

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2023.03.002

我国玉米南方锈病发生流行现状及绿色防控策略

王文宝¹, 马子慧¹, 陈德智¹, 田红琳²,
李鸿², 方安菲¹, 王静¹, 田斌年¹,
余洋¹, 毕朝位¹, 周茂林², 杨宇衡¹

1. 西南大学 植物保护学院, 重庆 400715;

2. 重庆市农业科学院 玉米研究所, 重庆 401329

摘要: 玉米南方锈病是严重影响我国玉米生产的真菌病害。绿色防控作为新兴的建立在农田生态系统整体上的农业病虫害管理方式, 近年来已成为研究和应用的热点。目前对玉米南方锈病的绿色防控技术已有使用, 但较为零散不成体系。为系统了解玉米南方锈病绿色防控领域的研究现状和未来趋势, 本文介绍了我国玉米南方锈病的发生状况, 系统阐述了防控玉米南方锈病绿色防控手段, 包括监测预警、抗病种质与基因、生态调控以及生物防治, 并对玉米南方锈病潜在绿色防控手段进行展望, 明确了绿色防控技术应用前景, 以期对玉米南方锈病绿色防控体系的构建提供思路。

关键词: 玉米南方锈病; 监测预警; 生物防治;

抗病种质与基因; 生态调控

中图分类号: S435.131.4

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2023)03-0016-15

Study on the Epidemic Status of Southern Corn Rust and Green Prevention and Control Strategies

WANG Wenbao¹, MA Zihui¹, CHEN Dezhi¹, TIAN Honglin²,
LI Hong², FANG Anfei¹, WANG Jing¹, TIAN Binnian¹,
YU Yang¹, BI Chaowei¹, ZHOU Maolin², YANG Yuheng¹

1. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Corn Research Institute, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China

收稿日期: 2023-05-01

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展重点项目(CSTB2022TIAD-LUX0004)。

作者简介: 王文宝, 硕士研究生, 主要从事植物资源利用与植物保护研究。

通信作者: 杨宇衡, 博士, 副教授。

Abstract: Southern corn rust (SCR) is a fungal disease that significantly impacts corn production in China. In recent years, green prevention and control based on the entire farmland ecosystem has emerged as a promising agricultural pest management method. Currently, a series of green prevention and control technologies for SCR have been used, but they are fragmented and lack a systematic approach. This paper aims to systematically understand the current research status and future trends in the field of green prevention and control of SCR. To achieve this purpose, in this paper, the occurrence situation of southern corn rust disease in China was introduced, and the green prevention and control measures of southern corn rust disease were systematically expounded, including monitoring and early warning, disease-resistance germplasm and genes, ecological regulation, and biological control methods. Additionally, this paper outlines potential green prevention and control methods for SCR and clarifies the application prospect of green prevention and control technology, in order to provide reference information for the establishment of a green prevention and control system for SCR.

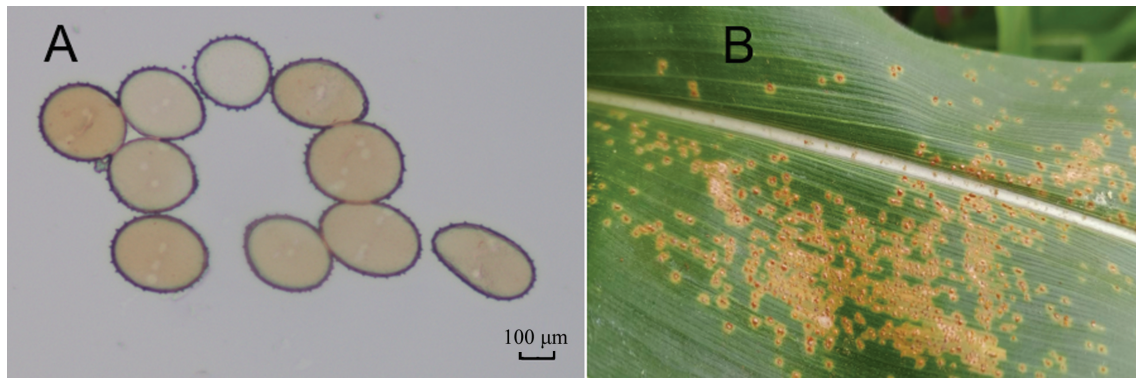
Key words: southern corn rust; monitoring and early warning; biological control; disease-resistant germplasm and genes; ecological regulation

玉米(*Zea mays*)是重要的农产品,在原料、牲畜饲料、人类食品和生物燃料等方面发挥着重要的经济作用.玉米南方锈病是影响玉米产量的主要病害之一,自1970年在我国海南省发现以后,迅速向大陆蔓延.近年来已经在许多省份暴发,特别是黄淮海玉米产区和南方玉米产区,对我国玉米产量以及品质造成了巨大威胁,逐渐由次要病害上升到主要病害,且有不断向北蔓延的趋势^[1-2].为贯彻“绿色植保”方针,本文就我国玉米南方锈病的危害现状及其监测预警、绿色防控、抗病种质和基因、生态调控以及生物防治等技术进行综述,并以此提出绿色综合防治措施,为我国玉米南方锈病绿色防控体系的构建提供参考.

