



王海光. 我国植物病害流行病学21世纪以来的研究进展及其发展挑战与机遇[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(10): 135-160.

WANG Haiguang. Advances in plant disease epidemiology in China since the 21st century and its challenges and opportunities [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(10): 135-160.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.10.11

我国植物病害流行病学21世纪以来的研究进展及其 发展挑战与机遇

王海光

(中国农业大学 植物保护学院, 北京 100193)

摘 要 植物病害流行病学是研究植物群体发病的科学,是植物病理学的一个重要分支学科,是多学科的交叉学科。21世纪以来,生物学和信息科学等多学科迅速发展,促进了植物病害流行病学发展,为保障农业生产安全发挥了重要作用。本研究从理论、技术和实际应用3个层面综述我国植物病害流行病学21世纪以来的研究进展。理论上,植物病害流行病学不断向宏观方向发展,促进了宏观植物病理学理论体系形成;分子生物学技术和信息技术的广泛应用拓宽了植物病害流行病学研究范围,丰富了研究方法,促进了植物病害分子流行病学研究不断发展以及智慧植保的形成和发展;病害流行规律、病害流行的遗传学基础、病害预测预报和病害防治效益评估等研究取得较大进展;提出了多种病害防治理念,生态调控、绿色防控等防治理论逐步形成。分子生物学技术和信息技术成为植物病害流行病学研究的重要技术手段,人工智能技术应用更加深入,各种病害和有害生物的检测和鉴定、监测、预测预警、防治技术不断向更加准确和智能化方向发展。植物病害流行病学多个研究成果和技术在实际中得到应用,尤其是在病害监测预警和防治方面的应用为病害管理做出了重要贡献。在综述基础上,提出了我国植物病害流行病学发展面临的挑战和机遇。本研究旨在对21世纪以来我国植物病害流行病学的发展进行回顾、总结和分析,以促进该学科发展。

关键词 植物病害流行病学; 病害流行; 分子生物学技术; 信息技术

中图分类号 S431;S432.1

文章编号 1007-4333(2025)10-0135-26

文献标志码 A

Advances in plant disease epidemiology in China since the 21st century and its challenges and opportunities

WANG Haiguang

(College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract Plant disease epidemiology, an important branch of plant pathology and an interdisciplinary subject across multiple disciplines, is the science that studies the diseases in plant populations. After entering the 21st century, the rapid development of biology, information science, and other disciplines has greatly promoted the development of plant disease epidemiology, which has played crucial roles in ensuring the safety of agricultural production. In this comprehensive review, the advances in plant disease epidemiology in China since the 21st century were explored from three aspects including theory, technology, and practical application. In theory, plant disease epidemiology continued to develop in the macro direction, which has promoted the formation of the theoretical system of macro-phytopathology; widespread applications of various molecular biology technologies and information technologies in plant disease epidemiology have broadened its research scope and enriched its research methods, thus facilitating the development of the research direction of plant disease

收稿日期: 2025-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1401001, 2018YFD0200402); 国家自然科学基金项目(32072357, 31471726)

第一作者: 王海光(ORCID:0000-0003-0796-725X), 博士, 副教授, 主要从事植物病害流行病学和宏观植物病理学研究, E-mail: wanghaiguang@cau.edu.cn

molecular epidemiology and promoting the formation and development of smart phytoprotection; great progress has been made in the epidemic laws of diseases, genetic bases of disease epidemics, disease forecast and prediction, and evaluation of disease management; and a variety of concepts about disease prevention and control were put forward, and theories including ecological regulation and green prevention and control of plant diseases were gradually formed and developed. In the aspect of technology, molecular biology and information techniques have become important technical means to study plant disease epidemiology, the application of artificial intelligence technology is more in-depth, and the detection and identification, monitoring, prediction and early warning, prevention and control technologies of various plant diseases and pathogens have become more accurate and intelligent. Many research findings and technologies of plant disease epidemiology have been applied in practice, and in particular, the applications in disease monitoring and early warning and disease prevention and control have made important contributions to disease management. Furthermore, the challenges and opportunities for the development of plant disease epidemiology in China were put forward. The aim of this review is to summarize and analyze the advances in plant disease epidemiology in China since the 21st century and then to promote the further development of this discipline.

Keywords plant disease epidemiology; disease epidemic; molecular biology technology; information technology

植物病害可造成植物产品产量降低和品质下降、影响植物景观、破坏生态环境、造成严重的社会问题,并且用于防治病害的农药会产生毒害、残留和药害。历史上发生了多次植物病害大流行,例如,1845—1846年爱尔兰马铃薯晚疫病(由 *Phytophthora infestans* 引起)流行、1870—1880年斯里兰卡咖啡锈病(由 *Hemileia vastatrix* 引起)流行、1942—1943年孟加拉水稻胡麻斑病(由 *Bipolaris oryzae* 引起)流行、1970年美国玉米小斑病(由 *B. maydis* 引起)流行等^[1],均造成严重损失和巨大社会影响。我国是农业大国,植物病害种类多,多种病害的流行规律差异大,多次的病害流行造成了严重危害。小麦条锈病(由 *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* 引起)在我国于1950、1964、1983、1985、1990、2002、2017和2020年发生大流行,分别造成我国小麦减产60亿、32亿、10.74亿、8.50亿、12.37亿、8.51亿、4.28亿和2.49亿 kg^[2];小麦赤霉病(主要由 *Fusarium graminearum* 和 *F. asiaticum* 等引起)2000年以来在我国呈现重发频率升高、发病区域“北抬西扩”的特点^[3],2012年流行范围涉及12个省(直辖市),发病面积达到927万 hm²^[4]。

植物病害流行病学(Plant disease epidemiology)是研究植物群体发病规律、病害预测和防治理论的科学^[1,5],是植物病理学的一个重要分支学科,涉及生态学、数学、系统科学、生物学、大气科学、计算机科学与技术、经济学等多个学科,是多学科的交叉

学科。植物病害流行病学发展起步较晚,但是发展迅速,经过经验-定性描述阶段、定性-定量描述阶段、理论-综合阶段等^[1]。植物病害流行病学研究对于植物病害管理具有重要意义。植物病害和危险性病原生物的有效防控均离不开植物病害流行病学研究。

我国在20世纪60年代初已开展植物病害定量流行病学研究。1986年曾士迈和杨演^[5]编著出版了《植物病害流行病学》。1998年肖悦岩等^[1]编著出版了《植物病害流行与预测》,该书成为我国多所高等院校植物病害流行病学课程教材。进入21世纪以来,植物病害流行病学进一步与其他学科交叉和融合,吸收很多技术和方法,在病害时空动态、病害监测、病害预测预报、病害管理、病原物群体动态、病害流行的遗传学基础和病害防治理论等方面均取得很大进展,尤其是分子生物学技术和信息技术更深入、广泛、融合地应用于植物病害流行病学研究,病害监测预警能力明显提高,防治理念和理论得到突破性发展,病害生态防治和绿色防控受到重视并得到实际应用。

本研究将从理论、技术和实际应用3个层面,综述21世纪以来我国植物病害流行病学研究进展,并提出其发展面临的挑战和机遇,旨在加强对我国植物病害流行学的认识,促进其进一步发展,保障其国际影响力。由于植物病害流行病学涉及甚广,我国相关文献甚多,难以面面俱到,希望此文能起抛砖引玉之用。

1 植物病害流行病学主要进展

1.1 理论层面

1.1.1 宏观植物病理学理论的形成和发展

科学的发展、研究方法和技术的进步、研究数据的积累等为植物病理学宏观方面研究提供了支撑,植物病害流行病学不断向更长时间、更大空间和更高系统复杂度等多个方面深入扩展,在理论、研究方法和应用等方面逐渐成熟,形成了宏观植物病理学(Macro-phytopathology)这一植物病理学分支学科和方向。

曾士迈在其1996年发表论文“宏观植物病理学拟议”正式提出“宏观植物病理学”基础上,于2003年发表论文“关于宏观植物病理学”^[6],阐述了宏观植物病理学的概念、时空观和系统观、研究对象特点(空间广、时间长、系统层次结构复杂)、病害宏观问题、研究方法以及宏观植物病理学包括的理论和规律等,认为宏观植物病理学是植物病害宏观问题的研究,包括病害宏观规律和宏观治理策略的研究,针对的是植物或病原物群体以及群体以上的现象,研究对象是复杂的植物病害系统(Plant disease system),开展宏观植物病理学研究,即是“认识宏观现象,探索宏观规律,解决宏观问题”,微宏观方法皆可用,强调特别需要微宏结合。2005年3月曾士迈^[7]主编的《宏观植物病理学》出版,该书是在其提出宏观植物病理学之后对宏观植物病理学在理论和方法学上的系统阐述和发展,探讨了植物病理学中的宏观问题,诠释了宏观植物病理学的概念,讨论了宏观植物病理学的定位(定位于农业生态系统-农业经济系统-社会系统的复合系统之中)、核心问题(如何认识植物病害系统的大尺度时空动态)和植物病害系统的宏观治理问题(包括宏观治理的基本原则、宏观治理策略以及病害风险分析和病害系统超长期预测),并给出基因工程风险和利用生物多样性持久控制病害2个宏观治理具体实例,介绍了宏观植物病理学的研究方法(主要包括系统分析、信息技术、分子生物学技术等技术以及有害生物风险分析方法),展望了宏观植物病理学发展前景,指明了植物病害流行病学宏观发展方向。宏观植物病理学的提出和发展为解决植物病理学中的宏观问题提供了理论基础和方法指导。

1.1.2 植物病害分子流行病学研究方向的产生和发展

术语“分子流行病学”或“分子流行病学”(Molecular epidemiology)早已被使用。在Web of Science核心库中检索“molecular epidemiology”,发现其最早出现在Kilbourne^[8]1973年发表在期刊*The Journal of Infectious Diseases*的论文“The molecular epidemiology of influenza”中,文中注释说明该论文由Kilbourne在1972年9月26日美国传染病学会(The Infectious Diseases Society of America)第十届年会上进行了报告;其在植物病理学领域的最早应用出现在1987年发表于期刊*Phytopathology*的一篇会议论文摘要^[9]。为了探寻我国科研领域中的相关情况,在中国知网分别检索“分子流行”“分子流行病学”“分子流行病学”,发现我国医学领域在20世纪80年代已使用“分子流行病学”,并开展分子流行病学研究;植物病理学领域在20世纪90年代已使用“分子流行病学”,期刊《微生物学报》刊登论文“我国水稻条纹病毒一个强致病性分离物的RNA4序列测定与分析”^[10]的中英文摘要中最早出现了对应的“分子流行病学”和“molecular epidemiology”。

医学领域中的分子流行病学发展较快,20世纪90年代既已成为流行病学的的一个分支学科“分子流行病学”^[11-12],可作为基于分子生物学技术的植物病害流行病学研究或者植物病害流行病学中的“分子流行病学”研究的借鉴。随着分子生物学技术逐步被用于解决植物病害流行病学问题,植物病害流行病学研究延伸到分子水平。2006年7月10—14日“第一期全国植物病害分子流行病学讲习班”在北京举办。2007年9月英文著作*Introduction to Molecular Epidemiology of Plant Diseases*(《植物病害分子流行病学导论》)^[13]出版,该书介绍了植物病害分子流行病学的基本概念、所用分子技术、研究领域以及主要的数据分析方法,指出植物病害分子流行病学仍是植物病害流行病学的一部分,不是植物病害流行病的分支学科,该书为利用分子生物学技术解决植物病害流行病学问题提供了指导和参考。骆勇^[14]于2009年在期刊《植物病理学报》发表论文“植物病害分子流行病学概述”,介绍了植物病害分子流行病学的基本概念和分子生物学技术在解决植物病害流行病学问题方面的应用。

现在,分子生物学技术在植物病害流行病学研究

领域应用更加深入和广泛,被用于解决依靠传统植物病害流行学研究方法和信息技术等不能解决的植物病害流行学问题,为病害流行规律研究和病害管理提供了技术支撑,亦为宏观植物病理学研究提供了方法支持,推动了植物病害流行学和宏观植物病理学的发展。相应地,植物病害分子流行学作为植物病害流行学的一个研究方向亦得到很大发展。随着分子生物学和植物病害流行学等原理和方法的深入应用和交叉融合,植物病害分子流行学的理论框架和体系将趋于完善和成熟,希望其能像医学领域中的流行病学的分支学科“分子流行病学”一样,可以发展成为植物病害流行学的一个新的分支学科,成为运用分子生物学的理论和方法解决植物病害流行学问题的科学。

1.1.3 植物病害预测预报理论的发展

“预则立,不预则废”。开展植物病害预测预报对于病害防治至关重要。各种技术的发展和多学科交叉为植物病害预测预报发展提供了动力和支撑。21世纪以来,我国植物病害预测预报水平得到很大提升、技术有了很大进步、准确率有了很大提高、法制化建设取得了很大突破、理论有了很大发展。

随着技术进步和根据实际需要,植物病害预测内容不断增多。目前,根据预测内容和预测量,病害预测可分为病害发生程度预测、病害发生期预测(包括病害侵染预测)、病害损失预测(损失估计)、病原物侵染量预测、病原物群体组成预测、病原物传播路线预测、病害空间分布预测等。有害生物风险分析(Pest risk analysis)逐渐发展为病害风险评估(Disease risk assessment)^[7]或病害流行风险分析(Risk analysis of plant disease epidemic)^[15],不仅是针对外来有害生物和检疫性有害生物,而且扩展到可对生产造成危害的常发病害和偶发病害的病原物。病害预测依据的预测因子由单因子逐渐向更加多源、多模态的多因子变化。预测因子的确定由主观判断发展到利用数理统计方法等进行^[16-17]。

病害预测模型构建方法更加多元,人工神经网络(Artificial neural network)^[17-19]、判别分析^[20-21]、支持向量机(Support vector machine, SVM)^[22-23]、决策树(Decision tree)^[24]等多种机器学习(Machine learning)方法更多地被用于病害预测模型构建,深度学习(Deep learning)算法/模型被用于构建病害

预测模型^[25-26],同时,系统模拟模型(机理模型)亦被用于病害预测^[27-29],但是对于系统模拟模型的研究仍需加强。

我国制定了多种植物病害的调查和预测预报国家标准和农业行业标准^[30],为开展病害调查和预测预报提供了基础,使得病害调查和测报方法更加规范化、标准化,有利于促进病害数据获取更加自动化、数据处理更加智能化以及病害预测预报更加数字化和智能化。

根据中华人民共和国农业农村部令2021年第6号,《农作物病虫害监测与预报管理办法》^[31]已于2022年1月24日起施行,其规范了我国农作物病虫害监测与预报工作,植物检疫性有害生物信息的报告与发布依照《农业植物疫情报告与发布管理办法》^[32](中华人民共和国农业部令2010年第4号)进行。

2006年3月张孝羲和张跃进^[33]主编的《农作物有害生物预测学》出版,该书介绍了农作物有害生物预测预报的原理和方法、数理统计预测方法以及遥感(Remote sensing, RS)、地理信息系统(Geographic information system, GIS)、可视化预报等技术在预测预报中的应用。2022年10月胡小平^[34]主编的《植物病虫害测报学》出版,该书系统介绍了植物病虫害测报学的发展历史、基础理论和基础知识以及测报技术和方法,给出了多个测报实例,其中包括最新的理论、技术和方法,尤其是包含了利用信息技术开展测报工作的具体思路 and 方案,并提供了相应实例,该书可作为相关研究人员的重要参考书。

1.1.4 智慧植保的出现和发展

21世纪是信息时代,信息技术迅速发展,被广泛用于多个领域,对科技、经济和社会等的发展产生了深刻影响,尤其是人工智能(Artificial intelligence, AI)技术更是掀起了科技革命和产业变革的浪潮。植保信息化快速推进,成为建设现代植保的重要引擎,推动着植物保护向智慧植保(Smart phytoprotection)发展。相关技术亦促进植物病害流行学研究和应用向自动化、数字化、智能化、智慧化方向发展。

2022年王海光^[35]发表论文“智慧植保及其发展建议”,系统分析了智慧植保产生的必然性和必要性,阐述了智慧植保的概念、理论框架、应用场所和

关键技术等,提出了智慧植保的主要功能和发展建议。智慧植保是 AI 等现代信息技术在农业全产业链和农业科研的各个环节中植物保护方面的深入应用,可以简单地理解为是“物联网+AI+植保”,更广义的是“AI+植保”,用于智能监测、智能预测预警、智能决策、智能溯源、智能管理和智能服务等,具有智能化、高精确性、高效率、可持续性和高安全性的特点^[35]。智慧植保涉及多种先进技术,包括传感器技术、计算机视觉技术和图像处理技术、“3S”(GNSS(Global navigation satellite system,全球导航卫星系统)、RS、GIS)技术、物联网技术、网络通讯技术、大数据技术、云计算技术、AI 技术和生物技术等^[35],尤其是 AI 技术的发展及与其他技术的深入融合,将会极大地促进智慧植保发展。作为智慧农业的重要部分,智慧植保已在病害监测、预测预警和防治等方面有一些实际应用,但与真正的智慧化仍有很大距离。智慧植保的发展应该引起重视和得到大力支持,可将其作为植物病害流行病学等相关多学科交叉的一个新学科进行建设,促进其良性发展,使其在现代植保和现代农业的建设中发挥应有作用。

1.1.5 新的防治理念和理论不断形成和发展

植物病害研究的目的是进行病害防治,减少病害危害,以获得最佳的经济、生态和社会效益。我国在与病害的长期斗争和防治病害的长期实践中,积累了丰富的经验,形成了防治理念和防治理论,并且制定了多个病害管理相关的法律法规。

1975 年,我国确立了“预防为主,综合防治”的植保方针,一直沿用至今。随着科技发展以及对植物病害流行规律和可持续发展认识的深入,我国提出了“公共植保、绿色植保”“科学植保、公共植保、绿色植保”“绿色防控”等防治理念。在 2006 年 4 月 13—14 日于湖北召开的全国植保工作会议上,原农业部副部长范小建提出“公共植保、绿色植保”的理念,提出“要把植保工作作为农业和农村公共事业的重要组成部分,突出其社会管理和公共服务职能”“要把植保工作作为人与自然和谐系统的重要组成部分,突出其对高产、优质、高效、生态、安全农业的保障和支撑作用”。2011 年 5 月农业部办公厅发布《农业部办公厅关于推进农作物病虫害绿色防控的意见》^[36](农办农[2011]54 号),提出大力推进农作物病虫害绿色防控。在 2012 年 10 月 25 日于北

