

苹果硬度品质的光谱图像检测技术研究

刘木华¹, 赵杰文², 程仁发¹

(1. 江西农业大学工学院, 江西 南昌 330045 2. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 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、650、670、780、850、900nm)的光谱图像, 对所采集的光谱图像灰度分布进行洛伦茨分布(LD)、高斯分布(GD)、指数分布(ED)函数的拟合, 通过比较发现洛伦茨分布为最优灰度分布拟合函数。将苹果硬度与洛伦茨分布函数拟合所得参数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, 相关系数分别是最佳单波长R为0.706; 最佳双波长0.837; 最佳三波长R为0.869; 最佳四波长R为0.880。结果表明: 利用光谱图像技术无损检测苹果硬度等内部品质是可行性的, 为应用计算机图像对水果进行内部品质的无损检测提供了技术依据。

关键词: 光谱图像; 硬度; 苹果; 多元线性回归

Study on Non-destructive Apple Firmness Assay with Spectral Imaging

LIU Mu-hua¹, ZHAO Jie-wen², CHENG Ren-fa¹

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

Abstract: The internal qualities of apple were detected with spectral imaging in this study. The spectral imaging in wavelength of 632, 650, 670, 780, 850 and 900 nm were respectively captured. The functions of 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 related with lorentzian parameters to fruit firmness were developed with best single wavelength, double wavelengths, three wavelengths and four wavelengths respectively. The best model with respect to four wavelengths was able to predict apple firmness with $r=0.880$. Results showed that the multi-spectral scattering imaging provides a nondestructive means for measuring apple firmness, and is a fast and easy method to perform.

Key words spectral imaging; firmness; apple; multi-linear regression

中图分类号: 0434.13 TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2008)03-0418-05

随着人们生活质量的不断提高, 消费者在选购水果时除了注重大小、颜色、外观形状等外部品质之外, 对于内部品质如硬度、糖度、酸度和内部营养物质如维生素含量等指标也极为看重。其中水果的硬度、糖度是直接影响消费者购买需求的重要品质属性。水果内部品质的无损检测尤其是硬度和糖度的检测将为消费者提供直接、快速评定水果口味品质的简便手段。为了满足广大消费者对于选购高品质水果, 真正达到货真价实之目的, 研究开发无损检测水果内部品质的分级技术极具实用价值。目前, 对水果质地品质硬度无损测定的方法主要有近红外光谱分析法^[1-11]。

虽然近红外光谱能较好地表征水果内部品质信息, 但这种信息是一维的。由于水果往往是不规则体, 表

面各部分可能有形状、颜色甚至组织特征的差别。而光纤探头检测的部位又是很小的, 所以光谱表达的信息就显得不全面。计算机图像能表达二维信息, 具有远距离测量的优点。此外, 用计算机图像可同时检测多个水果对象, 检测效率是很高的。当前, 一种能集成光谱检测和图像检测优点的新技术——光谱图像正好能满足农畜产品检测技术发展的需要^[12]。本研究采用光谱图像技术对苹果硬度无损检测进行研究, 并建立有效的预测模型, 从而能够方便、快速和准确的辨别苹果质地, 为实现对水果的光谱图像在线检测与分级打下了基础。

1 材料与方法

收稿日期: 2006-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(30460059)

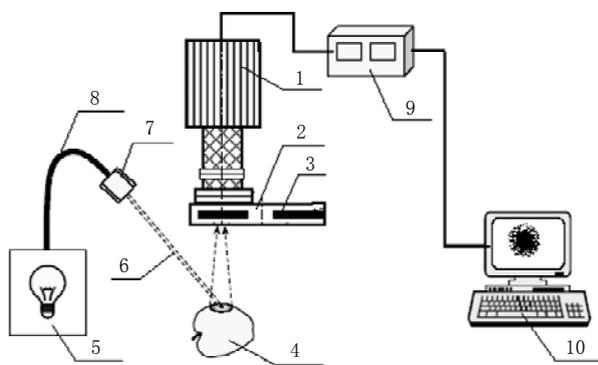
作者简介: 刘木华(1969-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学检测研究。E-mail: suikelmh@sohu.com

