

乐果农药对生菜叶片微观结构的作用机理研究

孙俊^{1,2} 周鑫¹ 李青林² 蒋淑英¹ 毛罕平² 杨宁¹

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013;

2. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为了更深入地研究乐果对生菜组织结构的影响,以莲座期的生菜为实验对象,利用扫描电镜和透射电镜对生菜叶片微观结构进行检测。研究发现随着喷洒农药浓度的增加,生菜叶片微观结构发生明显变化。气孔的长宽比和密度降低,叶片的厚度变小,嗜银颗粒增加,淀粉颗粒变少。在 897 ~ 1 332 nm 波长范围内,喷洒乐果的生菜光谱反射率与乐果浓度成反比,而在 1 703 ~ 1 754 nm 波长范围内,喷洒乐果的生菜光谱反射率与乐果浓度成正比。此外,喷洒不同浓度的乐果农药,生菜的纹理图像也存在差异。研究结果表明,乐果农药对生菜微观结构产生了较大改变,从而导致生菜叶片光谱图像信息产生较大变化。对喷洒不同浓度乐果农药的生菜叶片微观结构进行研究分析,可为高光谱技术对不同浓度农药残留的生菜进行定量检测提供机理研究依据。

关键词: 生菜叶片; 农药残留; 机理; 微观结构; 特征提取; 高光谱图像

中图分类号: S636.2; 0433.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0350-06

Mechanism of Different Concentrations of Dimethoate Residue on Microstructure of Lettuce Leaves

SUN Jun^{1,2} ZHOU Xin¹ LI Qinglin² JIANG Shuying¹ MAO Hanping² YANG Ning¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

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

Abstract: Fast identification of pesticide residue in lettuce leaves plays a key role in the test of food safety. However, there are a few studies on the mechanism of pesticide on the internal structure of lettuce. In order to further study the effects of dimethoate on lettuce microstructure, the lettuce at rosette stage was used as the experimental object. Besides, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) were used to detect the microstructure of lettuce leaves. It was found that the microstructure of the lettuce leaves was changed obviously with the increase of the concentration of dimethoate pesticides sprayed. Moreover, the ratio of length to width and density of stomata in leaves were decreased, leaf thickness was decreased, osmiophilic granules were increased and the starch granules were decreased. In the wavelength range of 897 ~ 1 332 nm, spraying dimethoate lettuce spectral reflectance was inversely proportional to the concentration of dimethoate. However, in the wavelength range of 1 703 ~ 1 754 nm, spraying dimethoate lettuce reflectance was proportional to the concentration of dimethoate. In addition, dimethoate pesticide spraying with different concentrations resulted in different textures of lettuce leaves. The results showed that dimethoate produced a huge change on lettuce microstructure, which caused great changes of the image information of lettuce leaves. Study on the microstructure of lettuce leaves sprayed with different concentrations of dimethoate pesticide provided the basis for the study on the mechanism of HSI technology to detect the different concentrations of pesticide residues in lettuce. Therefore, hyperspectral image detection technology can effectively realize the quantitative detection of pesticide residues on the surface of lettuce leaves.

Key words: lettuce leaves; pesticide residues; mechanism; microstructure; feature extraction; hyperspectral image

收稿日期: 2016-08-30 修回日期: 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471413)、江苏高校优势学科建设工程项目 PAPD(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项目(NZ201306)和江苏省六大人才高峰项目(ZBZZ-019)

作者简介: 孙俊(1978—),男,教授,博士,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

引言

生菜富含丰富的维生素、膳食纤维、矿物质元素,具有医疗保健作用^[1]。在生菜生长过程中,主要虫害有潜叶蝇、白粉虱、蚜虫、蓟马等,通常选用乐果中等毒杀虫剂来进行防治,乐果的使用提高了生菜的产量,但是农药残留问题也随之而来^[2-3]。由于农药的不规范、不科学使用造成的农药残留严重威胁着生菜品质安全,制约着生菜商品经济的发展。而过量使用农药不仅会造成农药残留在生菜上,还会造成地下水和土壤污染等环境问题^[4]。一些学者利用光谱技术对农药残留检测进行了研究^[5-7],使光谱信息检测农残成为一种研究思路。

