

◎ 王利民 刘 佳 张竞成 邵 杰 杨福刚 著

中国农业灾害遥感监测

病害卷

非外编

中国农业科学技术出版社

◎ 王利民 刘 佳 张竞成 邵 杰 杨福刚 著

中国农业灾害遥感监测

病害卷

中国农业科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国农业灾害遥感监测. 病害卷 /王利民等著. —
北京: 中国农业科学技术出版社, 2017. 1
ISBN 978-7-5116-2851-0

I. ①中… II. ①王… III. ①遥感技术—应用—农业
—自然灾害—监测—研究—中国 ②遥感技术—应用—农业
—病害—监测—研究—中国 IV. ①S42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 284937 号

责任编辑 于建慧 李 刚
责任校对 杨丁庆

出 版 者 中国农业科学技术出版社
北京市海淀区中关村南大街12号 邮编: 100081
电 话 (010) 82109708 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)
(010) 82109703 (读者服务部)
传 真 (010) 82109708
网 址 <http://www.castp.cn>
经 销 各地新华书店
印 刷 北京富泰印刷有限责任公司
开 本 710 mm × 1000 mm
印 张 13.75
字 数 211 千字
版 次 2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷
定 价 60.00元

前言

作物病害遥感监测是利用遥感技术实现田间作物生长状况的监测，以便及时采取措施进行治理。

本书的总体编写思路为：背景及研究现状介绍，作物病害遥感监测基础理论概述，主要数据源获取与处理，病害监测方法分析，相关案例陈述，作物病害预警及损失评估，系统模块设计等。基于这一编写思路，本书以病害监测为基准，对病害监测相关参数进行分析，并简要说明这些参数的数据来源及相关数据的处理流程，然后从病害监测、预警以及作物损失这几个方面进行作物病害研究，并列举若干实例进行说明，最后对作物病害监测及预计的系统设计和实现进行了叙述。

本书第1章到第4章为病害监测基础理论部分，其中，第1章引言对作物病害监测的背景以及当前的研究状况进行了简要介绍；第2章主要介绍病害监测相关指数获取以及农学参数的选择与量测；第3章列举了可实现作物病害监测的数据来源以及这些数据所需进行的处理过程；第4章到第5章为作物病害监测研究理论与应用部分，第4章对作物病害监测研究理论以及相对应的技术流程进行了阐述；第5章基于上一章中的作物病害监测理论，以西北三省为试验区，以冬小麦条锈病、白粉病和夏玉米大斑病、小斑病为例，进行了监测试验；第6章和第7章为作物病害预警及损失评估部分，第6章着重于作物病害监测后，依据监测构建的模型对作物进行的预警预测研究，并依此进行了相关作物的预警预测试验；第7章为作物病

害损失评价部分，通过前期的监测以及预测模型的反演，对受病害影响后的作物损失量进行了推算。第8章为系统开发介绍部分，分析作物病害监测、预警预测以及损失评价模块的需求，并进行系统模块的开发和实现，最后实现系统的应用及推广；附录为本书针对实例的一些附加说明。

随着遥感技术的发展和研究的深入，其在各行各业中的应用也日益广泛，而将遥感技术引入农业病害监测，不仅有效补充了病害监测手段，且发挥着越来越重要的作用，通过遥感技术可实现大范围农作物的快速监测、预警和损失评估，对保障农业安全生产，降低农业产量损失，提升国民经济具有重要意义。从事农业遥感研究以来，多年的经历使得我们积累了丰富的遥感专业知识和研究成果，同时，也组建了专业的研究队伍，包括经验丰富的科学家以及一批意气风发的青年科技工作者，在不断地研究过程中，大家都在学习中得到了成长，也使得我们的队伍日渐强大。在这里我们要提一下对本书作出贡献的人员，他们是高建孟、姚保明、富长虹、滕飞等。

本书以理论联系实际，从作物病害研究的背景、理论基础、数据来源、监测方法以及实地试验和结果验证对作物病害监测的整个技术流程作了简要概况，对相关专业领域的研究人员和技术人员也存在一定的参考价值。我们期望本书的出版能进一步促进遥感技术在农业病害监测预测领域的交流，以推进农业病害遥感监测的发展，为减少农业受病害影响，增加国家经济，提高国民收入作出更多的贡献。

鉴于本人水平有限，且作物病害监测的研究也在不断地丰富和发展，书中不妥和错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