1.1 材料

实验用的100个苹果为红富士。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℃和56%~58%相对湿度环境条件下放置24h。

1.2 设备

本研究光谱图像采集系统如图1所示。系统主要有250W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。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。



1. CCD摄像头; 2. 滤波片转轮; 3. 滤波片; 4. 苹果; 5. 光源; 6. 光子; 7. 透镜; 8. 光纤; 9. 控制器; 10. 计算机。

图1 光谱图像采集系统

Fig.1 Spectral imaging system

1.3 苹果硬度的测定

采用GY-1型水果硬度计(杭州托普仪器有限公司)测定苹果的硬度。首先,将测量位置的果皮去除并以2.0mm/s的加载速度插入果肉;穿入果肉9mm过程中所加载的最大力为苹果硬度的参考值。以每个苹果对应的光束入射点作为测量位置测三次取平均值作为该样品的硬度值。总共测量100个苹果并将其分为校正组(75个)和预测组(25个),测得苹果的硬度值统计如表1所示。

表1 苹果质地硬度统计值

Table 1 Statistics of apple firmness

样品	平均值	标准差	最小值	最大值
苹果(n=100)	8.84	1.00	6.60	11.10

2 苹果硬度预测模型的确立

2.1 光谱图像采集与函数拟合

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并操作计算机分别采集632、650、670、780、850、900nm六波段光谱散射图像共计100×6=600张。截取水果物理尺寸为20mm×20mm、以入射光点为中心的区域图

像。苹果各波段的光谱散射图像示例如图1。

在截取的区域图像中,以入射点处半径最外沿像素为中心像素,圆环状取像素点处光强值求平均(图3),则得到图像中半径光散射强度值(平均值)。用半径上光散射强度值来进行曲线拟合。通过采用MATLAB软件编写相应的程序对上述六波段的光谱散射图像分别进行LD、ED和GD函数拟合(图4)。LD、ED和GD函数的表达式分别是

