DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2018.01.004

黄文江[1,2]　张竞成[3]　师越[1,2]　董莹莹[1]　刘林毅[1,2]

作物病虫害遥感监测与预测研究进展

摘要

作物病虫害作为严重的生物灾害已危及到世界农业生产和粮食安全,病虫害对我国粮食生产造成的损失日益加剧,植保部门目前使用的测报和防控方式无法满足大范围的精准、高效、绿色科学防控需求.因此,建立基于遥感手段的高效、无损的大面积病虫害监测预测方法,将提升我国大面积作物病虫害的监测和测报精度与防控水平,有利于减少农药施用,对保障国家粮食和食品安全,实现农业可持续发展具有重要战略意义.近年来出现的多种形式的作物病虫害遥感监测方法和技术手段为病虫害的有效防治和管理提供了重要支撑,通过对相关技术方法进行综述,本文从多尺度下的作物病虫害遥感监测与预测机理、监测方法、预测预报方法、典型模型与应用等方面阐述了作物病虫害遥感监测和预测预报研究进展,并探讨了作物病虫害遥感监测当前面临的挑战以及未来发展趋势,建议通过建立全国尺度的作物病虫害遥感监测预测系统,构建作物病虫害绿色智能防控体系,实现病虫害大面积、快速的监测、预测预报和精准、高效、绿色科学防控.

关键词

作物病虫害;遥感监测;遥感预测;系统

中图分类号 TP13

文献标志码 A

收稿日期 2017-10-28

资助项目 国家重点研发计划项目(2016YFD0300702);国家自然科学基金(61661136004);中国科学院国际合作重点项目(131211KYSB20150034)

作者简介

黄文江,男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为农情遥感.huangwj@radi.ac.cn

1 中国科学院遥感与数字地球研究所 数字地球重点实验室,北京,100094

2 中国科学院大学,北京,100049

3 杭州电子科技大学 生命信息与仪器工程学院,杭州,310018

0 引言

作物病虫害已成为威胁粮食安全、制约农业生产的重要因素之一[1-2].据联合国粮农组织(FAO)估计,全世界每年由病虫害导致的粮食减产约占总产量的1/4,其中病害导致的损失约占14%,虫害导致的损失约占10%.中国每年因作物病虫害导致的粮食损失约400亿kg,占粮食总产量的8.8%.Piao等[3]分析了中国1971—2007年间的作物病虫害发生面积及对应的农药施用量,发现病虫害发生面积呈明显增长趋势,从1971年的约1亿hm^2增加到2007年的约3.45亿hm^2;同时,农药施用量也显著增加,从1971年的约600万t增加到2007年的约1 300万t.了解病虫害发生的位置、范围以及严重程度是进行植保工作的关键.目前传统的病虫害现场调查在很大程度上取决于专业调查人员的数量和素质,不仅效率低下,而且存在主观性强的问题,难以应对日益复杂的病虫害防治形势.为了解决这一问题,遥感技术提供了一种相对于传统的作物保护调查方法的重要补充手段,能够极大地提高大范围病虫害监测的能力[4].

作物病虫害的遥感监测可以看作是对作物的“放射诊断”,这是一种以非接触式的方式对病虫害进行空间连续监测的方法.随着计算机科学和遥感技术的迅速发展,多种遥感数据被广泛应用于病虫害的监测,在多个尺度上开展了对病虫害监测特征和模型的研究,使作物病虫害成为农业遥感研究中的一个重要研究方向[4-7].随着遥感科学与作物病理学之间联系的不断加强,研究从各个层面得到了深化,使其在农作物估产、品质预报和病虫害监测等多个方面有着不同程度的应用.这些应用在很大程度上改变了传统的作业和管理模式,极大地推动着农业朝高产、优质、高效、生态、安全和现代化、信息化的方向发展.例如美国国家尺度作物生长状态及作物产量数据自1995年起开始利用卫星遥感数据进行分析,该技术对快速、低成本地获得全国尺度的各种粮食种植品种、生长状态、产量等数据具有重要作用.

近期研究不仅希望监测特定病虫害的发生,同时希望评估病虫害感染的严重程度,甚至对一些复杂情况下不同病虫害胁迫进行区分和制图[2,8-10].随着精密制造技术和测控技术的发展,各类机载、星载的遥感数据源不断增多,为各级用户提供了多种时间、空间和光谱分辨率的遥感信息.而这些技术和数据的涌现为作物病虫害监测提供了宝贵的契机,使得有可能更为准确、快速地了解作物病虫害发生发

展的状况.随着这些技术的日渐成熟,特征提取与建模过程不再局限于一些传统的特征识别和统计方法,一些新的信号处理技术和模式识别算法在监测建模中不断被应用[4,11-15].这些方法在促进精细的病虫害防控管理等实际应用方面显示出了巨大潜力.本文通过对相关技术方法进行综述,从多尺度下的作物病虫害遥感监测与预测机理、作物病虫害遥感监测方法、作物病虫害遥感预测预报方法、作物病虫害遥感监测与预测典型模型及应用等4个方面阐述作物病虫害遥感监测方法,希望提供一个现阶段作物病虫害遥感监测研究的概述,并在此基础上探讨了病虫害遥感监测当前面临的挑战以及未来发展的趋势.

1 多尺度下作物病虫害遥感监测与预测机理

光学遥感是目前作物病虫害监测中研究最为聚集、应用最为广泛的领域.针对不同尺度下遥感数据源的特性以及病害胁迫的病理学基础,主要存在2种遥感监测方法:1)基于光谱特性的病虫害直接检测,即通过形式化表达病虫害的光谱响应,使其作为作物病虫害光学遥感监测的基本依据;2)基于生境信息反演的病虫害间接监测,即通过对地表温度、田间湿度及作物长势状况等生境信息的遥感反演,使其作为病虫害发生情况的定量指标.不同尺度作物病虫害监测数据源及特点如表1所示.

1.1 基于光谱特征的直接监测机理

作物在病虫害胁迫条件下会在不同波段上表现出差异性的吸收和反射特性,作物病虫害所引起的不同症状及光学属性是进行作物病虫害遥感监测的病理学基础.作物病虫害的光谱响应可以近似认为是一个由病虫害引起的作物色素、水分、形态、结构等变化的函数,因此往往呈现多效性,并且与每一种病虫害的特点有关[3-4,12,16-17].而不同的病虫害症状决定了在监测中应采取不同的方法.一些情况下作物病虫害由于缺乏可被遥感探测的特征(如一些穗部感染的病害或发生在作物体下部的病虫害)而难以进行遥感监测.通常而言,作物病虫害遥感监测的一个基本要求是作物的症状能够引起特定传感器或传感器系统的响应.多数作物病虫害的遥感监测包括4种症状或伤害类型(表2):1)生物量或叶面积指数(Leaf Area Index,LAI)的减少.如某些害虫(如玉米粘虫)啃食作物叶、茎等部位,导致作物LAI或生物量显著下降[18].这种伤害类型的遥感响应通常缺乏特异性,因此监测时存在较高的不确定性.2)病斑虫伤.一些作物病害特别是真菌性病害往往在作物叶片上形成孢子堆,以及由感染组织坏死引起的病斑.不同病虫害引起的病斑、虫伤在颜色、形状和分布(均匀分布或聚集分布)等方面都存在差异,而这些差异对病虫害监测至关重要[18-20].3)色素系统破坏.很多情况下,病虫害会导致叶绿体或其他细胞器的破坏,进而导致作物色素含量(如叶绿素、类胡萝卜素和花青素)的变化.这种类型病症的监测通常需要使用高光谱遥感数据[5,21].4)脱水.脱水在病虫害初起时并不是一种常见症状,而随着侵染程度加重会在后期普遍出现.某些害虫(如甲虫或蚜虫)的穿孔和吮吸行为可直接导致作物脱水.此外,当感染病虫害的作物水分传输系统被破坏时会影响水分代谢从而导致脱水[21].作物病虫害可导致上述症状中的一种或几种.此外,病虫害的侵染和破坏往往呈现一个时间过程,由不同形式的症状叠加或相互作用,进而在作物的不同生长阶段表现出不同程度和方式的危害[10,19].例如,感染黄锈病的冬小麦初期会引起叶片损伤和叶绿素含量下降,如不进行适当防治,因光合作用系统受损会导致生物量下降,甚至影响作物的水分代谢,使严重感染病害的作物在后期出现脱水症状[22].

