



作物病虫害遥感监测研究进展

陈兵¹, 李少昆^{1,2*}, 王克如^{1,2}, 柏军华², 隋学艳¹, 白彩云¹

(1. 新疆兵团绿洲生态农业重点开放实验室, 石河子大学新疆作物高产研究中心, 石河子 832000; 2. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要:近年来,随着信息技术的迅速发展,遥感作为一种快速监测手段已经被运用到作物病虫害监测中。本文阐述了作物病虫害遥感监测的基本原理及特点,重点介绍了国内外在其技术方法上的研究进展,提出了生产应用中的技术流程。进一步分析了当前本领域研究中的难点,展望了其应用前景,以期对棉花病虫害遥感监测研究提供借鉴与参考。

关键词:作物;病虫害;遥感;技术方法

中图分类号:S562 **文献标识码:**A

文章编号:1002-7807(2007)01-0057-07

Studies of Remote Sensing on Monitoring Crop Diseases and Pests

CHEN Bing¹, LI Shao-kun^{1,2*}, WANG Ke-ru^{1,2}, BAI Jun-hua², SUI Xue-yan¹, BAI Cai-yun¹

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan, Shihezi University, Research Center of Xinjiang Crop Yield, Shihezi University, shihezi 832003, Xinjiang, China; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: With the rapid development of information technology, remote sensing, as a fast monitoring means, has been used in monitoring crop diseases and pests in recent years. Some domestic and overseas scholars have had some bold experiments and made a great deal of achievements. Basic theorems of remote sensing of monitoring crop diseases and pests were elaborated in this thesis, meanwhile its characteristics were summarized, and especially recent progresses, then their application prospect was analyzed. The technical methods mostly could be divided into seven parts according to lots of experiments: analytic technology of spectral reflectance, of regression mode, of vegetation index, of derivative spectra, of basic variable of spectral site, of remote sensing image and of multi-angular remote sensing. The critical technology step of monitoring for diseases and pests on crop was introduced. At the same time, some difficulties were analyzed, and progress in this field was looked into as well. With regard to the prospect of remote sensing for monitoring crop diseases and pests, four points were put forward; 1) Basic principle of monitoring crop diseases and pests by near ground remote sensing should be profoundly developed; 2) Lots of experiments of characteristic relation between remote sensing images and crop pests should be studied; 3) new methods of monitoring crop diseases and pests should be explored; 4) Under the real-time monitoring by remote sensing condition, the information system platform for integrated pest management on plant should be established.

Key words: crop; diseases and pests; remote sensing; technical methods

病虫害是农业生产的主要障碍,是限制作物产量的主要因素。据统计,因病虫害,每年世界农业减产约 1/3,我国农业减产约 10%~15%,其中棉花减产约 15%~20%^[1],且有日益加重的趋

势。因此,尽早发现病虫害,及时进行科学防治,是提高作物产量,减少其经济损失的关键技术,而对病虫害的实时监测又是对其进行综合防治的有效保障。

遥感是在不直接接触目标物体的情况下,通过接收目标物体的反射或辐射电磁波,探测地物波谱信息,并获取目标地物的图谱信息,从而实现对地物定性及定量描述的技术^[2]。遥感因其能快速、高效、准确地提供农业信息而成为国家宏观调控、科学决策的有力工具。近年来,随着高光谱、多光谱、遥感影像技术的迅速发展,为通过航空、航天遥感实现大面积、快速获得包括病虫害在内的量化的作物信息成为可能^[3]。本文对国内外学者在水稻、小麦、大豆等作物上开展病虫害遥感监测研究取得的进展进行综述,以期对棉花病虫害遥感监测提供借鉴与参考。

1 作物病虫害遥感监测的基本原理及特点

1.1 作物病虫害遥感监测的基本原理

各种物质因结构与组成成分不同,大多数地物又具有 BRDF(双向反射分布函数)各向异性的反射特性,所以在光谱反射与辐射特性方面有差异,从而具有该物体诊断意义的光谱特征^[4]。据此,不同作物或同一作物在不同生长季节、不同角度和病虫害危害及程度下,有其特殊意义的诊断性光谱特征。因此通过光谱分析技术可以探测作物的健康状况以及病虫害发生情况。

