

作物病虫害预测机理与方法研究进展

张雪雪¹, 王斌¹, 田洋洋¹, 袁琳², 姜玉英³,
董莹莹⁴, 黄文江⁴, 张竞成^{1*}

(1. 杭州电子科技大学生命信息与仪器工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江水利水电学院信息工程与艺术设计学院, 杭州 310018; 3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100026; 4. 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)

摘要:我国目前作物病虫害防治普遍存在乱用农药等防治方法不当的情况,给粮食安全带来巨大隐患。有效的病虫害预测是提高作物植保综合防控水平的关键。综述了作物病虫害预测机理与方法研究方面的新进展。在预测机理方面,分析了包括气候背景、气象因子、病虫原分布、寄主状况以及种植模式等因素对农作物病虫害发生流行的影响机制,并根据已有研究结果详细阐述了海温、厄尔尼诺、大气环流等气候背景对病虫害的指示作用,以及温度、降雨、湿度、风、光照等气象因子对病虫害的发生时间、侵染速度、传播及分布的影响。在预测模型方面,对病虫害预测模型进行归纳和总结,分静态模型、时序动态模型和空间传播模型等类型介绍了模型对病虫害发生、发展概率、严重程度、扩散方向、流行趋势等方面的预测方法。最后,对作物病虫害预测技术发展趋势进行展望,从数据、分析方法、尺度、研究和应用模式等方面对后续研究的关键问题进行探讨。

关键词: 病虫害; 预测; 气象; 模型

doi: 10.13304/j.nykjdb.2018.0407

中图分类号: S431 文献标识码: A 文章编号: 1008-0864(2019)05-0110-11

Research Progress on Forecasting Mechanism and Methodology for Crop Disease and Insect Pest

ZHANG Xuexue¹, WANG Bin¹, TIAN Yangyang¹, YUAN Lin², JIANG Yuying³,
DONG Yingying⁴, HUANG Wenjiang⁴, ZHANG Jingcheng^{1*}

(1. College of Life Information Science and Instrument Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018;
2. College of Information Engineering and Art Design, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018; 3. National Agricultural Technology Extension Service Center, Beijing 100026; 4. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: The inappropriate use of pesticides is commonly existing in current prevention and control of crop diseases and insect in China, which has severely endangered the food security. This paper reviewed the latest research progresses in forecasting mechanism and methodology for crop disease and insect pest. About the forecasting mechanism, the paper analyzed many elements affecting the epidemic of crop diseases and insect pests, including climate background, meteorological factors, distribution of diseases and insects, host status, and planting pattern, etc. Besides, the paper also expounded in detail according to existing research results the indicative functions of sea temperature, El Nino, atmospheric circulation, etc. meteorological factors, and influence of meteorological factors like temperature, rainfall, humidity, wind and illumination, etc. on occurrence time, infection speed, spread and distribution of diseases and insect pests. In terms of the forecasting models, three types of models such as the static

收稿日期: 2018-07-06; 接受日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601461, 61661136004); 中国科学院青年创新促进会项目(2017085) 资助。

作者简介: 张雪雪, 硕士研究生, 研究方向为农业遥感及病虫害预警。E-mail: zhangxx_rs@163.com。* 通信作者: 张竞成, 副教授, 博士, 主要从事遥感、信息技术在农业、环境中应用研究。E-mail: zhangjc_rs@163.com

model, temporal dynamic model, and spatial dispersal model were summarized and introduced. The methodologies for forecasting the occurrence of diseases and insects, severity, dispersal and epidemics were reviewed. Finally, the paper looked forward the future development trend of forecasting technology for crop diseases and insect pests, and discussed the key issues, regarding data, analytical method, scale, research and application pattern, etc..

Key words: disease and insect pest; forecast; meteorology; model

农作物病虫害是全球粮食生产普遍面临的一个难题。作物病虫害损害占全球产量损失的10%~40%^[1]。在我国,病虫害防控主要通过喷洒杀虫或杀菌剂等途径。近年来,我国农药过量施用问题严重,农药使用量居世界第一,每年达50万~60万t,其中80%~90%最终将进入土壤环境,造成87万~107万hm²的农田土壤受到农药污染^[2],导致土壤结构破坏、水源污染、粮食品质降低以及威胁粮食安全等一系列问题。农业农村部于2015年2月发布了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》,正式提出我国农药化肥双减行动。在这一过程中,一个关键问题是需要对作物病虫害进行准确有效的预测预报,并据此指导农药施用,在保证防效的同时能够有效降低农药用量,从而改善粮食安全和土壤污染问题。因此,对病虫害预测理论和模型的研究是问题的核心。

根据植物病虫害流行病学理论,病虫害的发生受到病原、寄主和环境三方面因素的综合影响,而其发展又体现了病原繁殖、扩增的生物学过程和

传播、扩散等时空过程^[3],因此整体表现为一个复杂、动态的过程。目前有关作物病虫害预测的研究分别从不同过程、角度出发,试图弄清各因素与病虫害发生、发展的定性或定量关系,并通过建立相应的数学模型实现病虫害预测。本文在综述目前主要的病虫害预测理论、模型的基础上,分析了病虫害预测中存在的重要问题与趋势,旨在为该领域理论与模型的发展提供参考。

1 作物病虫害预测影响因素与机理

弄清作物病虫害预测影响因素和机理是有效预测病虫害的基础,目前国内外研究对作物病虫害预测的多个因素、过程进行分析,主要涉及了气候背景、气象条件、病虫原分布、品种抗性、种植习惯等因素的影响(表1)。

1.1 气候背景对病虫害发生的影响

农作物病虫害的发生发展与大尺度的气候背景密切相关。近年来作物病虫害气象影响因素的

表1 作物病虫害预测因素及其主要影响

Table 1 Forecasting factors and main effects of crop disease and insect.

预测因素 Forecasting factor	影响因素 Influence factor	影响方式 Influence way
气候背景 Climate background	海温 Sea temperature	大范围的气候异常 Wide range of climate anomalies
	厄尔尼诺事件 El Niño event	大气的正常环流 Normal circulation of atmosphere
	大气环流 Atmospheric circulation	作物环境的大气状态 Atmospheric state of crop environment
气象因子 Meteorological factor	温度 Temperature	病虫害的起止时间、感染或生长的速度及分布 Starting and ending time, infection or growth rate and distribution of pests and diseases
	降雨、湿度 Rainfall, humidity	病虫害的感染或生长的速度 Infection or growth rate of pests and diseases
	风 Wind	分散孢子、影响昆虫迁飞 Dispersal of spores, migration of insect
	光照 Illumination	病菌、害虫的存活和繁殖 Survival and reproduction of pathogens and pests
其他因素 Other factor	病原原分布、寄主生育期 Pest distribution, host growth period	寄生在田间植物残体、土壤中,外地传播或迁飞而来;发生与流行的物质基础 Parasites in plant residues, soil, spread or moved; the basis of epidemic
	种植模式 Planting mode	影响生物多样性(病虫害的天然屏障) Impact on biodiversity (natural barrier to pests and diseases)