表1 不同尺度作物病虫害监测数据源及特点

Table 1 Data and characteristics of crop pests and diseases monitoring and forecasting at different scales

观测尺度	特点及应用	常用设备
叶片及冠层尺度观测	光谱特征明确,准确度高,观测范围小,成本较高.以农机具作为平台,常作为喷药辅助设备	非成像高光谱扫描仪(ASD-2500) 高光谱成像仪(Headwall) 荧光成像扫描仪(PAM-2100)
农田地块尺度监测	观测范围较大,成本较高,精度较高.以航空飞行器为平台,输出田间病害处方图	成像多光谱仪(MS-4100) 成像高光谱相机(PHI,OMIS) 热红外成像仪(FLIR)
区域尺度监测	观测范围极大,成本低,以遥感卫星为数据源,为大尺度检测和预报提供依据	多光谱卫星(Quickbird,IKONOS,Landsat,GF,Sentinel) 高光谱卫星(Hyperion) 热红外卫星(Landsat,Aster,HJ)

表 2　作物病虫害典型遥感监测指标

Table 2　Crop pests and diseases indices associated with remote monitoring

破坏类型与监测指标	示例病虫害类型	症状表现
1. 生物量或 LAI 的减少	玉米粘虫	
2. 病斑虫伤	小麦条锈病、白粉病	
3. 色素系统破坏(叶绿素、类胡萝卜素、花青素等)	水稻白叶枯病	
4. 脱水	小麦蚜虫	

目前,依靠对不同波段范围内的光学信号在传输、反射、折射、衍射过程中与物体的相互作用后发生的速率、强度等重要属性的改变对作物组分、结构的改变进行探测常作为农作物长势和病虫害胁迫的诊断方式[22-23].在病害监测中通常使用的光学遥感系统的波谱范围主要涉及紫外(200~400 nm)、可见光(400~800 nm)和近红外(800~2 500 nm)波段.植被在这些波段上的反射率由于能对作物病虫害引起的生物量和 LAI 减少、病斑虫伤、色素系统破坏以及脱水等生理变化产生比较直接的响应[14,24-25],因此成为作物病害遥感探测的重要途径.在光学遥感中,高光谱和多光谱技术都可以作为病害监测的重要信息源,但高光谱数据由于具有更高的光谱分辨率,能够探测到植被光谱曲线在某些特定波段下的细节信息,在研究中受到广泛的重视[26-28].

基于地物光谱仪对作物病虫害症状进行光谱观测通常在器官(叶、穗)和冠层尺度上进行,主要通过研究病虫害在可见光至近红外波段的光谱响应为特征、模型研究提供重要信息.如 Adams 等[19]基于大豆叶片光谱,采用光谱微分技术对大豆萎黄病进行监测;Liu 等[13]采用类似的仪器测定了水稻颖枯病的穗光谱,建立了光谱与病情等级之间的关系模型.在针对冠层的研究方面,Huang 等[24]采用 ASD 光谱仪测定了小麦条锈病的冠层光谱,构建了适合于监测该病的光谱指数;Muhammed 等[21]利用小麦病害的冠层光谱,进行了病害特征的提取研究.同时,随着传感器制造技术的进步,研究者们越来越倾向利用图谱合一的成像光谱数据.Moshou 等[11,23]利用车载成像高光谱进行小麦病害的实时监测;Zhang 等[29]采用一台光谱范围在 200~2 500 nm 之间的成像光谱仪对小麦条锈病的病斑进行了遥感探测;Fiore 等[30]利用成像高光谱技术成功识别了番茄黄祛病.

1.2　基于生境信息反演的病虫害遥感预测

对作物病虫害进行大范围监测和发生预测是植被定量遥感研究和应用的重点.通常,对虫害而言,虫卵的出土、羽化、成虫,需要适宜的景观格局和土壤湿度等生境条件;对病害而言,病菌孢子的繁殖、传播、侵染等过程需要合适的寄主、有效积温及湿度条件,这些与病害发生相关的关键环境信息提取是作物病虫害遥感预测的基础.目前在这一方面,主要基于高光谱和多光谱遥感传感器,在近地获得光谱数据支持特征和模型方法研究,并通过在航天(遥感卫星)或航空(有人机、无人机)平台上搭载传感器获得遥感影像以支持大范围的病虫害监测.例如,利用航天平台获取的热红外通道信息(例如卫星热红

外波段)可反演得到地表温度 LST、土壤含水量 SWC 等生境参数在不同田块中的空间变异情况,进一步在田块尺度上解析关键环境因子对小麦病虫害发生的影响[31].Wang 等[32]通过对全国 15 个主要茶树种植省的采样分析,发现了 11 种侵染茶树叶的炭疽菌,并比较了每一种炭疽菌的侵染特性.Umina 等[33]通过研究澳大利亚东南部小麦线条花叶病毒与小麦种植的关系,发现线条花叶病毒在农作物中的流行与长季小麦品种的种植有关.Götz 等[34]针对泰国和越南的 2 种主要烟粉虱 *B. tabaci Asia*1 和 *Middle East-Asia Minor* 进行了分析,并发现 2 种烟粉虱在热带和亚热带地区存在物种替代现象.Graziosi 等[35]发现在全球气候变化的大背景下,一种新的病害正在侵染东南亚地区的木薯种植区,通过对 5 个国家、429 块样田的采样分析,发现遭受粉蚧和螨虫侵染的木薯种植区分别达到了 70% 和 54%.

2 作物病虫害遥感监测方法

近年来,随着高空间和时间分辨率国内外卫星的发射,使得作物病虫害遥感监测技术在不同作物病虫害胁迫早期的实时、快速、非破坏性的监测和识别成为可能.中国的高分辨率对地观测计划发射了高分(GF)系列卫星,欧州太空局发射的哨兵系列(Sentinel series)等卫星都大大缩短了全球对地观测数据的重访周期(从 16 d 缩短至 5~10 d).上述新发射卫星连同我国的风云(FY)系列、资源(ZY)系列、环境(HJ)系列等卫星正构筑起一个高频度、高空间分辨率、多谱段、全覆盖的对地观测系统.另一方面,无人机平台(如大疆、极飞、全丰等)和轻小型无人机载遥感传感器(如 UHD185 画幅式成像高光谱仪)的不断突破不仅极大地提高了观测分辨率(从米级提高至厘米级),同时为一些地块破碎及多云多雨的区域提供了更为灵活的影像获取手段.此外,多源信息融合算法的发展有助于充分利用多源异构数据中的互补信息形成具有更高分辨率和精度的时空连续数据集,为大范围的病虫害监测提供数据支撑.当前国内外研究成果主要基于高光谱和多光谱遥感特性,针对不同病虫害胁迫下的病理机制的差异,在不同尺度的应用条件下,构建作物病虫害的遥感监测和识别方法.

2.1 基于高光谱分析技术的遥感监测研究

高光谱作物监测和胁迫诊断能够同时支持图像维和光谱维的信息提取,能够精细对比植株局部光谱差异,提取胁迫的光谱特征.另一方面,丰富的窄波段光谱信息能够为胁迫的区分提供更全面的观察角度和更丰富的信息.目前的基于高光谱分析的病害监测研究结果表明,可见-近红外波段和荧光波段是作物病虫害监测的 2 个主要的光谱监测"窗口".

