

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.037

# 农业主要病害检测与预警技术研究进展分析

王翔宇<sup>1</sup> 温皓杰<sup>1,2</sup> 李鑫星<sup>2,3</sup> 傅泽田<sup>1,2</sup> 吕雄杰<sup>4</sup> 张领先<sup>3,5</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 食品质量与安全北京实验室, 北京 100083;  
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 4. 天津市农业科学院信息研究所, 天津 300192;  
5. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 农作物病害一直以来是制约农业可持续发展的主要因素之一, 农业病害预警逐渐成为国内外研究的热点问题。在总结和整理现有国内外研究文献的基础上, 对物联网和传感器、3S、光谱、病原微生物检测等农业病害预警信息获取关键技术以及病害图像处理、病害预警专家系统、病害预测等农业病害预警信息处理技术进行了系统的分析与讨论。综述结果表明, 多种技术的结合、集成及融合将使农业病害预警的覆盖面更广, 预警准确性更高; 农业病害预警信息获取方式在向精确化、广泛化方向发展; 对农业病害的短期预警将成为一个研究重点; 农业病害早期/初期检测、诊断与预警会成为新的发展方向; 农业病害预警系统及装备将朝着低成本化方向发展; 实时在线的农业病害自动预警方式具有更大的实际意义。

**关键词:** 农业病害; 预警; 病害检测; 物联网; 3S 技术

**中图分类号:** S431.9; S-1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0266-12

## Research Progress Analysis of Mainly Agricultural Diseases Detection and Early Warning Technologies

Wang Xiangyu<sup>1</sup> Wen Haojie<sup>1,2</sup> Li Xinxing<sup>2,3</sup> Fu Zetian<sup>1,2</sup> Lü Xiongjie<sup>4</sup> Zhang Lingxian<sup>3,5</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, Beijing 100083, China

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. Information Institute, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300192, China

5. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology (Beijing), Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The occurrence of agricultural diseases has been one of the restrict factors of sustainable agricultural development for a long time, and agricultural diseases early warning technology gradually becomes a hot issue in China and abroad. Based on the literature review, the important meaning of agricultural diseases early warning technology for agricultural development was presented. This article expounded the characteristics and classification of agriculture diseases early warning firstly. And then a systematical analysis and discussion were carried on the key technologies for agricultural diseases early warning information acquisition, mainly summarizing the internet of things and sensor technology, 3S technology, spectrum technology and pathogenic microorganism examination technology. And also an introduction of agricultural diseases early warning information processing technologies was made, such as image processing technology, expert system of disease early warning and disease prediction technology. Finally, the conclusion of the whole article was obtained. The results indicated that the integration and combination of multi-technology would cover the whole agricultural diseases early warning area and get a

收稿日期: 2016-04-22 修回日期: 2016-07-03

**基金项目:** 叶类蔬菜产业技术体系北京市创新团队建设专项资金项目(BAIC07-2016)和天津市科技支撑计划项目(15ZCZDNC00120)

**作者简介:** 王翔宇(1989—),男,博士生,主要从事农业系统与知识工程研究,E-mail: wangxiangyu@cau.edu.cn

**通信作者:** 张领先(1970—),男,副教授,博士,主要从事农业系统与知识工程研究,E-mail: zlx131@163.com

higher accuracy of disease early warning; the acquisition of agricultural information was becoming precision and extensive; the early detection, diagnose and warning of agricultural diseases would be a new development direction; the agricultural disease early warning systems and equipment would be developed with lower cost; the real-time and online agricultural diseases automatic early warning will be an important research direction.

**Key words:** agricultural diseases; early warning; disease detection; internet of things; 3S technology

## 引言

农作物病害是农业生产上重要的生物灾害,据联合国粮农组织估计,世界粮食生产因植物病害造成的年损失约为总产量的10%<sup>[1]</sup>。从近5年(2011—2015年)全国农业技术推广服务中心对全国农作物重大病虫害发生趋势做出的预报来看,我国农作物病虫害总体维持多发、重发和频发态势,全国累计发生面积均在3.5亿hm<sup>2</sup>以上<sup>[2]</sup>。

设施农业是我国农业发展的一个重点,截至2014年,我国温室设施面积高达410.9万hm<sup>2</sup>,目前,我国设施栽培占全世界的85%以上,总面积和总产量均居世界第1位<sup>[3]</sup>。设施农业的发展已经成为评价一个国家或地区农业现代化水平的重要指标<sup>[4-5]</sup>。虽然设施环境为作物周期性生产提供了有利场所,但人为创造的小气候环境会造成生态系统的不稳定,尤其高温高湿等环境条件给病原生物的繁殖和侵染提供了有利条件,导致作物病虫害发生数量激增<sup>[6]</sup>,如:连作导致土壤障碍发生,使土壤发生了理化性质的改变;高温高湿或低温高湿,以及通风不畅,为病原的滋生创造了有利条件。研究表明:棚室中的有害细菌、真菌数量均大于露地。在设施栽培的过程中,作物会受到其他生物的伤害或受到不适宜环境条件的影响而产生病害现象,造成作物的品质下降,影响其质量和经济效益,造成难以估量的损失<sup>[7-8]</sup>。

在20世纪70年代,国内外就对农业病害预警方法及技术进行了早期的研究<sup>[9]</sup>,随着技术的进步,特别是传感器、光谱、物联网等技术的发展与成熟,农业病害预警水平有了极大提升。基于此,本文对农业病害预警关键技术在国内外的研究进展进行综述,分析我国农业病害预警研究中存在的问题并对农业病害预警技术的未来发展做出展望。

## 1 农业病害预警概述

农业病害预警就是在农作物病症出现之前,以经验或信息化手段为指导,根据对环境、病原、作物本身等进行的监测及分析,对病害发生的可能性进

行预测并及时预报,以最大程度降低甚至避免病害发生而造成损失<sup>[10]</sup>。

### 1.1 农业病害预警特点

农业病害预警是有效降低农作物发病率的有效手段,其预警对象是农作物,与其他预警相比(如气象灾害预警、煤矿瓦斯预警、机械安全性能预警),农业病害预警有其自身特点:

(1)复杂性。农业病害预警针对的对象是农作物,而影响农作物发病的因素复杂,需要温度、湿度、光照等环境因素和病毒、细菌、真菌等病原生物的相互配合才能引发病害。

(2)积累性。农作物病害不是瞬间发生的,而是在一定的环境与病原侵染的条件下发生的,这个过程需要环境、病原等因素的积累才能引发病害。

(3)提前性。病原侵染作物后并不会即刻表现出病征,当病征显现时再进行预警为时已晚,所以作物病害预警的关键在于对病征表现之前的作物生理特征、病原微生物动态以及环境的有效监测,这就要求预警需要提前进行。

(4)持续性。农业病害预警需选取适当的预测指标作为预警判定的标准,而这些指标数据处在持续动态变化中,因此预警需要结合这些动态趋势,才能准确预测病害发生情况。

### 1.2 农业病害预警分类

农业病害预警按照植物病理学原理、预警时效性、预警范围和规模等分类方式可以有不同分类。

#### (1)按照植物病理学的预警分类

从植物病理学角度出发,根据病害三角原理<sup>[11]</sup>,可以将农业病害预警分为:基于环境信息的病害预警,基于病原微生物的病害预警以及基于寄主植物生理特性的病害预警。

#### (2)按照预警时效性的预警分类

从时间上,根据作物的生长周期以及预警的时效性,可以分为短期预警、中期预警、长期预警和超长期预警。4种预警方法的比较如表1所示。

#### (3)按照预警范围和规模的预警分类

从空间上,根据预警的范围和规模,又可将其分为宏观预警和微观预警。宏观预警和微观预警对比如表2所示。

表1 短期、中期、长期及超长期预警比较

Tab.1 Comparison of short-term, mid-term, long-term and ultra-long-term early warning