研究进展显示,海温、厄尔尼诺事件和大气环流等大尺度气候背景因子对作物病虫害发生具有明显的预警指示作用。

1.1.1 海温 海温的异常会引起大范围甚至全球气候异常,进而影响农作物病虫害的发生与流行,因此根据海温的变化可预测未来病虫害的发生发展趋势。刘了凡等^[4]研究发现鲁西南第三代玉米螟的发生程度、发生期、卵峰日与北太平洋某些区域的海温显著相关,利用海温因子建立的鲁西南三代玉米螟发生程度和卵峰日的预报模式,可提前 20 d 以上作出预报;蒋蓉^[5]用相关和回归方法分析了近 30 年来太平洋海温场、南方涛动指数(southern oscillation index, SOI)、中南半岛温度场与江苏省褐飞虱迁入量之间的关系,分别以太平洋海温场、南方涛动指数、中南半岛温度场建立了江苏省三个研究区褐飞虱迁入量的中长期预测模型,各模型的预测正确率均在 67% 以上;汪秀清等^[6]尝试以太平洋海温资料为因子,实现提前 3 个月对玉米螟发生程度的预报;Maelzer 等^[7]通过对澳大利亚两个地区的两种农业害虫与南方涛动指数、海温的关系研究,以南方涛动指数和海温为复合变量建立多元回归模型,能提前 6~15 个月对害虫发生做出预报。

1.1.2 厄尔尼诺 厄尔尼诺事件是指赤道中、东太平洋海水大范围异常偏暖 0.5℃ 以上、持续时间一般为 6 个月到一年半的现象。厄尔尼诺事件的出现会造成全球气候异常,进而能够影响病虫害的发生和分布。如 1982-1983 年强厄尔尼诺年之后我国南方稻飞虱、红铃虫相继大发生,1991、1993-1994 年两个厄尔尼诺年之后,我国棉铃虫、稻飞虱、麦蚜、小麦条锈病、蝗虫等大发生^[8]。Morishita^[9]分析了近 100 年日本褐飞虱大发生与厄尔尼诺的关系,得出厄尔尼诺的次年为日本褐飞虱大发生年的结论;霍治国等^[10]对厄尔尼诺事件与我国冬小麦白粉病发病面积的相关关系进行了分析,结果表明在厄尔尼诺起始年至下一个起始年之间,发病面积呈现逐年增大趋势,并在下一个厄尔尼诺起始年的前一年达到最大值;Schem 等^[11]分析了大气远程并置对比模式对于中国北方地区小麦条锈病发生流行的影响,结果表明华北地区小麦条锈病的发生同 SOI 相关关系显著,这对此前观察到的 SOI 与条锈病严重程度之间的关联产生更好的物理和生物解释;秦淑莲等^[12]分

析了厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-southern oscillation, ENSO)和 SOI 与棉铃虫卵量的遥相关关系,遥相关分析结果表明棉铃虫卵量与 ENSO 各指标遥相关关系的时间变化规律很相似,与 SOI 大多数月份呈负相关;Olatinwo 等^[13]研究了 ENSO 对花生萎黄病强度及花生产量的影响,结果表明 ENSO 与花生基因型间的相互作用能够显著影响斑点枯萎病强度,这一结果可以纳入已有的风险指数,从而帮助生产者做出减少斑萎的管理决策。

1.1.3 大气环流 大气环流即大范围空气运行现象,通常水平尺度大于 1 000 km,垂直尺度大于 10 km,时间尺度在 10⁵s 以上。大气环流通过影响作物环境的大气状态,会直接或间接地影响农作物病虫害的发生流行。高萃等^[14]发现了白背飞虱虫情指标与环流因子之间不仅存在线性及单调曲线关系,还存在非线性、非单调的单峰(谷)型的相关关系,为预报白背飞虱发生程度提供了新的长期因子和新途径;吴春艳等^[15]利用 500 hPa 大气环流因子作为分析小麦赤霉病发生程度的自变量,与海温因子共同对小麦赤霉病进行长期预测,环流及海温和赤霉病相关的时效可长达一年以上,因而可以用于赤霉病的长期预报;钱拴等^[16]以关键环流特征因子距平为预测因子,建立了 2 个全国小麦白粉病发病面积距平预测模式,对 2004 年的外延预报准确率分别达 87.5% 和 98.2%,并发现前期关键环流特征因子对我国小麦白粉病的发生流行具有很好的指示效应;尚志云等^[17]通过 Pearson 相关分析和逐步回归分析方法,筛选与白粉病发生显著相关的大气环流因子,建立白粉病发生面积预报模型,模型预报的小麦白粉病发生面积(河北省 1990-2013 年)与实际发生面积基本一致,说明大气环流特征量对小麦白粉病具有较强的气候指示效应,可为小麦白粉病的长期预测提供参考依据。

除目前已发现或建立的关于海温、厄尔尼诺和大气环流等气候背景因素对作物病虫害发生的相关关系及预测模型外,在未来的研究中应更多揭示这些影响的机理,多因素互作的关系,并发展相应的机理模型。

1.2 病虫害预测的关键气象因子

病虫害的发生受到大范围气象背景的影响,但与局地气象条件直接相关。这些局地气象因子

由于能够更容易地被准确观测,因此,常被用于预测模型中的关键输入因子,主要包括温度、降雨、湿度、风、光照等。

1.2.1 温度 气象条件对农作物病虫害的发生流行影响显著。通常,在发病温度范围内农作物病害的潜育期随温度升高而缩短,增加的积温能够增加病菌繁殖或昆虫的发生世代数目,发病程度也会随着温度升高而加重,如菱角白绢病、小麦全蚀病等。温度在很大程度上会决定农作物病虫害的区域分布。孔令斌等^[18]分析了温度等气象因子对橘小实蝇地理分布的影响,指出温度是橘小实蝇纬度分布最主要的影响因子,冬季低温是中高纬度分布的主要限制因子,夏季高温是低纬度地区的主要限制因素;胡小平等^[19]、张旭东等^[20]、曹宏等^[21]分别研究了我国汉中、甘肃、陇东等地小麦条锈病发生流行的气象敏感性因子,发现小麦条锈病流行与4月平均温度相关性较高;Guzman-Plazola等^[22]分析了番茄白粉病孢子萌发的适宜气象条件,并找出温度等气象因子在不同生育期的适宜范围;宋晶晶等^[23]监测了小麦白粉病菌空中孢子量,并对孢子量与气象因子的关系进行了分析,发现孢子量与温度呈负相关。