2.1.1 可见-近红外光谱响应特征

光谱波段反射率特征是最简单和直接的特征,可见-近红外波段的光谱反射信号反映了植被胁迫引起的物理生化组分的变化,已经被广泛地应用于作物病虫害的遥感监测和早期胁迫诊断研究[37-40].黄文江等[4]系统阐述了小麦、水稻、玉米和棉花主要病害的叶片和冠层光谱特性;Luo 等[41]发现小麦蚜虫的发生能够引起 700~750、750~930、950~1 030 和 1 040~1 130 nm 范围的光谱反射率的显著改变.除原始光谱波段外,Spilenlli 等[42]利用梨树冠层的近红外光谱的导数特征对火瘟病进行早期的遥感识别,研究表明高维的光谱信息能够提供更丰富的病害胁迫信息,进而对病害的早期发生进行判别;Purcell 等[43]利用傅里叶变换(FT)对甘蔗样本的可见-近红外波段的光谱特征进行提取,再利用主成分分析和偏最小二乘建模,对不同甘蔗病害进行判别研究,研究结果表明,二阶微分光谱对病害的识别具有显著效果,并在实际的病害早期识别和发生预测应用中显示出充足的潜力.另一方面,基于植被指数形式的光谱特征也是病虫害监测中较为常用的特征.基于一定生理意义的植被指数能够增强和突显一些光谱变化,从而得到较理想的效果.Naidu 等[39]利用叶片的可见光反射率特征对葡萄卷叶病进行诊断,结果表明在绿波段和近红外波段对病害胁迫有显著的响应,因此,通过构造植被指数,实现了对葡萄病害的遥感监测和识别;Shi 等[44]利用多年的小麦条锈病、白粉病和蚜虫叶片和冠层高光谱,构造基于相关植被指数的核判别分析的非线性分类器,研究表明在相关植被指数构造的特征空间中,基于 Sigmoid 核函数对其进行映射,有利于加强样本的类间距离,提高类精度,对多胁迫的小麦病虫害遥感监测与区分具有很强的应用价值.

在病虫害的发生预测方面,Huang 等[45]利用便携式光谱仪获取芹菜枯萎病的冠层高光谱反射信号,利用偏最小二乘回归分析,发现一阶和二阶光谱信号对枯萎病的侵染有敏感的响应,研究还发现,提取可见-近红外光谱波段(400~1 300 nm)的光谱信息进行建模,在满足分类精度的同时,极大地提高了

运算效率,预测精度大于 87%;Chen 等[46]对棉花黄萎病的冠层光谱进行分析,发现 680~760 nm 的可见光波段和 731~1 371 nm 的近红外波段对黄萎病的侵染有显著的响应,利用这 2 个响应区域构造棉花黄萎病的冠层发生预测模型,预测精度达到 82%;Shi 等[47]对小麦条锈病和白粉病的冠层高光谱的小波特征进行了定量提取和分析,结果表明,在 480、633 和 943 nm 波段处的小波特征变化可以有效诊断出小麦条锈病和白粉病胁迫,并对其进行区分;Delalieux 等[48]测量了 350~2 500 nm 波段范围内的苹果黑星病光谱响应信号,通过构建基于偏最小二乘和线性判别分析(PLS-LDA)的决策树算法,对健康苹果和感病苹果进行自动识别和筛选,结果表明,1 350~1 750 nm 和 2 200~2 500 nm 的光谱波段在黑星病感染早期有明显的响应,而 580~660 nm 以及 688~715 nm 的可见-近红外波段对表征病害中期的光谱特征并对其进行识别和预测有更显著的效果.

大量的信号处理和机器学习算法被用于敏感波段选择和目标识别等光谱分析过程中.例如,Roggo 等[49]对线性判别分析(LDA)、最临近判别(KNN)、偏最小二乘判别(DPLS)、主成分判别(PCD)、回归分析(RA)、极大似然分析(SIMCA)、神经网络(NN)和支持向量机(SVM)等 8 种主流的分类算法进行对比,评价其在甜菜病害的光谱特征筛选和分类中的性能,结果表明 DPLS、SIMCA 和 PCD 算法对病害的识别精度优于其他算法;Wu 等[50]利用基于主成分分析的神经网络算法(PCA-BPNN)和基于偏最小二乘的神经网络(PLS-BPNN)分别对茄子灰霉病冠层光谱进行分类和识别,结果表明 PCA-BPNN 算法对病害的识别精度达到 85%,优于 PLS-BPNN 算法的 78%.

上述关于病虫害光谱监测和预测特征的研究显示,病虫害敏感光谱特征的波段位置和表现形式较为多样化,在不同病虫害之间存在很大差别,因此在实际监测中,如何根据目标病虫害的监测特点,研究特征的选择和构建方法,找到高专一性的监测特征是监测中的关键问题.通过对敏感波段的筛选和组合,大量的学者提出了基于高光谱波段的一阶微分、连续统特征及植被指数,用于对不同病虫害胁迫的区分和识别,具体如表 3 所示.

近年来,成像高光谱传感器在病虫害监测和预测方面也取得了充分的发展,其响应范围主要在可见光-近红外波段(350~1 300 nm),由于其成像条件、光谱响应效率及使用成本等方面的限制,目前主要应用在冠层尺度和近地表的田间病虫害监测和预测研究中[9,21,63-65].例如,Aleixos 等[66]利用光谱图像对柑橘病害及其长势进行分类;Grown 等[63]利用多种图像处理技术对近地面的高光谱影像进行处理,实现了在田块尺度上的小麦长势及质量监测;Bravo 等[67]基于高光谱图像建立了线性判别模型,实现了对小麦条锈病发生的早期监测,分类精度高达 92%~98%;Moshou 等[11]分析了小麦条锈病在 460~900 nm 范围内的光谱图像的光谱特征和空间分布特征,构建了多层感知器用于小麦条锈病的监测和管理,结果表明 543、630 和 750 nm 波段组合下的分类效果最高,对健康和发病样本的分类精度分别达到 98.9%和 99.4%;Kumar 等[68]利用无人机平台的高光谱成像仪获取柑橘种植园的高光谱影响,结合“红边”参数和多种植被指数特征构造了病虫害的监测预警系统,分类精度达到 84%.

2.1.2 荧光波段光谱响应特征

近 20 年来,目标地物的荧光特性越来越多地应用在植被遥感监测的研究当中,例如监测胁迫等级、长势状态以及粮食估产等方面[69].400~600 nm 和 650~800 nm 范围是 2 种常用的荧光诱导波段,利用这 2 个波段提供的植被荧光特性,可以有效地对作物养分状态、胁迫状态及生境状况进行监测[70-72].Belasque 等[71]利用 532 nm 波长 10 mW 的激光进行主动诱导,收集了柑橘主要生长期长达 60 d 的连续的荧光光谱数据,并对荧光光谱的光学属性区分叶片的养分胁迫、病害胁迫、人工损坏等胁迫状态的能力进行评价,结果表明荧光波段的响应对 3 种胁迫有显著的区分能力,分类精度达到 87%;Lins 等[73]通过田间控制实验和实验室测量获取了柑橘萎黄病的实验室诱导荧光数据,该研究应用 2 种指标对健康和病害胁迫的柑橘叶片的荧光特性进行评价,结果表明,健康样本和病害胁迫的荧光参数有显著差异,利用这种差异构建的分类平面可以有效地对病害的发生进行区分和识别.

荧光成像技术是近年来新发展的植被遥感方法,主要应用 440~450 nm 蓝波段、520~550 nm 绿波段、690 nm 红波段、740~800 nm 近红外波段进行诱导[70,72,74],Lenk 等[72]在其研究中对多种波段的激光诱导的荧光图像在作物长势监测、光合效率、病斑监测等方面的应用进行了讨论.在作物病虫害监测和预测方面,目前的研究主要集中在蓝-绿荧光和叶绿

表 3 用于病虫害高光谱特征区分的一阶微分、连续统特征及植被指数

Table 3 The first derivative features, continuum features and vegetation indices used in hyperspectral feature discrimination for crop pests and diseases

