

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.036

# 基于高光谱图像的桑叶农药残留种类鉴别研究\*

孙俊<sup>1</sup> 张梅霞<sup>2</sup> 毛罕平<sup>1</sup> 李正明<sup>2</sup> 杨宁<sup>1</sup> 武小红<sup>2</sup>

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 研究了一种快速、精确、无损检测桑叶农药残留的方法。以不含农药残留的桑叶、含有敌敌畏残留的桑叶、含有毒死蜱残留的桑叶、含有乙酰甲胺磷残留的桑叶、含有乐果残留的桑叶和含有辛硫磷残留的桑叶为实验对象, 利用高光谱成像仪获取 390 ~ 1 050 nm 范围内的桑叶高光谱图像。利用 ENVI 软件确定叶片的感兴趣区域, 并采用连续投影算法 (SPA) 优选出 10 个特征波长 (452.51、469.88、517.28、539.85、578.92、643.72、727.24、758.34、785.67、819.67 nm)。利用基于径向基内核 (RBF) 的支持向量机 (SVM) 和 10 折交叉验证的方法建立桑叶农残检测模型, 并讨论了 3 种参数寻优算法 (网格搜索、遗传算法和粒子群算法) 对模型性能的影响, 发现采用网格搜索的 SVM 模型的性能最优, 其交叉验证正确率为 63.89%, 预测正确率为 78.33%。为了进一步提升模型的性能, 将自适应提升算法 (Adaboost) 引入到 SVM 建模方法, 基于特征波长下的光谱数据, 对桑叶是否含有农药残留及农药残留品种进行分类建模。结果表明, Ada-SVM 模型的预测准确率达到 97.78%, 较传统 SVM 模型的准确率提高了 19.45 个百分点。可见, 利用高光谱图像技术结合 Ada-SVM 算法能够较准确地鉴别桑叶农药残留。

**关键词:** 桑叶 农药残留 支持向量机 高光谱图像 特征波长

**中图分类号:** S481<sup>+</sup>.8; O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0251-06

## Identification of Pesticide Residues on Mulberry Leaves Based on Hyperspectral Imaging

Sun Jun<sup>1</sup> Zhang Meixia<sup>2</sup> Mao Hanping<sup>1</sup> Li Zhengming<sup>2</sup> Yang Ning<sup>1</sup> Wu Xiaohong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** A non-destructive testing method was studied to rapidly and accurately detect pesticide residues on mulberry leaves. Six groups of mulberry leaves were chosen as experimental samples, which contained pesticide residues of dichlorvos, chlorpyrifos, acephate, dimethoate and phoxim as the first to fifth groups, respectively, and the sixth group without pesticide residues was taken as control. Hyperspectral images of samples in 390 ~ 1 050 nm were acquired by hyperspectral imaging devices. The region of interest from hyperspectral image was selected, and ten characteristic wavelengths, which were 452.51, 469.88, 517.28, 539.85, 578.92, 643.72, 727.24, 758.34, 785.67 and 819.67 nm, were selected by the successive projections algorithm (SPA). Based on RBF kernel function of SVM and 10 fold cross-validation methods, the detection models of pesticide residues on mulberry leaves were established. The impacts of three parameter optimization algorithms (grid search, genetic algorithm and particle swarm optimization) on the model performance were discussed. The results showed that performance of SVM model by using grid search was the optimal one, and its cross-validation accuracy

收稿日期: 2014-10-23 修回日期: 2014-11-28

\* 国家自然科学基金资助项目(31471413)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发 2011 6 号)、江苏大学现代农业装备与技术重点实验室开放基金资助项目(NZ201306)、中国博士后科学基金资助项目(2014M561594)和江苏省博士后科研资助计划资助项目(1401175C)

作者简介: 孙俊, 副教授, 主要从事计算机技术在农业工程中的应用研究, E-mail: sun2000jun@ujs.edu.cn

was 63.89% and forecast accuracy was 78.33%. In order to further enhance the classification performance of the model, the adaptive algorithm (Adaboost) was introduced into the SVM model, and Ada-SVM algorithm was used to build classification model, which can detect pesticide residues on mulberry leaves and identify the kinds of pesticide residues. The results showed that the prediction accuracy of Ada-SVM model reached 97.78%, which was increased by 19.45% compared with the original SVM model. Therefore, hyperspectral imaging technology combined with Ada-SVM algorithm can accurately identify the pesticide residues on mulberry leaves.

