

文章编号: 0253-2239(2007)11-2042-5

苹果糖度的光谱图像无损检测技术研究*

刘木华¹ 陈全胜² 林怀蔚¹

(¹ 江西农业大学工学院, 南昌 330045
² 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

摘要: 应用光谱图像技术进行了苹果内部品质无损检测技术的研究。通过采集不同波长(分别为 632 nm, 650 nm, 670 nm, 780 nm, 850 nm 和 900 nm)的光谱图像,对所采集的光谱图像灰度分布进行洛伦兹分布(LD)、高斯分布(GD)、指数分布(ED)函数的拟合,通过比较发现洛伦兹分布为最优灰度分布拟合函数。将苹果的糖度与洛伦兹分布函数拟合所得参量分别进行多元线性回归,建立最佳单波长、最佳双波长组合、最佳三波长组合和最佳四波长组合的校正方程,相关系数 R 分别为 0.622、0.776、0.831、0.813。实验表明,利用光谱图像技术无损检测苹果糖度是可行性的,为计算机图像对水果进行内部品质的无损检测提供技术依据。

关键词: 医用光学与生物技术; 光谱图像; 无损检测; 多元线性回归; 苹果糖度
中图分类号: O434.13; TN911.73 文献标识码: A

The Study of Non-Destructive Measurement of Fruit Internal Qualities Using Spectral Imaging

Liu Muhua¹ Chen Quansheng² Lin Huaiwei¹

(¹ College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045
² School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract: The internal qualities of apple were detected using spectral imaging. The spectral imaging in wavelength of 632 nm, 650 nm, 670 nm, 780 nm, 850 nm and 900 nm were captured. The Lorentzian distribution (LD), Gaussian distribution (GD) and Exponential distribution (ED) with three parameters were used to fit scattering profiles for all wavelengths. LD was found to be the best function for fitting gray distribution of imaging. The multi-linear regression model relating Lorentzian parameters to fruit sugar content were development using best single wavelength, double wavelengths, three wavelengths and four wavelengths. The best model with four wavelengths was able to predict apple sugar content with $r=0.831$. Results show that the multi-spectral scattering imaging is nondestructive, fast and easy to implement, and it can provide a nondestructive means for measuring fruit internal quality.

Key words: medical optics and biotechnology; non-destructive measurement; spectral imaging; multi-linear regression; apple sugar content

1 引言

水果糖酸度无损测定的方法有近红外光谱分析法^[1~6]。虽然近红外光谱技术能较好地表征水果糖度品质信息,但这种信息是一维的。本文引入一种新的无损检测技术——高光谱图像技术检测水果的内部品质。高光谱图像技术集光谱信息和图像信息于一身,采集得到的光谱信息为二维的光谱图像信

息,较一维的光谱信息全面^[7~9]。实验通过选取特征波长处的光谱图像,并建立了有效的预测模型,能够方便、快速和准确地预测水果糖度,为实现对水果糖度的光谱图像在线检测与分级提供了依据。

2 材料与方 法

实验用的 100 个新鲜苹果品种为红富士,从水

* 国家自然科学基金(30460059)和江苏省自然科学基金重点项目(BK2006707-1)资助课题。

作者简介: 刘木华(1969—),男,江西宁都人,博士,教授,主要从事农产品品质无损检测和光谱图像等方面的研究。

E-mail: suikelmh@sohu.com

收稿日期: 2007-01-19; 收到修改稿日期: 2007-05-14

果批发市场上购买,所有的苹果购买后把表皮清洗干净,依次进行编号、标记,样品在 24~26 °C 温度和 56%~58% 湿度环境条件下放置 24 h。

光谱图像采集系统如图 1 所示。主要有 250 W 石英钨灯光源、GC-755P 型高性能 CCD 摄像头、Matrox 图像采集标准卡和安装有 Intellicom 图像采集软件的计算机等组成。光源发出的光经过光纤后经过透镜聚成点状光入射到苹果表面。光子进入到苹果组织内后经过散射会从表面逸出,被 CCD 摄像头采集成散射图像,再经滤波片后形成光谱图像。