1.2.2 降雨和湿度 降雨加快多数病菌的繁殖和扩散,同时雨水溅泼也是病菌传播的一条重要途径。湿度对有些病菌的影响很大,如:引起黄瓜绿粉病的绿藻门集球藻的藻孢在相对湿度不低于80%的环境下才能生长旺盛,当相对湿度低于70%时藻孢的发育就受到抑制^[24];Kriss等^[25]对小麦赤霉病与气象因素间关系进行研究,结果表明湿度等相关气象变量(如平均相对湿度,湿度超过80%的小时数)对病害发生会产生较大影响;曹宏等^[21]对陇东小麦条锈病发生的原因进行分析,发现春季(3~5月)降水量是条锈病流行的决定性因素;程玲娟等^[26]通过对江苏省宿迁市宿豫区多年气象资料和水稻纹枯病田间调查资料进行分析认为,水稻纹枯病的发生与7~8月降雨日数、降水量呈极显著的正相关关系;Launay等^[27]以平均感染强度和感染天数作为指标,对法国南部油菜茎点病、马铃薯晚疫病、葡萄霜霉病、小麦叶锈病和大麦网斑病的气象适宜性条件进行研究,指出病原体的生物气候生态位会随降雨模式的变化而改变。

1.2.3 风 风在作物病虫害的传播中起着不可

忽视的作用。风影响真菌孢子的释放和传播,同时,风对害虫的迁飞、降落也有重要的影响,风的强度、方向与害虫的起飞习性有关。害虫常在无风或微风的天气飞行,当风速超过4.2 m/s时停止,黏虫、稻纵卷叶螟、褐稻虱等害虫有长距离迁飞习性,晚秋随偏北气流由北向南回迁^[28]。刁家敏等^[29]分析了江岭稻区褐飞虱迁入量与准双周低频大气振荡之间的关系,探讨了大气低频流场对褐飞虱迁飞路径和虫源地的影响,结果表明,褐飞虱迁入量的低频振荡与同期850 hPa和925 hPa两个高度的风场、位势高度场及垂直速度场的低频振荡呈显著相关;迁入江岭稻区的褐飞虱的轨迹和虫源地与低频风场的盛行基本一致。在病害方面,谢水仙等^[30]通过分析高空气流动向、风速等数据资料,发现我国小麦条锈病菌远程传播与高空气流之间的关系密切;陈刚等^[31]首次引入风量值这一概念,并对风量值与小麦条锈病的发生流行进行了相关性分析。

1.2.4 光照 光照时间及强度直接影响病菌(虫)的存活和繁殖。光照时间对害虫的影响不同,如在长日照条件下,三化螟、棉铃虫等害虫发育正常,而短日照时受到影响。光照强度也会影响害虫生长发育、产卵和活动。比如,大地老虎、小麦吸浆虫等发育在长日照条件下受到抑制,蚜虫在黑暗中不起飞,中午光照强度超过10 000 Lux时,也会对迁飞有抑制作用^[32]。Mizubuti等^[33]评估了太阳辐照度(solar irradiance)对植物病菌孢子囊活力的影响,发现孢子囊存活时间在阴天比晴天长,太阳辐射会导致孢子囊的存活量急剧下降;马威等^[34]对小麦白粉病菌有性时期侵染自生麦苗的情况进行观察,结果显示干燥、阳光直射条件不利于闭囊壳向自生麦苗传病。

相对而言,目前气温、降水、湿度等参数常被用于作物病虫害预测模型的输入参数,而风、光照等因素在模型中体现得较少,后续亟待加强这一方面的研究。

1.3 影响病虫害发生的其他因素

作物病虫害的发生除受到气候、气象因素的影响,还受到病虫害原分布、寄主状况以及种植模式等因素的影响,是这些因素综合作用的结果。

1.3.1 病虫害原分布与寄主生育期 具备一定的病虫害原是病虫害发生的基础,按其来源可分为当地和外来两种情况。其中,田间植物残体是病虫

原最为普遍的寄生地,如螟虫和玉米螟的末代幼虫往往潜伏在禾莠及玉米残茬中休眠越冬,小菜蛾(蛹)以成虫和蛹在蔬菜或残株落叶及杂草上、土缝内越冬,成为翌年的虫源。其次,土壤也是病虫害原的寄生地,水稻纹枯病、玉米褐斑病等病害及棉铃虫、蝗虫等虫害分别以菌核或卵等形态的休眠体在土壤中越冬或越夏。病虫害的携带介体还包括种子或其他繁殖体,如小麦散黑穗病、马铃薯晚疫病菌存在于种子胚内和薯块内。小麦腥黑穗病菌主要靠冬孢子混杂在小麦种子中进行传播。因寄主或气候的影响,有些病虫害的病虫原只能来自异地,如小麦条锈病、稻褐飞虱、黏虫等迁飞性害(菌)虫,为维持种群的丰富度进行“变境成长”^[35]的行为,每年进行北迁南回的往复远距离传播或迁飞、多代次辗转危害。专性寄生的小麦条锈病等气传性、专性寄生病害,则靠迁飞来实现在生境适宜的地区进行越冬或越夏,年年循环往复。南方水稻黑条矮缩病,靠白背飞虱作为虫媒进行迁飞、传播病毒,引起不同区域病害的流行。

在有一定数量病虫害原的前提下,适宜生育期的寄主作物也是病虫害发生流行的必备条件。每种作物不光都有其常发或重发的病虫害,而且每种作物的各个生育期也有最易发生的病虫害,如小麦抽穗扬花期是赤霉病侵染的关键时期,水稻叶瘟、穗瘟发病时期分别是分蘖盛期、抽穗期。这些易受危害的时期称为作物敏感期,是预测病虫害的重要依据。

1.3.2 种植模式 农场化大规模种植模式在获得高效率的同时,也给作物病虫害的防控带来了新的挑战。生物多样性是病虫害的天然屏障,田间大面积品种单一化种植会增加病虫害感染及传播风险。一些土传病害如小麦纹枯病、小麦全蚀病等,容易随大型农机的使用将病原菌传到其他区域造成连片感染。耕作制度与作物病虫害的发生关系密切。一些积年流行病害如小麦黑穗病、棉花枯黄萎病等,虽在作物一个生长季中菌量增幅不大,但其产生的抗逆性休眠体能够逐年积累,可能在若干年后导致病害大流行。因此,改善大面积单一种植、连作障碍可以有效降低病虫害的发生风险。裴建锋^[36]比较测定了两种生态氮肥(C40, M20)对烟田土壤微生态的修复效果,结果表明增施生态氮肥能够改善连作烟田的土壤微生

态系统,是烟叶生产上具有较大应用潜力的一项绿色防控技术。扬州市江都区设施蔬菜种植为克服多年来严重的连作障碍,里下河所开展水生蔬菜与旱生蔬菜轮作种植试验,水旱轮作技术对土壤修复、缓解连作障碍起到了很好的促进作用,截止2017年此技术已累计推广533 hm²以上^[37]。研究表明,丛枝菌根(arbuscular mycorrhizae, AM)真菌能够改善连作土壤环境,诱导植物增强对连作土传病害的抗病性,李亮等^[38]总结了AM真菌在改善土壤环境方面的研究成果,并分析了AM真菌缓解连作障碍的作用机制,为今后研发AM真菌控制连作障碍的技术提供了理论依据。