王利民

2016年8月23日

目 录

1 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	3
参考文献	8
2 病害监测原理与农学参数	13
2.1 病害胁迫监测原理	13
2.2 病情指数	24
2.3 地面观测实验	24
2.4 与病害有关的农学参数选择与测量	25
参考文献	26
3 数据获取及处理	30
3.1 主要数据源	30
3.2 地面光谱数据处理	36
3.3 卫星遥感数据处理	37
3.4 气象数据处理	48
参考文献	49
4 作物病害遥感监测研究	56
4.1 作物病害遥感监测原理	57
4.2 结合多数据源的作物病害监测模型	61
4.3 作物病害监测精度验证	67
参考文献	68
5 作物病害遥感监测实例	72
5.1 研究目标与内容	72
5.2 作物病害简介	74

5.3	病害监测技术路线	77
5.4	数据准备	78
5.5	近地高光谱遥感监测研究	86
5.6	作物病害监测实例	91
5.7	结论	112
	参考文献	112
6	作物病害预测研究及实例	116
6.1	病害分区	116
6.2	数据整理	117
6.3	作物病害预测模型构建	117
6.4	作物病害预测精度评价	122
6.5	作物病害预测实例——以冬小麦白粉病和夏玉米 大、小斑病为例	122
6.6	作物病害预测结论	157
	参考文献	160
7	作物病害损失研究	163
7.1	研究目标	163
7.2	研究方案	164
7.3	病害损失估计	164
7.4	病害损失结果	168
	参考文献	168
8	作物病害监测、预警系统开发	171
8.1	研究内容	171
8.2	技术路线	171
8.3	作物病害监测、预警系统需求分析	173
8.4	作物病害监测、预警系统设计与实现	175
8.5	作物病害预警专家系统设计与实现	197
8.6	作物病害监测、预警系统测试	204
	参考文献	207
	附 录	210

1.1 研究背景

我国是人口大国，对粮食的需求日益增长，随着耕地面积的不断减少，粮食产量问题成为我国面临的一个关键问题。其中，作为影响作物粮食生产较大的因素之一，病虫害对作物的生长影响尤为明显，统计资料显示，全球每年因病虫害影响而损失的粮食数量占总产量四分之一左右，而在病虫害流行的年份，其影响更加突出，并且这种趋势也随着环境的恶化变得愈加严峻。因此，加强病虫害的预警和监测就显得尤为重要。

我国农业自然灾害预报仍然以常规手段为主，观测要素不全、不精、不连续，信息传输、处理和分析水平较低，缺乏天空地一体化的灾害监测应用系统、数据采集与处理技术，评估技术相对落后，存在很大的随意性，准确性和实时性较差；农业自然灾害监测、预警、预报、评估水平较低，仍然不能满足国家对农业灾害监测评估的需求，迫切需要解决。因此，通过采用现代化技术，实现农作物病害实时准确的监测预警，提高农作物病害的防灾减灾能力，无疑对我国农业发展、粮食增产都会产生很大

的经济作用和现实意义。

因此，作物病害遥感监测的研究是在国家需求催生、农业灾害遥感监测技术成熟度较高的双重背景下立项的，对推动我国农业灾害遥感监测、评估与预警技术的广泛应用，提高我国农业灾害信息服务能力具有重要的意义。在粮食贸易全球化趋势国际背景下，全球农业自然灾害的日趋严重，通过现代遥感技术提高农业信息服务水平，是指导国家粮食生产战略的现实需求。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》把“重大自然灾害监测与防御”列为优先主题；《国家‘十二五’科学和技术发展规划》《空间技术领域‘十二五’战略研究规划》《‘十二五’国际科技合作重点任务》《农业遥感应用‘十二五’发展规划》（审议稿），以及“十一五”期间启动的国家重大专项“高分辨率对地观测系统”等相关国家科技发展规划、重点任务、创新工程、重大工程及农业部有关规划，从提高公共安全和防灾减灾能力的需要，推进重点领域核心关键技术突破，大力加强民生科技等方面都对“重大自然灾害监测预警技术”进行了规划部署。

