

特 约 稿 件

Invited Paper

植物病害监测预警新技术研究进展

曹学仁^{1,2}, 周益林^{1*}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193; 2. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 农业部热带作物有害生物综合治理重点实验室, 海口 571101)

摘要 植物病害监测预警对病害防治和管理具有重要的意义, 本文综述了“3S”技术、孢子捕捉技术、轨迹分析技术、分子生物学技术等植物病害监测预警研究中的应用, 同时探讨了本研究领域的发展方向。

关键词 植物病害; 监测预警; “3S”技术; 孢子捕捉; 分子生物学

中图分类号: S 431.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2016.03.001

Progress in monitoring and forecasting of plant diseases

Cao Xueren^{1,2}, Zhou Yilin¹

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Disease and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory of Integrated Pest Management on Tropical Crops, Ministry of Agriculture, Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China)

Abstract Plant disease monitoring and forecasting are very important for disease management. This paper summarized the progress of the application of “3S” technologies (remote sensing, geographic information system and global positioning system), spore trap technology, trajectory analysis and molecular technologies in plant disease monitoring and forecasting. The strategies of future study for monitoring and forecasting of plant diseases were also discussed.

Key words plant disease; monitoring and forecasting; “3S” technologies; spore trap; molecular technologies

植物病害监测预警是制定病害防治措施的前提和基础, 传统的植物病害监测方法主要依靠田间人工调查获取数据, 预测预报多采用数理统计、综合分析方法等, 近些年来“3S”技术(遥感技术、地理信息系统、全球定位系统)、分子生物学技术以及一些相关学科如空气生物学、生物气象学的快速发展, 极大地促进了植物病害监测预警技术的研究发展。

1 “3S”技术在植物病害监测预警中的应用研究

1.1 遥感技术在植物病害监测预警中的应用

遥感技术(RS)通过处理和解释接受目标物辐射或反射的电磁波, 能够准确而快速地提供被测目标物

的相关信息^[1]。由于遥感技术能感受到人类肉眼看不到的光, 可利用的电磁波波长为 0.3 μm ~3 m, 同时这种技术还具有监测面积大, 获得资料快速、规范, 数据能直接输入电脑等优点, 已广泛应用于军事、气象、地质、农业等领域。植物病害的遥感监测开始于 20 世纪 30 年代早期, 将近红外航空图像应用于马铃薯和烟草病毒病的监测^[2]。当植物受到病害危害后, 叶片会出现颜色改变、结构破坏或外形变化等症状, 其反射光谱曲线会发生明显改变。一般在蓝光和红光波段, 发病植物的反射率比健康植物的大, 而近红外波段, 发病植物的反射率比健康植物的小^[3]。据此可以利用遥感技术进行病害诊断和监测等研究, 即当病害发生后, 从遥感图像上提取植被

收稿日期: 2016-02-05

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303016); 中央级科研院所基本科研业务费专项(2013hzs1J004)

* 通信作者 E-mail: yilinzhou6@163.com

的相关信息,快速、准确地判断出病害发生的位置、面积和程度,从而采取针对性的点、片防治措施。

根据平台可将遥感分为近地遥感、航空遥感和卫星遥感。近地遥感主要是通过利用光谱仪在实验室及田间测量农作物叶片及冠层受病害危害后的光谱反射率,它具有操作简单、信息量大、数据易处理分析等优点,是目前植物病害遥感监测中研究最多的。国内外已有关于利用近地遥感监测玉米矮花叶病和小斑病^[4]、马铃薯晚疫病^[5]、甜菜褐斑病、白粉病和锈病^[6]、稻瘟病^[7-8]、小麦条锈病^[9-13]、甜菜丛根病^[14]、小麦黄斑叶枯病^[15]、小麦叶枯病^[16]、小麦全蚀病^[17]、芹菜菌核病^[18]、小麦赤霉病^[19]、棉花黄萎病^[20-21]等在内的多种植物病害的研究报道。Cao 等利用高光谱仪对 2 个抗感性不同的品种、2 种不同种植密度下受白粉病危害后的小麦冠层光谱反射率进行了研究,获得了可用于小麦白粉病监测的敏感光谱参数和时期,建立了病害监测模型,发现品种和密度对利用高光谱遥感监测小麦白粉病无显著影响^[22-23]。但是地面遥感获取的面积比较小,与农作物大面积种植相比,其应用还受到一定的限制。航空遥感一般以无人机、气球等航空飞行器为平台,与地面高光谱遥感相比,虽然信息量减少,但一次可监测的面积大、数据获取快捷。目前已有其在栗树疫病^[24]、马铃薯晚疫病^[25]、小麦叶枯病^[26]、水稻白叶枯病^[27]、柑橘黄龙病^[28]、小麦条锈病^[13]、月桂枯萎病^[29]等病害上的研究报道。随着卫星数量的增多和分辨率的提高,卫星遥感也开始应用于植物病害监测,包括小麦叶锈病^[30]、小麦条锈病^[31]、小麦线条花叶病^[32]、小麦白粉病^[33]、柑橘黄龙病^[34]等多种植物病害。已有的研究还发现利用遥感技术还可将目标病害与其他病虫害和生理性病害区分开来。Mahlein 等^[6]研究发现利用光谱植被指数可以区分甜菜褐斑病、锈病和白粉病。采用 Fisher 线性判别分析(FLDA)和偏最小二乘回归法(PLSR)结合光谱反射率可以将小麦条锈病、白粉病和蚜虫区分开来^[35]。因此,利用遥感技术可以用来区分和监测植物病害。