	指标	定义	特点	文献
微分光谱	D_b	蓝波段一阶微分最大值(蓝边)	蓝边一般分布在 490~539 nm 波段范围	[51]
	λ_b	D_b 的波长	λ_b 表征了蓝边 D_b 处的波长	[51]
	$D_{b,S}$	蓝波段一阶微分光谱的和	表征了蓝边部分 35 个波段一阶微分光谱的和	[51]
	D_y	黄波段一阶微分最大值(黄边)	黄边一般分布在 550~582 nm 波段范围	[51]
	λ_y	D_y 的波长	λ_y 表征了红边 D_y 处的波长	[51]
	$D_{y,S}$	黄波段一阶微分光谱的和	表征了黄边部分 35 个波段一阶微分光谱的和	[51]
	D_r	红波段一阶微分最大值(红边)	红边一般分布在 670~737 nm 波段范围	[51]
	λ_r	D_r的波长	λ_r 表征了红边 D_r 处的波长	[51]
	$D_{r,S}$	红波段一阶微分光谱的和	表征了红边部分 35 个波段一阶微分光谱的和	[51]
连续统特征	DEP550-750	光谱深度	波段范围 550~750 nm	[52]
	DEP920-1120		波段范围 920~1 120 nm	[52]
	DEP1070-1320		波段范围 1 070~1 320 nm	[52]
	WID550-750	半波段宽度 DEP(nm)	波段范围 550~750 nm	[52]
	WID920-1120		波段范围 920~1 120 nm	[52]
	WID1070-1320		波段范围 1 070~1 320 nm	[52]
	AREA550-750	DEP 和 WID 组成区域的面积	波段范围 550~750 nm	[52]
	AREA920-1120		波段范围 920~1 120 nm	[52]
	AREA1070-1320		波段范围 1 070~1 320 nm	[52]
植被指数	GI	Greendness Index	R_{554}/R_{677}	[53]
	NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(R_{NIR}-R_R)/(R_{NIR}+R_R)$	[54]
	TVI	Triangular Vegetation Index	$0.5[120(R_{750}-R_{550})-200(R_{670}-R_{550})]$	[55]
	PRI	Photochemical Reflectance Index	$(R_{570}-R_{531})/(R_{570}+R_{531})$	[16]
	CARI	Chlorophyll Absorption Ratio Index	$(\lvert(670a+R_{670}+b)\rvert/(2a+1)1/2)(R_{700}/R_{670})$, $a=(R_{700}-R_{550})/150$, $b=R_{550}-(550a)$	[56]
	MCARI	Modified Chlorophyll(a and b) Absorption in Reflectance Index	$[(R_{700}-R_{670})-0.2(R_{700}-R_{550})](R_{700}/R_{670})$	[39]
	$CI_{Red-edge}$	Red-edge Chlorophyll Index	$(R_{NIR}/R_E)-1$	[57]
	SIPI	Structural Independent Pigment Index	$(R_{800}-R_{445})/(R_{800}+R_{680})$	[58]
	PSRI	Plant Senescence Reflectance Index	$(R_{678}-R_{550})/R_{750}$	[58]
	NPCI	Normalized Pigment Chlorophyll ratio Index	$(R_{680}-R_{430})/(R_{680}+R_{430})$	[58]
	OSAVI	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	$(R_{NIR}-R_R)/(R_{NIR}+R_R+0.16)$	[59]
	SR	Simple Ratio	$R_{1\,600}/R_{819}$	[60]
	WI	Water Index	R_{900}/R_{970}	[39]
	NDWI	Normalized Difference Water Index	$(R_{860}-R_{1\,240})/(R_{860}+R_{1\,240})$	[37]
	AI	Aphid Index	$(R_{740}-R_{887})/(R_{691}-R_{698})$	[61]
	GNDVI	Grern Normalized Difference Vegetation Index	$(R_{NIR}-R_G)/(R_{NIR}+R_G)$	[18]
	DSSI2	Damage Sensitive Spectral Index2	$(R_{747}-R_{901}-R_{537}-R_{572})/(R_{747}-R_{901}+R_{537}-R_{572})$	[61]
	HI	Healthy Index	$(R_{534}-R_{698})/(R_{534}+R_{698})-0.5R_{704}$	[10]
	RTVI	Ration Triangular Vegetation Index	$[55(R_{750}-R_{570})-90(R_{680}-R_{570})]/[90(R_{750}+R_{570})]$	[62]

素荧光成像技术的应用方面.Chaerle 等[74]利用蓝-绿荧光图像对烟草花叶病毒的侵染等级和空间分布进行分类和制图,研究表明,在叶片受病毒侵染时间达到 40~55 h 时,550 和 800 nm 的荧光强度有明显

增加,病害胁迫与健康叶片在荧光图像中显示出显著的差别;Bravo 等[75]对荧光成像技术在小麦条锈病的分类和识别效果进行了评价,该研究分别获取了背景场的图像和荧光诱导图像,从而获取病害胁迫下的荧光信号,研究表明,健康叶片和感病叶片在550 和 690 nm 激光诱导下的荧光强度有明显差异,并通过构造二次判别模型,实现了对病害样本和健康样本的精准分类,分类精度达到 71%;Moshou 等[23]尝试利用成像高光谱与荧光图像融合的方法对小麦条锈病进行监测和识别,结果表明,在二次判别分类算法的条件下,融合后的图像可以实现对病害发生的快速、精准的监测,分类精度达 70%~90%.

2.2 基于航空/航天平台的多光谱遥感监测研究

当前,随着多源信息融合算法的不断发展与成熟,具有高分辨率和高精度的新发卫星遥感数据有望与其他多源异构信息进行优势互补,形成具有更高分辨率和精度的时空连续数据集,为病害的预警及流行区空间变化研究提供技术支撑[36,76-77].Huang 等[16]采用机载的 PHI 高光谱仪实现了小麦条锈病情严重度反演和填图;Li 等[27]通过航空高光谱影像对柑橘黄龙病进行遥感分类监测研究,结果表明通过合理的特征和方法选择能够在独立检验的样本中达到 60%以上的精度.在基于卫星影像的研究方面,Franke 等[12]使用 Quickbird 影像对小麦病害进行了识别和监测;Lin 等[36]基于 SPOT-6 影像和 SAM 算法,提出了结合地面高光谱和多光谱影像的小麦白粉病监测方法,对陕西关中地区小麦白粉病的发生进行了监测,精度可达 78%;Apan 等[78]采用"病-水胁迫指数 DWSI"对甘蔗锈病进行识别,基于 EO-1 Hyperion 高光谱影像成功监测了受病害影响的区域范围;Lenthe 等[79]通过对热红外影像进行处理和分析,在实验区域内对小麦白粉病和条锈病的发生进行了监测识别,监测制图精度达到 88.6%;Yang 等[80]比较了多光谱和高光谱影像在监测棉花根腐病上的效果,发现采用多光谱影像亦能达到较满意的制图精度;Leucker 等[31]针对甜菜叶斑病监测,基于 400~900 nm 的图像立方体同时对光谱和图像特征进行提取和分析,实现对病害的精确识别;Zhang 等[15]采用多时相环境星影像在区域尺度上对小麦白粉病进行监测,分别检验了马氏距离法(MD)、最大似然法(MLC)、偏最小二乘回归(PLSR)和混合调谐滤波的混合像元分解法(MTMF)在病害监测方面的表现,并提出一种耦合 PLSR 和 MTMF 的监测方法,区域监测制图精度达到 78%.

基于航空、航天平台的大尺度病虫害遥感监测除用到光谱特征外,也用到一些图像分析和图像特征.Panmanas 等[81]在识别大豆的几种叶部病害(黄斑病、黑点病、疮痂病)时,采用了 13 个纹理特征进行分析,识别精度达到 95%;Kim 等[56]基于颜色共生矩阵方法提取了信息熵、对比度等纹理特征对柚皮病进行检测,成功实现了病害识别,分类精度达到 96.7%.进一步地,Wang 等[82]结合图像颜色、纹理、形状等特征对番茄瘟病、纹枯病和胡麻斑病进行区分和监测.此外,值得注意的是近年来一些研究者针对病虫害症状特点提出了一些新的图像形态学分析方法,如 Yao 等[83]基于图像的方向一致性特征对小麦条锈病与白粉病进行了识别,准确率达到 90%以上.在大尺度上,有时病虫害的发生会在空间上呈现出一些景观特征,因而可以通过对遥感影像进行分析辅助识别.Backoulou 等[77]基于航拍多光谱影像,在监测小麦俄罗斯蚜虫时首先采用简单的色度指标对图像进行分割,然后对景观中异常斑块的面积、形状、隔离/连通度和聚集度进行分析,并基于这些指标有效识别了虫害胁迫的田块.在这一方向上,成像光谱技术由于具有图-谱合一的天然优势,方便同时从图像和光谱两方面对病虫害进行特征提取和监测,因此得到了研究者的关注.总体上,相比病虫害监测的光谱特征研究,基于图像特征的病虫害监测研究开展得相对较少且系统性较弱,这一方面的工作未来有待加强.