京召开的中国植物保护学会成立 50 周年庆祝大会暨全国农作物重大病虫科学防控高层论坛上,原农业部副部长余欣荣提出建设现代植保,并提出“科学植保、公共植保、绿色植保”的现代植保理念。

《农作物病虫害防治条例》^[37]已自 2020 年 5 月 1 日起施行,其对危害农作物及其产品的病、虫、草、鼠等有害生物的监测与预报、预防与控制、应急处置等防治活动及其监督管理进行了规范,规定坚持政府主导、属地负责、分类管理、科技支撑和绿色防控,国家通过政府购买服务等方式鼓励和扶持专业化病虫害防治服务组织,鼓励专业化病虫害防治服务组织使用绿色防控技术。为了加强农作物病虫害分类管理,农业农村部 2020 年 9 月 15 日公布《一类农作物病虫害名录》^[38](中华人民共和国农业农村部公告 第 333 号);农业农村部 2023 年 3 月 7 日公布修订的《一类农作物病虫害名录(2023 年)》^[39](中华人民共和国农业农村部公告 第 654 号)。为做好植物病害专业化统防统治和专业化防治服务,农业部制定了自 2011 年 8 月 1 日起施行的《农作物病虫害专业化统防统治管理办法》^[40](2021 年 5 月 1 日废止),农业农村部制定了自 2021 年 5 月 1 日起施行的《农作物病虫害专业化防治服务管理办法》^[41]。植物病害专业化统防统治和专业化防治服务在全国推行效果显著。例如,我国在小麦生产上推行的“一喷三防”(“一喷”是指一次喷施杀虫剂、杀菌剂、叶面肥、植物生长调节剂等,“三防”是指防病虫害、防早衰、防干热风)为保障我国小麦安全生产和丰产做出了重要贡献。

利用生物多样性防治植物病害的理论不断丰富,并在水稻、小麦和玉米等多个植物病害系统中得到应用,通过品种混种、间作、套作和品种合理布局等措施,取得了良好的病害防治效果^[42-48]。

病害生态防治可以理解为基于生态学的病害防治,通过调控能够影响病害发生和流行的生物或非生物生态因子而达到防治病害目的。生态防治是绿色防控体系的重要部分,可以通过改变耕作措施等多种途径实现。例如,通过在农作物病害菌源地开展农作物改种等措施,从源头治理上起到防病、控病的作用,我国小麦条锈病菌源地退麦改种防控小麦条锈病就是比较成功的实例^[49-50]。

“十三五”以来,我国设置了多个“国家重点研发计划”项目用于化肥农药减施增效和绿色防控研

究,研发了一系列的植物病害绿色防控技术,化学农药用量大幅度降低,为保障我国农业生产安全和农产品质量安全做出了贡献,促进了绿色防控理论发展和我国农业绿色发展。例如,提出开展农作物全生育期绿色防控^[51];针对小麦条锈病,制定了“以绿色防控为基础,以全周期管理为重点,以跨区域联防联控为保障”的防控策略,构建了跨区域全周期绿色防控技术体系^[52]。

1.1.6 病害流行规律和病害流行的遗传学基础研究取得较大进展

掌握植物病害流行规律是开展病害有效防治的基础。我国植物病害系统监测水平有了很大提高,利用传统人工现场调查方法进行植物病害系统监测的研究越来越少,病害流行时间动态和空间动态的研究报道持续减少,但是21世纪以来我国科研人员仍研究了多种植物病害的流行规律,而且研究在时间和空间尺度不断扩展,在流行规律研究基础上,形成了多种病害的绿色防控策略和方案。随着分子生物学技术的发展和广泛应用,我国科研人员对多种病原物的群体遗传学开展了研究,加强了对病害流行的遗传学基础的认识。

做好植物病害系统监测和病害预测预报非常重要,是做好病害防治的基础和前提。计算机视觉技术和图像处理技术、物联网技术、“3S”技术、无人机等可用于植物病害系统监测。利用温湿度传感器、小型气象站、孢子捕捉器、各种拍照和摄像设备等可对环境、病原物、寄主、病害进行监测。多种方法可用于病害初始菌量的检测,可以准确测定种子带菌量、传毒介体带毒情况、植物组织中的病原物量、捕捉的病原菌孢子数量等。我国病害监测和预测预报发展迅速,数字化、网络化、信息化、自动化和智能化不断提高,开展了多种病害的流行规律研究,包括病害循环、病害时间动态和空间动态、病害流行因素、病原物群体组成的时空动态等,并建立了多种病害的预测模型/系统,在我国病害防治和有害生物防控中发挥了重要作用。

对多种农业重要病害进行了更大空间尺度、更多点、更长时间的系统调查,获得了多年、多点的病害系统的大量数据,从更大的空间和时间尺度对病害发生规律进行了研究,尤其是研究了大气环流^[53-55]、气候变化^[56-59]、耕作制度^[4,60-61]等对病害发生流行的影响,对于了解相关病害的宏观流行规律

非常重要,为病害宏观管理提供了理论基础和依据。例如,研究了小麦赤霉病^[53]和小麦白粉病(由 *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* 引起)^[54-55]与大气环流因子之间的关系,基于筛选的大气环流因子建立了相应病害的预测模型。

我国针对多种重要植物病害的病原物群体组成、动态变化和遗传分化等做了不少工作,研究了多种病害的病原物数量和群体组成的多年动态变化,如病原物量的时空动态变化、病原菌生理小种组成的多年动态变化和消长规律、病原物毒性变化、病原物抗药性变化等。例如,我国连续多年开展了小麦条锈病菌生理小种监测工作,并且基于多年监测结果,构建了小麦条锈病菌生理小种动态预测模型^[62]。21世纪以来,分子生物学技术用于病原物群体遗传学的研究很多^[63-68],包括病原物群体动态、遗传关系、演化等,促进了病害流行机制研究,有利于探索植物病害流行的遗传学基础。

利用农药防治病害时,病原物受到胁迫可能会产生抗药性。我国对多种病原物的抗药性进行了监测,例如,小麦赤霉病菌对多菌灵的抗药性监测^[69]、油菜菌核病菌(*Sclerotinia sclerotiorum*)对多菌灵和菌核净的抗药性监测^[70]、小麦白粉病菌对三唑酮的抗药性监测^[71-72]等,为科学用药提供了依据。根据病原物对农药抗药性的变异位点,建立了一些病原物抗药性的分子检测方法。例如,油菜菌核病菌对多菌灵抗药性检测的PCR(Polymerase chain reaction,聚合酶链式反应)方法^[73-74]。

GIS和地统计学被用于进行多种病害或病原物(包括小麦条锈病、小麦白粉病等重要病害和多种危险性有害生物)的地理分布(空间分布)、地理分布动态变化(空间动态变化)、远程传播、发生预测、风险分析、病害管理等,促进了地理植物病理学(Geophytopathology)的发展,可以更好地利用日益丰富的空间数据开展研究,并使病害或病原物的空间分布和发生动态可视化。

1.1.7 植物病害防治效益评估研究取得较大突破

为防治植物病害而采取各种防治措施后,需要对防治效果进行评估,以便优化和选择最优的防治措施。因此,如何评价防治措施的贡献和效益非常重要,但是相关研究通常涉及多种因素,研究难度较大。我国在植物病害防治措施的贡献和效益评估方面的研究相对较少,但是所取得的进展具有较

大意义。“十三五”以来,我国在研发一系列的植物病害绿色防控技术的同时亦建立了相关技术的综合效益评估体系。聂晓等^[75]利用层次分析法建立了小麦化肥农药减施集成技术综合效益评价体系。刘万才^[76]给出了植物保护贡献率(Plant protection contribution rate)的定义,利用植物保护贡献率评价所采取植物保护措施的贡献,提出了植物保护贡献率的测算方法(包括县域、省域、全国范围等不同地域范围的植物保护贡献率以及单一作物上的植物保护贡献率等的测算方法)。随后,全国农业技术推广服务中心制定了《农作物病虫害防控植保贡献率评价办法》,用于指导我国农作物病虫害防控植物保护贡献率评价工作。2022年^[77]和2023年^[78]全国农业技术推广服务中心在我国多地开展了三大粮食作物(小麦、水稻、玉米)重大病虫害防控植物保护贡献率的评价工作。植物保护贡献率的提出是植物保护措施评价的一个重要进步。

除了以上所提教材和著作,肖悦岩等^[1]编著的《植物病害流行与预测》经修订后于2005年8月进行了第2次印刷;2008年12月科学出版社出版了王海光和马占鸿主译的《植物病害流行病学》(原书第二版);马占鸿^[15]主编的《植病流行病学》于2010年2月出版,其第二版于2019年11月出版。我国科研人员主编的相关教材和著作体现了我国植物病害流行病学理论研究方面的创新性。

1.2 技术层面

1.2.1 植物病害流行主导因素分析

植物病害流行与寄主、病原物、环境和人类干预等有关^[5]。开展病害流行因素分析,可以明确病害流行的主导因素,为病害预测和病害防治提供依据。病害流行主导因素的确定方法逐渐由定性分析方法为主发展到定量分析方法为主。系统分析、相关分析和逐步回归分析等多种方法被用于病害流行主导因素分析,获得的主导因素可作为病害预测因子。曾娟和姜玉英^[4]认为免耕或浅旋耕种植模式为小麦赤霉病菌提供了丰富的寄主和生存基质,从而为该病发生提供了大量初侵染源;于舒怡等^[79]通过相关分析获得了辽宁沈阳地区葡萄霜霉病流行主导因素;胡小平等^[16]和邢瑜琪等^[17]利用逐步回归分析方法分别获得了渭北旱塬苹果黑星病(由 *Venturia inaequalis* 引起)和稻麦轮作区小麦赤霉病流行的主导因素,并基于主导因素分别构建了相应

病害的预测模型;钱拴等^[54]利用相关分析方法筛选获得了影响我国小麦白粉病发生流行的关键环流因子,然后利用逐步回归分析方法建立了我国小麦白粉病长期预测模型;尚志云等^[55]基于1990—2010年河北省冬小麦白粉病发生数据和大气环流因子数据,利用相关分析方法和逐步回归分析方法筛选影响小麦白粉病发生流行的大气环流因子,然后利用贝叶斯分类规则构建了小麦白粉病预测模型。

1.2.2 空气动力学技术

空气动力学理论和技术的应用促进了病原物和病害远程传播的研究,使得相关研究可以在区域水平,甚至洲际水平进行。目前,主要利用HYSPLIT-4等气流传播轨迹模式进行研究,可以通过前向轨迹推断病原物的传播路线和通过后向轨迹推断病原物的菌源地。我国科研人员基于空气动力学技术在小麦条锈病远程传播方面开展了研究工作^[80-83],并且逐渐与群体遗传分析、基因组分析和病原菌孢子捕捉等结合^[67-68,84],可以提供病原物远程传播和不同地区间菌源关系更高可信度的结果。相关研究方法亦被用于小麦叶锈病(由 *Puccinia triticina* 引起)^[85]、玉米南方锈病(由 *P. polysora* 引起)^[86]等气传病害的远程传播研究。相关工作将会随着空气动力学、群体遗传学、基因组学、孢子捕捉、病原物分子检测、GIS等多种技术和多方面数据的综合、融合利用,在探讨气传病原物的传播路线、菌源地、地区间菌源关系以及开展病害远程传播预测等方面取得突破进展。

1.2.3 孢子捕捉技术

孢子捕捉已成为空气中病原菌监测的重要手段。利用孢子捕捉技术可以捕捉空气中病原菌孢子,实现对田间病原菌的定量捕捉和测定,用于了解病原菌种类和群体组成、评估病原菌量、了解病原菌动态变化,为开展病害预测预报和指导病害防治等提供基础数据。孢子捕捉器发展较快,类型多样。根据孢子捕捉原理,孢子捕捉器主要分为重力沉降式、主动吸气式、撞击式等^[87-88]。根据工作平台,孢子捕捉器可分为地面固定式、车载式和飞行器搭载式。孢子捕捉器不但被用于室外空气中病原菌孢子捕捉,亦被用于设施栽培场所中病原菌孢子捕捉^[89]。由主要利用进口的Burkard-7d定容式孢子捕捉器逐步过渡到主要利用我国自主研发的各种孢子捕捉器,并且逐渐应用病原菌孢子智能化

捕捉技术^[87]。对捕捉的病原菌孢子,常用计数方法为显微观察法,可以结合分子检测技术^[90-93]和图像处理技术^[94]等进行计数和定量。

1.2.4 分子生物学技术

分子生物学技术为植物病害流行学研究提供了重要手段。用于植物病害流行学研究的主要分子生物学技术有酶谱分析技术、PCR、实时定量PCR(Quantitative real-time PCR, qPCR; 又称 Real-time PCR)、环介导等温扩增(Loop-mediated isothermal amplification, LAMP)、重组酶聚合酶扩增(Recombinase polymerase amplification, RPA)和各种组学(包括基因组学、蛋白质组学、转录组学等)技术等。在植物病害流行学研究中,分子生物学技术已用于病原鉴定、病害诊断、病原物侵染检测(主要是未显症或处于潜育期)和病害早期检测(未显症或处于潜育期,或者症状不明显或发病很轻)、病原物定量检测(针对寄主组织中的病原物、传播介体中的病原物、孢子捕捉器捕捉的病原物、土壤中的病原物、雨水中的病原物等)、病原物群体组成检测、微生物区系测定、寄主植物抗病基因的检测、病原物群体动态监测以及病原物遗传分化分析和监测等。

基于 RAPD(Random amplified polymorphic DNA, 随机扩增片段长度多态性)、RFLP(Restriction fragment length polymorphism, 限制性片段长度多态性)、SCAR(Sequence characterized amplified regions, 序列特征扩增区域)、AFLP(Amplified fragment length polymorphism, 扩增片段长度多态性)、SSR(Simple sequence repeat, 简单重复序列, 又称微卫星 DNA)、ISSR(Inter-simple sequence repeat, 简单序列重复区间)、SNP(Single nucleotide polymorphism, 单核苷酸多态性)等 DNA 分子标记或病原物全基因组测序,利用群体遗传学研究方法,分析各地病原物的遗传结构、基因(型)多样性的变化、遗传基因交流关系、遗传分化,进而研究病原物的传播路线。我国科研人员已利用此方法进行小麦条锈病^[64,66-68]和玉米南方锈病^[63,65]等气传病害的远程传播规律研究和不同地区菌源关系分析。

利用特异性分子标记,建立了多种病原物的定性和定量分子检测方法,用于病原物鉴定以及病害潜育期植物组织和器官中的病原物、传播介体中的

病原物、孢子捕捉器捕捉的病原物、植物体外存活场所(空气、土壤、雨水等)中的病原物等的定性和定量检测。基于关键变异位点,通过设计特异性引物,进行病原物抗药性的分子检测和监测^[73-74]。利用抗病基因的分子标记或连锁的分子标记,检测植物抗病基因(型)^[95-97]。基于各种组学手段,分析病原物群体组成、变异、遗传分化,筛选病原物的致病性相关基因和植物的抗病基因,筛选农药作用靶标和进行农药分子设计等。基于病原物致病机制和寄主植物抗病机制,进行感病基因和抗病基因的分子设计,开展分子育种等。

1.2.5 信息技术

数据库技术、专家系统技术、传感器技术、网络通讯技术、“3S”技术、计算机视觉技术和图像处理技术、近红外光谱(Near infrared spectroscopy, NIRS)技术、热红外成像技术、物联网技术、云计算技术、大数据技术、AI技术等多种信息技术用于植物病害系统信息的采集、存储、传输以及处理和分析,用于病害识别、监测、预测、防控,促进植物病害流行学研究更加信息化、数字化、智能化、智慧化,促进相关研究微宏结合。信息技术用于监测病害、病原物、寄主和环境等,并用于监测系统、病害预测模型、病害模拟模型、病害决策支持系统(Decision support system, DSS)、病害管理系统等构建以及病害管理措施的实施(通过无人机等),促进了病害管理的自动化、智能化。图像处理技术、RS技术和GIS技术等应用较多,热红外成像技术和NIRS技术等在病害监测方面具有较大应用潜力,AI技术已渗透到植物病害流行学多个研究方面。

1) 图像处理技术

通过对图像中感兴趣目标特征的分析,可以获得感兴趣目标的信息。图像处理技术已用于植物病害系统的监测,可以实现植物的定性和定量分析以及生长发育阶段的判别,监测植物表型变化,为病害管理提供支撑。植物发病会引起图像特征发生变化,从而可以通过图像分析进行病害识别、病害目标检测和严重程度评估,并且可以利用图像处理技术对病原菌孢子等进行识别和定量测定^[98]。利用图像处理技术进行病害图像和病原显微图像分析,通常涉及图像获取、图像预处理、图像分割、特征提取、特征选择和识别模型构建等技术^[35,98]。深度学习已用于对获取的图像直接或经预处理后

进行病害目标判别和检测,在此过程中,深度学习模型的选择、超参数的设置、迁移学习、微调和模型改进等尤其重要^[98]。我国已将图像处理技术用于多种植物病害研究中,尤其是近几年深度学习的应用和发展,更是推动了基于图像处理技术的植物病害识别、病害严重程度评估、病原识别和定量评估等的快速发展。

2)RS 技术

植物发病时,会发生一系列病理变化,从而使植物的光谱特性和遥感影像产生特异性变化,因此,可以依据获取的光谱或影像数据进行病害遥感监测。遥感数据通常可分为通过非成像光谱仪获取的遥感光谱数据和通过成像光谱仪获取的遥感影像数据。对遥感数据进行处理和分析,提取病害相关特征,然后构建模式识别模型,可进行病害的早期检测、种类识别、严重程度评估和损失评估等。我国对多种病害进行了遥感监测研究,从叶片水平遥感^[99-102]、近地冠层遥感^[100,103-107]、航空遥感^[100,103,108-110]到航天遥感^[100,104,111-112],已有不少报道。目前,应用较多的为高光谱遥感(Hyperspectral remote sensing)和多光谱遥感(Multi-spectral remote sensing)。由于遥感影像含有更丰富的信息,近年来成像光谱仪应用越来越多。随着无人机技术的发展和卫星分辨率的提高,基于无人机和卫星平台的植物病害遥感研究日益增多。

