第 28 卷 第 12 期
2008 年 12 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 28, No. 12
December, 2008

文章编号：0253-2239(2008)12-2277-04

基于高光谱图像技术的水果表面农药残留检测试验研究

薛 龙[1,2] 黎 静[2] 刘木华[2]

([1] 华东交通大学机电工程学院，江西 南昌 330013；[2] 江西农业大学工学院，江西 南昌 330045)

摘要 以脐橙为研究对象，初步探讨了应用高光谱图像技术检测水果表面农药残留的方法。用蒸馏水把农药分别配置成 1∶20，1∶100 和 1∶1000 倍的溶液。然后把同种不同浓度的溶液滴到 10 个洗净的脐橙表面，溶液量约为 120 μL，200 μL 和 400 μL，脐橙表面形成一个 3×3 的矩阵形状。将水果放置到通风阴凉处放 168 h 后，拍摄图像。采集脐橙在 625～725 nm 范围的高光谱图像，应用主成分分析方法(PCA)获得特征波长的图像，应用第三主成分图像(PC-3)并经过适当的图像处理方法对脐橙表面的农药残留进行检测。检测结果表明，高光谱技术对检测较高浓度农药残留非常明显。

关键词 医用光学与生物技术；高光谱图像；无损检测；主成分分析；农药残留

中图分类号 TS201.6 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082812.2277

Detecting Pesticide Residue on Navel Orange Surface by Using Hyperspectral Imaging

Xue Long[1] Li Jing[2] Liu Muhua[2]

([1] *School of Mechanical and Electronical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi* 330013, *China*
[2] *Engineering College, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi* 330045, *China*)

Abstract The Detection of fruit contaminate with pesticide residue is a public health concern. The pesticide was diluted to 1∶20, 1∶100 and 1∶1000 solution with distilled water. A 3×3 matrix of dilutions was applied to 10 cleaned sample with 120 μL, 200 μL and 400 μL. After 168h, hyperspectral images in the wavelength range from 625 nm to 725 nm are taken. The characteristic wavelength images are achieved by principal component analysis (PCA). Combining the 3rd principal component (PC) image with proper image processing methods detects the pesticide residue on navel orange. This research shows that the technology of hyperspectral imaging can be used to effectively detect pesticide residue on fruit surface.

Key words medical optics and biotechnology; hyperspectral imaging; non-destructive; principal component analysis; pesticide residue

1 引 言

随着人们生活水平的提高，健康环保意识的增强，消费者越来越关注果蔬的质量安全问题，其中果蔬表面的农药残留问题尤其备受关注。果蔬表面的农药残留不仅会危害消费者的健康，而且还会影响果蔬的出口贸易。虽然对农药检测已经有了许多成熟可行的方法，但现行方法大都费时、速度慢，而且是破坏性的检测。无损检测具有快速、简便、在线检测等特点，所以研究农药残留无损检测的方法是非常有实用价值的[1,2]。王玉田等[3]运用荧光光谱检测出水果表面残留的农药。胡淑芬等[4]运用激光技术对水果表面农药残留进行了试验研究。肖怡琳等[5]采用激光拉曼光谱检测技术和激光诱导荧光技术对多种农药进行了检测。周小芳等[6]应用不同波长激光光源研究水果表面农药残留的拉曼检测。Moon S. Kim 等[7]应用荧光光谱图像检测苹果表面的污染物。Alan M. Lefcourt 等[8~10]应用激光诱导荧光多光谱图像技术检测出水果表面的各种粪便污染物。

收稿日期： 2008-07-20；**收到修改稿日期：** 2008-09-26

基金项目： 国家自然科学基金(30760101)资助项目。

作者简介： 薛 龙(1977—)，男，硕士，讲师，主要从事机械工程方面的研究。E-mail：ultimata@163.com

导师简介： 刘木华(1969—)，男，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(通信联系人)

高光谱图像技术结合了光谱分析和图像处理的技术优势，对研究对象的内外部品质特征进行检测分析，赵杰文等[11]利用高光谱图像技术检测水果轻微损伤，准确率为 88.57%，Jasper G. Tallada 等[12~14]分别应用高光谱图像技术对不同成熟度的草莓表面损伤、苹果的表面缺陷及芒果的成熟度检测进行了试验研究。I. Kim 等[15]应用高光谱设备采集荧光图像检测鸡肉品质，准确率达到 76%。本文采用高光谱图像技术检测水果表面农药残留，并通过数字图像数据处理方法寻求能准确辨别水果表面农药残留的最佳波长图像，为实现对水果的无损快速在线检测技术提供依据。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