1.2 地理信息系统在植物病害监测预警中的应用

地理信息系统(GIS)是一个用于输入、存储、检索、分析和显示空间地理数据的计算机软件平台。将地面调查获取的植物病害的相关信息保存在 GIS 的数据库中,通过数据处理对同一区域或相邻的区

域病害的空间分布和发生程度进行监测。司丽丽等成功地研制出了基于地理信息系统的全国主要粮食作物病虫害实时监测预警系统,利用该系统能够对小麦、玉米、水稻、马铃薯、高粱和谷子 6 种主要粮食作物的 60 余种病虫害进行实时监测和预警^[36]。同时 GIS 也能和病害预测模型结合,实现对病害发生情况的预测。Hijmans 等应用地理信息系统结合马铃薯晚疫病发生的两个预测模型 Blitecast 和 Simcast,对全球马铃薯晚疫病的发生情况进行了预测,发现晚疫病的高发区主要包括欧洲西部、美国北部、加拿大东部沿海、巴西东南部和我国中南部地区,而病害低发区主要在印度西部平原、我国的中北部地区、美国中西部地区^[37]。马占鸿等和李伯宁等利用 GIS 技术分别对小麦条锈病和白粉病在我国的越夏区进行了区划研究,明确了小麦条锈病和白粉病在我国的越夏范围^[38-39]。

1.3 “3S”技术一体化在植物病害监测预警中的应用

3S 技术是将遥感、地理信息系统和全球定位系统三门学科有机结合,构成的一个集信息获取、处理和应用一体化的技术系统。其监测植物病害的基本流程是:RS 提供的图像将作为植物病害监测的数据源,通过软件对 RS 图像进行分析,得到病害发生区及程度;利用 GIS 对图像进一步分析,确定病情发生点的精确地理坐标和面积等所需信息;全球定位系统(GPS)作为定位空间地理位置精确坐标的工具,帮助找到病害不同发生点的准确位置。美国 Iowa 州立大学 Nutter 等运用地面 GPS 定位,通过地面高光谱测量、小型飞机搭载光谱仪低空飞行和 Landsat-7 分别获得地面、航空和卫星三个不同平台的遥感数据,利用 GIS 系统进行数据分析,监测大豆孢囊线虫(*Heterodera glycines*)的危害范围和危害程度,建立了田间病情与地面光谱以及航空和卫星遥感数据的关系^[40]。“3S”技术使植保研究的病害信息及环境信息的获取、采集、分析利用更加自动化、科学化,提高对农业有害生物的监测预警能力和综合治理水平,是未来监测作物病害的发展趋势。

2 基于病原菌孢子捕捉器技术的病害监测预警研究

对于气传性多循环真菌病害(如白粉病、锈病等)来说,病原菌孢子随气流传播是病害发生和流行

的主要原因,因此空气中病原菌孢子的数量和病害的发生有密切的关系,通过对空气中孢子捕捉可以为病害预测预报提供基础数据。用于空气中孢子捕捉的方法主要包括水平玻片法^[41]、垂直或倾斜玻片法或垂直圆柱体法^[42]、定容式孢子捕捉器法^[43]以及移动式孢子捕捉器法^[44]。但是前两种方法的孢子捕捉效率受到气候(如降雨、风速)和捕捉表面达到过饱和的影响,而移动式孢子捕捉器主要用于取样,不能对病原菌数量进行连续监测。因此在对空气中病原菌的动态监测上,应用最多的是定容式孢子捕捉器。