**Key words:** Mulberry leaves Pesticide residues Support vector machine Hyperspectral imaging Characteristic wavelength

## 引言

由于气候的影响,近几年桑树病虫害越来越严重,导致桑园农药的种类和使用剂量越来越多。虽然化学农药能有效地降低病虫害影响,但不合理的滥用农药,极易造成桑叶农药残留超标。家蚕食用了含有农药残留的桑叶,一方面极易发生急性中毒,甚至死亡;另一方面,家蚕也会因慢性中毒而影响蚕丝的产量和质量<sup>[1]</sup>,这会极大地影响我国养蚕业的发展和蚕农的生产积极性,造成巨大的经济损失,因此农药残留精确检测具有十分重要的意义。

检测农药残留的传统方法是气相色谱法和高效液相色谱法。色谱法虽然精度高,但检测过程十分复杂,并依赖于大量化学试剂,且属于破坏性检测<sup>[2]</sup>。目前,国内外学者们已经研究出一些无损检测农药残留的方法,如近红外光谱法、荧光光谱法、拉曼光谱法等<sup>[3-10]</sup>。这些均说明高光谱图像技术用于无损检测农药残留是可行的。

农药残留检测中鉴别有无农药残留及农药残留的品种是农药残留精确检测的前提。本文以不含农药的桑叶及含有常用的5种有机磷农药(敌敌畏、毒死蜱、乙酰甲胺磷、乐果和辛硫磷)残留的桑叶为研究对象,利用高光谱图像技术结合模式识别方法鉴别桑叶农药残留。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验样本的制备与采集

在桑园管理中,敌敌畏、毒死蜱、乙酰甲胺磷、乐果和辛硫磷是常被用来防治桑园害虫的主要有机磷农药<sup>[11]</sup>,本文采用了以上5种有机磷农药作为农药残留实验对象。此次实验所用的桑叶样本来自江苏省东台市富安镇桑园,均为成熟期的桑叶。在样本采集过程中,人为选取了60棵长势和形态相似的育711品种的桑树,每10棵分为一组(共6组),四周设隔离区。由于傍晚植物比较容易吸收农药,因此

农药喷洒实验选在18:00进行,利用背负式喷雾器分别对第1组按推荐剂量(1000倍稀释液)喷洒敌敌畏农药(77.5%敌敌畏乳油,由东台农用化学厂生产);第2组按推荐剂量(1500倍稀释液)喷洒毒死蜱农药(40%毒死蜱乳油,由东台农用化学厂生产);第3组按推荐剂量(1000倍稀释液)喷洒乙酰甲胺磷农药(30%乙酰甲胺磷乳油,由江苏蓝丰生物化工股份有限公司生产);第4组按推荐剂量(1000倍稀释液)喷洒乐果农药(40%乐果乳油,由南通江山晨乐化工股份有限公司);第5组按推荐剂量(1000倍稀释液)喷洒辛硫磷农药(40%辛硫磷乳油,由湖北仙隆化工股份有限公司);第6组桑树喷洒清水,确保全株桑叶正反面都被喷透。第3天09:00,从各组桑树的主要枝条中挑选叶位相同、叶面积相差不大、叶面无病斑的桑叶各60片,6组共360片桑叶,采摘完后依次编号并装入贴有标签的塑料袋密封保存,并于当日直接送往江苏大学农业工程研究院光谱实验室进行高光谱图像采集实验。