“农业灾害遥感监测、损失评估技术与系统”课题从国家农业灾害决策信息的实际需求出发，以服务于推进重点领域核心关键技术突破，加强农业农村科技创新，加强农业关键技术突破和成果转化应用，为粮食单产年增长率达到0.8%提供科技支撑，保障国家粮食安全和农产品有效供给为目的，以主要农业灾害为对象进行监测、损失评估技术研究 with 系统建设。课题设置是从保障国家粮食安全和农业生产、农民生活的需要，提高国家对重大自然灾害监测预警能力的需要，发展重大农业灾害风险管理科学技术的需要，参与建立国际农业灾害监测系统的需要出发，产生于我国农业生产的实际需求，并与国家中长期发展规划要求一致。因此，课题是在国家农业生产迫切需求的背景下立项的。

1.2 研究现状

当前,作物病虫害遥感监测的研究热点主要体现在两个方面:一是基于传统点状气象植保数据来构建病害预测模型;二是基于遥感新兴技术的病害监测。在气象数据预测病害方面,部分研究根据病害的发生生理机制,利用气象数据和物候规律进行预测。遥感技术则是通过病害光谱分析来监测病害发生范围和严重程度,一般是对不同病害程度下的作物进行光谱监测,为了获取明显的对比光谱信息,有效的光谱数据采集会在病害已经发生的后期进行,会限制病害的防治,因此如何采用遥感手段实现病虫害的早期预测是农作物病害监测研究的一个热点方向。

1.2.1 国内研究现状

我国从“六五”期间开始开展自然灾害遥感监测研究,基于各阶段的研究成果开发了不同的灾害监测与预警系统。早期的系统包括“八五”期间中国科学院开发的“灾害遥感监测评价系统ICS”和中国水利水电科学研究院开发的“自然灾害气象卫星宏观监测信息服务系统”等,这些系统对提高我国防灾减灾工作水平具有重大意义。农业行业以农业部所属农业遥感应用中心为牵头单位,于1999年建立了“全国农情遥感监测业务运行系统”,初步形成了符合中国农业生产特点的灾害监测业务系统,并实现了业务化运行至今。该系统从建立之初就涉及干旱、洪涝、草原等内容,其监测结果是农业部粮食会商的三大信息源之一,有效提升了农业部粮食监测的时效性与决策水平。

在农作物病虫害监测方面,北京农业信息技术研究中心多年研究积累了丰富的经验,并取得了相关的研究成果:明确不同病虫害胁迫下的农作物冠层光谱响应特征、规律和机理,提出新的高光谱植被指数、荧光参数和红边参数等光谱参数,建立了导数光谱、连续统去除法和变换特征等高光谱特征变量分析技术,研制了基于统计回归、学习矢量量化神经网络、

支持向量机、概率神经网络、主成分分析和概率神经网络相结合的农作物病虫害遥感定量反演技术,实现了冬小麦条锈病和白粉病、棉花黄萎病、水稻稻干尖线虫病、稻纵卷叶螟和穗颈瘟等主要农作物病虫害病情指数的遥感监测。

基于气象数据进行作物病害预测方面,目前国内较集中于气象环境因子以及监测模型等的研究。气象环境因子主要表现为气温、降水量等因素的作用,研究表明,气温、降水量及相对湿度等气象因子是造成西北地区小麦条锈病发生的重要因素;在陇东地区,春季降水量则是小麦条锈病发生的决定性因素,且病害程度主要受3—5月降水量的影响;同时还有研究人员将风量值作物冬小麦条锈病的影响因子之一,研究了其与条锈病发生的内在联系。在监测模型方面,则主要是数学模型的使用,即将作物病害气象因素等作为输入,利用数学模型进行病害的预测,有研究者利用降水量和平均温度、秋季菌量等信息作为病害预测关键因子输入模型,基于BP神经网络建立了小麦病害预测模型;利用冬小麦条锈病病害程度时间序列资料,应用马尔可夫链可预测下一年条锈病的发生程度,且预测结果与实际基本相符;也有研究尝试将气象数据和病菌孢子数量,菌源地分布等植保数据相结合,预测作物病虫害的流行趋势和时空分布。

利用遥感技术进行作物病虫害监测,主要表现在病虫害光谱响应生理机制、光谱响应位置、病虫害监测指数构建以及病虫害遥感识别和区分方面。

在作物受病虫害侵染时,作物光谱曲线上不同波段处会表现出不同程度的吸收和反射特性,这些特性一般认为是由病虫害引起的作物色素、水分、形态、结构等变化引起的,其与病虫害的特点相关。不同病虫害会引起作物相同波段处的光谱反射率差异,在小麦条锈病监测方面,研究发现630~687nm,740~890nm和976~1350nm处波段对条锈病较为敏感,而有学者则发现小麦条锈病与560~670nm波段的反射率变化有密切关系。在当前病虫害遥感探测的研究与实践中,往往不直接使用光谱反射率,一般是基于各种类型的植被指数进行分析。截至