这种类型的孢子捕捉器的原理是利用空气驱动装置使捕捉仓内形成负压,空气经进气嘴就被吸入到捕捉仓内,从而空气中的孢子就被吸附到捕捉盘上的黏性捕捉带上。通过安装定时钟,捕捉盘能按一定的速度转动,不同时段空气中的孢子数据就记录在捕捉带的不同位置,不仅避免了捕捉表面达到过饱和,而且也可实现对病原菌数量的连续监测。由于进气嘴的大小和进气速度都可以确定,因此可以计算出单位时间内每立方米空气中病原菌孢子的数量。

利用孢子捕捉器获得的孢子数或浓度数据,结合气象数据和病情调查数据,就可以分析三者之间的关系,最后建立病害预测模型。Cao 等对空气中小麦白粉病菌(*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*)分生孢子浓度的季节性和日变化动态进行了监测,分析了分生孢子浓度和气象因子、病情之间的关系,最后分别建立了基于气象因子、孢子浓度或气象因子和孢子浓度的小麦白粉病病害预测模型^[45-46]。基于空气中苹果白粉病菌(*Podosphaera leucotricha*)^[47]、草莓灰霉病菌(*Botrytis cinerea*)^[48-49]、葡萄白粉病菌(*Erysiphe necator*)^[50]、草莓白粉病菌(*Sphaerotheca macularis*)^[51]、甜菜褐斑病菌(*Cercospora beticola*)等病原菌孢子浓度或孢子数^[52]的病害预测模型也已报道。

3 基于轨迹分析技术的植物病害监测预警研究

对于远距离传播的气传性病原菌(如小麦条锈病菌和秆锈病菌、大豆锈病菌等)来说,研究病原菌随气流的传播路线、距离和菌源区和着落区之间菌量的关系及发生时间,将为病害监测预警提供新的方法。植物病原菌随气流的远距离传播是一个被动的过程,需要病原菌传播体(孢子)被气流抬送到一

定的高度,才能在高空随大气环流进行远距离传播,因此气流是植物病原菌远距离传播的主要动力。相关气流运动的物理模型已成为研究病原菌远距离传播的有力工具,轨迹分析是气流运动的物理模型中最常见的一种方法,其中在植物病原菌远距离传播中的研究报道仅见大气质点轨迹分析平台 Hysplit (Hybird Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)在大豆锈病菌(*Phakopsora pachyrhizi*)、小麦条锈病菌(*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*)和秆锈病菌(*P. graminis* f. sp. *tritici*)新毒性小种 Ug99 远距离传播研究中的运用。

Pan 等^[53]利用 Hysplit_4 结合区域气候预测模型(MM5)对大豆锈病菌孢子在洲际间的远距离传播进行了研究,根据孢子量的多少和分布来估计大豆锈病的病情和传播,结果表明该方法不仅可以用来模拟病原菌的传播路线和分布,还可以用来指导大豆锈病的早期预警和监测。

Wang 等^[54]、王海光等^[55]利用 Hysplit_4 研究了小麦条锈病菌在我国的远距离传播规律,分析了西北、华北、西南之间的菌源关系。

国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)研究人员也采用 Hysplit 对 1999 年在乌干达首次发现的强毒性小麦秆锈病菌小种 Ug99 的远距离传播进行了分析和预测,分析以 2007 年 Ug99 已传入的伊朗为菌源地,结果发现,病菌不但可能随气流向东传播,也有可能向北传播到高加索和中亚地区^[56]。

4 基于分子生物学技术的植物病害监测预警研究

目前,分子生物学技术已经渗透到几乎所有的生物学领域,成为 21 世纪应用于农业的两大高新技术之一。近年来,分子生物学技术在植物病原菌监测上也开始得到了应用。

4.1 在菌源量检测和监测上的应用

病害一般在发生初期或越冬越夏阶段往往处于潜伏状态,而此阶段病害菌源量的准确估计对病害流行预测预报十分重要,它是预测病害发展趋势的重要参数。但使用常规方法调查病害时,用肉眼无法观测到处于潜育状态的植物病害,而叶片培养法费工费时,且受环境干扰大,结果误差也比较大。快速发展的分子生物学方法和技术为此提供了强有力的工具,它可解决一些用传统植病流行病学方法无法

或很难解决的问题。如利用 Nested-PCR 技术,检测到了潜伏侵染的稻曲病菌(*Ustilaginoidea virens*)^[57]、油菜叶斑病菌(*Pyrenopeziza brassicae*)^[58]、葡萄座腔菌(*Botryosphaeria dothidea*)^[59]和小麦白粉病菌^[59]等。真正实现对病原菌的定量检测,要得益于近年来 Real-time PCR 在这方面的应用,Real-time PCR 可对植物叶片中病原菌侵染程度进行定量分析。闫佳慧等和郑亚明等利用 Real-time PCR 分别对田间不同地区未显症小麦叶片进行检测,并与实际调查小麦条锈病和白粉病病情指数或取样培养发病的病情指数进行比较,结果表明不同地区小麦叶片样品 Real-time PCR 检测的 MDX 与实际病情指数 DX 之间有显著的相关性^[61-62]。