以江西赣南脐橙为研究对象。所用的农药是杜邦万灵(LANNATE L)牌，有效成分是 24%灭多威(Methomyl)可溶性液剂，属于氨基甲酸酯类杀虫剂。

用蒸馏水把农药分别配置成 1∶20，1∶100 和 1∶1000倍的溶液。然后用滴管，把同种不同浓度的溶液滴到洗净的脐橙表面，在脐橙表面形成一个 3×3的矩阵形状(图 1)。图中从左到右农药溶液量约为 120 μL，200 μL 和 400 μL，共 10 个脐橙。将水果放置到通风阴凉处放 168 h 后，拍摄图像。

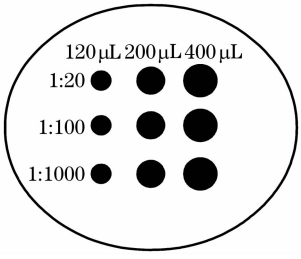

图 1 农药样品在水果表面的布置

Fig. 1 Schematic illustration of sample treatments

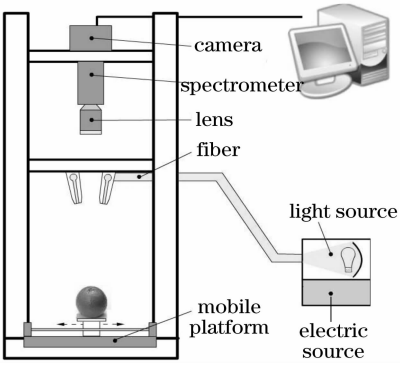

图 2 高光谱图像采集系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hyperspectral imaging system

2.2 试验装置

试验的高光谱图像数据是基于光谱仪的高光谱图像系统采集得到的。图 2 为高光谱图像采集系统示意图，由 1 台 CMOS 照相机(Photonfocus，瑞士)，1 台行扫描光谱摄制仪(ImSpector V10E)，250 W 的光纤卤素灯(ALPHA-1501，21 V/250 W Halogen Tugsten Lamp)和一套输送装置等部件组成。光谱范围 425～725 nm，光谱分辨率为 3 nm。

2.3 数据采集与预处理

成像光谱仪是将影像传感器的空间表述同光谱仪的分析能力结合在一起。它们有几百个狭窄波谱通道，因此成像光谱仪为影像中的每一个像元提供完整的波谱曲线。图 3 为典型高光谱图像，其中 x，y 代表某一波长下的像元坐标信息，第三维是 λ 代表波长信息，因此高光谱图像也称之为高光谱立方或高光谱数据立方。

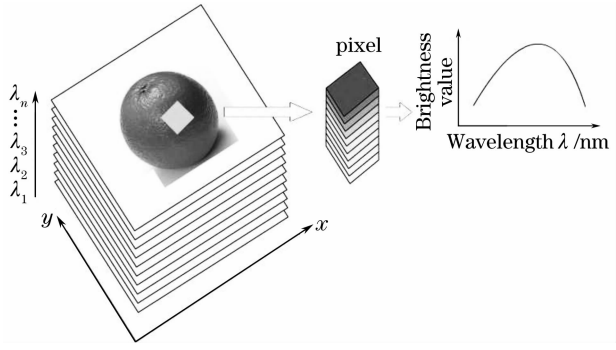

图 3 高光谱图像示意图

Fig. 3 Hyperspectral imaging cube

高光谱图像数据的采集使用 Spectral Cube (Spectral Imaging Ltd.，Finland)软件平台，预先确定好相机的曝光时间与平台移动速度，以确保图像清晰，最终获得 300×400×350 的高光谱图像；数据的处理采用 ENVI V4.3 (Research System，Inc.，USA)和 MATLAB (Mathworks，Matlab 7.1，Inc.，USA)。