### 1.2 高光谱图像采集标定

高光谱图像采集实验所采用的硬件部分由高光谱图像摄像机(ImSpector V10E, Spectral Imaging Ltd., Oulu, 芬兰)、2个150 W的直流可调控光纤卤素灯(2900-ER+9596-E型, Illumination 美国)、暗箱(SC100型,北京光学仪器厂)、电控位移台(MTS120型,北京光学仪器厂)和计算机等组成。采集高光谱图像前的准备工作:提前30 min打开光源进行预热;设置曝光时间为20 ms,电控位移台移动速度设为1.25 mm/s<sup>[12]</sup>,图像分辨率设置为672像素×512像素;将桑叶正面向上平铺在白纸上,放入暗箱中的电控位移台上;打开SpectralCube(Spectral Imaging Ltd., Finland)软件的操作界面。待准备就绪后,利用SpectralCube软件采集每片桑叶的高光谱图像。为了尽可能降低图像噪声和暗电流的影响,采集高光谱图像数据前需要黑白标定<sup>[13]</sup>。

### 1.3 ROI 选取和高光谱数据提取

感兴趣区域(ROI)是从桑叶叶片图像中选取分析的重点区域,可以是整个叶片或者部分叶片,ROI 选取对后续模型质量很重要。本文统一在叶片较平整的区域内(避开主茎干)设定一个 64 像素 × 64 像素的方形区域作为 ROI,然后将该区域内所有像素点光谱的平均值作为该桑叶样本的光谱数据。图 1 示意了不含农药残留桑叶样本的 ROI 和对应光谱数据的提取。

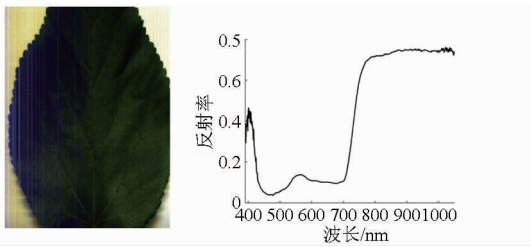


图 1 ROI 选取与光谱的提取示意图

Fig.1 Schematic diagram of ROI selection and spectrum extraction

## 2 结果与分析

### 2.1 桑叶光谱信息提取和分析

首先进行 ROI 的选取,然后分别计算每个 ROI 区域内的平均光谱数据,从而得到 360 个桑叶样本在 390 ~ 1 050 nm (共 512 个波长)范围内的光谱曲线图,原始光谱曲线图如图 2 所示。

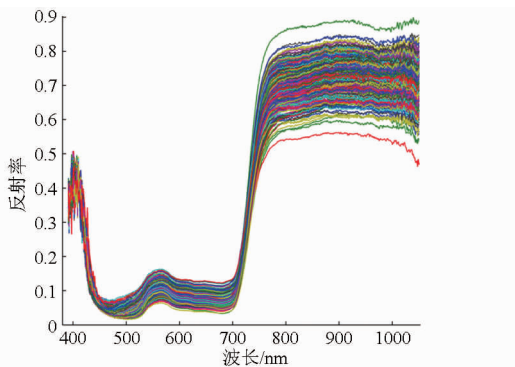


图 2 原始光谱曲线

Fig.2 Raw reflectance spectral curve of mulberry leaves

从图 2 可以看出,在 400 ~ 700 nm 波段内,450 nm 蓝光和 700 nm 红光附近出现 2 个反射率波谷,560 nm 绿光处形成一个反射率小峰;在 700 ~ 780 nm 波段内,反射率陡峭上升;在 780 ~ 1 000 nm 波段内,反射率趋于平稳。根据绿色叶片特有的光谱响应特征:“蓝边”、“绿峰”、“红谷”、“红边”和“红外高台阶”<sup>[14]</sup>,本文所提取的桑叶光谱曲线图的变化趋势是符合绿色叶片光谱反射率规律的。在 400 ~ 780 nm 波段内,叶绿素是影响叶片反射率的主要因素;780 ~ 1 050 nm 波段内,细胞结构与叶片光谱反射率有显

