

高光谱成像技术无损检测赣南脐橙表面农药残留研究

李增芳¹, 楚秉泉², 章海亮^{2,3}, 何勇^{2*}, 刘雪梅³, 罗微³

1. 浙江水利水电学院, 浙江 杭州 310018

2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058

3. 华东交通大学, 江西 南昌 330013

摘要 高光谱成像技术具备图像和光谱的双重优势, 作为一种快速无损检测分析技术, 检测过程无损、无污染和无接触。高光谱成像数据包括样本的图像信息和光谱信息, 采集样本高光谱成像数据时, 样本的每个像素点都有一条光谱与之对应, 样本的每个波长都有一幅灰度图像与之对应。研究采用高光谱成像技术无损检测不同稀释浓度的农药在赣南脐橙样品表面残留随时间变化的关系。用蒸馏水把农药分别配置成 1:20, 1:100 和 1:1000 倍的溶液。然后把不同浓度的溶液滴到 30 个洗净的脐橙表面, 将涂有农药的脐橙分别放置 0, 4 和 20 d, 然后采集在 900~1700 nm 波长范围的高光谱成像原始数据。通过主成分分析获取 930, 980, 1100, 1210, 1300, 1400, 1620 和 1680 nm 共 8 个特征波长, 基于这些特征波长做第二次主成分分析, 应用 PC-2 图像并经过适当的图像处理方法对不同浓度及放置不同天数的农药残留进行无损检测。采用高光谱成像技术检测三个时间段较高稀释浓度的果面农药残留都比较明显。高光谱成像技术作为一种检测方法, 可用于评价各个时间段较高浓度的农药残留。

关键词 高光谱成像; 赣南脐橙; 农药; 残留

中图分类号: TP391 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)12-4034-05

引言

果蔬表面的农药残留检测已经有了许多成熟可行的方法, 但大都费时、速度慢, 而且是破坏性的检测。高光谱成像分析技术不同于光谱分析技术, 可以同时处理样品的图像信息和光谱信息, 采集样品高光谱成像数据时, 样品的每个波段都有一幅灰度图像与之对应, 样品的每个像素点都有一条光谱与之对应。高光谱成像技术具备图像和光谱的双重优势, 作为一种无损检测分析技术, 检测过程无损、无污染、样品无需预处理, 在现代农业检测分析中得到了大量应用^[1-4]。

孙俊等基于高光谱图像的桑叶农药残留鉴别进行了研究^[5], Elmasry 等采用高光谱成像技术检测牛肉 pH 值、颜色和嫩度^[6]; 郭志明等研究苹果糖度高光谱图像可视化预测的光强度校正方法^[7]; 田有文等研究基于高光谱成像的苹果虫伤缺陷与果梗/花萼识别方法^[8]; Cheng 等利用高光谱成

像对鱼微生物腐败检测进行了研究^[9]; Xie 等利用高光谱成像对未解冻猪肉品质进行了研究^[10]; 李江波等利用近红外高光谱图像结合 CARS 算法对鸭梨 SSC 含量定量测定^[11]; 王斌等研究了基于高光谱成像技术的腐烂、病害梨枣检测^[12]; 黄文倩等研究了基于高光谱成像的苹果轻微损伤检测有效波长选取^[13]。国内外研究表明, 高光谱成像技术在农业检测中得到了广泛应用, 但是国内应用高光谱成像技术无损检测赣南脐橙表面农药残留的研究报道不多, 薛龙等以脐橙为研究对象, 初步探讨了应用可见近红外高光谱成像技术检测水果表面农药残留的方法^[14]。本工作主要基于高光谱 900~1700 nm 近红外波段成像系统, 讨论脐橙表面不同浓度农药残留随时间变化(0, 4 和 20 d)情况, 提取并分析涂抹农药后果面农药残留及未涂抹农药的果皮感兴趣区域光谱曲线, 基于光谱所有波段进行主成分处理, 根据分析权重系数获取一定数量的特征波段, 然后基于这些特征波段进行第二次主成分分析处理, 以简化检测农药残留波段数量, 实现赣南脐橙农药残留图像识别。