由于摄像头中暗电流的存在以及水果表面形状的不同，光强分布较弱波段下的图像噪声的影响较大，因此必须对图像进行预处理，以消除部分噪声的影响。在与采集样品相同的条件下，盖上镜头盖进行样品的采集，得到一个全黑的图像 B。然后对采集样品图像 A 进行预处理得到图像 I

$$I = A - B. \tag{1}$$

3 结果与讨论

在稀释浓度分别为 1∶20，1∶100，1∶1000 倍溶液和没有涂抹农药的表面的高光谱图像中，取矩形的

感兴趣区域(ROI)，然后计算这些像素在每一个波长下 ROI 的平均值，光谱曲线如图 4 所示。可以看出，在 425～575 nm 范围内，稀释倍数分别为1∶100，1∶1000 的溶液和没有涂抹农药的表面的光谱曲线几乎重合，在后续数据处理时不采用这段范围。在 625～725 nm范围内，上述四条光谱曲线差别明显，因此实验所选定的波长范围是625～725 nm。还可看出，在 425～575 nm 波段范围内，涂有 1∶20 农药的光谱曲线明显高于其他光谱曲线，因此该波段范围可以较容易地检测出高浓度氨基类农药的残留。

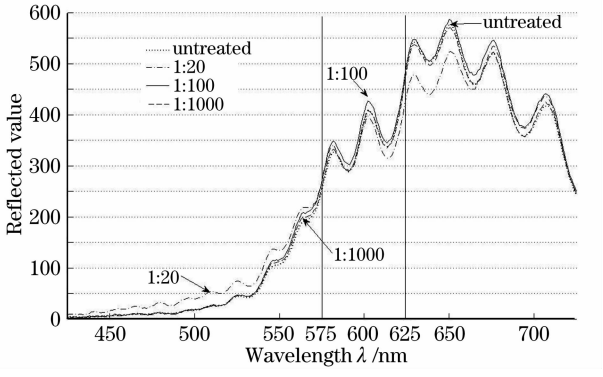

图 4　脐橙表面涂有氨基类农药和正常表面的光谱曲线

Fig. 4　Representative spectra obtained from the region of interests (ROI)

主成分分析(PCA)，即通常所称的 K-L 变换，在图像压缩、随机噪声信号的去除和减少数据集的维数等方面有广泛的应用。由于多波段数据经常是高度相关的，主成分变换寻找一个原点在数据均值的新的坐标系统，通过坐标轴的旋转使数据的方差达到最大，从而生成互补相关的输出波段。

主成分(PC)波段是原始波段的线性合成，它们之间互不相关。第一主成分包含最大的数据方差百分比，第二主成分包含第二大的方差，以此类推，最后的主成分波段由于包含很小的方差，因此显示为噪声。通过主成分分析，可以根据方差贡献的大小来选择主成分图像，从中选择出最能检测出脐橙表面农药残留的主成分图像。图 5 为滴有氨基类农药的脐橙高光谱图像的 PC-1 到 PC-4 主成分图像。

主成分分析的前 4 个主成分保留了原始变量 99.18%的指标，PC-2，PC-3 和 PC-4 可以明显地看出涂有农药的残留点。PC-2 和 PC-3 图像中涂有农药的区域相对于脐橙的正常表面的颜色为黑点。因此，可以把脐橙表面分为两类：一是涂有农药的区域，另一是脐橙正常表面。

经过主成分分析后得到的图像首先通过 3×3

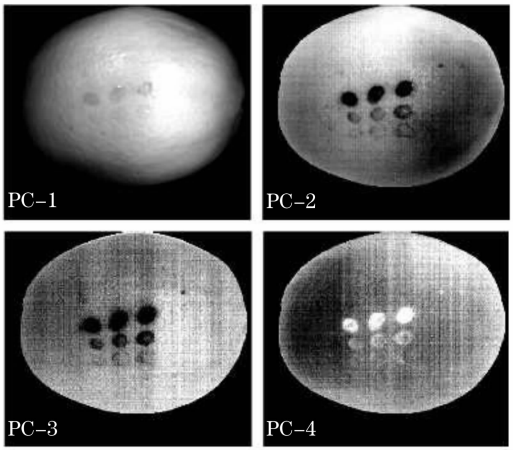

图 5　涂有氨基类农药的脐橙主成分分析的前 4 个主成分图像

Fig. 5　Principal component (PC) images from the 1st to 4th of the navel oranges obtained by principal component analysis (PCA)