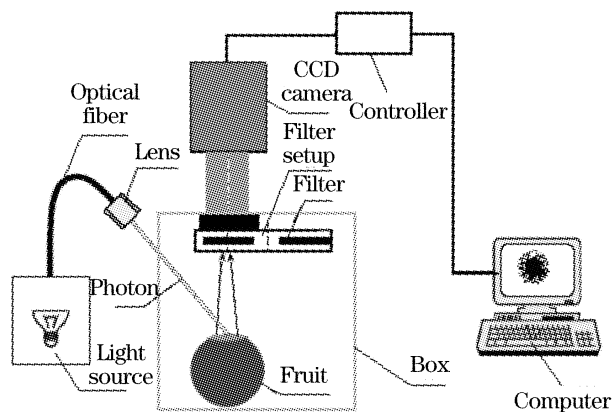


图 1 光谱图像系统

Fig.1 Spectral imaging system

采用 WZ-103 型手持糖度计(中友光学仪器有限公司,福建省泉州光学仪器厂)测定苹果的糖度。将每个苹果对应的光束入射点作为测量位置取两次的平均值作为该样品的糖度值。总共测量 100 个苹果并将其分为校正组(75 个)和验证组(25 个),测得苹果的糖度值统计如表 1 所示。

表 1 苹果糖度值参考测量的结果

Table 1 Reference measurement results of apple Sugar content / (°Brix)

Sample sets	Sample numbers	Range	Mean	Standard deviation
Calibration	75	9.0~15.0	12.8	0.92
Validation	25	10.0~14.8	12.5	1.20

3 苹果糖度预测模型的确立

3.1 光谱图像光散射分布的曲线拟合

将 100 个苹果编号依次放置于光谱图像采集系统的载物平台上,通过转动装有六个波段滤光片的转轮分别采集 632 nm、650 nm、670 nm、780 nm、850 nm、900 nm 六个波长的光谱散射图像共计 100×6=600 张。截取水果物理尺寸为 20 mm×20 mm、以入射光点为中心的区域图像。部分光谱图像如图 2 所示。

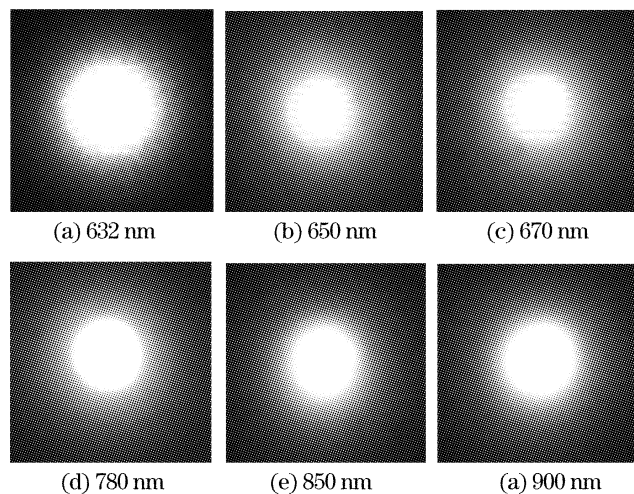


图 2 苹果光谱图像

Fig.2 Spectral images of apple

在截取的区域图像中,以入射点为中心像素,圆环状取像素点处光强值求平均(图 3),则能得到图像中半径上光散射强度分布值(平均值)。用半径上光散射强度分布值来进行曲线拟合。编写相应的程序对 632 nm、650 nm、670 nm、780 nm、850 nm、900 nm 六波段的光谱图像光散射分布分别进行洛伦兹分布、高斯分布和指数分布函数拟合(图 4)。表达式分别是