收稿日期: 2015-05-07, 修订日期: 2015-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61134011)和江西省科技支持项目(20161BAB202060, 20161BBF60060, 20151BAB207009, 20142BDH80021)资助

作者简介: 李增芳, 1971 年生, 浙江水利水电学院教授 e-mail: lzf118@163.com

* 通讯联系人 e-mail: yhe@zju.edu.cn

1 实验部分

1.1 材料

试验用赣南脐橙购于杭州某批发市场, 试验农药为 38% 恶霜密铜菌酯, 可防治脐橙霜霉病、炭疽病和溃疡病。用蒸馏水把农药分别配置成 1:20, 1:100 和 1:1 000 倍的溶液。然后把相同浓度的溶液分别滴到 30 个洗净的脐橙表面, 每个浓度滴 10 个果, 每个果面农药残留为 2 个椭圆形区域, 溶液量约为 500 μL 。将水果分别放置 0, 4 和 20 d, 拍摄图像。

1.2 高光谱成像系统

高光谱成像数据采集系统主要由 CCD 相机、近红外光谱仪、近红外光源、光箱、样品运行平台、电机、平台控制装置和计算机等功能部件组成。近红外光谱仪为 Specimen 公司生产的 ImSpector V17E 光谱仪, 该光谱仪可获取的波长范围为 900~1 700 nm, CCD 相机的作用主要是获取 900~1 700 nm 波长范围内每个波长的灰度图像, 近红外光源由两个 150 W 的光纤卤素灯构成, 可提供的波长范围为 400~1 780 nm, 由于高光谱成像仪采用线扫描工作方式, 而高光谱成像仪一旦在光箱内调整好位置和高度后, 就保持固定不动, 因此, 为获取到整个样品高光谱成像数据, 运行平台作相对于高光谱成像仪垂直水平运动, 运行速度由平台控制装置控制电机转速, 速度通过上位机采集软件调节。光源、CCD 相机和光谱仪等关键部件放置于光箱内, 隔离室内环境光的影响, 减少高光谱成像原始数据噪声, 方便后续分析。

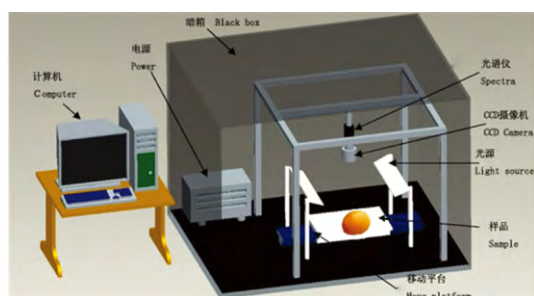


图 1 高光谱成像系统检测原理图

Fig 1 Schematic diagram of hyperspectral imaging system

1.3 高光谱数据采集

采集高光谱成像数据时, 脐橙样品放置于运行平台上, 由于采集数据时运行平台保持运动状态, 如果速度没有调整好, 采集到的图像会变形和不清晰, 为保证采集到清晰图像, 需要考虑三个参数, 分别为采集高度、平台运行速度和相机曝光时间, 经过多次调试, 最终确定曝光时间为 0.08 s, 输送平台运行速度为 3.1 mm $\cdot$ s $^{-1}$, 物距 42 cm。采集到的高光谱成像数据包括样品光谱数据和图像数据, 后面的数据处理分析都是在此基础上进行。

