|
| 1 | Non | 454.43~987.51 | 13 | 0.8570 | 0.6978 |
| 2 | MAS | 454.43~987.51 | 13 | 0.8635 | 0.6791 |
| 3 | Normalized | 454.43~987.51 | 12 | 0.8617 | 0.6851 |
| 4 | SGS | 454.43~987.51 | 13 | 0.8604 | 0.6867 |
| 5 | MFS | 454.43~987.51 | 13 | 0.8593 | 0.6894 |
| 6 | De-trending | 454.43~987.51 | 11 | 0.8482 | 0.7167 |
| 7 | Baseline | 454.43~987.51 | 13 | 0.8391 | 0.7355 |
| 8 | MSC | 454.43~987.51 | 11 | 0.8616 | 0.7515 |
| 9 | SNV | 454.43~987.51 | 12 | 0.8297 | 0.7542 |

3.2 光谱特征波长变量优选

光谱变量数目巨大, 将导致预测模型运行时间长, 不利于提高火龙果在线无损检测的速度。因此对波长变量进行优选, 不但提取出有效的光谱信号信息, 而且保证模型的预测精度, 使得模型具有较强的预测能力, 简化数据运算, 提高检测速度^[27]。目前, 常用的特征波长变量优选方法有SPA、遗传算法、无信息变量消除法(UVE)、反向间隔偏最小二乘法(BIPLS)、间隔偏最小二乘法(iPLS)和组合间隔偏最小二乘法(SiPLS)^[28], 其中SPA一般优选出的波长数目变量较少, 且优选出来的变量建立的模型预测能力较好^[29-30], 因此采用SPA波长优选方法研究火龙果有效信息提取, 建立火龙果可溶性固形物无损检测模型。

按照基于X-Y的样本集分区(SPX)样本划分方法^[31]选取86个实验样本作为校正集, 建立PLS模型, 42个实验样本作为预测集。

利用SPA算法对整果火龙果校正模型进行光谱特征波长变量选择, 指定波长数N的范围为5~30, 根据校正集的内部交叉验证均方根误差RMSECV值确定最佳的光谱变量总数。从442个光谱变量中, 共优选出光谱变量15个, 如图4(a)所示, 分别是53、140、154、172、191、199、208、234、266、299、319、325、378、412、440波长变量, 如图4(b)所示, 即对应的是517.29、622.46、639.38、661.14、684.1、693.78、704.65、736.08、774.76、814.66、838.83、846.08、910.15、951.25和985.1 nm处的光谱。优选出的光谱数量仅占全部光谱变量的3.4%。将这15个变量作为输入变量建立PLS模型, 该模型的预测相关系数 $R_p=0.8114$, 预测均方根误差 $f_{RMSEP}=0.8447$ 。这些变量作为火

龙果 SSC 的特征波长变量组合,分布在光谱中各个峰值的位置。

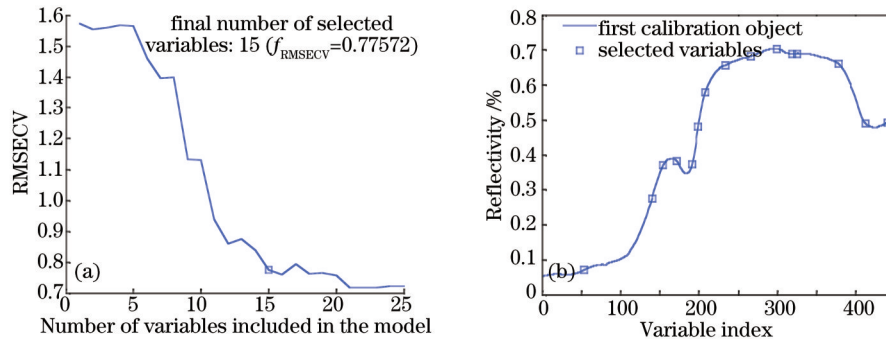


图4 校正集 SSC 的 SPA 结果。(a)模型最佳光谱变量总数;(b)相应的波长变量

Fig.4 SPA results of SSC in calibration set. (a) Best number of variables N selected based on RMSECV criterion; (b) corresponding wave variables