在对空气中病原菌进行取样监测时(如用孢子捕捉器),常规的病菌孢子种类鉴定和计数方法是在显微镜下根据孢子的形态特征来判断,该方法需要的时间长、工作量大,且有些病原菌孢子的形态特征相似容易产生误判。分子生物学技术在对空气中病原菌的检测上也得到了应用。Williams 等首先报道了孢子捕捉器捕捉带上孢子 DNA 的提取方法^[63]。Calderon 等成功地提取了 Burkard 孢子捕捉器捕捉到的 2 种油菜重要病原菌 *Leptosphaeria maculans* 和 *Pyrenopeziza brassicae* 的 DNA,发现 PCR 技术可检测的最低孢子数分别为 1 个和 10 个左右^[64]。此外空气中油菜菌核病菌(*Sclerotinia sclerotiorum*)^[65]、葡萄白粉病菌(*Erysiphe necator*)^[66]和啤酒花霜霉病菌(*Pseudoperonospora humuli*)^[67]等的分子检测技术也已报道。

Real-time PCR 不仅可对孢子捕捉器样本中的孢子进行鉴定,更重要的是可以进行定量分析。该技术近年来也开始应用于空气中病原菌浓度定量研究。Fraaije 等利用孢子捕捉器和 Real-time PCR 技术,研究了小麦壳针孢叶枯病菌(*Mycosphaerella graminicola*)子囊孢子在病原菌对 QoI 类杀菌剂抗性传播中的作用^[68]。Luo 等利用 Real-time PCR 技术测定 Burkard 孢子捕捉器样品中核果褐腐病菌(*Monilinia fructicola*)孢子的 DNA 浓度,定量估计空气中此病原菌的孢子浓度,它与显微镜孢子计数方法的结果一致^[69]。曹学仁等也成功开发出用于定量检测 Burkard 孢子捕捉器样品中小麦白粉病菌孢子量的 Real-time PCR 技术^[70]。孢子捕捉器上的油

菜黑胫病菌(*Leptosphaeria maculans* 和 *L. biglobosa*)^[71]、油菜菌核病菌(*S. sclerotiorum*)^[72]、葱鳞葡萄孢菌(*Botrytis squamosa*)^[73]、油菜叶斑病菌(*P. brassicae*)^[74]、苹果黑星病菌(*Venturia inaequalis*)^[75]等病菌的实时定量 PCR 检测技术都已有报道。

4.2 在生理小种和抗药性监测上的应用

由于常规的生理小种鉴定及监测均基于鉴别寄主,分析方法繁杂、费工时,其结果易受鉴定条件、人员等外部条件的影响。利用分子生物学技术特别是分子标记可以较好地解决这一问题。如条锈菌条中 29 号、31 号、32 号和 33 号生理小种的 SCAR 检测标记已建立^[76-78]。刘景梅等在香蕉枯萎病菌上也获得了尖孢镰刀菌古巴专化型 Race 1 和 Race 4 的 SCAR 标记^[79]。利用这类专化标记可以直接进行生理小种的分子鉴定和各生理小种的田间流行动态监测,不仅准确性高,而且缩短了时间。

分子技术检测方法特别是 Real-time PCR 检测方法也开始在杀菌剂抗性监测中应用,此方法不但高通量、快速,而且准确性也较高,尤其适于不能在人工培养基上培养的专性寄生菌。采用这种方法可对低频率的杀菌剂抗性基因进行早期检测,并结合抗药性的风险评估,有利于进一步的抗性风险评估和制定有效的抗性策略。如李红霞等基于油菜菌核病菌(*S. sclerotiorum*)抗药性菌株 β -微管蛋白基因的突变,开发出了用于检测油菜菌核病菌对多菌灵抗药性的 PCR 方法,其检测所得结果与传统菌落直径法结果相吻合^[80]。Fraaije 等采用定量荧光等位基因特异性实时 PCR 方法,可检测小麦白粉病菌抗甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂发生位点突变的菌株,用此方法可快速监测使用杀菌剂前后田间发生突变的小麦白粉病菌菌株的动态变化^[81]。利用 Real-time PCR 技术监测田间褐腐病菌(*M. fructicola*)对苯并咪唑类杀菌剂^[82]、小麦白粉病菌对三唑酮^[83]以及葡萄白粉病菌(*E. necator*)对 DMIs 杀菌剂及 QoIs 类杀菌剂^[84]的抗性频率已经报道。