1.4 光谱校正

尽管采集高光谱成像数据时是在光箱内进行, 隔离了外界环境光的影响, 但是, 由于光源电源稳定性、光强分布不

均匀、光谱仪存在暗电流和脐橙不规则外形等影响, 采集到的高光谱成像数据还是含有大量噪声, 因此, 需要对原始高光谱成像数据进行校正, 以减少噪声的影响, 方便后续数据分析。数据校正需要用到白板, 在相同采集条件下, 获取白板高光谱成像数据 W , 然后盖上 CCD 相机镜头, 光源发出的可见近红外光不能进入到光谱仪, 采集到黑板高光谱成像数据 B , 校正公式如下

$$R = (I - B) / (W - B) \quad (1)$$

式中: R 为校正后高光谱成像数据; W 为白板高光谱成像数据; B 为黑板高光谱成像数据; I 为原始高光谱成像数据。后续数据分析涉及到的处理软件包括: Matlab 2010b, Origin 8.5, Envi 4.6 和 Unscrambler X。

2 结果与讨论

2.1 光谱数据分析

提取光谱数据通过软件 Envi 4.6 完成, 在脐橙图像上选取感兴趣区域 (region of interest, ROI) 提取光谱数据, ROI 包括的像素点在 80 个左右, Envi 软件会自动计算 ROI 内每个像素点光谱的平均值, 以此平均值作为每个脐橙样品的光谱数据, 图 2 给出不同浓度农药残留果赣南脐橙和正常果的 ROI 在 900~1 700 nm 平均光谱曲线, 脐橙样品的光谱曲线如图 3 所示。由图 3 可知: (1) 脐橙样品在近红外区域的反射率大于可见光波长范围的反射率; (2) 在 1 080~1 700 nm 光谱区域几乎呈单调递减趋势; (3) 与正常果样本相比, 滴过农药的水果 ROI 光谱曲线在 1 000 nm 波段处出现光谱吸收峰。

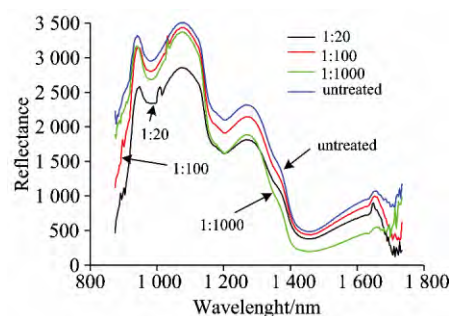


图 2 正常果和农药残留表面 ROI 光谱曲线

Fig 2 Reflectance spectra of ROI at the surfaces of Ganna navels with and without pesticide residue

2.2 主成分分析

主成分分析 (PCA) 是一种线性数据转换方法, 本文 PCA 处理分析在软件 envi 4.6 中完成, 对原始样品高光谱成像数据进行 PCA 处理后, 图 3 表示在 900~1 700 nm 区域波长经过 PCA 处理后表面不同浓度的农药残留及放置不同时间样本的 PC 图像。一般情况下, PC-1 包括的原始信息最多, 尽管理论上认为 PC-1 所含原始数据信息最多, 主要包括正常果面信息, 就本研究而言, PC-2 图像更适合提取农药残留信息, 因此, 取 PC-2 图像进行后续分析处理。

每个 PC 图像理论上都是由原始数据中每个波长下的灰

度图像数字矩阵经过线性运算而形成,可以通过分析线性运算形成的权重系数曲线得到每个 PC 图像的特征波长,如图 4 所示,图中权重系数曲线是由图像 PC-2 的特征向量绘制而成。在分析权重系数曲线时,波峰或者波谷处的波长被认为是特征波长,对图像分析有较大帮助。因此,930, 980, 1 100, 1 210, 1 300, 1 400, 1 620 和 1 680 nm 是 PC-2 的特征波长。