3.3 建模方法的结果比较

使用 SPA 算法提取的 15 个特征波长变量作为输入变量,分别建立 PLS 模型和 BPNN 模型。BPNN 法输入层为 15 个特征波长光谱变量,隐含层中的神经元采用 logsig 型传递函数,训练函数选用 trainscg 函数,输出层为单个神经元即火龙果的 SSC 含量,神经元函数采用 pureline 线性传递函数,学习函数采用 learnngdm 函数,训练过程中,不断调整权值和阈值,使得神经网络输出和期望输出向量的均方差达到最小^[32-34]。神经网络的各项参数设置为:

- 1) 最大训练次数 epochs 定为 20000;
- 2) 训练要求精度 goal 取 0.001;
- 3) 学习率 lr 取 0.05。

对 42 个预测集样本进行预测分析,实验结果如图 5 所示。图 5 中斜线是 1:1 比例线,图 5(a)、(b)所示是两种建模方法以预测集样本可溶性固形物含量真实值为横坐标,预测值为纵坐标的散点图。经过 SPA 优选波长建立的 PLS 模型的预测相关系数为 0.8114,预测均方根误差为 0.8447,非线性 BPNN 模型的预测相关系数为 0.8411,预测均方根误差为 0.8171,预测精度高于线性 PLS 模型,表明 BPNN 模型具有很好的非线性映射能力^[2],更适合火龙果可溶性固形物含量高光谱无损检测。

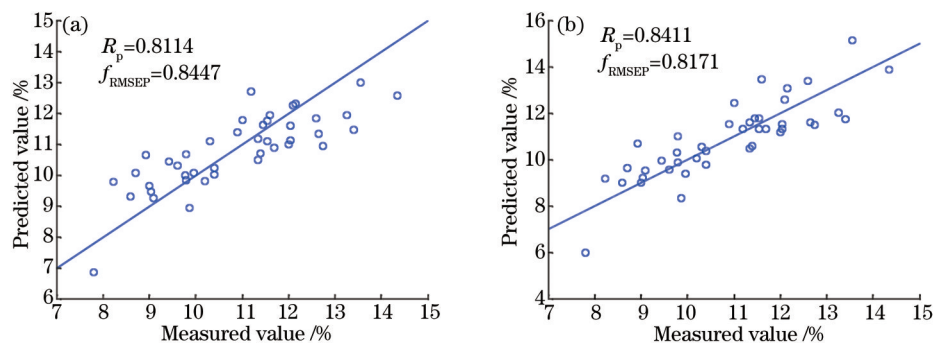


图5 不同建模方法下火龙果可溶性固形物真实值与预测值的比较。(a) SPA+PLS 模型;(b) SPA+BPNN 模型

Fig.5 Predicted value versus real value of SSC of pitaya using different modeling methods.

(a) SPA+PLS; (b) SPA+BPNN

3.4 火龙果果皮对模型精度的影响

3.4.1 去皮前后火龙果光谱差异

实验在采集完整果光谱后,将火龙果果皮剥下,立即进行果肉的光谱采集,图 6 为 128 个火龙果去皮后的火龙果漫反射光谱图,图 7 为一个样本完整果、果皮和果肉的漫反射光谱对比图。

从图 7 可以看到,样本的完整果、果皮和果肉光谱是有差异的,其反射率有差别,同时光谱曲线的形状也有所不同,整果和果皮的光谱形状很相似,峰值出现的位置差异也不明显,仅在 665.97~698.61 nm 波段范围内,果皮的反射率值大于完整果;整果和果皮的光谱形状与果肉的光谱形状则有很大差异,可以看到,在

