

## 高光谱成像技术的苹果品质无损检测

孙梅<sup>1</sup>, 陈兴海<sup>2</sup>, 张恒<sup>2</sup>, 陈海霞<sup>2</sup>

(1. 北京工商大学 计算机与信息工程学院, 北京 100048;

2. 北京卓立汉光仪器有限公司, 北京 101102)

**摘要:** 高光谱成像技术把二维成像和光谱技术融为一体, 图像技术可全面反映水果的外部品质、表面缺陷及污染等, 光谱技术则可用于水果内部品质的检测, 能对水果的综合品质进行全面、快速的检测。以苹果为研究对象, 得用高光谱成像技术和主成分分析方法分析了苹果的风伤和压伤, 对比分析不同光谱区域主成分分析对识别结果的影响, 优选出识别光谱区域(550~950 nm)。通过主成分分析根据权重系数, 选取了 714 nm 作为苹果风伤研究的最佳特征波长。

**关键词:** 高光谱成像技术; 水果品质; 无损检测

中图分类号: S126 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)04-1272-06

## Nondestructive inspect of apple quality with hyperspectral imaging

Sun Mei<sup>1</sup>, Chen Xinghai<sup>2</sup>, Zhang Heng<sup>2</sup>, Chen Haixia<sup>2</sup>

(1. School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. Zolix Instruments Co., Ltd, Beijing 101102, China)

**Abstract:** Image cubes containing continuous spectral waveband information, in which the image information could be used for external attribute inspection while the spectral information could be applied to the internal attribute inspection, could be obtained from implementing a hyperspectral image technology which combines the advantages of computer vision and spectroscopy. Apples were adopted as the experimental object. A hyperspectral imaging system with the wavelength range of 400–1 000 nm was built for detecting bruises. The hyperspectral imaging system was used as a powerful tool to determine the effective wavelengths that could be used for the detection of bruises on apples. The optimal wavelength region 550–950 nm for bruise detection was selected by the Principal component analysis (PCA), which is a very effective method for data dimension reduction and feature extraction of the hyperspectral data cube. The effective wavelengths 714 nm with weighing coefficients at peaks was determined using the loading coefficients of the PC4 image of PCA on 400–1 000 nm.

**Key words:** hyperspectral imaging; fruit quality; nondestructive detection

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-09-03

基金项目: 北京市自然科学基金(4122020); 北京市组织部优秀人才培养 D 类项目(2013D005003000008)

作者简介: 孙梅(1976-), 女, 博士, 副教授, 主要从事高光谱成像与食品检测等方面的研究。Email: smcxh123@163.com

## 0 引言

国内的苹果产量很大,但其出口比例却只占到生产总量的1.5%左右<sup>[1]</sup>。国内的苹果以本国消费为主,在国际苹果市场上缺乏竞争力,只有部分出口到一些不发达的国家和地区。分析其原因,除了种植品种不合理、农药残留较高外,还有一个重要原因是在苹果采摘后商品化处理落后,外观质量较差,特别是在水果的品质检测和分级上的技术较落后。所以,研究快速、无损的苹果品质及其分级检测技术,为推动国内果蔬产业的健康发展,提高水果交易价格、增加果农的收入,具有十分重要的意义和价值。

无损检测技术(Non Destructive Testing, NDT)又称是非破坏检测,它是在不损坏检测对象的前提下,利用水果的光学、物理和生物等特性实现对内部品质及表面表面缺陷(例如,缺陷的类型、尺寸、形状、数量、位置、性质分布和其变化等)的评价<sup>[2]</sup>。既可以检测果品品质,又不会对水果造成伤害,将无损检测技术应用于水果品质检测是最新发展一种趋势,其价值在于能够保证水果分选质量,指导水果生产,即根据成熟度、糖度、硬度等指标来决定施肥、浇水、采摘时间,减少抽样浪费,增加水果的附加值。

近年来,近红外光谱分析技术得到了广泛的应用。它是一种集成了光谱学、化学计量学和计算机等多学科知识的现代分析技术。这种方法是将一种点光谱打到水果表面,并利用成像系统获取点信息,通过分析点光源小区域处的水果品质而对整个水果的品质进行分析。近红外光的无损检测技术不仅可以检测水果的传统的化学成分,同时也应用在对品种的鉴别、感官品质评价、水果品质检测等其他方面。近红外光谱检测技术具有适应性强、操作简单无污染、非破坏性分析、在线快速分析、成本低和易实现自动化等优点,被普遍用于水果品质的无损检测。与高效液相色谱法(HPLC)、质谱分析法(MS)等传统分析技术相比,近红外光谱技术只能实现小区域的检测,缺少待检测对象的空间信息。但它具有建立模型时需要大量有代表性且化学值已知的样品数据,计算模式建立繁琐、定量分析精度不高等缺点。