作物病虫害遥感监测主要在单叶与冠层两个层面上展开。对单叶,因病虫害危害导致叶片细胞结构、色素、水分、氮素含量及外部形状等发生变化,从而引起光谱的变化;对冠层,因病虫害危害引起 LAI、生物量、覆盖度等的变化,可见光到热红外波谱反射光谱与正常作物有明显差异。在大尺度上,病虫害危害作物、高光谱扫描记录上会引起灰度值的差异,在空间相、光谱相和时间相上有明显的差异^[5-6]。

因此,可通过地面获得的遥感数据结合高空成像仪获得的遥感影像监测作物病虫害。

1.2 作物病虫害遥感监测的特点

传统的病虫害监测主要是人工调查,田间取样,综合其它信息进行预测预报,做出决策,但该方法耗时、费力,时效性差,一定程度上影响了预测预报的及时性与精确性。应用遥感技术监测作物病虫害,通过图谱分析,可及早了解作物健康状

况信息,获得作物病虫害发生、发展的定性和定量及空间分布信息,从而为决策者在病虫害未造成严重为害前有针对性地决策、及时采取措施,加强重点防治,提供数据支持。

利用遥感技术特别是高光谱、卫星技术监测病虫害,具有快速、简便、宏观、无损、客观等优点,是作物病虫害监测的发展方向^[7-8]。

2 作物病虫害遥感监测的技术方法与流程

2.1 作物病虫害遥感监测的技术方法

遥感,特别是高光谱遥感数据,在增加了光谱信息的同时也给数据传输、储存和处理带来了一定困难。因此,发展遥感数据分析技术可增强遥感应用范围和深度。以往的研究中,如光谱反射率、回归分析、植被指数、光谱微分、基于光谱位置变量的分析、遥感影像、多角度遥感等数据分析方法与技术被大量应用。其不仅用于监测作物水、肥、生化组分等信息,而且在作物病虫害监测方面也得到迅速发展^[9-10]。

2.1.1 光谱反射率分析技术。它是一种直接、简单和快速的分析技术。它从传感器直接获得的数据入手,分析其转化后的光谱反射率特征,获取植被信息,具有普适性。

以往研究虽然更多的使用反射光谱数据来估测作物光合有效辐射、LAI 和叶绿素含量等生物物理参量,但也有估测作物病虫害的。如 Ponzoni 等用 PEC-TRONSE-590 光谱仪(光谱波段 400~900 nm)和 LICON 积分球研究作物缺素时的光谱特性,认为在可见光波段能检测到作物缺钾症状^[11]。刘兴库等发现接种马铃薯奥古巴花叶病毒烟草早期的叶片在可见光部分与对照组无明显区别,但在近红外差别明显^[12]。黄木易等对冬小麦条锈病光谱反射率特征进行深入研究后提出了冬小麦条锈病遥感监测的敏感波段^[13]。

他们的研究都较多地考虑了作物病害的光谱特性,而较少地考虑病害导致作物体内生理生化变化,因此只能定性的分析其光谱特征。在今后的研究中若能将其光谱特征与不同发病程度及生理生化指标建立对应关系的话,可望实现病害的半量化或量化监测。

2.1.2 回归模型分析技术。遥感的实质是反演,反演可以通过反演模型来实现。在作物病虫害监测研究中应用最多的是一元和多元回归模型,包括:简单线性函数 $y=a+bx$,对数函数 $y=a+b \times$

$\ln(x)$, 抛物线 $y = a + bx + cx^2$, 一元三次函数 $y = a + bx + cx^2 + dx^3$, 指数函数 $y = a \times \exp(bx)$, 多元线性函数 $y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_i x_i + \dots$ [14]。

近年来,国内学者在回归模型分析技术用于作物病虫害监测方面做了大量研究。牛铮等对小麦叶片光谱进行了分析,建立的估算鲜叶氮素含量的回归模型相关系数达 0.99,能很好地反映氮素丰缺状况[15]。王登伟等对棉花整个生长期进行监测,建立了早衰棉花反射光谱与叶片光合速率的线性回归方程,相关系数达到了 0.975[16]。蔡成静等对小麦条锈病进行了单叶及冠层的光谱特征研究,建立了病情指数(y)与冠层光谱反射率(x)回归模型,相关系数达到了 0.9484[17]。黄木易等对冬小麦条锈病光谱进行了研究建立了条锈病反演的一元和多元回归方程,建立的模型具有很高的精度[18]。

