

遥感技术在农作物病虫害监测中的应用浅析

司政邦¹, 乔欢欢¹, 依斯麻¹, 李博宇², 杨 飞², 郭武军³

(1. 西藏自治区农业技术推广服务中心, 西藏 拉萨 850000; 2. 陕西省农业技术推广总站, 陕西 西安 710000; 3. 西藏自治区山南市职业技术学校, 西藏 山南 856000)

摘 要: 农作物病虫害调查存在时效性差、代表性不强、人为影响因素多等方面的短板, 利用遥感技术进行农作物病虫害监测预测, 具有很好的补充作用。基于3S(RS、GIS、GPS)技术的发展, 遥感技术在农作物病虫害监测中的研究和应用逐步深入。本文对遥感技术的基本原理及其在国内外农作物病虫害监测方面的应用研究进展进行了综述, 以促进遥感技术在农作物病虫害监测中的应用研究, 为今后农作物病虫害预测监测方法的研究提供一个方向。

关键词: 遥感技术; 农作物; 病虫害监测; 应用

中图分类号: S435

文献标志码: A

Application of Remote Sensing Technology in Crop Diseases and Pest Monitoring

SI Zhengbang¹, QIAO Huanhuan¹, Yi Sima¹, LI Boyu², YANG Fei², GUO Wujun³

(1. Agricultural Technology Extension Service Center of Tibet Autonomous Region, Tibet Lhasa 850000, China; 2. Shaanxi Agricultural Technology Extension General Station, Shaanxi Xi'an 710000, China; 3. Tibet Autonomous Region Shannan Vocational and Technical School, Tibet Shannan 856000, China)

Abstract: In order to make up for the shortcomings in the investigation of crop diseases and pests, such as poor timeliness, weak representativeness, human influence, etc., the use of remote sensing technology in the process of crop disease and pest monitoring and prediction plays a good supplementary role. Relying on the development of 3S (RS, GIS, GPS) technology, the research and application of remote sensing technology in crop disease and pest monitoring has gradually deepened. Through a comprehensive discussion of the basic principles of remote sensing technology, this paper summarized the research progress and application of crop disease and pest monitoring at home and abroad, in order to promote the more extensive research and application of remote sensing technology in crop disease and pest monitoring, and provide a direction for the research of crop pest forecasting and monitoring methods in the future.

Key Words: remote sensing technology; crop; disease and pest monitoring; application

农作物病虫害的发生为我国农业生产带来了巨大损失,且具有区域性发生普遍、外来入侵生物逐渐增加、发生规模不断扩大等特点,促使农药使用数量增加,病虫害抗药性增强,次要性害虫的危害逐步扩大^[1]。传统人工病虫害调查方法存在时效性差、调查采样代表性弱、调查结果受人为因素影响大等缺陷。遥感技术是指利用仪器和设备,在不同的平台(地面、飞机、卫星等)收集地表各类地物的电磁波谱信息,并对收集信息进行提取、判定、加工、处理、分析与应用的一门技术^[2],在作物病虫害监测方面

具有时效性强、连续性强、非接触等特点^[3]。利用遥感手段监测农作物病虫害可改变人为监测存在的弊端,做到早发现、早防治,把病虫害损失降到最低^[4]。本文对遥感技术在病虫害监测中的作用原理、方法及存在的问题和发展趋势进行了综述。

1 遥感在病虫害监测中的作用原理

不同作物自身对不同波段光谱具有一定的反射、吸收和透射能力,当作物受到病虫害侵害后,与正常生长的作物相比,植物体内的色素、水分、蛋白质、酶、细胞形态等会随之发生变化。当作物对不同波段的反射、吸收和透射能力发生改变,颜色随之发生改变^[5]。作物被侵染后反射率发生强弱变