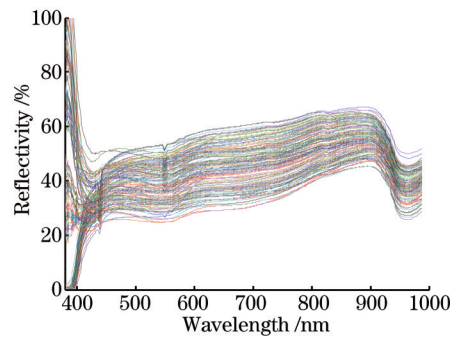


图6 128个火龙果去皮后的火龙果漫反射光谱图

Fig.6 Diffuse reflectance spectra of 128 pitaya samples after peeling

616.41~944 nm 波段范围内,光谱差异是非常明显的,这种情况在光谱经过一阶导数处理后更加明显。图8是火龙果完整果、果皮和果肉光谱经过一阶导数处理后的漫反射光谱图。图8表明,在570.48~724 nm 波段范围内,果肉的光谱和完整果、果皮的光谱差异非常明显,说明可见-近红外区域的光谱对果皮是敏感的^[35]。

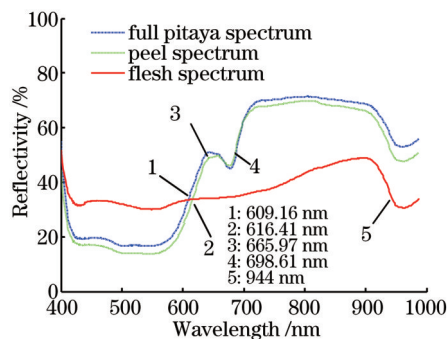


图7 一个样本完整果、果皮和果肉的漫反射光谱对比图

Fig.7 Diffuse reflectance spectra of a pitaya with and without peel

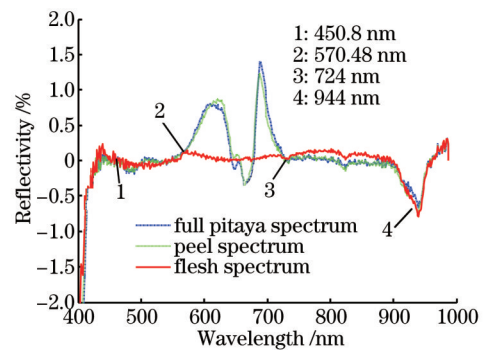


图8 火龙果完整果、果皮和果肉一阶导数光谱对比图

Fig.8 First-order derivative spectra of a pitaya with and without peel

3.4.2 果皮对火龙果可溶性固形物模型的影响

为了研究果皮对火龙果可溶性固形物含量模型结果的影响,将86个去皮前后的校正集火龙果在454.43~987.51 nm 波长范围内,采用PLS建立可溶性固形物的校正模型,利用这两个模型对42个预测集的样本进行预测,结果如表3所示。

表3 去皮前后86个校正集样本SSC模型的预测结果

Table 3 Prediction results for 86 samples with and without peel by SSC models

| Model | Calibration | | Prediction | |
|-------|-------------|--------|------------|--------|
| | R_c | RMSEC | R_p | RMSEP |
| Full | 0.9253 | 0.5067 | 0.8999 | 0.7208 |
| Flesh | 0.9651 | 0.4026 | 0.9304 | 0.5291 |

表3表明完整果和果肉的PLS模型的预测精度较好,其中完整果PLS模型的预测相关系数为0.8999,预测均方根误差为0.7208,果肉PLS模型的预测相关系数为0.9304,预测均方根误差为0.5291,其预测精度优于完整果PLS模型,说明果皮对建模结果会产生一定的影响。

4 结论

研究结果说明利用高光谱技术和连续投影算法无损检测火龙果可溶性固形物含量是可行的。从实验中得到如下结论:

1) 用高光谱技术采集火龙果漫反射光谱,并对光谱数据采用MAS平滑去噪效果最优,其验证相关系数为0.8635,交叉验证均方根误差为0.6791,可提高火龙果可溶性固形物模型的精度;