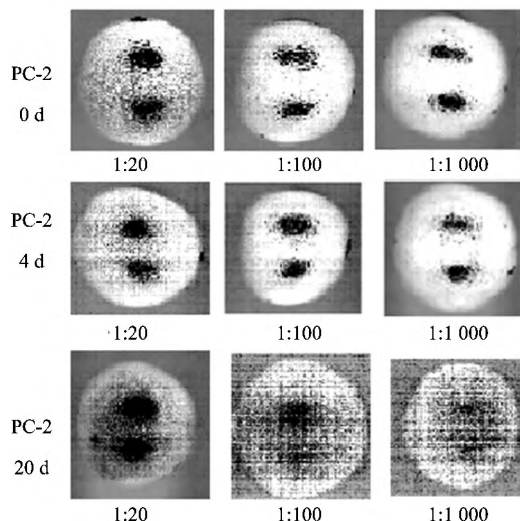


图 3 不同天数和稀释比样品主成分图像

Fig 3 Principal component images of samples

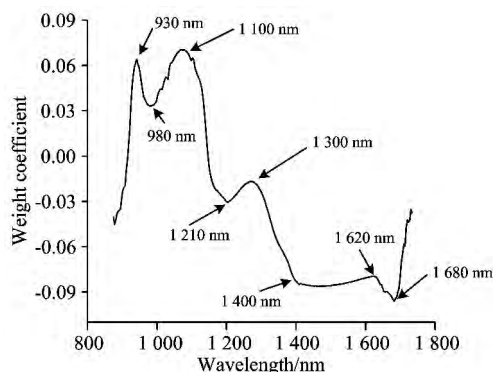


图 4 PC2 图像光谱曲线权重系数

Fig 4 PC2 image spectral curve weight coefficient

2.3 特征波段主成分分析

在第一次 PCA 处理中,所用波长都参与了线性运算,由于大量波段参与第一次主成分分析,尽管利用图 3 中 PC-2 图像检测成功率达到 100%,由于所用波长数量多,不适合在线检测。为了简化数学运算,在前面分析基础之上,采用 930, 980, 1 100, 1 210, 1 300, 1 400, 1 620 和 1 680 nm 做第二次 PCA 处理,得到的 6 个 PC 图像如图 5 所示。和采用全波长进行 PCA 处理得到的结果相比较差异不大,采用 930, 980, 1 100, 1 210, 1 300, 1 400, 1 620 和 1 680 nm 做 PCA 处理得到的 PC-2 图像适合农药残留检测,与全波段主成分分析相比,利用特征波段做主成分分析可以降低系统复

杂性,简化算法。



图 5 基于 8 个特征波段的 PC 图像

Fig 5 PC images based on 8 characteristic bands

2.4 农药残留区域提取识别算法

为了方便赣南脐橙 PC-2 图像分析处理,需要将样品从图像背景中分离出来,使得样品背景为全黑或者全白,本文采用背景全黑处理,为了获取全黑背景,软件 Envi 4.6 中提供了掩模处理方法。处理过程如下:

首先,选取一个波长为分析对象,这个波长不是唯一的,但这个波长必须能很好的区分背景和样品,具体判断标准就是看反射率,选取的标准为这个波长在背景处的反射率明显低于在样品处的反射率,通过分析可知,1 300 nm 左右波长范围的波长都基本满足这个条件,在此,选取 1 300 nm 波长作为进行掩模算法所用波长。图 6(a)是进行掩膜前样品 1 300 nm 灰度图像,图 6(b)是采样 1 300 nm 波长获取到的样品掩模二值图像,具体到数字图像分析领域,样品掩模二值图像即背景为全 0,样品对象为全 1,将图 6(a)与图 6(b)两幅图像的数字矩阵进行点乘运算,得到掩膜后的灰度图像,如图 6(c)所示。

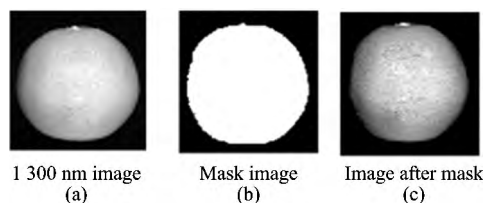


图 6 采用掩模去除背景噪声图像

Fig 6 Background noise removal of image using masking method

图 7 为赣南脐橙不同浓度的农药残留及放置不同时间样本掩模去背景后部分 PC-2 图像。从图 7 可以看出,采用高光谱成像技术可以检测出 3 个时间段较高浓度的农药残留。

