

doi:10.3788/gzxb20134205.0592

## 哈密瓜坚实度的高光谱无损检测技术

李锋霞<sup>a</sup>, 马本学<sup>a,b</sup>, 何青海<sup>a</sup>, 吕琛<sup>a</sup>, 王宝<sup>a</sup>, 田昊<sup>a</sup>

(石河子大学 a. 机械电气工程学院; b. 新疆兵团农业机械重点实验室, 新疆 石河子 832003)

**摘 要:**提出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、不同光谱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.实验结果表明,在 500~820 nm 波段光谱区域,采用偏最小二乘法对经过标准正则变换校正的一阶微分处理的光谱建模效果较优,其校正集相关系数为 0.873,校正均方根误差为 4.18N,预测集相关系数为 0.646,预测均方根误差为 6.40N.研究表明,应用高光谱对哈密瓜坚实度的无损检测研究具有可行性.

**关键词:**光谱学;高光谱成像技术;无损检测;偏最小二乘法;坚实度;哈密瓜

中图分类号:O657.39;TP274

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)05-0592-4

## Non-destructive Detection of Firmness of Hami Melon by Hyperspectral Imaging Technique

LI Feng-xia<sup>a</sup>, MA Ben-xue<sup>a,b</sup>, HE Qing-hai<sup>a</sup>, LÜ Chen<sup>a</sup>, WANG Bao<sup>a</sup>, TIAN Hao<sup>a</sup>

(a. College of Mechanical and Electrical Engineering; b. Agricultural Machinery Key Laboratory of the Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** In order to detect firmness of hamimelon, a method based on hyper spectral imaging technique is proposed. Effects of different wave bands, different preprocessing methods, different spectral correction methods and different quantitative methods on the predictive accuracy of the model for firmness are compared and analyzed. Experimental results show that in the spectral region between 500 to 820 nm, the partial least square model of the first derivative spectrum processed by standard normal variate gives the best prediction of firmness, with a correction sample correlation coefficient of 0.873, a lower root mean square errors of correction of 4.18 N, a prediction sample correlation coefficient of 0.646 and a root mean square errors of prediction of 6.40 N. The research indicutes that the hyperspectral imaging technique can be used for the non-destructive detection of firmness of hami melon.

**Key words:** Spectroscopy; Hyperspectral imaging technique; Non-destructive detection; Partial least square; Firmness; Hami melon

## 0 引言

哈密瓜是新疆传统的名优特产之一,因新疆独特的自然地理条件的优势,使其生长出的哈密瓜品种繁多,风味独特,奇香袭人,饮誉国内外.而随着人们生活水平的提高,也越来越关注哈密瓜的品质,因而急需对哈密瓜的品质进行无损检测研究.坚实度

是果实的重要品质之一,决定果实质地和成熟度.经验表明,随着果实成熟度的增加,其坚实度逐步降低.当瓜身坚实微软时,成熟度比较适中.而太硬则欠熟,太软则成熟过度.因此坚实度可以作为哈密瓜品质检测的重要指标之一.

高光谱技术是结合了光谱分析技术和图像处理技术,对获取的待测物的光谱信息和图像信息进行

基金项目:国家自然科学基金(No.61263041)和新疆兵团农业机械重点实验室开放课题(No.KFKT-200902)资助

第一作者:李锋霞(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为农产品智能化检测与分级装备. Email:lf\_x\_shz@sina.com

导师(通讯作者):马本学(1970-),男,教授,博士,主要研究方向为农产品智能化检测与分级装备. Email:mbx\_shz@163.com

收稿日期:2012-12-11;录用日期:2013-01-22

分析提取,最终能够快速、无损和准确检测水果品质<sup>[1]</sup>。近年来,国内外学者对水果的糖度<sup>[2]</sup>、可溶性固形物<sup>[3]</sup>的研究较多,方法也较成熟。目前,对于水果坚实度作也做了相应的研究工作。LU, R. F., Nagata M, H. K. Noh, Yankun Peng 等<sup>[4-7]</sup>利用高光谱对苹果、草莓、梨等坚实度进行了无损检测研究。田海清、傅霞萍、曾一凡、张鹏、王爽等<sup>[9-15]</sup>利用高光谱、近红外线等技术对西瓜、梨、柿子的坚实度进行无损检测研究。这些研究为哈密瓜无损检测提供了一定的理论基础。