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

$$I_i = a_{1i} + a_{2i} e^{-\frac{|x|}{2a_{3i}}} \tag{2}$$

$$I_i = a_{1i} + a_{2i} e^{-0.5(\frac{x}{2a_{3i}})^2} \tag{3}$$

由图4可知,当距离(X)较小时,三种分布函数(LD、GD和ED)拟合曲线均有急剧下降的特征;随着距

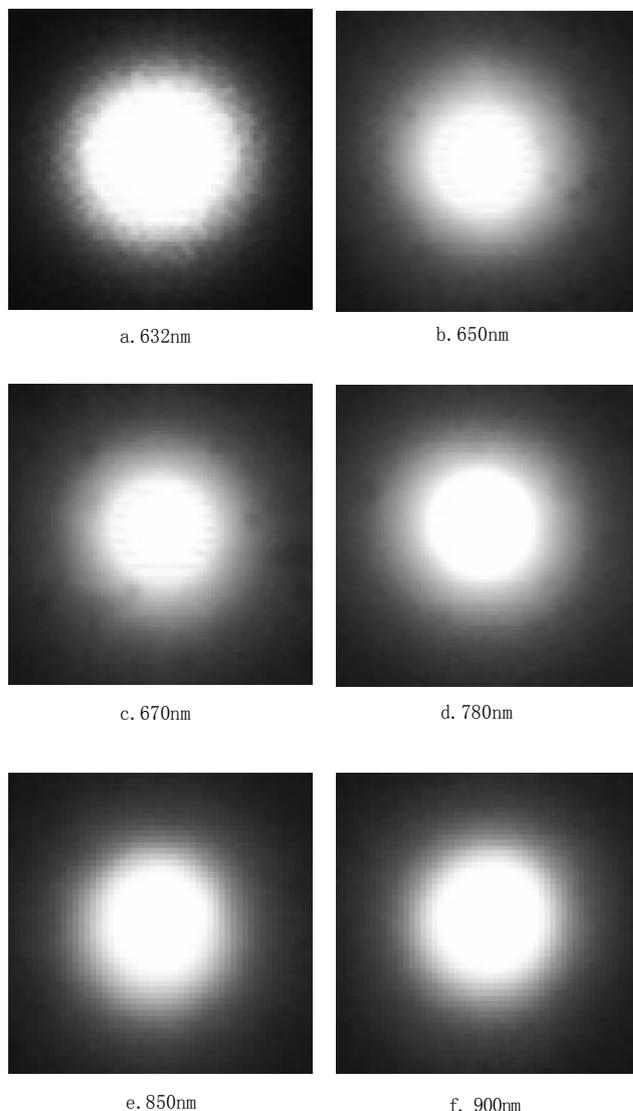


图2 不同波长的苹果散射图像

Fig.2 Spectral images of apple

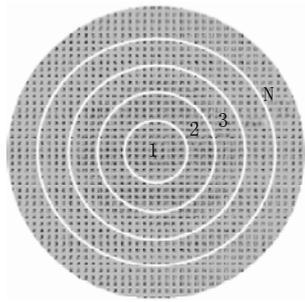


图3 散射图像中像素的定点选取
Fig.3 Quantitative scattering image with pixel

离(X)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;洛伦茨分布能够较好的拟合整个散射光区域。可知波长为632、650、670、850、900nm洛伦茨分布(LD)的曲线拟合结果最好。其不同波长散射图像拟合后具有最高的相关系数(滤光片1、2、3、4、5、6分别为 $R^2=0.9999$ 、 0.9996 、 0.9996 、 0.9997 、 0.9998 、 0.9997)及拟合标准差(滤光片1、2、3、4、5、6分别为 $SE=0.005$ 、 0.008 、 0.008 、 0.006 、 0.005 、 0.007)。同样其它所有样品的散射图像用LD、GD、ED三种函数拟合具有相同的数据拟合结果。

2.2 苹果硬度预测模型

通过对LD、GD、ED三种分布函数拟合结果的比较分析可知,洛伦茨分布(LD)最适合于拟合苹果不同波长光谱散射图的相对光子流分布。因而,将苹果硬度的测量值与LD拟合参数(a_{1i} 、 a_{2i} 、 a_{3i})进行多元线性回归分析。该预测模型可由下式表示:

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

式中, F 表示估计硬度值; N 表示波长个数; $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$; a_{1i} 、 a_{2i} 、 a_{3i} 分别为每个波长对应的洛伦茨函数系数; f_0 、 f_{1i} 、 f_{2i} 、 f_{3i} ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$) 分别为回归系数。