$$I_i = a_{1i} + \frac{a_{2i}}{1 + (x/a_{3i})^2}, \tag{1}$$

$$I_i = a_{1i} + a_{2i} \exp[-0.5(x/a_{3i})^2], \tag{2}$$

$$I_i = a_{1i} + a_{2i} \exp(-|x|/a_{3i}). \tag{3}$$

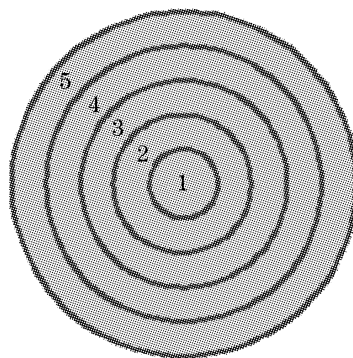


图 3 散射图像中的像素点选取

Fig.3 Quantitative scattering image with pixels

由图 4 可知,当距离(X)较小时,三种分布函数(LD、GD 和 ED)拟合曲线均急剧下降;随着距离的增大,下降趋势逐渐缓和。指数分布和高斯分布的整体拟合较差;洛伦兹分布能够较好的拟合整个散射光区域。通过比较分析,洛伦兹分布曲线对波长为 632 nm、650 nm、670 nm、850 nm 和 900 nm 的图像光散射分布拟合结果最好。对于所有其它样品所得的散射图像用洛伦兹分布、高斯分布、指数分布三

种函数拟合都具有相同结果。

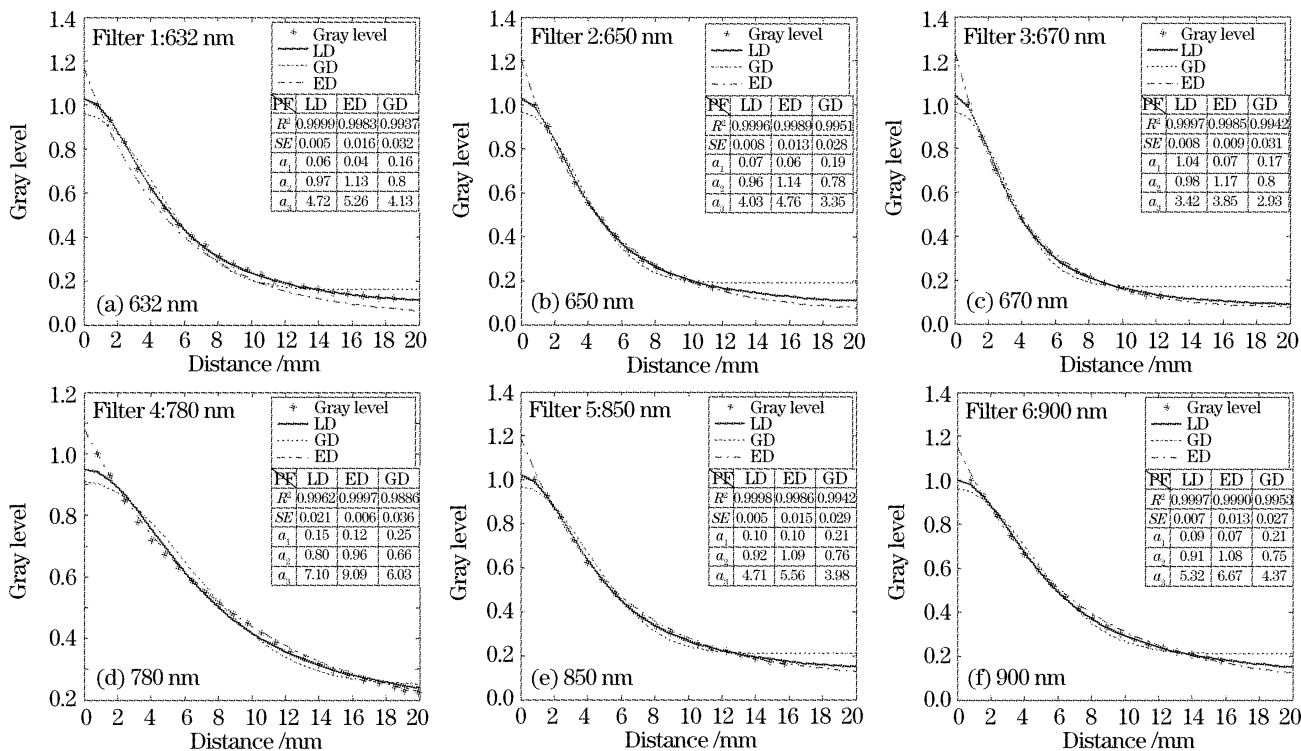


图 4 洛伦兹分布、高斯分布、指数分布函数拟合苹果散射图像的结果

Fig. 4 Curve fittings of LD,ED and GD functions for an apple imaging scattering profiles