2) 使用连续投影算法能够有效地对光谱数据进行降维处理,经过SPA优选出15个建模变量,仅占全谱

变量数目的3.4%,建立PLS模型的预测相关系数为0.8114,预测均方根误差为0.8447,非线性BPNN模型的预测相关系数为0.8411,预测均方根误差为0.8171,预测精度高于线性PLS模型,表明BPNN模型具有很好的非线性映射能力,更适合火龙果可溶性固形物高光谱无损检测;

3) 分析了火龙果果皮对预测模型的影响,实验结果表明,完整果PLS模型的预测相关系数为0.8999,预测均方根误差为0.7208,果肉PLS模型的预测相关系数为0.9304,预测均方根误差为0.5291,去皮后的火龙果SSC模型与完整火龙果SSC模型的预测能力相比有所提高,说明果皮对建模结果会产生一定的影响。但是果皮对模型的影响大小还需要进一步进行实验研究。

参考文献

- 1 Deng Renju, Fan Jianxin, Cai Yongqiang. Present research status and industrial development of pitaya at home and abroad[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2011, 39(6): 188-192.
邓仁菊, 范建新, 蔡永强. 国内外火龙果研究进展及产业发展现状[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(6): 188-192.
- 2 Dai Fen, Cai Bokun, Hong Tiansheng, *et al.*. Non-destructive measurement of soluble solid content in litchi by visible/near-infrared transmission spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 287-292.
代芬, 蔡博昆, 洪添胜, 等. 漫透射法无损检测荔枝可溶性固形物[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 287-292.
- 3 Wu Di, Ning Jifeng, Liu Xu, *et al.*. Determination of anthocyanin content in grape skins using hyperspectral imaging technique and successive projections algorithm[J]. Food Science, 2014, 35(8): 57-61.
吴迪, 宁纪锋, 刘旭, 等. 基于高光谱成像技术和连续投影算法检测葡萄果皮花色苷含量[J]. 食品科学, 2014, 35(8): 57-61.
- 4 Huang Shuangping, Hong Tiansheng, Yue Xuejun, *et al.*. Multiple regression analysis of citrus leaf nitrogen content using hyperspectral technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 132-138.
黄双萍, 洪添胜, 岳学军, 等. 基于高光谱的柑橘叶片氮素含量多元回归分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 132-138.
- 5 P Rajkumar, N Wang, G Elmasry. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 194-200.
- 6 A Baiano, C Terracone, G Peri, *et al.*. Application of hyperspectral imaging for prediction of physico-chemical and sensory characteristics of table grapes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 87: 142-151.
- 7 Hong Tiansheng, Qiao Jun, Ning Wang, *et al.*. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(2): 151-155.
洪添胜, 乔军, Ning Wang, 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.
- 8 Li Fengxia, Ma Benxue, He Qinghai, *et al.*. Non-destructive detection of firmness of Hami melon by hyperspectral imaging technique[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(5): 592-595.
李锋霞, 马本学, 何青海, 等. 哈密瓜坚实度的高光谱无损检测技术[J]. 光子学报, 2013, 42(5): 592-595.
- 9 Huang Wenqian, Li Jiangbo, Chen Liping, *et al.*. Effectively predicting soluble solids content in apple based on hyperspectral imaging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(10): 2843-2846.
黄文倩, 李江波, 陈立平, 等. 以高光谱数据有效预测苹果可溶性固形物含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2843-2846.
- 10 Wu Longguo, He Jianguo, He Xiaoguang, *et al.*. Research progress of hyperspectral imaging technology in non-destructive detection of fruit[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(9): 990-996.
吴龙国, 何建国, 贺晓光, 等. 高光谱图像技术在水果无损检测中的研究进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 990-996.
- 11 Hong Tiansheng, Li Zhen, Wu Chunying, *et al.*. Review of hyperspectral image technology for non-destructive inspection of fruit quality[J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 280-285.
洪添胜, 李震, 吴春胤, 等. 高光谱图像技术在水果品质无损检测中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 280-285.
- 12 Ma Benxue, Ying Yibin, Rao Xiuqin, *et al.*. Advance in nondestructive detection of fruit internal quality based on hyperspectral imaging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6): 1161-1165.
马本学, 应义斌, 饶秀勤, 等. 高光谱成像在水果内部品质无损检测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1161-1165.
- 13 Dai Fen, Hong Tiansheng, Luo Xia, *et al.*. Nondestructive test of total acidity in 'Shatangju' (*Citrus reticulata* Blanco) with near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2012, 31(4): 518-523.
代芬, 洪添胜, 罗霞, 等. 基于可见-近红外光谱的砂糖橘总酸无损检测[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(4): 518-523.
- 14 Li Donghua, Ji Shujuan, Shigefuji Kazuaki. Applicability of visible-near infrared spectroscopy models for determining soluble solid and total acid contents in 'Nanguo' pears during storage period[J]. Transactions of the Chinese Society