预警方法	预警时限	作用
短期预警	7~10 d	目标明确,不确定因素少,预见性强,能对近期病害流行规律提供各种资料,为病害防治提供决策依据
中期预警	10~30 d	可对未来病害发生程度进行预测,为病害防控工作提供指导 <sup>[12]</sup>
长期预警	大于30 d	掌握病害发生时间、爆发程度等发展规律 <sup>[13]</sup> ,为控制病害流行提供指导依据
超长期预警	大于1 a	在研究病害发生发展规律的基础上,探索下年度的发生趋势,提前为下年度的病害防控提供有效指导 <sup>[10]</sup>

表2 宏观与微观预警比较

Tab.2 Comparison of macroscopic and microcosmic early warning

预警方法	范围与规模	作用
宏观预警	范围广,规模大,通常为种植面积较大的地理区域	从宏观层面,对大面积爆发的病害进行分析预测,为政府和相关部门对农业宏观调控提供有效的依据和指导 <sup>[14]</sup>
微观预警	面积小,通常是一片田地、一个温室或一株作物本身	针对某一农户所种植的作物,从作物与所生长环境及病原微生物角度进行病害的分析预测,为农户提供病害防治建议

### 1.3 农业病害预警过程

农业病害的预警过程从逻辑上划分为5个阶段,即:确定警情、寻找警源、分析警兆、预报警度及排除警情<sup>[9]</sup>。

(1)确定警情。即确定农作病害发生情况,具体可通过警素和警度来反映警情。警素是构成警情的指标,如:病害严重度、病情指数等;警度指病害发生的严重程度,通常划分为无警、轻警、中警、重警及巨警5种警度。

(2)寻找警源。即找出警情产生的根源,如利于发病的环境、易于侵染的病原等。

(3)分析警兆。即分析病害发生的征兆,警兆可以是显性表现,如:作物出现病斑等;也可以是隐性表现,如:在潜育期,病原与寄主植物斗争激烈,但却并未表现出病征。

(4)预报警度。即根据警情及警兆来做出综合预报,给出预警的等级。

(5)排除警情。即根据预警结果给出相应的病害防治指导建议,以消除警情。

## 2 农业病害预警关键技术

农业病害预警主要涉及的关键技术包括农业病害预警信息获取关键技术和农业病害预警信息处理技术。

### 2.1 农业病害预警信息获取关键技术

农业病害预警信息的获取是病害预警的前提,准确及时的信息获取可为病害预警提供必要的依据。农业病害预警信息获取关键技术可分为:环境信息获取技术、病原微生物信息获取技术、作物生理信息获取技术及地理信息获取技术。

#### 2.1.1 环境信息获取技术

在农业病害预警领域中,主要通过物联网与传

感器技术获取作物生长环境信息<sup>[15-17]</sup>。

刘渊等<sup>[18]</sup>设计开发了基于物联网的连栋蔬菜温室环境监测系统,通过温度、湿度、二氧化碳浓度和光照传感器采集环境数据,由生物特征提取器采集作物生理信息,并通过无线传感网络进行通信,将信息传输到上位机,实时感知作物生长环境信息,经专家系统判别后进行相应反馈调控。赵中华等<sup>[19]</sup>利用物联网关键技术,应用传感器自动采集环境因子数据,并结合马铃薯生产环境气象因子与晚疫病病害发生的关系模型,构建了马铃薯晚疫病监测预警与防控决策系统,对监测地的马铃薯晚疫病信息进行实时监测、预警、诊断及科学防控指导。叶片湿润时间在一定程度上决定了病原能否侵染及产孢,是病害预警的关键因素之一,利用叶面湿度传感器<sup>[20]</sup>可以获取叶面湿度信息,为预警提供决策依据。李明等<sup>[21]</sup>、ZHAO等<sup>[22]</sup>利用传感器监测黄瓜冠层相对湿度、温度、露点温度、太阳辐射等参数,并构建了叶片湿润时间估计模型,可以用于日光温室黄瓜叶片湿润时间监测。

物联网与传感器技术在设施农业中的应用更多,而大田种植应用有很大局限性,这是因为大田种植面积大,要准确获取大田作物及生长环境信息,就必须增加传感器的布设,这会使成本大大增加,故低成本信息化成为了农业物联网的一个发展方向。目前,通过传感器可以准确获取作物生长环境信息,但其应用主要停留在对农业环境信息的监测方面,对于农业病害预警方面没有得到较为深入的应用,将传感器采集的环境数据与作物病理信息相结合并进行综合分析会使物联网与传感器技术在农业预警领域发挥更大的作用。

#### 2.1.2 病原微生物信息获取技术

病原微生物对作物的侵染是作物病理性病害发

生的重要因素,准确获取病原微生物信息有助于对病害种类进行判别,增强预警的精确性。

### 2.1.2.1 电镜检测技术

引起农作物发生病害的病原微生物种类繁多,通过病原微生物电镜检测技术可以准确检测出病原微生物种类,从而可以协助判断出病害的准确类别,为病害预警及防治提供准确直接的指导依据。

传统的病原微生物检测技术包括涂片镜检和分离培养,但传统方法程序较为复杂,且较为费时。电子显微镜检测简便快捷,是采集病原微生物图像信息的主要技术手段<sup>[23]</sup>。YE等<sup>[24]</sup>利用电子显微镜技术研究了大麦黄矮病毒对植物叶绿体的侵染过程。李小龙等<sup>[25]</sup>、齐龙等<sup>[26]</sup>通过显微镜获取了小麦条锈病菌和稻瘟病菌孢子图像,并实现了对孢子的自动计数,对指导病害预警工作提供了良好的依据。

由于电镜检测技术具有高分辨率的优点,可以观察到植物组织、细胞以及病原微生物的超微结构,所以电镜在农作物病害检测中具有很高的可靠性。但电镜检测技术通常是在实验室条件下进行,需要去现场采集样本并带回实验室进行观察,无法进行实时监测预警是电镜技术在作物病害预警中的一大难题。将电镜检测技术与实时在线监测技术相结合可为农作物病害预警提供新的、及时有效的方法。

### 2.1.2.2 PCR与生物芯片技术

随着微生物检测技术的不断发展与进步,检测已从病原体水平深入到了分子水平和基因水平<sup>[27]</sup>,出现了众多新型微生物检测技术,主要包括PCR(Polymerase chain reaction)技术和生物芯片技术。

PCR检测技术能够实现对植物病原真菌快速、灵敏和可靠的检测。肖长坤等<sup>[28]</sup>利用PCR检测技术,分别设计合成了鉴定白菜黑斑病菌3个种的特异性引物,为白菜黑斑病的快速检测提供了新的方法。

基因的表达谱芯片已被广泛应用于医学中,主要用于对人类疾病检测<sup>[29]</sup>,但随着植物-病原物基因组测序的逐步完善,植物病害检测也将通过生物芯片实现<sup>[30-31]</sup>。

PCR与生物芯片技术能在基因水平上对病原进行识别检测,准确度高,但其检测结果很大程度上依赖基因测序工作,基因测序工作只能在实验室条件下进行,而且时间消耗量大,因此在相当一段时期内,PCR与生物芯片技术在农业病害预警中的应用还存在一定的限制因素。

### 2.1.3 作物生理信息获取技术

光谱技术作为一种无损、快速、高精度的检测技

术,被广泛应用于各个研究领域。光谱技术主要应用于作物长势与估产、营养诊断与施肥、农产品品质和安全检测以及病害信息监测等方面,在作物病害诊断中也得到了广泛应用<sup>[32-34]</sup>。

