

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.030

波谱成像技术在作物病害信息早期检测中的研究进展*

冯雷 高吉兴 何勇 刘飞

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 阐述了波谱成像技术在作物病害信息早期检测方面的研究进展。作物病害是制约农业生产稳定发展的重要因素。实时、灵敏、可靠的作物病害检测和防治是进行科学的作物生产管理的基础。利用多光谱图像、高光谱图像、热红外图像等波谱成像技术,结合作物病理学以及化学计量学的方法,对感病植株进行早期检测,建立能准确反映作物病害的检测模型和病害程度的定量描述模型,对提高作物抗病机制的研究,科学指导作物生产具有重要的意义。

关键词: 作物病害 多光谱图像 高光谱图像 热红外图像

中图分类号: O657.3; S432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0169-08

Research Development of Spectral Imaging Technology in Early Detection of Botanical Diseases

Feng Lei Gao Jixing He Yong Liu Fei

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The research achievements of spectral imaging technology in early detection of botanical diseases were briefly summarized. The plant disease is an important factor that restricts the steady development of agriculture. It is fundamental to botanical production and management to utilize real-time, sensitive, stable detection and prevention methods. Combined multi-spectral images, hyperspectral images, infrared thermal images with plant pathology as well as chemometrics, infected plants can be detected in early stage by spectral imaging technology. It is very meaningful to build a quantitative model that can reflect botanical diseases and its extent precisely.

Key words: Botanical diseases Multi-spectral images Hyperspectral images Infrared thermal images

引言

健康的作物能够为人类提供更多更好的粮油食品、果蔬和其他农副产品。但作物在自然界的生长与发育过程中,会遇到各种各样的挑战与威胁。病害就是制约农产品品质和产量稳定发展的最重要因素之一。有害病原物对作物的侵袭破坏,除了致使农作物不能正常生长而减产外,还导致其品质降低,而为防治病害要大面积使用农药,则会产生成本投入增加、污染与公害加剧等问题。据联合国粮农组

织的估计,作物遭受病害以后造成的平均损失为总产量的10%~15%。加强作物病害检测研究,科学地指导作物生产,减轻病菌危害,对国民经济的发展和人类生存环境意义重大。

在恰当的时间、恰当的地点,实施精确剂量的农药喷洒是数字农业病虫害管理系统的目标。作物病虫害实时、准确检测技术是保证数字农业病虫害管理系统正常运行的关键前提和基础。本文阐述目前国内外利用光谱以及多光谱图像、高光谱图像、红外热成像等技术进行作物感病信息检测的研究进展。

收稿日期:2013-05-06 修回日期:2013-05-26

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102301)和国家自然科学基金资助项目(31201137)

作者简介: 冯雷,副教授,主要从事数字农业和光谱成像技术研究,E-mail: lfeng@zju.edu.cn

通讯作者: 何勇,教授,主要从事精细农业与农业物联网技术研究,E-mail: yhe@zju.edu.cn

1 传统作物病害监测

目前,国内外在作物病害检测方面的传统技术主要包括光学显微镜技术、透射电子显微镜技术、生物测定技术、血清学技术、多聚醇链式反应技术、核酸序列分析技术、指纹图谱分析技术、分子标记技术及生物电子技术等^[1-6]。现代农业生产管理要求对作物的生长过程实施监控,对作物长势信息进行快速获取,以便及时作出变量喷药等管理措施的决策,而多数以分子水平为基础的传统检测技术手段对使用者技术要求高,且时效性较差,在具体诊断中很不实用。因此,在实际诊断中需要提供实用的新工具和新方法。传统作物病理诊断中,确定染病的标准一般是由专家眼看、手摸而来的定性描述;而使用显微镜检测技术,必须先将感病组织制样,置于显微镜下才能观察,然后根据病菌质粒形态、大小、内含体等,来诊断病菌种类;当用光学显微镜分析内含体来确定作物病菌浸染时,需先将作物材料进行仔细的染色处理等工序。在病害预测和普查、各种防治措施快速评价等极频繁而又重要的生产科研实践中,早期的病害诊断技术显得相对不适应。

2 光谱分析和数字图像处理技术

利用光谱分析技术对作物实时检测一直是遥感在农业中应用的研究热点^[7-11]。作物的光谱特性是作物在生长过程中与环境因子(包括生物因子和非生物因子)相互作用的综合光谱信息。当作物遭受病菌侵染后,其外部形态和生理效应发生变化,如卷叶、落叶、枯萎等,导致冠层形状变化;叶绿素组织遭受破坏,光合作用减弱,养分水分吸收、运输、转化等机能衰退都必然导致作物叶绿素荧光、可见光、近红外、中红外和热红外波谱特征的变化。受害作物的光谱特性与健康作物的光谱特性相比,某些特征波段的值会发生不同程度的变化。此类光谱特性的变异现象已被许多研究所证实^[12-16]。由于卫星遥感分辨率低,价格昂贵,实效性差,只能作为作物宏观评估手段,无法直接指导以农户为单位的微观田间生产作业,而在地面近距离采集作物光谱数据,由于受到作物冠层几何结构、土壤覆盖度、天气对光谱吸收等因素影响,精确度降低,大大限制了利用光谱技术进行作物病害诊断的可靠性和实用性,所以研究多是围绕病害程度与光谱反射率关系的理论分析和探索,真正用于指导实际生产的较少。