上述关于病虫害原、寄主生育期、种植模式对病虫害发生流行影响的研究目前基本处在机理研究的层面,尚难以将上述影响、过程耦合到预测模型中。这可能与这些影响较难定量描述,并且难以获得关于这些因素的稳定观测有关。因此,未来可考虑通过遥感、无线传感、地理信息系统(geographic information system, GIS)等多种方式获得有效的信息,并将这些信息输入模型,以在病虫害预测时获得更全面的信息。

1.4 基于无线传感网的气象观测

目前针对作物病虫害预测研究和应用,已出现通过无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)获取气象观测、作物长势及土壤环境等信息。不同于传统的依靠气象站,WSN可以将传感节点精准布设在研究区域,实现对农田温度、湿度、光照、土壤水分等农田环境参数的快速、精确、时间连续地测量,为病虫害预测模型提供更加有效的信息。目前,基于WSN技术,研究人员已经做了一些有益的尝试。如2009年López Riquelme等^[39]在木尔西亚半干旱地区的一个生态园中设计并部署了一个试验性WSN系统,测量各种土壤温度、容积含水率及环境温、湿度、水体温度等,实现了生态园植物生长环境的无线实时监控;王志宇等^[40]基于物联网技术实现区域农田土壤墒情监测的应用开发,提出了通过WSN实现农田土壤温度、湿度等土壤墒情信息进行自动化采集与存储的信息系统设计;Fukatsu等^[41]将WSN与图像分析技术结合,通过对实时获取图像的特征提取,实现了对水稻虫害信息的探测。针对WSN运行状态中存在覆盖空洞的问题,赵春江等^[42]提出了一种基于Voronoi有效覆盖区域的空洞侦测修复

策略。该策略能有效减少网络总节点个数和感知重叠区域,同时其收敛速度较快,能够获得比现有算法更高的空洞修复率,实现网络覆盖控制优化。总之,在推进农业精细化、信息化建设中,基于 WSN 的信息观测技术不可或缺并日益成为研究热点,如何更好地将此技术与作物病虫害预测结合提高预测精度与效率,是病虫害预测领域研究的一个重要方向。

2 作物病虫害预测模型

作物病虫害预测模型是依据病虫害发生流行机制,以一些影响病虫害发生发展的关键因素为输入,依靠一定的数理统计、时序分析、空间分析

方法建立的模型,能够给出病虫害发生、发展概率、严重程度、扩散方向、流行趋势等方面的信息。根据预测模型的原理和形式,目前已建立的病虫害预测模型主要包括静态模型、时序动态模型和空间传播模型。模型中所涉及的算法见表 2。

2.1 静态预测模型

静态预测模型是对某一特定时期病虫害发生情况进行预测的模型,往往关注于对病虫害发生盛期或年际发生状况的预测。胡小平等^[19]基于陕西汉中地区 1974-1997 年的小麦条锈病病情、菌量、品种和气象资料,利用逐步回归法筛选了影响条锈病流行的主要因子,采用 BP 神经网络建立小麦条锈病流行程度的年度预测模型,对 1994-1997 年小麦条锈病的流行程度进行预测,结果

表 2 预测模型中涉及的相关算法和模型

Table 2 Related algorithm and model involved in the prediction model.

类别 Category	算法/模型 Algorithm/model	精度 Accuracy	文献 Reference
统计与回归方法 Statistical and regression method	Fisher 判别分析 Fisher discriminant analysis	88.2%、95.0%	[43]
	Logistic 回归 Logistic regression	72.2%	[44]
	多元线性回归 Multiple linear regression	87.5%	[45]
机器学习算法 Machine learning algorithm	BP 神经网络 BP neural network	100%	[19]
	LVQ 神经网络 LVQ neural network	90%	[46]
	改进的 AdaBoost 算法 Improved AdaBoost algorithm	91.69%	[47]
	决策树 C4.5 算法 Decision tree C4.5 algorithm	90%	[48]
	马尔科夫链 Markov chain	66.7%	[49]
	多项式非线性拟合 Polynomial nonlinear fitting	标准误差为 0.227 Standard error was 0.227	[50]
	深度信念网络 (DBN ₂) Deep belief network (DBN ₂)	90.56%	[51]
其他模型 Other models	Epitimulator 模型 Epitimulator model	94.6%	[52]
	EPIRICE 模型 EPIRICE model	误差为 ±10% Error was ±10%	[53]
	MaxEnt 生态位模型 MaxEnt niche model	AUC = 0.995	[54]

模型的回测准确率为 100%; Rongai 等^[55]运用回归模型根据春季蚜虫飞行估计量预测马铃薯 Y 病毒感染 (potato virus Y, PVY) 蚜虫的估计量提前预警了预测年份病毒感染率的高、低情况;肖志强等^[45]利用与小麦条锈病显著相关的品种抗病性、菌源量和气象条件建立春季病害流行情况的多元回归预报方程,预报准确率高,其历史拟合率可达 87.5%,其中偏重到大流行拟合率为 100%,并成功预报了 2006 年春季陇南市小麦条锈病的流行趋势;余剑^[47]采用改进的 AdaBoost 算法对农作物病虫害的发生种类进行预测,模型对可疑病

虫害区域提取突发病虫害的特征值,然后训练最优特征选择来预测病虫害类型。模型可根据病虫害发生前期的气候条件,给出预测年份病虫害的发生种类;纪思琪等^[46]分别使用 LVQ 神经网络、BP 神经网络、决策树 C4.5 算法^[48]构建设施蔬菜病害静态预警模型,根据气候条件和土壤环境对预测年份的病害发生可能性进行预测,三种模型均能够较好、较精确地实现对黄瓜黑星病的预测,准确率都高达 90%。其中, BP 神经网络、决策树两个模型计算速度较快,在实际应用中更有优势;王秀美等^[51]利用两个隐藏层的深度信念网络

(deep belief nets ,DBN) DBN₂ ,建立基于深度学习的小麦蚜虫短期预测模型 ,在对训练集和测试集的小麦蚜虫发生程度的准确率预测中 ,DBN₂模型的回代准确率达到 90.56% ,预测准确率为 82.14% ,与此研究中的 SVR 和 BP 网络相比 ,泛化能力较好。静态模型多为短期或年际预测模型 ,思路较简单 ,预测精度也相对较高 ,但是提供的预测信息量少 ,实用性不强。