3)GIS 技术

GIS 是一种强大的地理信息分析管理系统,可进行数据采集、存储、显示、管理和分析。基于网络的 GIS(Web GIS、WebGIS 或 Web-based GIS)发展迅速。GIS 可用于植物病害信息查询和数据管理、病害空间格局分析、病害发生时空动态分析、有害生物风险分析、病害风险评估、病害适宜生境分析、病害传播路线分析、病害发生趋势预测、病害管理和决策等。基于空间数据和属性数据,GIS 具有强大的空间分析功能,因此,其在病害空间动态和传播研究方面应用较多。我国基于 GIS 进行了小麦条锈病^[58-59,113]、小麦白粉病^[114-116]、小麦矮腥黑穗病(由 *Tilletia controversa* Kühn(TCK)引起)^[117]、梨火疫病(由 *Erwinia amylovora* 引起)^[118]等多种病害传播、病害空间动态、预测及其病原物适宜生境等多方面的研究,并且开发了一些基于 GIS 用于病害监测^[119-122]、预测^[119-120,123-124]、管理^[119-121]的系统,为病害

防治和有害生物防控提供了依据和支撑。“3S”技术的集成应用更是为植物病害流行病学研究提供了强大工具。我国北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system)为相关研究和应用提供了强大支持。

4)热红外成像技术

植物受到病原物侵染后产生的病理变化会影响受侵染部位温度的变化,从而会导致红外辐射的变化,可以利用热红外成像技术进行可视化、无损检测。热红外成像技术已用于病害潜育期病原物侵染的检测^[125]、症状较轻情况下的病害发生早期检测^[125-126]、病害检测^[126]和病害严重程度评估^[127]。热红外成像仪可以搭载在无人机、机器人等设备上^[128],以实现病害监测和精准防控。

5)NIRS 技术

NIRS 技术是一种基于样品近红外光谱信息的间接分析技术,一般是通过专用的近红外光谱仪获取近红外光谱信息,利用化学计量学方法进行信息处理,构建定性判别或定量分析模型,然后用于待测样品检测。发病植物和病原物在近红外光谱区会包含特定信息,主要是含氢基团振动的倍频和合频信息,基于这些信息,通过分析,可实现病害识别^[129]、病害早期检测(潜育期检测)^[129-130]、病害严重程度评估^[131]、病原物的定性识别和定量分析^[132]以及病原菌产生毒素的测定^[133]等。

1.3 应用层面

1.3.1 分子生物学技术在植物病害流行病学研究中的应用

1)分子生物学技术在植物病害早期检测和监测中的应用

植物受到病原物侵染后,在显症前会有一个潜育期,在此期间,通过肉眼看不到植物体内的病原物。对于很多病害来说,发病早期症状并不明显和典型,不易于调查和诊断。利用分子生物学技术进行病害潜育期检测和发病早期检测,可以在显症前或发病早期检测到病原物侵染和病原物量,可为病害预测和防控提供基础和依据,可以做到病害早检测、早发现、早预警和病害防治早决策。通过寻找病原物的特异性分子标记,设计特异性引物,利用普通 PCR、巢式 PCR(Nested PCR)、real-time PCR、LAMP、RPA 等技术进行病原物潜伏侵染的植物组织中的病原物的检测,可以检测到微量病原物,从

而实现病害早期检测和监测。例如,Huang等^[134]建立了一种小麦条锈病菌 LAMP 检测方法和 Zhao 等^[135]建立了一种基于 PCR 的小麦条锈病菌检测方法,均可在接种 1 d 后检测到小麦叶片中的条锈病菌的潜伏侵染;Wang 等^[136]建立了一种基于 PCR 可于显症前检测小麦叶片中小麦条锈病菌潜伏侵染的方法;潘娟娟等^[137]建立了一种小麦条锈病菌潜伏侵染的 real-time PCR 定量检测方法,在接种 12 h 后即可定量检测小麦叶片中的条锈病菌。Zeng 等^[138]建立了一种巢式 PCR 方法用于检测小麦白粉病菌对小麦叶片的潜伏侵染,能够比普通 PCR 提前 2 d 检测到白粉病菌的潜伏侵染;Zheng 等^[139]建立了一种用于定量检测小麦白粉病菌对小麦叶片潜伏侵染的 real-time PCR 方法。Du 等^[140]将 RPA 技术与侧流层析试纸条(Lateral flow dipstick, LFD)技术相结合,研发了一种检测稻瘟病菌(*Pyricularia oryzae*)的 RPA-LFD 方法,该方法可在显症前检测到人工接种的水稻幼苗中的稻瘟病菌的潜伏侵染。

2) 分子生物学技术在植物病原定量检测和监测中的应用

基于 real-time PCR,已经建立了多种植物的组织中病原物定量检测和监测方法^[137,139]。为了对田间病原菌孢子进行监测,可以使用孢子捕捉器捕捉病原菌孢子,然后利用分子生物学技术进行病原菌种类鉴定和定量测定。利用显微观察法进行捕捉孢子计数时,易受灰尘、其他病原菌孢子等影响,并且有些病原菌孢子形态上非常相似,难以通过显微观察进行形态学鉴定。利用分子生物学技术,借助于特异性分子标记可以解决这方面的问题,已经实现了小麦条锈病菌^[92]、小麦白粉病菌^[90-92]、小麦赤霉病菌^[92]以及苹果腐烂病菌(*Valsa mali*)、苹果轮纹病菌(*Botryosphaeria dothidea*)和苹果褐斑病菌(*Marssonina coronariae*)^[93]等多种病原菌田间捕捉孢子的定量测定。Cao 等^[90]和王奥霖等^[91]利用 Burkard-7d 定容式孢子捕捉器进行田间空气中小麦白粉病菌分生孢子捕捉,利用 real-time PCR 方法进行捕捉孢子的定量测定。Wang 等^[92]建立了一种基于 qPCR 可同时定量检测孢子捕捉器捕捉的小麦条锈病菌、小麦白粉病菌、小麦赤霉病菌的检测方法。魏佳美等^[93]利用孢子捕捉器在苹果园不同高度捕捉空气中的病原菌孢子,并利用实时荧光定量 PCR 技术对捕捉的苹果腐烂病菌、苹果轮纹病菌和苹果

褐斑病菌孢子进行定量测定。土壤中病原物的检测对于了解土壤中病原物种类和病原物量至关重要,根据获得的信息,可以了解土壤中病原物群体动态,以合理使用防控措施。分子生物学技术为土壤中病原物的定性和定量检测提供了便捷工具,我国已建立多个植物病害系统的土壤中病原物分子检测方法^[141]。葛波等^[142]利用实时荧光定量 PCR 实现了对采集自我国不同地区玉米根际土壤中的镰孢菌属(*Fusarium* spp.)、拟轮枝镰孢(*F. verticillioides*)和禾谷镰孢复合种(*F. graminearum* species complex)的定量测定。

3) 分子生物学技术在植物病原物群体动态监测中的应用

分子生物学技术被用于多种病原物群体动态监测,以研究病原物的群体组成、动态和遗传演化规律,为病害预测、病害防治和抗病育种等提供了支撑。Cao 等^[90]在 3 个生长季利用 Burkard-7d 定容式孢子捕捉器进行田间空气中小麦白粉病菌分生孢子捕捉,利用显微观察计数和 real-time PCR 这 2 种方法测定的孢子浓度呈线性相关,孢子浓度动态变化亦相似,表明孢子捕捉技术与 real-time PCR 定量技术相结合可以进行田间空气中小麦白粉病菌的监测。王奥霖等^[91]利用 Burkard-7d 定容式孢子捕捉器在小麦白粉病不同抗性品种的田间试验区内分别进行空气中小麦白粉病菌分生孢子捕捉,利用显微观察计数和 real-time PCR 这 2 种方法所测孢子浓度之间的关系和动态变化趋势的结果与 Cao 等^[90]得到的结果一致。魏佳美等^[93]基于实时荧光定量 PCR 技术对利用孢子捕捉器在苹果园内捕捉的苹果腐烂病菌、苹果轮纹病菌和苹果褐斑病菌孢子进行定量测定,研究了这 3 种病原菌孢子的周年时空动态变化规律。

4) 分子生物学技术在植物病原物群体遗传分析中的应用

基于分子生物学技术,通过群体遗传分析,研究了多种病原物的群体遗传组成以及各群体所占比例、种群有性/无性繁殖方式、群体间的遗传关系,分析病原物间的亲缘关系、菌源关系和传播路线等。郭云燕等^[63]利用 18 对 ISSR 引物对 2011 年和 2012 年采集自 12 个省(自治区、直辖市)的玉米南方锈病菌 72 个菌株进行群体遗传分析,结果表明,我国不同地区玉米南方锈病菌群体具有较高遗

传变异,各地玉米南方锈病的初侵染源来源不同,海南三亚冬季玉米南方锈病菌不是我国其他地区玉米南方锈病的初侵染源,广东和广西等华南地区的玉米南方锈病菌亦不是黄淮夏玉米区玉米南方锈病的初侵染源;我国大陆地区和海南岛的玉米南方锈病初侵染源可能来自我国大陆以外的地区。鄢洪海等^[65]利用11对ISSR引物对2014—2016年采集自山东、江苏、浙江、河南和海南的玉米南方锈病菌60个菌株进行群体遗传分析,结果表明,病原菌在地域间和年度间表现出遗传变异,认为山东玉米南方锈病的初侵染源不是海南,推测其菌源可能来自于菲律宾或我国台湾地区。马丽杰等^[64]利用SSR分子标记对2009—2010年春季从甘肃、四川、陕西和西藏采集的小麦条锈病标样中分离获得的961个菌株进行群体遗传分析,结果表明,西藏林芝条锈病菌的遗传多样性水平相对较低,陕西宝鸡与甘肃平凉间,陕西汉中、甘肃陇南、甘肃天水及四川广元间,存在着频繁的菌源交流关系,四川宜宾、凉山与四川阿坝、陕西汉中、甘肃陇南间存在着菌源交流关系,西藏与内地间几乎没有菌源交流,初步认为西藏林芝条锈病菌可能是一个相对独立的遗传群体。黄苗苗等^[66]在甘肃和青海设置6个由82份小麦品种组成的抗病性变异观察圃,从变异观察圃共采集获得551份条锈病标样,利用15对SSR分子标记引物进行群体遗传分析,结果表明,甘肃和青海群体总的基因型多样性较高,在条锈病春季流行期,以甘肃平凉和临夏条锈病菌到青海传播为主,甘肃文县条锈病菌到青海的传播为辅。

5)分子生物学技术在病原物抗药性检测和监测中的应用

长期和大面积施用农药会导致病原物产生抗药性。利用分子生物学技术,可以获得病原物产生抗药性的变异位点,通过设计特异性引物,可以建立病原物抗药性的分子检测方法。我国已经建立了一些病原物抗药性PCR检测方法^[73-74]和LAMP检测方法^[143],可用于病原物群体中抗药性菌株的检测和监测,为合理使用农药提供依据。

6)分子生物学技术在植物抗病性基因检测中的应用

依据“基因对基因学说”,通过接种病原物,利用病原物-寄主植物互作可以进行植物抗病性基因(型)的检测。分子生物学技术为植物抗病性基因

检测提供了准确、快捷手段,利用抗病性基因分子标记或其连锁的分子标记,可以进行抗病性基因(型)检测和分析,有助于病害流行的遗传学基础研究、寄主植物抗病性监测、抗病性基因筛选和抗病育种。孙振宇等^[97]评估了小麦抗条锈病基因Yr5、Yr9和Yr18分子标记的特异性,结果表明,所用分子标记均可对相应的目的抗病基因进行有效检测。段灿星等^[95]利用7个与玉米抗南方锈病的3个基因连锁的SSR标记和40个多态性SSR标记进行了玉米抗南方锈病种质标记基因型鉴定与遗传多样性分析。黄苗苗等^[96]利用抗病基因Yr5、Yr9、Yr10、Yr15、Yr18和Yr26的分子标记对甘肃省223份小麦农家品种进行抗条锈病性基因类型检测,结果表明,可能携带相应抗病基因的小麦农家品种分别有92、8、12、77、22和112份,41份品种中未检测到任何供测抗条锈病性基因。

通过分子生物学技术手段获得的病害和病原物信息以及寄主植物抗病基因信息,可为病害防治决策提供基础信息,有利于病害及早防控、定点防控、防控药剂的选择和施用、抗病育种和品种的合理布局。

1.3.2 信息技术在植物病害流行病学研究中的应用

1.3.2.1 信息技术在植物病害系统监测中的应用 信息技术在植物病害系统监测中发挥了重要作用。我国对植物病害系统(包括病害、病原物、寄主、环境等)的监测技术和能力有了明显提高。在植物病害系统监测中,物联网技术、计算机视觉技术和图像处理技术、网络通讯技术、传感器技术、“3S”技术、AI技术等信息技术得到广泛应用,热红外成像技术和NIRS技术逐渐受到重视,监测更加规范化、标准化、信息化、自动化和智能化。信息技术已用于病害识别和定量评估、病害发生和流行时间和空间动态分析、远程监测、病原物自动识别和定量计数、非生物环境因子监测、寄主种类/品种/分布/生长状况/生育时期监测等。通过监测,获得和积累了大量的病害发生和流行相关资料,并且相关资料基本从纸质材料形式实现电子化和数字化,更便于管理、传输和共享,为开展病害预测预报、制定防治策略、实施防治措施提供了依据和支撑。

1)图像处理技术的应用

图像处理技术逐步被用于植物病害识别^[35,98]、病害严重程度评估^[35,144-147]、病原识别^[148]、病原菌孢

子自动计数^[35,94,149]等。我国发表了大量相关研究论文,尤其是近年来深度学习得到广泛应用,更多研究人员投入到相关研究,同时,不少公司亦涉足这一方面。基于图像处理技术的病害严重程度评估^[35,144-147]、病原识别^[148]和病原菌孢子自动计数^[35,94,149]的研究相对较少,基于图像处理技术的病害识别的论文很多,涉及多种植物上的病害,其中绝大多数论文是基于深度学习的。

病害图像采集更加便捷,所采集图像分辨率更高,目前主要利用数码相机、智能手机、具备拍照或摄像功能的各种传感器等设备,通过现场人工拍照、无人机平台拍照和物联网自动拍照等方式进行病害图像采集。另外,可以从网络上的病害图像数据集/库中获取所需图像^[98]。已经开发了“植小保”、“随识”^[150]、“识农”等App(Application,应用程序),可对拍摄的病害图像实时识别。基于图像处理技术的植物病害严重度自动分级系统^[145-146]和病原菌孢子自动计数系统^[149]亦被开发出来。借助于图像处理技术,孢子捕捉器捕捉的病原菌孢子的远程自动计数已经实现。基于增强现实(Augmented reality)和AI技术的AR智能眼镜(Augmented reality goggles/glasses)已被研发成便于佩戴、可实现植物病害自动识别的工具,用于实际的病害监测。图像处理技术的应用提升了植物病害系统的监测水平和效率。此外,图像处理技术逐步被用于植物病理学多个研究方面,包括蛋白质印迹条带定量分析和荧光图像分析等,使之前仅能进行的定性研究转化为定量研究。

2) RS技术的应用

我国开展了多种植物病害的遥感监测研究,研究较多的是小麦、水稻、玉米和棉花等具有重要价值的植物上的重要病害的遥感监测,基于叶片水平遥感、近地冠层遥感、航空遥感和航天遥感等进行病害种类识别、病害严重程度评估和病害空间分布分析,特别地,利用叶片水平遥感和近地冠层遥感识别受到病原物侵染而处于潜育期的叶片和植株^[100],实现基于RS的病害早期检测。此外,RS还可用于病害损失估计和病害发生环境监测。

可以利用手持式或背负式光谱仪以及热气球、无人机、有人机、卫星等不同平台搭载的光谱仪进行病害监测。随着无人机性能的提高,无人机遥感监测病害研究日益增多。利用无人机搭载照相机

和光谱仪等传感器进行植物病害系统的监测(包括病害种类、发生位置、严重程度以及寄主生长情况等)^[103,109-110,151]。冷伟锋等^[109]利用无人机搭载的数码相机获取遥感图像,利用ISODATA(Iterative self-organizing data analysis technique algorithm,迭代自组织数据分析算法)对图像进行非监督分类获得小麦条锈病空间格局,并基于从图像中获得的小麦冠层反射率构建了条锈病病情指数反演模型。Liu等^[110]开展了不同飞行高度的小麦白粉病无人机遥感监测研究。Zhang等^[151]提出了一种基于深度学习的方法,用于从利用无人机搭载快照式高光谱成像仪获取的小麦条锈病高光谱图像中自动检测小麦条锈病。基于无人机平台,进行病害监测和精准变量施药防控病害具有很大发展前景。

随着卫星遥感分辨率的提高,植物病害航天遥感监测受到重视,可用于监测大范围的植物病害^[104,111-112]。张玉萍等^[104]对获得的小麦条锈病SPOT-2卫星遥感数据进行分析,认为利用SPOT-2卫星遥感数据进行条锈病监测是可行的。刘良云等^[111]分析了小麦条锈病和小麦白粉病不同时相的Landsat TM卫星图像光谱的多时相光谱特征变化。Sheng等^[112]基于Sentinel-2、Landsat-8、Gaofen-1卫星遥感图像和气象因子,利用主成分分析方法获取综合了遥感信息特征和气象特征的主成分,并基于获得的主成分构建小麦条锈病和小麦赤霉病的随机森林(Random forest)和BP神经网络(Backpropagation neural network)判别模型,结果表明,BP神经网络判别模型效果最优。