收稿日期: 2023-08-10

作者简介: 司政邦(1985-),男,农艺师,主要从事农业机械的引进与示范推广, E-mail: sizhengbang@163.com。

化,遥感设备接受的影像能量也随之发生变化:当反射能力较强时,影像设备接收的辐射多,颜色变白、变灰;当能量较弱时,接收到的辐射能量较少,颜色随之变黑、变暗,这就是作物病虫害侵染能够被监测的重要原因^[6]。分析比较作物在不同光波波段的变化,研究作物受病虫害侵染情况,并做出防治预案。对获取的光谱资料进行分析反演,做出被病虫害侵害防治判断^[7]。遥感技术通过作物对不同波段的吸收和反射波段采样,利用不同平台的吸收反射分析数据,识别作物的类别及状态^[8]。

2 国内外研究进展

2.1 国外研究进展

遥感技术在农作物病虫害监测中的应用研究最早始于20世纪20至30年代的美国,Neblette^[9-10]利用遥感技术对森林病虫害监测,之后Taubenhaus等^[11]在飞机上安装黑白相机,通过人工读片的方式研究了棉花根腐病危害,1933年Bawden^[12]通过红外摄影相片对马铃薯锈病和烟草花叶病进行研究。1956年Colwell^[13]利用航空影像研究谷类条锈病,首次全面开展植物病虫害研究,确定了航空影像在病虫害研究中的优势。1977年Hielkema^[14]借助Landsat/MSS影像通过对蝗虫生长环境中绿色植被及其动态变化分析,判断蝗虫可能发生的区域。Mukai等^[15]1987年研究了感染山松大小蠹后松树Landsat/MSS红光波段和近红外波段的变化。1989年Lorenzen和Jensen^[16]研究发现近红外波段和病情严重程度有较高相关性,与近红外/红光、绿光/红光反射比有较好的相关性。VogelmannRock^[17]利用多时相TM数据研究梨带蓟马引起的森林损害。Carter等^[18]1994年研究了植物反射率比值在受胁迫时的变化。1999年Riedell和Blackmer^[17]研究了冬小麦受俄罗斯麦蚜虫和麦二叉蚜胁迫时叶片的光谱特征。2002年Zhang等^[18]研究了西红柿枯萎病的光谱识别。2007年Mirik等^[19]研究了冬小麦反射率光谱与虫量关系,提出用虫量光谱指数预测虫量。

2.2 国内研究进展

国内遥感病虫害监测相对于国外起步较晚,但是发展较快,目前已经取得了很多的研究成果。我国遥感病虫害监测的研究最早始于20世纪50年代对华北平原冬小麦条锈病的预测预报。黄木易等^[20]通过遥感技术分析研究了小麦条锈病,确定了条锈病监测敏感波段,建立了病情指数反演模型。

何国金等^[21]研究了不同等级感染稻叶瘟绿光区、红光区、近红光区反射光谱特征,并且做出判别危害程度的反射率变化趋势。吴继友等^[22]研究发现赤松林被病虫害感染后红边位置原始光谱斜率降低。倪绍祥等^[23]利用遥感影像与GIS技术相结合的方法,通过监测蝗虫的生态环境,推断蝗灾可能发生的区域。季荣等^[24]用MODIS遥感数据研究蝗虫危害程度和范围。武红敢等^[25]研究了TM影像数据对松毛虫危害的监测。乔洪波^[26]对冬小麦受到蚜虫和白粉病危害后的冠层高光谱测量和分析发现,NDVI与虫量、病情指数相关性显著。Shi等^[27]研究冬小麦冠层受白粉病、条锈病、蚜虫侵染时的高光谱数据,提取了多个植被指数特征,构建了多种非线性分类器进行监测。

3 作物病虫害遥感监测技术方法

每种作物有一个光谱曲线,遭受病虫害侵染之后,曲线会发生变化,通过对比健康植株与病株的曲线,判断是否受到病虫害侵扰及受害程度^[28]。作物遭受病虫害胁迫后,叶片表面“可见—近红外”波段光谱反射率发生变化,以此作为判断作物遭受病虫害胁迫的直接特征,最终成为作物理化组分的响应^[29]。对敏感波段进行组合,构成的光谱指数不仅拥有明确的物理意义,还能突显病虫害的生理生化过程,实现对病虫害的监测和区分^[30]。