2.2 时序动态模型

时序动态模型是针对作物病虫害发生过程进行预测的模型 ,它基于输入数据是时序序列或者输出预测是时序序列实现对作物病虫害发生进行动态预测 ,灵活度较高。王贺军等^[56]选取雨日数、雨量、气温、光照为预测因子进行了小麦白粉病的流行动态规律的研究 ,对小麦白粉病的发生期、发生量进行长、中、短期预测;李娟^[50]在苹果褐斑病多项式非线性拟合模型的研究中 ,进行多项式拟合构建苹果褐斑病动态预测模型 ,该模型标准误差为 0.227 ,预测结果和实际结果一致性良好;李成文^[52]将理查德函数引入描述病害流行的时间动态 ,构建了 EpiSimulator 病害预测模型 ,模型对水稻纹枯病、玉米大斑病的发生时间和发生严重度的短期预测具有很高的准确性 ,预测的平均准确度分别为 93.4%和 94.6%;王海光等^[49]针对玉米矮花叶病的预测 ,基于局地植保和气象数据 ,利用马尔科夫链的时序预测方法对该病进行长期发生趋势的预测 ,其准确率较低为 66.7% ,不过该方法可为玉米矮花叶病长期发生趋势预测预报提供参考 ,后续研究可通过改善准确率的计算方法提高预测精度。于彩霞^[43]基于 Fisher 判别分析的广西桂林地区稻飞虱发生程度等级、河北地区小麦白粉病发生程度等级的动态预警模型预测基本一致准确率分别为 88.2%和 95.0%;Kim 等^[53]结合长时间序列气象数据和病害流行病学模型 EPIRICE ,建立了水稻叶瘟病和纹枯病时间动态预测模型 ,模型有效性高 ,模拟结果可用来解释疾病风险变化的可能程度。近年来关于时序动态模型的研究不断增加 ,此类模型预测准确度较高 ,时序动态也是作物病虫害预测发展的重要趋势。随着遥感和无线传感等新兴技术的发展 ,获取越来越精确的多源时序序列数据将会大大提高模型的预测能力。

2.3 空间传播模型

空间传播模型是考虑作物病虫害的空间传播 ,能够对孢子传播、害虫迁飞等过程进行描述的模式。曾士迈^[57]根据中国小麦条锈病远程传播的历史数据 ,利用数理统计方法对菌源区病情与传播着落区的病情进行了定量分析;Kolmer^[58]从洲际尺度上对小麦条锈病菌的扩散和迁移规律进行系统研究 ,并给出病菌的传播路径;Soubeyrand 等^[59]通过实验研究了小麦条锈病的田间传播过程与微气候因素、种植密度及已感染区距离等因素的关系 ,并提出了病虫害传播的预测方法;孙淑清等^[60]提出利用 3S 技术(遥感技术、地理信息系统、全球定位系统)和用 GIS 数据库及遥感所监测到的数据对病虫害进行预报的方法 ,基于 GIS 的扩散模拟功能建立病虫害的扩散模型 ,从而对病虫害的发展趋势进行预测预报;罗菊花等^[61]使用 GIS 软件作为开发平台 ,建立农作物病虫害预警系统 ,系统直观显示了病虫害的发生程度和空间分布规律 ,相关数据的检验结果与实际数据符合性良好;王海光等^[62]基于 HYSPLIT-4 模式对历史上我国小麦条锈病菌远程传播的经典事例(分别发生于 1960 年、1964 年、1975 年和 1983 年)进行了分析 ,结果表明小麦条锈病的远程传播及发生时间可通过计算大气环流运动来预测 ,并且发现病原菌孢子的沉降除由于自身重力而引起的沉降外 ,很大程度上还受到降雨引起的湿沉降的影响;曹学仁等^[54]利用 MaxEnt 生态位模型预测麦瘟病在全球及我国的潜在分布 ,并得出该病害在我国的适生区较小 ,但随着全球气候变化 ,该病原菌的潜在分布范围可能将进一步扩大的结论。空间传播模型从除作物生境信息的另一个尺度考虑病虫害的发生情况 ,对单一基于生境信息的预测提供了补充。目前也出现了基于农田景观格局的病虫害发生情况的预测研究 ,如杨龙等^[63]评价在华北地区农田景观格局对早期麦田瓢虫种群数量的影响 ,得出在华北地区农田景观系统中非作物生境有利于麦田早期瓢虫种群发生的结论。

3 作物病虫害预测技术的发展趋势

关于作物病虫害预测机理与模型方法的研究和进展为作物病虫害预测提供了丰富的知识和科

学的分析框架。但目前作物病虫害预测模型还存在一定的局限,具体表现在:①目前多数病虫害预测模型仍基于单一的数据源进行分析建模;②病虫害预测模型多为局地小尺度的分析,对大区域寄主分布及易感性、病虫源发生流行动态等大尺度过程考虑及描述得较少;③预测模型普遍缺乏能够有效综合多源数据和描述复杂过程的机制和算法。

目前,随着数据源、数据分析方法的不断进步,病虫害预测模型也应朝向动态、准确、尺度兼容等方向发展,并逐渐弥合病虫害预测理论与病虫害防控实际需求之间的鸿沟。因此,病虫害预测理论及模型的发展呈现以下趋势:

①多源异构信息与机理模型融合的病虫害预测模式。随着多种新型观测手段的不断发展及性能不断增强,病虫害预测的数据源正由气象、植保等单一来源的数据扩展至气象、遥感、地面传感网等多源数据。这些数据能够为预测提供环境、寄主、病虫原等多个方面的关键信息,从而支持建立更全面综合的预测模型。建立一个能够兼顾多因素及过程的病虫害预测机理模型需对诸多具体的问题和挑战作出回应,比如:如何在模型中体现对风、光照等因素的影响;如何对病虫原、生育期、种植模式等因素进行定量描述;如何设计模型的结构使之能够综合体现多种因素和过程;以及如何使模型兼容不同形式的时间、空间数据等。目前,已出现一些有益的尝试,如黄健熙等^[64]利用 Landsat8 数据,通过对叶面积指数、地表温度和土壤湿度分析,得到蝗虫虫口密度与生境参数模型;Zhang 等^[44]监测了北京地区小麦白粉病生境,建立了结合生境信息的白粉病发病概率预测模型,并基于地面调查数据进行验证,其精度可达 72.2%。该研究表明,通过对病虫害生境的遥感反演,有可能提高病虫害预测的空间精度。对这些问题的研究、解决将深化对病虫害预测机理的认识,并推动病虫害预测模式的发展。

②模型宏观尺度预测能力的提升。目前较多病虫害预测研究、模型较多地体现了实验室内或试验田间较小尺度的研究成果,如对一些气象、养分等因素影响的模拟,对孢子扩散等过程的观察等,难以反映大区域长势变异、局地小气候,以及虫团移动等宏观尺度上的影响。然而,病虫害防控的实际需求更需要进行大尺度、时空连续的预

测。因此,未来非常有必要将遥感、昆虫雷达、地面传感网等新型观测对田间小气候、土壤、作物冠层内部状况信息进行有机综合,将模型进行升尺度及时空扩展,更好地应对病虫害防控的实际需求。张云慧等^[65]利用我国首台垂直监测昆虫雷达进行了空中昆虫初步监测,监测结果符合崔保平等提出的昆虫迁飞大气边界层顶现象,也与扫描昆虫雷达的监测结果相符。在此研究基础上,可以分析昆虫迁飞的轨迹和方向,进而提升模型的宏观尺度预测能力。