农作物估产是RS技术的一个重要应用。病害对农作物产量的影响可以通过RS技术进行评估^[105-106,110-111],特别地,RS技术在区域水平的病害损失估计中将发挥更大作用。王爽等^[105]基于高光谱遥感技术,测定不同生育时期的小麦条锈病冠层光谱,并调查条锈病发生情况和进行小麦产量测定,基于所获数据,利用植被指数构建了多时相产量模拟方程,利用单一生育时期的一阶微分参数构建了产量回归方程。刘良云等^[111]获取了不同时相的Landsat TM卫星影像,并获得小麦冠层光谱数据以及小麦条锈病和小麦白粉病病情、叶面积指数、产量等数据,构建了基于卫星遥感数据的小麦产量早期预测模型,并基于所建模型进行了条锈病和白粉病的产量损失评估。

病害遥感监测逐渐趋于网络化和与其他技术的集成应用。宫彦萍等^[123]采用 B/S (Browser/Server, 浏览器/服务器) 结构模式, 利用 SuperMap IS . NET 5 和 C#, 开发了集成 WebGIS、遥感、数据库、ASP . NET 等技术的全国县级尺度的主要作物病虫害预测预报系统, 可以实现数据的发布与共享、病虫害预报模型网络化运行、预测结果可视化等。李卫国等^[122]采用 C/S (Client/Server, 客户端/服务器) 结构模式, 利用 ArcObjects 9. 2 和 Delphi 7. 0, 开发了县域冬小麦病害遥感监测信息系统, 该系统集成了 GIS、RS、GPS、组件技术、数据库技术等, 可以实现遥感影像数据管理、空间地理信息分析、生长参数反演、病害估测、产量估算与统计、病害遥感信息图生成等。

3) 热红外成像技术的应用

利用热红外成像技术可以获得受到病原物感染的植物的温度数据, 并可以可视化温度状态和温度变化位置, 可对植物病害进行早期检测和表征植物病害的发生严重程度, 因此, 这一技术受到重视。目前, 这方面发展的方向是利用搭载在其他平台和设备上的热红外成像仪获取病害信息, 为病害管理提供依据。李小龙等^[125]利用热红外成像技术, 在小麦条锈病菌接种后第 3 天即可区分处于潜育期的小麦植株与健康植株, 处于潜育期的植株叶片平均温度和不同部位最大温差分别比健康植株叶片的低 0. 08 °C 和高 0. 04 °C ($P < 0. 05$), 接种后第 12 天小麦叶片出现小的夏孢子堆, 接种植株叶片平均温度和不同部位最大温差分别比健康植株叶片的低 1. 22 °C 和高 1. 58 °C, 表明利用热红外成像技术可进行小麦条锈病早期检测。Wang 等^[126]利用热红外成像技术检测了土传病原菌 *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum* 侵染的黄瓜地上植株叶片温度变化, 结果表明, 可利用该技术无损检测病原菌引起的黄瓜枯萎病和间接可视化黄瓜枯萎病的发展。朱文静等^[127]基于热红外成像技术获得小麦叶锈病发病面积比率, 进行小麦叶锈病单叶严重度评估和植株病情指数评估。冯子恒等^[128]利用无人机搭载 K6 多光谱传感器和 Thermal Capture 2. 0 热成像仪获取田间发生小麦白粉病的小麦冠层信息, 融合所获取的信息, 利用多元线性回归、BP 神经网络、随机森林、极限学习机等方法构建了白粉病病情指数监测模型, 结果表明, 利用随机森林构建的模型最优。

可以综合利用 RS 技术、NIRS 技术和热红外成像技术等实现病害早期检测和监测, 并充分利用网络通讯技术和物联网技术, 实现病害的远程检测和监测, 发挥 RS 技术的作用, 实现区域水平的病害监测, 并结合分子生物学技术, 综合利用其他各种技术, 构建“天空地”一体化病害监测体系, 实现自动化、智能化病害监测。

1. 3. 2. 2 信息技术在病害气候区划和病原物适生区预测中的应用 每种生物都有特定的生境, 气候条件通常是影响生物分布的关键因素。因此, 对于有些病原物, 可以根据其适宜生存的气候环境条件, 预测其潜在适生区, 以便为病害和病原物的管理提供依据。信息技术为研究适于病原物或病害发生的区域提供了强有力的工具。

病害气候区划通常是针对非限定有害生物, 根据气候环境条件和有害生物所引起病害对环境的要求, 主要借助 GIS 确定适于病害发生区域。由于小麦条锈病、小麦白粉病等病害的发生受环境影响大, 相关病原物通常存在越夏、越冬问题, 因此, 我国对于这些病害的气候区划研究较多, 为相应病害的防治提供了依据。李迅等^[114]基于全国农业技术推广服务中心提供的 1980—1998 年小麦白粉病病情数据, 使用 GIS 软件 Arcview 3. 0 和地统计学工具软件 GeoEAS, 利用普通克里格法和反距离加权平均法对我国小麦白粉病的大尺度地理空间分布特征进行了分析, 结果表明, 我国小麦白粉病的发生具有一定的空间相关性和空间分布的各向异性, 利用软件生成的插值图可以比较合理地展示小麦白粉病的地理空间分布格局。利用 ArcGIS 软件, Li 等^[115]基于我国 1951—2006 年 743 个气象站点的气象数据, 以 7、8 月份连续最热 10 d 平均温度低于 25. 5 °C 的年概率和连续 10 d 的累计终止小麦白粉病病程当量 < 1 的年概率为主要区划指标, 结合我国小麦种植区图和小麦生态区划图, 进行了我国小麦白粉病菌越夏区划研究; Zou 等^[116]以我国 752 个气象站点的 1951—2013 年最热 10 d 均温低于 26. 2 °C 的年概率为主要指标, 对小麦白粉病菌在我国越夏范围进行区划研究。利用 GIS 软件, 石守定等^[113]基于 1960—2001 年我国气象数据、小麦条锈病菌越冬需要的气象条件和冬小麦种植区图, 进行了我国小麦条锈病菌越冬区划研究; Wang 等^[58]基于 2001—2012 年气象数据和小麦条锈病菌越冬需

要的气象条件进行了我国小麦条锈病菌越冬区划研究;王晓晶等^[59]基于2002—2012年气象数据和小麦条锈病菌越冬需要的气象条件进行了我国小麦条锈病菌越冬区划研究。

适生区预测通常是针对检疫性有害生物、限定的非检疫性有害生物或新发病害的病原物进行的,依据有害生物和病害发生对环境的要求或有害生物和病害发生区的环境条件,基于气候相似性原理,利用GIS软件、MaxEnt(Maximum entropy)和CLIMEX等软件预测有害生物潜在适生区或病害潜在发生区。陈克等^[117]基于TCK萌发侵染条件和气象数据,利用GIS软件对TCK在我国冬麦区的定殖可能性进行了评估,根据18年内适于TCK发生的年数对我国冬麦区进行TCK定殖风险区划,划分为高、中、低风险区和基本不发生区,结果表明,高风险区和中风险区约占全国冬麦区总面积的19.3%,研究结果为我国制定相应的植物检疫措施和保障我国小麦安全生产提供了科学依据。陈晨等^[118]利用苹果开花期的温度和降水量作为关键气候因子,基于GIS对梨火疫病在我国渤海湾和黄土高原苹果优势栽培产区的潜在定殖区域进行了评估,结果表明,在这2个苹果产区中优先扶持的县大多数处于梨火疫病高风险区。曹学仁等^[152]基于环境相似性原理,利用软件MaxEn预测麦瘟病(由*Magnaporthe grisea*引起)在全球的潜在分布区,结果表明,南美中东部、非洲东南部和中西部、南亚东南部和东南亚以及澳大利亚东部沿海地区是该病在全球的主要适生区,在我国的适生区较小,仅包括云南、广东和海南等省的少数地区。吴卓瑾等^[153]基于梨火疫病菌全球分布数据和发生相关环境变量,利用软件MaxEnt对其在当前气候和未来气候条件下的潜在地理分布进行了评估,结果表明,梨火疫病菌对我国大部分地区具有潜在威胁。陈艺芳等^[154]利用CLIMEX预测了大豆南方茎溃疡病菌(*Diaporthe aspalathi*)和大豆北方茎溃疡病菌(*D. caulivora*)在我国当前和未来气候条件下的潜在适生区。

1.3.2.3 信息技术在病害预测预报中的应用 我国非常重视信息技术在植物病害测报领域中的应用,在病害数字化预测预报方面取得巨大进步,提高了我国病害预测预报水平和能力,对于保障我国粮食安全和生物安全做出重要贡献。

随着数据可获得性和丰富度的提高以及建模方法的进步,所建病害预测模型更加多样,从建立简单的回归方程预测式到构建人工神经网络模型^[17-19]、SVM^[22-23]、决策树^[24]等多种机器学习模型,再到开发系统模拟模型^[27-29]和构建基于深度学习的预测模型^[25-26],所建预测模型的预测准确率和鲁棒性均有大幅度提高。构建病害预测模型的依据有气象因子、初始菌源数量、田间病原菌孢子量(主要是孢子捕捉器捕捉的孢子量^[155-157])等。我国已构建大量植物病害预测模型,由于受到模型可应用性的影响,很多模型未被用于生产实际。应注重病害预测模型的实际应用。在构建病害预测模型时,应结合实际情况,选用适当的建模方法,不必追求模型的复杂度;预测因子应尽量少、易于获得,所建模型尽量简单化、可解释,便于理解和应用。为了方便,利用现代信息技术,尽量将所建预测模型开发成预测系统,通过输入所需预测因子数据或直接由传感器获得所需预测因子数据,然后由预测系统自动输出预测结果;有些预测模型可以结合到DSS等其他模型/系统中。

除了构建病害预测模型,根据病原物监测结果,构建了病原物动态预测模型。肖悦岩等^[62]构建了小麦条锈菌生理小种群动态简要模型,可以模拟预测条锈病菌生理小种动态变化,获得未来若干年生理小种的频率;刘伟等^[156]根据利用孢子捕捉器获得的田间空气中小麦白粉菌分生孢子的动态监测数据和利用自动气象站记录获得的气象数据,建立了基于温度的白粉菌分生孢子浓度预测模型。

我国已经研发不少预报器或病害监测预警系统,其中有些可以自动化根据获取的数据或自动化获取数据,进行病害预测预警。王杰等^[18]构建了水稻白叶枯病(由*Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*引起)神经网络中期预警系统。官彦萍等^[123]构建了一个基于WebGIS的作物病虫害监测预报系统。Kuang等^[124]构建了一个基于WebGIS的小麦条锈病预测系统。王光等^[158]利用单片机设计开发了一种梨黑星病菌(*Venturia nashicola*)侵染测报器,利用该测报器,可根据实测果园的温度和湿度,基于梨黑星病菌侵染测报模型预测梨黑星病菌能否侵染和侵染量。李娟等^[159]以梨黑星病菌侵染测报模型VenInf为基础设计了一种便携式梨黑星病侵染测报器,该测报器可实时采集温度和湿度,然后计

算梨黑星病菌的相对侵染量,实现梨黑星病菌侵染的实时预测和预警。全国农业技术推广服务中心建立了“农作物重大病虫害数字化监测预警系统”^[121],基于 WebGIS 实现了对我国水稻、小麦、玉米、马铃薯、棉花和油菜等作物重大病虫害的数字化监测预警。全国农业技术推广服务中心基于比利时埃诺省农业应用研究中心(Centre for Applied Research in Agriculture-Hainaut, CARAH)建立的马铃薯晚疫病监测预警模型——CARAH 模型,利用 WebGIS 技术,使用 B/S 架构开发了中国马铃薯晚疫病实时监测预警系统,该系统利用置于田间的小气候监测仪(自动气象站)自动采集气象数据并无线传输至数据库服务器,结合天气预报数据,分析当日或预测未来 3 d 马铃薯晚疫病病菌的侵染情况,在地图上将结果通过不同颜色显示或进行插值分析,并将包括马铃薯晚疫病侵染情况、预测意见、防治措施等的预警信息通过邮件和短信的形式传递给用户,实现了马铃薯晚疫病全国联网监测^[160]。河北农业大学研发了中国马铃薯晚疫病监测预警系统“China-blight”(http://www.china-blight.net)^[119-120],通过该系统可以查看我国马铃薯晚疫病的实时分布图,了解我国马铃薯晚疫病的发生情况,进行马铃薯晚疫病病菌的侵染预测,为防治决策提供建议,还可以了解马铃薯其他病虫害、马铃薯晚疫病防治方法、马铃薯晚疫病防治药剂和马铃薯品种抗病性等信息,2020 年该系统的微信小程序“守卫土豆”正式上线,更加方便在智能手机等移动端使用。西北农林科技大学、陕西省植物保护工作站、西安黄氏生物工程有限公司基于物联网技术研发了小麦赤霉病自动监测预警系统^[161],该系统由小麦赤霉病预报器和预警软件平台系统(https://www.cebaowang.com)组成,根据调查获得的初始菌源量数据和通过传感器获得的田间环境因子数据,可在小麦扬花期前 1 周自动预测小麦蜡熟期赤霉病的发生严重程度,并可自动发出警报,指导用户进行病害防治,该系统在陕西、江苏、河南、安徽和湖北等省的应用效果评价结果表明,利用该系统可获得较好的预测效果^[162-165]。目前,以西北农林科技大学为首的研究团队还研发了小麦条锈病、小麦白粉病、玉米大斑病(由 *Exserohilum turcicum* 引起)、稻瘟病和苹果褐斑病等多种病害的自动监测预警系统,提高了我国植物病害自动化监测水平和

病害预测预报水平。

病害预测信息的发布方式发生了巨大变化,更加数字化、网络化、智能化。病害预报由权威部门通过纸质材料形式、广播、电视、网络(网页、电子邮件、微博、QQ 群、微信公众号、微信群、视频号等)、手机(短信、手机报等)等多种形式和途径进行发布,更加注重新媒体^[166]和融媒体的应用。预报内容的形式呈现多态性,信息可视化程度越来越高。预报信息可以更加及时到达行政管理部门、生产管理部门、专业化防治组织和农民等,以便根据情况开展病害防控和应急防治行动,发挥病害预报作用。

1.3.2.4 计算机模拟在植物病害流行病学研究中的应用 计算机模拟是植物病害流行病学研究的重要手段。通过构建计算机模拟模型,可以开展植物病害流行病学相关研究(长期的病害动态和大范围的病害扩展、预测、宏观治理策略和措施的效果模拟等),可以解决不能开展试验或无法开展真实试验的研究。李保华和赵美琦^[27]开发了梨黑星病流行动态模拟模型,该模型由描述果园状态的 18 个子对象和描述梨黑星病发生流行过程的 10 个子模型构成,利用该模型,可以根据果园状态和环境条件,对梨园整个生长季节中梨黑星病逐日流行动态进行模拟。曾士迈^[167]利用基于小麦条锈病大区流行模型 PANCRIN 建成的小麦条锈病抗病性持久度模型 PANCVDE,对小麦条锈病抗病性持久度进行了模拟研究,并利用 PANCRIN 进行了小麦条锈病越冬过程模拟研究^[28]和品种布局防治小麦条锈病模拟研究^[168]。胡小平等^[29]开发了苹果黑星病春季流行模拟系统,其包括 12 个子模型,利用该系统可以模拟以子囊孢子为初侵染源的渭北旱塬苹果黑星病春季逐日流行过程。由于计算机模拟模型的开发需要对病害流行过程系统研究,难度较大,因此,近年来鲜见相关研究,需要加强这方面的研究。

1.3.2.5 信息技术在病害防控决策中的应用 利用信息技术,已经开发了植物病害 DSS 等系统,以用于智能化病害防控决策。刘书华等^[169]综合利用植保知识、AI 技术、GIS 技术、DSS 技术开发了基于 GIS 的农作物病虫害防治决策支持系统,该系统具有数据管理、病虫害预测、防治决策、病虫害诊断和咨询等功能,预测结果可以地图化分级显示,利用风险型决策法提供防治决策和行动方案。河北农业大学研发的中国马铃薯晚疫病监测预警系统

“China-blight”可以给出马铃薯晚疫病防治意见^[119-120]。目前,开发的很多系统和应用程序可以提供病害防治建议,但是所提供的防治建议大多是固化的、针对相应病害一致的建议,而不是根据病害发生情况智能化给出的防治决策和建议。应该综合AI技术等多种技术,加强用于病害管理的具身智能体(Embodied agent)的研发。

1.3.2.6 自主研发的植物病害流行病学软件和程序除了系统模拟模型、病害识别模型、病害严重程度评估模型和病害DSS等,我国自主研发了植物病害流行病学软件和程序,为开展相关研究和教学提供了工具。李保华和徐向明^[170]利用C++语言,开发了一个植物病害时空流行动态模拟模型PDEpic,该模型由寄主和病原2个组分以及多个代表病害流行生物学过程的子模型构成,利用该模型可在二维空间中对单一种植或混合种植的植物群体内病害时空流行动态进行模拟,该模型可在个人电脑上使用,用于病害流行模拟研究和作为植物病害流行病学教学工具。刘影等^[171]利用VBA(Visual Basic for Applications)语言,基于Excel软件,编写了一个植物病害流行病学常用程序软件包,包括Weibull模型拟合“S”型曲线程序等,可用于植物病害流行病学教学和在植物病害流行病学研究中进行数据分析。Tan等^[172]利用Visual Basic语言,开发了一个可用理查德模型(Richards model)、逻辑斯蒂模型(Logistic growth model)、冈珀茨模型(Gompertz model)、单分子模型(Monomolecular model)、指数模型(Exponential growth model)模拟植物病害流行进展时间动态的计算机软件Epitimulator[®],该软件可在个人电脑上安装使用,利用该软件拟合构建的病害流行进展时间动态模型可以进行病害预测。虽已报道不少植物病害流行病学软件和程序,但是这些软件和程序的可获得性非常重要,应在重视知识产权保护的同时,充分发挥这些软件和程序的作用。

1.3.3 空气动力学在植物病害流行病学研究中的应用

多种植物病害是通过气流传播的,通常涉及传播体的释放、扩散和着落等过程,可以借助空气动力学技术研究传播过程。研究较多的是气传病害借助高空气流进行的远程传播,主要利用空气动力学模型开展气传病害病原物的远程传播轨迹分析和传播动态研究。我国开展了小麦条锈病菌的远