3.1 光谱反射率分析法

光谱反射率分析法是通过分析传感器获得的作物病害的光谱数据,转化为光谱反射率特征,进行健康植株与感病植株的光谱反射率比较,获得作物的光谱特征信息。该方法具有直接、简单、快速和普适性等特征,是其他高光谱分析方法的基础,但较少考虑病害引起的作物体内的其他变化,在以往的研究中更多地使用反射光谱数据来进行分析。Lou等^[31]通过对小麦蚜虫的光谱响应波段研究发现,在700~750 nm、750~930 nm和1 040~1 130 nm时,叶片反射光谱响应显著。罗菊花等^[32]研究表明,小麦冠层在630~687 nm、740~890 nm及976~1 350 nm时的反射率对感染条锈病反应敏感。

3.2 回归模型分析法

回归模型分析法是指对一元和多元回归模型的反演,一元回归模型、多元回归模型、简单线性函数在回归模型分析法判别作物病虫害的监测研究中应用最广。通过对冬小麦条锈病感病后的光谱进行

研究分析,建立一元和多元的条锈病反演回归方程,该方法建立的反演模型具有很高的精度^[33]。

3.3 植被指数分析法

植被指数是依据植被光谱特性,由可见光和近红外波段组合形成。在遥感病虫害检测的研究与实践中,很多情况不直接使用植物的光谱反射率,而是通过各种类型的植被指数进行分析,目前已有40多种植被指数被定义。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^[34]。Wu等^[35]通过研究表明,植被指数能很好地判别作物遭受病虫害为害的情况。罗菊花等^[36]研究表明,利用光谱指数可以有效分析冬小麦蚜虫侵害情况,构建冬小麦蚜虫高光谱指数,与蚜虫登记遥感反演模型相结合,为灌浆期蚜虫监测和预防提供依据。根据植被光谱特性,选用多光谱遥感数据进行分析运算,产生某些对植物长势、生物量等具有一定指示意义的数值。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,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,将其应用到作物病虫害监测中,可提高监测的灵敏性和准确性。

3.4 光谱微分分析法

微分光谱表示光谱曲线上的斜率,是通过微分或数学函数估算整个光谱而得。植物内部物质光谱吸收波形变化是植物光谱导数本质的反映。光谱微分分析法不能产生多余的数据信息,而是减少背景噪音和提高重叠光谱分辨率。微分光谱可根据运算方式分为一阶导数光谱和高阶导数光谱^[37]。蒋金豹等^[38]研究表明,通过对冬小麦冠层一阶微分指数进行分析,能够在冬小麦条锈病症状出现12 d前有效识别有病虫害的植株,可以更加有效监测条锈病的发生。

3.5 基于光谱位置变量的分析法

光谱位置变量指光谱曲线上的最高点、最低点、拐点等特殊点特征的波长。红边效应和光谱吸收特征分析技术被普遍应用。红边现象是指在作物受到病虫害侵染时,作物体内的吸收光谱发生位移变化的现象。红边参数通常是通过实测高光谱数据的一阶微分而求得。基于光谱位置变量的分析法可以有效消除土壤背景的影响^[39]。

3.6 遥感影像分析法

遥感影像分析技术法包括目视解译法和计算

机信息提取法,主要包括数据压缩、混合象元分解、光谱匹配、降维运算、光谱植被指数等方法^[40]。刘良云等^[41]利用多时相的高光谱航空图像对冬小麦条锈病进行监测,有效地把冬小麦不同感病时相区分开来,并进行感病程度划分。刘清旺等^[42]通过陆地卫星TM数据介绍了松毛虫危害的TM影像监测技术,为遥感影像监测分析提供了实例。倪绍祥等^[43]概述了国外利用遥感影像与GIS在蝗虫灾害防治研究中的应用进展并对其进行了总结分析。

3.7 多角度遥感分析法

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^[44]。Zhang等^[45]利用MD(Mahalanobis Distance 马氏距离法)、PLSR(Partial Least Squares Regression 偏最小二乘回归)、MLE(Maximum Likelihood Estimate 最大似然法)和MTMF(Mixture Tuned Matched Filtering 混合调协滤波的混合像元分解法),采用多时相遥感卫星对小麦白粉病进行研究,结果表明,耦合PLSR和MTME监测方法对白粉病的监测精度达到78%。