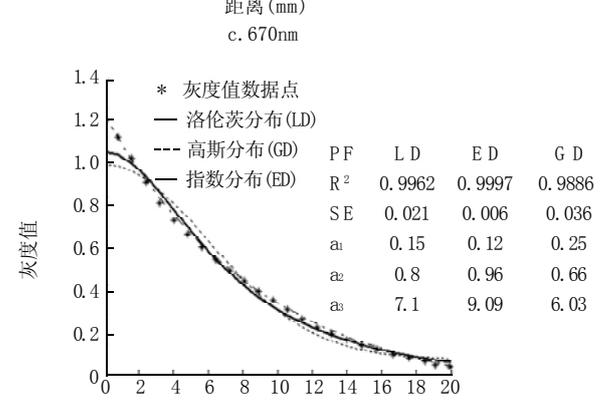
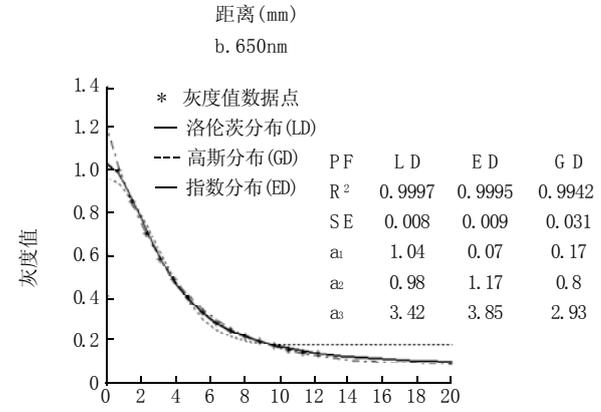
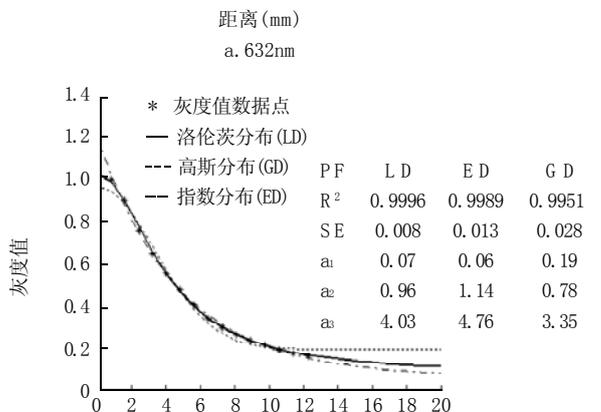
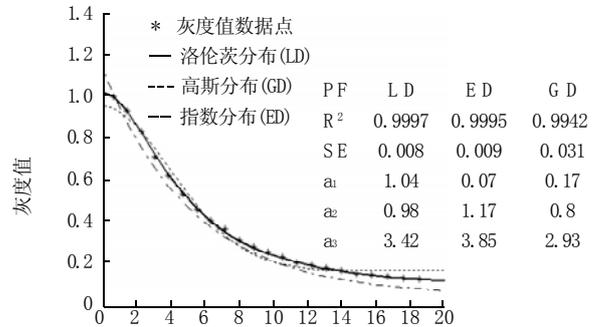
75个苹果用于确立校正模型,25个苹果用于验证预测模型。苹果硬度预测模型的建立过程如下:(1)分别计算出每个水果样品在六种波长滤光片下洛伦茨拟合的参数(a_{1i} 、 a_{2i} 、 a_{3i});(2)通过对校正组拟合参数与苹果糖度值进行多元线性回归;(3)对六个波长进行排列组合,用以确定不同波长对于苹果硬度预测的影响(表2);(4)选择最优波长组合。

从表2多元线性回归分析可知:

(1)用单波长预测苹果硬度,其校正组相关系数 $r=0.423\sim 0.706$,预测误差标准差 $SPE=0.56\sim 0.87$;验证组相关系数 $r=0.419\sim 0.698$,预测误差标准差 $SPE=0.57\sim 0.88$ 。比较六种波长预测结果可知,波长632nm预测效果最好 $r=0.706$ 及 $SPE=0.59$ (图5a),为最佳单波长。

(2)若采用双波长预测苹果硬度,根据其不同的波

长组合校正组相关系数 $r=0.527\sim 0.837$,预测误差标准差 $SPE=0.26\sim 0.69$;验证组相关系数 $r=0.310\sim 0.816$,预测误差标准差 $SPE=0.27\sim 0.70$ 。比较双波长的十五种组合