Malthus等^[17]用地物光谱仪研究大豆和蚕豆斑点葡萄孢子感染后的反射光谱,发现其一阶反射率要高,可用来监测病虫害的感染发生情况。Adams

等^[18]利用大豆黄萎病光谱二阶导数设计的发黄指数对病情评价进行了研究。吴曙雯等^[19]对稻叶瘟病的光谱特征进行了研究。黄木易等^[20]对不同处理条件下应用光谱技术对冬小麦条锈病的病情指数及其遥感机理进行了分析。Bravo等^[21]利用可见光到近红外波段的光谱反射率数据对小麦黄锈病进行了早期诊断。Muir等^[22]研究了马铃薯块茎在感染病害而肉眼又未能观测到阶段的光谱反射率,以实现早期诊断。吴迪等^[23-25]应用可见/近红外波段的光谱信息对蔬菜灰霉病和水稻穗颈瘟进行了早期检测研究。Cao等^[26]检测并比较了两种感染白粉病的冬小麦在不同感染程度和染病阶段的冠层光谱反射率和多种光谱参数,发现红边峰值面积是白粉病检测最敏感的光谱参数。Mahlein等^[27]研究了甜菜的3种真菌类叶片病害的光谱特征,并对几种植被指数判断不同病害的可靠性进行了比较。Zhang等^[28]利用基于BP神经网络的光谱反射率模型估计水稻的颈瘟病严重程度。而Liu等^[29]则针对4个感病等级的水稻稻穗的病害,使用神经网络和主成分分析技术建立了一个学习向量量化神经网络分类器进行鉴别。Sankaran等^[30]提取了柑橘黄龙病的可见近红外光谱特征;光谱敏感波段和敏感植被指数,并利用两种预测模型进行了病害鉴别,取得良好的效果。Mathyam等^[31]利用近红外光谱多元逻辑模型估计黑豆的黄色花叶病的严重程度和相关色素损失。Jones等^[32]利用可见近红外的光谱特征预测番茄细菌性叶斑病严重程度。消除相关噪声干扰,提高信息数据可靠性是建立通用的且精确度较高的作物病害诊断方法和模型的关键。

数字图像处理技术是从获取的测定对象图像中得到大量具有较好适应性和鲁棒性的信息,进行分析判别。它在农业生产上的应用研究,始于20世纪70年代末期,主要进行的是作物种类的鉴别、农产品品质检测和分级等^[33-35],如根据梅、鸡蛋、黄瓜、玉米、竹笋、西红柿、辣椒、水果和烟叶等的大小、形状、颜色和表面损伤与缺陷进行检测和分级。在病害图像处理中,除了给出被检测对象是什么病害外,还要求给出该病害所处的位置和姿态以引导机器人的工作。岑喆鑫^[36]建立了计算机视觉采集系统和黄瓜叶部病害数字图像数据库,利用病斑区域图像的颜色纹理和形状进行多种病害的鉴别。Wijekoon等^[37]利用图像处理方法量化多种作物真菌病害的叶片病斑面积。Camargo等^[38]建立了一种自动辨认作物病斑的图像处理算法。目前在所处理的数字图像中,一般是处理某一光谱波段的灰度图像或由红、绿、蓝3个光谱分量组成的彩色RGB图像。当作物

受到病菌胁迫后,作物叶片的光合色素含量和细胞结构会发生改变,不同波段的光谱反射率随之会产生变化,所以在作物病害研究中,要全面检测和分析受害作物叶片和冠层的特征信息,仅仅依靠灰度图像或RGB图像进行模式检测是无法完成的。

3 多光谱图像技术

多光谱成像技术是将摄入光源经过过滤,同时采集不同可见光谱和红外光谱等波段的数字图像,并进行分析处理的技术。它结合了波谱学分析技术(特征敏感波段提取)和模式检测(数字图像处理)技术的长处,同时可以弥补光谱仪抗干扰能力较弱和RGB图像波段感受范围窄的缺点。针对错综复杂的外部环境和形状各异的作物品种,利用多光谱成像技术,同时处理可见光谱和红外光谱图像中作物的颜色信息、形状信息以及特征信息,对作物生长状况进行了检测和诊断研究,是作物生理学、生物学、生物数学、遥感技术、计算机图像处理技术等多学科交叉而形成的新研究领域。此技术在农业应用初期,是在卫星、飞机上用安装的多光谱成像仪,对区域作物群体进行光谱成像分析^[39]。卫星影像图片的空间分辨力通常较低,又常受天气条件限制,目前尚不适用于小尺度的田间作业。航空像片尽管可以达到1 m的分辨率,但代价昂贵,大面积农业生产上成本太高,且与地表近距离研究相比,实效性较差。