著的相关性<sup>[15]</sup>,且目前已有研究报道:农药胁迫会影响植物的生理生化指标(如叶绿素<sup>[16]</sup>、可溶性多糖<sup>[17]</sup>、可溶性蛋白等)。因此农药胁迫与叶片光谱反射率存在一定的相关性,从而可以利用高光谱图像技术来无损检测有机磷农药残留。为了清晰地看到各组样本之间光谱信息的差异,对每组 60 条光谱求平均,平均光谱曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,叶片光谱反射率受农药残留明显影响,且含不同种类的农药残留的桑叶光谱反射率曲线差异明显,因此可以利用光谱信息来判断桑叶中是否有农药残留以及甄别农药残留的种类。

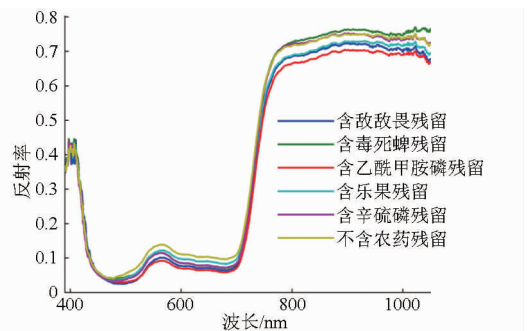


图 3 平均光谱曲线

Fig.3 Average reflectance spectral curve of mulberry leaves

### 2.2 桑叶光谱信息预处理

高光谱数据不仅易受外界干扰,而且受到仪器噪声和随机误差的影响,这会严重降低建模的精确度。为了消除光谱噪声,提高信噪比,采用 S-G 多项式拟合平滑法预处理高光谱数据。S-G 多项式拟合平滑由 Savitzky 和 Golay 共同提出,原理是通过多项式对移动窗口内的数据进行多项式最小二乘拟合<sup>[18]</sup>。该方法不仅能够去噪提高信噪比,还能够较好地保持光谱信息中的有用信息。此外,由于高光谱数据在开头和结尾部分信噪比较低,因此分别剔除头尾各 50 个波长下的光谱数据,最终得到 412 个波长范围内的光谱数据,如图 4 所示。

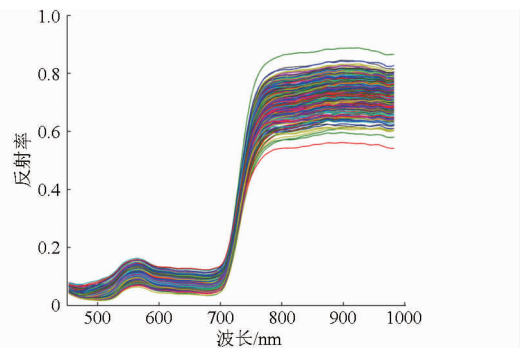


图 4 平滑后光谱曲线

Fig.4 Reflectance spectral curve of mulberry leaves after smoothing

### 2.3 特征波长选取

高光谱图像的光谱数据量大、波段间相关性大,

使得光谱数据中存在大量的冗余信息<sup>[19]</sup>,极大地影响了建模的效率和精度。为此选择既能代表所有光谱信息,又能减小波段间相关性的特征波长尤为重要。连续投影算法(SPA),能够从光谱信息中充分寻找含有最低限度的冗余信息的变量组,使得变量之间的共线性达到最小;同时又能大大减少建模所用变量的个数,提高建模的速度和效率<sup>[20]</sup>。本文采用 SPA 选择特征波长,特征波长数( $N$ ) 范围设为 1~20。如图 5 所示,当保留的变量个数从 1 增加到 10 时,验证均方根误差下降幅度大;当变量个数达到 10 以后,验证均方根误差趋于稳定。根据验证均方根误差尽可能小和后期模型尽可能简化的原则, $N$  取值为 10,其验证均方根误差为 1.194 3,如图 5 中方块所示。