通过回归模型反演作物病虫害,虽然实效性差,但能实现病虫害的定量监测,今后的研究中若能将其与气象、栽培等因素相结合,可大大提高病虫害的预测预报精度。

2.1.3 植被指数分析技术。根据植被光谱特性,将可见光和近红外波段进行组合,形成各种植被指数。目前已经定义了 40 多种植被指数,在作物病虫害监测中,常见的光谱植被指数有比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)和一些变换的植被指数。

Miller 等研究发现,作物生长与 R_{650}/R_{850} 具有很好的相关性,其比值大,表明作物生长好,比值小,则表明作物发育不良[19]。Gregory 研究了 8 种胁迫下的作物反射率比值特征,发现叶片中 R_{695}/R_{420} 和 R_{695}/R_{760} 与胁迫显著相关[20]。杨建国等对不同蚜量的春小麦进行光谱监测,建立 $RVI = TM4 / TM3 \times$ 标准板值,用来推测蚜量,以指导蚜虫防治[21]。Suryanarayana 等研究发现玉米,花生和大豆的 NDVI 与叶绿素含量呈现正相关,可以用来反映作物受胁迫引起的色素变化[22]。Yang 等通过比较 16 波段多光谱植被指数与 Landsat TM 的宽波段植被指数对麦二叉蚜危害的敏感性,发现多光谱植被指数并未比 Landsat TM 宽波段植被指数对麦二叉蚜危害的敏感性高[23]。黄木易等研究了冬小麦条锈病光谱,对 NDVI、RVI、TVI 和 $\log p$ 等进行变换,利用相关性最好的 666 nm 和相关性最弱的 758 nm 波段组合设计了光谱角度指数 SAI(Spectral an-

gle index),并建立条锈病胁迫指数 SRSI(stripe rust stressed index)反演冬小麦条锈病的发生情况[8]。刘良云等利用多时相高光谱航空图像对冬小麦条锈病监测,定义了相对病害光谱指数 = $[(Red_{disease} - Red_{Normal}) / Red_{Normal}] \times [(NIR_{Normal} - NIR_{disease}) / NIR_{Normal}]$,成功反演了病害区条锈病发病程度[24]。

以往的研究中虽然构建了较多的病虫害植被指数,但构建方法与标准都不统一,普适性差,且未见棉花病虫害植被指数的相关报道。若能在今后的研究中建立统一的植被指数构建方法和标准,将其应用到棉花病虫害监测中,可提高监测的灵敏性和准确性。

2.1.4 光谱微分技术。在太阳光的大气窗口内,测得的光谱是地物吸收光谱及大气吸收和散射光谱的混合光谱,一般是以反射率的数据图像表达。为了正确地解译遥感数据图像,消除大气和背景噪音的影响,从中提取目标物体的特征信息,人们使用了微分光谱技术。微分光谱又叫导数光谱,可分为一阶导数光谱和高阶导数光谱。由于光谱采样间隔的离散性,导数光谱一般用差分方法来近似计算。

一阶导数光谱: $\rho'(\lambda_i) = d\rho(\lambda_i)/d\lambda = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda$

二阶导数光谱: $\rho''(\lambda_i) = d^2\rho(\lambda_i)/d\lambda^2 = [\rho'(\lambda_{i+1}) - \rho'(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda = [\rho(\lambda_{i+2}) - 2\rho(\lambda_i) + \rho(\lambda_{i-2})] / 4(\Delta\lambda)^2$

其中, λ_i 为波段 i 波长值; $\rho(\lambda_i)$ 是波长 λ_i 的光谱值(如反射率、透射率等); $\Delta\lambda$ 是波长 λ_{i+1} 到 λ_i 的差值,由光谱采样间隔决定[25]。在光谱微分技术用于作物病虫害监测方面的研究有:发现微分后的 1536 nm 下的反射率值与病指之间存在着明显的正相关,可以用来监测小麦条锈病[13];用地物光谱仪研究大豆和蚕豆斑点葡萄孢子感染后的光谱,发现其一阶反射率高于正常叶片,可以监测到大豆病害[26];利用高光谱二阶导数构建了发黄指数作为大豆黄萎病病情评价指标[27]。

光谱微分技术因其能消除土壤等低频背景噪音,可提高对作物病虫害监测的精度,但以往的研究对同一(或不同)作物不同(或相同)病虫害的微分光谱研究较少,若扩展到相关研究,有望进一步提高病虫害的识别精度。