4 存在问题和发展趋势

遥感技术在作物病虫害监测中的应用随着遥感卫星、无人机及地面光谱等的发展逐步走向成熟,但仍存在需要深入研究和亟待解决的问题。

4.1 存在问题

4.1.1 国际间合作研究较少

随着病虫害发生、发展的变化,遥感病虫害监测逐步迈向国际化,通过国际间合作有利于对病虫害进行早监测、早防治。多方位组织人员协同攻关,助推可供全球范围适用的机理模型的研发工作,逐步在模型开发方法上趋于一致。加强遥感在农作物病虫害监测中的研究,提高监测的准确度,扩大监测的范围,对不同病虫害识别度增加,监测的方式方法更加简便易行^[46]。但目前遥感技术在农作物病虫害监测方面的国际间合作较少,今后需要进一步加强。

4.1.2 成本高,应用效果不佳

遥感技术在使用中成本相对较高,这是目前大规模快速推广应用受限的主要因素之一。今后应通过推广设备的研发和应用速度的加快,促进快速、高效、低成本的遥感监测设备及手段诞生,使监测方法更加简便,数据系统更加全面,病虫害识别更加精准^[47]。

4.1.3 专家系统平台不健全

病虫害的发生发展是一个动态过程,遥感技术在病虫害监测中,往往需要病虫害判别和发展情况的预测,通过构建专家系统,可以有效地在平台内共享数据,对进一步诊断和病虫害发生情况的预测具有很好的指导作用。目前在生产实践中,这样的专家系统平台并不健全,需加大构建力度。

4.1.4 不同环境下病虫害遥感监测的研究少

我国地域辽阔,各省市自然环境和耕地状况差异较大,要加强对不同农田环境条件下的遥感监测的研究。针对病虫害移动性强,要综合考虑各种环境因素对作物病虫害监测带来的干扰,排除干扰带来的监测不确定性的各种因素,以提高精准度,并适应不同农田环境条件下遥感技术对病虫害的监测。

4.1.5 缺少多学科综合研究

遥感在病虫害监测中,不仅仅只限于遥感技术研究,还需要结合农学参数、农业气象参数、植物病理、生长环境参数等,与遥感信息及模型有效整合,通过综合分析病虫害的发生发展情况,为及早做出预测和防治提供有效的支撑。我国遥感技术在病虫害监测中的应用尚缺乏上述多学科的综合研究。

4.2 发展趋势

4.2.1 遥感监测向着可靠与准确方向发展

近年来航空、航天遥感数据获取技术趋向三多(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),遥感图像用于病虫害监测趋向于更加可靠和精确。随着遥感监测设备的不断发展完善,地面、高空、卫星等3个平台联动,相互补充,成像光谱仪的光谱探测能力将继续提高,成像光谱仪获取影像的空间分辨率逐步提高。

4.2.2 遥感监测向着多元化方向发展

遥感监测由航空遥感为主转为航空和航天遥感相结合阶段,逐步从遥感定性分析阶段发展到定量分析阶段,监测地面遥感技术将不仅对病虫害进行监测,还将应用于产量、灾情、耕地质量等方面,扩大遥感监测范围。通过遥感监测作物长势,对作物的各个生育期生长状况进行监测,可以为实施田间管理提供依据。遥感监测各项数据还可为无人农场建设提供数据支持。

4.2.3 遥感监测研究更加深入

遥感监测应用的研究将向着多学科、多领域、多国家方向发展,有助于开展更加全面的分析,应

对各种复杂环境的监测变得简单,监测时间变得越来越长,监测范围越来越广,结合遥感技术和传感器网络构建全国性作物病虫害实时监测与服务平台。通过不断完善监测数据,持续的动态监测有助于及早发现及早防治。

4.2.4 遥感监测数据平台建设趋于完善

随着国际国内合作不断加强,研究设备和手段的不断发展以及研究的深入,遥感实时作物病虫害监测数据综合防治信息服务平台的建设趋于完善。该平台为快速准确判断作物病虫害发生情况提供了便利,为广泛普遍应用遥感监测技术奠定了基础,为遥感技术的大面积应用提供了技术支撑,为非专业人士识别病虫害提供了便利,为深入研究遥感病虫害监测提供了数据基础。