高光谱成像系统结合了光谱和图像两种技术,

能够同时得到待检测对象的空间及光谱信息,所以它不仅能够检测出果品信息的相关图像信息还包含有丰富的光谱信息。高光谱图像技术之所以能够检测水果的内外品质信息及食品安全性等综合性品质信息,是因为图像检测技术能够全面的反映肉品的外在特征,而光谱检测技术则能够检测肉品的化学成分和物理结构等信息。所以说,高光谱图像检测技术是一种易于操作、快速而且无损的新型检测技术。而近几年的研究也表明,将高光谱图像检测技术应用于对农产品品质的无损检测研究领域中,对于无损检测技术未来的发展趋势提供了一个非常重要的探索方向。

## 1 实验

高光谱图像技术(Hyper-spectral image)是一种把传统的光谱技术和二维成像技术于一体的新兴的无接触式检测技术,通过对获取待测物的光谱信息和图像信息进行分析提取,实现对水果的快速无损检测。

高光谱图像技术具有高分辨率的特性,其图像数据相邻波段间隔比较窄,波段存在重叠,高光谱图像数据每个像元均可提取一条完整的高分辨率光谱曲线,所以高光谱图像技术已经发展成覆盖了上百条光谱通道、像素点携带波谱信息量丰富的高分辨率检测技术,如图1所示。它的出现解决了传统科学领域“成像无光谱”和“光谱不成像”的历史问题。

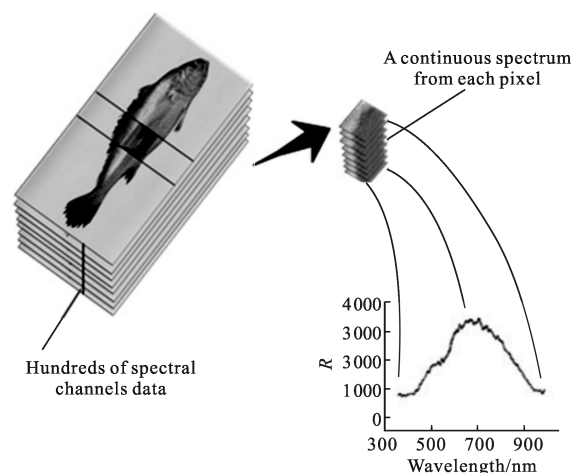


图1 高光谱成像仪的图像结构

Fig.1 Picture structure of hyperspectral imaging system

根据三维数据块的获取方式不同可将高光谱图

像系统分为两种:第一种是基于滤波器(或滤波片)的高光谱图像系统,它通过连续采集一系列波长下的实验样品获取高光谱图像;第二种方法是基于图像光谱仪的高光谱图像系统,它是采用"推扫式"成像的方法来获得高光谱图像数据。高光谱图像检测系统的硬件由装备有图像采集卡的计算机、CCD 摄像头、光谱仪和光源组成。文中采用的是"推扫式"HyperSIS 系列成像的高光谱检测系统,其硬件组成如图 2 所示,主要有光源、光谱相机(即高光谱成像仪),样品移动台等部件组成。