目前,越来越多不同形式的植被指数被提出,这些指数也具有一定的生物或理化意义,通常是利用敏感波段组合、插值、比值等代数形式进行构建。国内已有较多研究尝试通过各类植被指数建立遥感信息与病虫害之间的联系,有学者采用改正型叶绿素吸收比值指数和优化土壤调节植被指数的组合对小麦病害下的色素变化进行监测,并建立了这两个指数与受条锈病感染小麦间的良好相关关系;有采用水体指数对番茄病虫害进行探测,并建立了两者之间的联系;其中,较常见的植被指数为归一化植被指数和比值植被指数,有研究人员利用比值植被指数和三角形植被指数进行了小麦病害诊断,并取得良好效果;此外,还有利用波段区间内的吸收深度和吸收面积来建立与作物病害程度间的关系;除了基本的植被指数外,一般还可以光谱进行微分处理,通过获取的一阶微分光谱,对敏感波段进行组合等,建立指数与病情间的相关关系。

在利用遥感技术进行作物病虫害识别和病害程度区分时,除了选取合适的波段和病害监测指数外,还需要选用合适的病害识别和区分算法,以建立作物光谱与病害之间的关系。目前国内外研究人员针对不同类型的病虫害特点,提出了各种各样的方法和模型,一般可以分为两类:基于高光谱非成像数据和基于成像光谱数据的作物病虫害识别与区分。在高光谱非成像数据分析病害研究中,有学者利用回归分析构建了小麦条锈病病害程度的反演模型;有研究团队运用主成分分析、概率神经网络和支持向量机等多种数据挖掘算法进行光谱数据分析和模型的构建,在水稻稻瘟病、稻纵卷叶螟、稻干尖线虫病、水稻胡麻斑病等多种病害的识别、监测方面开展了系列研究;还有的学者使用非线性软间隔分类机,以红边面积和红边位置作为输入向量,进行水稻干尖线虫的研究;利用主成分分析技术和概率神经网络相结合,也可以实现对多种水稻病虫害进行快速、精准的分类识别;除了以上的分析方法以外,常用的还有偏最小二乘回归和人工神经网络等方法被用于作物的病害识别和区分。在基于成像光谱数据的作物病害研究方面,国内有学者借助航空高光谱图像,利用回归分析技术建立了小

麦条锈病的病害反演模型；主成分分析也在成像光谱数据中得到了重要应用，并被应用到柑橘溃皮病识别，以及结合交互自组织数据分析技术进行了棉花根腐病的提取等。

1.2.2 国外研究现状

20世纪60年代以来，随着空间遥感技术的快速发展，以及粮食安全预警、农产品贸易、农产品补贴等对粮食信息的强烈需求，国际上相继开展了农业灾害遥感监测技术与业务系统建设。欧美等发达国家实施了一系列重大计划，率先开展了农业灾害监测工作，并形成了业务化运行系统。美国“国家集成干旱信息系统”于2003年正式在全国范围内运行，对全国干旱进行监测和分析，并预测下一周干旱发展趋势。

国外在基于气象数据进行农作物病害监测方面，也是主要集中于气象条件，其中有学者通过分析温度、相对湿度等因子在不同生育期内，分析了番茄白粉病孢子萌发的适宜气象条件；还有采用以周为单位的温度、湿度等气象数据对印度地区油菜蚜虫进行预测，构建的模型能提前一周预测蚜虫的发生，可提前进行病害防治；在决策支持方面，有学者通过理论模型模拟了气象条件波动性和作物病虫害发生程度以及作物产量的关系。

研究作物受病虫害危害后的光谱变化，寻找病虫害危害程度与原始光谱、植被指数、光谱导数等变化之间的关系，确定不同作物和病虫害监测的敏感波段和敏感时期，是利用遥感技术监测农作物病虫害研究的热点和关键。国外在利用遥感技术进行作物病虫害方面，与国内所采用的研究思路大致相同，即从病虫害生理机制分析开始，确认病虫害敏感波段，并构建病害监测指数，依此建立预测模型实现作物病害的预测等。