目前,已经有部分学者进行了农药残留对植物叶片微观结构影响的研究。赵文等^[8]利用扫描电镜和透射电镜对喷洒不同浓度毒死蜱和霜霉威的 2 种系列黄瓜的外果皮进行了观察,发现在未喷洒农药的情况下,2 种系列的黄瓜外果皮细胞具有较大差异。同时,也有学者利用扫描电镜和透射电镜对生菜进行了一些研究。WU^[9]利用透射电镜观测到电喷雾喷射的纳米颗粒进入生菜种子后可提高植物种子的萌发率。SHIM 等^[10]用扫描电子显微镜和透射电子显微镜观察了致病菌的细胞膜损伤,并研究评估了 γ 射线辐照对鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌以及细胞膜损伤存活的影响。这说明扫描电镜和透射电镜可以用于观测生菜的微观结构,但目前,尚未存在关于不同浓度农药对生菜微观结构的研究报道。

本文利用扫描电镜观察不同浓度乐果处理后的生菜表皮形态结构细微变化,根据电子和物质间的相互作用,获得生菜表面的气孔密度、气孔大小和生菜断面的叶片厚度等信息,并利用透射电镜观察生菜细胞内部结构变化。

1 实验材料与方法

1.1 实验样本的栽培与制备

实验样本为江苏大学重点 Venlo 型温室内种植的意大利全年耐抽苔生菜,采用珍珠岩为基质的无土栽培方式进行生菜培育,确保每株生菜样本的营养均衡以避免营养元素对生菜微观结构的影响。待到莲座期时,利用塑料薄膜将生菜与土壤隔离开,防止生菜叶片上的农药滴入土壤中并被生菜根系吸收。实验试剂为南通江山晨乐化工股份有限公司生产的 40% 乐果乳油,首先配置 4 个浓度梯度(乐果农药与丙酮体积比分别为 1:1 400、1:1 000、1:500、1:100)的乐果农药,然后将长势相近的 160 株生菜

分为 4 组,对每组生菜充分喷洒同一梯度浓度的乐果。历时 5 d 后(安全间隔期),摘取大小、形状、长势相近的 160 片成熟生菜叶片,依次编号并装入贴有标签的塑料袋密封保存,将采集得到的 160 片生菜分别装袋送往实验室,进行样本高光谱图像采集^[11]。并快速切取 2 mm × 5 mm 叶片和 1 mm × 2 mm 叶片(温度为 25℃ 左右,相对湿度为 65%,光照强度约为 1 000 lx,采摘时刻为 14:00),并分别用 4% 戊二醛溶液固定,使其完全下沉,利用扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)对生菜叶片微观结构进行检测。最后,利用化学定量实验^[12]喷洒 4 个农药(乐果,40% 乳油)梯度,依次为 0.36、1.02、5.10、15.78 mg/kg。其中,国家规定乐果农药每日允许摄入量 0.002 mg/kg,生菜表面乐果农药最大检测限量为 1 mg/kg^[13]。

1.2 扫描电镜和透射电镜

实验仪器主要包括 HCP-2 型临界点干燥仪、IB-5 型离子溅射仪、INCA X-ACT 型能谱仪、Quanta 200 型扫描电镜^[14](SEM,美国 FEI 公司)和 JEM-1400 型透射电子显微镜^[15](TEM,日本电子株式会社)。在 SEM 仪器中,钨灯丝作为电子枪,加速电压为 0.2 ~ 30 kV,放大倍数为 20 ~ 300 000 倍,分辨率达到 3.5 nm,如图 1 所示。在 TEM 仪器中,加速电压为 0.04 ~ 100 kV,放大倍数为 50 ~ 1 000 000 倍,点分辨率达到 0.38 nm,线分辨率达到 0.2 nm,如图 2 所示。