③发展适应病虫害预测大数据的算法。随着可用于病虫害预测的数据源类型的增加、性能的提升,高时间分辨率气象数据、高分辨率遥感影像数据和高性能地面无线传感网数据等多源数据正逐渐形成一个病虫害预测大数据,赋予病虫害预测模型前所未有的能力。而如何对这些数据进行有效分析和挖掘,建立相应的由大数据驱动的预测模型关键算法是一个亟需研究的问题。在这一方面,可以考虑将深度学习、时序分析、概率分析等模式识别和多元统计领域一些新方法引入到算法构建中,提升对病虫害预测数据的挖掘能力和模型效力。

4 结语

我国农药过量施用问题严重,对农作物病虫害准确有效地预报预测是改善这一问题的关键。针对病虫害预测,研究人员已经开展了大量工作并取得了一定的成效。在理论上,初步明确了影响作物病虫害发生各种因素的影响机理;预测数据来源正逐渐由单一的气象数据扩展至气象、遥感、地面传感网多源数据结合的模式。在方法上,预测模型由静态向动态发展,由局地小尺度向宏观尺度扩展。未来,随着病虫害影响因素和机理的不断清晰,观测数据源的不断丰富,分析和建模技术的不断进步,病虫害预测模型将在多源大数据驱动下,基于病虫害发生流行机理,实现对病虫害时空动态过程准确预测,大幅提升预测的准确率。

参 考 文 献

- [1] Christou P, Twyman R M. The potential of genetically enhanced plants to address food insecurity [J]. *Nutr. Res. Rev.* 2004, 17 (1): 23-42.
- [2] 仲维科,郝戡,孙梅心,等.我国食品的农药污染问题[J].农

- 药, 2000, 1(7): 1-4.
- [3] 曾士迈. 宏观植物病理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [4] 刘了凡, 黄善斌, 孔繁忠. 三代玉米螟发生程度和卵峰日的海温预报模式[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(2): 264-268.
Liu L F, Huang S B, Kong F Z. A SST based forecasting model for G3 maize borer [J]. J. Nanjing Institute Meteorol., 1999, 22(2): 264-268.
- [5] 蒋蓉. 江苏省褐飞虱迁入量的中长期预报模型研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 硕士学位论文, 2013.
Jiang R. Study on the medium and long-term forecasting models of BPH's immigration in Jiangsu province [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, Master Dissertation, 2013.
- [6] 汪秀清, 张丽, 程红军, 等. 用海温资料预报玉米螟发生程度[J]. 吉林气象, 2003(1): 29-31.
- [7] Maelzer D A, Zalucki M P. Long range forecasts of the numbers of *Helicoverpa punctigera* and *H. armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Australia using the southern oscillation index and the sea surface temperature [J]. Bull. Entomol. Res., 2000, 90(2): 133-146.
- [8] 叶彩玲, 霍治国, 丁胜利, 等. 农作物病虫害气象环境成因研究进展[J]. 自然灾害学报, 2005, 24(1): 90-97.
Ye C L, Huo Z G, Ding S L, et al.. Advance in study on formation of meteorological environment causing crop's diseases and insectpests [J]. J. Nat. Disasters, 2005, 24(1): 90-97.
- [9] Morishita M. A possible relationship between outbreaks of rice planthoppers in Japan and El Niño phenomenon [J]. Plant Epidemic Prevention, 1992, 46(5): 11-13.
- [10] 霍治国, 叶彩玲, 钱拴, 等. 气候异常与中国小麦白粉病灾害流行关系的研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 85-90.
Huo Z G, Ye C L, Qian S, et al.. Relationship between climatic anomaly and prevalence of the wheat powdery mildew in China [J]. J. Nat. Disasters, 2002, 11(2): 85-90.
- [11] Schem H, Yang X B. Atmospheric teleconnection patterns associated with wheat stripe rust disease in North China [J]. Int. J. Biometeorol., 1998, 42(1): 28-33.
- [12] 秦淑莲, 翟保平, 张孝羲, 等. 应用前期 ENSO 指标做棉铃虫大发生预测[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1695-1711.
Qin S L, Zhai B P, Zhang X X, et al.. Using advance ENSO indices to forecast outbreaks of *Helicoverpa armigera* [J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 23(9): 1695-1711.
- [13] Olaitinwo R O, Paz J O, Kemerait R C Jr, et al.. El Niño-Southern Oscillation (ENSO): Impact on tomato spotted wilt intensity in peanut and the implication on yield [J]. Crop Protection, 2010, 29(5): 448-453.
- [14] 高苹, 武金岗, 陈宁, 等. 大气环流特征量的水稻白背飞虱发生程度预报模型的研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(2): 146-152.
Gao P, Wu J G, Chen N, et al.. Atmospheric circulation characteristics (ACC) models for the prediction of the occurrence and development of *Sogatella furcifera* [J]. Chin. J. Ecol., 2005, 24(2): 146-152.
- [15] 吴春艳, 李军, 姚克敏. 小麦赤霉病发病程度的预测[J]. 中国农业气象, 2003, 24(4): 19-22.
Wu C Y, Li J, Yao K M. Prediction of damage level of scab of wheat in Shanghai [J]. Chin. J. Agrometeorol., 2003, 24(4): 19-22.
- [16] 钱拴, 霍治国, 叶彩玲. 我国小麦白粉病发生流行的长期气象预测研究[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 56-63.
Qian S, Huo Z G, Ye C L. Long-term meteorological prediction research on epidemic of wheat powdery mildew in China [J]. J. Nat. Disasters, 2005, 14(4): 56-63.
- [17] 尚志云, 姚树然, 王锡平, 等. 基于大气环流特征量的河北省冬小麦白粉病预报模型[J]. 中国农业气象, 2014, 35(6): 669-674.
Shang Z Y, Yao S R, Wang X P, et al.. Prediction of winter wheat powdery mildew in Hebei province based on atmospheric circulation characteristics [J]. Chin. J. Agrometeorol., 2014, 35(6): 669-674.
- [18] 孔令斌, 林伟, 李志红, 等. 气候因子对橘小实蝇生长发育及地理分布的影响[J]. 昆虫知识, 2008, 45(4): 528-531.
Kong L B, Lin W, Li Z H, et al.. Effects of climatic factors on the growth and geographical distribution of Oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* [J]. Chin. Bull. Entomol., 2008, 45(4): 528-531.
- [19] 胡小平, 杨之为, 李振岐, 等. 汉中地区小麦条锈病的 BP 神经网络预测[J]. 西北农业学报, 2000, 9(3): 28-31.
Hu X P, Yang Z W, Li Z Q, et al.. Prediction of wheat stripe rust by BP neural network in Hanzhong district, Shaanxi province [J]. Acta Agric. Boreali-Occid. Sin., 2000, 9(3): 28-31.
- [20] 张旭东, 尹东, 万信, 等. 气象条件对甘肃冬小麦条锈病流行的影响研究[J]. 中国农业气象, 2003, 24(4): 26-28.
Zhang X D, Yin D, Wan X, et al.. Impact of meteorological condition on stripe rust of winter wheat in Gansu province [J]. Chin. J. Agrometeorol., 2003, 24(4): 26-28.
- [21] 曹宏, 兰志先. 试论陇东小麦条锈病发生原因与防治对策[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(3): 144-147.
Cao H, Lan Z X. A discussion on the occurrence and control of wheat stripe rust in Longdong district [J]. J. Triticeae Crops, 2003, 23(3): 144-147.
- [22] Guzman-Plazola R A, Davis R M, Marois J J. Effects of relative humidity and high temperature on spore germination and development of tomato powdery mildew (*Leveillula taurica*) [J]. Crop Protection, 2003, 22(10): 1157-1168.
- [23] 宋晶晶, 曹远银, 李天亚, 等. 小麦白粉病菌空中孢子量与气象因子的关系及病害预测模型的建立[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(13): 2652-2654.
Song J J, Cao Y Y, Li T Y, et al.. Relationship between the amount of aerial conidia of *Blumeria graminis* f.sp. *tritici* and meteorological factors and the establishment of forecasting model [J]. Hubei Agric. Sci., 2011, 50(13): 2652-2654.
- [24] 陈秀蓉, 魏勇良. 黄瓜绿粉病病原鉴定及其发生规律研究[J]. 植物保护, 2000, 26(1): 7-10.
Chen X R, Wei Y L. Identification of the green powdery pathogenetic fungi on cucumber infected by *PlanellOCOCEUS* sp. and the occurrence of disease [J]. Plant Protection, 2000, 26(1): 7-10.
- [25] Kriss A B, Paul P A, Xu X M, et al.. Quantification of the