- of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 270-275.
- 李东华, 纪淑娟, 重滕和明. 南果梨糖、酸度近红外光谱模型适用的贮藏期研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 270-275.
- 15 Shan Jiajia, Peng Yankun, Wang Wei, *et al.*. Simultaneous detection of external and internal quality parameters of apples using hyperspectral technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 140-144.
- 单佳佳, 彭彦昆, 王伟, 等. 基于高光谱成像技术的苹果内外品质同时检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 140-144.
- 16 Guo Junxian, Rao Xiuqin, Cheng Guoshou, *et al.*. Prediction of the sugar degree and grading of Xinjiang fuji apple by hyperspectral imaging techniques[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2012, 35(1): 78-86.
- 郭俊先, 饶秀勤, 程国首, 等. 基于高光谱成像技术的新疆冰糖心红富士苹果分级和糖度预测研究[J]. 新疆农业大学学报, 2012, 35(1): 78-86.
- 17 S Wang, M Huang, Q Zhu. Model fusion for prediction of apple firmness using hyperspectral scattering image[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80: 1-7.
- 18 Liu Yande, Chen Xingmiao, Ouyang Aiguo. Non-destructive measurement of soluble solid content in Gannan navel oranges by visible/near-infrared spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 478-481.
- 刘燕德, 陈兴苗, 欧阳爱国. 可见/近红外光谱法无损检测赣南脐橙可溶性固形物[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 478-481.
- 19 Zhao Conghui, Zhang Shujuan, Zhang Haihong, *et al.*. Dynamic detection for soluble solids content of fresh jujube based on least square support vector machines[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(3): 210-213.
- 赵聪慧, 张淑娟, 张海红, 等. 鲜枣可溶性固形物最小二乘支持向量机动态检测研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(3): 210-213.
- 20 Xue Long, Li Jing, Liu Muhua, *et al.*. Nondestructive detection of soluble solids content on navel orange with Vis/NIR based on genetic algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(12): 123001.
- 薛龙, 黎静, 刘木华, 等. 基于遗传算法的脐橙可溶性固形物的可见/近红外光谱无损检测[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(12): 123001.
- 21 Chen Quansheng, Zhang Yanhua, Wan Xinmin, *et al.*. Study on detection of pork tenderness using hyperspectral imaging technique[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2602-2607.
- 陈全胜, 张燕华, 万新民, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉嫩度检测研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2602-2607.
- 22 Deng Xiaoling, Kong Chen, Wu Weibin, *et al.*. Detection of citrus Huanglongbing based on principal component analysis and back propagation neural network[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0430002.
- 邓小玲, 孔晨, 吴伟斌, 等. 基于主成分分析和BP神经网络的柑橘黄龙病诊断技术[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0430002.
- 23 Sun Mei, Fu Yan, Xu Ranran, *et al.*. Nondestructive inspect of fruit quality with hyperspectral imaging technology[J]. Journal of Food Science and Technology, 2013, 3(2): 67-71.
- 孙梅, 付妍, 徐冉冉, 等. 基于高光谱成像技术的水果品质无损检测[J]. 食品科学技术学报, 2013, 3(2): 67-71.
- 24 Mei Huilan, Deng Xiaoling, Hong Tiansheng, *et al.*. Early detection and grading of citrus Huanglongbing using hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(9): 140-147.
- 梅慧兰, 邓小玲, 洪添胜, 等. 柑橘黄龙病高光谱早期鉴别及病情分级[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 140-147.
- 25 Liu Fei, Zhang Fan, Fang Hui, *et al.*. Application of successive projections algorithm to nondestructive determination of total amino acids in oilseed rape leaves[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(11): 3079-3083.
- 刘飞, 张帆, 方慧, 等. 连续投影算法在油菜叶片氨基酸总量无损检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(11): 3079-3083.
- 26 Hong Ya, Hong Tiansheng, Dai Fen, *et al.*. Successive projections algorithm for variable selection in nondestructive measurement of citrus total acidity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(14): 380-384.
- 洪涯, 洪添胜, 代芬, 等. 连续投影算法在砂糖橘总酸无损检测中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(14): 380-384.
- 27 Jie Dengfei, Xie Lijuan, Rao Xiuqin, *et al.*. Improving accuracy of prediction model for soluble solids content of watermelon by variable selection based on near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(12): 264-270.
- 介邓飞, 谢丽娟, 饶秀勤, 等. 近红外光谱变量筛选提高西瓜糖度预测模型精度[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 264-270.
- 28 Chu Xiaoli, Yuan Hongfu, Lu Wanzhen. Progress and application of spectral data pretreatment and wavelength selection methods in NIR analytical technique[J]. Progress in Chemistry, 2004, 16(4): 528-542.