随着计算机软硬件技术、图像处理技术的迅速发展,多光谱成像技术在农业上的应用,尤其在近距离对作物信息采集数据研究,有了较大的进展。在国外,已有部分学者对此做了一些有益的基础研究工作,并取得了很好的效果,如:Guyer等^[40]分别研究了作物和土壤在可见光和近红外波段内的光反射特性,指出利用对近红外敏感的摄像机可以轻易将作物与土壤背景分离开来。Shearer等^[41]选用波长为1 100 nm和1 600 nm的滤光片,通过获得反射率的比值分离作物与背景,准确率达100%。Adams等^[42]利用550、650和750 nm的光谱图像检测大豆的微量元素含量。美国伊利诺依大学Kim等^[43]提出利用550、650和800 nm的3通道的多光谱图像用于玉米冠层氮肥分析,Noh等^[44]完成了基于地面多光谱(550、650和800 nm)成像技术的玉米氮含量精确变量管理系统,多光谱成像玉米氮素实时检测与传统离线式检测方法比较,精确度相同。Aleixos等^[45]利用RGB和750 nm的光谱图像进行柑橘的探伤和分级,成功率分别为93%和94%。Leckie^[46]利用448、525、553、593、667、780、2 200 nm等7个波

长的松树冠层光谱图像,对松树蚜虫的侵害程度进行检测分析。Yang^[47]利用460 nm、540 nm和700 nm 3个波长多光谱图像进行农产品疾病的安全检测。吴迪等^[48]应用地面多光谱成像技术对茄子灰霉病进行了识别研究。冯雷等^[49]利用多光谱成像技术对水稻叶瘟进行了早期的分级检测。冯洁等^[50]用光谱分析技术和多光谱成像技术相结合的方法识别红粉、黑星、白粉、褐斑和霜霉5种黄瓜常见的病害。Dammer等^[51]对比了RGB成像和多光谱成像技术识别冬小麦赤霉的结果,分析得到了图像分析的病害等级结果与人眼识别结果的线性关系。Cui等^[52]利用两种图像处理法——阈值设定法和质心定位法,从多光谱图像中定量检测大豆锈病。李泽东等^[53]在多光谱成像技术基础上,利用光谱特征信息的编码条件,区分不同等级黄瓜霜霉病。Georges等^[54]利用从多光谱图像提取的一组空间模式矩阵,来区分麦双尾蚜损害的小麦田。Yang等^[55]利用机载多光谱和高光谱遥感图像检测定位棉花根腐病,并比较了两者的不同。

病原菌在植株内的潜伏期一般很短,所以研究针对早期的、灵敏的病害检测方法更为迫切。目前的研究表明:应用多光谱成像技术是解决上述难题的可行方法之一。用作物病理学的观点来解释:病原菌通过气孔、水孔、皮孔、蜜腺等自然孔口和伤口侵入作物,使健康的作物组织中的细胞结构和间隙发生变化,并不断丧失水分,造成水分对近红外区反射能力的下降;随着病原菌的进一步侵入,叶绿素逐渐被破坏,光合作用的能量吸收减弱,导致细胞的持水量、叶绿素含量和光合作用强度下降,从而引起受害作物近红外区和绿光区反射能力减弱,红光区反射能力增强。这些因素通过在绿、红、近红外3个波段通道组成的作物叶面多光谱图像得到反映,因此多光谱成像技术在田间作物信息检测中有良好的应用前景。

4 高光谱图像技术

近年发展起来的基于高光谱成像技术的机器视觉系统是一个重要的发展趋势,已经应用于从精密制造到遥感的许多研究领域。一般认为,光谱分辨率在 $10^{-1} \lambda$ 数量级范围内称为多光谱(Multi-spectral),在 $10^{-2} \lambda$ 数量级范围内称为高光谱(Hyper-spectral)。高光谱图像是一系列光波波长的光学图像,光谱范围可以在紫外(200~400 nm)、可见光(400~760 nm)、近红外(760~2 560 nm)以及波长大于2 560 nm的区域。一台高光谱成像设备可以在很窄的光谱波段内连续地采集图像。与多