1 玉米南方锈病的流行及危害

1.1 玉米南方锈病概况

由多堆柄锈菌(*Puccinia polysora*)引起的玉米南方锈病(Southern Corn Rust, SCR)是我国玉米锈病主要类型之一^[3].多堆柄锈菌隶属于锈菌目柄锈菌属,在高温高湿条件下,其夏孢子通过风雨传播侵染玉米地上部组织,主要为害叶片,严重时也侵染茎秆、苞叶和雄穗^[4].夏孢子落到叶片后在合适条件下开始萌发产生菌丝,菌丝由细胞间隙或孔口侵入叶片组织中,也可通过菌丝顶部破开表皮细胞,直接侵入^[5].侵染定殖之后,在受害部位产生密集橘黄色夏孢子堆,椭圆至圆形,直径0.2~0.8 mm(图1).发病初期为黄色小点,1~2 d后黄点长出丘疹状隆起,3~5 d后破裂散发夏孢子.夏孢子为卵形或椭圆形单孢,长短直径为(27~31) μm × (33~39) μm ,淡黄色到金黄色,上有细突起(图1).玉米南方锈病属于典型的多循环病害,在一个生长季节内可发生多次再侵染.田间自然发病,玉米下部叶片最早开始出现病害症状,随后逐渐向新叶蔓延.若感染感病品种,会在叶片上产生大量孢子堆,影响叶片光合作用的同时,大量消耗叶片营养,导致叶片干枯,植株早衰,灌浆期籽粒灌浆不足,产量降低^[6-7].



A 为玉米南方锈菌夏孢子；B 为玉米南方锈病田间为害状

图1 玉米南方锈病为害状

P. polysora 是 1897 年 Underwood 首次在美国阿拉巴马州采集的鸭茅状摩擦禾 (*Tripsacum dactiloides*) 标本上发现并命名^[8]。事实上, 早在其命名之前的 1879 年就有人发现玉米南方锈病在中美、南美洲以及美国部分州广泛传播^[9]。早期玉米南方锈病主要发生在热带、亚热带地区, 1941 年之前在西半球没有相关报道, 但 1879 年在植物标本馆的一件样本中检测出含有病原体, 表明在此之前玉米南方锈病就已经存在^[10]。

目前, 随着全球温度上升以及多堆柄锈菌生理小种进化, 该菌在高纬度地区逐渐流行。在我国玉米南方锈病的发生为害已经超越玉米普通锈病^[11], 鉴于该病害发生之广、损失之重, 于 2023 年由中华人民共和国农业农村部确立将其新增到《一类作物病虫害名录》中^[12]。

1.2 我国玉米南方锈病发生流行现状

亚洲最早出现报道是在 1953 年, 该病在菲律宾暴发造成了 80%~84% 的损失^[13]。4 年后, 印度南部开始小范围发生^[14], 随后向亚洲腹地蔓延。我国最早是 1970 年在海南西南部乐东县发现, 随后几年内向东及北传播, 先后在海南省三亚市和陵水县被报道^[15]。大陆最早于 1997 年在浙江淳安县发现秋玉米田感染该病, 发病面积达 1 333.3 hm², 占全县秋玉米种植面积的 22.1%, 平均损失 375 kg/hm²。1998 年在山东大部分地区和河北邯郸、沧州两市暴发^[16], 造成减产一般为 20%~30%, 重者达 80% 以上, 甚至绝收。随后发病面积逐年增加, 发病时间也逐渐提前, 于 1999 年发现感染春玉米。2004 年在河南省暴发, 发生面积达 78.52 万 hm², 占全省玉米播种面积的 32.7%^[17]。随后玉米南方锈病向全国各种植区蔓延, 发病程度也越发严重。据资料显示, 黄淮海玉米产区 2012 年平均发病级别在 3 级, 2013 年平均发病等级达到 5 级, 2015 年大暴发, 平均发病等级 5~7 级, 造成了极大损失^[18]。2021 年受台风登陆影响, 黄淮海地区病田率达 100%, 病叶率和病株率均在 70% 以上, 严重地块病叶率达 100%^[19]。根据相关统计, 截至 2021 年, 我国已有 23 省有玉米南方锈病为害报道^[20] (图 2)。

1.3 我国主栽玉米品种抗病现状

Ramirez-Cabrald 等通过气候数据建立 CLIMEX 模型, 预测了 2050 年和 2100 年玉米南方锈病在全世界的发生情况, 其指出到 2100 年玉米南方锈病有由南向北蔓延的趋势, 2050 年左右高风险区主要集中在中国西南地区、非洲南部和南美洲东南地区^[11]。我国情况不容乐观, 目前最为有效且经济的方法是栽培抗病品种。近年来我国科研工作者也在对我国主要栽培品种进行抗性鉴定、品种间抗性差异分析从而减轻我国玉米南方锈病防控压力。2004 年, 吕印谱等对河南周口市和商丘市共计 66 个玉米栽培品种进行抗玉米南方锈病调查, 其中有 14 个品种表现