本文以新疆哈密瓜为研究对象,应用高光谱成像技术对其内部品质(坚实度)进行检测研究。

## 1 实验和方法

### 1.1 实验材料

实验所用 92 个新疆哈密瓜样本从石河子水果批发市场选购,去除表面明显有伤痕的样本,在对哈密瓜表面进行清洗擦拭干净后,依次进行编号。为使哈密瓜样本实验环境与周围环境一致,在实验室放置 24 h 后再进行光谱数据采集,实验室环境条件为:温度 20~24℃,相对湿度为 49%~51%。

### 1.2 高光谱数据采集

实验用的高光谱图像采集系统主要包括线阵 CCD 摄像机(Hamamatsu)、荷兰生产的成像光谱仪(Imspector V10E)、物镜、电控平移台、150 W 光纤卤素灯(SCHOTT DCR III)及带有 1 394 采集卡的计算机(TOSHIBA,英特尔酷睿 Corei3)等部件组成。

采集光谱时,测量实验系统环境温度为 25℃,湿度为 58%~60%,仪器预热 30 min 后,为了避免采集的图像失真同时能够消除噪音的影响,需要在采集前进行黑白校正,确定曝光时间和位移台运行速度。经过多次实验调整和参量优化,仪器使用参量设置为:测量波段范围:400~1 000 nm,光谱分辨率:2.8 nm,曝光时间:30 ms,平均照度:1 4870 Lux,物距:967 mm,图像采集速度:1.13 mm/s。

### 1.3 坚实度测量

坚实度测量采用 GY-4 型手持式硬度计(杭州托普仪器有限公司)测定哈密瓜的坚实度。将所抽取的样品在标记区域内逐个从果皮和果肉结合处剖开,使硬度计垂直于被测水果表面,压头均匀压入哈密瓜内,刺入瓜瓢的探头直径为 11 mm,当压头压到刻度线(10 mm)处停止,屏幕显示的读数即为哈密瓜的硬度,取三次的平均值作为该样品的硬度值。将所测坚实度值从大到小排列,按 2:1 的原则,将上述 92 个样本分成校正集和验证集,校正集含有

62 个样本,验证集含有 30 个样本,用于模型的哈密瓜样本的坚实度值统计如表 1 所示。

表 1 哈密瓜坚实值的统计  
Table 1 Statistics of Hami melon firmness

Sample sets	Max/N	Min/N	Mean/N	Standard deviation
Calibration(62)	81.80	43.60	62.55	8.63
Prediction(30)	80.60	45.20	61.23	7.81

### 1.4 光谱处理及数据分析

实验中数据的预处理与分析使用了定量分析 TQ Analyst 光谱分析软件和 Excel 2010。实验中对对比分析不同波段范围内经过多元信号修正(Multiplicative Signal Correction, MSC)、标准正则变换(Standard Normal Variate, SNV)等光程校正方法的原始光谱、一阶微分处理光谱和二阶微分处理光谱对建模准确度的影响。应用逐步多元线性回归法(Stepwise Multiple Linear Regression, SMLR),主成分回归法(Principal Component Regression, PCR)和偏最小二乘法(Partial Least Squares, PLS)三种校正建模算法对哈密瓜坚实度进行校正建模,模型的准确性和可靠性由正集相关系数(Correlation Coefficient Calibration, Rc)、预测集相关系数(Correlation Coefficient Prediction, Rp)和校正均方差(Root Mean Square Error of Calibration, RMSEC)及预测均方差(Root Mean Square Error of Prediction, RMSEP)来进行评价,对比不同参量选择出较优的模型。

## 2 结果与讨论

### 2.1 光谱区域的选择与结果分析

不同的光谱波段范围,对建立模型会产生不同的效果,为了寻找最优波段,确定最佳回归和预测光谱区域,首先选择全光谱波段,然后再逐步缩短光谱范围。最后对选择的光谱波段应用 PLS 方法,对原始光谱进行模型建立,结果如表 2。