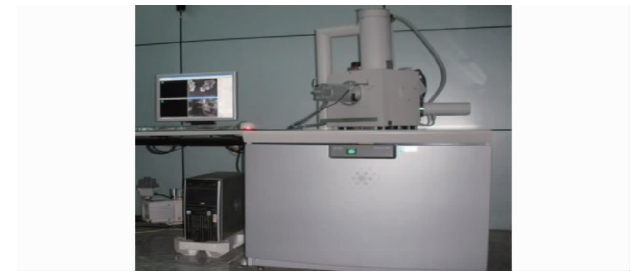


图 1 Quanta 200 型扫描电镜实物图
Fig.1 Picture of Quanta 200 SEM



图 2 JEM-1400 型透射电镜实物图
Fig.2 Picture of JEM-1400 TEM

1.3 SEM 样本处理

在扫描电镜试验前,先对叶片进行固定、脱水、

断裂、干燥、投影等处理^[16]。样本固定:将2 mm × 5 mm 生菜叶片样本浸入4%戊二醛溶液,固定2 h (4℃)。脱水:先采用5个体积分数(30%、50%、70%、90%、100%)的乙醇按梯度逐步脱水,随后采用体积比1:1的100%乙醇-乙醚混合液置换20 min,最后采用乙醚置换30 min。断裂:将脱水处理后生菜叶片样本放置在液氮环境中,当液氮平静后,用由液氮冷却处理的单面刀片撞击生菜叶片样本使其断裂。干燥:在真空环境中,采用CO₂对断裂后的生菜叶片样本进行临界点干燥,使其温度升至常温(20℃)。投影:使用导电胶将干燥处理后的生菜叶片断面向上粘在样品台上,用离子溅射镀膜仪对样本进行镀金(15 mA,90 s)。最后,将2 mm × 5 mm 生菜叶片样本进行扫描电镜观察。

1.4 TEM 样本处理

在透射电镜试验之前,叶片先经过洗涤、固定、脱水、浸透、包埋、聚合和超薄切片等处理^[17]。固定洗涤:过4 h后,用pH值7.0的磷酸缓冲液冲洗1 mm × 2 mm 叶片3次,每次约为20 min,然后放入2%锇酸液中使其完全黑透。脱水、渗透、包埋、聚合:磷酸缓冲液冲洗3次,每次约为20 min,用4个质量分数(30%、50%、70%、90%)的丙酮按梯度逐步脱水,随后用100%丙酮脱水2次,每次约30 min,然后用包埋剂逐步浸透、包埋,并在恒温箱中进行37℃—45℃—60℃加温聚合12 h。超薄切片、染色:用美国RMC型超薄切片机切取50~70 nm厚度的叶片,采用铀铅方法染色,最后放入JEM-1400

TEM型透射电子显微镜观察。

1.5 高光谱图像的采集与标定

利用高光谱图像系统采集样本的高光谱图像,先将生菜叶片样本放置在一个长5 cm、宽10 cm的长方形白纸上,对仪器进行预热使光源达到稳定状态。其次将装有生菜样本的白纸放置在移动平台上,卤素灯放在水平夹角45°的位置,精密电控平移台的平移速度设置为1.25 mm/s,曝光时间设置为20 ms,最终对所有制备的生菜样本进行扫描,通过Spectral Cube软件采集生菜的高光谱图像。在采集样本高光谱图像前,系统需要黑白板标定^[18]以消除暗电流等对高光谱图像的影响。

2 结果与分析

为了从根本上研究乐果对生菜组织的影响,利用扫描电镜观察不同浓度乐果处理后的生菜表皮形态结构细微变化,根据电子和物质间的相互作用,获得生菜表面的气孔密度、气孔大小和生菜断面的叶片厚度等信息。利用透射电镜观察生菜细胞内部结构变化。

2.1 生菜表面微观形态

生菜表面主要有表皮细胞和气孔。生菜表面的乐果需通过气孔进入内部细胞组织,因此对生菜表皮的研究主要针对气孔进行。经过农药处理后,生菜叶片的气孔发生较大变化。随着喷洒农药浓度变高,气孔的长宽比减小,气孔密度也随之变小,如图3所示。因为生菜自身存在保护系统,生菜碰触