在作物病虫害胁迫下光谱响应特征位置分析方面，有研究人员运用反射率光谱，在冠层和叶片尺度上对稻穗瘟进行识别，发现随受病稻粒的增加，水稻光谱反射率在430~530nm、580~680nm和1480~2000nm范围内均有提高（Kobayashi, 2001）；感染白粉病和全蚀病的小麦在490nm、510nm、516nm、540nm、780和1300nm波段处的光谱会发生强

烈的响应 (Graeff, 2006), 且小麦条锈病与680、725和750nm这三个波段的关系较密切; 黄瓜在受到*Colletotrichum orbiculare*病菌感染后, 会在380~450nm和750~1200nm波段处出现吸收特征的改变; 番茄叶片在受叶斑病感染后, 会造成395nm、633~635nm和750~760nm处的光谱反射率显著改变 (Jones, 2010)。

在病害监测指数构建方面, 目前国外主要采用的也是一般的植被指数以及波段间的组合等形式, 其中应用较多的一个指数就是归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 有用其来判别分析小麦条锈病病情信息, 准确率超过95% (Bravo, 2003); NDVI还可对甜菜病害进行检测 (Steddom, 2003)。有研究也发现氮反射率指数、结构不敏感植被指数、植被衰老指数和归一化叶绿素比值指数能够识别并进一步区分小麦病害以及病害的不同亚型 (Devadas, 2009); 在受病害侵染后, 一般对病害敏感的波段主要集中在可见光的绿光波段以及近红外波段处, 其中在红光波段到近红外波段区间的红边波段会反映强烈, 且已经被广泛应用到多种作物的病害监测中。

在进行病虫害遥感识别和区分过程中, 基于高光谱非成像数据的方法以统计和数据挖掘为主。在小麦病害研究方面, 有国外研究者采用方差分析、相关分析和回归分析的方法, 研究了小麦条锈病和全蚀病病情与光谱特征之间的关系, 并对病害敏感的波段进行了筛选, 还有学者结合成分分析和主成分分析对小麦褐斑病进行了研究, 并达到较好的效果; 经过主成分变化后的光谱对猕猴桃的灰霉病和核盘霉病的早期诊断具有显著效果; 判别分析可在早期对葡萄卷叶病进行诊断 (Naidu, 2009); 利用支持向量机可建立光谱信息和甜菜病斑间的高精度识别模型 (Rumpf, 2010)。以上基于高光谱非成像数据的研究方法基本上是通过统计判别、回归模型或数据挖掘建立光谱特征与病虫害类型和病害程度之间的关系。近年来, 使用成像光谱分析作物病虫害的研究不断增多, 且观测尺度也在逐渐扩展, 慢慢由近地平台扩展到航天平台, 而国外在这方面的研究要多于国内, 目前所使用的分析和建模方法主要集中于对图像中光谱和空间的变异

信息的提取。有研究基于逐步判别分析和图像机器视觉方法对小麦赤霉病进行识别和区分研究,并取得较好的结果,为高光谱图像在小麦赤霉病的监测方法提供了技术支持(Delwiche, 2000);在小麦条锈病的监测上,结合自组织图、神经网络和二次判别分析,在光谱图像中可有效地提取小麦条锈病信息,有研究人员基于Quickbird卫星影像,利用光谱角度制图和混合调谐滤波算法进行了小麦白粉病和条锈病的识别(Jonas, 2007),这些研究成果为病虫害的遥感监测提供丰富的经验。

参考文献

- 曹宏, 兰志先. 2003. 试论陇东小麦条锈病发生原因与防治对策[J]. 麦类作物学报, 23(3): 144-147.
- 陈刚, 王海光, 张录达. 2006. 小麦条锈病流行相关性研究初报[J]. 中国农学通报, 22(7): 420-425.
- 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 1998. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 胡小平, 杨为之, 李振岐, 等. 2000. 汉中地区小麦条锈病的BP神经网络预测[J]. 西北农业学报, 9(3): 28-31.
- 黄敬峰, 王福民, 王秀珍. 2010. 水稻高光谱遥感实验研究[M]. 杭州: 浙江大学出版社.
- 黄木易, 黄文江, 刘良云, 等. 2004. 冬小麦条锈病单叶光谱特性及严重度反演[J]. 农业工程学报, 20(1): 176-180.
- 黄木易, 王纪华, 黄文江, 等. 2003. 冬小麦条锈病的光谱特征及遥感监测[J]. 农业工程学报, 19(6): 154-158.
- 李波, 刘占宇, 黄敬峰. 2009. 基于PCA和PNN的水稻病虫害高光谱识别[J]. 农业工程学报, 25(9): 143-147.
- 李波, 刘占宇, 武洪峰, 等. 2009. 基于概率神经网络的水稻穗颈瘟高光谱遥感识别初步研究[J]. 科技通报, 25(6): 811-815.
- 刘良云, 黄木易, 黄文江, 等. 2004. 利用多时相的高光谱航空图像监测冬