光谱技术检测作物病害的基本原理是不同的病害对不同波段光线吸收和反射光线效果不同<sup>[35]</sup>,因此可以通过其敏感光谱段的特征来判别病害情况,并进行早期预警。

在农业病害预警领域中,光谱技术最大的贡献是可以近距离和远距离,从微观和宏观2个方面来检测农作物病害情况,为病害预警提供可靠、直观的理论事实依据。

在近距离农作物病害光谱检测研究中,隋媛媛等<sup>[36-37]</sup>应用激光诱导叶绿素荧光光谱分析技术,通过测定健康叶片、病菌接种3d叶片和接种6d叶片的光谱曲线以及黄瓜蚜虫害的侵染与发生等级,综合应用主成分分析和最小二乘支持向量机方法,构建了温室黄瓜霜霉病害的预测模型和蚜虫害的分类预测模型,预测能力分别达到97.73%和96.34%,具有很好的分类和鉴别效果。ZHOU等<sup>[38]</sup>以叶绿素荧光光谱为主要手段,结合环境信息、水稻生理信息和生化信息,构建了基于SG-FDT预处理PCA-SVC稻叶瘟病识别与预警模型,识别正确率达95.0%。冯雷等<sup>[39]</sup>利用绿、红、近红外3波段通道的多光谱成像技术对水稻叶瘟病进行检测,通过提取水稻叶面及冠层图像信息建立的稻叶瘟病情检测分级模型,对营养生长期水稻苗瘟的识别准确率可达98%,叶瘟的识别准确率为90%,为实施科学的稻叶瘟防治提供了决策支持。邢东兴等<sup>[40]</sup>分析了红富士苹果树在各级黄叶病害胁迫下的反射光谱特征,利用光谱数据对果树受害程度及病害级别进行定量化测评。RINEHART等<sup>[41]</sup>、BRAVO等<sup>[42]</sup>、JONES等<sup>[43]</sup>、冯雷等<sup>[44]</sup>利用可见近红外光谱技术分别对牧草匍匐剪股颖褐斑病、小麦黄锈病、番茄叶斑病及大豆豆荚炭疽病进行了早期预测。

远距离光谱检测主要是高光谱技术与遥感技术的结合,高光谱遥感特有的光谱匹配和光谱微分技术使其在农业病害监测中得到研究者的青睐<sup>[45]</sup>。MOSHOU等<sup>[46]</sup>利用高光谱遥感技术分析作物病害光谱响应,通过迭代自组织与二项式分析相结合的方法,对小麦条锈病光谱信息进行分析,识别结果高于99%。QIN等<sup>[47]</sup>利用高空间分辨率的航空遥感光谱数据检测水稻纹枯病,通过光谱数据、标准差分指数等来研究影像数据与地面实测数据的相关性,相关系数大于0.62,该方法对于中等和严重级别的水稻纹枯病预测有较好的效果。

目前光谱在作物病害诊断中的应用较为广泛,但在病害预警领域中应用较为缺乏,因此,通过光谱采集侵入期、潜育期的作物样本,即采集未表现病征的作物样本的光谱信息,并通过特征波段来判别作物的染病情况,将成为作物病害预警的一种有效手段。

#### 2.1.4 地理信息获取技术

作物病害地理信息的获取可以对病害发生地进行准确定位,可以帮助政府部门发布区域性预警信息,及时提醒当地病害防控指导中心做好病害防控工作。

地理信息的获取主要通过 3S 技术<sup>[48-49]</sup>实现。3S 技术在农业中,遥感(Remote sensing, RS)用于实时、快速地提供大面积地表物体及其环境的几何与地理信息及各种变化,通过遥感数据可反演地表温度、土壤、植被水分等参数,能够在一定程度上反映作物生境状况,配合气象信息对病害发生适宜性进行综合预测,提高了病害预测能力<sup>[50]</sup>;地理信息系统(Geography information system, GIS)则是多源时空数据综合处理和应用分析的平台,能够对病害发生、发展进行分析、模拟,利用 GIS 的空间建模和空间决策支持功能,并结合生物地理统计学,进行农作物病害空间分布、空间相关分析和病害发生动态的时空模拟,实现大尺度数据库管理等功能<sup>[51]</sup>;全球定位系统(Global positioning system, GPS)主要是实时、快速地提供目标的空间位置,找到病害发生地,辅助飞行喷药设备进行精准喷药, GPS 主要用于农业病害动态监测,通过辅助遥感数据处理与信息提取、病害防治地理信息系统的建立和数据更新及飞机防治与监测路线导航等,实现病害发生点的准确定位及农药的准确喷洒<sup>[52-54]</sup>。

MARQUES 等<sup>[55]</sup>利用遥感技术,通过气象卫星来获取地表温度,利用地表温度数据及其时空特征构建了番茄的病虫害的风险地图,有效提高了番茄病虫害的预测结果。罗菊花等<sup>[56]</sup>使用 SuperMapIS. NET 的 GIS 软件作为开发平台,以 C++ 作为编程语言,建立农作物病虫害预警系统,将 GIS 与 RS 在系统中集成,实现了将抽象数据转换成清晰简明的电子地图,直观明了地显示了病害的发生程度和空间分布规律,并使用甘肃省庆阳地区西峰区 2002 年的小麦条锈病相关数据,验证了预警系统的病害预测功能,获得了与实际相吻合的预警结果。刘明辉等<sup>[57]</sup>以开源版 MapGuide 为 WebGIS 二次开发平台,结合 .net 技术开发了具有 B/S 三层网络架构的农业病虫害预测预报专家系统,系统采用基于知识的前向型推理与基于系统案例推理相结合的方法,

用户依据系统的向导式提示以及数据输入规范输入病虫害监测数据,系统将病虫害发生程度以 GIS 专题图、数据图表及文字等多种方式反馈给用户,实现了病虫害的预测预报。刘书华等<sup>[58]</sup>将植保知识、人工智能技术、地理信息系统(GIS)、决策支持系统(Decision support system, DSS)有机结合起来,开发了基于 GIS 的农作物病虫害防治决策支持系统,能够对主要作物病虫害进行预测、决策、诊断、咨询,并将抽象的数据转换成清晰简明的电子地图,直观显示病虫害发生程度及地域分布规律,为病虫害防治提供服务。陈林等<sup>[59]</sup>利用 Agent 模型对昆虫及其寄主、环境之间的关系进行计算机模拟,并以北京地区 1993 年的实际日均温、湿度、降雨量数据为主要环境数据,进行了区域模拟验证,与北京地区实际调查数据进行了对比研究,并开发了基于 GIS 的麦蚜种群动态模拟平台,以小麦生长季节的气象数据对宁夏、陇东、陕西 3 个地区进行了模拟,在一定程度上,可以模拟田间实际情况。

3S 技术以其优良的远距离空间测控识别特性以及精准的地理定位特性,被广泛应用于大田作物生长监测中,与物联网技术相反,3S 技术在种植面积较小的设施环境中的应用较为局限。

## 2.2 农业病害预警信息处理技术

### 2.2.1 农业病害图像处理技术

农作物病害图像处理技术主要用于病害诊断研究,具体包括图像分割、特征提取、病害识别等方面<sup>[60]</sup>。

徐鹏云等<sup>[61]</sup>利用面阵 CCD 摄像机采集显微镜中孢子的图像,研究了孢子自动计数方法。李小龙等<sup>[25]</sup>利用孢子捕捉器捕捉小麦条锈病菌夏孢子,利用显微镜照相技术获得孢子图像,通过对图像进行基于最近邻插值法的缩放处理、基于 K-means 聚类算法的分割处理、形态学操作修饰和分水岭分割等一系列处理,实现了对夏孢子的自动计数和标记。齐龙等<sup>[26]</sup>利用显微图像处理技术获取稻瘟病菌孢子图像,根据显微图像中孢子的边缘特征,利用 Canny 算子进行边缘检测,然后对边缘检测后的二值图像进行数学形态学闭、开运算处理,最后通过基于距离变换和高斯滤波的改进分水岭算法对粘连孢子进行分离,实现了对稻瘟病菌孢子的自动检测和计数,孢子检测的平均准确率达 98.5%。利用图像处理技术完成孢子计数,为气传植物真菌病害的预测预报提供了新的方法。