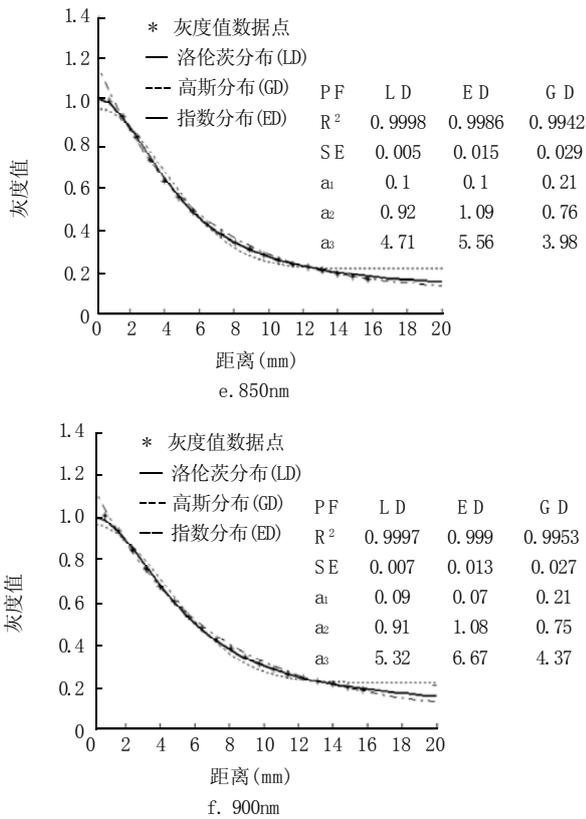


图4 苹果散射图像的洛伦茨分布、高斯分布及指数分布函数拟合曲线
Fig.4 Curve fittings of LD,ED and GD functions for scattering profiles of apple

可知, 波长 650nm 与 900nm 组合极大提高了预测效果: r=0.837 及 SPE=0.46(图 5b), 为最佳双波长组合。

(3) 若采用三波长预测苹果硬度, 其波长组合校正组相关系数 r=0.599~0.869, 预测误差标准差 SPE=0.52~0.75; 验证组相关系数 r=0.584~0.851, 预测误差标准差 SPE=0.53~0.77。比较三波长的十种组合可知, 波长 632、650、850nm 组合的相关系数 r=0.869, SPE=0.52(图 5c), 为最佳三波长组合。

(4) 若采用四波长预测苹果硬度, 其波长组合校正组相关系数 r=0.675~0.880, 预测误差标准差 SPE=0.52~0.70; 验证组相关系数 r=0.668~0.869, 预测误差标准差 SPE=0.53~0.72。比较四波长的六种组合可知, 波长 632、650、670、900nm 组合的相关系数 r=0.880, SPE=0.52(图 5d), 为最佳四波长组合。

由图 5 可知, 随着波长数的增加, 苹果硬度的预测效果逐步提高。由单波长(632nm)的相关系数 r=0.706 提高到四波长(632、650、670、900nm)相关系数 r=0.880, 但预测误差标准差(SPE)稍微有所增大由单波长的 SPE=0.46 增大到四波长的 SPE=0.52。校正组与验证组的预测结果相对变化不大, 同时也表明此预测模型能够较好的预测出苹果的硬度。从而, 可以得到四波长(632、650、670、900nm)组合的苹果硬度预测模型(表 3)。

表 2 苹果硬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 multi-linear regression for predicting apple firmness