3.2 苹果糖度预测模型

通过三种分布函数拟合结果的比较分析可知,洛伦兹分布最适合于拟合苹果不同波长光谱散射图像的光强分布。将苹果糖度测量值分别与每个波长的洛伦兹分布拟合所得参量(a_{1i}, a_{2i}, a_{3i})进行多元线性回归分析。模型可由下式表示:

$$F = f_0 + \sum_{i=1}^N (f_{1i}a_{1i} + f_{2i}a_{2i} + f_{3i}a_{3i}), \quad (4)$$

式中 F 为糖度值, N 为波长个数, $i = 1, 2, \dots, 6, a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}$ 分别为每个波长对应的洛伦兹函数系数, $f_0, f_{1i}, f_{2i}, f_{3i}$ 分别为回归系数。

75 个苹果用于确立校正模型, 25 个苹果用于验证预测模型。苹果糖度预测模型的建立过程如下:

1) 分别计算出每个水果样品在六种波长滤光片下

洛伦兹拟合的参量(a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}); 2) 通过对校正组拟合参量与苹果糖度值进行多元线性回归; (3) 对六个波长进行排列组合, 用以确定不同波长对于苹果糖度预测的影响(表 2); 4) 选择最优波长组合。

用单波长预测苹果糖度, 其校正组相关系数 $r = 0.336 \sim 0.622$, 校正组标准差 $SEC = 0.53 \sim 1.16$; 验证组相关系数 $r = 0.312 \sim 0.610$, 验证组标准差 $SEP = 0.56 \sim 1.17$ 。比较六种波长预测结果可知, 波长 632 nm 预测效果最好, 校正组 $r = 0.622$ 及 $SEC = 0.58$, 验证组 $r = 0.610$ 及 $SEP = 0.61$, 模型的校正结果如图 5(a) 所示。

若采用双波长预测苹果糖度, 根据其不同的波长组合校正组相关系数 $r = 0.460 \sim 0.776$, 校正组标准差 $SEC = 0.52 \sim 0.66$; 验证组相关系数 $r =$

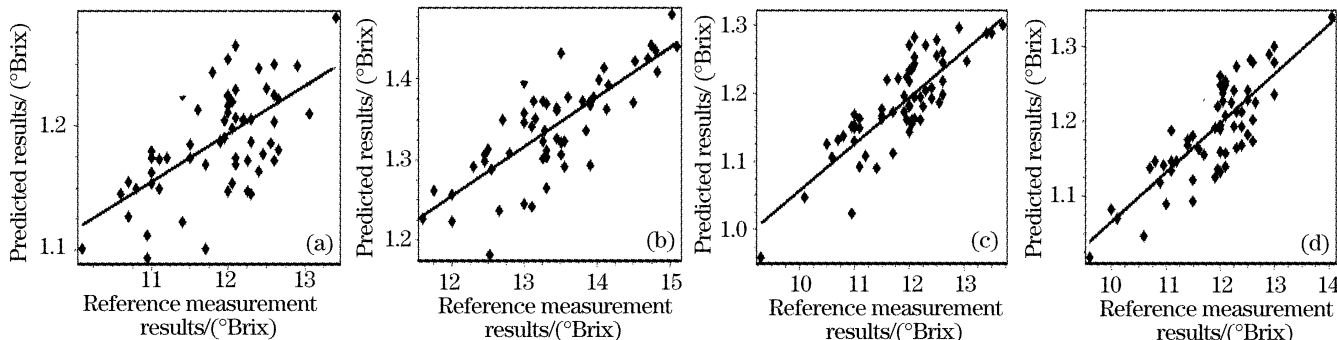


图 5 不同波长组合预测苹果糖度多元线性回归模型

Fig. 5 Multi-linear regression model with different wavelength combination for predicting apple sugar content