在农业病害中长期及超长期预警中,图像处理技术主要用来辅助完成农作物病害识别。彭占武等<sup>[62]</sup>综合运用图像处理和模糊识别技术,以自然光

条件下拍摄黄瓜叶片图像作为实验数据,从病斑形状、纹理和颜色3方面提取了16个特征参数,并对黄瓜霜霉病叶片图像进行有监督的样本训练,再对待测样本进行模糊聚类测试,平均识别准确率为95.28%。王献锋等<sup>[63]</sup>结合黄瓜生长的环境信息提取病斑图像的颜色、形状、纹理等统计特征向量,再利用统计分析系统进行判别分析,实现了对黄瓜霜霉病、褐斑病和炭疽病3种叶部病害的识别,识别率高达90%以上。MA等<sup>[64]</sup>构建了面向叶类蔬菜病害识别的温室监控视频采集系统<sup>[65]</sup>,并利用融合视觉显著性和在线聚类的改进像素帧平均算法,对温室蔬菜监控视频中含有病征信息的关键帧进行了提取,并完成了对油菜叶片病斑的分割。王建玺等<sup>[66]</sup>对采集的烟叶图像进行去噪处理,采用快速模糊C-均值聚类算法对病斑进行分割,提取烟叶病斑颜色、形状和纹理特征,通过模糊识别技术完成了对烟叶角斑病和野火病的自动识别。

图像处理技术主要应用于作物病害诊断中,为作物中期和长期预警提供有效的参考,是对作物病害短期(或早期)预警的一种有效补充。

### 2.2.2 农业病害预警专家系统

农业专家系统在国内外有较大的发展,并涉及到作物栽培、施肥、病虫害防治等方面<sup>[67]</sup>。农业专家系统主要以知识库、数据库以及推理判断程序等为核心<sup>[68]</sup>。

马丽丽等<sup>[69]</sup>综合了番茄生长日光温室多年环境数据,建立了周年连续的温室环境通用数据库,依此数据库中的温湿度数据对番茄病害发生进行预测预警,实现了对番茄早疫病、晚疫病、灰霉病和叶霉病4种常见病害的预警。温皓杰等<sup>[70]</sup>利用黄瓜病害的专家领域知识,构建了基于Web的黄瓜病害诊断专家系统,以MyEclipse 6.0、SQL Server 2000为系统设计及数据库开发工具,利用JAVA技术实现了黄瓜病害诊断系统的开发。宋启堃等<sup>[71]</sup>根据1982—2010年的黔南州统计的作物病情、虫情数据以及1981—2010年统计的气象数据,构建了白背飞虱、卷叶螟蛾等虫情数据库,稻瘟病、小麦条锈病等病情数据库以及平均气温、逐日降水量、日照时数、相对湿度、风向风速等气象数据库,根据农业病害领域专家知识,得到病害监测指标,利用VB.NET设计并开发了黔南州主要农作物病虫害监测预警专家系统,将病害及气象资料实时入库监测分析,当达到某种病虫害发生条件即预警,实现了植物保护的现代化跟踪监测管理。闵红<sup>[72]</sup>将河南省植保专家有关小麦纹枯病知识进行智能化集成,根据1991—2000年的河南省项城市、洛阳市、郑州市等地的小

麦纹枯病病害情况及气象条件构建病情及气象数据库,采取定性预测稳定期发病程度和定量预测冬前病株率、稳定期病指相结合的方式,对小麦的整个生育期进行研究,开发了河南省小麦纹枯病预警与决策专家系统,实现了对小麦纹枯病的预警、诊断和防治决策功能。

农业病虫害预警与防治专家系统的构建主要依靠农业病虫害领域专家的知识与经验,领域专家知识经验的准确性会直接影响到专家系统的准确性,所以大量准确、专业的农业病虫害预测及诊断知识是整个专家系统的有力支撑。

### 2.2.3 农业病害预测技术

#### 2.2.3.1 基于回归分析的病害预测模型

以积累的设施环境气象资料为自变量,以设施作物病虫害发生或流行的程度为因变量,通过回归分析构建病虫害回归预警模型是最常见的预警方法。MOH等<sup>[73]</sup>利用多元回归分析构建了温度、湿度、接种菌量与马铃薯块茎软腐病征的关系模型,结果证明,模型对马铃薯软腐病有良好的响应和预测能力。李明等<sup>[74]</sup>以黄瓜霜霉病为例,以空气平均相对湿度大于等于80%的小时数、空气平均相对湿度大于等于90%的小时数以及病原侵染后的积温为监测指标,并将其与病情指数建立关系,采用逐步回归分析方法进行拟合,通过参数调整得到最优模型,为温室黄瓜霜霉病初侵染预警提供决策支持。鄢洪海<sup>[75]</sup>以山东省临邑县2000—2005年11月和12月气象资料中的平均温度、降水量和光照6因子为自变量,以番茄晚疫病病情指数为因变量,用逐步回归分析法建立番茄晚疫病预测初级模型,预测结果与实际结果基本相符。惠祥海等<sup>[76]</sup>根据2001—2006年的观察资料,以上年11月和12月的平均气温、降水量和光照6个因子为自变量,以翌年2月辣椒疫病病株率为因变量,利用回归分析构建辣椒疫病预测模型,预测结果与实测结果基本一致。华来庆等<sup>[77-79]</sup>根据上海市松江区蔬菜基地2004年3—6月的气象数据,以黄瓜霜霉病发病株数、发病程度、棚内温度、棚内湿度、气温、气湿、降雨量、降雨天数、日照时数等为监测指标,通过主成分回归模型、自回归条件异方差模型等,构建了监测指标与病情指数的关系,取得了良好的预测效果。马宁<sup>[80]</sup>根据温度、相对湿度、降水与玉米大斑病病斑面积及病情指数的关系,利用回归分析方法构建了玉米大斑病预警模型,预警结果有较高的准确性。王纯枝等<sup>[81]</sup>以2002—2008年东北地区杨树烂皮病发病程度及气温、降水量、降水日数、日照时数、空气相对湿度、温湿系数、风速等相应气象资料为研究基础,利用回归

分析法构建了杨树烂皮病气象适宜度预报模型,平均预报准确率达75%,具有较好预测效果。

基于回归分析的病害预测模型需要一定的数据积累,通常需要以各个植保站、气象站等相关单位提供的积年累月的病害数据和气象数据为数据基础进行分析建模,时间代价较大,因此不适合短期或中期预警。除此,其建模指标选取过程较为复杂,自变量的选取直接影响到模型的准确度,泛化能力较差,无法通过参数优化来达到更准确的预测效果,随着神经网络等新的机器学习方法的出现和发展,回归分析在病害预警领域中的应用也变得越来越少。