5 植物病害监测预警技术研究展望

综上所述,近年来随着“3S”技术(GPS、GIS 和 RS)、电子传感技术(电子鼻、电子舌等)^[85]、分子生物学技术等相关学科的快速发展,大大促进了病害的监测预警技术的发展,一些技术如 GPS 技术和 GIS 技术已普遍应用于病害调查和研究中,遥感技

术也已显现它广阔的应用前景,而且随着卫星分辨率的提高和高分辨率卫星如 Quickbird、IKONOS、GeoEye、高分系列卫星等应用的广泛性,可实现对植物病害整体的、实时的和动态监测和分析,特别是近年来实时定量 PCR 检测技术的发展,为病害的早期和高通量监测提供了强有力的工具,因此未来植物病害流行的监测和预警,将具备微观和宏观的双重手段,从而全面提高对病害的监测预警准确性。尽管国内的一些研究单位或实验室已在这方面做了一些探索性的工作,但总体来说目前我国对重要植物病害的监测和预警还比较薄弱,今后还应加强这方面的工作,使这些新技术尽快在生产上得到应用,以提高我国植物病害监测和预警的水平。

参考文献

- [1] 梅安新,彭望球,秦其明,等. 遥感导论[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [2] Bawden F C. Infra-red photography and plant virus diseases [J]. Nature, 1933, 132:168.
- [3] West J S, Bravo C, Oberti R, et al. The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop disease [J]. Annual Review of Phytopathology, 2003, 41:593 - 614.
- [4] Ausmus B S, Hilty J W. Reflectance studies of healthy, maize dwarf mosaic virus-infected, and *Helminthosporium maydis*-infected corn leaves [J]. Remote Sensing of Environment, 1972, 2:77 - 81.
- [5] Zhang Minghua, Qin Zhihao, Liu Xue, et al. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2003, 4:295 - 310.
- [6] Mahlein A K, Steiner U, Dehne H W, et al. Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases [J]. Precision Agriculture, 2010, 11:413 - 431.
- [7] Kobayashi T, Kanda E, Kitada K, et al. Detection of rice panicle blast with multispectral radiometer and the potential of using airborne multispectral scanners [J]. Phytopathology, 2001, 91(3):316 - 323.
- [8] 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(农业科学版), 2001,20(1):73 - 76.
- [9] Sharp E L, Perry C R, Scharen A L, et al. Monitoring cereal rust development with a spectral radiometer [J]. Phytopathology, 1985, 75(8):936 - 939.
- [10] Hansen J G. Use of multispectral radiometry in wheat yellow rust experiments [J]. EPPO Bulletin, 1991,21:651 - 658.
- [11] 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.
- [12] Moshou D, Bravo C, West J, et al. Automatic detection of 'yellow rust' in wheat using reflectance measurements and neural networks [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44:173 - 188.
- [13] 冷伟锋,王海光,胥岩,等. 无人机遥感监测小麦条锈病初探 [J]. 植物病理学报, 2012, 42(2):202 - 205.
- [14] Steddom K, Heidel G, Jones D, et al. Remote detection of *Rhizomania* in sugar beets [J]. Phytopathology, 2003, 93(6):720 - 726.
- [15] Muhammed H H, Larsolle A. Feature vector based analysis of hyperspectral crop reflectance data for discrimination and quantification of fungal disease severity in wheat [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(2):125 - 134.
- [16] Nicolas H. Using remote sensing to determine of the date of a fungicide application on winter wheat [J]. Crop Protection, 2004, 23(2):853 - 863.
- [17] 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, 1:275 - 288.
- [18] 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, 51:129 - 142.
- [19] Bauriegel E, Giebel A, Geyer M, et al. Early detection of *Fusarium* infection in wheat using hyper-spectral imaging [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75:304 - 312.
- [20] Chen Bing, Li Shaokun, Wang Keru. Spectrum characteristics of cotton canopy infected with *Verticillium* wilt and applications [J]. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(5):561 - 569.