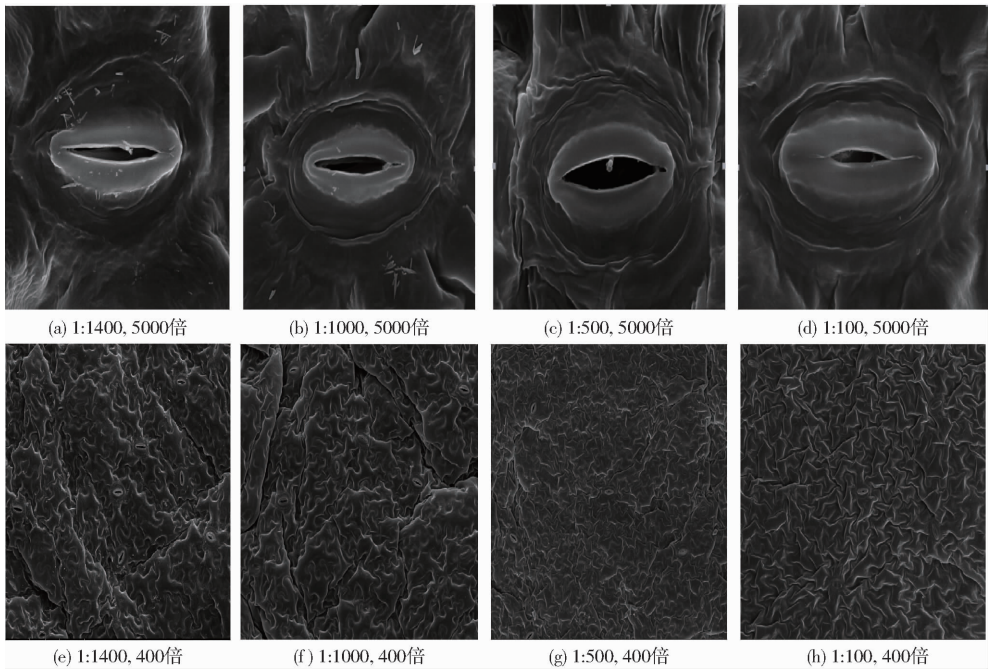


图3 不同浓度乐果对生菜叶片表面气孔特征的影响

Fig. 3 Effect of pores on lettuce leaves sprayed with different concentrations of dimethoate

到高浓度的乐果后会自动开启防御系统,气孔会自动慢慢收缩以防止乐果的侵入。尽管如此,部分农药残留还会侵入生菜内部来破坏内部组织,高浓度乐果下的生菜表皮破损较为严重。因此,生菜表面气孔的长宽比和密度变化直接反映了乐果农药的残留量。

2.2 生菜叶肉组织

从生菜叶片样本的切面分析,生菜叶片切面组织主要包含海绵组织、栅栏组织、上表皮和下表皮。当喷洒不同浓度农药乐果时,生菜叶片切面厚度会发生明显的变化。其中,不同浓度农药乐

果残留下生菜叶片切面的海绵组织、栅栏组织厚度会出现明显差异。从总体统计上看(表 1),随着喷洒的农药浓度变大,叶片的厚度将越来越薄。在生菜喷洒1:1 400 的农药乐果时,生菜叶片的厚度为 $(168.38 \pm 8.80) \mu\text{m}$,栅栏组织厚度为 $(117.05 \pm 5.68) \mu\text{m}$,海绵组织厚度为 $(32.36 \pm 7.56) \mu\text{m}$ 。当生菜上喷洒1:100乐果时,生菜叶片厚度为 $(140.96 \pm 2.32) \mu\text{m}$,栅栏组织厚度为 $(81.02 \pm 5.26) \mu\text{m}$,海绵组织厚度为 $(54.98 \pm 3.48) \mu\text{m}$ 。两者叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度相差较大。

表 1 不同浓度乐果下的叶片厚度
Tab.1 Thickness of lettuce leaf sprayed with different concentrations of dimethoate μm

生菜切面组织	农药乐果试剂类别			
	1:1 400	1:1 000	1:500	1:100
生菜叶片	168.38 ± 8.80	166.89 ± 1.15	157.60 ± 1.89	140.96 ± 2.32
栅栏组织	117.05 ± 5.68	114.63 ± 5.42	98.45 ± 1.28	81.02 ± 5.26
海绵组织	32.36 ± 7.56	35.09 ± 1.36	51.13 ± 2.14	54.98 ± 3.48