出抗性^[21]. 2008—2010年3年间,黄飞燕对国家种质资源库收藏的1136份玉米种质资源进行人工接种条件下玉米南方锈病抗性鉴定,其中高抗、抗、中抗、感和高感的比例分别为2.46%, 7.13%, 29.93%, 36.79%和23.68%^[22]. 2009—2010年两年间,袁虹霞等对河南省主栽19个玉米品种进行鉴定,明确了19个玉米品种对南方锈病抗性水平,其中仅有3个品种抗性较强^[23]. 2011年,程平等对安徽省60个玉米品种进行田间自然诱发鉴定,结果表明60个预试玉米品种中,71.7%不同程度的抗南方锈病,21.6%不抗^[24]. 2008—2012年,江凯等通过高病害压力和连续多年的鉴定,在1589份玉米种质中鉴定出的抗性材料占10.26%,感病材料占65.7%^[25]. 陈文娟等在我国南方(广西南宁)和北方(北京昌平)对903份种质资源进行平均抗性研究,其中抗性种质占15.2%^[26]. 王睿等对33个玉米品种接种贵州和广西混合菌种,结果表明,仅有“登海605”品种表现高抗^[27]. 鄢洪海等2014—2016年连续3年定点调查山东省主导品种共计19种,其中2015年病害流行较其余两年严重,同一品种不同年份表现出的抗性存在差异,如“登海605”在2014年和2016年表现高抗,2015年则表现抗性;“郑单958”品种在2015年抗性表现为高感,2014年和2016年为中抗^[28]. 晏卫红等2016—2019年对62个拟引种广西的玉米品种进行6种主要病害的抗病性鉴定,其中中抗以上的品种比例只有30.6%^[29]. 黄莉群等在85个玉米品种上接种了来自海南三亚、广东河源、广西河池和湖南邵东4个地区的玉米南方锈菌菌株,调查田间抗病性. 供试品种中,表现为高抗、中抗和感病的品种百分比分别为10.59%, 22.35%和67.06%^[30]. 另外,相同品种对不同地区菌株的抗性水平也存有差异. 在此基础上,把6个来源不同的菌株接种到28个玉米品种上,研究其寄生适合度. 结果表明,玉米南方锈菌存在致病性分化,不同来源菌株在同一玉米品种上致病差异明显;相同来源菌株在不同玉米品种间寄生适合度也有所不同^[31].

总而言之,我国主栽玉米品种数量较多,但其中抗玉米南方锈病的品种占比较少,高抗品种更是少之又少,在不同地方均表现出高度抗性的资源十分匮乏. 前文提到的团队在大量玉米品种的鉴定中,最后得到的抗病品种,大部分重合,近几年对抗性材料的研究报导也较少,需加快研究. 目前就玉米南方锈病抗病品种而言,面临着两大挑战:一是不同菌株之间致病性不同,需要兼具更多菌株抗性;另一个则是由于生理小种进化,克服了抗病品种抗性,引起抗病品种抗性丧失. 今后需要多抗性基因进行组合,开发不同抗病机制品种.

2 农作物病虫害绿色防控发展现状

2.1 绿色防控定义与内涵

绿色防控是以促进农作物安全生产、减少化学农药使用量为目标,采用生态调控、生物防治、物理防治,结合科学、安全、合理使用农药等技术,来控制有害生物的有效行为^[32]. 绿色防控注重农产品质量安全和农业生态环境安全,偏向于优先采用各项生态控害措施,创造促进作物健康生长、不利于病虫害发生的环境条件,结合科学、合理的药物防治,在有效防治病虫害的同时,不断提高农业生产经济、社会和生态效益^[33].

绿色防控对保障我国农业生产安全和农产品质量安全有重大意义. 绿色防控技术注重保护生物多样性,可以减少病虫害的暴发,实现对病虫害的可持续管理,同时可以减少病虫害为害损失,保障农产品产量安全. 大规模推广绿色防控技术,可以促进农产品标准化生产,提升农产品质量安全,增加市场竞争力,增加农民收入. 绿色防控技术可以取代高毒、高残留化学农药使用,在保障人畜健康的同时,还减少农业面源污染,有助于保护农业生态环境^[32].

2.2 绿色防控主要技术

1) 生态调控技术. 以推广抗病虫品种为核心, 优化作物布局, 改善栽培措施, 并结合农田生态工程对生物多样性进行调控与天敌生物保护利用等, 人为提高作物抗害能力.

2) 生物防治技术. 利用生物种间相互关系, 以一种或一类生物抑制另一种或另一类生物. 主要包含以虫治虫、以菌治菌、以菌治虫、牧鸡牧鸭等技术, 并基于相互关系开发的植物源农药、植物诱抗剂等生物生化制剂应用.

3) 理化诱控技术. 利用昆虫的趋光、趋化等特性, 布置诱虫光源、色板、昆虫信息素、食饵等实现对害虫的诱集、诱杀.

4) 科学用药技术. 推广环境友好型高效低毒农药, 配套使用精准施药、不同作用机制农药交替使用、安全间隔及剂量等技术^[34].

2.3 我国绿色防控现状与制约因素

自2006年起, 全国农业技术推广服务中心在全国开展了绿色防控技术示范、推广工作. 截至2022年, 全国农作物病虫害绿色防控应用面积达到0.7893亿 hm^2 , 绿色防控覆盖率达52.07%^[35]. 但推广过程中仍面临一些问题而制约着绿色防控的发展^[36]: ①绿色防控宣传度不高, 一些农业参与者对绿色防控概念认识不到位, 认为绿色防控即采用非化学农药手段控制病虫害, 因而实施过程中盲目排斥使用化学农药. ②使用的绿色防控技术缺乏系统性、科学性, 单纯堆砌绿色防控技术或者只单独使用一两个技术, 没有考虑针对特定病虫害而建立合适的绿色防控体系. 因为适用性强的关键绿色防控技术较少, 技术集成水平较低, 针对不同农作物绿色防控技术规程欠缺. ③农户参与度不高, 社会资本投资意愿较弱. 主要因为绿色防控农产品社会认知度较低, 未在社会上引起广泛共识, 且相比普通农产品没有价格优势, 所以很难在市场调节下引入资本投入.