表 2 应用 PLS 建模方法对一阶微分处理的不同波段范围的光谱的建模结果

Table 2 Results of calibration models of PLS methods for the original spectrum with different wavelength ranges

Wavelength range/nm	Factors	Correlation	RMSEC/N	RMSEP/N
400~500	9	0.601	6.84	7.21
500~700	10	0.706	6.06	6.55
700~820	7	0.752	5.64	7.67
500~820	12	0.757	5.59	7.10
820~1 000	7	0.627	6.66	7.82
400~1 000	6	0.626	6.67	7.13

从结果中可知选择的光谱区域一定要适中,不可过窄,也不可过宽.过窄可能会缺失所需要的重要信息,过宽可能会添加影响较大的噪音波段和多余的背景信息波段,因此一定要根据水果的吸收特性选择适合的光谱区域,这样才能取得较好的结果.试验中采用 500~820 nm 全波段范围为最佳有效建模波段区域.图 1 为 500~820 nm 的光谱曲线图.

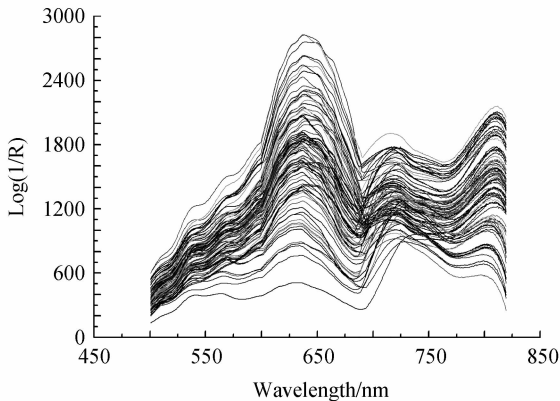


图 1 500~820 nm 的光谱曲线

Fig. 1 The spectral region between 500 and 820 nm

## 2.2 光谱预处理的比较与结果分析

光谱采集的过程中,会出现光谱偏移或漂移,导数处理是净化谱图常用的方法.试验在 500~820 nm 全波段范围,对不同光谱预处理方法(原始光谱和一阶、二阶微分光谱),采用 PLS 校正方法建立模型,结果如表 3.从结果中可知选择一阶微分预处理的模型较好.原因在于一阶微分处理可以很好地消除基线偏移,起到放大和分离重叠信息的作用.

表 3 应用 PLS 建模方法对 500~820 nm 的光谱用不同预处理方法建模的结果

Table 3 Results of calibration models of PLS methods using different preprocessing method in the wavelength range of 500~820 nm

Spectrum	Factors	Correlation	RMSEC/ N	RMSEP/ N
Original	14	0.796	5.18	7.51
First derivative	7	0.855	4.44	7.14
Second derivative	2	0.787	5.28	8.67

## 2.3 光程校正方法的比较与结果分析

光谱采集时,光程一般为恒定(Constant),但是由于哈密瓜表面纹理、大小及均匀性等的影响,光程无法恒定<sup>[16]</sup>,因此需要使用多元信号修正(MSC)、标准正则变换(SNV)等方法来处理,实验对比分析不同的光程校正方法,采用 PLS 校正方法对一阶微分光谱建立模型,结果如表 4.从结果中可看出,各种方法的校正效果很接近,相比较而言,SNV 作为光程校正效果最好,校正相关系数较高.

表 4 应用 PLS 建模方法对一阶微分处理的 500~820 nm 的光谱用不同的光程校正的建模结果

Table 4 The results for firmness calibration models of PLS regression methods for first derivative spectrum using different spectral correction in the wavelength range of 500~820 nm

Pathlength type	Factors	Correlation	RMSEC/N	RMSEP/N
Constant	7	0.855	4.44	7.14
MSC	7	0.867	4.26	6.98
SNV	7	0.873	4.18	6.40

## 2.4 建模算法的比较与结果分析

不同的建模算法会产生不同的影响.采用 PLS、SMLR 及 PCR 方法对经过平滑处理的一阶微分光谱和 SNV 预处理的光谱进行建模分析比较,以确定最优模型,结果如表 5.结果表明,采用 PLS 方法的建模效果较好,原因在于 PLS 方法适用于复杂分析体系的全光谱数据或部分光谱数据,数据矩阵分解与回归交互结合,使得特征向量直接与样品性质相关,模型更为稳健.