2.3 细胞超微结构

生菜内部细胞主要包括叶绿体、嗜钨颗粒、细胞壁等,当乐果农药通过气孔进入生菜内部时,对生菜细胞产生较大影响。喷洒不同浓度乐果农药后,生菜叶片叶绿体形态及内部结构均未发生较大变化,表明这些内部结构组织对乐果的侵害具有一定的抵抗力。随着喷洒乐果农药浓度的增加,生菜叶绿体内的嗜钨颗粒变化较为明显,数量变多,而淀粉颗粒变少。通过透射电镜试验观察可以看出生菜叶片内部叶绿体断层纹路清晰,呈矩形条状。1:1 400、1:1 000 乐果配比下,生菜叶片内部叶绿体排列紧凑,叶绿体间无缝隙;1:500 乐果配比下,生菜叶片内部叶绿体间已经开始出现了间隙;1:100 乐果配比下,生菜叶片内部叶绿体间的间隙较为明显。不同浓度乐果农药残留下生菜叶片内部组织形态产生了细微变化。相关透镜试验结果见文献[19]。

2.4 生菜光谱和纹理

乐果农药不仅对生菜表皮组织产生影响,而且使得生菜内部组织形态结构产生细微变化。高光谱图像技术将成像技术与光谱技术相结合,既得到了光谱信息,又得到了图像信息。通过高光谱图像的纹理信息和光谱信息直观地反映出因喷洒不同浓度的农药而造成的差异。纹理差异直接表现在乐果对生菜表面结构的破坏,喷洒农药的浓度不同,生菜农药残留的光谱会存在差异,如图 4 所示。

生菜中心区域内的 250 像素 × 250 像素区域选为感兴趣区域 (Region of interest, ROI),并将计

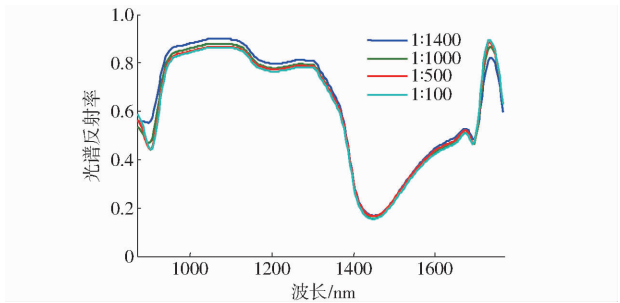


图 4 生菜农残原始光谱曲线
Fig.4 Original spectral curves of pesticide residues on lettuce leaves

算得到 ROI 区域内光谱的平均值作为光谱数据。从图 4 可以看出,在 897 ~ 1 332 nm 波长范围内,喷洒乐果的生菜光谱反射率与乐果浓度成反比,喷洒的乐果浓度越高,生菜的光谱反射率越低。在 1 703 ~ 1 754 nm 波长范围内,喷洒乐果的生菜光谱反射率与乐果浓度成正比,喷洒的乐果浓度越高,生菜的光谱反射率越高。在 1 332 ~ 1 703 nm 波长范围内,可以明显看到喷洒浓度较大的生菜光谱反射率低,其他浓度的生菜光谱反射率也存在差异。因此,喷洒的乐果农药与生菜光谱反射率存在一定的相关性。

本文提取生菜叶片主成分图像 (PC1、PC2 图像)下基于灰度共生矩阵的纹理特征^[20] (对比度、相关性、能量、同质性)作为图像信息,本文采用的是 Matlab 中的 graycomatrix 函数,将距离设为 1,方向依次取 0°、45°、90°、135°共 4 个角度,然后对感兴趣区域中的叶片分别提取对比度、能量、同质性、相关

性 4 个纹理特征,PC1、PC2 下共计 32 个特征下纹理参数。从图 5 可以看出,喷洒不同浓度的乐果农药,生菜的纹理也存在差异。这表明喷洒的乐果与生菜图像光谱反射率和纹理数据之间存在一定的相关性,因此可以利用高光谱图像(Hyperspectral image, HSI)技术定量检测生菜乐果残留。

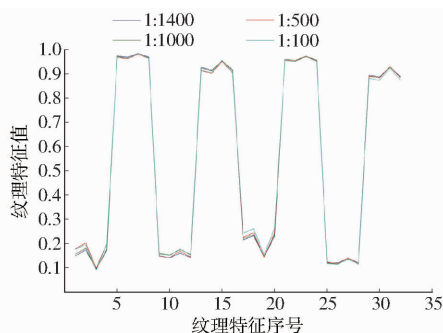


图 5 生菜农残主成分图像的纹理曲线

Fig. 5 Texture curves of principal component image of pesticide residues on lettuce leaf