2.1.5 基于光谱位置变量的分析技术。光谱位置变量指在光谱曲线上具有一定特征的点(最高

点、最低点、拐点等)的波长。其中最常用的是红边效应和光谱吸收特征分析技术。红边参数除通过实测高光谱数据的一阶微分求得外,以 Miller 等提出的倒高斯模型—光谱红边特征的重建模型来拟合植被红边特征最为常用^[28]。该模型数学表达式为:

$$R(\lambda) = R_s - (R_s - R_0) \exp((\lambda - \lambda_0) / 2\sigma^2)$$

式中, R_s 为红边最高点(肩部)的反射率; R_0 为红边最低点(红谷)的反射率; λ_0 为红谷位置波长。各种环境胁迫,如缺氮、干旱,病虫害等均会使作物的反射特性发生改变,从而改变红边位置。

另外,作物光谱维方向的特征信息主要集中在由作物叶片中生物化学成分含量的变化形成的吸收波形处,因此当作物受到病虫害危害时光谱吸收波形处也会发生变化。吴继友等发现受病虫害危害的赤松林随危害程度的加重,叶绿素含量下降,导致红边陡生段斜率的降低^[29]。吴曙雯等研究叶瘟病水稻,发现绿光吸收边缘的特征波长值发生红移,红光吸收边缘和近红外吸收边缘的特征波长值发生蓝移^[30]。黄木易等发现条锈病冬小麦的红边发生蓝移,550~750 nm 处的特征吸收峰的深度、面积与单叶严重度呈极显著负相关^[18]。刘良云等发现条锈病冬小麦冠层光谱红谷吸收深度和绿峰的反射峰高度均较正常小麦减小^[24]。

前人研究中运用光谱位置变量分析技术分析了大量作物病虫害光谱特征位置的特征,对病虫害的识别作出了贡献,但由于不能反映作物受病虫害危害的全波段光谱信息,为病虫害的快速识别带来了困难。

2.1.6 遥感影像分析技术。遥感影像分析技术主要包括数据压缩、混合象元分解、光谱匹配、降维运算、光谱植被指数等。近年来,也有遥感影像分析技术监测作物病虫害的报道。倪绍祥利用遥感影像结合 GIS 对作物蝗虫灾害防治进行了研究^[31]。武红敢等以陆地卫星 TM 数据为例介绍了松毛虫灾害的 TM 影像监测技术,为航天遥感技术用于重大森林病虫害的宏观监测和预警提供了实例^[32]。刘良云等利用多时相的高光谱航空图像对冬小麦条锈病进行了监测,成功地将不同时相感病的冬小麦从正常的冬小麦中区分出来,并进一步划分感病程度^[24]。

该项技术目前在病虫害监测中仍存在较多的困难,但由于可以从大尺度上分析作物病虫害的发生发展情况,若能与地面非成像光谱数据处理

方法相结合,将大大提高监测的实效性和普适性。

2.1.7 多角度遥感分析技术。多角度遥感技术主要指在地面 BRDF 和多角度卫星方面的应用研究技术。与传统的垂直观测遥感方式相比,多角度遥感追求的不仅是地面目标的平面位置和大小,而且是目标在三维空间的结构特征的获取。运用多角度遥感监测作物病虫害尚处在起步阶段,但由于作物病虫害自身的特点决定了多角度遥感在这方面的应用潜力,是作物病虫害遥感监测的新途径,必将在今后的研究中发挥更大的潜力。

以上七种遥感监测技术方法是目前病虫害遥感监测研究中最常用的技术方法。因其各有优缺点,所以,在今后的研究中特别是棉花病虫害的遥感监测中应根据研究需要有选择的使用。当然,其它研究方法,如多光谱遥感等也可尝试着运用,本文就不做重点叙述了。