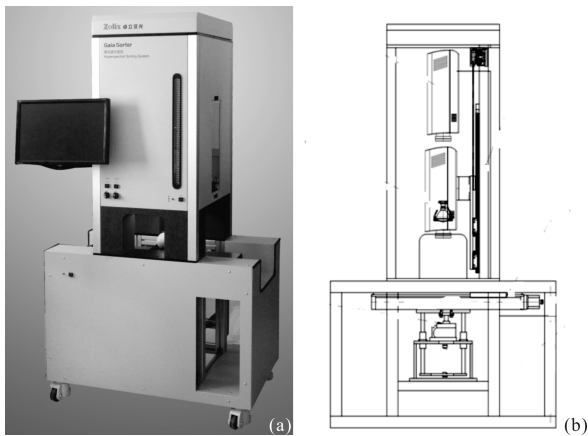


图 2 V10E-PS 高光谱成像系统

Fig.2 V10E-PS hyperspectral imaging system

## 2 结果与讨论

果蔬的无损检测对生产和贸易都具有重要价值。果蔬成熟度是果蔬分级与保鲜的重要评价指标之一。此外,水果在采摘、包装和运输过程等环节中,容易受到外力的作用使其表皮受到机械损伤,特别轻微伤,就是在没有造成外表皮的破损的情况下,和正常组织的颜色几乎没有差别,对比度也不明显,只是伤面有轻微凹陷,色稍变暗,很难用肉眼进行识别。大多数的计算机视觉技术无法对轻微损伤加以检测,这严重影响了对水果进行快速和准确的进行分级,影响了水果交易价格和果家的收入。近几年来,利用高光谱成像技术对水果品质进行无损检测成为研究热点,首先利用高光谱成像系统获得水果的高光谱图像,然后选取合适的特征波长得到水果的各主成份图像,最后借助相应的算法实现对水果的内、外品质无损识别和检测。目前,高光谱成像系

统被广泛应用于农产品品质和食品安全无损检测等方面,特别是对梨、苹果、甜瓜、草莓等一些水果的果蔬品质进行无损检测<sup>[7-15]</sup>。

Polder 等<sup>[9]</sup>利用可见光(波长范围为 396~736 nm)高光谱成像系统对西红柿的成熟度进行判别研究。通过对不同成熟度的西红柿光谱图像进行试验研究,实验结果表明西红柿的红素和叶绿素在其成熟中起到决定性的作用。可见光图像的判别误差为 51%,而高光谱的判别误差为 19%~35%,并且高光谱成像系统不容易受外部光照条件和西红柿几何形状等的影响。

Lu<sup>[10]</sup>利用高光谱成像系统研究了苹果的坚实度。以两类苹果(Red delicious 和 Golden delicious)为研究对象,测量波长范围为 900~1 900 nm。研究结果表明,利用高光谱成像系统可以对苹果表面新旧两种损伤进行检测类型,特别是 1 000~1 340 nm 的光谱范围更适合,检测的准确率随着苹果损伤后存放的天数不同而不同。

洪添胜<sup>[11]</sup>等利用高光谱图像技术对雪花梨中糖和水进行无损检测,提取了雪花梨含糖量与含水率的光谱响应和形态特征参数,获取样品含糖量和含水率的敏感吸收水分吸收光谱带,研究结果表明,利用人工神经网络得到的含糖量预测相关系数  $R$  为 0.996,含水率预测相关系数  $R$  为 0.94。

E M asry 等<sup>[12]</sup>采用波长范围为 400~1 000 nm 的近红外高光谱成像技术检测了草莓内部含水量和可溶性固形物含量,采用偏最小二乘法的  $\beta$  系数对光谱数据进行分析,最佳光谱波段的多元线性回归建立预测模型。在整个光谱范围对总可溶性固形物进行预测的相关系数为 0.80。

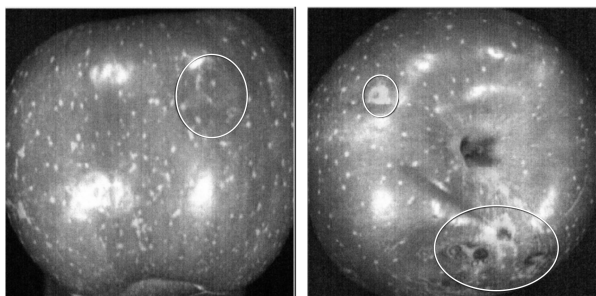
Nagata 等<sup>[13]</sup>应用 650~1 000 nm 高光谱成像系统对草莓可溶性固体含量和硬度进行了预测,提取了 5 个特征波长,分别是: 915 nm, 765 nm, 870 nm, 695 nm 和 860 nm,所得到的可溶性固形物的相关系数为 0.87。

Sivakumarc<sup>[14]</sup>2006 年等采用高光谱成像技术研究了芒果的水分含量,测量光谱范围为 400~1 000 nm,选取芒果的水分含量的三个最优波长(831 nm, 923 nm 和 950 nm),结果表明,使用人工神经网络预测芒果水分的相关系数为 0.81。

郭恩有等<sup>[15]</sup>采用光谱范围为 700~1 000 nm 的高光谱成像检测脐橙的可溶性固形物含量。脐橙糖度的光谱特征波长采用脐橙的反射光谱得到。研究结果表明,利用 BP 人工神经网络系统脐橙糖度预测模型相关系数为 0.831。