- 小麦条锈病[J]. 遥感学报, 8 (3): 275-281.
- 刘占宇, 黄敬峰, 陶荣祥, 等. 2008. 基于主成分分析和径向基网络的水稻胡麻斑病严重度估测[J]. 光谱学与光谱分析, 29 (9): 2 156-2 160.
- 刘占宇, 石晶晶, 王大成, 等. 2010. 稻干尖线虫病胁迫水稻叶片波谱响应特征及识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 30 (3): 710-713.
- 刘占宇, 孙华生, 黄敬峰. 2007. 基于学习矢量量化神经网络的水稻白穗和正常穗的高光谱识别[J]. 中国水稻科学, 21 (6): 664-668.
- 刘占宇, 王大成, 李波, 等. 2009. 基于可见光/近红外光谱技术的倒伏水稻识别研究[J]. 红外与毫米波学报, 28 (5): 342-345.
- 强中发. 1999. 1988年青海省小麦条锈病发生程度的马尔柯夫链预测[J]. 植物保护, 25 (4): 19-22.
- 石晶晶, 刘占宇, 张莉丽, 等. 2009. 基于支持向量机 (SVM) 的稻纵卷叶螟水稻高光谱遥感识别[J]. 中国水稻科学, 23 (3): 331-334.
- 宋晶晶, 曹远银, 李天亚, 等. 2011. 小麦白粉病菌空中孢子量与气象因子的关系及病害预测模型的建立[J]. 湖北农业科学, 50 (13): 2 652-2 654.
- 王静. 2015. 多源遥感数据的小麦病害预测监测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学.
- 张旭东, 尹东, 万信, 等. 2003. 气象条件对甘肃冬小麦条锈病流行的影响研究[J]. 中国农业气象, 24 (4): 26-28.
- Bravo C, Moshou D, West J S, et al. 2003. Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance[J]. Biosystems Engineering, 84 (2): 137-145.
- Delwiche S R, Kim M S. 2000. Hyperspectral imaging for detection of scab in wheat[J]. Biological Quality and Precision Agriculture II, 4203: 13-20.
- Devadas R, Lamb D W, Simpfendorfer S, et al. 2009. Evaluating ten spectral vegetation indices for identifying rust infection in individual wheat leaves[J]. Precision Agriculture, 10 (6): 459-470.

- Graeff S, Link J, Claupein W. 2006. Identification of powdery mildew and take-all disease in wheat by means of leaf reflectance measurements[J]. Central European Journal of Biology, 1 (2) : 275-288.
- Huang W J, Huang M Y, Liu L Y, et al. 2005. Inversion of the severity of winter wheat yellow rust using proper hyper spectral index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 21 (4) : 97-103.
- Huang W J, Lamb D W, Niu Z, et al. 2007. Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging[J]. Precision Agriculture, 8 (5) : 187-197.
- Jonas F, Menz G. 2007. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing[J]. Precision Agriculture, 8 (3) : 161-172.
- Jones C D, Jones J B, Lee W S. 2010. Diagnosis of bacterial spot of tomato using spectral signatures[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 74 (2) : 329-335.
- Kobayashi T, Kanda E, Kitada K, et al. 2001. Detection of rice panicle blast with multispectral radiometer and the potential of using airborne multispectral scanners[J]. The American Psychopathological Society, 91 (3) : 316-323.
- Liu Z Y, Huang J F, Shi J J, et al. 2007. Characterizing and estimating rice brown spot disease severity using stepwise regression, principal component regression and partial least-square regression[J]. Journal of Zhejiang University-Science B: Biomedicine and Biotechnology, 8 (10) : 738-744.
- Liu Z Y, Shi J J, Zhang L W, et al. 2010. Discrimination of rice panicles by hyperspectral reflectance data based on principal component analysis and support vector classification[J]. Journal of Zhejiang University-Science: Biomedicine and Biotechnology, 11 (1) : 71-78.
- Liu Z Y, Wu H F, Huang J F. 2010. Application of neural networks to