2.2 作物病虫害遥感监测的技术流程

作物病虫害遥感监测的技术流程,见图 1。

3 讨论与展望

3.1 作物病虫害遥感监测的难点

3.1.1 “同物异谱”和“同谱异物”现象。大量试验表明,同一作物在不同(或相同)生育时期可能遭受相同(或不同)病虫害的危害,在反射光谱上表现的特征各异。同一作物在不同传感器或角度上所得到的光谱数据也不相同。多数被真菌侵染的作物,其反射光谱曲线均在绿光谱段(500~600 nm)和红光光谱段(600~700 nm)有所增高,而在近红外光谱段(700~1000 nm)下降,且随波长增大反射率下降程度逐渐加大而形成“圆肩”形^[33]。这些“同物异谱”和“同谱异物”现象增加了遥感监测病虫害进行光谱信息匹配的难度,也增加了病虫害识别的难度。虽然运用光谱微分、多角度遥感等技术方法可以在一定程度上避免“同物异谱”和“同谱异物”带来的困难,但就技术方法本身而言,仍有很多亟待解决的困难。所以,在相当长的一段时期,该现象仍将是监测中的主要困难,仍需不断探索更好的解决方法。

3.1.2 传感器分辨率与病虫害监测的要求。由于病虫害表现病症前,作物体内的生化组分已经发生变化,到表现症状时作物已受到较大损害,而目前用于作物病虫害监测的同一传感器很难同时满足高空间、高光谱和高时相分辨率的要求,影响了作物病虫害监测的精度。所以,今后应不

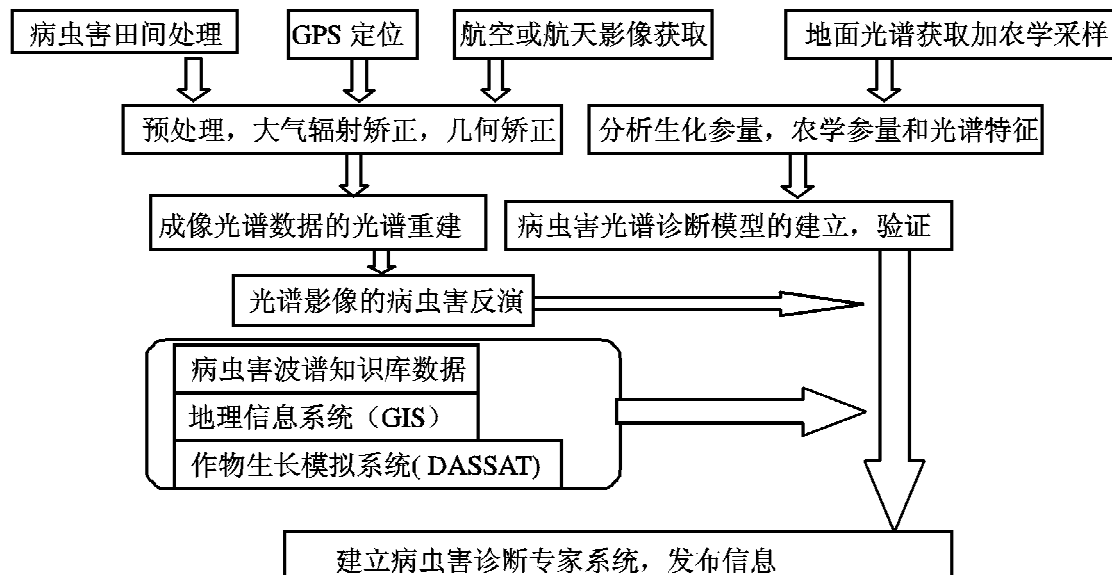


图 1 遥感监测农作物病虫害技术流程

Fig. 1 The critical technology step of monitoring for diseases and pests on crop

断发展高光谱分辨率和高空间分辨率的遥感传感器,以提高监测精度,同时提高时间分辨率,不断完善遥感影像、多角度等分析技术,以确保在作物病虫害发生的早期获取准确信息,并及时防治,把因病虫害造成的损失降到最低。

3.1.3 作物病虫害光谱监测模型与多源信息综合利用。近年来,随着遥感技术的广泛研究和应用,国内外学者利用植被指数和回归模型等分析技术建立了大量的作物光谱反演模型,其中也不乏一些病虫害反演模型。但由于影响光谱数据的因素很多,获取的实验结果往往存在适用性问题^[34]。这些模型一般又都是线性和非线性拟合的统计模型,有较大的局限性,真正能够用来定量反演的较少,尤其用于反演作物病虫害的更少。因此,如何在不影响监测要求的情况下扩大模型的适用性,也是研究的难题。另外,遥感专家与植保专家的合作还不够紧密,病虫害波谱数据库、数据采集规范还不够完善,缺乏实践应用的技术支持,这些都增加了作物病虫害的遥感监测难度。因此,建立高精度的病虫害光谱定量反演机理模型,加强多源信息的综合利用是今后努力的方向。