表 5 对一阶微分处理过的 500~820 nm 光谱应用 PLS、SMLR 和 PCR 建模的结果

Table 5 Results of calibration models of PLS, SMLR and PCR methods for first derivative spectrum, with spectral range of 500~820 nm

Method	Factors	Correlation	RMSEC/N	RMSEP/N
PLS	7	0.873	4.18	6.40
SMLR	6	0.764	5.52	7.97
PCR	10	0.545	7.17	8.13

## 2.5 模型的验证

由实验比较与结果分析可知,在 500~820 nm 全波段光谱,应用 PLS 方法对经过平滑处理的一阶微分和 SNV 预处理的光谱进行建模的结果较优.如图 2 所示,校正集相关系数  $R=0.873$  N,  $RMSEC=4.18$  N.为了检验模型的准确性和准确度,采用已

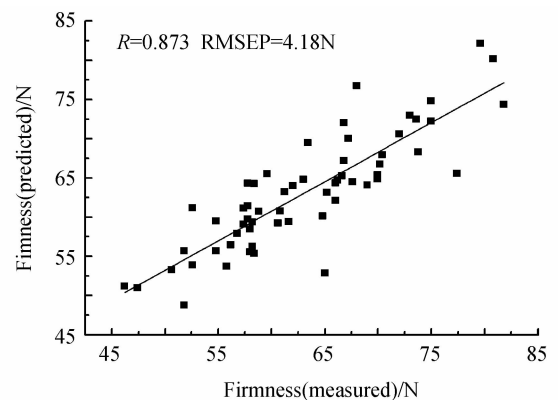


图 2 应用 PLS 建模方法对 62 个哈密瓜样本坚实度的校正结果

Fig. 2 PLS calibration result of firmness of 62 Hami melon samples

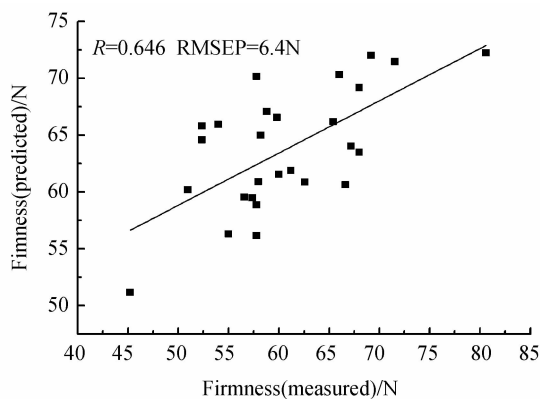


图3 应用 PLS 建模方法对 30 个哈密瓜样本坚实度的预测结果

Fig. 3 PLS prediction result of firmness of 30 Hami melon samples

建立的校正模型对 30 个样本进行哈密瓜坚实度预测,结果如图 3. 结果可知,预测集相关系数为 0.646,预测均方误差为 6.40.

### 3 结论

实验应用高光谱对哈密瓜的坚实度进行无损检测,得出以下结论:

1)选取不同的波段范围对光谱信息进行有效的提取和分析,确定最佳波段范围为 500~820 nm.

2)对获取的哈密瓜坚实度的光谱进行不同方法的预处理及光程的选择,结果对比分析之后可知,选择 SNV 光程的一阶微分处理的光谱建模效果较好.

3)采用 PLS、SMLR 及 PCR 方法对经过平滑处理的一阶微分光谱和 SNV 预处理的光谱进行建模分析比较,结果表明,用 PLS 方法建立的坚实度模型最优.其中校正集相关系数 $R=0.873$ , $RMSEC=4.18$  N;预测集相关系数为 0.646,预测均方误差为 6.40 N.