3 作物病虫害遥感预测预报方法

近年来,利用遥感数据的高空间、高时间、高光谱分辨率的连续观察能力和其不同波段包含的丰富信息在监测作物生长状况、植被覆盖类型及土壤湿度、环境温度等景观条件的优势引起农学研究领域的广泛关注[6,84].同时,病虫害发生时,虫卵的出土、羽化、成虫,以及病菌孢子的繁殖、传播、侵染等过程需要适宜的景观格局和生境条件,对这些与病害发生相关的关键环境信息提取是病害遥感预测的基础.例如,沈颖等[85]通过对中国 1960—2014 年和浙江省温州市 1971—2015 年水稻白叶枯病的发生情况进行调查统计和分析,发现水稻白叶枯病的发生可分为重发流行阶段、间歇流行阶段和流行减弱阶段,并总结了 2014、2015 年浙江省晚稻白叶枯病发病特点和分布情况;彭昌家等[86]通过分析小麦条锈

病在南充市的发生特点,建立了各个生育时期病田率和病株率同年发生面积预测数学模型,减少了随高空气流传入川东南春季流行区以及渝、鄂、湘等邻近麦区和中国东部小麦主产区条锈病菌源量.值得注意的是,Yang 等[80]比较了多光谱和高光谱影像预测棉花根腐病的效果,发现多光谱影像达到了较满意的精度.此外,利用多时相遥感影像进行病虫害预测亦是一个重要方向,杨可明等[87]基于多时相高光谱影像提出光谱点位与参数模 FPPM 对小麦条锈病进行有效监测和预测;Zhang 等[88]采用多时相 HJ-1 影像在区域尺度上对小麦白粉病进行监测,通过对影像进行时相对比分析提取时间变化特征并用于病害发生预测,结果表明,即使采用分辨率 30 m 的影像,通过多时相分析亦能够达到 78%的监测精度;Yuan 等[62]采用 SPOT-6 高分辨率影像在陕西关中平原对局地发生的小麦白粉病进行预测,发现影像反演的病害发生变化规律与地面调查趋势一致,精度达到 89%;Huang 等[89]建立了作物病虫害监测的新的指数,具有更高的精度和普适性;Helmi 等[90]采用二次土壤调节植被指数(MSAVI2)、湿度(wetness)和地表温度(LST)3 个环境变量及普通克里格方法预测的回归残差 4 个因子建立回归模型,相关系数达到 0.852;陈秀法等[91]基于"资源 2"号高分影像和 TM 影像,对盖州滩潮沟发育分维特征和贝类生境信息之间的相关性进行了研究,为盖州滩的保护和开发提供了理论依据.此外,Bryceson 等[92]还使用 NOAA-APT 数据计算出植被的水分指数,用它间接表征植被绿度,从而大面积监测蝗虫的适宜生境;Ni 等[93]运用美国陆地卫星图像对蝗虫栖息、生长和繁殖的生境进行监测,为利用遥感技术预测该区草地蝗虫的发生提供了重要依据;Wilson 等[94]探讨了利用高空间分辨率和高光谱分辨率遥感影像进行生境特征反演,从而进行流行病学中可传染疾病的监测方面的应用;Wolter 等[95]利用多时相美国陆地卫星影像对云杉卷叶蛾寄主的生境参数进行了反演;Zhang 等[14]基于多时相环境星可见光、近红外、短波红外和热红外通道计算相关特征对北京地区小麦白粉病生境进行了监测,建立了结合生境信息的小麦白粉病发病概率预测模型,其基于地面调查数据进行验证的精度可达 72.2%.以遥感数据为基础的植物病虫害生境信息提取从环境适宜性角度为病虫害遥感预测开辟了新的思路,通过生境遥感监测与针对作物本身的观测结合可能有助于更全面地预测预报不同病虫害的发生趋势.

4 作物病虫害遥感监测与预测典型模型与应用

近年来,国内外学者针对病虫害遥感监测的问题,基于不同类型的算法,建立了作物病虫害识别、区分及严重度诊断模型,并在不同作物类型上进行了应用.常用的监测模型以是否成像的模式分为成像和非成像 2 大类(表 4);以是否具有机理性和普适性分为经典统计模型和基于模式识别和机器学习的模型等类别.

1)经典统计模型,具有形式简单、机制明确的优点,被广泛应用在一些病虫害的监测研究中.如 Graeff 等[37]采用方差分析和相关分析,通过研究小麦条锈病和全蚀病病情程度与光谱特征之间的关系,对病害的敏感波段进行了筛选;Helmi 等[90]在监测油棕茎腐病的研究中,采用 JM 距离进行敏感波段选择,并据此建立病害识别模型;Zhang 等[29]利用 Fisher 判别分析建立了小麦白粉病的病情程度分级模型以及不同病虫害区分模型;Luo 等[41]基于偏最小二乘回归分析(PLSR)建立了小麦白粉病和蚜虫的伤害程度估计模型;Zhang 等[20]采用最大似然方法(MLC)基于多时相卫星影像对玉米粘虫进行了监测制图.

2)基于模式识别和机器学习的模型,通过将计算机、数学领域发展的模式识别等高级算法引入病虫害遥感监测模型的构建中,开展了广泛的研究.如 Moshou 等[23]结合神经网络和二次判别分析建立了小麦条锈病识别模型,模型精度达 95%,实现了冠层尺度小麦条锈病的有效识别;王海光等[38]采用 SVM 算法对不同严重度的小麦条锈病叶片光谱进行分析,建立了相应的严重度估测判别模型,精度达到 97%,实现了对小麦条锈病严重度的有效估测;Wang 等[82]采用反向传播(BP)神经网络(ANN)对马铃薯晚疫病进行监测,分析了网络结构和学习策略对预测的影响,基于近地数据和高光谱遥感影像得到的病害严重度的预测和实测值相关系数分别达到 0.99 和 0.82;Mahlein 等[10]利用支持向量机(SVM)算法对感染叶斑病的甜菜病叶光谱进行分析,成功建立了高精度的病斑识别模型;Yuan 等[62]基于 SPOT-6 影像比较了最大似然(MLC)、马氏距离(MD)和 ANN 在小麦白粉病监测中的表现,发现 ANN 可得到相对较高的精度;Zhang 等[14]将混合调谐匹配滤波

表 4　病虫害遥感监测与预测典型模型

Table 4　Algorithms for crop pests and diseases monitoring and forecasting

遥感方式	植被类型	病害名称	分析方法	文献
非成像	小麦	白粉病,全蚀病	方差分析,相关和回归分析	[37]
	小麦	条锈病	回归分析	[16]
	小麦	黄斑病	独立成分分析,主成分分析	[21]
	水稻	褐飞虱,稻纵卷叶螟	线性回归分析	[96]
	水稻	褐斑病	多元逐步回归,主成分分析,偏最小二乘回归	[83]
	水稻	稻纵卷叶螟	支持向量机	[83]
	水稻	稻瘟病	概率神经网络	[5]
	水稻	稻颖枯病	主成分分析,方差分析,人工神经网络	[13]
	番茄	潜叶蛾	回归分析	[97]
	番茄	细菌性叶斑病	多元逐步分析,偏最小二乘回归	[82]
	甜菜	褐斑病	支持向量机	[70]
	芹菜	菌核病	偏最小二乘回归	[45]
	猕猴桃	灰菌病,菌核病	主成分分析	[42]
	葡萄	卷叶病	判别分析	[39]
成像	小麦	赤霉病	逐步判别分析	[30]
	小麦	条锈病	自组织图,神经网络,二次判别分析	[58]
	小麦	条锈病	回归分析	[23]
	小麦	条锈病,白粉病	光谱角度制图,混合调谐滤波	[15]
	番茄	晚疫病	最小噪声去除,光谱角度制图	[98]
	棉花	根腐病	主成分分析,交互自组织数据分析	[80]
	柑橘	柑橘溃疡	主成分分析	[73]
	洋葱	酸皮病	图像分析	[99]
	甜橙	霜霉病,褐腐病	波段差异分析	[65]

(MTMF)这种针对特定目标识别的混合像元分解方法引入病虫害制图,并提出了将 MTMF 与 PLSR 这 2 种方法进行耦合的制图策略,显著提高了制图精度.总体而言,对研究方法的选择,与问题的难易、样本量大小等因素有关,一些新数据分析方法在病虫害监测方面的潜力正被不断证实.