### 2.2.3.2 基于机器学习的病害预测模型

机器学习是指计算机通过模拟人类学习方法来重新组织知识体系,并实现获取新的知识技能的行为。将机器学习方法应用于设施农业病害预警中,可实现病害预警的智能化。

机器学习主要是从数据中学习,包括有指导学习、无指导学习和半指导学习<sup>[82]</sup>。对于农业病虫害预警,病虫害种类与作物生长环境以及病原微生物有着明确的关系,即根据环境条件、侵染的病原及病征表现即可判定病害类型,故常通过有指导学习的方式,构建特征(包括环境条件、病原、病征表现等)与结果(病害类型)的关系,从而达到精确预警的目的。常见的有指导学习包括:决策树、贝叶斯算法、人工神经网络和支持向量机等。刘晓宇<sup>[83]</sup>以移栽时间、氮、磷、钾肥施用量,5—8月的月平均气温、月平均降水量、月平均日照时数和月积温8个指标作为烟草野火病预警的警兆指标,使用病情指数作为野火病预警的警情指标,综合分析了黑龙江省2005—2011年的历史数据,构建了基于决策树的野火病预警模型,实现了对黑龙江省烟草野火病警情指标的轻警、中警偏轻、中警、中警偏重、重警5个警度的预报。张寿明等<sup>[84]</sup>根据马龙县1991—2003年的气象数据和田间马铃薯晚疫病实际病害情况等数据,以6、7月份的月平均温度、平均相对湿度、总降雨量作为神经网络的输入参数,当年相应的病害流行程度作为输出参数,运用BP神经网络技术开发了马铃薯晚疫病预测预警系统。李丽等<sup>[85]</sup>以平均气温、最低气温、日照时数、降雨量为输入向量,以苹果病虫害发生等级为输出向量,构建了基于径向基的神经网络预测模型,可以预测苹果常见的20余种病虫害。熊雪梅等<sup>[86]</sup>、曹志勇等<sup>[87]</sup>将神经网络应用于植物病虫害预警中,建立降雨量、雨日数、平均温度、平均湿度、光照指标等与作物病情指数的关系,实现了对作物病害的预警。牛海微<sup>[88]</sup>、李娟<sup>[89]</sup>分别应用人工神经网络构建了月季花卉病害预警模

型和小麦黄矮病预警模型,并取得了较好的预警效果。RUMPF等<sup>[90]</sup>根据甜菜叶片光谱图像特征,利用支持向量机分类算法进行了甜菜褐斑病和白粉病的早期检测及预警。杨志民等<sup>[91]</sup>以浙江省宁波市1995—2007年的稻瘟病气象数据为基础,将对稻瘟病影响较大的日平均气温、平均空气相对湿度、平均日降水量、平均日照时数等指标作为警兆指标,构建了基于强模糊支持向量机的稻瘟病气象预警模型,实现了对稻瘟病的气象预警。

机器学习是一个“黑匣子”问题,它可以根据环境信息及作物生理信息对病害及流行趋势进行预测,但其无法准确表示出环境信息、作物生理信息与病害之间的关系。所以基于机器学习的设施农业病虫害预警仍需建立在准确、详实的农业病虫害及相关信息和数据的基础之上,通过改进和优化机器学习算法及参数,可以获得具有良好推演、泛化能力的预警模型,已经成为了农业病害预警研究领域的一条重要途径。

## 3 农业病害预警发展趋势

我国在农业病害预警研究中取得了一定的进展,特别是在水稻、小麦等粮食作物以及黄瓜、番茄等蔬菜病害预警中取得了较大进步,随着物联网、3S、光谱、图像处理、病原微生物检测等信息技术的发展成熟,也为农业病害预警提供了良好的技术支持。

(1)多种技术的结合、集成及融合将使农业病害预警的覆盖面更广,预警准确性更高。以往的研究中,往往只针对某种预警技术进行研究,而忽略了其他技术的帮助和指导,通过技术的结合应用,如:将物联网技术与3S技术结合起来,将对整个农作物(大田作物与设施作物)生长环境监测形成覆盖,使信息的采集更加全面;结合不同机器学习算法的优势进行病害预警模型构建,将使病害预测准确度更加精确;结合光谱、电镜检测、PCR及生物芯片技术,将使病害预警从宏观到微观均得到良好效果。

(2)预警信息获取方式将更加精确,获取范围将更加广泛。精确、有效的数据是支撑和验证理论的核心,以往的病害预警研究中,往往只是定性研究,不注重数据的积累和及时更新,科研机构和相关单位应该更加注重对环境、病害及病原微生物等信息的数据积累和信息获取技术的改进提升,保证数据的准确性和泛用性,不断更新数据,才能为病害预警研究提供更可靠的技术与数据支撑。

(3)农业病害早期/初期检测、诊断与预警会成为新的发展方向。现阶段的农业病害预警研究,主

要根据历史数据进行中长期预警,可以为农作物生产提供宏观指导,但时效性较差,且病害预警模型多以环境及病害数据为预警依据,即预警模型构建的数据来源于环境参数及已经发生病害的叶片样本,样本采集周期长,且构建的预警模型仅仅能针对某种作物的一种或几种病害进行预警,通用性较差,而农业病害早期/初期检测技术可以在短时间内准确判定病原,即有效做到了短期预警,其预警精确性高、时效性好,同时,农业病害早期诊断与预警可以及时为农民提供病害防治指导措施,大大减少了不必要的经济损失。

(4)农业病害预警系统及装备将朝低成本方向发展。有效实施农业病害预警会使用到传感器、计

算机等硬件设备以及实时监测等软件平台,目前而言,这些设备成本相对较高,只有一些大型农业基地或科研基地能够负担起这些成本,而对于一些小型农户,不便推广应用,适当降低其成本是普及农业病害预警信息化技术的必要手段。

(5)实时在线的农业病害自动预警方式将成为重点研究方向。现阶段的农业病害预警往往需要结合一些实验室处理方法,如光谱采集、电镜检测等,在做出预警决策之前,已经消耗了一定的时间,因此预警无法做到实时在线进行,将电镜检测、光谱采集等技术与实时在线监测技术相结合,实现对病害的实时监测与自动预警,将对农业病害预警领域具有更大的实际意义。