波长组合	校正组		验证组	
	r	SPE	r	SPE
F1	0.706	0.59	0.698	0.60
F2	0.686	0.56	0.672	0.57
F3	0.561	0.87	0.549	0.88
F4	0.453	0.61	0.438	0.62
F5	0.463	0.58	0.451	0.59
F6	0.423	0.60	0.419	0.62
F1&F2	0.757	0.26	0.748	0.27
F1&F3	0.749	0.55	0.739	0.57
F1&F4	0.787	0.55	0.761	0.57
F1&F5	0.759	0.59	0.739	0.60
F1&F6	0.819	0.53	0.805	0.51
F2&F3	0.731	0.57	0.721	0.58
F2&F4	0.741	0.57	0.731	0.57
F2&F5	0.821	0.48	0.816	0.50
F2&F6	0.837	0.46	0.837	0.47
F3&F4	0.589	0.64	0.574	0.65
F3&F5	0.527	0.69	0.510	0.70
F3&F6	0.684	0.56	0.649	0.57
F4&F5	0.569	0.64	0.541	0.66
F4&F6	0.542	0.67	0.528	0.68
F5&F6	0.565	0.64	0.546	0.65
F1, F2&F3	0.808	0.57	0.796	0.58
F1, F2&F4	0.805	0.60	0.785	0.61
F1, F2&F5	0.869	0.52	0.851	0.53
F1, F2&F6	0.839	0.55	0.829	0.56
F2, F3&F4	0.788	0.59	0.779	0.6
F2, F3&F5	0.736	0.60	0.721	0.62
F2, F3&F6	0.776	0.60	0.769	0.63
F3, F4&F5	0.621	0.69	0.615	0.71
F3, F4&F6	0.651	0.75	0.642	0.77
F4, F5&F6	0.599	0.66	0.584	0.66
F1, F2, F3&F4	0.879	0.56	0.867	0.57
F1, F2, F3&F5	0.865	0.58	0.853	0.59
F1, F2, F3&F6	0.880	0.52	0.869	0.53
F2, F3, F4&F5	0.806	0.62	0.800	0.63
F2, F3, F4&F6	0.818	0.59	0.809	0.6
F3, F4, F5&F6	0.675	0.70	0.668	0.72

注: 1. 实验样品共计 100 个, 其中校正组 75 个, 验证组 25 个; 2. 预测误差标准差(standard prediction error, SPE); 3. F1: 632nm; F2: 650nm; F3: 670nm; F4: 780nm; F5: 850nm; F6: 900nm。

表 3 苹果硬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 firmness prediction of apple fruit by multi-linear prediction model

模型参数	f ₁			149.75		
	f ₁₁	f ₁₂	f ₁₃			
				-65.51	-43.26	-0.83
				-78.70	-43.26	-1.03
				-11.30	-8.68	-0.06
				-74.46	-30.97	-1.83
校正组结果(n=75)	r=0.88			SPE=0.52		
验证组结果(n=25)	r=0.87			SPE=0.53		

3 结论

本实验通过对所采集得不同波长(632、650、670、780、850、900nm)的光谱图像进行分析, 分别建立了苹果硬度的预测模型。实验结果表明, 对于苹果硬度的预测宜采用最佳四波长(632、650、670、900nm)组