程传播轨迹分析,对不同发病地区间的菌源关系进行了研究,有助于掌握我国小麦条锈病的宏观流行规律和开展病害监测与宏观治理。王海光等^[80]利用HYSPLIT-4前向轨迹模式对我国小麦条锈病远程传播的经典事例进行了分析,结果表明,可利用该模式进行我国小麦条锈病区域间菌源传播关系分析,根据孢子远程传播模拟结果进行病害预测。Wang等^[81]和王海光等^[82]基于1997—2006年的气象场数据,利用HYSPLIT-4前向轨迹模式模拟了我国小麦条锈病菌越夏和越冬后的远程传播,研究了我国小麦条锈病菌的远程传播规律,探讨了不同地区间的菌源关系。Wang等^[83]利用后向轨迹方法分析了2011—2022年河南南部小麦条锈病初侵染来源,结果表明,引起河南南部小麦条锈病初侵染的病原菌来源于条锈病菌甘肃越夏区,若河南南部早春小麦条锈病显症,则来源于距离较近的陕西南部 and 湖北西北部的条锈病菌冬繁区;另一个可能来源是湖北南部条锈病菌冬繁区。将空气动力学技术与群体遗传分析、地形分析等方法结合,不仅开展了我国小麦条锈病菌的远程传播研究^[67-68,84],亦开展了小麦叶锈病^[85]、玉米南方锈病^[86]等重要病害的病原物远程传播研究。将空气动力学轨迹模式结果与传入地的气象因素、寄主、孢子捕捉情况等结合,可从宏观尺度上进行病害预测。

1.3.4 微宏结合研究方法在植物病害流行病学研究中的应用

在植物病害流行病学研究中,微观和宏观方面的研究方法都得到了较多应用,两方面的研究方法亦越来越多地结合在一起,用于开展依靠单一方法不能解决或不能很好解决的病害流行病学问题。

空气动力学技术(主要是气流传播轨迹模式)、GIS技术和基于分子生物学技术的群体遗传分析相结合,可以更好地开展气传病害及其病原物的远程传播,再进一步与孢子捕捉和田间病害调查等相结合,可以获得更准确的研究结果。王晓鸣等^[86]利用18对ISSR引物对我国11个省份玉米南方锈病菌进行群体遗传分析,并结合病害突发性和热带气旋活动的相关分析结果,发现我国不同地区的玉米南方锈病初侵染源具有多源性,来自我国台湾的病原菌引起黄淮海夏玉米种植区、辽宁、福建、浙江的南方锈病发生和广东春季南方锈病发生;菲律宾是广东、广西、海南的南方锈病的菌源地;来自泰国等东

南亚国家的病原菌是引起云南、贵州的南方锈病的菌源。Li 等^[67]基于基因组分析、HYSPLIT-4 模式轨迹分析和田间调查等对我国小麦条锈病菌源和远程传播路线进行了分析。Li 等^[85]对 2020 年冬季采集自甘肃和陕西的小麦叶锈病菌样品以及 2021 年春季和夏季采集自山东、河南、甘肃、陕西、湖北、云南、贵州和新疆的小麦叶锈病菌,利用 12 对 SSR 引物进行群体遗传分析,结合风场分析、气流轨迹分析、地形分析、采样时间线,分析了小麦叶锈病菌的传播路线,提出 2021 年叶锈病流行季节有 2 条传播路线,一条是从关中盆地向河南传播,另一条是从汉水河谷向湖北传播。

将基于分子生物学技术的病原物定量测定和预测模型构建相结合,可利用分子生物学技术对病原物定量测定,然后将病原物量作为预测因子,构建病原物动态预测模型和病害预测模型。王奥霖等^[91]利用 Burkard-7d 定容式孢子捕捉器并结合 real-time PCR 测定田间空气中小麦白粉病菌分生孢子浓度,通过田间病害调查获得病情数据,建立了基于累积孢子浓度的小麦白粉病田间病情估计模型。

2 我国植物病害流行学发展的挑战和机遇

进入 21 世纪以来,我国植物病害流行学在理论、技术和实际应用方面均取得很大进步,但是,其发展面临着严峻挑战。我国农业在新形势下面临的诸多问题的解决需要植物病害流行学发挥作用。同时,我国正在发展智慧农业、建设农业强国,不少政策非常有利于植物病害流行学发展;分子生物学技术和信息技术等技术和相关学科迅速发展,尤其是 AI 技术飞速发展,为植物病害流行学带来了发展机遇。

2.1 亟需重视和加强支持植物病害流行学研究

科研经费存在难以获得、支持不能连续和支持力度不够等问题,严重阻碍了植物病害流行学研究的系统深入开展。同时,植物病害流行学研究对科研人员要求较高,需要科研人员具备多学科的专业知识和背景,特别是在数学和信息技术方面有一定要求,研究所需开展的田间试验易受多种外界因素影响,研究周期长,研究内容难以发表高影响因子的学术论文,不少原来从事植物病害流行学研究的人员和团队只好将研究重心转向分子植物病理

学相关研究,导致国内真正集中力量进行植物病害流行学研究的人员和团队愈来愈少。在此情况下,系统学习过植物病害流行学的教师亦越来越少,植物病害流行学教学受到严重影响。目前,不少农林院校未开设植物病害流行学课程,有些学校由对植物病害流行学不甚了解、不从事相关研究的教师承担教学任务,只有少数学校由系统学习过这一课程、从事这方面研究的教师承担教学任务。因此,造成具有植物病害流行学系统学习背景的科研人员所占比例越来越小,这严重影响我国病虫害测报人员的培养,严重影响植物病理学科和植物保护学科的发展。应重视和加强支持植物病害流行学研究,加强植物病害流行学人才培养和技术培训。

2.2 植物病害流行学面临很好的发展机会

2024 年 10 月 25 日,农业农村部发布《农业农村部关于大力发展智慧农业的指导意见》^[173](农市发[2024]3 号),对我国智慧农业发展进行了总体部署,同日印发《全国智慧农业行动计划(2024—2028 年)》^[174],对加快推动智慧农业全面发展进行布局,涉及病虫害监测预警、水肥药精准管理、变量施药和智慧植保等方面。中共中央、国务院印发了《加快建设农业强国规划(2024—2035 年)》^[175],要求建立健全“天空地”一体化农业观测网络,这离不开病虫害“天空地”一体化监测网络的建设。我国对智慧农业发展的重视和采取的推动政策与措施,必然会促进智慧植保和植保信息化的发展。越来越多农业工程、信息技术和计算机等学科的研究人员加入到植物病害智慧化监测、预测和管理研究中,植物病理学专业学者亦有部分开始相关研究工作,这为植物病害流行学发展提供了支持。我国正在加快新农科建设和推进高等农林教育创新发展,这为植物病害流行学发展和人才培养提供了机遇。可以通过国家政策和行政管理,集中力量解决生产中植物病害流行学相关的“卡脖子”问题,尤其是共性技术和通用技术(如建立统一的病害图像识别系统和智慧化管理系统、研发病害监测和防治工具和设备等),避免力量分散而不能形成解决问题的合力。应加强多种技术、多源信息和多模态信息等的融合利用,进一步吸收其他学科的技术和方法,促进植物病害流行学发展。加强病害调查和测报标准的制定,制定科学、合理、适应时代发展的病害调查和测报标准,尤其是针对主要农作物病害和危害性增

长很快或新发生、危害性增长很快的农作物病害。对于大尺度空间上的病害预测,应基于多种数据,探索不同地区病原物的关系以及病害发生流行的影响因素,建立宏观水平上的病害预测模型。应通过多种途径促进植物病害流行病学研究成果的推广应用,特别是发挥已有多种病害预测模型和DSS等的作用,使相关研究成果真正地应用于科研和生产实际中,以充分体现植物病害流行学的实际价值。

2.3 亟需加强植物病害宏观规律和宏观管理研究

我国气候、耕作制度、经济等方面的变化不断引致新的植物病害流行病学问题。应重视植物病理学宏观研究,尤其是病害流行宏观规律和宏观治理策略的研究。应加强病害长期动态变化规律和机制,病原物长期演化规律和机制,以及气候变化背景下病害演替规律和对病害发生流行、病原物遗传演化等方面影响的研究。我国耕作制度的变化(包括保护性耕作实施、设施栽培、土地流转后大面积连片种植单一作物等),生物多样性防治植物病害,减肥减药措施的实施,以及生态调控防治植物病害等,会导致农业生态系统和植物病害系统改变,从而影响病害流行,应加强相关研究。病害管理措施对病害流行的影响不容忽视^[176]。应重视我国病害防治政策对病害流行的影响。应重视我国病虫害分类管理、农机大范围作业、农作物品种大范围更替和病害防治策略改变等对农业生态系统和病害流行的影响。例如,病虫害防治统治、专业化防治队伍的建立等对我国植物病害流行的影响,更具体地,如“一喷三防”对整个小麦病害系统的影响。经济快速发展,贸易往来日益频繁,网购经济的兴起和繁荣,促进了货物快速运输和快递业的迅速发展,在此过程中,应注意有害生物的传播和扩散以及危险性有害生物潜在风险。旅游业的繁荣发展,促进了人员大量、频繁、大范围流动,应重视携带有害生物传播的风险。应该研究经济贸易、快递业和旅游业的发展对植物病害系统演化的影响。

2.4 分子生物学技术和信息技术双引擎助力植物病害流行病学发展

分子生物学技术和信息技术应该会在植物病害流行病学中得到更深入应用。分子遗传学、分子生态学和各种信息技术促进病害流行的遗传学基础研究,应深入研究病原物群体组成以及病原物与其

生境内微生物、植物、非生物因子的关系等,加强监测手段,促进病害流行病学规律研究,实现对植物病害系统更有效、可持续管理。AI技术将在植物病害流行病学研究中发挥更大作用,加速植物病害流行病学一些疑难问题的解决,可将相关的信息技术和硬件结合,促进病害和病原的识别和定量评估、早期检测和监测、病害预测预报、病害防治等的智能化,实现无人化作业,实现植物病害系统的自动、远程、智能监测,病害精准预测和预警,病害早发现、即时有效精准防控。利用AI技术,构建植物病害系统智慧化管理平台,集病害监测、病害预警、病害管理于一体,并可进一步融合到生产、储存、流通/运输和销售等农业全产业链智慧化管理系统/平台。AI技术的深入应用将开启植物病害流行病学研究新的阶段。应深入融合分子生物学技术和信息技术以及多方面的信息,微宏结合,促进植物病害流行病学更好地发展。

参考文献 References

- [1] 肖悦岩,季伯衡,杨之为,姜瑞中. 植物病害流行与预测[M]. 北京:中国农业大学出版社,1998
Xiao Y Y, Ji B H, Yang Z W, Jiang R Z. *Epidemic and Forecast of Plant Disease*[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 1998 (in Chinese)
- [2] 刘万才,王保通,赵中华,李跃,康振生. 我国小麦条锈病历史大流行的历史回顾与对策建议[J]. 中国植保导刊, 2022, 42(6): 21-27, 41
Liu W C, Wang B T, Zhao Z H, Li Y, Kang Z S. Historical review and countermeasures of wheat stripe rust epidemics in China[J]. *China Plant Protection*, 2022, 42(6): 21-27, 41 (in Chinese)
- [3] 黄冲,姜玉英,李春广. 1987年—2018年我国小麦主要病虫害发生危害及演变分析[J]. 植物保护, 2020, 46(6): 186-193
Huang C, Jiang Y Y, Li C G. Occurrence, yield loss and dynamics of wheat diseases and insect pests in China from 1987 to 2018[J]. *Plant Protection*, 2020, 46(6): 186-193 (in Chinese)
- [4] 曾娟,姜玉英. 2012年我国小麦赤霉病暴发原因分析及持续监控与治理对策[J]. 中国植保导刊, 2013, 33(4): 38-41
Zeng J, Jiang Y Y. Outbreak causes of wheat scab and its sustainable and monitoring and controlling strategy in China in 2012[J]. *China Plant Protection*, 2013, 33(4): 38-41 (in Chinese)
- [5] 曾士迈,杨演. 植物病害流行病学[M]. 北京:农业出版社,1986
Zeng S M, Yang Y. *Plant Disease Epidemiology*[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
- [6] 曾士迈. 关于宏观植物病理学[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(3): 3-7
Zeng S M. Discussion on the macro-phytopathology[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2003, 5(3): 3-7 (in Chinese)
- [7] 曾士迈. 宏观植物病理学[M]. 北京:中国农业出版社, 2005
Zeng S M. *Macro-phytopathology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese)
- [8] Kilbourne E D. The molecular epidemiology of influenza[J]. *The Journal of Infectious Diseases*, 1973, 127(4): 478-487
- [9] Gilbertson R L, Leong S A, Hagedorn D J, Maxwell D P. Molecular

- epidemiology of *Xanthomonas campestris* pv *phaseoli* and *X. c. phaseoli* var *fuscans*[J]. *Phytopathology*, 1987, 77(12): 1718
- [10] 林含新, 魏太云, 吴祖建, 林奇英, 谢联辉. 我国水稻条纹病毒一个强致病性分离物的 RNA4 序列测定与分析[J]. 微生物学报, 2001, 41(1): 25-30
Lin H X, Wei T Y, Wu Z J, Lin Q Y, Xie L H. Sequence and analysis of RNA4 of a severe isolate of rice stripe virus in China[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2001, 41(1): 25-30 (in Chinese)
- [11] Foxman B, Riley L. Molecular epidemiology: Focus on infection [J]. *American Journal of Epidemiology*, 2001, 153(12): 1135-1141
- [12] 段广才, 陈帅印. 分子流行病学进展: 机遇和挑战[J]. 中华流行病学杂志, 2016, 37(8): 1059-1062
Duan G C, Chen S Y. Opportunity and challenge on molecular epidemiology [J]. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2016, 37(8): 1059-1062 (in Chinese)
- [13] Luo Y, Ma Z H, Ma Z H. *Introduction to Molecular Epidemiology of Plant Diseases*[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007
- [14] 骆勇. 植物病害分子流行病学概述[J]. 植物病理学报, 2009, 39(1): 1-10
Luo Y. Brief introduction to molecular epidemiology of plant diseases[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2009, 39(1): 1-10 (in Chinese)
- [15] 马占鸿. 植物流行病学[M]. 北京: 科学出版社, 2010
Ma Z H. *Plant Disease Epidemiology*[M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)
- [16] 胡小平, 杨家荣, 田雪亮, 李随院, 高立强, 苟建军. 渭北旱塬苹果黑星病流行因子分析[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 118-121
Hu X P, Yang J R, Tian X L, Li S Y, Gao L Q, Gou J J. Analysis on factors affecting apple scab prevalence in Weibei semi-arid plateau of Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2): 118-121 (in Chinese)
- [17] 邢瑜琪, 周佳, 黄卫利, 王军娟, 刘美艳, 胡小平. 基于 BP 神经网络的稻麦轮作区小麦赤霉病预测模型[J]. 西北农业学报, 2023, 32(11): 1842-1848
Xing Y Q, Zhou J, Huang W L, Wang J J, Liu M Y, Hu X P. Prediction model of Fusarium head blight in rice-wheat rotation area based on BP neural network[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2023, 32(11): 1842-1848 (in Chinese)
- [18] 王杰, 檀根甲, 胡易冰, 刘明芳. 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 J, Tan G J, Hu Y B, Liu M F. 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)
- [19] Wang H G, Ma Z H. Prediction of wheat stripe rust based on neural networks [C]. In: *Computer and Computing Technologies in Agriculture V. CCTA 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2012, 369(PART 2): 504-515
- [20] 陈观浩, 李前飞. 用判别分析法预测早稻穗瘟流行程度的研究[J]. 江西农业学报, 2002, 14(1): 37-40
Chen G H, Li Q F. Prediction of epidemic degree of neck blast on early rice by discriminatory analysis method[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2002, 14(1): 37-40 (in Chinese)
- [21] 陈刚, 王海光, 马占鸿. 利用判别分析方法预测小麦条锈病[J]. 植物保护, 2006, 32(4): 24-27
Chen G, Wang H G, Ma Z H. Forecasting wheat stripe rust by discrimination analysis[J]. *Plant Protection*, 2006, 32(4): 24-27 (in Chinese)
- [22] 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 Z M, Liang J, Liu G L. 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)
- [23] Wang H G, Ma Z H. Prediction of wheat stripe rust based on support vector machine [C]. In: *Proceedings of 2011 7th International Conference on Natural Computation*. New York: IEEE Computer Society, 2011: 378-382
- [24] 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]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2017, 24(2): 77-80 (in Chinese)
- [25] 张善文, 张传雷, 丁军. 基于改进深度置信网络的大棚冬枣病虫害预测模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 202-208
Zhang S W, Zhang C L, Ding J. Disease and insect pest forecasting model of greenhouse winter jujube based on modified deep belief network [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19): 202-208 (in Chinese)
- [26] 王献锋, 张传雷, 张善文, 朱义海. 基于自适应判别深度置信网络的棉花病虫害预测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 157-164
Wang X F, Zhang C L, Zhang S W, Zhu Y H. Forecasting of cotton diseases and pests based on adaptive discriminant deep belief network [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(14): 157-164 (in Chinese)
- [27] 李保华, 赵美琦. 梨黑星病流行动态模拟模型程序设计[J]. 植物保护学报, 2002, 29(2): 124-128
Li B H, Zhao M Q. Development of a computer program for pear scab epidemic simulation model[J]. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2002, 29(2): 124-128 (in Chinese)
- [28] 曾士迈. 小麦条锈病越冬过程的模拟研究[J]. 植物病理学报, 2003, 33(3): 267-278
Zeng S M. Simulation study on overwintering process of wheat stripe rust caused by *Puccinia striiformis* West in China[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2003, 33(3): 267-278 (in Chinese)
- [29] 胡小平, 陈婧, 周书涛, 冯小军, 田雪亮, 杨家荣, 杨之为. 渭北旱塬苹果黑星病春季流行模拟系统[J]. 西北农业学报, 2009, 18(5): 127-132
Hu X P, Chen J, Zhou S T, Feng X J, Tian X L, Yang J R, Yang Z W. Simulation system for apple scab epidemic in spring on arid plateau of Weibei [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(5): 127-132 (in Chinese)
- [30] 王海光. 普通植物病理学实验(农学专业用书)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2024
Wang H G. *General Plant Pathology Experiment*[M]. Beijing: China Agricultural University Press. 2024 (in Chinese)
- [31] 中华人民共和国农业农村部. 农作物病虫害监测与预报管理办法: 中华人民共和国农业农村部令 2021 年第 6 号[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202112/t20211224_6385489.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Administrative measures on crop diseases and pests monitoring and forecasting: Decree No. 6/2021 of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202112/t20211224_6385489.htm (in Chinese)
- [32] 中华人民共和国农业部. 农业植物疫情报告与发布管理办法: 中华人民共和国农业部令 2010 年第 4 号[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201006/t20100606_1534627.htm
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Measures for management of report on and release of agricultural plant diseases: Decree No. 4/2010 of the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China [EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201006/t20100606_1534627.htm (in Chinese)
- [33] 张孝義, 张跃进. 农作物有害生物预测学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
Zhang X X, Zhang Y J. *Forecast of Crop Pests* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese)