3 结束语

采用扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)对不同浓度乐果农药残留下的生菜叶片微观结构进行研究分析。研究结果表明随着喷洒乐果农药浓度的增加,生菜叶片表面气孔的长宽比和气孔密度逐渐变小,生菜叶片厚度变薄,生菜叶片内部的嗜铁颗粒增加,淀粉颗粒变少。此外,生菜叶片内部细胞重要组成部分叶绿体间间隙随着喷洒乐果农药浓度的增加而逐渐变大。其中,叶片细胞的排列结构方式直接影响近红外波段的植被反射光谱。喷洒不同浓度乐果农药的生菜叶片近红外波段的高光谱图像信息间的差异性进一步验证了 HSI 技术应用于生菜不同浓度农药残留定量检测的有效性。为此,对喷洒不同浓度乐果农药的生菜叶片微观结构进行了研究分析,为 HSI 技术对生菜不同浓度农药残留进行定量检测提供了机理研究依据。

参 考 文 献

- 武小红,蔡培强,武斌,等. 基于无监督可能模糊学习矢量量化的近红外光谱生菜品种鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(3): 711–715.
WU Xiaohong, CAI Peiqiang, WU Bin, et al. The identification of lettuce varieties by using unsupervised possibilistic fuzzy learning vector quantization and near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(3): 711–715. (in Chinese)
- 卫晓怡,楼文高,王胜桥,等. 绿叶菜农药残留去除的清洗方法[J]. 食品与发酵工业, 2014(10): 90–96.
WEI Xiaoyi, LOU Wen'gao, WANG Shengqiao, et al. Optimization on pesticide residues removing methods of green leafy vegetables[J]. Food and Fermentation Industries, 2014(10): 90–96. (in Chinese)
- 郭佳婧,李高阳,刘咏红. 化学氧化剂降解果蔬农残研究进展[J]. 食品与机械, 2014(3): 249–251.
GUO Jiajing, LI Gaoyang, LIU Yonghong. Research progress on chemical oxidants degradation methods of pesticide residues in fruits and vegetables[J]. Food & Machinery, 2014(3): 249–251. (in Chinese)
- GAN J, LÜ L, PENG J, et al. Multi-residue method for the determination of organofluorine pesticides in fish tissue by liquid chromatography triple quadrupole tandem mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2016, 207(15): 195–204.
- 陈蕊,张骏,李晓龙. 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)
- 孙旭东,董小玲. 蜂蜜中乐果农药残留的表面增强拉曼光谱定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(6): 1572–1576.
SUN Xudong, DONG Xiaoling. Quantitative analysis of dimethoate pesticide residues in honey by surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(6): 1572–1576. (in Chinese)
- PANDEY J K, DUBEY G, GOPAL R. Study the effect of insecticide dimethoate on photosynthetic pigments and photosynthetic activity of pigeon pea: laser-induced chlorophyll fluorescence spectroscopy[J]. Journal of Photochemistry & Photobiology B Biology, 2015, 151: 297–305.
- 赵文,秦智伟,吴鹏,等. 黄瓜低农药残留品种的外果皮组织解剖学特征比较分析[J]. 中国蔬菜, 2013(20): 32–38.
ZHAO Wen, QIN Zhiwei, WU Peng, et al. Comparative analysis of epicarp tissue anatomical in low pesticide residue cucumber strain[J]. China Vegetables, 2013(20): 32–38. (in Chinese)
- WU S G. Electrospray facilitates the germination of plant seeds[J]. Aerosol & Air Quality Research, 2014, 14(3): 632–641.
- SHIM W B, JE G S, KIM K, et al. Effect of irradiation on kinetic behavior of *Salmonella typhimurium* and *Staphylococcus aureus* in lettuce and damage of bacterial cell envelope[J]. Radiation Physics & Chemistry, 2012, 81(81): 566–571.
- 潘磊庆,张伟,于敏莉,等. 基于高光谱图像的鸡种蛋孵化早期胚胎性别鉴定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 181–186.
PAN Leiqing, ZHANG Wei, YU Minli, et al. Gender determination of early chicken hatching eggs embryos by hyperspectral imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 181–186. (in Chinese)
- GB/T 20769—2008 水果和蔬菜中 450 种农药及相关化学品残留量的测定 液相色谱-串联质谱法[S]. 2008.
- GB/T 2763—2014 食品安全国家标准——食品中农药最大残留限量[S]. 2014.