考虑到经原始图像变化后的 PC2 图像中农药残留区域和其他区域差异明显,因此,无需对 PC-2 图像进行预处理,先将 PC-2 图像转换为灰度图,然后再将灰度图进行二值化处理,阈值为 0.5,可以看出农药残留区域从其他区域中有效的被识别出来。

图 9 是结合掩模算法、特征波段主成分法以及简单图像处理算法(如域值分割等)的流程图。

为了进一步检验算法的有效性,特征波段主成分分析法应用于本试验中其他样本,发现高光谱成像技术对检测 3 个时间段较高浓度的农药残留都比较明显。考虑到篇幅所限,部分样品识别结果如图 8 所示。

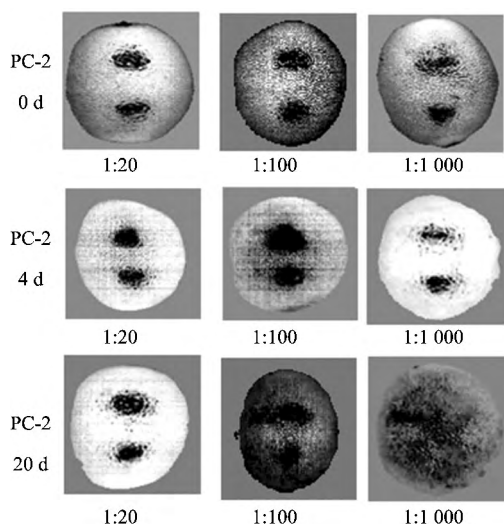


图 7 去背景后的图像

Fig. 7 Image with the background removal

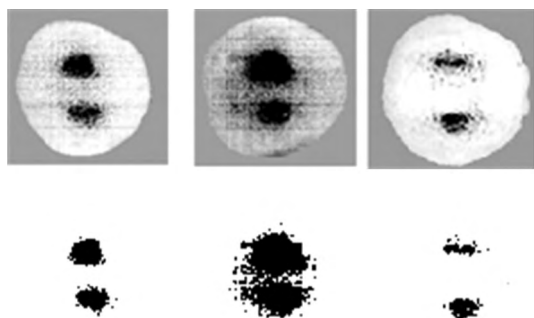


图 8 二值提取农药残留

Fig. 8 Binary imaging extracting pesticide residue

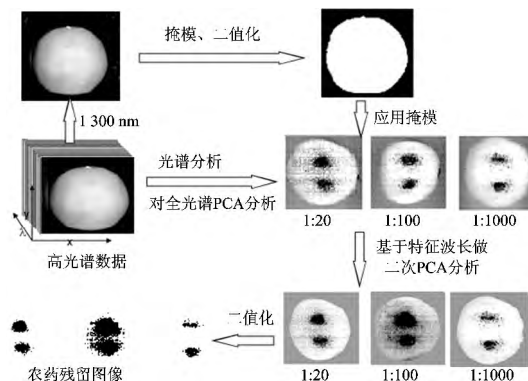


图 9 农药残留识别流程图

Fig. 9 Flow chart of the key steps involved in pesticide residue detection algorithm

3 结 论

(1) 基于高光谱成像系统利用主成分分析法对农药残留区域识别, 结果表明高光谱成像技术对检测各个时间段较高浓度的农药残留都比较明显。

(2) 原始高光谱成像数据量大, 不适合用于在线分析检测。对原始高光谱成像数据进行 PCA 处理, 得到 930, 980, 1 100, 1 210, 1 300, 1 400, 1 620 和 1 680 nm 共 8 个特征波长可以用于检测, 大大简化了模型, 减少了数学运算量, 使得采用高光谱成像技术应用于农药残留在线检测成为可能。

(3) 基于本文得到的结果, 应基于 930, 980, 1 100, 1 210, 1 300, 1 400, 1 620 和 1 680 nm 波长进行 PCA 处理, 利用得到的 PC-2 图像进行农药残留检测。另外, 本工作用到的样品数量较少, 共 24 个缺陷样品, 以后应加大样品数量, 以验证本研究结论的可行性。