- [34] 胡小平. 植物病虫害测报学[M]. 北京: 科学出版社, 2022
- Hu X P. *Monitoring and Prediction of Plant Diseases and Pests*[M]. Beijing: Science Press, 2022 (in Chinese)
- [35] 王海光. 智慧植保及其发展建议[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(10): 1-21
- Wang H G. Smart phytoprotection and suggestions for its development[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(10): 1-21 (in Chinese)
- [36] 中华人民共和国农业部办公厅. 农业部办公厅关于推进农作物病虫害绿色防控的意见[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tz/201105/t20110523_1996135.htm
- General Office of the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Opinions of the General Office of the Ministry of Agriculture on promoting green prevention and control of farm crops' pests and diseases[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tz/201105/t20110523_1996135.htm (in Chinese)
- [37] 中华人民共和国国务院. 农作物病虫害防治条例: 中华人民共和国国务院令 第 725 号 [EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-04/02/content_5498241.htm
- The State Council of the People's Republic of China. Regulations on the prevention and control of crop diseases and insect pests: Decree No. 725 of the State Council of the People's Republic of China[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-04/02/content_5498241.htm (in Chinese)
- [38] 中华人民共和国农业农村部. 一类农作物病虫害名录: 中华人民共和国农业农村部公告 第 333 号 [EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202009/t20200917_6352227.htm
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. List of Class-I crop diseases and insect pests: Announcement No. 333 of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China [EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202009/t20200917_6352227.htm (in Chinese)
- [39] 中华人民共和国农业农村部. 一类农作物病虫害名录(2023年): 中华人民共和国农业农村部公告 第 654 号 [EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202303/t20230314_6422981.htm
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. List of Class-I crop diseases and insect pests (2023): Announcement No. 654 of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China [EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202303/t20230314_6422981.htm (in Chinese)
- [40] 中华人民共和国农业部. 农作物病虫害专业化统防统治管理办法: 中华人民共和国农业部第 1571 号公告 [EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201107/t20110714_2053048.htm
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Measures for specialized prevention and control of crop diseases and pests in a socialized, large-scale and intensive way: Announcement No. 1571 of the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China [EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201107/t20110714_2053048.htm (in Chinese)
- [41] 中华人民共和国农业农村部. 农作物病虫害专业化防治服务管理办法: 中华人民共和国农业农村部公告 第 417 号 [EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202104/t20210425_6366583.htm
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Measures for specialized prevention and control services of crop diseases and pests: Announcement No. 417 of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China [EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202104/t20210425_6366583.htm (in Chinese)
- [42] 朱有勇, 陈海如, 范静华, 王云月, 李炎, 范金祥, 杨仕生, 马光亮, 陈建斌, 李作森, 卢宝荣. 利用水稻品种多样性控制稻瘟病研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(5): 521-527
- Zhu Y Y, Chen H R, Fan J H, Wang Y Y, Li Y, Fan J X, Yang S S, Ma G L, Chen J B, Li Z S, Lu B R. The use of rice variety diversity for rice blast control[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(5): 521-527 (in Chinese)
- [43] 陈企村, 朱有勇, 李振岐, 唐永生, 康振生. 不同品种混种对小麦产量及条锈病的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 29-33
- Chen Q C, Zhu Y Y, Li Z Q, Tang Y S, Kang Z S. Effect of wheat cultivar mixtures on wheat yield and stripe rust [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 29-33 (in Chinese)
- [44] 郭世保, 黄丽丽, 康振生, 程晶晶, 陆宁海, 杨之为, 陈银潮. 小麦多品种混播控制条锈病的效果和机理研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3485-3492
- Guo S B, Huang L L, Kang Z S, Cheng J J, Lu N H, Yang Z W, Chen Y C. Efficacy and mechanism of control of wheat stripe rust by diversifying cultivars in mix-planting[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(10): 3485-3492 (in Chinese)
- [45] 陈伟帅, 高利, 刘太国, 刘博, 陈万权. 小麦抗病遗传多样性对条锈病的调控效应[J]. 植物保护, 2015, 41(6): 185-190
- Chen W S, Gao L, Liu T G, Liu B, Chen W Q. Regulating effects against wheat stripe rust by the genetic diversity of wheat[J]. *Plant Protection*, 2015, 41(6): 185-190 (in Chinese)
- [46] 姜延涛, 许韬, 段霞瑜, 周益林. 品种混种控制小麦白粉病及其对小麦产量和蛋白质含量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(2): 276-285
- Jiang Y T, Xu T, Duan X Y, Zhou Y L. Effect of variety mixture planting on powdery mildew controlling as well as yield and protein contents in common wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(2): 276-285 (in Chinese)
- [47] 代真林, 汪娅婷, 姚秀英, 张晋豪, 王彦芳, 姚博, 魏兰芳, 姬广海. 玉米大豆间作模式对玉米根际土壤微生物群落特征、玉米产量及病害的影响[J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2020, 35(5): 756-764
- Dai Z L, Wang Y T, Yao X Y, Zhang J H, Wang Y F, Yao B, Wei L F, Ji G H. Effects of maize/soybean intercropping on the microbial community characteristics of maize rhizosphere soil, maize yield and diseases[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science*, 2020, 35(5): 756-764 (in Chinese)
- [48] 王红丽, 蒋倩, 曹世勤, 孙振宇, 王海光. 品种混种对小麦条锈病发生和小麦产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 1-21
- Wang H L, Jiang Q, Cao S Q, Sun Z Y, Wang H G. Effects of cultivar mixture on wheat stripe rust caused by *Puccinia striiformis* f sp *tritici* and wheat yield[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(4): 1-21 (in Chinese)
- [49] 陈万权, 康振生, 马占鸿, 徐世昌, 金杜林, 姜玉英. 中国小麦条锈病综合治理理论与实践[J]. 中国农业科学, 2013, 46(20): 4254-4262
- Chen W Q, Kang Z S, Ma Z H, Xu S C, Jin S L, Jiang Y Y. Integrated management of wheat stripe rust caused by *Puccinia striiformis* f sp *tritici* in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(20): 4254-4262 (in Chinese)
- [50] 陈万权. 中国小麦条锈病生态调控技术研究与应[J]. 植物医学, 2025, 4(2): 1-11
- Chen W Q. Research and application of ecological management for control of wheat stripe rust in China[J]. *Plant Health and Medicine*, 2025, 4(2): 1-11 (in Chinese)
- [51] 刘万才, 朱景全, 赵中华, 郭荣, 李萍, 朱晓明, 卓富彦, 李跃. 我国农作物病虫害绿色防控的研究进展[J]. 植物医生, 2021, 34(5): 5-12
- Liu W C, Zhu J Q, Zhao Z H, Guo R, Li P, Zhu X M, Zhuo F Y, Li Y. Progress in researches of green prevention and control of crop pests in China [J]. *Plant Doctor*, 2021, 34(5): 5-12 (in Chinese)
- [52] 刘万才, 李跃, 王保通, 李好海, 冯小军, 刘媛, 彭红, 吕国强, 张光先, 王玲, 赵中华, 王晓杰, 康振生. 小麦条锈病跨区域全周期绿色防控技术体系的构

- 建与应用[J]. 植物保护, 2024, 50(3): 1-9, 36
- Liu W C, Li Y, Wang B T, Li H H, Feng X J, Liu Y, Peng H, Lü G Q, Zhang G X, Wang L, Zhao Z H, Wang X J, Kang Z S. Construction and application of a green pest management technical system for wheat stripe rust caused by *Puccinia striiformis* f sp *tritici* in China[J]. *Plant Protection*, 50 (3): 1-9, 36 (in Chinese)
- [53] 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]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2003, 24(4): 19-22 (in Chinese)
- [54] 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]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(4): 56-63 (in Chinese)
- [55] 尚志云, 姚树然, 王锡平, 高军, 杜汛雨. 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, Gao J, Du X Y. Prediction of winter wheat powdery mildew in Hebei Province based on atmospheric circulation characteristics[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(6): 669-674 (in Chinese)
- [56] 霍治国, 叶彩玲, 钱拴, 陈林, 刘万才. 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, Chen L, Liu W C. Relationship between climatic anomaly and prevailing of the wheat powdery mildew in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(2): 85-90 (in Chinese)
- [57] 王丽, 霍治国, 张蕾, 姜玉英, 肖晶晶, 卢小凤. 气候变化对中国农作物病害发生的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(7): 1673-1684
- Wang L, Huo Z G, Zhang L, Jiang Y Y, Xiao J J, Lu X F. Effects of climate change on the occurrence of crop diseases in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(7): 1673-1684 (in Chinese)
- [58] Wang X J, Ma Z H, Jiang Y Y, Shi S D, Liu W C, Zeng J, Zhao Z W, Wang H G. Modeling of the overwintering distribution of *Puccinia striiformis* f sp *tritici* based on meteorological data from 2001 to 2012 in China[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2014, 1(3): 223-235
- [59] 王晓晶, 马占鸿, 姜玉英, 刘万才, 曾娟, 王海光. 基于 2002-2012 年气象数据的中国小麦条锈病菌越冬区划[J]. 植物保护学报, 2018, 45(1): 124-137
- Wang X J, Ma Z H, Jiang Y Y, Liu W C, Zeng J, Wang H G. Oversummering regionalization of *Puccinia striiformis* f sp *tritici* based on the meteorological data in China from 2002 to 2012 [J]. *Journal of Plant Protection*, 2018, 45(1): 124-137 (in Chinese)
- [60] 章力干, 石心怡, 王玉宝, 杨欣润, 余舫, 江彤, 常婷婷, 马超. 秸秆还田对中国主要粮食作物病害影响的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 93-100
- Zhang L G, Shi X Y, Wang Y B, Yang X R, Yu F, Jiang T, Chang T T, Ma C. Meta-analysis for the impacts of straw return on the diseases of major grain crops in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(21): 93-100 (in Chinese)
- [61] 王永芳, 董志平, 陈立涛, 王孟泉, 刘佳, 齐永志, 勾建军, 李秀芹, 崔彦. 保护性耕作条件下小麦茎基腐病菌周年侵染循环规律[J]. 中国植保导刊, 2024, 44(2): 27-34
- Wang Y F, Dong Z P, Chen L T, Wang M Q, Liu J, Qi Y Z, Gou J J, Li X Q, Cui Y. Annual infection cycle of wheat crown rot pathogens under conservation tillage condition[J]. *China Plant Protection*, 2024, 44(2): 27-34 (in Chinese)
- [62] 肖悦岩, 吴立人, 胡家怀, 万安民, 常稳. 小麦条锈菌生理小种动态预测[J]. 植物保护学报, 2007, 34(3): 257-262
- Xiao Y Y, Wu L R, Hu J H, Wan A M, Chang W. Forecast of race dynamic of wheat stripe rust[J]. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2007, 34(3): 257-262 (in Chinese)
- [63] 郭云燕, 陈茂功, 孙素丽, 武小菲, 江凯, 朱振东, 李洪杰, 何月秋, 王晓鸣. 中国玉米南方锈病病原菌遗传多样性[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4523-4533
- Guo Y Y, Chen M G, Sun S L, Wu X F, Jiang K, Zhu Z D, Li H J, He Y Q, Wang X M. Genetic diversity of *Puccinia polysora* Underw in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(21): 4523-4533 (in Chinese)
- [64] 马丽杰, 王雅婷, 鲁传强, 王建锋, 詹刚明, 王保通, 康振生, 杨敏娜, 彭岳林, 刘太国, 陈万权, 胡小平. 西藏林芝与内地小麦条锈菌分子群体遗传结构及菌源关系[J]. 植物病理学报, 2015, 45(2): 188-197
- Ma L J, Wang Y T, Lu C Q, Wang J F, Zhan G M, Wang B T, Kang Z S, Yang M N, Peng Y L, Liu T G, Chen W Q, Hu X P. Molecular population genetic structure and migration relation of *Puccinia striiformis* f sp *tritici* between Linzhi in Tibet and inland [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2015, 45(2): 188-197 (in Chinese)
- [65] 鄢洪海, 王琰, 张茹琴, 夏淑春, 王志奎, 宋希云. 基于 ISSR-PCR 对山东玉米多堆柄锈菌遗传多样性的研究及其初侵染菌源的推测[J]. 菌物学报, 2018, 37(2): 157-165
- Yan H H, Wang Y, Zhang R Q, Xia S C, Wang Z K, Song X Y. Genetic diversity and deduction of primary infection source of *Puccinia polysora* in Shandong Province based on ISSR-PCR[J]. *Mycosystema*, 2018, 37(2): 157-165 (in Chinese)
- [66] 黄苗苗, 陈万权, 曹世勤, 孙振宇, 贾秋珍, 高利, 刘博, 刘太国. 甘肃、青海地区小麦条锈菌监测及群体遗传多样性分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(18): 3693-3706
- Huang M M, Chen W Q, Cao S Q, Sun Z Y, Jia Q Z, Gao L, Liu B, Liu T G. Surveillance and genetic diversity analysis of *Puccinia striiformis* f sp *tritici* in Gansu and Qinghai Provinces[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(18): 3693-3706 (in Chinese)
- [67] Li Y X, Dai J C, Zhang T X, Wang B T, Zhang S Y, Wang C H, Zhang J G, Yao Q, Li M J, Li C Y, Peng Y L, Cao S Q, Zhan G M, Tao F, Gao H F, Huang W L, Feng X J, Bai Y W, Oucuo Z, Shang H S, Huang C, Liu W C, Zhan J S, Xu X M, Chen X M, Kang Z S, Hu X P. Genomic analysis, trajectory tracking, and field surveys reveal sources and long-distance dispersal routes of wheat stripe rust pathogen in China [J]. *Plant Communications*, 2023, 4(4): 100563
- [68] Li Y X, Zhang S Y, Liu D, Zhang T X, Zhang Z B, Zhao J C, Zhang B, Cao S Q, Xu X M, Yao Q, Hu X P. Migration of wheat stripe rust from the primary oversummering region to neighboring regions in China [J]. *Communications Biology*, 2025, 8: 350
- [69] 王建新, 周明国. 小麦赤霉病菌对多菌灵抗药性监测技术研究[J]. 植物保护学报, 2002, 29(1): 73-77
- Wang J X, Zhou M G. Methods for monitoring resistance of *Gibberella zeae* to carbendazim [J]. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2002, 29(1): 73-77 (in Chinese)
- [70] 匡静, 王建新, 周明国. 江苏省油菜菌核病菌对多菌灵和菌核净的抗药性监测[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 285-291
- Kuang J, Wang J X, Zhou M G. Monitoring on carbendazim and dimethachlon-resistance of *Sclerotinia sclerotiorum* obtained from the blight stems of rape in Jiangsu Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(15): 285-291 (in Chinese)
- [71] 曹学仁, 赵文娟, 周益林, 段霞瑜, 张莹, 丁克坚. 2007 年我国部分麦区小麦白粉菌对三唑酮的抗药性监测[J]. 植物保护, 2008, 34(6): 74-77
- Cao X R, Zhao W J, Zhou Y L, Duan X Y, Zhang Y, Ding K J. Monitoring of resistance of *Blumeria graminis* f sp *tritici* isolates to triadimefon in 2007 [J]. *Plant Protection*, 2008, 34(6): 74-77 (in Chinese)