由于国家投入的研究经费不足,力度不够,中国精细农业的实施远没有达到空间意义上的精细农业的要求,作物病虫害的监测还没有真正提到议事日程上来,限制了遥感监测作物病虫害技术的发展。因此,需加强学科间、国际间合作,国家投入必需的研究经费,重视病虫害遥感监测研究,以加快解决其研究中的困难。

3.2 遥感监测农作物病虫害的展望

3.2.1 进一步开展作物病虫害近地遥感监测基本原理方面的研究。因为就目前的技术、知识水平而言,有些农情要素仍不能或难以用遥感监测,即使能用遥感监测的要素,由于技术上、经济上的原因,也需要地面监测的补充,同时遥感图像的判读也需要地面数据支持,因此地面监测系统是不可缺少的。而在地面监测系统中,近地遥感又是现代遥感发展的主要方向和不可缺少的组成成分。在绝大多数情况下,近地遥感不需要图像数据,这为高光谱非成像光谱仪测量地物的光谱反射率、透射率及其它辐射率提供了广阔的使用空间和前景。但由于目前作物病虫害监测的研究尚处在起点阶段,作物病虫害的种类很多,而从事这方面的研究人员相对较少,目前可用的非成像光谱数据分析方法还不完善,许多原理和规律还没有完全弄清楚。因此,有必要对作物病虫害近地遥感监测进行更加深入的基础性的研究。

3.2.2 进一步开展遥感图像特征与作物病虫害特征关系的研究。近年来,航空、航天遥感数据获取技术趋向于三多(多平台、多传感器、多角度)和三高(高空间、高光谱和高时相分辨率),使得遥感图像用于病虫害监测趋向于更加可靠和精确。在利用遥感技术进行病虫害监测研究时,主要是对绿色植被生物量, LAI 变化等特征进行监测,同时考虑到遥感图像的高空间、高光谱和高时相分辨率,应在今后的研究中综合运用 Landsat/MSS、TM、MODIS 及 NOAA/AVHRR 图像信息,遥感

监测分析技术,同时开展更为详细的地面实况调查,才有可能实现对病虫害进行动态监测的目的。这是遥感监测作物病虫害的发展趋势。

3.2.3 进一步探索作物病虫害技术方法的研究。虽然遥感技术方法的发展在经历了很长的一段时间以后已日趋完善,也有很多已运用在作物病虫害遥感监测中,但由于各种技术方法难免存其自身缺点,同时,由于遥感技术的不断发展,新的技术方法不断涌现,必将给作物病虫害研究带来新的革命,在今后的研究中不断探索更好更完善的作物病虫害技术方法是今后努力的方向。