中值滤波，然后通过合适的阈值分割 PC-2 和 PC-3 图像得到二值图像，最后完成水果表面农药残留的特征提取。分割后 PC-2 和 PC-3 主成分图像的二值图如图 6 所示，图中箭头代表检测的误检点。虽然该二值图像没有明显地检测出全部1∶1000农药所在的位置，但是 PC-3 的二值图像对 1∶20 和 1∶100 农药所在的位置的检测非常明显，误检点也比 PC-2 少很多。

表 1 是应用 PC－3 图像的检测结果，可见对高浓度氨基甲酸酯类农药溶液的检测准确率很高。

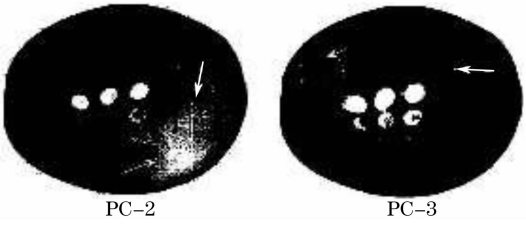

图 6　分割后的二值图像

Fig. 6　Binary images for detection spots

表 1　应用 PC-3 图像检测结果

Table 1　Results of detecting spots on navel oranges

Solution	Detected ratio
1∶20	100%
1∶100	100%
1∶1000	13%

每一个单独的 PCA 图像都是由一些显著波长线性组合而成的。图 7 是根据 PC-2 和 PC-3 图像的特征向量绘制的图像光谱曲线权重系数图，图中每一处波峰和波谷都代表了一个显著波长，644 nm 与 714 nm是 PC-2 的特征波长，631 nm，644 nm，655 nm，

676 nm,698 nm 和 715 nm 是 PC-3 的特征波长。

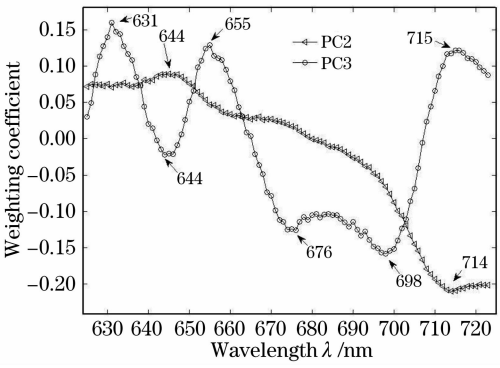

图 7 PC-2 和 PC-3 图像光谱曲线权重系数

Fig. 7 Spectral weighting coefficients for PC-2 and PC-3

图 8 分别给出了这几个特征波长下脐橙的灰度图像,可以看出图中除 676 nm 波长下的图像外,其余图像都较明显地检测到涂有 1∶20 和 1∶100 倍溶液农药的污染点。在实际应用中,通过确定几个特征波长,根据这些波长图像和权重系数分别生成与 PC-2 和 PC-3 图像相似的图像,就可以采用一个多光谱图像采集系统来实现水果表面农药残留的快速在线无损检测。

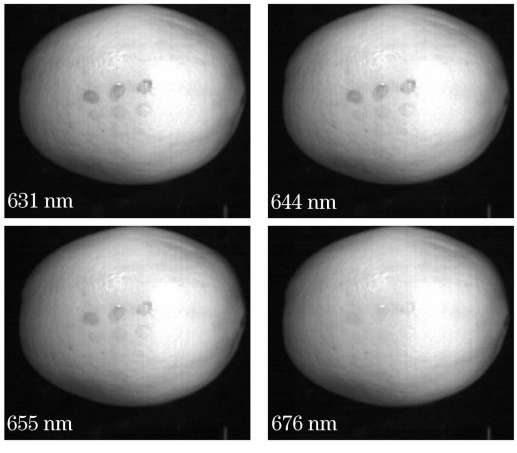

图 8 不同波长下的灰度图像

Fig. 8 Spectral images at different wavelengths

4 结 论

应用高光谱图像技术对水果表面农药残留的检测进行了初步研究。应用主成分分析方法对所获得的高光谱图像进行分析,并找出特征波长下的图像。应用这些特征图像,经过图像处理技术,可以检测出水果表面农药残留,特别对较高浓度农药残留的检测。但对低浓度农药检测还没有精确的辨认。实验结果表明,基于高光谱图像检测技术可以检测出水果表面的农药残留,特别是在选定某些特征波长后,可以实现水果表面农药残留的在线快速检测,适应于水果农药残留无损检测的未来发展方向。