### 参 考 文 献

- 冯占山,高世杰. 农业可持续发展与农业病害的持续控制[J]. 现代化农业,2013(3): 5-6.
- 姜玉英,曾娟,陆明红,等. 2015年全国农作物重大病虫害发生趋势预报[J]. 中国植保导刊,2015(2): 10-12.
- 申保珍. 我国设施农业创造近7000万就业岗位[N]. 农资快递,2015-7-20.
- 姜钧武. 设施蔬菜栽培特点及其调控技术[J]. 吉林蔬菜,2012(4): 27-28.
- 王红梅,王宏. 浅谈设施蔬菜产业的发展[J]. 科学之友,2012(24): 162-163.  
WANG Hongmei, WANG Hong. Discussion on facilities the development of the vegetable industry[J]. Friend of Science Amateurs, 2012(24): 162-163. (in Chinese)
- 孙传恒,杨信廷. 可控环境下温室蔬菜病虫害发生特点及预警技术研究[C]//中国植物保护学会第九届会员代表大会暨2005年学术年会,2005:837-841.
- ILARIA Perto, TSVI Kuflik, IGOR Gordon, et al. Identifier: a web-based tool for visual plant disease identification, a proof of concept with a case study on strawberry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012,84: 144-154.
- SINDHUJA Sankaran, ASHISH Mishra, REZA Ehsania, et al. A review of advanced techniques for detecting plant diseases[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010,70: 1-13.
- 李丽. 基于径向基网络和支持向量机的梨病虫害预警预报系统研究[D]. 北京:中国农业大学,2007.
- 李道亮,傅泽田,温继文,等. 农业病虫害远程诊断与预警技术[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- 陈雅君,李永刚. 园林植物病虫害防治[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- 王杰,檀根甲,胡易冰,等. 基于神经网络的稻白叶枯病中期预警[J]. 安徽农业大学学报,2002,29(1): 12-15.  
WANG Jie, TAN Genjia, HU Yibing, et al. The mid-term predictive warning of neural network for bacterial leaf blight of rice diseases[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2002, 29(1): 12-15. (in Chinese)
- 秦淑莲,翟保平,张孝羲,等. 棉铃虫发生与北太平洋海温的遥相关及其长期灾变预警[J]. 昆虫学报,2003,46(4): 479-488.  
QIN Shulian, ZHAI Baoping, ZHANG Xiaoxi, et al. Teleconnection between sea surface temperature in North Pacific and outbreaks of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) in Northern and Eastern China: an approach for long-term forecast[J]. Acta Entomologica Sinica, 2003, 46(4): 479-488. (in Chinese)
- 秦世宏. 农业预警与农业宏观调控分析[J]. 农业与技术,2015,35(11): 19-23.
- 刘东红,周建伟,莫凌飞. 物联网技术在食品及农产品中的应用的研究进展[J]. 农业机械学报,2012,43(1): 146-152.  
LIU Donghong, ZHOU Jianwei, MO Lingfei. Applications of internet of things in food and agri-food areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 146-152. (in Chinese)
- 何勇,聂鹏程,刘飞. 农业物联网与传感仪器研究进展[J]. 农业机械学报,2013,44(10): 216-226.  
HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 216-226. (in Chinese)
- 黄冲,刘万才. 试论物联网技术在农作物重大病虫害检测预警中的应用前景[J]. 中国植保导刊,2015(10): 55-60.
- 刘渊,王瑞智,杨泽林. 基于物联网的连栋蔬菜温棚环境监测系统设计[J]. 农机化研究,2014(1): 121-126.  
LIU Yuan, WANG Ruizhi, YANG Zelin. Design of environment monitoring system in multi-span vegetable greenhouse based on internet of things[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(1): 121-126. (in Chinese)
- 赵中华,车兴壁,张君. 物联网技术在马铃薯晚疫病防控中的应用实践[J]. 中国植保导刊,2015(7): 37-40.
- SENTELLAS P C, MONTEIRO J E B A, GILLESPIE T J. Electronic leaf wetness duration sensor, why it should be painted[J]. International Journal of Biometeorology, 2004, 48(4): 202-205.



- 21 李明,赵春江,乔淑,等. 基于冠层相对湿度的日光温室黄瓜叶片湿润时间估计模型[J]. 农业工程学报,2010,26(9): 286-291.  
LI Ming, ZHAO Chunjiang, QIAO Shu, et al. Estimation model of leaf wetness duration based on canopy relative humidity for cucumbers in solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 286-291. (in Chinese)
- 22 ZHAO Chunjiang, LI Ming, YANG Xinting, et al. A data-driven model simulating primary infection probabilities of cucumber downy mildew for use in early warning systems in solar greenhouses[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(2): 306-315.
- 23 马丹丹,邓雨青,周彦,等. 电镜技术在植物病害研究中的应用[G]//中国植物病理学会. 中国植物病理学会2015年学术年会论文集,2015:589.
- 24 YE Tao, SOUMOU Wansim Nadege, HUANG Caiping, et al. *Brachypodium distachyon* is a suitable host plant for study of barley yellow dwarf virus[J]. Virus Genes, 2016, 52(2): 299-302.
- 25 李小龙,马占鸿,孙振宇,等. 基于图像处理的小麦条锈病菌夏孢子模拟捕捉的自动计数[J]. 农业工程学报,2013, 29(2): 199-206.  
LI Xiaolong, MA Zhanhong, SUN Zhenyu, et al. Automatic counting for trapped urediospores of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici based on image processing[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 199-206. (in Chinese)
- 26 齐龙,蒋郁,李泽华,等. 基于显微图像处理的水稻瘟病菌孢子自动检测与计数方法[J]. 农业工程学报,2015,31(12): 186-193.  
QI Long, JIANG Yu, LI Zehua, et al. Automatic detection and counting method for spores of rice blast based on micro image processing[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 186-193. (in Chinese)
- 27 YOO S M, LEE S Y. Diagnosis of pathogens using DNA microarray[J]. Recent Patents on Biotechnology, 2008, 2(2): 124-129.
- 28 肖长坤,李健强,师迎春,等. 十字花科蔬菜黑斑病菌的PCR鉴定[J]. 植物病理学报,2005,35(3): 278-282.  
XIAO Changkun, LI Jianqiang, SHI Yingchun, et al. PCR identification of the pathogens causing black leaf spot of cruciferae vegetables[J]. Acta Phytologica Sinica, 2005, 35(3): 278-282. (in Chinese)
- 29 林琳,马雅军. 生物芯片在病原体检测中的研究进展[J]. 中国病原生物学杂志,2011,6(3): 232-235.  
LIN Lin, MA Yajun. Applications of biochip technology in pathogen detection[J]. Journal of Pathogen Biology, 2011, 6(3): 232-235. (in Chinese)
- 30 倪进斌,吕德方,高亚梅,等. 生物芯片在植物科学中应用的研究进展[J]. 现代化农业,2010(7): 1-3.
- 31 李淼,檀根甲,周冬生,等. 基因芯片技术及其在植物病害研究中的应用[J]. 植物保护,2003,29(1): 5-9.  
LI Miao, TAN Genjia, ZHOU Dongsheng, et al. Gene chip technology and its applications in the research of plant diseases[J]. Plant Protection, 2003, 29(1): 5-9. (in Chinese)
- 32 滕安国,高峰,夏新成,等. 高光谱技术在农业中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学,2009(3): 8-11.
- 33 王坤,朱大洲,张东彦,等. 成像光谱技术在农作物信息诊断中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(3): 589-594.  
WANG Kun, ZHU Dazhou, ZHANG Dongyan, et al. Advance of the imaging spectral technique in diagnosis of the information of crop[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(3): 589-594. (in Chinese)
- 34 孙金英,曹宏鑫,黄云. 光谱技术在作物生长与营养信息监测方面的研究进展[J]. 中国农业科技导报,2008,10(增刊1): 18-24.  
SUN Jinying, CAO Hongxin, HUANG Yun. Research advances of spectral technology in monitoring the growth and nutrition information of crop[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2008, 10(Supp.1): 18-24. (in Chinese)
- 35 王海超,高雄,陈铁英,等. 农作物病害检测中光谱和图像处理技术现状及展望[J]. 农机化研究,2015(10): 1-7.  
WANG Haichao, GAO Xiong, CHEN Tiewing, et al. Research progress and prospect of spectral and machine vision technology on crop disease detection[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(10): 1-7. (in Chinese)
- 36 隋媛媛,于海业,张蕾,等. 基于叶绿素荧光光谱分析的黄瓜霜霉病害预测模型[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(11): 2987-2990.  
SUI Yuanyuan, YU Haiye, ZHANG Lei, et al. Cucumber downy mildew prediction model based on analysis of chlorophyll fluorescence spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(11): 2987-2990. (in Chinese)
- 37 隋媛媛,于海业,张蕾,等. 温室黄瓜蚜虫害的荧光光谱监测与预警[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(7): 1834-1837.  
SUI Yuanyuan, YU Haiye, ZHANG Lei, et al. Fluorescence spectrum monitor for early warning of greenhouse cucumber aphid pests[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1834-1837. (in Chinese)
- 38 ZHOU Lina, YU Haiye, ZHANG Lei, et al. Rice blast prediction model based on analysis of chlorophyll fluorescence spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(4): 1003-1006.
- 39 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)