- [21] Chen Bing, Li Shaokun, Wang Keru, et al. Evaluating the severity level of cotton *Verticillium* using spectral signature analysis [J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(9):2706 - 2724.
- [22] Cao Xueren, Luo Yong, Zhou Yilin, et al. Detection of powdery mildew in two winter wheat cultivars using canopy hyperspectral reflectance [J]. Crop Protection, 2013, 45:124 - 131.
- [23] Cao Xueren, Luo Yong, Zhou Yilin, et al. Detection of powdery mildew in two winter wheat plant densities and prediction of grain yield using canopy hyperspectral reflectance [J]. PLoS ONE, 2015, 10(3):e0121462.
- [24] Martins L M, Lufinha M I, Marques C P, et al. Small format aerial photography to assess chestnut ink disease [J]. Forest, Snow and Landscape Research, 2001, 76(3):357 - 360.
- [25] Johnson D A, Alldredge J R, Hamm P B, et al. Aerial photography used for spatial pattern analysis of late blight infection in irrigated potato circles [J]. Phytopathology 2003, 93:805 - 812.
- [26] Nicolas H. Using remote sensing to determine of the date of a fungicide application on winter wheat [J]. Crop Protection, 2004, 23(2):853 - 863.
- [27] 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.
- [28] Li Xiuhua, Lee W S, Li Minzan, et al. Spectral difference analysis and airborne imaging classification for citrus greening infected trees [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 83:32–46.
- [29] de Castro A I, Ehsani R, Ploetz R C, et al. Detection of laurel wilt disease in avocado using low altitude aerial imaging[J]. PLoS ONE, 2015, 10(4):e0124642.
- [30] Franke J, Menz G. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing [J]. Precision Agriculture, 2007, 8:161–172.
- [31] 张玉萍, 郭洁滨, 王爽, 等. 小麦条锈病卫星与近地光谱反射率的比较[J]. 植物保护学报, 2009, 36(2):119–122.
- [32] Mirik M, Jones D C, Price J A, et al. Satellite remote sensing of wheat infected by *Wheat streak mosaic virus*[J]. Plant Disease, 2011, 95:4–12.
- [33] Zhang Jingcheng, Pu Ruiliang, Yuan Lin, et al. Monitoring powdery mildew of winter wheat by using moderate resolution multi-temporal satellite imagery [J]. PLoS ONE, 2014, 9(4):e93107.
- [34] Li Xiuhua, Leed W S, Li Minzan, et al. Feasibility study on Huanglongbing (citrus greening) detection based on WorldView-2 satellite imagery [J]. Biosystems Engineering, 2015, 132:28–38.
- [35] Yuan Lin, Huang Yanbo, Loraamm R W, et al. Spectral analysis of winter wheat leaves for detection and differentiation of diseases and insects [J]. Field Crops Research, 2014, 156:199–207.
- [36] 司丽丽, 曹克强, 刘佳鹏, 等. 基于地理信息系统的全国主要粮食作物病虫害实时监测预警系统的研制[J]. 植物保护学报, 2006, 33(3):282–286.
- [37] Hijmans R J, Forbes G A, Walker T S. Estimating the global severity of potato late blight with GIS-linked disease forecast models [J]. Plant Pathology, 2000, 49:697–705.
- [38] 马占鸿, 石守定, 姜玉英, 等. 基于 GIS 的中国小麦条锈病菌越冬区气候区划[J]. 植物病理学报, 2005, 34(5):455–462.
- [39] Li Boning, Cao Xueren, Chen Lin, et al. Application of geographic information systems to identify the overwintering regions of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* in China [J]. Plant Disease, 2013, 97:1168–1174.
- [40] Nutter F W, Tylka G L, Guan J, et al. Use of remote sensing to detect soybean cyst nematode-induced plant stress [J]. Journal of Nematology, 2002, 34(3):222–231.