果蔬表面污染和损伤(例如动物粪便、轻微磕伤、病伤、虫蛀等)的检测对于生产者和消费者来说一直都是很重视的问题。普通的检测方法要么对果蔬表面有一定的损害,要么仅能够检测到部分表征,无法深入分析和检测。应用高光谱成像的方法既能够实现无损检测,又能够快速准确的获取样本的完整的图像信息和光谱信息。通过图像和光谱分析方法,检测果蔬的物理结构、化学成分和表面特征。

该实验中所用的高光谱系统是北京卓立汉光仪器有限公司 Hypersis 系列高光谱成像检测系统,主要集中研究了苹果在可见光及近红外波段的压伤和风伤两种表面损伤。如图 3 所示,是利用数码相机拍摄的彩色图像,通过数码相机或人眼虽然可以看到虫伤的明显痕迹,但挤压损伤处就是不是很明显了,轻微处用肉眼是无法进行评判的。并且如果在灰度图像中,这样的挤压伤痕是看不到的。



(a) 样品的压伤 (b) 样品的风伤  
(a) Crushed (b) Wind damage apple

图 3 实验样品的实物图

Fig.3 Apple's picture of bruises

文中采用的是“推扫式”HyperSIS 系列成像的高光谱检测系统,该研究中采用的是可见-近红外光谱范围,即 400~1 000 nm。光谱分辨率为 2.8 nm,采样间隔:1.9 nm,测定速度:每个样品小于 1 min。在 400~1 000 nm 的可见光和近红外的光谱范围内,综合曝光时间、扫描速度和光谱校正等信息,采集到包括二维的图像像素信息和第三维的波长信息的“三维”图像块。由高光谱图像原理可知,苹果图像上每

个像素都存在不同波长下的光谱信息。如图 4 所示,给出的是同一苹果不同位置的反射率光谱曲线。从图 4 可以看出,对于苹果的不同位置,例如风伤处、压伤处及果梗处和正常位置处,反射率的光谱曲线有明显的差异。在波长 550 nm 以下时,各测量区域的光谱曲线区别不大,而在 550~950 nm 的波长范围内,果梗处及风伤的反射率明显降低,而压伤处的反射率却高于正常区域,比如在 800 nm 波长处,压伤果的反射率为 78%,而正常果的反射率为 60%。所以在后续的损伤检测中,波长的选择区域可以选择在 550~950 nm 之间。

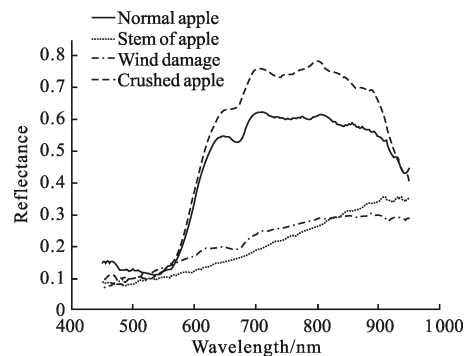


图 4 同一苹果的不同位置的反射率光谱曲线

Fig.4 Reflectance spectra of different regions on apple

巨大的数据量、不同波段间的相关性和冗余信息、信号噪声等都对数据的处理和分析有着很大的影响。因此必须对数据进行降维和去噪处理。主要处理过程包括 Resize(重置图像大小和波段范围)、ROI(感兴趣区)、Mask(阈值)、Filter(中值滤波)、PCA(主成分分析)/MNF(最小噪声分离)、特征波段提取等。主成分分析方法采用多变量线性变换对高光谱数据进行特征提取,分析得到的各个主成分向量之间互相独立,既可以实现降维,又能消除原始数据中的冗余信息,是一种应用最广的数据降维方法。该研究利用 PCA 对 550~950 nm 的光谱区域的苹果高光谱图像数据进行降维,获得 PC 图像,通过对 PC 图像进行分析,确定可用于分割损伤和正常区域的有效光谱区域。图 5 所示为苹果的各主成分分析图,其中,图 5(a)~(c)分别对风伤和虫伤的第 3、4、7 主成分分析,而图(d)是对压伤区域的第 4 主成分分析,从图中可以明显看到第 3 主成分 PC3 和第 4 主成分 PC4 都可以看出苹果的虫伤和压伤。