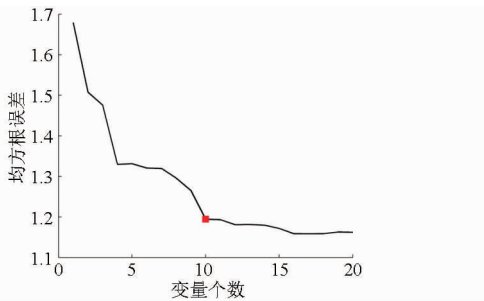


图 5 验证均方根误差随变量个数的变化情况

Fig. 5 Change of RMSE with variables under different numbers

从 412 个波长中,利用 SPA 优选出 10 个特征波长,分别为 452.51、469.88、517.28、539.85、578.92、643.72、727.24、758.34、785.67、819.67 nm,如图 6 中圆点所示。

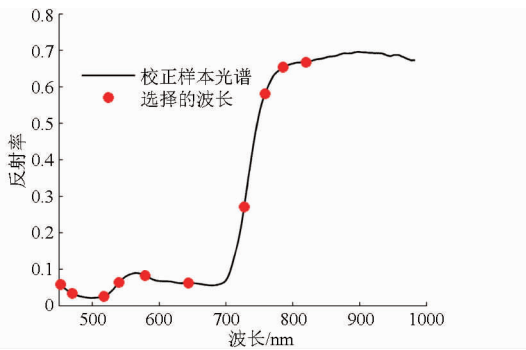


图 6 SPA 筛选出的波长

Fig. 6 Reflectance spectral curve by SPA

## 2.4 SVM 分类建模

支持向量机(SVM)分类算法是一种基于统计学习理论的分类算法。SVM 已被大量用于高光谱数据分类处理,且 SVM 比传统的分类算法的分类性能更好<sup>[21]</sup>。由于 SVM 的参数直接影响 SVM 分类精度,如何选择最优的参数是建立 SVM 分类模型必须考虑的问题。

首先分别从每类中随机选取一半样本作为训练样本集(每类 30 个,共计 180 个),余下的则作为测试样本集(每类 30 个,共计 180 个)。然后利用 SVM 算法基于特征波长下的光谱数据对样本进行分类。选择稳定性和准确性均较好的 RBF 核函数作为 SVM 核函数。在模型建立过程中,分别采用 10 折交叉验证和网格搜索<sup>[22]</sup>、遗传算法<sup>[23]</sup>和粒子群算法<sup>[24]</sup>相结合的方法对模型参数进行寻优,从而确定 SVM 的惩罚因子  $c$  和 RBF 核函数参数  $\gamma$ 。最后,通过比较各模型分类准确率和建模所需时间,从中优选出一个最适合用于桑叶农药残留鉴别模型的参数优化方法。表 1 为使用默认参数和 3 种参数寻优算法所建立的 SVM 模型的结果

表 1 不同寻优算法下 SVM 模型的分类结果

Tab. 1 Classification results of SVM model under different optimization algorithms

寻优算法	交叉验证集(10折)			准确率/%	
	惩罚因子 $c$	核函数参数 $\gamma$	时间/s	交叉验证集	预测集
无(默认参数)	1	1/10	0.08	48.89	47.78
网格搜索	147.03	1	22.90	63.89	78.33
遗传算法	85.97	1.21	103.85	63.89	78.33
粒子群算法	92.77	0.78	117.90	60.56	76.11

从表 1 结果可以看出,从模型分类准确率来看,使用默认参数建立的 SVM 模型性能最差,交叉验证准确率仅为 48.89%,预测准确率也只有 47.78%,而采用参数寻优方法后所建 SVM 模型的交叉验证准确率达 60.56%,预测准确率达 76.11%,性能明显优于未经参数寻优所建模型的性能,说明利用参数寻优算法可以有效提高 SVM 模型的性能;从建模所需时间来看,使用默认参数建立 SVM 模型所需的时间最少,采用 3 种参数寻优方法(网格搜索、遗传算法和粒子群算法)建模所需时间分别为 22.90、103.85、117.90 s,网格搜索方法较优。综合模型分类准确率和建模所需时间这两点来看,采用网格搜索的方法来进行参数寻优,然后建立 SVM 模型,并用来对预测集样本进行分类,此种方法最优,较适合于实际的 SVM 建模。