3 玉米南方锈病的绿色防控策略

3.1 抗病种质资源筛选

多年以来, 我国科研工作者通过大量筛选和鉴定, 获得了一批遗传多样且抗性相对稳定的优质种质资源. 1991年, 山东省农业科学院以外引种质“78599”为基础选育出优良自交系“齐319”, 并组配出高抗玉米南方锈病并兼抗多种病害的鲁单系玉米杂交种^[37]. 2004年陈翠霞等对14个玉米自交系接种了多堆柄锈菌, 再次验证了自交系“齐319”的高抗性^[38]. 黄飞燕在国家玉米种质资源库1136份材料中筛选出了抗病自交系“辽2202”“辽2204”“遵90110”等共计28份高抗品种^[22]. 江凯等对1589份种质经2~3年重复鉴定, 获得表现出稳定的高抗水平材料“赤556”“SW-113”“小白籽”“A101”等共26份^[25]. 陈文娟等从903份材料中获得了“丹3130”“164”“冀186”等8份高抗材料^[26]. 任转滩从127份来自CIMMYT种质中筛选出“CML311”“CML246”等8份对锈病免疫的种质资源^[39]. 冒宇翔等从184份玉米自交系中筛选出“K22”“T2”等18份高抗系^[40]. 以国外玉米杂交种“M119”为基础材料选育的优良玉米自交系“浚M9”综合抗病性强、配合力高. 以“浚M9”为基础材料, 构建高抗南方锈病的父本群体, 选育出的“浚96”“浚M97”“浚M98”不仅高抗南方锈病, 还兼抗镰孢茎腐病、小斑病等常见玉米病害^[41]. 以高抗锈病、高抗倒伏自交系“LG311”为母本、自交系“LA7359”为父本杂交选育而成的“隆平243”, 具有稳产、适应性强、高抗南方锈病等优点^[42]. 除科研院所和高校外, 许多种业公司也自主选育构建出了许多优良抗病品系.

3.2 抗病基因发掘

未来几十年玉米南方锈病发生趋势是越来越严重^[11],我国玉米抗病育种工作将面临严峻的考验.目前已有较多科研工作者对玉米南方锈病抗病基因进行了定位.近年来国内外已经鉴定完成的抗病基因包括:抗不同南方锈病生理小种的基因 $Rpp1 \sim Rpp11$ ^[43-44],显性单基因 $RppQ$ ^[45-46], $RppP25$ ^[47-48], $RppD$ ^[49], $RppC$ ^[50], $RppS$ ^[51], $RppM$ ^[52], $RppCML496$ ^[53],以及 $RppS$ 的等位基因 $RppK$ ^[54].除此之外,一些抗南方锈病的数量性状位点被报道,且多数主效 QTL 都定位在 10 号染色体上.艾堂顺等精细定位到主效抗病位点 $qSCR10.01$ ^[55].陈文娟等成功定位到了位于 10 号染色体上的 $qSCR10$ ^[56].王兵伟等对热带高抗玉米南方锈病材料“S313”进行 QTL 定位,筛选出了 3 个抗病候选基因^[57].路璐定位到 1 个新的主效抗性位点 $qSCR6.01$ ^[58].另外除了抗病基因,相对应的无毒基因也在逐渐被发掘:Deng 等从 *P. polysora* 的田间分离株中发现了 $RppC$ 的同源无毒基因 $AvrRppC$ ^[59].Chen 等通过 R 蛋白与 Avr 蛋白识别会诱发过敏性坏死(HR),发现了编码 AvrRppK 蛋白的基因 $PPG1259$ ^[54].抗病基因蕴含的分子生物学信息,除了有助于人们对抗病机理更深层次的理解外,还可以运用到抗病遗传、辅助育种、作物改良等诸多领域.

3.3 监测预警技术

3.3.1 遥感技术

高光谱遥感技术(hyperspectral remote sensing).高光谱遥感图像可以用于检测作物的健康状态.病虫害会对作物的生长状况和叶片颜色产生影响,因此,通过分析光谱图像中的叶片反射率,可以检测出植物的受损程度和病虫害的类型^[60-61].高光谱技术在玉米南方锈病识别上已有应用,Gao 等研究收集太阳照射下的全范围高光谱数据(350~2 500 nm),收集了不同病害严重程度、测量高度和叶片曲率(叶片表面光滑度)下太阳照射下光谱(SCUSI).选取 81 个指标作为 SCR 分类的候选指标,对病害严重程度、高度和叶片曲率的敏感性进行方差分析(ANOVA).结果表明,光化学反射率指数(PRI)是基于 SCUSI 进行 SCR 分类的最优指标,混合样本的总体准确率为 81.30%^[62].

热红外遥感技术(thermal infrared remote sensing).热红外遥感可以用于检测植物的生长过程中的温度分布.当植物受到病虫害的攻击时,它们的生长情况和温度分布通常会发生变化.通过分析热红外图像,可以检测出这些变化并识别出病虫害^[63-66].

合成孔径雷达技术(synthetic aperture radar, SAR).合成孔径雷达技术可以穿透植物表面,获取到植物内部的信息,从而检测出病虫害的类型和程度.SAR 图像可以用于监测作物的生长状况、叶片结构和植物的水分状况等,且不受天气和时间的限制,可以在白天和夜间,甚至在云层和雨雪天气下获取高分辨率的遥感图像^[67-69].

热红外技术和 SAR 虽在 SCR 上没有直接应用,但在其他作物病害识别及监测上已取得优秀应用成果^[70-72],可以借鉴应用.同时,单个技术的使用往往存在局限性,如高光谱技术易受天气影响,热红外受环境温度限制等.多技术结合使用可以做到取长补短,增加识别或预测准确率.