- 40 邢东兴,常庆瑞. 基于光谱反射率的果树病虫害级别定量测评——以红富士苹果树黄叶病害、红蜘蛛虫害为例[J]. 西北农林科技大学学报,2009,37(11):143-148.  
XING Dongxing, CHANG Qingrui. Quantitative evaluation of the degrees of disease or insect pest intimidation based on spectral reflectance of canopies of fruit trees—Yellow leaf disease and red mite insect pest of fuji apple trees as samples[J]. Journal of Northwest A&F University, 2009, 37(11):143-148. (in Chinese)
- 41 RINEHART G J, BAIRD J H, CALHOUN R N. Remote sensing of brown patch and dollar spot on creeping bentgrass and annual bluegrass turf using visible and near-infrared spectroscopy[C]//9th International Turfgrass Research Conference, 2001,9:705-709.
- 42 BRAVO C, MOSHOU D, WEST J, et al. Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance [J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(22):137-145.
- 43 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.
- 44 冯雷,陈双双,冯斌,等. 基于光谱技术的大豆豆荚炭疽病早期鉴别方法[J]. 农业工程学报,2012,28(1):139-144.  
FENG Lei, CHEN Shuangshuang, FENG Bin, et al. Early detection of soybean pod anthracnose based on spectrum technology [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1):139-144. (in Chinese)
- 45 姚云军,秦其明,张自力,等. 高光谱技术在农业遥感中的应用研究进展[J]. 农业工程学报,2008,24(7):301-306.  
YAO Yunjun, QIN Qiming, ZHANG Zili, et al. Research progress of hyperspectral technology applied in agricultural remote sensing [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(7):301-306. (in Chinese)
- 46 MOSHOU D, BRAVO C, WAHLEN S, et al. Simultaneous identification of plant stresses and diseases in arable crops using proximal optical sensing and self-organising maps[J]. Precision Agriculture, 2006,7(3):149-164.
- 47 QIN Zhihao, ZHANG Minghua. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multispectral remote sensing[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005,7(2):115-128.
- 48 李楠,刘成良,李彦明,等. 基于3S技术联合的农田墒情远程监测系统开发[J]. 农业工程学报,2010,26(4):169-174.  
LI Nan, LIU Chengliang, LI Yanming, et al. Development of remote monitoring system for soil moisture based on 3S technology alliance[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4):169-174. (in Chinese)
- 49 佟彩,吴秋兰,刘琛,等. 基于3S技术的智慧农业研究进展[J]. 山东农业大学学报,2015,46(6):856-860.  
TONG Cai, WU Qiulan, LIU Chen, et al. A review of wisdom agriculture based on 3S technologies[J]. Journal of Shandong Agricultural University, 2015, 46(6):856-860. (in Chinese)
- 50 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. 农业机械学报,2014,45(12):277-293.  
ZHAO Chunjiang. Advances of research and application in remote sensing for agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):277-293. (in Chinese)
- 51 洪波,张锋,李英梅,等. GIS在农业病虫害预警研究中的应用[J]. 陕西农业科学,2011(3):170-173.
- 52 石雷,韦雪花,周汝良. 3S技术在松材线虫病监测预警中的应用研究现状[J]. 云南地理环境研究,2008,20(3):15-19.  
SHI Lei, WEI Xuehua, ZHOU Ruliang. Present utilization and research situation of 3S on monitoring and forecasting pine wilt disease[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2008, 20(3):15-19. (in Chinese)
- 53 王蕾,黄华国,张晓丽,等. 3S技术在森林虫害动态监测中的应用研究[J]. 世界林业研究,2005,18(2):51-56.  
WANG Lei, HUANG Huaguo, ZHANG Xiaoli, et al. The application of RS, GIS and GPS in the monitoring of forest insect pests dynamics[J]. World Forestry Research, 2005, 18(2):51-56. (in Chinese)
- 54 石进,马盛安,蒋丽雅,等. 航空遥感技术监测松材线虫病的应用[J]. 中国森林病虫,2006(1):18-20.  
SHI Jin, MA Shengan, JIANG Liya, et al. Application of aerial remote sensing technique in monitoring pine wood nomatode disease[J]. Forest Pest and Disease, 2006(1):18-20. (in Chinese)
- 55 MARQUES da SILVA J R, DAMÁSIO C V, SOUSA A M O, et al. Agriculture pest and disease risk maps considering MSG satellite data and land surface temperature[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015,38:40-50.
- 56 罗菊花,黄文江,韦朝领,等. 基于GIS的农作物病虫害预警系统的初步建立[J]. 农业工程学报,2008,24(12):127-131.  
LUO Juhua, HUANG Wenjiang, WEI Chaoling, et al. Establishment of prewarning system for crop diseases and insect pests[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(12):127-131. (in Chinese)
- 57 刘明辉,沈佐锐,高灵旺,等. 基于WebGIS的农业病虫害预测预报专家系统[J]. 农业机械学报,2009,40(7):180-186.  
LIU Minghui, SHEN Zuorui, GAO Lingwang, et al. Expert system based on webgis for forecast and prediction of agricultural pests [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(7):180-186. (in Chinese)
- 58 刘书华,杨晓红,蒋文科,等. 基于GIS的农作物病虫害防治决策支持系统[J]. 农业工程学报,2003,19(4):147-150.  
LIU Shuhua, YANG Xiaohong, JIANG Wenke, et al. Decision support system for crop diseases and insect pests prevention and control based on GIS[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(4):147-150. (in Chinese)
- 59 陈林,程登发,陆庆光,等. 一种基于多Agent和GIS的麦蚜种群动态模拟方法研究初报[J]. 植物保护,2006,32(6):33-38.