- relationship between the environment and Fusarium head blight, Fusarium pathogen density, and mycotoxins in winter wheat in Europe [J]. *Eur. J. Plant Pathol.*, 2012, 133(4): 975-993.
- [26] 程玲娟, 王金强, 王孝春. 气象因子对水稻纹枯病的影响之探讨[J]. *中国植保导刊*, 2012, 32(5): 35-37.
- [27] Launay M, Caubel J, Bourgeois G, et al.. Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate change impacts on five major foliar fungal diseases in northern France [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2014, 197: 147-158.
- [28] 王淑梅. 基于气象视角的农作物病虫害预测预报研究概况[J]. *中国植保导刊*, 2009, 29(12): 13-16.
Wang S M. Review of research on pests forecast based on weather [J]. *Chin. Plant Protection*, 2009, 29(12): 13-16.
- [29] 刁家敏, 孙思思, 包云轩, 等. 准双周大气低频振荡对江岭稻区褐飞虱迁入的影响[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(3): 181-195.
Diao J M, Sun S S, Bao Y X, et al.. Impacts of quasi-biweekly atmospheric low frequency oscillation on immigration of *Nilaparvata lugens*(Stal) in cropping area of Jiangling [J]. *Chin. J. Agrometeorol.*, 2017, 38(3): 181-195.
- [30] 谢水仙, 汪可宁, 陈杨林, 等. 我国小麦条锈病菌传播与高空气流关系的初步研究[J]. *植物病理学报*, 1993, 23(3): 203-209.
Xie S X, Wang K N, Chen Y L, et al.. Preliminary studied on the relationship between transport of wheat stripe rust, and the upper air current in China [J]. *Acta Phytopathol. Sin.*, 1993, 23(3): 203-209.
- [31] 陈刚, 王海光, 张录达, 等. 小麦条锈病区域流行相关性研究初报[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(7): 415-420.
Chen G, Wang H G, Zhang L D, et al.. Preliminary research on the regional relationship of epidemic of *Puccinia striiformis* in China [J]. *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 2006, 22(7): 415-420.
- [32] 吴胜文. 气象条件与农作物病虫害预报以及防治措施[J]. *农家科技旬刊*, 2012(2): 63.
- [33] Mizubuti E S G, Aylor D E, Fry W E. Survival of *Phytophthora infestans* sporangia exposed to solar radiation [J]. *Phytopathology*, 2000, 90(1): 78-84.
- [34] 马威, 王利兵. 小麦白粉病菌闭囊壳在初侵染中的作用观察[J]. *湖北植保*, 2009(2): 10-12.
- [35] 马世骏. 昆虫种群的空间、数量、时间结构及其动态[J]. *昆虫学报*, 1964, 13(1): 38-55.
Ma S J. The structure and dynamics of space, number and time of insect population [J]. *Acta Entomol. Sin.*, 1964, 13(1): 38-55.
- [36] 裴建锋. 生态炭肥在改善连作烟田土壤微生态中的应用[D]. 郑州: 河南农业大学, 硕士学位论文, 2016.
Pei J F. Demonstration application of biochar-based fertilizer for soil microecological improvement in tobacco continuous-cropping field [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, Master Dissertation, 2016.
- [37] 张永吉. 里下河所: 新技术克服蔬菜连作障碍[J]. *江苏农村经济*, 2017(6): 51.
- [38] 李亮, 蔡柏岩. 丛枝菌根真菌缓解连作障碍的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1372-1377.
Li L, Cai B Y. Advances in arbuscular mycorrhizal fungi alleviating continuous cropping obstacles [J]. *Chin. J. Ecol.*, 2016, 35(5): 1372-1377.
- [39] López Riquelme J A, Soto F, Suardiaz J, et al.. Wireless sensor networks for precision horticulture in southern Spain [J]. *Comp. Electron. Agric.*, 2009, 68(1): 25-35.
- [40] 王志宇, 车承钧, 王阳. 基于物联网的区域农田土壤墒情监测系统研究[J]. *自动化技术与应用*, 2010, 29(12): 39-41.
Wang Z Y, Che C J, Wang Y. Research of regional soil moisture monitoring system based on the internet of things [J]. *Tech. Automation Appl.*, 2010, 29(12): 39-41.
- [41] Fukatsu T, Watanabe T, Hu H, et al.. Field monitoring support system for the occurrence of *Leptocoris chinensis* Dallas (Hemiptera: Alydidae) using synthetic attractants, field servers, and image analysis [J]. *Comp. Electron. Agric.*, 2012, 80(1): 8-16.
- [42] 赵春江, 吴华瑞, 刘强, 等. 基于 Voronoi 的无线传感器网络覆盖控制优化策略[J]. *通信学报*, 2013, 34(9): 115-122.
Zhao C J, Wu H R, Liu Q, et al.. Optimization strategy on coverage control in wireless sensor network based on Voronoi [J]. *J. Commun.*, 2013, 34(9): 115-122.
- [43] 于彩霞. 稻飞虱、小麦白粉病发生的气候背景指示及区域动态预警研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 硕士学位论文, 2014.
Yu C X. The climate background and early dynamic warning research of rice planthopper and wheat powdery [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, Master Dissertation, 2014.
- [44] Zhang J C, Pu R L, Yuan L, et al.. Integrating remotely sensed and meteorological observations to forecast wheat powdery mildew at a regional scale [J]. *IEEE J. Selected Topics Appl. Earth Observ. Remote Sensing*, 2014, 7(11): 4328-4339.
- [45] 肖志强, 李宗明, 樊明, 等. 陇南山区小麦条锈病流行程度预测模型[J]. *中国农业气象*, 2007, 28(3): 350-353.
Xiao Z Q, Li Z M, Fan M, et al.. Prediction model on stripe rust influence extent of winter wheat in Longnan mountain area [J]. *Chin. J. Agrometeorol.*, 2007, 28(3): 350-353.
- [46] 纪思琪, 吴芳. 基于神经网络的蔬菜病害静态预警模型[J]. *电脑知识与技术*, 2016, 12(10): 189-191.
Ji S Q, Wu F. Static early-warning models of vegetable diseases based on neural network [J]. *Comp. Knowledge Technol.*, 2016, 12(10): 189-191.
- [47] 余剑. 基于 AdaBoost 改进算法的农作物病虫害预测模型研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2010, 41(6): 755-757.
Yu J. Pest forecast model based on improved AdaBoost algorithm [J]. *J. Shenyang Agric. Univ.*, 2010, 41(6): 755-757.
- [48] 纪思琪, 吴芳, 李乃祥. 基于决策树的蔬菜病害静态预警模型[J]. *天津农学院学报*, 2017, 24(2): 77-80.
Ji S Q, Wu F, Li N X. Static early-warning model of vegetable diseases based on decision tree [J]. *J. Tianjin Agric. Coll.*, 2017, 24(2): 77-80.
- [49] 王海光, 马占鸿. 玉米矮花叶病预测预报研究[J]. *玉米科学*, 2004, 12(4): 94-98.