3.2.4 遥感实时监测条件下作物病虫害综合防治信息平台的建立。随着信息技术的迅速发展,遥感与GIS、GPS、DASSAT等信息技术的融合已很好地展示其应用潜力^[35],该项技术成本较低,易掌握,并能实时得到图像,即时进行分析处理,作为一种平台与其它信息技术互相补充,为建立遥感实时监测条件下作物病虫害综合防治信息平台奠定了坚实的基础,为病虫害综合防治提供了有效保障。为作物病虫害的监测开拓了新的途径,将有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 张存信. 棉花灾害及防灾减灾技术[M]. 北京:中国农业科技出版社,2001:176-180.
- [2] 朱述龙,张占睦. 遥感图像获取分析[M]. 北京:科学出版社,2000:153-157.
- [3] 梅安新,彭望,秦其明等. 遥感导论[M]. 北京:高等教育出版社,2001:240-245.
- [4] 日本卡农公司图象研究室. 遥感-遥感技术的发展及其应用研究[M]. 王历译. 北京:科学出版社,1983:36-44.
- [5] 黄春燕,王登伟,陈冠文,等. 基于高光谱植被指数的棉花干物质积累估算模型研究[J]. 棉花学报,2006,18(2):115-119.
- [6] 李亚兵,毛树春,王香河,等. 棉花早衰程度诊断数码图像数字化指标的研究[J]. 棉花学报,2006,18(3):160-163.
- [7] 王春艳,磯田昭弘,王道龙,等. 新疆石河子棉区高密度条件下冠层结构和光分布特征[J]. 棉花学报,2006,18(4):223-227.
- [8] 黄木易,王纪华,黄义德,等. 高光谱遥感监测冬小麦条锈病的研究进展(综述)[J]. 安徽农业大学学报,2004,31(1):119-122.
- [9] 赵艳霞,秦军,周秀骥. 遥感信息与棉花模型结合反演模型初始值和参数的方法研究[J]. 棉花学报,2005,17(5):280-284.
- [10] 祁亚琴,王登伟,陈冠文,等. 基于高光谱数据提取作物冠层特征信息的研究进展[J]. 棉花学报,2005,17(6):371-375.
- [11] PONZONNI F J. Spectral features associated with nitrogen, phosphorus and potassium deficiencies in *Eucalyptus saligna* seeding leaves[J]. Int J Remote Sensing, 1999,20(11):2249-2264.
- [12] 刘兴序,李兆华. 多光谱诊断植物病害的初步研究[J]. 东北林业大学学报,1993,21(2):106-110.
- [13] 黄木易,王纪华,黄文江,等. 冬小麦条锈病的光谱特征及遥感监测[J]. 农业工程学报,2003,19(6):154-158.
- [14] 王秀珍,黄敬峰,李云梅,等. 水稻地上鲜生物量的高光谱遥感估算模型研究[J]. 作物学报,2003,29(6):815-821.
- [15] 牛铮,陈永华,隋洪智,等. 叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析[J]. 遥感学报,2000,4(2):125-130.
- [16] 王登伟,李少昆,田庆久,等. 棉花主要栽培生理参数的高光谱估测研究[J]. 中国农业科学,2003,36(7):770-774.
- [17] 蔡成静,王海光,安虎,等. 小麦条锈病高光谱遥感监测技术研究[J]西北农林科技大学学报增刊,2005,33:31-36.
- [18] 黄木易,黄文江,刘良云,等. 小麦条锈病单叶光谱特性及严重度反演[J]. 农业工程学报,2004,20(1):176-180.
- [19] MILLER J R. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance 1. an inverted - Gaussian reflectance mode[J]. Int J Remote sensing,1990,11(10):1755-1773.
- [20] GREGORY A C. Carter ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress[J]. Int J Remote sensing, 1994,15(3):697-703.
- [21] 杨建国,金晓华,郭永旺,等. 遥感技术麦蚜监测应用研究[J]. 中国农学通报,2001,17(6):4-8.
- [22] SURYANARAYANA G R. Influence of plant pigments on spectral reflectance of maize Groundnut and soybean grown in semi-arid environments[J]. Int J Remote Sensing, 2001,22(17):3373-3380.
- [23] YANG Z, Raob M N, Elliott N C, et al. Using ground-based multispectral radiometry to detect stress in wheat caused by greenbug (*Homoptera: Aphididae*) infestation [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2005,47:121-135.
- [24] 刘良云,黄木易,黄文江,等. 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, 2004, 8(3): 276-281.
- [25] 王秀珍, 李建龙, 唐延林. 导数光谱在棉花农学参数测定中的作用[J]. 华南农业大学学报, 2004, 25(2): 17-21.
- [26] MALTHUS T J, Maderia A C. High resolution pectroradiometry: spectral reflectance of field bean leaves Infected by botrytis abae[J]. Remote Sense. Environ, 1993, 45:107-116.
- [27] ADAMS M L, Philpot W D, Norvell W A, et al. Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation[J]. Int J Remote Sensing, 1999, 20(18): 3663-3675.
- [28] MILLER J R, Hare F W. Quantitative characterization of the vegetation red reflectance-an interted-gaussian reflectance model[J]. Int J Remote Sensing, 1990, 11(10):1755-1773.
- [29] 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):250-251.
- [30] 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, 2002, 20(1): 73-84.
- [31] 倪绍祥, 蒋建军, 王杰臣. 遥感与 GIS 在蝗虫灾害防治研究中的应用进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(1):97-100.
- [32] 武红敢, 石 进. 松毛虫灾害的 TM 影像监测技术[J]. 遥感学报, 2004, 8(2):173-177.
- [33] 郑 威, 陈述彭. 资源遥感纲要[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995:393-396.
- [34] 陈鹏程, 张建华, 雷勇辉, 等. 高光谱遥感监测农作物病虫害研究进展[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2):388-391.
- [35] ZHANG B L, Song S J, Feng W L, et al. Assessment and risk zonation of landslides in Panxi area based on 3S technology[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences 2006, 11(4):793-800. ●