光谱图像相比,高光谱图像具有更高的光谱分辨率,通常精度可达到2~3 nm,能充分反映光谱信息的细微变化。利用高光谱成像技术进行田间杂草识别,可获得大量包含连续波长光谱信息的图像块,从而克服多光谱成像系统探测波段有限、谱系断裂等原因造成的光谱信息缺失问题。通过对高光谱图像信息的处理,可提取作物色彩、外形、位置等外部特征;通过对连续光谱信息进行高维数据压缩和特征波长提取,可用于检测作物内部特征。通过图像特征和光谱特征的有效融合,可以克服单纯依靠外在表现特征和光谱特征的不足,显著提高作物病害早期检测和识别的准确度,从而达到根据作物内、外部综合特征进行精确识别病害的目的。

近年来,使用高光谱成像技术进行作物生长信息的研究主要用在卫星/航空遥感领域^[56~58]。通过卫星/航空遥感获得的高光谱图像虽然探测波长范围大,光谱信息充分,但其空间分辨能力有限,目前只能达到米级水平。这种高空光学探测方式比较适合大面积病害的探测和预报。而农田机械化精准药物喷洒需要定位精度在亚米级以内,遥感成像显然定位精度不够。目前,在地面使用高光谱成像技术主要局限在农畜产品内部品质检测^[59],水果品质检测^[60~63]等领域,在作物病害识别方面的研究报道不多。Bauriegel等^[64]在实验室条件下利用高光谱成像技术来检测小麦的赤霉病及其染病程度。Tian等^[65]利用高光谱成像技术检测黄瓜霜霉病,通过主成分分析方法收集最优波段,将图像融合后进行增强、二值化、腐蚀和膨胀处理,此算法的判别准确率接近90%。谢传奇等^[66]对灰霉病胁迫下茄子叶片过氧化氢酶(CAT)活性的高光谱图像特征进行了研究,证明基于高光谱图像特性的茄子叶片CAT活性定量检测是可行的。冯雷等^[67]优选了3个特征波长下的特征图像提取了基于灰度共生矩阵的纹理特征变量,利用连续投影算法和最小二乘支持向量机构建的鉴别模型,判别准确率达到97.5%,说明高光谱成像技术可以用于茄子叶片灰霉病早期监测。柴阿丽等^[68]利用高光谱成像技术获取的光谱信息识别黄瓜白粉病、角斑病、霜霉病、褐斑病和无病区域,采用逐步判别分析和典型判别分析两种方法,取得了很高的准确率。田有文等^[69]利用光谱图像采集的染病叶片图像数据,选出相应特征波长下的图像,采用支持向量机方法,对黄瓜霜霉病和白粉病的正确诊断率达100%。Mahlein等^[70]利用高光谱成像方法分析了3种甜菜病害的光谱特性和不同时期不同位置的变化,通过光谱角度填图算法分别实现了每种甜菜病害的准确判别。

5 红外热成像技术

红外热成像与一般的可见光成像不同,是通过记录物体表面的红外辐射来实现对物体的检测。一般红外热像仪对温度的敏感性均优于0.1℃,能检测物体间较小的温差。红外热像仪通过光学电子系统将物体辐射的红外光经滤波聚集、调制及光电转换,变为电信号,并可转换为数字量,经过数字图像处理,以伪彩色热图像或灰度图像形式显示物体的温度场。红外热像仪将从物体表面发出的辐射转化成热(温度),然后转化成电信号并放大显示,从而形成可见的热图像。同时,红外热像仪能提供视场内任意一点温度,并通过相应的分析软件可以得出温度分布直方图等信息来理解和识别被检测对象,能帮助人们探测肉眼观察不到的事物,从另一种角度来观察人们所熟悉的事物。作物病害是致病生物与感病作物之间相互作用的结果。作物受到病原菌侵染后,其局部或全株会产生对入侵者的抵御,即抗病。作物抗病性是作物在形态结构和生理生化等方面综合的表现结果,其生理代谢过程会发生一系列变化,例如水分平衡失调,叶组织产生萎蔫现象;呼吸速率升高;叶绿体结构破坏,叶绿素含量减少,光和作用下降;发生过敏反应(HR);产生如水杨酸(SA)等信号。Chaerle等^[71]研究了烟草与烟草花叶病毒(TMV)的病症:当感染此病毒后,作物叶子中会产生水杨酸(Salicylic acid),在细胞坏死症状出现前,在被感染的外叶面温度会上升,因此可以用热成像技术对作物病害进行早期诊断和预测。Baccaral等^[72]用红外热记录仪检测了火疫病菌蛋白诱变在烟草中引起的过敏反应,发现诱变后3~4 h,有明显的温度下降,约2℃,且比坏死症状出现早几个小时。研究认为红外热像仪可以用于检测诱变引起的与作物呼吸作用相关的突变现象。Merlot等^[73]用红外热像仪检测阿拉伯芥作物(Arabidopsis)在病菌胁迫下气孔的反应,研究作物在病原脱落酸(ABA)侵染诱导下调控细胞死亡,限制病原菌在寄主上的繁殖扩展以保持作物自身正常生长作用。Wang等^[74]利用热红外照相机监测感染尖孢镰刀菌的黄瓜的叶片反应,发现在感染初期,激素脱落酸诱导叶片气孔关闭导致蒸腾速率下降叶片温度上升;之后细胞失水死亡,温度略有下降;最后受感染的作物水平衡被破坏,死亡组织脱水导致温度回升。研究证明了叶片的不可控失水是由于叶片细胞受损而非气孔,同时认为热红外成像可以实现黄瓜镰刀菌枯萎病的无损可视化监测。从目前试验研究报道来看,利用作物的抗病性并基于红外热成