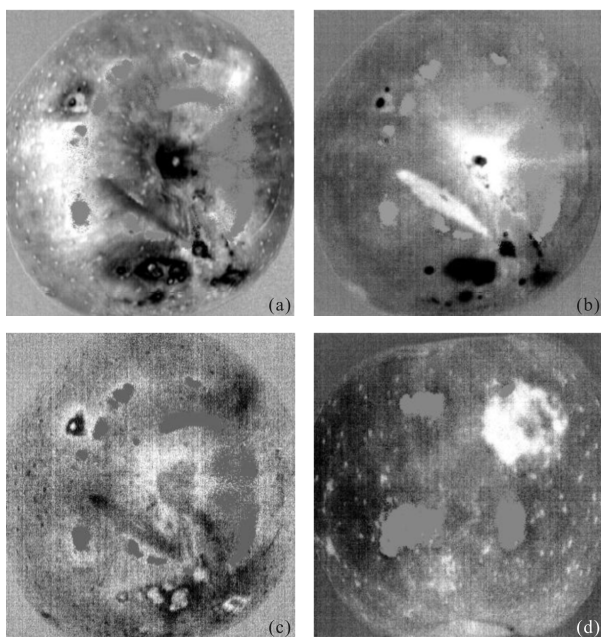


图 5 主成分分析图像

Fig.5 Images with principle component analysis

由于主成分图像都是由原始数据中的各个波段下的图像经过线性组合而成:

$$PC_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i I_i$$

式中:  $PC_m$  为第  $m$  个主成分;  $\alpha_i$  为该主成分的权重系数;  $I_i$  为单个波段的原始图像。比较该线性组合的权重系数  $\alpha_i$ , 如果权重系数绝对值越大, 对主成分图像贡献就越大。最大权重系数所对应的波长下的图像为最佳特征波长图像。为了选取最佳的波长组合, 必须保证它们的权重系数绝对值尽可能大, 同时还要保证它们之间有一定的波长间隔。如图 6 所示是根

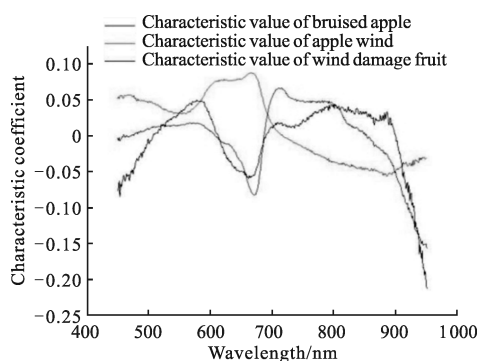


图 6 权重系数曲线

Fig.6 Spectra of weighing coefficients

据各主成分图像的特征向量绘制的图像光谱曲线权

重系数图, 对于风伤, 分别选取 714 nm 和 785 nm 两个权重系数较大的波长作为最佳特征波长, 如图 7 所示。图 7(a) 是波长为 714 nm 单波段高光谱图像, 而图 7(b) 785 nm 单波段高光谱图像。从两图的对比中, 可以明显发现, 权重系数较大的 714 nm 的高光谱图像要比权重系数较小的 785 nm 的要清楚和明显。同样的方法, 可得到 580 nm 作为苹果压伤研究的最佳特征波长。

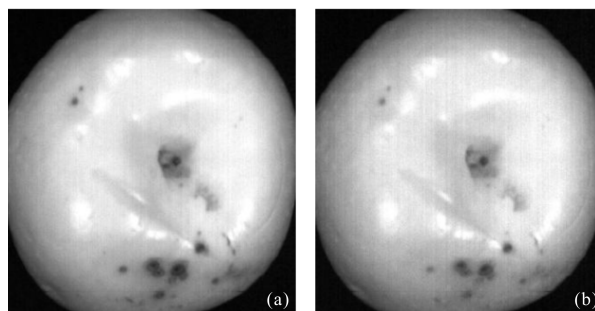


图 7 有效波长图像

Fig.7 Effective wavelength

在实验中, 笔者对 100 个苹果样本进行风伤和压伤检测, 检测结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 所有的正常苹果没有被误检测为风伤苹果, 检测精度为 100%, 而 50 个有风伤的苹果样本中, 有 49 个被正确检测出来, 检测正确率为 98%。将风伤苹果误分为正常苹果的原因比较复杂, 主要是有些风伤区域正好处于光斑所形成的高亮区, 风伤信息被掩盖造成了误判断。

表 1 苹果风伤的检测结果

Tab.1 Results of subtle bruises on apple

Kind	Number	Results		Precision/%
		Normal	Damaged	
Normal	50	50	0	100
Damaged	50	1	49	98