#### 参考文献

- [1] MA Ben-xue, YING Yi-bin, RAO Xiu-qin, *et al.* Advance in nondestructive detection of fruit internal quality based on hyperspectral imaging [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(6): 1611-1615.  
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): 1611-1615.
- [2] LIU Mu-hua, CHEN Quan-sheng, LIN Huai-wei. The study of non-destructive measurement of fruit internal qualities using spectral imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2042-2046.  
刘木华, 陈全胜, 林怀蔚. 苹果糖度的光谱图像无损检测技术研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2042-2046.
- [3] LIU Yan-de, CHEN Xing-miao, OUYANG Ai-guo. 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.
- [4] LU R, PENG Y. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, **93**(2): 161-171.
- [5] NAGATA M, JASPER G Tallada, TAIICHI Kobayashi, *et al.* NIR hyperspectral imaging for measurement of internal quality in strawberries [C]. 2005 ASAE Annual International Meeting. Florida: American Society of Agricultural Engineers, 2005: 053131-053141.
- [6] NOH H K, PENG Y, LU R. Integration of Hyperspectral reflectance and fluorescence Imaging for assessing apple maturity [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, **50**(3): 963.
- [7] PENG Yan-kun, LU Ren-fu. Analysis of spatially resolved Hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, **48**(1): 52-62.
- [8] TIAN Hai-qing, YING Yi-bin, LU Hui-shan, *et al.* Study on predicting firmness of watermelon by vis/NIR diffuse transmittance technique [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(6): 1113-1117.  
田海清, 应义斌, 陆辉山, 等. 可见/近红外光谱漫透射技术检测西瓜坚实度的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(6): 1113-1117.
- [9] FU Xia-ping, YING Yi-bin, LIU Yan-de, *et al.* Detection of pear firmness using near infrared diffuse reflectance spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(6): 1038-1041.  
傅霞萍, 应义斌, 刘燕德, 等. 水果坚实度的近红外光谱检测分析试验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(6): 1038-1041.
- [10] FU Xia-ping, YING Yi-bin, LU Hui-shan, *et al.* Application of some different modeling algorithms to pear MT-firmness detection using NIR spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(5): 911-915.  
傅霞萍, 应义斌, 陆辉山, 等. 应用多种近红外建模方法分析梨的坚实度[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(5): 911-915.
- [11] ZENG Yi-fan, LIU Chun-sheng, SUN Xu-dong, *et al.* Nondestructive measurement of firmness of pear using visible and near-infrared spectroscopy technique [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, **24**(5): 250-252.  
曾一凡, 刘春生, 孙旭东, 等. 可见/近红外光谱技术无损检测果实坚实度的研究[J]. *农业工程学报*, 2008, **24**(5): 250-252.
- [12] ZHAO Jie-wen, CHEN Quan-sheng, SARITPORN Vittayapadung, *et al.* Determination of apple firmness using hyperspectral imaging technique and multivariate calibrations [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, **25**(11): 226-231.
- [13] ZHANG Hai-liang, SUN Xu-dong. Experimental study on electrical-driven centrifugal nozzle of aerial spray [J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2011, **1**: 101-103.  
章海亮, 孙旭东. 近红外漫反射检测梨可溶性固形物 SSC 和硬度的研究[J]. *中国农机化*, 2011, **1**: 101-103.
- [14] ZHANG Peng, LI Jiang-kuo, MENG Xian-jun, *et al.* Study on Nondestructive Measurement of firmness of Mopan persimmon using visible and near infrared diffuse reflection spectroscopy [J]. *Science and technology of food industry*, 2011, **32**(7): 423-428.  
张鹏, 李江阔, 孟宪军, 等. 可见近红外漫反射光谱无损检测磨盘柿果实硬度的研究[J]. *食品工业科技*, 2011, **32**(7): 423-428.
- [15] WANG Shuang, HUANG Min, ZHU Qi-bing. Optimal wavelength selection of hyperspectral scattering images based on UVE-PLS projection analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 428-432.  
王爽, 黄敏, 朱启兵. 基于无信息变量和偏最小二乘投影分析的高光谱散射图像最优波段选择[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 428-432.
- [16] ZHU Xiao-li, YUAN Hong-fu, LU Wan-zhen. Progress and application of spectral data pretreatment and wavelength selection methods in NIR analytical technique [J]. *Progress in Chemistry*, 2004, **16**(4): 528-542.  
褚小力, 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): 528-54.