像,研究作物的生理病变过程,加深对寄主-病原物的相互关系的认识,更好地理解作物的抗病机制,揭示抗病性的本质,对作物病害进行非破坏性、早期诊断的新技术具有巨大的潜力,前景十分广阔。

6 展望

目前大多数研究中描述的算法和方法没有很好地考虑实时性,再加上田间环境的多变性,利用波谱成像技术进行田间作物病害实时检测尚需进行更深

入的研究。

在作物病害研究中,应用多光谱成像、高光谱成像以及红外热成像等波谱成像,可获取波谱范围广且可靠性高的信息。在此基础上,结合传统作物保护学信息及相关农学数据,则可以在提高病害检测方法的实时性、方便性、非破坏性上进行突破,甚至在病菌侵入及感病初期对作物病害程度进行动态定量监测,实现作物病害的早期诊断。

参 考 文 献

- Putnam M L. Evaluation of selected methods of plant disease diagnosis[J]. *Crop Protection*, 1995, 14(6):517~525.
- Fox R T. The present and future use of technology to detect plant pathogens to guide disease control in sustainable farming systems [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1997, 64(2):125~132.
- 杨崇良. 植物病毒研究及进展[J]. *山东农业科学*, 2000(6):50~51.
Yang Chongliang. Research progress of plant virus[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2000(6): 50~51. (in Chinese)
- 洪健,陈集双,周雪平,等. 植物病毒的电镜诊断[J]. *电子显微学报*, 1999, 18(3):274~289.
Hong Jian, Chen Jishuang, Zhou Xueping, et al. Diagnosis of plant viruses by electron microscopy [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 1999, 18(3): 274~289. (in Chinese)
- 冯洁,陈万权,康晓惠. 生物技术在植物病害诊断中的应用[J]. *生物技术*, 1999, 9(1):33~37.
Feng Jie, Chen Wanquan, Kang Xiaohui. The application of biology technique in botanical diseases diagnosis [J]. *Biotechnology*, 1999, 9(1):33~37. (in Chinese)
- 傅和玉. 植物病害诊断仪的传感机理研究[J]. *北京教育学院学报*, 2000, 14(2):43~48.
Fu Heyu. Research of the sensor mechanism of the plant diseases diagnosis instrument [J]. *Journal of Beijing Institute of Education*, 2000, 14(2):43~48. (in Chinese)
- Broner I, Bausch W, Westfall D, et al. Decision support for crop management using remote sensing[C]//*Proceedings of the World Congress of Computation in Agriculture and Natural Resources*, Iguacu Falls, Brazil, 2002: 339~346.
- Bausch W C, Duke H R. Remote sensing of plant nitrogen status in corn[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39(5): 1 869~1 875.
- Li Y, Demetriades-Shah T H, Kanemasu E T, et al. Use of second derivatives of canopy reflectance for monitoring prairie vegetation over different soil backgrounds[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44(1): 81~87.
- Tumbo S D, Wagner D G, Heinemann P H. Hyperspectral-based neural network for predicting chlorophyll status in corn[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(3): 825~832.
- 王福民,王渊,黄敬峰. 不同氮素水平油菜冠层反射光谱特征研究[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(2):80~84.
Wang Fumin, Wang Yuan, Huang Jingfeng. Spectra characteristics of rape canopy at different nitrogen levels [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(2): 80~84. (in Chinese)
- 田国良,包佩丽,李建军,等. 土壤中镉、铜伤害对水稻光谱特性的影响[J]. *环境遥感*, 1990, 5(2):140~149.
Tian Guoliang, Bao Peili, Li Jianjun, et al. Effects of cadmium and copper in soil on spectral reflectance of rice [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 5(2):140~149. (in Chinese)
- 吴继友,倪健. 松毛虫危害的光谱特征与虫害早期探测模式[J]. *环境遥感*, 1995, 10(4): 250~258.
Wu Jiyou, Ni Jian. Spectral characteristics of the pine leaves damaged by pine moth and a model for detecting the damage early [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 10(4): 250~258. (in Chinese)
- 李云梅,倪绍祥,黄敬峰. 高光谱数据探讨水稻叶片叶绿素含量对叶片及冠层光谱反射特性的影响[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(1):1~5.
Li Yunmei, Ni Shaoxiang, Huang Jingfeng. Discussing effects of different chlorophyll concentration to leaf and canopy reflectance by hyperspectral data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(1): 1~5. (in Chinese)
- Kokaly R F, Clark R N. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple liner regression[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(3):267~287.
- Rencet A N, Nemeth J. Defection of mountain pine beetle infection using Landsat MSS and simulated thematic mapper data[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1985, 11(1): 50~58.
- Malthus T J, Maderia A C. High resolution spectroradiometry: spectral reflectance of field bean leaves infected by botrytis fabae [J]. *Remote Sensing of Environ.*, 1993, 45(1):107~116.
- Adams M L, Philpot W D, Norvell W A, et al. Yellowness index: and application of spectral second derivatives to estimate