- Wang H G, Ma Z H. Forecast methods of maize dwarf mosaic [J]. *J. Maize Sci.*, 2004, 12(4): 94-98.
- [50] 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]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 硕士学位论文, 2010.
- Li J. Construction of neural network of wheat yellow dwarf disease and dynamic model of apple marssonina blotch [D]. Shaanxi Yangling: Northwest A & F University, Master Dissertation, 2010.
- [51] 王秀美, 牟少敏, 邹宗峰, 等. 基于深度学习的小麦蚜虫预测预警[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(5): 183-187.
- [52] 李成文. 植物病害流行时间模拟与预测系统 EpiSimulator 开发及应用[D]. 重庆: 西南大学, 硕士学位论文, 2007.
- Li C W. Development and application of computer software for simulating temporal dynamics of plant disease progresses and forecasting disease epidemic [D]. Chongqing: Southwest University, Master Dissertation, 2007.
- [53] Kim K H, Cho J, Yong H L, et al.. Predicting potential epidemics of rice leaf blast and sheath blight in South Korea under the RCP 4.5 and RCP 8.5 climate change scenarios using a rice disease epidemiology model EPIRICE [J]. *Agric. Forest Meteorol.*, 2015, 203: 191-207.
- [54] 曹学仁, 陈林, 周益林, 等. 基于 MaxEnt 的麦瘟病在全球及中国的潜在分布区预测[J]. *植物保护*, 2011, 37(3): 80-83.
- Cao X R, Chen L, Zhou Y L, et al.. Potential distribution of *Magnaporthe grisea* in China and the world, predicted by MaxEnt [J]. *Plant Protection*, 2011, 37(3): 80-83.
- [55] Rongai D, Bellocchi G, Cerato C. Use of meteorological data to estimate aphid catches and the incidence of potato virus Y (PVY) [J]. *Inform. Fitopatol.*, 2000, 50(6): 34-38.
- [56] 王贺军, 张书敏, 张彦坤, 等. 小麦白粉病流行动态预测预报技术[J]. *中国植保导刊*, 1990(2): 6-9.
- [57] 曾士迈. 小麦条锈病远程传播的定量分析[J]. *植物病理学报*, 1988(4): 29-33.
- Zeng S M. Interregional spread of wheat yellow rust in China [J]. *Acta Phytopathol. Sin.*, 1988(4): 29-33.
- [58] Kolmer J A. Tracking wheat rust on a continental scale [J]. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2005, 8(4): 441-449.
- [59] Soubeyrand S, Enjalbert J, Sanchez A, et al.. Anisotropy, in density and in distance ρ of the dispersal of yellow rust of wheat: Experiments in large field plots and estimation [J]. *Phytopathology*, 2007, 97(10): 1315-24.
- [60] 孙淑清, 罗继生, 李庆君. 现代技术在我国森林病虫害监测管理中的应用[J]. *防护林科技*, 2004(2): 38-39.
- Sun S Q, Luo J S, Li Q J. Application of modern technology to pest monitoring [J]. *Protection Forest Sci. Technol.*, 2004(2): 38-39.
- [61] 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 J H, Huang W J, Wei C L, et al.. Establishment of prewarning system for crop diseases and insect pests [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Engin.*, 2008, 24(12): 127-131.
- [62] 王海光, 杨小冰, 马占鸿. 应用 HYSPLIT-4 模式分析小麦条锈病菌远程传播事例[J]. *植物病理学报*, 2009, 39(2): 183-193.
- Wang H G, Yang X B, Ma Z H. Case analysis of long-distance transports of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in China using HYSPLIT-4 model [J]. *Acta Phytopathol. Sin.*, 2009, 39(2): 183-193.
- [63] 杨龙, 徐磊, 刘冰, 等. 农田景观格局对华北地区麦田早期瓢虫种群发生的影响[J]. *应用昆虫学报*, 2016, 53(3): 612-620.
- Yang L, Xu L, Liu B, et al.. Effects of landscape pattern on the occurrence of ladybeetles in wheat fields in northern China [J]. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 2016, 53(3): 612-620.
- [64] 黄健熙, 卓文, 杨春喜, 等. 基于 Landsat8 卫星数据的蝗虫遥感监测方法研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 258-264.
- Huang J X, Zhuo W, Yang C X, et al.. Locust remote sensing monitoring methods based on Landsat8 satellite data [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.*, 2015, 46(5): 258-264.
- [65] 张云慧, 乔红波, 程登发, 等. 垂直监测昆虫雷达空中昆虫监测的初步应用[J]. *植物保护*, 2007, 33(3): 23-26.
- Zhang Y H, Qiao H B, Cheng D F, et al.. Primary application of vertical-looking radar to tracking high-flying insects in China [J]. *Plant Protection*, 2007, 33(3): 23-26.

(责任编辑: 温小杰 陈凌云)