- [41] 曹青, 房辉, 何有才, 等. 稻瘟病菌孢子传播的影响因素与田间捕捉方法[J]. 信阳农业高等专科学校学报, 2004, 14(3):7–9.
- [42] Inch S, Fernando W G D, Gilbert J. Seasonal and daily variation in the airborne concentration of *Gibberella zeae* (Schw.) Petch spores in Manitoba [J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2005, 27:357–363.
- [43] Hirst J M. An automatic volumetric spore trap [J]. Annals of Applied Biology, 1952, 39(2):257–265.
- [44] 周益林, 段霞瑜, 程登发. 利用移动式孢子捕捉器捕获的孢子量估计小麦白粉病田间病情[J]. 植物病理学报, 2007, 37(3):307–309.
- [45] Cao Xueren, Duan Xiayu, Zhou Yilin, et al. Dynamics in concentrations of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* conidia and its relationship to local weather conditions and disease index in wheat [J]. European Journal of Plant Pathology, 2012, 132:525–535.
- [46] Cao Xueren, Yao Dongming, Xu Xiangming, et al. Development of weather-and airborne inoculum-based models to describe disease severity of wheat powdery mildew [J]. Plant Disease, 2015, 99:395–400.
- [47] Jeger M J. Relating disease progress to cumulative numbers of trapped spores: apple powdery mildew and scab epidemics in sprayed and unsprayed orchard plots [J]. Plant Pathology, 1984, 33:517–523.
- [48] Xu Xiangming, Harris D C, Berrie A M. Modeling infection of strawberry flowers by *Botrytis cinerea* using field data [J]. Phytopathology, 2000, 90:1367–1374.
- [49] Blanco C, Santos B D L, Romero F. Relationship between concentrations of *Botrytis cinerea* conidia in air, environmental conditions, and the incidence of grey mould in strawberry flowers and fruits [J]. European Journal of Plant Pathology, 2006, 114(4):415–425.
- [50] Carisse O, Bacon R, Lefebvre A. Grape powdery mildew (*Erysiphe necator*) risk assessment based on airborne conidium concentration [J]. Crop Protection, 2009, 28:1306–1044.
- [51] Blanco C, Santos B D L, Barrau C, et al. Relationship among concentrations of *Sphaerotheca macularis* conidia in the air, environmental conditions, and the incidence of powdery mildew in strawberry [J]. Plant Disease, 2004, 88(8):878–881.
- [52] Khan J, Qi A, Khan M F R. Fluctuations in number of *Cercospora beticola* conidia in relationship to environment and disease severity in sugar beet [J]. Phytopathology, 2009, 99:796–801.
- [53] Pan Zaitao, Yang Xiaobing, Pivonia S, et al. Long-term prediction of soybean rust entry into the continental United States [J]. Plant Disease, 2006, 90:840–846.
- [54] Wang Haiguang, Yang Xiaobing, Ma Zhanhong. Long-distance spore transport of wheat stripe rust pathogen from Sichuan, Yunnan, and Guizhou in southwestern China [J]. Plant Disease, 2010, 94:873–880.
- [55] 王海光, 杨小冰, 马占鸿. 基于 HYSPLIT-4 模式的小麦条锈病菌远程传播研究[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(5):55–64.
- [56] Singh R P, Hodson D P, Huerta-Espino J, et al. The emergence of Ug99 races of the stem rust fungus is a threat to world wheat production [J]. Annual Review of Phytopathology, 2011, 49:465–481.
- [57] Zhou Yongli. Specific and sensitive detection of the fungal pathogen *Ustilaginoidea virens* by nested PCR [J]. Mycosystema, 2004, 23(1):102–108.
- [58] Foster S J, Ashby A M, Fitt B D L. Improved PCR-based assays for pre-symptomatic diagnosis of light leaf spot and determination of mating type of *Pyrenopeziza brassicae* on winter