- chlorosis of leaves in stressed vegetation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(18):3 663 ~ 3 675.
- 19 吴曙雯,王人潮,陈晓斌,等. 稻叶瘟对水稻光谱特性的影响研究[J]. *上海交通大学学报:农业科学版*,2003, 20(1):73 ~ 77.
Wu Shuwen, Wang Renchao, Chen Xiaobin, et al. Effects of rice leaf blast on spectrum reflectance of rice[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Sciences*, 2003, 20(1):73 ~ 77. (in Chinese)
- 20 黄木易,黄义德,黄文江,等. 冬小麦条锈病生理变化及其遥感机理[J],*安徽农业科学*,2004,32(1):132 ~ 134.
Huang Muye, Huang Yide, Huang Wenjiang, et al. The physiological changes of winter wheat infected with stripe rust and the remote sensing mechanism of disease incidence[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2004, 32(1):132 ~ 134. (in Chinese)
- 21 Bravo C, Moshou D. Earlydisease detection in wheat fields using spectral reflectance[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 84(22): 137 ~ 145.
- 22 Muir Y, Porteous R L, Wastie R L. Experiments in the detection of incipient diseases in potato tubers by optical methods[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1982, 27(2): 131 ~ 138.
- 23 吴迪,冯雷,张传清,等. 基于可见/近红外光谱技术的茄子叶片灰霉病早期检测研究[J]. *红外与毫米波学报*,2007,26(4):269 ~ 274.
Wu Di, Feng Lei, Zhang Chuanqing, et al. Early detection of gray (cinerea) on eggplant leaves based on Vis/near infrared spectra[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(4):269 ~ 274. (in Chinese)
- 24 吴迪,冯雷,张传清,等. 基于可见/近红外光谱技术的番茄叶片灰霉病检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*,2007,27(11): 2 208 ~ 2 211.
Wu Di, Feng Lei, Zhang Chuanqing, et al. Early detection of gray (cinerea) on tomato leaves based on Vis/near infrared spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(11): 2 208 ~ 2 211. (in Chinese)
- 25 吴迪,曹芳,张浩,等. 基于可见-近红外光谱技术的水稻穗颈瘟染病程度分级和有效波长选择方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*,2009,29(12):3 295 ~ 3 299.
Wu Di, Cao Fang, Zhang Hao, et al. Study on disease level classification of rice panicle blast based on visible and near infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(12):3 295 ~ 3 299. (in Chinese)
- 26 Cao X, Luo Y, Zhou Y, et al. Detection of powdery mildew in two winter wheat cultivars using canopy hyperspectral reflectance [J]. *Crop Protection*, 2013, 45:124 ~ 131.
- 27 Mahlein A K, Steiner U, Dehne H W, et al. Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases[J]. *Precision Agriculture*, 2010, 11(4): 413 ~ 431.
- 28 Zhang H, Hu H, Zhang X B. Estimation of rice neck blasts severity using spectral reflectance based on BP-neural network[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2011, 33(6):2 461 ~ 2 466.
- 29 Liu Z Y, Wu H F, Huang J F. Application of neural networks to discriminate fungal infection levels in rice panicles using hyperspectral reflectance and principal components analysis[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 72(2):99 ~ 106.
- 30 Sankaran S, Ehsani R. Visible-near infrared spectroscopy based citrus greening detection: evaluation of spectral feature extraction techniques[J]. *Crop Protection*, 2011, 30(11): 1 508 ~ 1 513.
- 31 Mathyam P, Yenumula G P, Suseelendra D, et al. Hyperspectral remote sensing of yellow mosaic severity and associated pigment losses in vigna mungo using multinomial logistic regression models[J]. *Crop Protection*, 2013, 45:132 ~ 140.
- 32 Jones C D, Jones J B, Lee W S. Diagnosis of bacterial spot of tomato using spectral signatures[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 74(2): 329 ~ 335.
- 33 Berlage A G, Cooper T M, Aristazabal J F. Machine vision identification of diploid and tetraploid ryegrass seed[J]. *Transactions of the ASAE*,1998,31(1):24 ~ 27.
- 34 王丰元,周一鸣. 种子形状参数检测的计算机图像处理技术[J]. *农业机械学报*,1995,26(2):52 ~ 57.
Wang Fengyuan, Zhou Yiming. Seed shape detection and measurement with computer image processing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1995, 26(2):52 ~ 57. (in Chinese)
- 35 Delwiche M J, Tang S, Goodrum J W. Detection of cracks in eggs using machine vision[J]. *Transactions of the ASAE*,1991, 34(1):307 ~ 312.
- 36 岑喆鑫. 基于计算机视觉技术的黄瓜叶部病害自动诊断研究 [D]. 北京:中国农业科学院, 2008.
- 37 Wijekoon C P, Goodwin P H, Hsiang T. Quantifying fungal infection of plant leaves by digital image analysis using Scion Image software[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2008,74(2~3): 94 ~ 101.
- 38 Camargo A, Smith J S. An image-processing based algorithm to automatically identify plant disease visual symptoms[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 102(1): 9 ~ 21.
- 39 Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Remote sensing of pigment content in higher plants: principles and techniques[C] //Proc. 3rd International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 1997: 657 ~ 664.
- 40 Guyer D E, Miles G E, Schreiber M M. Machine vision and image processing for plant identification[J]. *Transactions of the ASAE*,1986,29(6):1 500 ~ 1 507.
- 41 Shear S A, Thomasson J A, Meneill S G. Filter selection for NIR sensor of plant and soil matrials[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996,39(3):1 209 ~ 1 214.