## 2.5 Ada-SVM 分类建模

Adaboost 是基于在线分配算法的一种迭代算法<sup>[25]</sup>,其核心思想是根据每次训练样本集中的每个样本的分类是否正确,以及上次的总体分类的准确率,来修改每个样本的权值,将修改的权值送给下层分类器进行训练,最后将每次训练得到的弱分类器融合为一个强分类器。采用 Ada-SVM 集成分类算法<sup>[26]</sup>,该算法将 Adaboost 引入 SVM 算法:首先利用

SVM 分类器训练弱分类器;其次计算分类误差,再次根据弱分类器的预测误差计算权重。最后更新权重,经过  $T$  轮迭代后,得到强分类器函数。建模实验中,采用 RBF 核函数作为 SVM 的核函数,并利用网格搜索法寻找核函数参数( $c$  和  $\gamma$ )的最优值( $c = 147.03$  和  $\gamma = 1$ ),迭代次数设为  $T = 15$ 。分别运行 SVM 和 Ada-SVM 2 种分类器,得到的预测结果如图 7 所示。

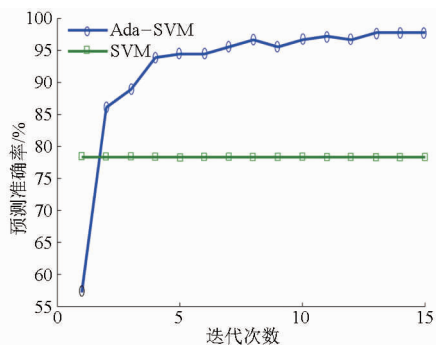


图 7 不同迭代次数下 Ada-SVM 的预测准确率

Fig.7 Prediction accuracy of Ada-SVM under different iterations

从图 7 中的迭代次数和预测准确率可以看出,引入 Adaboost 后的 Ada-SVM 分类器的性能得到了明显的提升,当迭代次数从 2 开始,Ada-SVM 的预测准确率就超越了传统的 SVM 分类器。从迭代次数看,当迭代次数为 3 和 4 时模型性能提升最快,预测准确率大约提升了 20% 左右,随着迭代次数的不

断增加,Ada-SVM 模型的准确率呈现起伏状态,但从整体趋势上来看,模型性能还是得到了一定的提升。当迭代次数为 13 时,模型性能达到最优,预测准确率达到 97.78%。与传统 SVM 模型的预测准确率相比,Ada-SVM 分类模型的预测准确率提高了 19.45 个百分点,这是因为 Adaboost 算法可以根据弱分类器的分类误差,自主选择弱分类器的权重,从而使得最终构成的强分类具有最优的分类性能。

### 3 结束语

利用高光谱图像采集仪得到 6 组桑叶的高光谱图像,然后利用 ENVI 软件从高光谱图像中提取高光谱信息。采用 SPA 对高光谱数据进行特征波段的选择,然后采用 10 折交叉验证的方法和 3 种寻优算法寻找 SVM 建立过程中变动的参数。从分类准确率和建模时间 2 个角度考虑,选取了一组最优的参数,同时利用该参数建立桑叶农药残留鉴别 SVM 模型。为了提高 SVM 分类器的准确性,将 Adaboost 引入 SVM 分类器中,建立分类模型。结果表明,Ada-SVM 比 SVM 有了很大的提高,且 Ada-SVM 能在迭代次数为 10 的情况下,预测准确率能达到 97.78%。利用高光谱图像技术结合 Ada-SVM 算法可以用来作为桑叶表面农药残留有无以及农药种类鉴别的建模方法。