- 褚小立, 袁洪福, 陆婉珍. 近红外分析中光谱预处理及波长选择方法进展与应用[J]. 化学进展, 2004, 16(4): 528-542.
- 29 M C U Araújo, T C B Saldanha, R K H Galvão, *et al.*. The successive projections algorithm for variable selection in spectroscopic multicomponent analysis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 57(2): 65-73.
- 30 Chen Bin, Meng Xianglong, Wang Hao. Application of successive projections algorithm in optimizing near infrared spectroscopic calibration model[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2007, 26(1): 66-69.
- 陈 斌, 孟祥龙, 王 豪. 连续投影算法在近红外光谱校正模型优化中的应用[J]. 分析测试学报, 2007, 26(1): 66-69.
- 31 R K H Galvão, M C U Araújo, G E José, *et al.*. A method for calibration and validation subset partitioning[J]. Talanta, 2005, 67(4): 736-740.
- 32 Xiao Haibin, Zhao Jinhui, Liu Muhua, *et al.*. Application study of three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with PLSR for carbaryl residues in duck meat[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 043001.
- 肖海斌, 赵进辉, 刘木华, 等. 三维荧光光谱技术结合 PLSR 在鸭肉中西维因残留检测的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 043001.
- 33 Dai Fen, Hong Tiansheng, Yin Ling, *et al.*. Nondestructive examination of apple soluble solids content based on artificial neural network[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 10: 134-137.
- 代 芬, 洪添胜, 尹 令, 等. 基于人工神经网络的苹果可溶性固形物无损检测[J]. 农机化研究, 2011, 10: 134-137.
- 34 Zhao Jiewen, Hui Zhe, Huang Lin, *et al.*. Quantitative detection of TVB-N content in chicken meat with hyperspectral imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 073003.
- 赵杰文, 惠 喆, 黄 林, 等. 高光谱成像技术检测鸡肉中挥发性盐基氮含量[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 073003.
- 35 Li Donghua. Study on Nondestructive Detecting Internal Quality in 'Nanguo' Pears by NIRS Technology[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009: 41-46.
- 李东华. 南果梨内在品质近红外光谱无损检测技术研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009: 41-46.

栏目编辑: 吴秀娟