- [72] 史倩倩, 范洁茹, 周益林, 邹亚飞, 段霞瑜. 2012年部分麦区小麦白粉菌群体对三唑酮敏感性及其与毒性的关系[J]. 植物病理学报, 2015, 45(2): 181-187
- Shi Q Q, Fan J R, Zhou Y L, Zou Y F, Duan X Y. Triadimefon sensitivity and its correlation with the virulence population of *Blumeria graminis* f sp *tritici* in some wheat growing areas in 2012[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2015, 45(2): 181-187 (in Chinese)
- [73] 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
- Li H X, Zhou M G, Lu Y J. Using polymerase chain reaction for detection of carbendazim resistance in *Sclerotinia sclerotiorum* [J]. *Mycosystema*, 2002, 21(3): 370-374 (in Chinese)
- [74] 李红霞, 周明国. 用等位基因特异性寡核苷酸(ASO)-PCR快速检测抗多菌灵的油菜菌核病菌[J]. 中国农业科学, 2004, 37(9): 1396-1399
- Li H X, Zhou M G. Rapid identification of carbendazim resistant strains of *Sclerotinia sclerotiorum* using allele-specific oligonucleotide (ASO)-PCR[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(9): 1396-1399 (in Chinese)
- [75] 聂晓, 刘伟, 范洁茹, 胡小平, 周益林. 小麦化肥农药减施集成技术综合效益评价[J]. 植物保护, 2021, 47(2): 95-102
- Nie X, Liu W, Fan J R, Hu X P, Zhou Y L. Comprehensive evaluation of the benefits of integrated technologies for reducing fertilizers and pesticides in wheat production[J]. *Plant Protection*, 2021, 47(2): 95-102 (in Chinese)
- [76] 刘万才. 试论植物保护贡献率的测算方法[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(8): 5-8
- Liu W C. Discussion of the evaluation of plant protection contribution rate [J]. *China Plant Protection*, 2021, 41(8): 5-8 (in Chinese)
- [77] 刘万才, 刘慧, 朱晓明, 卓富彦, 李跃, 李萍, 任彬元. 2022年全国三大粮食作物病虫害防控植保贡献率评价研究报告[J]. 中国植保导刊, 2023, 43(1): 5-9, 39
- Liu W C, Liu H, Zhu X M, Zhuo F Y, Li Y, Li P, Ren B Y. Evaluation of plant protection contribution of pest control to three major grain crops in China in 2022[J]. *China Plant Protection*, 2023, 43(1): 5-9, 39 (in Chinese)
- [78] 刘慧, 朱晓明, 卓富彦, 李跃, 李萍, 刘万才. 2023年全国三大粮食作物病虫害防控植保贡献率评价研究报告[J]. 中国植保导刊, 2024, 44(1): 62-66, 103
- Liu H, Zhu X M, Zhuo F Y, Li Y, Li P, Liu W C. Evaluation of the contribution of pest control to three major grain crops in China in 2023[J]. *China Plant Protection*, 2024, 44(1): 62-66, 103 (in Chinese)
- [79] 于舒怡, 傅俊范, 刘长远, 关天舒, 王辉, 刘丽. 沈阳地区葡萄霜霉病流行时间动态及其气象影响因子分析[J]. 植物病理学报, 2016, 46(4): 529-535
- Yu S Y, Fu J F, Liu C Y, Guan T S, Wang H, Liu L. Epidemic temporal dynamic of grape downy mildew and its meteorological influencing factors in Shenyang, Liaoning[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2016, 46(4): 529-535 (in Chinese)
- [80] 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 Phytopathologica Sinica*, 2009, 39(2): 183-193 (in Chinese)
- [81] Wang H G, Yang X B, Ma Z H. Long-distance spore transport of wheat stripe rust pathogen from Sichuan, Yunnan, and Guizhou in southwestern China[J]. *Plant Disease*, 2010, 94(7): 873-880
- [82] 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
- Wang H G, Yang X B, Ma Z H. Investigation of the long-distance transports of *Puccinia striiformis* f sp *tritici* in China using HYSPLIT-4 model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(5): 55-64 (in Chinese)
- [83] Wang A L, Cao S Q, Peng H, Jiang R, Zhang M H, Nie X, Xu F, Huang L, Sun Z Y, Hu X P, Liu W, Fan J R, Zhou Y L, Xu X M. Identification of wheat stripe rust inoculum sources and dispersal routes responsible for initial rust establishment in southern Henan of China[J]. *Plant Disease*, 2025, 109(2): 361-372
- [84] Huang L, Zhao W C, Xia C J, Zhao N, Li H F, Sun Z Y, Yang L J, Li M J, Chen W, Yang F, Zhang H, Chen W Q, Liu T G. Wheat stripe rust inoculum from the southwest dispersed to the east Huang-Huai-Hai region through southern Anhui in China[J]. *Plant Disease*, 2025, 109(1): 138-148
- [85] Li H F, Zhao N, Zhang Q Q, Huang L, Zhang H, Gao L, Chen W Q, Liu T G. Genetic and wind field analysis of wheat leaf rust (*Puccinia triticina*) dispersal: From winter sources in Gansu and Shaanxi to summer epidemics in China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1558898
- [86] 王晓鸣, 刘骏, 郭云燕, 段灿星, 朱振东, 孙素丽, 杨知还. 中国玉米南方锈病初侵染源的多源性[J]. 玉米科学, 2020, 28(3): 1-14, 30
- Wang X M, Liu J, Guo Y Y, Duan C X, Zhu Z D, Sun S L, Yang Z H. Multiorigins of initial infection sources of *Puccinia polysora* causing southern rust of maize in China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(3): 1-14, 30 (in Chinese)
- [87] 龚国淑, 姚凯凯. 孢子捕捉仪在植物病害监测中的应用[J]. 植物保护学报, 2022, 49(3): 721-730
- Gong G S, Yao K K. A review of the application of spore trap in plant disease monitoring[J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49(3): 721-730 (in Chinese)
- [88] 王奥霖, 范洁茹, 徐飞, 陈莉, 曹世勤, 王万军, 孙振宇, 刘伟, 胡小平, 周益林. 植物病原菌孢子捕捉和监测:助力植物病害管理[J]. 植物保护, 2025, 51(1): 1-19
- Wang A L, Fan J R, Xu F, Chen L, Cao S Q, Wang W J, Sun Z Y, Liu W, Hu X P, Zhou Y L. Catching and monitoring airborne inoculum of plant pathogens: Improving plant disease management[J]. *Plant Protection*, 2025, 51(1): 1-19 (in Chinese)
- [89] 徐佳美, 王海光, 秦丰, 张国珍. 北京地区日光温室草莓灰霉病发生动态监测和影响因素分析[J]. 植物病理学报, 2018, 48(2): 228-238
- Xu J M, Wang H G, Qin F, Zhang G Z. Epidemic monitoring and influence factor analysis of strawberry gray mold in greenhouse in Beijing[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2018, 48(2): 228-238 (in Chinese)
- [90] Cao X R, Yao D M, Zhou Y L, West J S, Xu X M, Luo Y, Ding K J, Fan J R, Duan X Y. Detection and quantification of airborne inoculum of *Blumeria graminis* f sp *tritici* using quantitative PCR[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2016, 146(1): 225-229
- [91] 王奥霖, 商昭月, 张美惠, 王贵, 胡小平, 徐飞, 孙振宇, 曹世勤, 刘伟, 范洁茹, 周益林. 基于病菌孢子捕捉和real-time PCR技术的田间空气中小麦白粉病菌孢子动态监测及病情估计模型研究[J]. 植物保护, 2024, 50(2): 49-56
- Wang A L, Shang Z Y, Zhang M H, Wang G, Hu X P, Xu F, Sun Z Y, Cao S Q, Liu W, Fan J R, Zhou Y L. Dynamic monitoring of aerial conidia and disease estimation models for wheat powdery mildew in fields using pathogen spore traps coupled with real-time PCR technique[J]. *Plant Protection*, 2024, 50(2): 49-56 (in Chinese)
- [92] Wang A L, Shang Z Y, Jiang R, Zhang M H, Wang J F, Li H F, Zhang B, Tang H R, Xu F, Hu X P, Liu W, Fan J R, Zhou Y L, West J S. Development and application of a qPCR-based method coupled with spore trapping to monitor airborne pathogens of wheat causing stripe rust, powdery mildew, and Fusarium head blight[J]. *Plant Disease*, 2025, 109(2): 257-264
- [93] 魏佳美, 王强, 黄卫丽, 胡小平, 商文静. 苹果园3种病原真菌孢子数量的时空动态研究[J]. 西北农业学报, 2025, 34(4): 754-760
- Wei J M, Wang Q, Huang W L, Huang L L, Hu X P, Shang W J. Spore dynamics of three apple fungal pathogens in orchards[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2025, 34(4): 754-760 (in Chinese)
- [94] 李小龙, 马占鸿, 孙振宇, 王海光. 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 X L, Ma Z H, Sun Z Y, Wang H G. Automatic counting for trapped

- urediospores of *Puccinia striiformis* f sp *tritici* based on image processing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(2): 199-206 (in Chinese)
- [95] 段灿星, 江凯, 秦子惠, 孙素丽, 宋凤景, 王晓鸣. 玉米抗南方锈病种质标记基因型鉴定与遗传多样性分析[J]. 植物保护学报, 2015, 42(6): 899-907
- Duan C X, Jiang K, Qin Z H, Sun S L, Song F J, Wang X M. Identification of resistance marker genotype and genetic diversity of maize germplasm with resistance to southern corn rust[J]. *Journal of Plant Protection*, 2015, 42(6): 899-907 (in Chinese)
- [96] 黄苗苗, 孙振宇, 曹世勤, 贾秋珍, 刘太国, 陈万权. 223 份小麦农家品种田间抗条锈病性评价及抗病基因分子检测[J]. 植物保护学报, 2018, 45(1): 90-100
- Huang M M, Sun Z Y, Cao S Q, Jia Q Z, Liu T G, Chen W Q. Evaluation of the resistance of 223 wheat landraces in Gansu Province to stripe rust and molecular detection[J]. *Journal of Plant Protection*, 2018, 45(1): 90-100 (in Chinese)
- [97] 孙振宇, 黄亮, 黄苗苗, 刘太国. 小麦抗条锈基因 *Yr5*、*Yr9* 和 *Yr18* 分子标记的特异性评估[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(1): 45-51
- Sun Z Y, Huang L, Huang M M, Liu T G. Evaluation of molecular markers for wheat stripe rust resistance genes *Yr5*, *Yr9* and *Yr18*[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(1): 45-51 (in Chinese)
- [98] 王海光. 植物病害图像识别及其发展前景[J]. 植物病理学报, 2025, 55(4): 964-977
- Wang H G. Plant disease image recognition and its prospects[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2025, 55(4): 964-977 (in Chinese)
- [99] 王海光, 马占鸿, 王韬, 蔡成静, 安虎, 张录达. 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 H G, Ma Z H, Wang T, Cai C J, An H, Zhang L D. 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 (in Chinese)
- [100] Wang H G, Guo J B, Ma Z H. Monitoring wheat stripe rust using remote sensing technologies in China [C]. In: *Computer and Computing Technologies in Agriculture V. CCTA 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2012, 370 (PART 3): 163-175
- [101] Zhao J L, Huang L S, Huang W J, Zhang D Y, Yuan L, Zhang J C, Liang D. Hyperspectral measurements of severity of stripe rust on individual wheat leaves[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2014, 139(2): 407-417
- [102] Wang H, Qin F, Ruan L, Wang R, Liu Q, Ma Z H, Li X L, Cheng P, Wang H G. Identification and severity determination of wheat stripe rust and wheat leaf rust based on hyperspectral data acquired using a black-paper-based measuring method[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(4): e0154648
- [103] 乔红波, 周益林, 白由路, 程登发, 段霞瑜. 地面高光谱和低空遥感监测小麦白粉病初探[J]. 植物保护学报, 2006, 33(4): 341-344
- Qiao H B, Zhou Y L, Bai Y L, Cheng D F, Duan X Y. The primary research of detecting wheat powdery mildew using in-field and low altitude remote sensing[J]. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2006, 33(4): 341-344 (in Chinese)
- [104] 张玉萍, 郭洁滨, 王爽, 王海光, 马占鸿. 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
- Zhang Y P, Guo J B, Wang S, Wang H G, Ma Z H. Relativity research on near-ground and satellite remote sensing reflectance of wheat stripe rust[J]. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2009, 36(2): 119-122 (in Chinese)
- [105] 王爽, 马占鸿, 孙振宇, 黄冲, 王海光, 闫佳会, 梁俊敏. 基于高光谱遥感的小麦条锈病胁迫下的产量损失估计[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21): 253-258
- Wang S, Ma Z H, Sun Z Y, Huang C, Wang H G, Yan J H, Liang J M. Yield loss assessment under wheat stripe rust stress based on hyperspectral remote sensing[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(21): 253-258 (in Chinese)
- [106] Cao X R, Luo Y, Zhou Y L, Fan J R, Xu X M, West J S, Duan X Y, Cheng D F. 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
- [107] Wang H, Qin F, Liu Q, Ruan L, Wang R, Ma Z H, Li X L, Cheng P, Wang H G. Identification and disease index inversion of wheat stripe rust and wheat leaf rust based on hyperspectral data at canopy level[J]. *Journal of Spectroscopy*, 2015, 2015: 651810
- [108] 刘良云, 黄木易, 黄文江, 王纪华, 赵春江, 郑兰芬, 童庆禧. 利用多时相的高光谱航空图像监测冬小麦条锈病[J]. 遥感学报, 2004, 8(3): 275-281
- Liu L Y, Huang M Y, Huang W J, Wang J H, Zhao C J, Zheng L F, Tong Q X. Monitoring stripe rust disease of winter wheat using multi-temporal hyperspectral airborne data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(3): 275-281 (in Chinese)
- [109] 冷伟锋, 王海光, 胥岩, 马占鸿. 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
- Leng W F, Wang H G, Xu Y, Ma Z H. Preliminary study on monitoring wheat stripe rust with using UAV[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2012, 42(2): 202-205 (in Chinese)
- [110] Liu W, Cao X R, Fan J R, Wang Z H, Yan Z Y, Luo Y, West J S, Xu X M, Zhou Y L. Detecting wheat powdery mildew and predicting grain yield using unmanned aerial photography[J]. *Plant Disease*, 2018, 102(10): 1981-1988
- [111] 刘良云, 宋晓宇, 李存军, 齐腊, 黄文江, 王纪华. 冬小麦病害与产量损失的多时相遥感监测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 137-143
- Liu L Y, Song X Y, Li C J, Qi L, Huang W J, Wang J H. Monitoring and evaluation of the diseases and yield of winter wheat from multi-temporal remotely-sensed data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(1): 137-143 (in Chinese)
- [112] Sheng Q, Ma H Q, Zhang J C, Gui Z Q, Huang W J, Chen D M, Wang B. Coupling multi-source satellite remote sensing and meteorological data to discriminate yellow rust and Fusarium head blight in winter wheat[J]. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 2025, 94(2): 421-440
- [113] 石守定, 马占鸿, 王海光, 赵中华, 姜玉英. 应用 GIS 和地统计学研究小麦条锈病菌越冬范围[J]. 植物保护学报, 2005, 32(1): 29-32
- Shi S D, Ma Z H, Wang H G, Zhao Z H, Jiang Y Y. Climate-based regional classification for overwintering of *Puccinia striiformis* in China with GIS and geostatistics[J]. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2005, 32(1): 29-32 (in Chinese)
- [114] 李迅, 肖悦岩, 刘万才, 汤金仪. 小麦白粉病地理空间分布特征[J]. 植物保护学报, 2002, 29(1): 41-46
- Li X, Xiao Y Y, Liu W C, Tang J Y. Geographic spatial distribution attributes of wheat powdery mildew[J]. *Acta Phytophylacica Sinica*, 2002, 29(1): 41-46 (in Chinese)
- [115] Li B N, Cao X R, Chen L, Zhou Y L, Duan X Y, Luo Y, Fitt B D L, Xu X M, Song Y L, Wang B T, Cao S Q. Application of geographic information systems to identify the overwintering regions of *Blumeria graminis* f sp *tritici* in China[J]. *Plant Disease*, 2013, 97(9): 1168-1174
- [116] Zou Y F, Qiao H B, Cao X R, Liu W, Fan J R, Song Y L, Wang B T, Zhou Y L. Regionalization of wheat powdery mildew overwintering in China based on digital elevation[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4): 901-910
- [117] 陈克, 姚文国, 章正, 肖悦岩, 严进, 徐岩, 白章红, 陈小帆, 包黎明. 小麦矮腥黑穗病在中国定殖风险分析及区划研究[J]. 植物病理学报, 2002, 32(4): 312-318
- Chen K, Yao W G, Zhang Z, Xiao Y Y, Yan J, Xu Y, Bai Z H, Chen X F, Bao L M. Establishment risk analysis and divisions of TCK in China[J]. *Acta*