3.3.2 孢子捕捉技术

玉米南方锈病是通过夏孢子进行传播,孢子捕捉技术是一种用于监测大气中微生物孢子浓度的技术.该技术使用特殊的设备收集和分析空气中的孢子,以确定其数量和种类.气传病害的发生与侵染源散发的初始孢子量有关^[73-74],对植物冠层中的病菌孢子进行早期捕捉、计数及

分析可以准确预测和分析病害的始发期和未来几个潜育期后病害的发生量^[75-76]。随着科学技术发展,传统人工捕捉仪器和分析的方法逐渐被兼具孢子自动捕捉、拍照及分析的智能仪器取代。智能捕捉仪完成捕捉任务后,借助显微成像系统,可将仪器监测的孢子图片经质量筛选后,通过无线设施上传至终端的云服务器,由 AI 完成统计与分析^[77]。王晓鸣等对 11 省份病菌不同地理种群遗传相关性解析,研究多堆柄锈菌夏孢子生物学特性、结合病害突发性与热带气旋活动相关性分析直接证明我国不同地区玉米南方锈病初侵染的直接来源。引起黄淮海夏玉米区、辽宁以及福建、浙江地区以及广东春季南方锈病的菌源来自台湾省。引起广东、广西及海南南方锈病的是来自菲律宾的病菌。云南、贵州等西南地区的南方锈病初侵染源从泰国等东南亚国家由西南季风传播的病菌,其他地区的初侵染源主要由不定期形成的西太平洋热带气旋所携带^[78](图 2)。可以在玉米南方锈病传播途径和流行区域设立孢子捕捉仪,在完成侵染前作出预警。



基础地图来自中国标准地图服务网,审图号:GS(2019)1828 号

图 2 我国玉米南方锈病发病省份及菌种来源

3.4 生态调控技术

3.4.1 选用抗病品种

因地制宜选择适宜抗病品种是生态调控常用手段,是防治玉米南方锈病最经济也是最有效的手段^[17, 21]。我国主栽玉米品种中,“登海 605”“丹 3130”“冀 186”“CML311”“CML246”“K22”“T2”“赤 556”“SW-113”“小白籽”“A101”“隆平 243”及“浚 M9”系列等都是优良高抗品系,值得推广合理搭配使用。

3.4.2 加强田间管理

正确的田间管理方式可以显著提高玉米抗性^[79]。合理调节氮、磷、钾肥的施用,根据不同

生育期玉米对氮、磷、钾的需求量,采用分段施肥的方法,适时适量地补充养分,增强玉米抗病虫害性。例如,在玉米生长初期,氮素的供应可以适量增加,以促进植株生长;到了抽雄期和灌浆期,适当增加磷、钾肥的施用,有利于提高籽粒产量和品质。SCR 通过夏孢子传播^[15],在田间需及时摘除病叶,避免成熟夏孢子在田间再侵染。注意田间水分情况,开沟排涝避免积水,干旱时引水浇灌,防止出现旱灾^[21]。

3.4.3 调整栽培模式

董佳玉等通过种植农艺性,状相似但对抗感性不同的玉米品种,将抗性品种“登海 605”种植在田块外围构成保护行中间种植感病品种,在一定程度上降低玉米南方锈菌对田块内感病玉米品种的侵染^[80]。合理的混种方案可以实现与种植抗性品种相同的病害防控效果,将高感、中感和两个中抗品种进行混种栽培。结果表明混种栽培的平均病情指数均低于单个感病品种,且混种品种越多,平均病情指数越接近单个抗病品种种植平均病情指数,抗、感品种各占 50%左右的混种方案效果最为突出^[81]。在难以大面积使用抗病品种的地区,可采用这两种方法实现对 SCR 控害。推广玉米大豆复合种植,不仅可以提高土地利用率和经济效益,玉米和大豆具有不同的病虫害,通过复合种植可以减少害虫和病菌的传播,减少农药使用,降低生产成本^[82-83]。

3.5 生物防治技术

3.5.1 以菌治菌

Sphaerellopsis (有性态 *Eudarluka*) 是一类寄生性真菌,与其他寄生菌不同的是,其寄主是另外一类真菌——锈菌,因其具有潜在生物防治锈菌的作用而广受关注^[84-86]。Zapata 等观察到 *S. macroconidialis* 的菌丝缠绕玉米南方锈病菌夏孢子萌发产生的芽管上并对芽管产生破坏,该菌在全世界范围内分布广泛,可作为生防菌开发使用^[87]。

部分微生物在生长发育过程中会产生一些抑制其他微生物发育的次生代谢物,有被开发为生物制剂的潜力。孙志强等研究获得了一株具有潜在生防作用真菌,其代谢物对玉米南方锈菌的孢子萌发制率达到 90%以上^[88],有良好的应用前景。赵晨晨等从玉米上分离鉴定的内生细菌——蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*),在“先玉 335”“银糯 1 号”“浚单 20”上对 SCR 的防效达 39.2%~92.1%(平均为 65.7%),可直接开发利用^[89]。

3.5.2 以虫治菌

取食真菌在双翅目幼虫上很常见,大多以大型肉质真菌菌丝或子实体为食^[90-91]。其中只有极少数以特异性真菌为食,如隶属于瘿蚊科的 *Cecidomyiidae mycodiplosis*,其幼虫主要以锈菌和白粉菌为食^[92, 93]。另外 Silva 通过实验证实蠼螋(*Doru luteipes*)会取食玉米叶片上的南方锈菌孢子堆,玉米叶片上多堆柄锈菌夏孢子量因取食而显著降低^[94]。*D. luteipes* 在全世界分布广泛,作为天敌生物防治玉米南方锈病有良好的应用前景。