0.440~0.761, 验证组标准差 $SEP=0.53\sim0.68$ 。比较双波长的十五种组合可知, 波长 632 nm 与 650 nm 组合极大提高了预测效果, 校正组 $r=0.776$ 及 $SEC=0.62$, 验证组 $r=0.761$ 及 $SEP=0.64$, 模型的校正结果如图 5(b) 所示。

若采用三波长预测苹果糖度, 其波长组合校正组相关系数 $r=0.631\sim0.831$, 校正组标准差 $SEC=0.55\sim0.92$; 验证组相关系数 $r=0.618\sim0.819$, 验证组标准差 $SEP=0.55\sim0.94$ 。比较三波长的十种组合可知, 632 nm、650 nm 和 780 nm 的组合为最佳三波长组合。校正组相关系数 $r=0.831$,

$SEC=0.55$, 验证组 $r=0.819$ 及 $SEP=0.55$, 模型的校正结果如图 5(c) 所示。

若采用四波长预测苹果糖度, 其波长组合校正组相关系数 $r=0.736\sim0.813$, 校正组标准差 $SEC=0.60\sim0.76$; 验证组相关系数 $r=0.726\sim0.805$, 验证标准差 $SEP=0.62\sim0.77$ 。比较四波长的六种组合可知, 650 nm、670 nm、780 nm 和 850 nm 的组合为最佳四波长组合。校正组的相关系数 $r=0.813$, $SEC=0.67$, 验证组 $r=0.805$ 及 $SEP=0.68$, 模型的校正结果如图 5(d) 所示。

表 2 苹果糖度校正组与验证组的多元线性回归预测结果

Table 2 Calibration and validation results from the multi-linear regression for predicting the Sugar content of apple

Wavelength combination	Calibrations		Validations		Wavelength combination	Calibrations		Validations	
	r	SEC	r	SEP		r	SEC	r	SEP
F1	0.622	0.58	0.610	0.61	F4&F6	0.588	0.62	0.569	0.65
F2	0.564	0.53	0.558	0.56	F5&F6	0.720	0.65	0.705	0.67
F3	0.428	1.16	0.411	1.17	F1,F2&F3	0.786	0.56	0.769	0.57
F4	0.448	0.64	0.425	0.65	F1,F2&F4	0.831	0.55	0.819	0.55
F5	0.520	0.60	0.512	0.61	F1,F2&F5	0.753	0.65	0.738	0.67
F6	0.336	0.98	0.312	0.99	F1,F2&F6	0.735	0.64	0.721	0.65
F1&F2	0.776	0.62	0.761	0.64	F2,F3&F4	0.818	0.57	0.809	0.59
F1&F3	0.728	0.59	0.715	0.60	F2,F3&F5	0.788	0.61	0.769	0.63
F1&F4	0.752	0.56	0.741	0.57	F2,F3&F6	0.631	0.60	0.618	0.61
F1&F5	0.681	0.66	0.642	0.68	F3,F4&F5	0.786	0.65	0.779	0.65
F1&F6	0.734	0.59	0.721	0.61	F3,F4&F6	0.720	0.58	0.715	0.59
F2&F3	0.475	0.63	0.451	0.65	F4,F5&F6	0.759	0.92	0.743	0.94
F2&F4	0.565	0.59	0.542	0.60	F1,F2,F3&F4	0.790	0.70	0.762	0.71
F2&F5	0.751	0.52	0.734	0.53	F1,F2,F3&F5	0.785	0.70	0.771	0.72
F2&F6	0.488	0.63	0.451	0.65	F1,F2,F3&F6	0.803	0.60	0.799	0.62
F3&F4	0.685	0.55	0.671	0.57	F2,F3,F4&F5	0.813	0.67	0.805	0.68
F3&F5	0.713	0.59	0.705	0.61	F2,F3,F4&F6	0.736	0.76	0.726	0.77
F3&F6	0.460	0.64	0.440	0.66	F3,F4,F5&F6	0.791	0.71	0.781	0.72
F4&F5	0.646	0.61	0.624	0.63					

备注: 1) SEC =Standard error of calibration 校正组标准差; SEP =Standard error of prediction 验证组标准差;