### 3 结论

高光谱图像检测技术结合了光谱学和成像学的优势, 应用高光谱图像检测技术研究水果品质的检

测问题是近年来才兴起的。通过对苹果表皮的检测试验,初步研究表明高光谱图像技术能对水果品质进行可视化分析,高光谱图像用于水果品质检测具有较好的效果,且具有可研究性和可行性。

笔者利用高光谱技术研究了苹果在在400~1 000 nm的可见光和近红外的光谱范围内的压伤和风伤,首先利用反射光谱曲线,确定波长的最佳选择区域为550~950 nm,然后用主成分分析的方法对高光谱的数据进行降维和去噪,发现第3主成分分析和第4主成分分析可以很明显观察到苹果的压伤和风伤,最后通过权重系数曲线,选取了权重系数较大的714 nm和785 nm两个波段作为最佳特征波长进一步分析,发现714 nm波长的高光谱图像更容易分辨风伤,其他有关水果的成熟度、水果表面农药残留等进一步的水果品质研究还在进行中。

#### 参考文献:

- [1] The Ministry of Agriculture. The international apple trade situation and China apple export situation of [J]. *Chinese Fruit Industry Information*, 2006(4): 6-8. (in Chinese)  
农业部. 国际苹果贸易概况与我国苹果出口情况[J]. 中国果业信息, 2006(4): 6-8.
- [2] Mo Runyang. Nondestructive testing technology in fruit quality evaluation in the application of [J]. *In Physics and Technology*, 2004, 33 (11): 848-851. (in Chinese)  
莫润阳. 无损检测技术在水果品质评价中的应用[J]. 物理学和高新技术, 2004, 33 (11): 848-851.
- [3] Zhang Xiang, Zhang Jianqi, Qin Hanlin, et al. Anomaly detection for hyperspectral image based on multiresolution decomposition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 570-575. (in Chinese)  
张翔, 张建奇, 秦翰林, 等. 用多分辨率分解的高光谱图像异常检测[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 570-575.
- [4] Liu Y, Chen Y R, Wang C Y, et al. Development of hyperspectral imaging technique for the detection of chilling injury on cucumbers spectral and image analysis [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2006, 22(1): 101-111.
- [5] Xu Hong, Wang Xingjun. Applications of multi spectral hyperspectral imaging technologies in military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 13-17. (in Chinese)  
许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 13-17.
- [6] Wang Jingli. Mamimum band screening and its application to hyperspectral target dection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1514-1518. (in Chinese)  
王静荔. 波段最大筛选法及其在高光谱目标探测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1514-1518.
- [7] Liu Y, Ying Y. Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of internal quality of 'Fuji' apples [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 37: 65-71.
- [8] He Yuanlei, Liu Daizhi, Wang Jingli, et al. Independent component analysis-based band selection for hyperspectral imagery [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 818-824. (in Chinese)  
何元磊, 刘代志, 王静荔, 等. 利用独立成分分析的高光谱图像波段选择方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 818-824.
- [9] Polder G, Van der Heijden G W A M, Young I T. Spectral image analys is for measuring ripeness of tomatoes [J]. *American Society of Agricultural Engineers*, 2002, 45 (4): 1155-1161.
- [10] Lu R. Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging [J]. *Transactions of ASAE*, 2003, 46 (2): 523-530.
- [11] 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. (in Chinese)  
洪添胜, 乔军, 王宁, 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.
- [12] Masry E G. Hyperspectral imaging for nondestructive deterruination of some quality at tributes for straw berry [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81: 98-107.
- [13] NagataM, Tallada J G, Kobayashi T, et al. Predictingm aturity quality parameters of strawberries using hyperspectral imaging [C]//American Society of Agricultural Engineers Annual Meeting, 2004: 043033.
- [14] Sivakumar S S, Qiao J, Garipey Y, et al. Detectingm aturity parameters of mango using hyperspectral imag ing techology [C]//American Society of Agricultural Engineers Annual Meeting, 2006: 066183.
- [15] Guo Enyou, Liu Muhua, Zhao Jienwen, et al. Nondestructive detection of sugar content on Navel orange with hyperspectral imaging[J]. *Transactions of the CSAM*, 2008, 39(5): 91-93, 103. (in Chinese)  
郭恩有, 刘木华, 赵杰文, 等. 脐橙糖度的高光谱图像无损检测技术[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 91-93, 103.