- CHEN Lin, CHENG Dengfa, LU Qingguang, et al. Development of large-scale spatio-temporal dynamic model of wheat aphid population based on the multi-agent system and geographic information system[J]. *Plant Protection*, 2006, 32(6):33-38. (in Chinese)
- 60 陈兵旗,郭学梅,李晓华. 基于图像处理的小麦病害诊断算法[J]. *农业机械学报*,2009,40(12):190-195.  
CHEN Bingqi, GUO Xuemei, LI Xiaohua. Image diagnosis algorithm of diseased wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(12):190-195. (in Chinese)
- 61 徐鹏云,么永强,白庆华. 基于图像灰度识别的孢子自动计算系统[J]. *植物保护*,2007,33(1):109-112.  
XU Pengyun, YAO Yongqiang, BAI Qinghua. Automatic counting system for spores based on gray level recognition[J]. *Plant Protection*, 2007, 33(1):109-112. (in Chinese)
- 62 彭占武,司秀丽,王雪,等. 基于图像处理和模糊聚类方法的黄瓜霜霉病识别研究[J]. *中国农机化学报*,2013,34(2):212-216.  
PENG Zhanwu, SI Xiuli, WANG Xue, et al. Study on the recognition of cucumber downy mildew based on image processing and fuzzy clustering [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(2):212-216. (in Chinese)
- 63 王献锋,张善文,王震,等. 基于叶片图像和环境信息的黄瓜病害识别方法[J]. *农业工程学报*,2014,30(14):148-153.  
WANG Xianfeng, ZHANG Shanwen, WANG Zhen, et al. Recognition of cucumber diseases based on leaf image and environmental information[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(14):148-153. (in Chinese)
- 64 MA Juncheng, LI Xinxing, WEN Haojie, et al. A key frame extraction method for processing greenhouse vegetables production monitoring video[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 111:92-102.
- 65 马浚诚,李鑫星,温皓杰,等. 面向叶类蔬菜病害识别的温室监控视频采集系统[J]. *农业机械学报*,2015,46(3):282-287.  
MA Juncheng, LI Xinxing, WEN Haojie, et al. Monitoring video capture system for identification of greenhouse vegetable diseases[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3):282-287. (in Chinese)
- 66 王建玺,徐向艺. 基于图像处理和模糊识别技术的烟叶病害识别研究[J]. *现代电子技术*,2015,38(8):4-7.  
WANG Jianxi, XU Xiangyi. Research on tobacco disease auto-recognition based on image processing and fuzzy recognition technology[J]. *Modern Electronics Technique*, 2015, 38(8):4-7. (in Chinese)
- 67 武向良,高聚林,赵于东,等. 农业专家系统研究进展及发展方向[J]. *农机化研究*,2008(1):235-238.  
WU Xiangliang, GAO Julin, ZHAO Yudong, et al. Agriculture expert system research progress and development direction[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008(1):235-238. (in Chinese)
- 68 刘卫华,张顺,许家来,等. 农业专家系统应用现状与前景展望[J]. *农业灾害研究*,2015,5(2):52-54.  
LIU Weihua, ZHANG Shun, XU Jialai, et al. Application status and perspective of agricultural expert system[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2015, 5(2):52-54. (in Chinese)
- 69 马丽丽,纪建伟,贺超兴,等. 番茄专家系统环境数据库在病害预测中的应用[J]. *农机化研究*,2008(6):161-163.  
MA Lili, JI Jianwei, HE Chaoxing, et al. The application of environment data base in tomato expert system for disease prevention [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008(6):161-163. (in Chinese)
- 70 温皓杰,张领先,傅泽田,等. 基于 Web 的黄瓜病害诊断系统设计[J]. *农业机械学报*,2010,41(12):178-182.  
WEN Haojie, ZHANG Lingxian, FU Zetian, et al. Disease diagnosis system design for cucumber based on Web[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(12):178-182. (in Chinese)
- 71 宋启堃,郑松,宋彦棠. 黔南州主要农作物病虫害监测预警专家系统的构建与实现[J]. *云南地理环境研究*,2011,23(1):34-37.  
SONG Qikun, ZHENG Song, SONG Yantang. The construction and realization of the qiannan main plant insect pests monitoring warning expert system[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2011, 23(1):34-37. (in Chinese)
- 72 闵红. 河南省小麦纹枯病预警与决策专家系统的构建[D]. 郑州:河南农业大学,2003.
- 73 MOH A, MASSART S, JIJAKLI M H, et al. Models to predict the combined effects of temperature and relative humidity on *Pectobacterium atrosepticum* and *Pectobacterium carotovorum* subsp. *Carotovorum* population density and soft rot disease development at the surface of wounded potato tubers[J]. *Journal of Plant Pathology*, 2012, 94(1):181-191.
- 74 李明,赵春江,杨信廷,等. 温室蔬菜病害预警体系初探——以黄瓜霜霉病为例[J]. *中国农学通报*,2010,26(6):324-331.  
LI Ming, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Towards an early warning framework of greenhouse vegetable diseases—a case of cucumber downy mildew[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(6):324-331. (in Chinese)
- 75 鄢洪海. 保护地番茄晚疫病发生流行预测模型的建立与应用[J]. *长江蔬菜*,2009(10):72-74.  
YAN Honghai. Application and establishment of the prevalence prediction model of tomato late blight in protected cultivation[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2009(10):72-74. (in Chinese)
- 76 惠祥海,孙明海,刘兰兰. 温室辣椒疫病的预报模型与防治技术[J]. *现代农业科技*,2009(5):118-119.
- 77 华来庆,熊林平,孟虹,等. 指数平滑法在霜霉病发病趋势预测中的应用[J]. *数理医药学杂志*,2006,19(2):119-121.  
HUA Laiqing, XIONG Linping, MENG Hong, et al. The application of exponential smoothing methods on the forecast of downy mildew disease trends[J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2006, 19(2):119-121. (in Chinese)

- 78 华来庆,熊林平,孟虹,等. AR-EGARCH 模型在疾病指数时间序列建模中的应用研究[J]. 中国卫生统计,2006,23(6): 482-485.  
HUA Laiqing, XIONG Linping, MENG Hong, et al. Application of AR-EGARCH model in establishing methods of disease index time series models[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2006, 23(6): 482-485. (in Chinese)
- 79 华来庆,熊林平,申广荣,等. 自回归模型在黄瓜霜霉病预测中的应用[J]. 第二军医大学学报,2005,26(6): 684-686.  
HUA Laiqing, XIONG Linping, SHEN Guangrong, et al. Application of an autoregressive model in cucumber downy mildew disease forecasting[J]. Academic Journal of Second Military Medical University, 2005, 26(6): 684-686. (in Chinese)
- 80 马宁. 寒地玉米大斑病预警诊断系统研究[D]. 泰安: 山东农业大学,2015.
- 81 王纯枝,郭安红,张玉书,等. 东北地区杨树烂皮病气象预报模型研究[J]. 中国农学通报,2012,28(10): 47-52.  
WANG Chunzhi, GUO Anhong, ZHANG Yushu, et al. Study on meteorological forecasting model of valsa sordida nits in northeast China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(10):47-52. (in Chinese)
- 82 陈凯,朱钰. 机器学习及其相关算法综述[J]. 统计与信息论坛,2007,22(5): 105-112.  
CHEN Kai, ZHU Yu. A summary of machine learning and related algorithms[J]. Statistics & Information Forum, 2007, 22(5): 105-112. (in Chinese)
- 83 刘晓宇. 黑龙江烟草产量预测及病害预警方法研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学,2012.
- 84 张寿明,李灿辉,何慧龙,等. 神经网络在马铃薯晚疫病长期预报中的应用研究[J]. 昆明理工大学学报,2004,29(4): 139-142.  
ZHANG Shouming, LI Canhui, HE Huilong, et al. Applicative research of the long-term prediction of the neural network to the potato late blight disease[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2004, 29(4): 139-142. (in Chinese)
- 85 李丽,李道亮,周志坚,等. 径向基函数网络与 WebGIS 融合的苹果病虫害预测[J]. 农业机械学报,2008,39(3): 116-119.  
LI Li, LI Daoliang, ZHOU Zhijian, et al. Forecast of disease and pest in apple orchards based on fusion of radial basis function neural network and WebGIS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 116-119. (in Chinese)
- 86 熊雪梅,姬长英,CLAUDIO Moraga. 基于参数化遗传神经网络的植物病害预测方法[J]. 农业机械学报,2004,35(6): 110-114.  
XIONG Xuemei, JI Changying, CLAUDIO Moraga. Parametric fuzzy neural network based on genetic algorithm configured for plant disease prediction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 110-114. (in Chinese)
- 87 曹志勇,邱靖,曹志娟,等. 基于改进型神经网络的植物病虫害预警模型的构建[J]. 安徽农业科学,2010,38(1): 538-540.  
CAO Zhiyong, QIU Jing, CAO Zhijuan, et al. Construction of the early-warning model for plant diseases based on improving neural network[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(1): 538-540. (in Chinese)
- 88 牛海微. 基于遗传 BP 神经网络构建温室月季花卉病害预警系统[D]. 长春: 吉林大学,2011.
- 89 李娟. 小麦黄矮病人工神经网络模型及苹果褐斑病动态预测模型的构建[D]. 杨凌: 西北农林科技大学,2010.
- 90 RUMPF T, MAHLEIN A K, STEINER U, et al. Early detection and classification of plant diseases with support vector machines based on hyperspectral reflectance[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2010, 74(1): 91-99.
- 91 杨志民,梁静,刘广利. 强模糊支持向量机在稻瘟病气象预警中的应用[J]. 中国农业大学学报,2010,15(3): 122-128.  
YANG Zhimin, LIANG Jing, LIU Guangli. Application of strong fuzzy support vector machine on weather early warning of rice blast[J]. Journal of China Agricultural University, 2010, 15(3): 122-128. (in Chinese)