### 参 考 文 献

- 杜建勋,王兆红,孙日彦,等. 可用于桑园的杀虫剂作用特点及对蚕的残毒期[J]. 北方蚕业,2005,26(4):49-50.
- 洪添胜,乔军,Wang Ning,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):151-154. Hong Tiansheng, Qiao Jun, Wang Ning, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique [J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(2):151-154. (in Chinese)
- Sanchez Maria Teresa, Katherine Flores Rojas, Jose Emilio Guerrero, et al. Measurement of pesticide residues in peppers by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Pest Management Science,2010,66(6):580-586.
- 陈蕊,张骏,李小龙. 蔬菜表面农药残留可见-近红外光谱探测与分类识别研究[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(5):1230-1233. Chen Rui, Zhang Jun, Li Xiaolong. Study on the detection and pattern classification of pesticide residual on vegetable surface by using visible/near-infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(5):1230-1233. (in Chinese)
- 薛龙,黎静,刘木华,等. 荧光光谱检测脐橙表面敌敌畏残留试验研究[J]. 江西农业大学学报,2011,33(2):394-398. Xue Long, Li Jing, Liu Muhua, et al. A study on detection of dichlorvos residue on navel orange surface by means of fluorescence spectrum [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2011, 33(2):394-398. (in Chinese)
- 雷鹏,吕少波,李野,等. 多光谱荧光图像技术检测农药残留[J]. 发光学报,2014,35(6):748-753. Lei Peng, Lü Shaobo, Li Ye, et al. Multispectral fluorescence imaging technology for pesticide residues detection [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014,35(6):748-753. (in Chinese)
- 张丹,王俊红. 蔬菜和水果的显微激光拉曼光谱研究[J]. 光谱实验室,2010,27(4):1389-1392. Zhang Dan, Wang Junhong. Study on laser micro-raman spectra of vegetables and fruits [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2010, 27(4):1389-1392. (in Chinese)
- 刘文涵,张丹,何华丽,等. 激光拉曼光谱内标法测定红辣椒表面的农药甲基毒死蜱[J]. 光谱实验室,2012,29(4):2059-2062. Liu Wenhan, Zhang Dan, He Huali, et al. Determination of pesticide residue chlorpyrifos methyl on surface of red pepper by laser raman spectroscopy with internal standard method [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2012, 29(4):2059-2062. (in Chinese)
- 索少增,刘翠玲,吴静珠,等. 高光谱图像技术检测梨表面农药残留试验研究[J]. 北京工商大学学报:自然科学版,2011,