- oilseed rape[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2002, 108:379–383.
- [59] Ma Zhonghua, Luo Yong, Michailides T J. Nested PCR assays for detection of *Monilinia fructicola* in stone fruit orchards and *Botryosphaeria dothidea* from Pistachios in California [J]. *Journal of Phytopathology*, 2003, 151:312–322.
- [60] Zeng Xiaowei, Luo Yong, Zheng Yaming, et al. Detection of latent infection of wheat leaves caused by *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* using Nested PCR[J]. *Journal of Phytopathology*, 2009, 158:227–235.
- [61] Yan Jiahui, Luo Yong, Chen Tingting, et al. Field distribution of wheat stripe rust latent infection using real-time PCR [J]. *Plant Disease*, 2012, 96:544–551.
- [62] Zheng Yaming, Luo Yong, Zhou Yilin, et al. Real-time PCR quantification of latent infection of wheat powdery mildew in the field [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2013, 136 (3):565–575.
- [63] Williams R H, Ward E, McCartney H A. Methods for integrated air sampling and DNA analysis for detection of airborne fungal spores [J]. *Applied Environmental Microbiology*, 2001, 67:2453–2459.
- [64] Calderon C, Ward E, Freeman J, et al. Detection of airborne inoculum of *Leptosphaeria maculans* and *Pyrenopeziza brassicae* in oilseed rape crops by polymerase chain reaction (PCR) assays [J]. *Plant Pathology*, 2002, 51:303–310.
- [65] Freeman J, Ward E, Calderon C, et al. A polymerase chain reaction (PCR) assay for the detection of inoculum of *Sclerotinia sclerotiorum* [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2002, 108:877–886.
- [66] Falacy J S, Grove G G, Mahaffee W F, et al. Detection of *Erysiphe necator* in air samples using the polymerase chain reaction and species-specific primers [J]. *Phytopathology*, 2007, 97:1290–1297.
- [67] Gent D H, Nelson M E, Farnsworth J L, et al. PCR detection of *Pseudoperonospora humuli* in air samples from hop yards [J]. *Plant Pathology*, 2009, 58:1081–1091.
- [68] Fraaije B A, Cools H J, Fountaine J, et al. Role of ascospores in further spread of QoI-resistant cytochrome b alleles (G143A) in field populations of *Mycosphaerella graminicola* [J]. *Phytopathology*, 2005, 95:933–941.
- [69] Luo Yong, Ma Zhonghua, Reyes H C, et al. Quantification of airborne spores of *Monilinia fructicola* in stone fruit orchards of California using real-time PCR [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2007, 118:145–154.
- [70] Cao Xueren, Yao Dongming, Zhou Yilin, et al. Detection and quantification of airborne inoculum of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* using quantitative PCR [J/OL]. *European Journal of Plant Pathology*, DOI:10.1007/S10658-016-0908-8.
- [71] Kaczmarek J, Jędryczka M, Fitt B D L, et al. Analyses of air samples for ascospores of *Leptosphaeria maculans* and *L. biglobosa* by light microscopy and molecular techniques [J]. *Journal of Applied Genetics*, 2009, 50(4):411–419.
- [72] Rogers S L, Atkins S D, West J S. Detection and quantification of airborne inoculum of *Sclerotinia sclerotiorum* using quantitative PCR [J]. *Plant Pathology*, 2009, 58:324–331.
- [73] Van de Wouw A P, Stonard J F, Howlett B J, et al. Determining frequencies of avirulent alleles in airborne *Leptosphaeria maculans* inoculum using quantitative PCR [J]. *Plant Pathology*, 2010, 59:809–818.
- [74] Carisse O, Tremblay D M, Lévesque C A, et al. Development of a TaqMan real-time PCR assay for quantification of airborne conidia of *Botrytis squamosa* and management of *Botrytis* leaf blight of onion [J]. *Phytopathology*, 2009, 99:1273–1280.
- [75] Meitz-Hopkins J C, von Diest S G, Koopman T A, et al. A method to monitor airborne *Venturia inaequalis* ascospores using volumetric spore traps and quantitative PCR [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2014, 140:527–541.
- [76] 康振生, 曹丽华, 郑文明, 等. 小麦条锈菌条中 29 号生理小种 SCAR 检测标记的建立[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(5):53–56.
- [77] 曹丽华, 康振生, 郑文明, 等. 小麦条锈菌条中 31 号生理小种 SCAR 检测标记的建立[J]. *菌物学报*, 2005, 24(1):98–103.
- [78] Wang Baotong, Hu Xiaoping, Li Qiang, et al. Development of race specific-SCAR markers for detection of Chinese races CYR32 and CYR33 of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* [J]. *Plant Disease*, 2010, 94:221–228.
- [79] 刘景梅, 陈霞, 王璧生, 等. 香蕉枯萎病菌生理小种鉴定及其 SCAR 标记[J]. *植物病理学报*, 2006, 36(1):28–34.
- [80] 李红霞, 周明国, 陆悦健. 应用 PCR 方法检测油菜菌核病菌对多菌灵的抗药性[J]. *菌物系统*, 2002, 21(3):370–374.
- [81] Fraaije B A, Butters J A, Coelho J M, et al. Following the dynamics of strobilurin resistance in *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* using quantitative allele-specific real-time PCR measurements with the fluorescent dye SYBR Green I[J]. *Plant Pathology*, 2002, 51:45–54.
- [82] Luo Yong, Ma Zhonghua, Michailides T J. Quantification of allele E198A in β -tubulin conferring benzimidazole resistance in *Monilinia fructicola* using real-time PCR [J]. *Pest Management Science*, 2007, 63:1178–1184.
- [83] Yan Leiyan, Yang Qianqian, Zhou Yilin, et al. A real-time PCR assay for quantification of the Y136F allele in the CYP51 gene associated with *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* resistance to sterol demethylase inhibitors [J]. *Crop Protection*, 2009, 28:376–380.
- [84] Dufour M C, Fontaine S, Montarry J, et al. Assessment of fungicide resistance and pathogen diversity in *Erysiphe necator* using quantitative real-time PCR assays [J]. *Pest Management Science*, 2011, 67:60–69.
- [85] 曹学仁, 詹浩宇, 周益林, 等. 电子鼻技术在快速检测小麦矮腥黑穗病菌中的应用[J]. *生物安全学报*, 2011, 20(2):171–174.