5　存在问题与发展趋势

5.1　适应复杂农田环境的病害遥感监测

对于作物病害发生的遥感监测而言,现阶段,病害遥感监测机理与方法在精度、稳定性和通用性方面与实际作业和管理的监测需求之间仍存在一定的差距.目前,病虫害遥感监测研究趋势正逐渐从表观层面的遥感观测深入到结合病虫害发生机制的遥感监测,模型的适用范围从简单的实验环境发展到需要综合考虑不同病虫害、水分、养分胁迫类型的识别,达到适应复杂的农田环境的病虫害遥感监测的要求.考虑到不同类型病虫害在监测上的差异性,如能根据一定区域病虫害发生的情况,建立作物病虫害光谱库,以支持特征构建和模型研究,则可以提升监测模型对复杂农田环境的适应能力,有助于研究向实际应用转化.

5.2　明确景观结构变化和生境因素对虫害发生的影响

对于虫害的遥感监测与预测,在实际的监测中,虫害早期由于密度小,多埋藏于土下或植株叶下部,难以被传统的遥感方式有效监测.因此,需要将遥感信息与气象、土壤等一些非遥感信息结合,并耦合遥感数据明确虫害寄主植物的景观生态格局和生境条件,有助于对虫害防控更有针对性,更有效率.另一方面,随着全球气候变化及人类发展的影响,虫害生境适宜区的变迁对其发生范围和程度影响仍未被有效评价,明确这方面的影响,在区域尺度实现虫害生境适宜区的景观格局监测和生境条件预测是虫害发生的早期预警和流行动态监测的关键的环节.并且,虫害的早期发现、早期预警并及时防治也是从根本上控制农药用量的有效途径.

5.3 发展适合作物病虫害监测和预测的遥感系统

作物病虫害作为一种生物性的作物胁迫具有高度动态性的特点,这也为遥感监测系统提出了更高的要求.针对这种应用,一个理想的遥感系统需要在光谱、空间和时间维度上都具有足够的分辨率才能够保证监测的效果.而实际上,目前单一的遥感系统还难以同时满足上述要求.因此,如何协同应用多种遥感系统进行研究和应用是未来更为可行的模型.可喜的是,近年来我国高分计划的实施不仅大幅提高了单颗卫星传感器的性能,并且通过多星协同形成一套高空间、高时间和高光谱分辨率的数据集和初步建立了全国尺度的作物病虫害遥感监测和预测系统.未来基于国内外中高分辨率多源卫星结合无人机等遥感平台,协同构建适应作物病虫害监测和预测的遥感系统实现区域、全国和全球尺度的作物病虫害监测和预测,对于提升作物病虫害的监测能力和精度具有重要意义.

6 总结

近年来,随着空间信息技术的发展,利用遥感技术进行作物病虫害监测正从理论逐步走向应用.不断涌现的各类数据源以及数据挖掘方法为病害遥感监测提供了丰富的资源.本篇综述分别从数据源、光谱特征以及算法等几个方面总结和梳理了目前遥感技术在作物病害监测方面的应用情况,并提出了这些技术和方法在未来的发展方向.目前,病虫害遥感监测总体上与生产管理的实际应用仍存在着不小的距离,而这些问题的解决,需要将农学和植保经验知识与遥感信息与模型进行有效整合,充分挖掘遥感技术在作物病害监测方面的潜力,使得作物病虫害遥感监测和预测技术及方法在应用中不断走向成熟.

所以,1)作物病虫害早期预测预报和区划要综合考虑不同病虫害特性、作物长势遥感监测结果和作物生态环境动态监测结果(如气象与遥感反演温度相结合),并与病虫害发生发展模型和地面传感和病虫害调查验证结合开展;2)作物病虫害严重度监测和损失评估,需要综合遥感作物长势和健康监测、病虫害敏感植被指数和作物病虫害损失评估模型结合开展;3)作物病虫害科学防控,需要综合作物病虫害遥感预测预报结果结合病虫害科学防控知识,根据不同病害严重程度和危害性开展生物防治和化学防治结合的作物病虫害科学防治与综合治理,并需要进行科学普及和科学立法等结合进行科学管理.

参考文献

References

[1] Strange R N,Scott P R.Plant disease:A threat to global food security[J].Annual Review of Phytopathology,2005,43(1):83-116

[2] 黄文江.作物病害遥感监测机理与应用[M].北京:中国农业科技出版社,2009
HUANG Wenjiang.The mechanism and applications of crop diseases remote sensing monitoring[M].Beijing:China Agricultural Science and Technology Press,2009

[3] Piao S L,Ciais P,Huang Y,et al.The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J].Nature,2010,467(7311):43

[4] 黄文江,张竞成,罗菊花,等.作物病虫害遥感监测与预测[M].北京:科学出版社,2015
HUANG Wenjiang,ZHANG Jincheng,LUO Juhua,et al.Remote sensing monitoring and forecasting of crop pests and diseases[M].Beijing:Science Press,2015

[5] Huang W J,Yang Q Y,Pu R L et al.Estimation of nitrogen vertical distribution by bi-directional canopy reflectance in winter wheat[J].Sensors,2014,14(11):20347-20359

[6] Seelan S K,Laguette S,CasadY G M,et al.Remote sensing applications for precision agriculture:A learning community approach[J].Remote Sensing of Environment,2003,88(1/2):157-169

[7] West J S,Bravo C,Oberti R,et al.The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases[J].Annual Review of Phytopathology,2003,41:593-614

[8] Moran M S,Inoue Y,Barnes E M.Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management[J].Remote Sensing of Environment,1997,61(3):319-346

[9] Mehl P M,Chen Y R,Kim M S,et al.Development of hyperspectral imaging technique for the detection of apple surface defects and contaminations[J].Journal of Food Engineering,2004,61(1):67-81

[10] Mahlein A K,Rumpf T,Welke P,et al.Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases[J].Remote Sensing of Environment,2013,128(1):21-30

[11] Moshou D,Bravo C,West J,et al.Automatic detection of yellow rust in wheat using reflectance measurements and neural networks[J].Computers & Electronics in Agriculture,2004,44(3):173-188

[12] Franke J,Menz G.Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing[J].Precision Agriculture,2007,8(3):161-172

[13] 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 & Electronics in Agriculture,2010,72(2):99-106