参 考 文 献

1 Li Jing, Xue Long, Liu Muhua *et al*.. A study on navel orange grading system based on computer vision [J]. *J. Jiangxi Agricultural University*, 2006, **28**(2): 304～307
黎 静,薛 龙,刘木华 等. 基于计算机视觉的脐橙分级系统研究[J]. 江西农业大学学报, 2006, **28**(2): 304～307

2 Zhang Chenghui, Liu Chunqing, Liu Muhua *et al*.. A study on inspecting internal quality of rambuta using X-ray CT imaging[J]. *J. Jiangxi Agricultural University*, 2005, **27**(6): 939～942
章程辉,刘纯青,刘木华. 应用 X 射线 CT 图像技术检测红毛丹内部品质的试验研究[J]. 江西农业大学学报, 2005, **27**(6): 939～942

3 Wang Yutian, Li Changwu, Li Yanchun *et al*.. Fluorescence spectral recognition of pesticides based on wavelet neural network[J]. *Chin. J. Sensors and Actuators*, 2004, **19**(4): 1223～1225
王玉田, 李艳春, 林洪彬 等. 小波神经网络在农药荧光光谱识别中的应用[J]. 传感技术学报, 2004, **19**(4): 1223～1225

4 Hu Shufen, Liu Muhua, Lin Huaiwei. A study on detecting pesticide residuals on fruit surface by using laser imaging[J]. *J. Jiangxi Agricultural University*, 2006, **28**(6): 872～876
胡淑芬,刘木华,林怀蔚. 基于激光图像的水果表面农药残留检测试验研究[J]. 江西农业大学学报, 2006, **28**(6): 872～876

5 Xiao Yilin, Zhang Pengxiang, Qian Xiaofan. Micro-Raman and fluorescence spectra of several agrochemicals[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, **24**(5): 579～581
肖怡琳,张鹏翔,钱晓凡. 几种农药的显微拉曼光谱和荧光光谱[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, **24**(5): 579～581

6 Zhou Xiaofang, Fang Yan, Zhang Pengxiang. Raman spectra of pesticides on the surface of fruits[J]. *Chin. J. Light Scattering*, 2004, **16**(1): 11～14
周小芳,方 炎,张鹏翔. 水果表面残留农药拉曼光谱研究[J]. 光散射学报, 2004, **16**(1): 11～14

7 Kim Moon S, Alan M. Lefcourt, Chen Yud-Ren. Ns-scale time-resolved laser induced fluorescence imaging fordetection of fecal contamination on apples[C]. *SPIE*, 2004, **5587**: 190～197

8 Alan M. Lefcourt, Kim Moon S, Chen Yud-Ren. Automated detection of fecal contamination of apples bymulti-spectral laser-induced fluorescence imaging [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**: 3935～3943

9 Moon S. Kim, Alan M. Lefcourt, Yud-Red Chen. Automated detection of fecal contamination of apples based on multispectral fluorescence image fusion[J]. *J. Food Engineering*, 2005, **71**: 85～91

10 Angela M. Vargas, Moon S. Kim. Detection of fecal contamination on cantaloupes using hyperspectral fluorescence imagery[J]. *J. Food Science*, 2004, **70**(8): 471～476

11 Zhao Jiewen, Liu Jianhua, Chen Quansheng *et al*.. Detecting subtle bruises on fruits with hyperspectral imaging [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, **31**(1): 106～109
赵杰文, 刘建华,陈全胜 等. 利用高光谱图像技术检测水果轻微损伤[J]. 农业机械学报, 2008, **31**(1): 106～109

12 Jasper G. Tallada, Masateru Nagata, Taiichi Kobayashi. Detection of bruises in strawberies by hyperspectral imaging. ASABE Paper No. 063014. St. Joseph, Mich.: ASABE, 2006

13 Kang-Jin Lee, Sukwon Kang, Moon S. Kim. Hyperspectral imaging for detecting defect on apples. ASABE Paper No. 053075. St. Joseph, Mich.: ASABE, 2005

14 Federico Hahn. Hyperspectral Mango Ripeness Detection. Paper No. 023140. ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA

15 I. Kim, M. S. Kim, Y. R. Chen *et al*.. Detection of skin tumors on chicken carcasses using hyperspectral fluorescence imaging[J]. *Transactions of the ASAE*, **47**(5): 1785～1792