5 总结

遥感作为病虫害监测的重要手段,将会随着我国农业大数据平台的建设和遥感技术的研究发展,逐步在病虫害监测中发挥重要作用。有一些病虫害不容易被监测到,例如作物基部以及小麦穗部的病虫害等,但利用遥感技术可以做到及时精准监测。我国拥有广阔的国土面积和漫长的边界线,沙漠飞蝗、草地贪夜蛾等越境进入我国时有发生,人工监测调查病虫害发生难度大、时间长、效率低、精准度不高,但采用遥感技术则可以解决上述问题。通过加强国际间合作研究,降低遥感技术应用成本,增加使用效果,加快构建专家系统平台,加大对不同环境条件下病虫害遥感监测和多学科综合研究,充分发挥遥感监测技术优势,为大面积精准管理和植保提供精确、实时、大范围的监测信息,为降低我国农作物遭受病虫害侵袭而做出及早监测,并提供有效保障。

参考文献:

- [1] 吴孔明. 中国农作物病虫害防控科技的发展方向[J]. 农学报, 2018, 8(1): 44-47.
- [2] 陈兵, 李少昆, 王克如, 等. 作物病虫害遥感监测研究进展[J]. 棉花学报, 2007, 19(1): 57-63.
- [3] 闫峰, 李茂松, 王艳姣, 等. 遥感技术在农业灾害监测中的应用[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 131-136.
- [4] 黄文江, 师越, 董莹莹, 等. 作物病虫害遥感监测研究进展与展望[J]. 智慧农业, 2019, 4(1): 1-11.
- [5] 张竞成, 袁琳, 王纪华, 等. 作物病虫害遥感监测研究进展[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 1-11.
- [6] 赵子娟, 刘东, 杭中桥. 作物遥感识别方法研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(16): 45-51.