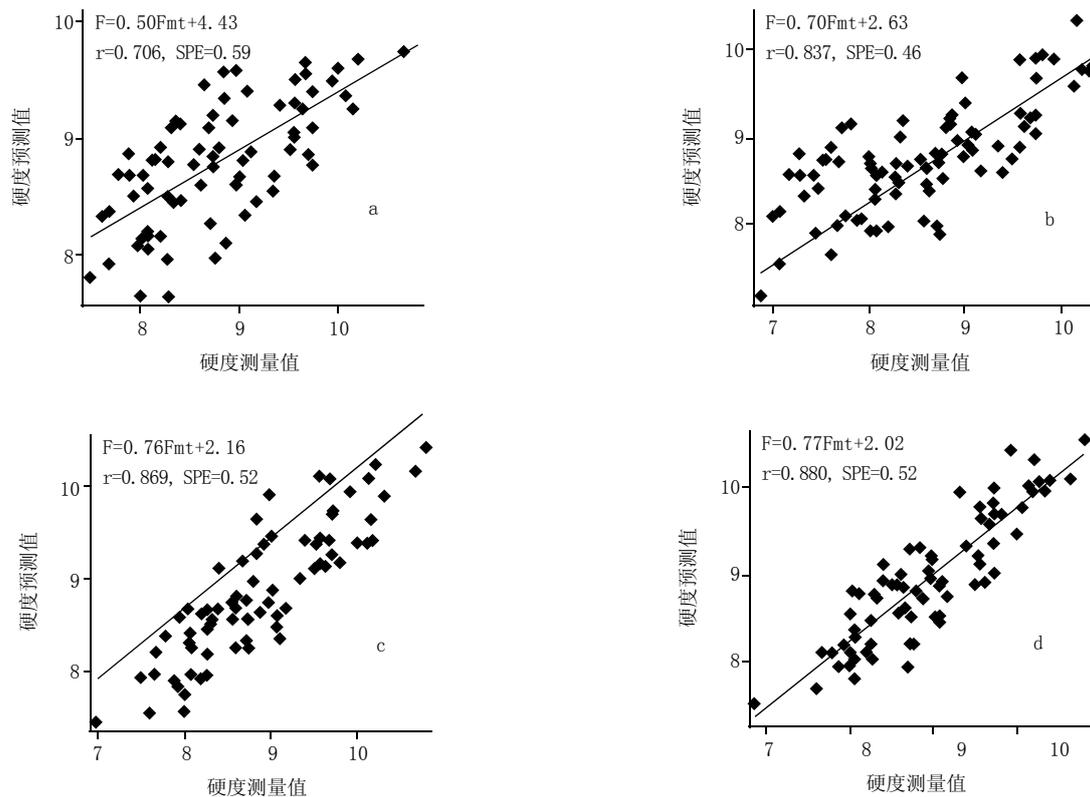


图5 不同波长组合预测苹果硬度的多元线性回归模型

Fig.5 Multi-linear regression model with different wavelength combinations for predicting apple firmness

合, 其预测相关系数 $r=0.880$, 预测误差标准差 $SPE=0.52$ 。研究表明运用光谱图像技术无损检测苹果硬度是可行的, 该方法具有简单、成本低、效果好的特点, 对其它水果的质地检测有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 金同铭, 崔洪昌. 苹果中蔗糖、葡萄糖、果糖、苹果酸的非破坏检测[J]. 华北农学报, 1997, 12(1): 91-96.
- [2] 韩东海. 日本的柑橘分级新技术[J]. 食品工业科技, 1998(6): 21-23.
- [3] 何东健. 水果内部品质在线近红外分光检测装置及试验[J]. 农业工程学报, 2001, 17(1): 146-148.
- [4] LU R F, GUYER D E. Determination of firmness and sugar content of apples using near-infrared diffuse reflectance[J]. Journal Texture Studies, 2000, 31: 615-630.
- [5] CHEN P, NATTUVETY V R. Light transmittance through a region of an intact fruit[J]. Transaction of the ASAE, 1980, 23(2): 519-522.
- [6] SLAUGHTER D. Non-destructive determination of internal quality in peaches and nectarines[J]. Transactions of ASAE, 1995, 38: 617-623.
- [7] CHEN Y R, HRUSCHKA W R, EARLY H. A chicken carcass inspection system using visible/near-infrared reflectance: in plant trials[J]. Journal of Food Process Engineering, 2000, 23(2): 89-99.
- [8] BUDIASTRA I, IKEDA Y, NISHIZU T. Optical methods for quality evaluation of fruits (Part I)—optical properties of selected fruits using the Kubelka-Munk theory and their relationships with fruit maturity and sugar content[J]. Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery, 1998, 60(2): 117-128.
- [9] LAMMERTYN J, ANN P, JOSSE D, et al. Light penetration properties of NIR radiation in fruit with respect to non-destructive quality assessment[J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 18: 121-132.
- [10] FRASER D G, ROBERT B J, RAINER K, et al. Light distribution inside mandarin fruit during internal quality assessment by NIR spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 27: 185-196.
- [11] RINALDO C, COSIMO D, ANTONIO P, et al. Nondestructive quantification of chemical and physical properties of fruits by time-resolved reflectance spectroscopy in the wavelength range 650-1000nm[J]. Applied Optics, 2001, 40(4): 538-543.
- [12] 刘木华, 赵杰文. 农畜产品品质无损检测中高光谱图像技术的应用进展[J]. 农业机械学报, 2005(9): 139-143.