- Phytopathologica Sinica*, 2002, 32(4): 312-318 (in Chinese)
- [118] 陈晨, 陈娟, 胡白石, 白艺珍, 姜英华, 刘凤权. 梨火疫病菌在中国的潜在分布及入侵风险分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 940-947
Chen C, Chen J, Hu B S, Bai Y Z, Jiang Y H, Liu F Q. Potential distribution of *Erwinia amylovora* in China and invasion risk assessment[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(5): 940-947 (in Chinese)
- [119] 胡同乐, 张玉新, 王树桐, 杨军玉, 张瑜, 曹克强. 中国马铃薯晚疫病监测预警系统“China-blight”的组建及运行[J]. 植物保护, 2010, 36(4): 106-111
Hu T L, Zhang Y X, Wang S T, Yang J Y, Zhang Y, Cao K Q. Construction and implementation of China-blight: A monitoring and warning system on potato late blight in China[J]. *Plant Protection*, 2010, 36(4): 106-111 (in Chinese)
- [120] 张玉新, 胡同乐, 曹克强, 韩永峰. 中国马铃薯晚疫病监测预警系统的研制[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(1): 118-122
Zhang Y X, Hu T L, Cao K Q, Han Y F. Development of Chinese potato late blight monitoring and warning system [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2012, 35(1): 118-122 (in Chinese)
- [121] 黄冲, 刘万才, 姜玉英, 曾娟, 陆明红, 刘杰. 农作物重大病虫害数字化监测预警系统研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(5): 196-199, 205
Huang C, Liu W C, Jiang Y Y, Zeng J, Lu M H, Liu J. Research on web-based monitoring and warning system for crop diseases and pests[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(5): 196-199, 205 (in Chinese)
- [122] 李卫国, 顾晓鹤, 葛广秀, 陈华, 张琰琰. 县域冬小麦病害遥感监测信息系统研制[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 302-306
Li W G, Gu X H, Ge G X, Chen H, Zhang C C. Development of remote sensing monitoring information system for county scale winter wheat diseases [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35(2): 302-306 (in Chinese)
- [123] 宫彦萍, 黄文江, 潘瑜春, 徐新刚, 刘良云, 王纪华, 阎广建. 基于WebGIS的作物病虫害监测预报系统构建[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 36-41
Gong Y P, Huang W J, Pan Y C, Xu X G, Liu L Y, Wang J H, Yan G J. Construction of a Web GIS-based forecast system of crop diseases and pests [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(6): 36-41 (in Chinese)
- [124] Kuang W G, Liu W C, Ma Z H, Wang H G. Development of a web-based prediction system for wheat stripe rust [C]. In: *Computer and Computing Technologies in Agriculture VI. CCTA 2012. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2013, 392 (PART 1): 324-335
- [125] 李小龙, 王库, 马占鸿, 王海光. 基于热红外成像技术的小麦病害早期检测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 183-189
Li X L, Wang K, Ma Z H, Wang H G. Early detection of wheat disease based on thermal infrared imaging [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(18): 183-189 (in Chinese)
- [126] Wang M, Ling N, Dong X, Zhu Y Y, Shen Q R, Guo S W. Thermographic visualization of leaf response in cucumber plants infected with the soil-borne pathogen *Fusarium oxysporum* f sp *cucumerinum* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 61: 153-161
- [127] 朱文静, 陈华, 李林, 魏新华, 毛罕平, Spaner D. 基于红外热成像边缘检测算法的小麦叶锈病分级研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 36-41, 48
Zhu W J, Chen H, Li L, Wei X H, Mao H P, Spaner D. Grading of wheat leaf rust based on edge detection of infrared thermal imaging [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 36-41, 48 (in Chinese)
- [128] 冯子恒, 宋莉, 张少华, 井宇航, 段剑钊, 贺利, 尹飞, 冯伟. 基于无人机多光谱和热红外影像信息融合的小麦白粉病监测[J]. 中国农业科学, 2022, 55(5): 890-906
Feng Z H, Song L, Zhang S H, Jing Y H, Duan J Z, He L, Yin F, Feng W. Wheat powdery mildew monitoring based on information fusion of multi-spectral and thermal infrared images acquired with an unmanned aerial vehicle [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(5): 890-906 (in Chinese)
- [129] 李小龙, 马占鸿, 赵龙莲, 李军会, 王海光. 基于近红外光谱技术的小麦条锈病和叶锈病的早期诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2661-2665
Li X L, Ma Z H, Zhao L L, Li J H, Wang H G. Early diagnosis of wheat stripe rust and wheat leaf rust using near infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(10): 2661-2665 (in Chinese)
- [130] 李小龙, 马占鸿, 赵龙莲, 李军会, 王海光. 基于近红外光谱技术的小麦条锈病菌潜伏侵染的检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1853-1858
Li X L, Ma Z H, Zhao L L, Li J H, Wang H G. Detection of *Puccinia striiformis* f sp *tritici* latent infections in wheat leaves using near infrared spectroscopy technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(7): 1853-1858 (in Chinese)
- [131] 李小龙, 秦丰, 赵龙莲, 李军会, 王海光. 近红外光谱技术的小麦条锈病严重度分级识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(2): 367-371
Li X L, Qin F, Zhao L L, Li J H, Ma Z H, Wang H G. Identification and classification of disease severity of wheat stripe rust using near infrared spectroscopy technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(2): 367-371 (in Chinese)
- [132] 李小龙, 马占鸿, 赵龙莲, 李军会, 王海光. 近红外光谱技术在小麦条锈病菌和叶锈病菌定性识别和定量测定中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(3): 643-647
Li X L, Ma Z H, Zhao L L, Li J H, Wang H G. Application of near infrared spectroscopy to qualitative identification and quantitative determination of *Puccinia striiformis* f sp *tritici* and *P. recondita* f sp *tritici* [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 643-647 (in Chinese)
- [133] 郭志明, 尹丽梅, 石吉勇, 陈全胜, 邹小波. 粮食真菌毒素的光谱检测技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(6): 1751-1757
Guo Z M, Yin L M, Shi J Y, Chen Q S, Zou X B. Spectroscopic techniques for detection of mycotoxin in grains [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(6): 1751-1757 (in Chinese)
- [134] Huang C, Sun Z Y, Yan J H, Luo Y, Wang H G, Ma Z H. Rapid and precise detection of latent infections of wheat stripe rust in wheat leaves using loop-mediated isothermal amplification [J]. *Journal of Phytopathology*, 2011, 159(7/8): 582-584
- [135] Zhao J, Wang X J, Chen C Q, Huang L L, Kang Z S. A PCR based assay for detection of *Puccinia striiformis* f sp *tritici* in wheat [J]. *Plant Disease*, 2007, 91(12): 1669-1674
- [136] Wang X J, Zheng W M, Buchenauer H, Zhao J, Han Q M, Huang L L, Kang Z S. The development of a PCR-based method for detecting *Puccinia striiformis* latent infections in wheat leaves [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2008, 120(3): 241-247
- [137] 潘娟娟, 骆勇, 黄冲, 孙振宇, 赵磊, 闫佳会, 马占鸿. 应用 real-time PCR 定量检测小麦条锈病菌潜伏侵染量方法的建立[J]. 植物病理学报, 2010, 40(5): 504-510
Pan J J, Luo Y, Huang C, Sun Z Y, Zhao L, Yan J H, Ma Z H. Quantification of latent infections of wheat stripe rust by using real-time PCR [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2010, 40(5): 504-510 (in Chinese)
- [138] Zeng X W, Luo Y, Zheng Y M, Duan X Y, Zhou Y L. Detection of latent infection of wheat leaves caused by *Blumeria graminis* f sp *tritici* using nested PCR [J]. *Journal of Phytopathology*, 2010, 158(4): 227-235
- [139] Zheng Y M, Luo Y, Zhou Y L, Zeng X W, Duan X Y, Cao X R, Song Y L, Wang B T. 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
- [140] Du Y, Yang J, Qi Z Q, Yu J J, Zhang R S, Yu M N, Cao H J, Song T Q, Pan X Y, Wang S C, Xiong Q, Liu Y F. Rapid and visual detection of

- Pyricularia oryzae* using coupled recombinase polymerase amplification – lateral flow dipstick assay[J]. *Plant Disease*, 2025, 109(5): 1024-1030
- [141] 姜文君, 曾舒泉, 陈伟, 席先梅, 卢灿华, 郭庆港, 马平, 张力群. 土传植物病原物的定量检测[J]. 植物病理学报, 2025, 55(4): 949-963
- Jiang W J, Zeng S Q, Chen W, Xi X M, Lu C H, Guo Q G, Ma P, Zhang L Q. Quantitative detection of soil-borne plant pathogens [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2025, 55(4): 949-963 (in Chinese)
- [142] 葛波, 王宝宝, 郭成, 孙素丽, 陈国康, 王晓鸣, 朱振东, 段灿星. 玉米根际土壤中镰孢菌的构成与定量分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(19): 3683-3693
- Ge B, Wang B B, Guo C, Sun S L, Chen G K, Wang X M, Zhu Z D, Duan C X. Composition and quantitative analysis of *Fusarium* species in maize rhizosphere soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(19): 3683-3693 (in Chinese)
- [143] Duan Y B, Yang Y, Li M X, Li T, Fraaije B A, Zhou M G. Development and application of a simple, rapid and sensitive method for detecting moderately carbendazim-resistant isolates in *Botrytis cinerea*[J]. *Annals of Applied Biology*, 2018, 172(3): 355-365
- [144] 李冠林, 马占鸿, 王海光. 基于图像处理的葡萄霜霉病单叶严重度自动分级方法[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(6): 88-93
- Li G L, Ma Z H, Wang H G. An automatic grading method of severity of single leaf infected with grape downy mildew based on image processing[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(6): 88-93 (in Chinese)
- [145] Li G L, Ma Z H, Wang H G. Development of a single-leaf disease severity automatic grading system based on image processing[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013, 212: 665-675
- [146] 蒋倩, 王红丽, 王海光. 基于图像处理技术的小麦条锈病严重度自动分级系统构建[J]. 植物病理学报, 2024, 54(2): 385-397
- Jiang Q, Wang H L, Wang H G. Development of an automatic grading system of wheat stripe rust severity based on image processing[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2024, 54(2): 385-397 (in Chinese)
- [147] Qin F, Wang H G, Jiang Q, Wang H L. A novel method based on lesion expansion to assess plant disease severity[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1510663
- [148] 邓继忠, 李敏, 袁之报, 金济, 黄华盛. 基于图像识别的小麦腥黑穗病害特征提取与分类[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 172-176
- Deng J Z, Li M, Yuan Z B, Jin J, Huang H S. Feature extraction and classification of *Tilletia* diseases based on image recognition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(3): 172-176 (in Chinese)
- [149] Li X L, Ma Z H, Giagnocavo C, Qin F, Wang H G, Álvarez-Bermejo J A. Development of automatic counting system for urediospores of wheat stripe rust based on image processing[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(5): 134-143
- [150] 谢成军, 刘振东, 张炜, 陈天娇, 陆明红, 刘万才. 基于植保大数据的病虫草害移动智能识别系统: 随识[J]. 植物医生, 2020, 33(2): 53-59
- Xie C J, Liu Z D, Zhang W, Chen T J, Lu M H, Liu W C. Sensee: A mobile intelligent pest and disease recognition system based on agricultural plant protection big data[J]. *Plant Doctor*, 2020, 33(2): 53-59 (in Chinese)
- [151] Zhang X, Han L X, Dong Y Y, Shi Y, Huang W J, Han L H, González-Moreno P, Ma H Q, Ye H C, Sobeih T. A deep learning-based approach for automated yellow rust disease detection from high-resolution hyperspectral UAV images[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1554
- [152] 曹学仁, 陈林, 周益林, 段霞瑜. 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, Duan X Y. Potential distribution of *Magnaporthe grisea* in China and the world, predicted by MaxEnt[J]. *Plant Protection*, 2011, 37(3): 80-83 (in Chinese)
- [153] 吴卓瑾, 梁特, 石娟. 基于MaxEnt模型预测梨火疫病病菌的潜在地理分布[J]. 植物保护学报, 2023, 50(6): 1518-1527
- Wu Z J, Liang T, Shi J. Prediction of the global potential geographical distribution of fire blight pathogen *Erwinia amylovora* by using the MaxEnt model[J]. *Journal of Plant Protection*, 2023, 50(6): 1518-1527 (in Chinese)
- [154] 陈艺芳, 汤敬诚, 王佳楠. 基于CLIMEX模型的大豆南(北)方茎溃疡病菌在中国的潜在适生区预测[J]. 大豆科学, 2025, 44(2): 101-109
- Chen Y F, Tang J C, Wang J N. Prediction of the potential distribution of *Diaporthe aspalathi* and *Diaporthe caulivora* in China using CLIMEX model [J]. *Soybean Science*, 2025, 44(2): 101-109 (in Chinese)
- [155] 宋晶晶, 曹远银, 李天亚, 李伟华, 张晶. 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, Li W H, Zhang J. Relationship between the amount of aerial conidia of *Blumeria graminis* f sp *tritici* and meteorological factors and the establishment of forecasting model[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(13): 2652-2654 (in Chinese)
- [156] 刘伟, 姚冬明, 范洁茹, 曹学仁, 陈莉, 丁克坚, 周益林, 邹亚飞, 段霞瑜. 田间空气中小麦白粉菌分生孢子的动态监测研究[J]. 植物病理学报, 2016, 46(1): 112-118
- Liu W, Yao D M, Fan J R, Cao X R, Chen L, Ding K J, Zhou Y L, Zou Y F, Duan X Y. Dynamic monitoring of aerial conidia of *Blumeria graminis* f sp *tritici* in wheat fields[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2016, 46(1): 112-118 (in Chinese)
- [157] 闫征远, 范洁茹, 刘伟, 周益林. 基于田间空气中病菌孢子浓度的小麦白粉病病情估计模型研究[J]. 植物病理学报, 2017, 47(2): 253-261
- Yan Z Y, Fan J R, Liu W, Zhou Y L. Models of disease index estimation of wheat powdery mildew based on the concentrations of *Blumeria graminis* f sp *tritici* conidia in the fields[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2017, 47(2): 253-261 (in Chinese)
- [158] 王光, 刘智军, 刘立山, 李娟, 李保华. 梨黑星病菌侵染测报器的设计[J]. 青岛农业大学学报: 自然科学版, 2007, 24(1): 65-67
- Wang G, Liu Z J, Liu L S, Li J, Li B H. Design of intelligent instrument to predict the infection of pear leaves by pathogen of *Venturia nashicola*[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University: Natural Science*, 2007, 24(1): 65-67 (in Chinese)
- [159] 李娟, 李保华, 郑海菊. 基于VenInf模型的梨黑星病侵染测报器的设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊2): 199-203
- Li J, Li B H, Zheng H J. Design of forecasting and alarming device for pear scab infection based on the VenInf model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(Supp. 2): 199-203 (in Chinese)
- [160] 黄冲, 刘万才, 张君. 马铃薯晚疫病物联网实时监测预警系统平台开发及应用[J]. 中国植保导刊, 2015, 35(12): 45-48
- Huang C, Liu W C, Zhang J. Development and application of real time monitoring and forecast system platform of Internet of Things against potato late blight[J]. *China Plant Protection*, 2015, 35(12): 45-48 (in Chinese)
- [161] 张平平. 关中地区小麦赤霉病预测系统[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015
- Zhang P P. The prediction system of wheat head blight in Guanzhong region [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015 (in Chinese)
- [162] 袁冬贞, 崔章静, 杨桦, 刘万才, 谢飞舟, 文耀东, 胡小平. 基于物联网的小麦赤霉病自动监测预警系统应用效果[J]. 中国植保导刊, 2017, 37(1): 46-51
- Yuan D Z, Cui Z J, Yang H, Liu W C, Xie F Z, Wen Y D, Hu X P. Application effects of wheat *Fusarium* head blight automatic monitoring and prediction system based on Internet of Things[J]. *China Plant Protection*, 2017, 37(1): 46-51 (in Chinese)
- [163] 宋瑞, 王嘉荟, 袁冬贞, 王保通, 范三红, 秦志波, 黄冲, 刘万才, 胡小平.

- 小麦赤霉病自动监测预警系统应用效果评价[J]. 植物保护, 2020, 46(3): 215-219
- Song R, Wang J H, Yuan D Z, Wang B T, Fan S H, Qin Z B, Huang C, Liu W C, Hu X P. Application effect evaluation of the automatic monitoring and warning system for Fusarium head blight[J]. *Plant Protection*, 2020, 46(3): 215-219 (in Chinese)
- [164] 黄冲, 刘万才, 姜玉英, 吴佳文, 邱坤, 杨俊杰, 彭红, 杨桦, 胡小平. 小麦赤霉病物联网实时监测预警技术试验评估[J]. 中国植保导刊, 2020, 40(9): 28-32
- Huang C, Liu W C, Jiang Y Y, Wu J W, Qiu K, Yang J J, Peng H, Yang H, Hu X P. Experimental evaluation of real-time monitoring and early warning technology for Fusarium head blight based on Internet of Things[J]. *China Plant Protection*, 2020, 40(9): 28-32 (in Chinese)
- [165] 田静, 王强, 周佳, 黄卫利, 胡小平. 2022年-2023年基于物联网的小麦赤霉病自动监测预警系统应用效果评价[J]. 植物保护, 2024, 50(6): 270-275
- Tian J, Wang Q, Zhou J, Huang W L, Hu X P. Evaluation of the application effect of the automatic monitoring and warning system for Fusarium head blight based on the internet of things in 2022 and 2023[J]. *Plant Protection*, 2024, 50(6): 270-275 (in Chinese)
- [166] Zhao Z W, Qin F, Wang H G. Application and prospect of new media in forecast of plant pests[C]. In: Li D L, Chen Y Y, eds. *Computer and Computing Technologies in Agriculture VIII. CTA 2014. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Cham: Springer, 2015, 452: 313-323
- [167] 曾士迈. 抗病性持久度的估测(II): 小麦条锈病抗病性持久度的模拟研究[J]. 植物病理学报, 2002, 32(2): 103-113
- Zeng S M. On the estimation of the durability of disease resistance (II): Simulation study on the durability of disease resistance of wheat to yellow rust[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2002, 32(2): 103-113 (in Chinese)
- [168] 曾士迈. 品种布局防治小麦条锈病的模拟研究[J]. 植物病理学报, 2004, 34(3): 261-271
- Zeng S M. Simulation study on cultivar deployment against wheat stripe rust caused by *Puccinia striiformis* West in China[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2004, 34(3): 261-271 (in Chinese)
- [169] 刘书华, 杨晓红, 蒋文科, 曹克强. 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 S H, Yang X H, Jiang W K, Cao K Q. Decision support system for crop diseases and insect pests prevention and control based on GIS [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(4): 147-150 (in Chinese)
- [170] 李保华, 徐向明. 植物病害时空流行动态模拟模型的构建[J]. 植物病理学报, 2004, 34(4): 369-375
- Li B H, Xu X M. Development of a stochastic model simulating spatio-temporal dynamics of plant disease epidemics[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2004, 34(4): 369-375 (in Chinese)
- [171] 刘影, 马海霞, 杨信东. 用EXCEL中的VBA编写植物病害流行学常用程序软件包[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(4): 436-441, 476
- Liu Y, Ma H X, Yang X D. Using VBA to program the common procedures package in plant diseases epidemiology on EXCEL [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30(4): 436-441, 476 (in Chinese)
- [172] Tan W Z, Li C W, Bi C W, Sun X C. A computer software: Epitimulator[®] for simulating temporal dynamics of plant disease epidemic progress[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(2): 242-248
- [173] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于大力发展智慧农业的指导意见[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/SCYJJXXS/202410/t20241025_6465040.htm
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Guidance of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on promoting smart agriculture development[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/SCYJJXXS/202410/t20241025_6465040.htm (in Chinese)
- [174] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于印发《全国智慧农业行动计划(2024-2028年)》的通知[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/SCYJJXXS/202410/t20241025_6465041.htm
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Circular of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on printing and distributing national smart agriculture action plan (2024-2028)[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/SCYJJXXS/202410/t20241025_6465041.htm (in Chinese)
- [175] 中共中央, 国务院. 加快建设农业强国规划(2024-2035年)[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.gov.cn/zhengce/202504/content_7017469.htm
- The Central Committee of the Communist Party of China, the State Council of the People's Republic of China. Plan to accelerate building up strength in agriculture (2024-2035)[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.gov.cn/zhengce/202504/content_7017469.htm (in Chinese)
- [176] 王海光, 马占鸿, 黄冲. 植物病害管理与生物安全[J]. 植物保护, 2007, 33(3): 1-7
- Wang H G, Ma Z H, Huang C. Plant disease management and biosafety[J]. *Plant Protection*, 2007, 33(3): 1-7 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 王海光, 博士, 副教授, 主要从事植物病害流行学和宏观植物病理学研究。以第一或通讯作者发表SCI/EI检索论文40余篇, 获得授权专利9项和计算机软件著作权登记4项, 主编、主译、副主编、参编教材10余部; 主持或参加国家自然科学基金项目、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目、公益性行业(农业)科研专项经费项目、国家重点研发计划项目等多项; 获得中国植物保护学会青年科技奖、中华农业科技奖优秀创新团队奖、神农中华农业科技奖科学研究类成果三等奖、大北农科技奖成果奖二等奖等科研奖励。