- 42 Adams M L, Norvell W A, Philpot W D, et al. Spectral detection of micronutrient deficiency in "Bragg" soybean[J]. *Journal of Agronomy*, 2000, 92(2): 261 ~ 268.
- 43 Kim Y, Reid J F, Hansen A, et al. Ambient illumination effect on a spectral image sensor for detecting crop nitrogen stress[C] //2001 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 011178, 2001.
- 44 Noh H K, Zhang Q, Han S, et al. Dynamic calibration and image segmentation for multispectral imaging corn nitrogen deficiency sensors[J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(1): 393 ~ 401.
- 45 Aleixos N, Blasco J, Navarro'n F, et al. Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 33(2): 121 ~ 137.
- 46 Leckie D G, Cloney E, Joyce S P. Automated detection and mapping of crown discoloration caused by jack pine budworm with 2.5 m resolution multispectral imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(1): 61 ~ 77.
- 47 Yang C, Chao K, Chen Y. Development of multispectral image processing algorithms for identification of wholesome, septicemic, and inflammatory process chickens[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 69(2): 225 ~ 234.
- 48 吴迪, 朱登胜, 何勇, 等. 基于地面多光谱成像技术的茄子灰霉病无损检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(7): 1496 ~ 1500.
Wu Di, Zhu Dengsheng, He Yong, et al. Nondestructive detection of grey mold of eggplant based on ground multi-spectral imaging sensor[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(7): 1496 ~ 1500. (in Chinese)
- 49 冯雷, 柴荣耀, 孙光明, 等. 基于多光谱成像技术的水稻叶瘟检测分级方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(10): 2730 ~ 2733.
Feng Lei, Chai Rongyao, Sun Guangming, et al. Identification and classification of rice leaf blast based on multi-spectral imaging sensor[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(10): 2730 ~ 2733. (in Chinese)
- 50 冯洁, 廖宁放, 赵波, 等. 常见黄瓜病害的多光谱诊断[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(2): 467 ~ 470.
Feng Jie, Liao Ningfang, Zhao Bo, et al. Cucumber diseases diagnosis using multispectral imaging technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(2): 467 ~ 470. (in Chinese)
- 51 Dammer K H, Möller B, Rodemann B, et al. Detection of head blight (*Fusarium* spp.) in winter wheat by color and multispectral image analyses[J]. *Crop Protection*, 2011, 30(4): 420 ~ 428.
- 52 Cui D, Zhang Q, Li M Z, et al. Image processing methods for quantitatively detecting soybean rust from multispectral images[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 107(3): 186 ~ 193.
- 53 李泽东, 李宏宁, 方玉萍, 等. 黄瓜霜霉病害的窄带多光谱图像光谱分类和评估研究[J]. *云南师范大学学报:自然科学版*, 2011, 31(6): 63 ~ 69.
Li Zedong, Li Hongning, Fang Yuping, et al. Study on spectral classification and evaluation base on narrowband multispectral images of cucumbers downy mildew disease[J]. *Journal of Yunnan Normal University: Nature Sciences*, 2011, 31(6): 63 ~ 69. (in Chinese)
- 54 Backoulou G F, Elliott N C, Giles K L, et al. Differentiating stress to wheat fields induced by diuraphis noxia from other stress causing factors[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 90: 47 ~ 53.
- 55 Yang C, Everitt J H, Fernandez C J. Comparison of airborne multispectral and hyperspectral imagery for mapping cotton root rot [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 107(2): 131 ~ 139.
- 56 Goel P K, Prasher S O, Landry J A, et al. Hyperspectral image classification to detect weed infestations and nitrogen status in corn[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(2): 539 ~ 550.
- 57 Tang L, Tian L, Steward B L. Classification of broadleaf and grass weeds using gabor wavelets and an artificial neural network [J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(4): 1247 ~ 1254.
- 58 Yang CC, Prasher S O, Goel P K. Differentiation of crop and weeds by decision-free analysis of multi-spectral data [J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(3): 873 ~ 879.
- 59 刘木华, 赵杰文, 郑建鸿, 等. 农畜产品品质无损检测中高光谱图像技术的应用进展[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(9): 139 ~ 143.
Liu Muhua, Zhao Jiewen, Zheng Jianhong, et al. Review of hyperspectral imaging in quality and safety inspections of agricultural and poultry products [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(9): 139 ~ 143. (in Chinese)
- 60 Mehl P M, Chao K, Kim M, et al. Detection of defects on selected apple cultivars using hyperspectral and multispectral image analysis[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2002, 18(2): 219 ~ 226.
- 61 Polder G, Yang I T. Spectral image analysis for measuring ripeness of tomatoes[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(4): 1155 ~ 1161.
- 62 洪添胜, 乔军, Ning Wang, 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.
Hong Tiansheng, Qiao Jun, Ning Wang, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(2): 151 ~ 155. (in Chinese)
- 63 赵杰文, 刘剑华, 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, 39(1): 106 ~ 109.