References

- [1] Siripaurawan U, Makino Y. International Journal of Food Microbiology, 2015, 199: 93.
- [2] Yang Y, Sun D, Pu H, et al. Postharvest Biology and Technology, 2015, 103: 55.
- [3] Wu D, Chen J, Lu B, et al. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2147.
- [4] Zhu F, Zhang D, He Y, et al. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(10): 2931.
- [5] SUN Jun, ZHANG Mei-xia, MAO Han-ping, et al(孙 俊, 张梅霞, 毛罕平, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2015, 46(6): 251.
- [6] ElMasry G, Sun D W, Allen P. Journal of Food Engineering, 2012, 110(1): 127.
- [7] GUO Zhi-ming, ZHAO Chun-jiang, HUANG Wen-qian, et al(郭志明, 赵春江, 黄文倩, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2015, 46(7): 227.
- [8] TIAN You-wen, CHENG Yi, WANG Xiao-qi, et al(田有文, 程 怡, 王小奇, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2015, (4): 325.
- [9] Cheng J, Sun D. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(2): 1060.
- [10] Xie A, Sun D, Xu Z, et al. Talanta, 2015, 139: 208.
- [11] LI Jiang-bo, PENG Yan-kun, CHEN Li-ping, et al(李江波, 彭彦昆, 陈立平, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2014, 34(5): 1264.
- [12] WANG Bin, XUE Jian-xin, ZHANG Shu-juan(王 斌, 薛建新, 张淑娟). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2013, (S1): 205.
- [13] HUANG Wen-qian, CHEN Li-ping, LI Jiang-bo, et al(黄文倩, 陈立平, 李江波, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2013, (1): 272.

[14] XUE Long, LI Jing, LIU Mu-hua(薛 龙, 黎 静, 刘木华). Acta Optica Sinica(光学学报), 2008, (12): 2277.

Study on Nondestructive Detecting Gannan Navel Pesticide Residue with Hyperspectral Imaging Technology

LI Zeng-fang¹, CHU Bing-quan², ZHANG Hai-liang^{2,3}, HE Yong^{2*}, LIU Xue-mei³, LUO Wei³

1. Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China

2. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

3. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

Abstract Hyperspectral imaging technology is a rapid, non-destructive, and non-contact technique which integrates spectroscopy and digital imaging to simultaneously obtain spectral and spatial information. Hyperspectral images are made up of hundreds of contiguous wavebands for each spatial position of a sample studied and each pixel in an image contains the spectrum for that specific position. With hyperspectral imaging, a spectrum for each pixel can be obtained and a gray scale image for each narrow band can be acquired, enabling this system to reflect componential and constructional characteristics of an object and their spatial distributions. In this study, hyperspectral image technology is used to discuss the application of hyperspectral imaging detection technology of Jiangxi navel orange surface of different concentrations of pesticide residue changes with time relationship. The pesticide was diluted to 1 : 20, 1 : 100 and 1 : 1 000 solution with distilled water. A 1×2 matrix of dilutions was applied to each of 30 cleaned samples with different density pesticide residue. After 0, 4 and 20 d respectively, hyperspectral images in the wavelength range from 900 to 1 700 nm are taken. The characteristic wavelengths are achieved by using principal component analysis (PCA) and the PC-2 image based on PCA using characteristic wavelengths (930, 980, 1 100, 1 210, 1 300, 1 400, 1 620 and 1 680 nm) as the classification and recognition of image. Based on these 8 characteristic wavelengths for a second principal component analysis, the application of PC-2 image and appropriate image processing methods for different concentrations and different days of placing pesticide residues in non-destructive testing were applied. Using hyperspectral imaging technology to detect three periods a higher dilution of the fruit surface pesticide residues are more obvious. This research shows that the technology of hyperspectral imaging can be used to effectively detect pesticide residue on Gannan navel surface.

Keywords Hyperspectral imaging; Gannan navel; Pesticide; Residue

(Received May 7, 2015; accepted Sep. 13, 2015)

* Corresponding author