因地制宜合理使用以上玉米南方锈病绿色防控手段,根据当地环境、气候条件等选择适宜的绿色防控技术,组建以病情监测预警网络、抗病品种选育和推广、生态调控手段和生物防治技术相结合的绿色防控技术体系(图 3)。对玉米种植区涉农人员进行绿色防控技术培训,建立示范区并推广技术应用规模,以实现玉米南方锈病绿色防控目的。并以绿色防控体系理论为基础,拟出玉米南方锈病绿色防控技术规程,指导并规范技术应用。



图3 玉米南方锈病绿色防控

4 展望

在相关报道中,有许多技术具有玉米南方锈病绿色防控潜力,但还需进一步开发.在上文提到的生物防治手段中,除了以菌治菌和以虫治菌外,一类可以感染真菌的病毒也有潜在的绿色防治价值,即将感染了病毒的真菌去感染寄主,患病真菌致病性降低而使寄主发病较轻或者不发病.但是由于真菌繁殖速度很快,这些携带病毒的真菌在经过数代繁殖以后,病毒量会减少甚至消失,因而以病毒治菌的稳定性饱受争议^[95-97].基于此问题,Liu等创新性地给出了解决方案——将番茄匍柄霉叶斑病菌真菌病毒基因 *ORF3* 整合在匍柄霉基因组上,改良后的真菌感染寄主后能显著提高寄主对匍柄霉强毒菌株的抗性,使其由致病菌转变为生防菌^[98].目前许多锈菌上都发现了锈菌病毒,如小麦条锈菌上的 *Puccinia striiformis* virus 1~5 (PsV1~5)^[99-100],玉米普通锈菌上也有发现^[101],玉米南方锈菌上暂未有报道;后续若发现玉米南方锈菌病毒,可借鉴此方法对进行真菌改良.

植物局部组织受到侵染时,会在局部组织中诱发植物抗性,而这种抗性可以随着植物自身复杂的信号途径,如水杨酸(salicylic acid)途径、茉莉酸(jasmonic acid)、羟基肉桂酸酰胺(Hydroxycinnamic Acid Amide)、甘油-3-磷酸(glycerol-3-phosphate)途径等进行远距离传递^[102-105].通过诱导植物抗性来保护植物免受病原物入侵有着巨大的应用前景,因而催生了植物免疫诱抗剂——外源使用诱导植物产生免疫反应的物理、化学因子(免疫诱导子)或病原物(免疫诱导菌).遗憾的是虽在玉米病害上有免疫诱抗剂的使用^[106],但没有涉及SCR方面的研究,玉米和其他作物在免疫上没有本质区别,可借鉴其他作物上的免疫诱抗剂原理进行玉米诱抗剂的开发.木霉菌(*Trichoderma asperellum*)是生产上常用的免疫诱导菌,其定植寄主后不仅可以抑制其他病原菌活性,还可以促进植物生长和根系发育、提高作物产量并诱导寄主抗病性,在许多作物上使用对病害防控和作物增产都有着不错的效果^[107-109],在玉米病害如玉米纹枯病、大小斑病、叶枯病等及其他作物锈病上都有着十分显著的防治效果^[110-112],在玉米南方锈病上防治上可尝试使用.蜡样芽孢杆菌是一种玉米内生细菌,用其悬浮液处理的玉米种子在

发芽率、同时期株高、地上地下部干质量等方面都显著高于对照组,同时在大田条件下,自然感染 SCR 发病率也显著低于对照组^[89]。

幽灵技术是一种利用温和手段诱导细胞形成扩散孔,清理内容物后形成仍有免疫活性的3D结构腔,其最早在人体医学上用于药物运输、免疫应用等^[113-115]。通过幽灵技术把活细胞变为有免疫活性的幽灵细胞,可用于激活免疫反应。植物有着和有动物类似的免疫系统,在植物上也有类似实验^[116-118]。El-Baky 等通过随机化实验设计(Plackett-Burman)绘制的黄曲霉和尼日尔曲霉幽灵产生的最佳条件,用于制备真菌幽灵,并用制备的幽灵真菌感染体外培养的荷荷巴(Jojoba)组织,在第5d和第10d均无观察到感染^[118],表明该项技术在农业病害绿色防控上有良好的应用前景,值得进一步开发。

大数据技术在处理如农田环境数据、作物生长数据、气象数据、土壤数据、病害分级等样本量大的数据时,可快速完成对数据的管理、处理和分析。可借助如分布式计算、云计算、机器学习、人工智能等技术和工具对各种数据进行分析 and 挖掘,从中发现与作物病害相关的模式和规律,建立监测作物病害的模型^[119]。利用监测数据和建立的模型,进行实时预警,通过可视化的方式展示监测结果,及时发现作物病害并采取相应措施^[120-123]。

5 结语

本文综述了目前我国玉米南方锈病的发生情况及绿色防治的可行手段,旨在贯彻落实“预防为主,综合防治”植保方针和“公共植保,绿色植保”的植保理念,对玉米南方锈病绿色防控技术集成创新。但是每一种技术都有优缺点,单独使用都很难控制住病害。因此,建立抗病育种、监测预警、生态调控和绿色防治措施相结合的玉米南方锈病综合绿色防控体系,是对玉米南方锈病进行绿色管理的最佳手段,也是我国病虫害管理的大势所趋。

参考文献:

- [1] 汪诗华,胡务义,丰玉成,等. 玉米南方型锈病的发生与防治技术 [J]. 农业科技通讯, 2003(2): 32-33.
- [2] 梁克恭,武小菲. 我国玉米锈病的发生与为害情况 [J]. 植物保护, 1993, 19(5): 34.
- [3] HOOKER A L. Corn and Sorghum Rusts [M]//Diseases, Distribution, Epidemiology, and Control. Amsterdam: Elsevier, 1985: 207-236.
- [4] BREWBAKER J L, KIM S K, SO Y S, et al. General Resistance in Maize to Southern Rust (*Puccinia polysora* Underw.) [J]. Crop Science, 2011, 51(4): 1393-1409.
- [5] 江凯,段灿星,武小菲,等. 多堆柄锈菌侵染玉米的细胞学及超微结构特征 [J]. 植物保护学报, 2015, 42(6): 877-883.
- [6] FUTRELL M C. Maize associated with cropping [J]. Phytopathology, 1975, 65: 1040-1042.
- [7] RODRIGUEZ-ARDON R, SCOTT G E, KING S B. Maize Yield Losses Caused by Southern Corn Rust1 [J]. Crop Science, 1980, 20(6): 812-814.
- [8] UNDERWOOD L M. Some New Fungi, Chiefly from Alabama [J]. Bulletin of the Torrey Botanical Club, 1897, 24(2): 81.
- [9] KRATTIGER A, KULISEK E S, CASELA C R. Diagnosis maize diseases with proprietary biotechnology applications transferred from Pioneer Hi-bred International to Brazil and Latin America [J]. ISAAA Briefs, 1998, 9: 1-4.
- [10] CUMMINS G. Identity and Distribution of Three Rusts of Corn [J]. Phytopathology, 1941, 31(9): 856-857.
- [11] RAMIREZ-CABRAL N Y Z, KUMAR L, SHABANI F. Global Risk Levels for Corn Rusts (*Puccinia sorghi*

- and *Puccinia polysora*) under Climate Change Projections [J]. *Journal of Phytopathology*, 2017, 165(9): 563-574.
- [12] 中华人民共和国农业农村部. 《一类农作物病虫害名录(2023年)》[A/OL]. (2023-03-07)[2023-05-03]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202303/t20230314_6422981.htm.
- [13] REYES G M. An Epidemic Outbreak of the Maize Rust in Eastern and Central Visayas, Philippines[J]. *Philipp J Agric*, 1953, 18(1-4): 115-128.
- [14] PAYAK M M. Interception of *Puccinia polysora* Southern Rust of Maize in India[J]. New Delhi: National Bureau of Plant Genetic Resources, Indian Agricultural Research Institute, 1992, 23: 1-5.
- [15] 段定仁, 何宏珍. 海南岛玉米上的多堆柄锈菌 [J]. *真菌学报*, 1984, 3(2): 125-126.
- [16] 刘玉瑛, 石洁, 王庆雷. 1998年河北省发生南方型玉米锈病 [J]. *植物保护*, 1999, 25(3): 56.
- [17] 任转滩, 马毅, 任真真, 等. 南方玉米锈病的发生及防治对策 [J]. *玉米科学*, 2005, 13(4): 124-126.
- [18] 刘杰, 姜玉英, 曾娟, 等. 2015年我国玉米南方锈病重发特点和原因分析 [J]. *中国植保导刊*, 2016, 36(5): 44-47.
- [19] 赵猛. 2021年黄淮海地区玉米南方锈病发生情况和为害损失调查 [J]. *农业科技通讯*, 2022(7): 118-120.
- [20] SUN Q Y, LI L F, GUO F F, et al. Southern Corn Rust Caused by *Puccinia polysora* Underw: a Review [J]. *Phytopathology Research*, 2021, 3(1): 1-11.
- [21] 吕印谱, 宋宝安, 李传礼, 等. 河南省 2004 年夏玉米锈病发生原因及防治对策 [J]. *中国植保导刊*, 2005, 25(11): 15-17.
- [22] 黄飞燕. 玉米对南方锈病抗性资源筛选及抗病特征 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.
- [23] 袁虹霞, 邢小萍, 李朝海, 等. 不同玉米品种对南方锈病的抗性比较 [J]. *玉米科学*, 2010, 18(2): 107-109.
- [24] 程平, 汪琪. 安徽省玉米南方锈病的抗性鉴定 [J]. *农业灾害研究*, 2011, 1(2): 21-22, 54.
- [25] 江凯, 杜青, 秦子惠, 等. 玉米种质资源抗南方锈病鉴定 [J]. *植物遗传资源学报*, 2013, 14(4): 711-714.
- [26] 陈文娟, 李万昌, 杨知还, 等. 玉米抗南方锈病种质资源初步鉴定及遗传多样性分析 [J]. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(2): 225-231, 242.
- [27] 王睿, 刘金平. 几个玉米品种抗锈病的分析与鉴定 [J]. *农业科技通讯*, 2019(2): 140-143.
- [28] 鄢洪海, 王琰, 张茹琴, 等. 山东省玉米主导品种抗南方锈病鉴定及对灾情的影响 [J]. *玉米科学*, 2019, 27(6): 175-180.
- [29] 晏卫红, 覃嘉明, 李焜华, 等. 同一适宜生态区拟引种广西的玉米品种抗病性鉴定与分析 [J]. *玉米科学*, 2022, 30(1): 166-171.
- [30] 黄莉群, 马玥, 戚新蕾, 等. 玉米品种对不同地区玉米南方锈菌的抗性评价 [J]. *作物杂志*, 2021(6): 205-210.
- [31] 黄莉群, 张克瑜, 李磊福, 等. 玉米南方锈菌在玉米品种上的相对寄生适合度研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(11): 1-9.
- [32] 杨普云, 熊延坤, 尹哲, 等. 绿色防控技术示范工作进展与展望 [J]. *中国植保导刊*, 2010, 30(4): 37-38.
- [33] 赵中华, 尹哲, 杨普云. 农作物病虫害绿色防控技术应用概况 [J]. *植物保护*, 2011, 37(3): 29-32.
- [34] 农业部办公厅印发《关于推进农作物病虫害绿色防控的意见》[J]. *中国植保导刊*, 2011, 31(6): 5-6.
- [35] 全国农业技术推广服务中心. 全国农技中心组织召开 2022 年全国农作物病虫害防控工作总结及绿色防控视频会议[R]. 2022-12-26.
- [36] 欧高财, 郑和斌, 任凡, 等. 农作物病虫害绿色防控发展制约因素及解决对策 [J]. *中国植保导刊*, 2012, 32(8): 59-62, 50.
- [37] 叶金才. 育成我国首例对玉米南方锈病免疫系齐 319 [J]. *中国农业科学*, 2000, 33(4): 110.
- [38] 陈翠霞, 赵延兵, 刘保申, 等. 不同玉米自交系南方锈病的抗性评价 [J]. *作物学报*, 2004, 30(10): 1053-1055, 1069.
- [39] 任转滩. 玉米抗锈病种质资源的筛选及应用研究 [J]. *玉米科学*, 2006, 14(4): 155-157.
- [40] 冒宇翔, 薛林, 王莉萍, 等. 玉米抗锈病自交系种质的发掘与评价 [J]. *玉米科学*, 2017, 25(4): 55-61.
- [41] 张志方, 张素娟, 张守林, 等. 高抗南方锈病玉米自交系浚 M9 的选育与应用 [J]. *玉米科学*, 2023, 31(1):