- [7] 鲁军景,孙雷刚,黄文江.作物病虫害遥感监测和预测预警研究进展[J].遥感技术与应用,2019,34(1):21-32.
- [8] 李卫国,蒋楠.农作物病虫害遥感监测研究进展与发展对策[J].江苏农业科学,2012,40(8):1-3.
- [9] NEBLETTE C B. Aerial pHotograpHy for the study of plant disease [J].Photo-Era Magazine, 1927,58(4):346.
- [10] NEBLETTE C B. Aerial pHotograpHy for plant disease surveys [J].Photo-Era Magazine, 1928,59(2):175.
- [11] TAUBENHAUS J J, EZEKIEL W N, Neblette C B. Airplane pHotograpHy in the study of cotton root rot [J].Phytopathology, 1929,19(6):1025-1029.
- [12] BAWDEN F C. Infra-red pHotograpHy and plant virus diseases [J].Nature, 1933, 132: 168.
- [13] COLWELL R N. Determining the prevalence of certain cereal crop disease by means of aerial pHotograpHy [J]. Hilgardia, 1956,26(2):223-286.
- [14] HIELKEMA J U. Application of Landsat data in desert locust survey and control[R]. AGP/ LCC/77/11.Rome:FOA, 1977.
- [15] MUKAI Y, SUGIMURA T, WATANABE H, et al. Extraction of areas infested by pine bark beetle using Lansat MSS data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1987,54(1): 77-81.
- [16] LORENZEN B, JENSEN A. Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery mildew [J].Remote Sensing of Environment, 1989,27(2):201-209.
- [17] VOGELMANN J E, ROCK B N. Use of Thematic Mapper data for the detection of forest damage caused by the pear theips [J].Remote Sensing of Environment, 1989,30(3):217-225.
- [18] CATER G A, MILLER R L. Early detection of plant strees by digital imaging wonebands [J].Remte Sensing of Environment, 1994,50(3):295-302.
- [19] ZHANG J C, YUAN L, PU R, et al. Comparison between wavelet spectral features and conventional spectral features in detecting yellow rust for winter wheat [J].Computers and Electronics in Agriculture, 2014,100(2):79-87.
- [20] 黄木易,黄文江,刘良云,等.小麦条锈病单叶光谱特性及严重程度反演[J].农业工程学报,2004,20(1):176-180.
- [21] 何国金,胡德永,金小华,等.北京麦蚜虫害的光谱测量与分析 [J].遥感技术与应用,2002,17(3):119-124.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 季荣,张霞,谢宝瑜,等.用MODIS遥感数据监测东亚飞蝗灾害——以河北省南大港为例[J].昆虫学报,2003(6): 713-719.
- [25] 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.
- [26] 乔红波,夏斌,马新明,等.冬小麦病虫害的高光谱识别方法研究[J].麦类作物学报,2010,30(4):770-774.
- [27] SHI Y, HUANG W, LOU J, et al. Detection and discrimination of pests and diseases in winter wheat based on spectral indices and kernel discriminant analysis [J].Computers and Electronics in Agricultuer, 2017,141:171-180.
- [28] 易玲,杨小唤,江东,等.农作物病虫害遥感监测研究进展 [J].甘肃农业科学,2003,15(3):58-63.
- [29] 赵虎,杨正伟,李霖,等.作物长势遥感监测指标的改进与比较分析[J].农业工程学报,2011,27(1):243-249.
- [30] 杨淑芳.遥感技术在农业上的应用与展望[J].农业科技展望, 2008(7):39-42.
- [31] LUO J, HUANG W, ZHAO J, et al. Detecting apHid density of winter leaf using hyperspectral measurements [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2013,6(2):690-698.
- [32] 罗菊花,黄文江,韦朝领,等.冬小麦条锈病害与常规胁迫的定量化识别研究——高光谱应用[J].自然灾害学报,2008,17(6):115-118.
- [33] 黄木易,黄文江,刘良云,等.冬小麦条锈病单叶光谱特性及严重程度反演[J].农业工程学报,2004(1):176-180.
- [34] 王玉玺,郭珊珊.基于FY3/MERSI数据提取并应用植被指数 [J].河南科技,2013(17):22-27.
- [35] WU W, PIYARATNE M, ZHAO H, et al. Butterfly catastrophHe moldel for wheat apHid population dynamic: Construction analysis and application [J].Ecological modelling, 2014,288:55-61.
- [36] 罗菊花,黄木易,赵晋陵,等.冬小麦灌浆期蚜虫危害高光谱特征研究[J].农业工程学报,2011,38(7):215-219.
- [37] 沈艳,牛铮,王汶,等.基于导数光谱位置变量的干叶片生化组分反演[J].遥感信息,2005,4(2):4-7.
- [38] 蒋金豹,陈云浩,黄文江.利用高光谱红边与黄边位置距离识别小麦条锈病[J].光谱学与光谱分析,2010,6(5):1614-1618.
- [39] 徐永明,蔺启忠,黄秀华,等.利用可见光/近红外反射光谱估算土壤总氮含量的实验研究[J].地理与地理信息科学,2005, 21(1):19-22.
- [40] 张健康,程彦培,张发旺,等.基于多时相遥感影像的作物种植信息提取[J].农业工程学报,2012,28(2):134-141.
- [41] 刘良云,宋晓宇,李存军,等.冬小麦病害与产量损失的多时相遥感监测[J].农业工程学报,2009,25(1):137-143.
- [42] 刘清旺,武红敢,石进,等.基于TM影像的森林病虫害灾害遥感监测系统[J].遥感信息,2007(2):46-49.
- [43] 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(1):97-100.
- [44] 杨贵军,黄文江,王纪华,等.多源多角度遥感数据反演森林叶面积指数方法[J].植物学报.2010,45(5):566-578.
- [45] ZHANG J C, PU R L, HUANG W J, et al. Using in-situ hyperspectral data for detecting and discriminating yellow rust disease from nutrient stresses [J]. Field Crops Research, 2012, 134: 165-174.
- [46] 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].农业信息科学,2006,22(2):388-391.
- [47] 杨国鹏,余旭初,冯伍法,等.高光谱遥感技术的发展与应用现状[J].测绘通报,2008,10(4):1-5.