- 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, 2008,39(1): 106 ~ 109. (in Chinese)
- 64 Bauriegel E, Giebel A, Geyer M, et al. Early detection of Fusarium infection in wheat using hyper-spectral imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(2): 304 ~ 312.
- 65 Tian Y, Zhang L. Study on the methods of detecting cucumber downy mildew using hyperspectral imaging technology[J]. Physics Procedia, 2012, 33: 743 ~ 750.
- 66 谢传奇, 冯雷, 冯斌, 等. 茄子灰霉病叶片过氧化氢酶活性与高光谱图像特征关联方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 177 ~ 184.
- Xie Chuanqi, Feng Lei, Feng Bin, et al. Relevance of hyperspectral image feature to catalase activity in eggplant leaves with grey mold disease[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(18): 177 ~ 184. (in Chinese)
- 67 冯雷, 张德荣, 陈双双, 等. 基于高光谱成像技术的茄子叶片灰霉病早期检测[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2012, 38(3): 311 ~ 317.
- Feng Lei, Zhang Derong, Chen Shuangshuang, et al. Early detection of gray mold on eggplant leaves using hyperspectral imaging technique[J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2012, 38(3): 311 ~ 317. (in Chinese)
- 68 柴阿丽, 廖宁放, 田立勋, 等. 基于高光谱成像和判别分析的黄瓜病害识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(5): 1357 ~ 1361.
- Chai Ali, Liao Ningfang, Tian Lixun, et al. Identification of cucumber disease using hyperspectral imaging and discriminate analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(5): 1357 ~ 1361. (in Chinese)
- 69 田有文, 李天来, 张琳, 等. 高光谱图像技术诊断温室黄瓜病害的方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 202 ~ 206.
- Tian Youwen, Li Tianlai, Zhang Lin, et al. Diagnosis method of cucumber disease with hyperspectral imaging in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 202 ~ 206. (in Chinese)
- 70 Mahlein A K, Steiner U, Hillnhütter C, et al. Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases[J]. Plant Methods, 2012, 8(1): 1 ~ 13.
- 71 Chaerle L. Presymptomatic visualization of plant-virus interactions by thermography[J]. Nature Biotechnology, 1999, 17(8): 813 ~ 816.
- 72 Boccara M, Boue C, Garmier M. Infra-red thermograph revealed a role for mitochondria in pre-symptomatic cooling during harpin-induced hypersensitive response[J]. The Plant Journal, 2001, 28(6): 663 ~ 670.
- 73 Merlot S, Mustilln A, Genty B. Use of infrared thermal imaging to isolate Arabidopsis mutants defective in stomatal regulation [J]. The Plant Journal, 2002, 30(5): 601 ~ 609.
- 74 Wang M, Ling N, Dong X, et al. Thermographic visualization of leaf response in cucumber plants infected with the soil-borne pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 61: 153 ~ 161.