14 MEI H, LU X. The quantitative description between zeta potential and fluorescent particle adsorption on Cu surface [J]. International Journal of Dermatology, 2014, 46(1):56 – 60.

15 STENTIFORD G D, BATEMAN K S, FEIST S W, et al. Areospora rohanae n. gen. n. sp. (Microsporidia; Areosporiidae n. fam.) elicits multi-nucleate giant-cell formation in southern king crab (*Lithodes santolla*) [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2014, 118:1 – 11.

16 李青林, 毛罕平, 左志宇, 等. 基于叶片微观结构变化的番茄磷水平检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 282 – 287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141044&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.044.

LI Qinglin, MAO Hanping, ZUO Zhiyu, et al. A detection method of tomato phosphorus level based on micro-structure of leaf[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 282 – 287. (in Chinese)

17 绍云, 姜丽娜, 李万昌, 等. 砷、铅胁迫对小麦幼苗毒害效应及叶片下表皮扫描电镜观察[J]. 西北农业学报, 2009, 18(1): 133 – 138.

SHAO Yun, JIANG Li'na, LI Wanchang, et al. Toxic effects of As and Pb to wheat seedling and scanning electron microscopic observation on nether epidermis of leaves [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2009, 18(1):133 – 138. (in Chinese)

18 TAN K, CHAI Y, SONG W, et al. Identification of soybean seed varieties based on hyperspectral image[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(9):235 – 242.

19 孙俊, 周鑫, 毛罕平, 等. 基于 PDWT 与高光谱的生菜叶片农药残留检测[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12):323 – 329. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161240&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.040.

SUN Jun, ZHOU Xin, MAO Hanping, et al. Detection of pesticide residues on lettuce leaves based on piece-wise discrete wavelet transform and hyperspectral data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):323 – 329. (in Chinese)

20 郭志明, 赵春江, 黄文倩, 等. 苹果糖度高光谱图像可视化预测的光强度校正方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 227 – 232. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150733&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.033.

GUO Zhiming, ZHAO Chunjiang, HUANG Wenqian, et al. Intensity correction of visualized prediction for sugar content in apple using hyperspectral imaging[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):227 – 232. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 362 页)

20 QIN J, BURKS T F, RITENOUR M A, et al. Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(2):183 – 191.

21 BULANON D M, BURKS T F, KIM D G, et al. Citrus black spot detection using hyperspectral image analysis[J]. Agricultural and Engineering International, 2013, 15(3):171 – 180.

22 ZHAO C, LEE W S, HE D. Citrus black spot detection based on selected wavelengths using hyperspectral images[C]. ASABE, 2015 Annual Meeting Papers 152181190, 2015.

23 SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8):1627 – 1639.

24 SOMOL P, PUDIL P, NOVOTI J. Adaptive floating search methods in feature selection[J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20(11 – 13):1157 – 1163.

25 PUDIL P, FERRI F, NOVOTI J, et al. Floating search methods for feature selection with nonmonotonic criterion functions [C]//Proceedings of the 2nd IAPR International Conference on Pattern Recognition, 1994, 2: 279 – 283.

26 PENG H, LONG F, DING C. Feature selection based on mutual information: criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(8):1226 – 1238.

27 PLATT J C. Sequential minimal optimization: a fast algorithm for training support vector machines[M]//Advances in kernel methods—support vector learning. Cambridge: The MIT Press, 1998: 212 – 223.

28 MOODY J, DARKEN C. Fast learning in networks of locally-tuned processing units[J]. Neural Computation, 1989, 294(1): 281 – 294.

29 程龙, 蔡远文. 数据挖掘 C4.5 算法的编程设计与增量学习改进[J]. 计算技术与自动化, 2009, 28(4): 83 – 87.

CHENG Long, CAI Yuanwen. Program design and an improved incremental learning method of C4.5 algorithm[J]. Computing Technology and Automation, 2009, 28(4): 83 – 87. (in Chinese)

30 高阳, 廖家平, 吴伟. 基于决策树的 ID3 算法与 C4.5 算法[J]. 湖北工业大学学报, 2011, 26(2):54 – 56.

GAO Yang, LIAO Jiaping, WU Wei. ID3 algorithm and C4.5 algorithm based on decision tree[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2011, 26(2): 54 – 56. (in Chinese)