[14] Zhang B H,Huang W Q,Li J B,et al.Principles,developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables:A review[J].Food Research International,2014,62:326-343
[15] Zhang J C,Yuan L,Pu R L,et al.Comparison between wavelet spectral features and conventional spectral features in detecting yellow rust for winter wheat[J].Computers & Electronics in Agriculture,2014,100(2):79-87
[16] Huang W J,Davidw L,Niu Z,et al.Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging[J].Precision Agriculture,2007,8(4/5):187-197
[17] Sankaran S,Mishra A,Ehsani R,et al.A review of advanced techniques for detecting plant diseases[J].Computers & Electronics in Agriculture,2010,72(1):1-13
[18] Grisham M P,Johnson R M,Zimba P V.Detecting sugarcane yellow leaf virus infection in asymptomatic leaves with hyperspectral remote sensing and associated leaf pigment changes[J].Journal of Virological Methods,2010,167(2):140-145
[19] Adams E,Mutanga O.Spectral discrimination of papyrus vegetation (Cyperus papyrus L.) in swamp wetlands using field spectrometry[J].ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2009,64(6):612-620
[20] Zhang J C,Huang Y B,Yuan L,et al.Using satellite multispectral imagery for damage mapping of armyworm (Spodoptera frugiperda) in maize at a regional scale[J].Pest Management Science,2016,72(2):335-348
[21] Muhammed H H.Hyperspectral crop reflectance data for characterising and estimating fungal disease severity in wheat[J].Biosystems Engineering,2005,91(1):9-20
[22] Cao X R,Luo Y,Zhou Y L,et al.Detection of powdery mildew in two winter wheat cultivars using canopy hyperspectral reflectance[J].Crop Protection,2013,45(3):124-131
[23] Moshou D,Bravo C,Oberti R,et al.Plant disease detection based on data fusion of hyper-spectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps[J].Real-Time Imaging,2005,11(2):75-83
[24] Huang W J,Huang M Y,Liu L Y,et al.Inversion of the severity of winter wheat yellow rust using proper hyper spectral index[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2005,21:97-103
[25] Zhang J C,Lin Y,Wang J H,et al.Spectroscopic leaf level detection of powdery mildew for winter wheat using continuous wavelet analysis[J].Journal of Integrative Agriculture,2012,11(9):1474-1484
[26] Calderon R,Navas-Cortes J A,Lucena C,et al.High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of Verticillium wilt of olive using fluorescence,temperature and narrow-band spectral indices[J].Remote Sensing of Environment,2013,139:231-245
[27] Li X H,Lee W S,Li M Z,et al.Spectral difference analysis and airborne imaging classification for citrus greening infected trees[J].Computers & Electronics in Agriculture,2012,83(1):32-46
[28] Zhang J C,Pu R L,Wang J H,et al.Detecting powdery mildew of winter wheat using leaf level hyperspectral measurements[J].Computers & Electronics in Agriculture,2012,85(1):13-23
[29] 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(3):165-174
[30] Delwiche S R,Kim M S.Hyperspectral imaging for detection of scab in wheat[C]//Environmental and Industrial Sensing,International Society for Optics and Photonics,2000
[31] Leucker M,Mahlein A K,Steiner U,et al.Improvement of lesion phenotyping in Cercospora beticola-sugar beet interaction by hyperspectral imaging[J].Phytopathology,2015,106(2):731-738
[32] Wang Y C,Hao X Y,Wang L,et al.Diverse colletotrichum species cause anthracnose of tea plants (Camellia sinensis (L.) O.Kuntze) in China[J].Scientific Reports,2016,6:35287
[33] Umina P A,Schiffer M,Parker P,et al.Distribution and influence of grazing on wheat curl mites (Aceria tosichella Keifer) within a wheat field[J].Journal of Applied Entomology,2016,140(6):426-433
[34] Götz M,Winter S.Diversity of Bemisia tabaci in Thailand and Vietnam and indications of species replacement[J].Journal of Asia-Pacific Entomology,2016,19(2):537-543
[35] Graziosi I,Minato N,Alvarez E,et al.Emerging pests and diseases of South-east Asian cassava:A comprehensive evaluation of geographic priorities,management options and research needs[J].Pest Management Science,2016,72(6):1071-1089
[36] Lin Y,Pu R L,Zhang J C,et al.Using high spatial resolution satellite imagery for mapping powdery mildew at a regional scale[J].Precision Agriculture,2016,17(3):332-348
[37] Graeff S,Link J,Claupein W.Identification of powdery mildew (Erysiphe graminis sp.tritici) and take-all disease (Gaeumannomyces graminis sp.tritici) in wheat (Triticum aestivum L.) by means of leaf reflectance measurements[J].Central European Journal of Biology,2006,1(2):275-288
[38] 王海光,马占鸿,王韬,等.高光谱在小麦条锈病严重度分级识别中的应用[J].光谱学与光谱分析,2007,27(9):1811-1814
WANG Haiguang,MA Zhanhong,WANG Tao,et al.Application of hyperspectral data to the classification and identification of severity of wheat stripe rust[J].Spectroscopy and Spectral Analysis,2007,27(9):1811-1814
[39] Naidu R A,Perry E M,Pierce F J,et al.The potential of spectral reflectance technique for the detection of Grapevine leafroll-associated virus-3 in two red-berried wine grape cultivars[J].Computers & Electronics in Agriculture,2009,66(1):38-45
[40] Prabhakar M,Prasad Y G,Thirupathi M,et al.Use of ground based hyperspectral remote sensing for detection of stress in cotton caused by leafhopper (Hemiptera:Cicadellidae)[J].Computers & Electronics in Agriculture,

2011,79(2):189-198
[41] Luo J H, Huang W J, Zhao J L, et al. Detecting aphid density of winter wheat leaf using hyperspectral measurements[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2013, 6(2): 690-698
[42] Spinelli F, Noferini M, Costa G. Near infrared spectroscopy (NIRs): Perspective of fire blight detection in asymptomatic plant material[J]. Acta Horticulturae, 2006,704:87-90
[43] Purcell D E, O'Shea M G, Johnson R A, et al. Near-infrared spectroscopy for the prediction of disease ratings for Fiji leaf gall in sugarcane clones[J]. Applied Spectroscopy,2009,63(4):450-457
[44] Shi Y, Huang W J, Luo J H, et al. Detection and discrimination of pests and diseases in winter wheat based on spectral indices and kernel discriminant analysis[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2017, 141: 171-180
[45] Huang J F, Apan A. Detection of Sclerotinia rot disease on celery using hyperspectral data and partial least squares regression[J]. Journal of Spatial Science, 2006, 51(2): 129-142
[46] Chen B, Wang K R, Li S K, et al. Spectrum characteristics of cotton canopy infected with verticillium wilt and inversion of severity level[J]. International Federation for Information Processing, 2008, 259: 1169-1180
[47] Shi Y, Huang W J, Zhou X F. Evaluation of wavelet spectral features in pathological detection and discrimination of yellow rust and powdery mildew in winter wheat with hyperspectral reflectance data[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2017, 11(2): 026025
[48] Delalieux S, Van Aardt J, Keulemans W, et al. Detection of biotic stress (Venturia inaequalis) in apple trees using hyperspectral data: Non-parametric statistical approaches and physiological implications[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 27(1): 130-143
[49] Roggo Y, Duponchel L, Huvenne J P. Comparison of supervised pattern recognition methods with McNemar's statistical test: Application to qualitative analysis of sugar beet by near-infrared spectroscopy[J]. Analytica Chimica Acta, 2003, 477(2): 187-200
[50] Wu D, Feng L, Zhang C Q, et al. Early detection of botrytis cinerea on eggplant leaves based on visible and near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008, 51(3): 1133-1139
[51] Gong P, Pu R L, Heald R C. Analysis of in situ hyperspectral data for nutrient estimation of giant sequoia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(9): 1827-1850
[52] Pu R L, Ge S, Kelly N M, et al. Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (Quercus agrifolia) leaves[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(9): 1799-1810
[53] Zarco-Tejada P J, Berjon A, Lopez-Lozano R, et al. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99(3): 271-287
[54] Rouse J W J, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts[J]. Nasa Special Publication, 1974, 351: 309
[55] Zhao C, Huang M, Huang W, et al. Analysis of winter wheat stripe rust characteristic spectrum and establishing of inversion models[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '04. Proceedings, 2004 IEEE International, 2004, 6: 4318-4320
[56] Kim D G, Burks T F, Qin J W, et al. Classification of grapefruit peel diseases using color texture feature analysis[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2009, 2(3): 41-50
[57] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves[J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(3): 271-282
[58] Devada S R, Lamb D W, Simpfendorfer S, et al. Evaluating ten spectral vegetation indices for identifying rust infection in individual wheat leaves[J]. Precision Agriculture, 2009, 10(6): 459-470
[59] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95-107
[60] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, et al. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 77(1): 22-33
[61] Mirik M, Michels G J J, Kassymzhanova-Mirik S, et al. Using digital image analysis and spectral reflectance data to quantify damage by greenbug (Hemitera: Aphididae) in winter wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2006, 51(1/2): 86-98
[62] Yuan L, Zhang J C, Shi Y Y, et al. Damage mapping of powdery mildew in winter wheat with high-resolution satellite image[J]. Remote Sensing, 2014, 6(5): 3611-3623
[63] Gowen A A, O'Donnell C P, Cullen P J, et al. Hyperspectral imaging-an emerging process analytical tool for food quality and safety control[J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18(12): 590-598
[64] Li W B, Hartung J S, Levy L. Quantitative real-time PCR for detection and identification of Candidatus Liberibacter species associated with citrus huanglongbing[J]. Journal of Microbiological Methods, 2006, 66(1): 104-115
[65] Sighicelli M, Colao F, Lai A, et al. Monitoring post-harvest orange fruit disease by fluorescence and reflectance hyperspectral imaging[J]. Acta Horticulturae, 2009, 817(1): 277-284
[66] Aleixos N, Blasco J, Navarron F, et al. Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2002, 33(2): 121-137
[67] Bravo C, Moshou D, West J, et al. Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(2): 137-145
[68] Kumar A, Lee W S. Citrus greening disease detection

using aerial hyperspectral and multispectral imaging techniques[J].Journal of Applied Remote Sensing,2012,6(1):063542