2) F1: 632 nm; F2: 650 nm; F3: 670 nm; F4: 780 nm; F5: 850 nm; F6: 900 nm

由图 5 可知, 随着波长数的增加, 苹果糖度的预测效果逐步提高。由单波长 (632 nm) 的相关系数 $r=0.622$ 提高到三波长 (632 nm、650 nm 和 780 nm) 的相关系数 $r=0.831$; 校正组标准差由单波长的 $SEC=0.58$ 降低到三波长的 $SEP=0.55$ 。验证组与校正组的预测结果相对变化不大, 表明三波长预测模型能够较好的预测出苹果的糖度。三波长 (632 nm、650 nm 和 780 nm) 组合的苹果糖度预测模型如(5)式。模型的预测结果如表 3 所示。

$$F = f_0 + \begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} & f_{31} \\ f_{12} & f_{22} & f_{32} \\ f_{14} & f_{24} & f_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{34} \end{bmatrix} = 73.81 + \begin{bmatrix} -96.31 & -38.03 & -1.30 \\ 8.55 & 1.94 & 0.41 \\ -21.74 & -5.99 & -1.04 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{34} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

表3 苹果糖度校正组和验证组结果及其多元线性预测模型
Table 3 Calibration and validation results for apple sugar content prediction with three-wavelength model

Sample sets	Sample numbers	Results for calibration and validation set
Calibration set	75	$r=0.831$; $SEC=0.55$
Validation set	25	$r=0.819$; $SEP=0.55$

4 结 论

通过对所采集不同波长(632 nm、650 nm、670 nm、780 nm、850 nm、900 nm)的光谱图像进行光散射的分析,并用洛伦兹函数进行曲线拟合,得到函数的拟合系数。由拟合参量建立了苹果糖度的预测模型。实验表明,对于苹果糖度的预测采用三波长(632 nm、650 nm 和 780 nm)组合的效果最好,其校正组相关系数 $r=0.831$ 及校正标准差 $SEC=0.55$,验证组相关系数 $r=0.819$ 及验证标准差 $SEP=0.55$ 。运用光谱图像技术无损检测苹果糖度等内部品质是一种简单、低廉、快速、高效的方法。为今后对其它水果进行糖度的无损检测奠定了基础。

参 考 文 献

1 V. Andrew McGlone, Paul J. Martinsen, Christopher J. Clark *et al.*. On-line detection of Brownheart in Braeburn apples using near infrared transmission measurements [J]. *Postharvest*

Biology and Technology, 2005, **37**(2): 142~151

2 Zhao Jiewen, Zhang Haidong, Liu Muhua. Preprocessing methods of near-infrared spectra for simplifying prediction model of sugar content of apples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 136~140 (in Chinese)

赵杰文,张海东,刘木华. 简化苹果糖度预测模型的近红外光谱预处理方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 136~140

3 Ann Peirs, Jeroen Tirry, Bert Verlinden *et al.*. Effect of biological variability on the robustness of NIR models for soluble solids content of apples [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, **28**(2): 269~280

4 Manuela Zude, Bernd Herold, Jean-Michel Roger *et al.*. Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life [J]. *J. Food Engineering*, 2006, **77**(2): 254~260

5 Chen Quansheng, Zhao Jiewen, Zhang Haidong *et al.*. Identification of authenticity of tea with near infrared spectroscopy based on support vector machine [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 993~996 (in Chinese)

陈全胜,赵杰文,张海东等. 基于支持向量机的近红外光谱鉴别茶叶的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 993~996

6 Chen Wenliang, Liu Rong, Cui Houxin *et al.*. Application of transcutaneous diffuse reflectance spectroscopy in the measurement of blood glucose concentration [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 411~413

7 Renfu Lu, Yankun Peng. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness [J]. *Biosystems Engineering*, 2006, **93**(2): 161~171

8 Yankun Peng, Renfu Lu. Prediction of apple fruit firmness and soluble solids content using characteristics of multispectral scattering images [J]. *J. Food Engineering*, 2007, **82**(2): 142~152

9 Renfu Lu. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2004, **31**(2): 147~157