- 29(6):73-77.
- Suo Shaozeng, Liu Cuiling, Wu Jingzhu, et al. Detecting pesticide residue on crystal crown pear surface by hyperspectral imaging technology combined with artificial neural network [J]. Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2011,29(6):73-77. (in Chinese)
- 10 薛龙,黎静,刘木华. 基于高光谱图像技术的水果表面农药残留检测试验研究[J]. 光学学报,2008,28(12):2277-2280.  
Xue Long, Li Jing, Liu Muhua. Detecting pesticide residue on navel orange surface by using hyperspectral imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(12):2277-2280. (in Chinese)
- 11 林小丽,单正军,韩志华,等. 40%毒死蜱乳油在桑园使用后对家蚕的影响评估[J]. 农药学报,2009,11(2):255-260.  
Lin Xiaoli, Shan Zhengjun, Han Zhihua, et al. Effect of 40% chlorpyrifos emulsifiable concentrates to silkworm with spraying application in mulberry field [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2009, 11(2):255-260. (in Chinese)
- 12 朱文静,毛罕平,周莹,等. 基于高光谱图像技术的番茄叶片氮素营养诊断[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2014,35(4):290-294.  
Zhu Wenjing, Mao Hanping, Zhou Ying, et al. Hyperspectral imaging technology of nitrogen status diagnose for tomato leaves [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2014,35(4):290-294. (in Chinese)
- 13 朱荣光,姚雪东,高广娣,等. 不同储存时间和取样部位牛肉颜色的高光谱图像检测[J]. 农业机械学报,2013,44(7):165-169.  
Zhu Rongguang, Yao Xuedong, Gao Guangdi, et al. Hyperspectral imaging detection of beef color under different storage time [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):165-169. (in Chinese)
- 14 孙林,程丽娟. 植被叶片生化组分的光谱响应特征分析[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(11):3025-3031.  
Sun Lin, Cheng Lijuan. Analysis of spectral response of vegetation leaf biochemical components[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(11):3025-3031. (in Chinese)
- 15 梁守真,施平,马万栋,等. 植被叶片光谱及红边特征与叶片生化组分关系的分析[J]. 中国生态农业学报,2010,18(4):804-809.  
Liang Shouzhen, Shi Ping, Ma Wandong, et al. Relational analysis of spectra and red-edge characteristics of plant leaf and leaf biochemical constituent[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4):804-809. (in Chinese)
- 16 沈燕,封超年,李邵,等. 农药对干旱胁迫下小麦幼苗生理生化特性的影响[J]. 江苏农业科学,2007(3):16-19.  
Shen Yan, Feng Chaonian, Li Shao, et al. Effect of pesticide stress on physiological and biochemical characteristics of wheat seedlings to drought[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2007(3):16-19. (in Chinese)
- 17 De L M, Terouzi W, Kzaiber F, et al. Classification of moroccan olive cultivars by linear discriminant analysis applied to ATR - FTIR spectra of endocarps[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2012,47(6):1286-1292.
- 18 杜树新,杜阳锋,武晓莉. 基于 Savitzky - Golay 多项式的三维荧光光谱的曲面平滑方法[J]. 光谱学与光谱分析,2010,31(2):440-443.  
Du Shuxin, Du Yangfeng, Wu Xiaoli. The surface smoothing methods for three-dimensional fluorescence spectrometry based on Savitzky - Golay polynomial smoothing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010,31(2):440-443. (in Chinese)
- 19 Bazi Y, Melgani F. Toward an optimal SVM classification system for hyperspectral remote sensing images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(11):3374-3385.
- 20 代芬,洪添胜,岳学军,等. 砂糖橘可溶性总糖可见-近红外光谱无损检测[J]. 农业机械学报,2011,42(4):133-138.  
Dai Feng, Hong Tiansheng, Yue Xuejun, et al. Nondestructive examination of sugar content of intact 'Shatangju' with visible-near infrared spectroscopy based on variables selection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4):133-138. (in Chinese)
- 21 Nelson J D B, Damper R I, Gunn S R, et al. Signal theory for SVM kernel design with application to parameter estimation and sequence kernels [J]. Neurocomputing, 2008,72(1-3):15-22.
- 22 李清毅,周昊,林阿平,等. 基于网格搜索和支持向量机的灰熔点预测[J]. 浙江大学学报:工学版,2011,45(12):2181-2187.  
Li Qingyi, Zhou Hao, Lin Aping, et al. Prediction of ash fusion temperature based on grid search and support vector machine[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011,45(12):2181-2187. (in Chinese)
- 23 王春林,周昊,李国能,等. 基于支持向量机与遗传算法的灰熔点预测[J]. 中国电机工程学报,2007,27(8):11-15.  
Wang Chunlin, Zhou Hao, Li Guoneng, et al. Combining support vector machine and genetic algorithm to predict ash fusion temperature [J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(8):11-15. (in Chinese)
- 24 宋志强,沈雄,郑晓,等. 应用近红外光谱对低碳数脂肪酸含量预测[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(8):2079-2082.  
Song Zhiqiang, Shen Xiong, Zheng Xiao, et al. Low carbon number fatty acid content prediction based on near-infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(8):2079-2082. (in Chinese)
- 25 严超,王元庆,李久雪,等. Adaboost 分类问题的理论推导[J]. 东南大学学报:自然科学版,2011,41(4):700-705.  
Yan Chao, Wang Yuanqing, Li Jiuxue, et al. Theory deduction of Adaboost classification[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011,41(4):700-705. (in Chinese)
- 26 孙俊,金夏明,毛罕平,等. 基于 Adaboost 及高光谱的生菜叶片氮素水平鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(12):3372-3376.  
Sun Jun, Jin Xiaming, Mao Hanping, et al. Identification of lettuce leaf nitrogen level based on Adaboost and hyperspectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(12):3372-3376. (in Chinese)