[69] Cerovic Z G,Samson G,Morales F,et al.Ultraviolet-induced fluorescence for plant monitoring:Present state and prospects[J].Agronomie,1999,19(7):543-578

[70] Chaerle L,Hagenbeek D,Bruyne E D,et al.Thermal and chlorophyll-fluorescence imaging distinguish plant-pathogen interactions at an early stage[J].Plant & Cell Physiology,2004,45(7):887-896

[71] Belasque J J,Gasparoto M C G,Marcassa L G.Detection of mechanical and disease stresses in citrus plants by fluorescence spectroscopy[J].Applied Optics,2008,47(11):1922-1926

[72] Lenk S,Chaerle L,Ndel E E,et al.Multispectral fluorescence and reflectance imaging at the leaf level and its possible applications[J].Journal of Experimental Botany,2007,58(4):807-814

[73] Lins E C,Belasque J,Marcassa L G.Detection of citrus canker in citrus plants using laser induced fluorescence spectroscopy[J].Precision Agriculture,2009,10(4):319-330

[74] Chaerle L,Lenk S,Hagenbeek D,et al.Multicolor fluorescence imaging for early detection of the hypersensitive reaction to tobacco mosaic virus[J].Journal of Plant Physiology,2007,164(3):253-262

[75] Bravo C,Moshou D,Oberti R,et al.Foliar disease detection in the field using optical sensor fusion[J].European Journal of Endocrinology,2004,133(4):467-474

[76] Backoulou G F.Using multi-spectral imagery to detect and map stress induced by Russian wheat aphid[D].Stillwater,OK:Oklahoma State University,2008

[77] Backoulou G F,Elliott N C,Giles K,et al.Spatially discriminating Russian wheat aphid induced plant stress from other wheat stressing factors[J].Computers & Electronics in Agriculture,2012,78(2):123-129

[78] Apan A,Held A,Phinn S,et al.Detecting sugarcane 'orange rust' disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery[J].International Journal of Remote Sensing,2004,25(2):489-498

[79] Lenthe J H,Oerke E C,Dehne H W,et al.Digital infrared thermography for monitoring canopy health of wheat[J].Precision Agriculture,2007,8(1/2):15-26

[80] Yang C H,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

[81] Panmanas S,Yuki H,Munehiro T.Study on non-destructive evaluation methods for defect pods for green soybean processing by near-infrared spectroscopy[J].Journal of Food Engineering,2009,93(4):502-512

[82] Wang X,Zhang M,Zhu J,et al.Spectral prediction of phytophthora infestans infection on tomatoes using artificial neural network (ANN)[J].International Journal of Remote Sensing,2008,29(6):1693-1706

[83] Yao Q,Guan Z X,Zhou Y F,et al.Application of support vector machine for detecting rice diseases using shape and color texture features[C]//International Conference on Engineering Computation,2009:79-83

[84] Steddom K,Heidel G,Jones D,et al.Remote detection of rhizomania in sugar beets[J].Phytopathology,2003,93(6):720-726

[85] 沈颖,王华弟,李仲惺,等.水稻白叶枯病再流行原因分析与防控对策研究[J].中国农学通报,2016,32(24):180-185
SHEN Ying,WANG Huadi,LI Zhongxing,et al.Re-epidemic causes and control measures for rice bacterial leaf blight[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2016,32(24):180-185

[86] 彭昌家,冯礼斌,白体坤,等.小麦条锈病发生流行趋势及其成因探讨[J].农学学报,2015,5(5):39-47
PENG Changjia,FENG Libin,BAI Tikun,et al.Study on the epidemic characteristic and causes of wheat strip rust in Nanchong city[J].Journal of Argiculture,2015,5(5):39-47

[87] 杨可明,陈云浩,郭达志,等.基于高光谱影像的小麦条锈病光谱信息探测与提取[J].光子学报,2008,37(1):145-151
YANG Keming,CHEN Yunhao,GUO Dazhi,et al.Spectral information detection and extraction of wheat stripe rust based on hyperspectral image[J].Acta Photonic Sinica,2008,37(1):145-151

[88] Zhang J C,Pu R L,Yuan L,et al.Monitoring powdery mildew of winter wheat by using moderate resolution multi-temporal satellite imagery[J].PloS One,2014,9(4):e93107

[89] Huang W J,Guan Q S,Luo J H,et al.New optimized spectral indices for identifying and monitoring winter wheat diseases[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2014,7(6):2516-2524

[90] Helmi Zulhaidi M S,Hamdan N.Hyperspectral imagery for mapping disease infection in oil palm plantation using vegetation indices and red edge techniques[J].American Journal of Applied Sciences,2009,6(6):1031-1035

[91] 陈秀法,杨晓梅,王敬贵,等.高分辨率遥感下的盖州滩潮沟发育分维特征和贝类生境区信息研究[J].海洋学报,2005,27(3):39-45
CHEN Xiufa,YANG Xiaomei,WANG Jinggui,et al.Study on fractal characteristics of tidal creeks and information of seashell habitats in the Gaizhou beach based on high resolution satellite images[J].Acta Oceanologica Sinica,2005,27(3):39-45

[92] Bryceson K,Hunter D,Hamilton J.Use of remotely-rensed data in the Australian plague locust commission[J].Pest Control,1993:435-439

[93] Ni S X,Jiang J J,Wang J.Landscape ecology of the region surrounding Qinghai Lake,Qinghai Province of China based on remotesensing[J].Journal of Environmental Sciences,1999,277(2):84-89

[94] Wilson M L.Emerging and vector-borne diseases:Role of high spatial resolution and hyperspectral images in analyses and forecasts[J].Journal of Geographical Systems,2002,4(1):31-42

[95] Wolter P T,Townsend P A,Sturtevant B R,et al.Remote sensing of the distribution and abundance of host species

for spruce budworm in Northern Minnesota and Ontario [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3971-3982

[96] Yang C M, Cheng C H, Chen R K. Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leaffolder[J]. Crop Science, 2007, 47(1): 329-335

[97] Xu H R, Ying Y B, Fu X P, et al. Near-infrared spectroscopy in detecting leaf miner damage on tomato leaf[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(4): 447-454

[98] Zhang M H, Qin Z H, Liu X. Remote sensed spectral imagery to detect late blight in field tomatoes[J]. Precision Agriculture, 2005, 6(6): 489-508

[99] Wang W, Chi T, Li C, et al. Detection of sour skin diseases in vidalia sweet onions using near-infrared hyperspectral imaging [C]// 2009 ASABE Annual International Meeting, Reno, 2009

Progress in monitoring and forecasting of crop pests and diseases by remote sensing

HUANG Wenjiang[1,2] ZHANG Jingcheng[3] SHI Yue[1,2] DONG Yingying[1] LIU Linyi[1,2]

1 Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 School of Life Information and Instrument Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018

Abstract Crop pests and diseases have caused serious crop yield loss all over the world. Therefore, the establishment of un-destructive and effective method for monitoring and forecasting of crop pests and diseases at large scale is of great importance for crop management. In recent years, crop pests and diseases forecasting information is available and integrated with multi-source datasets (Earth Observation (EO), meteorological, biopesticide and crop control) to make foundation for sustainable management of pests and diseases. This paper summarizes domestic and overseas research progresses on remote sensing systems, monitoring methods, features and algorithms. Approaches for the dynamic remote sensing monitoring of pest and disease environment and development are investigated with multi-source EO data (hyperspectral, high spatial and high temporal satellite images). This paper introduces the progress for crop pests and diseases monitoring and forecasting mechanism, models, methods and applications at leaf, canopy and regional scale. It explores their system outputs to provide information for pest and disease management with new biopesticides and automatic Unmanned Aerial Vehicle (UAV) spraying system to produce an estimation of risk or potential yield losses. The crop pests and diseases remote sensing monitoring and forecasting system should be constructed by integration with EO data, meteorological data and crop control data to produce national pests and diseases maps and scientific reports. Crop pests and diseases monitoring and forecasting by remote sensing will be beneficial for the improvement of regional crop pests and diseases forecasting and sustainable management to guarantee food security and promote agricultural modernization.

Key words crop pests and diseases; remote sensing monitoring; forecasting; system