- 9-15.
- [42] 杨二波, 祝学刚, 胡跃, 等. 国审玉米新品种隆平 243 的选育及高产栽培技术 [J]. 农业科技通讯, 2022(8): 195-198.
- [43] STOREY H H, RYLAND A K. Resistance to the Maize Rust, *Puccinia polysora* [J]. Nature, 1954, 173 (4408): 778-779.
- [44] ULLSTRUP A J. Inheritance and Linkage of a Gene Determining Resistance in Maize to an American Race of Fuccinia Polysora [J]. Phytopathology, 1965, 55: 425-428.
- [45] CHEN C X, WANG Z L, YANG D E, et al. Molecular Tagging and Genetic Mapping of the Disease Resistance Gene RppQ to Southern Corn Rust [J]. TAG Theoretical and Applied Genetics Theoretische Und Angewandte Genetik, 2004, 108(5): 945-950.
- [46] ZHOU C J, CHEN C X, CAO P X, et al. Characterization and Fine Mapping of *RppQ*, a Resistance Gene to Southern Corn Rust in Maize [J]. Molecular Genetics and Genomics, 2007, 278(6): 723-728.
- [47] ZHAO P F, ZHANG G B, WU X J, et al. Fine Mapping of *RppP25*, a Southern Rust Resistance Gene in Maize [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2013, 55(5): 462-472.
- [48] 刘章雄, 王守才, 戴景瑞, 等. 玉米 P₂₅ 自交系抗锈病基因的遗传分析及 SSR 分子标记定位 [J]. 遗传学报, 2003, 30(8): 706-710.
- [49] ZHANG Y, XU L, ZHANG D F, et al. Mapping of Southern Corn Rust-Resistant Genes in the W2D Inbred Line of Maize (*Zea mays* L.) [J]. Molecular Breeding, 2010, 25(3): 433-439.
- [50] 姚国旗, 单娟, 曹冰, 等. 玉米自交系 CML470 抗南方锈病基因的定位 [J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(3): 518-522.
- [51] WU X J, LI N, ZHAO P F, et al. Geographic and Genetic Identification of *RppS*, a Novel Locus Conferring Broad Resistance to Southern Corn Rust Disease in China [J]. Euphytica, 2015, 205(1): 17-23.
- [52] WANG S, ZHANG R Y, SHI Z, et al. Identification and Fine Mapping of *RppM*, a Southern Corn Rust Resistance Gene in Maize [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 1057.
- [53] LV M, DENG C, LI X Y, et al. Identification and Fine-Mapping of RppCML496, a Major QTL for Resistance to *Puccinia polysora* in Maize [J]. The Plant Genome, 2021, 14(1): e20062.
- [54] CHEN G S, ZHANG B, DING J Q, et al. Cloning Southern Corn Rust Resistant Gene RppK and Its Cognate Gene AvrRppK from *Puccinia polysora* [J]. Nature Communications, 2022, 13: 4392.
- [55] 艾堂顺, 田志强, 李会敏, 等. 玉米南方锈病抗病 QTL 鉴定和效应分析 [J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(4): 514-518.
- [56] 陈文娟, 路璐, 李万昌, 等. 玉米抗南方锈病基因的 QTL 定位 [J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 521-529.
- [57] 王兵伟, 覃嘉明, 时成俏, 等. 一个高抗玉米南方锈病基因的 QTL 定位及遗传分析 [J]. 中国农业科学, 2019, 52(12): 2033-2041.
- [58] 路璐. 玉米抗南方锈病基因挖掘和精细定位 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [59] DENG C, LEONARD A, CAHILL J, et al. The RPPC-AvrRppC NLR-Effector Interaction Mediates the Resistance to Southern Corn Rust in Maize [J]. Molecular Plant, 2022, 15(5): 904-912.
- [60] SIYUAN C, XIA J, YINGYING D, et al. Detection of Wheat Stripe Rust using Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence and Reflectance Spectral Indices [J]. Remote sensing technology and application, 2019, 34(3): 511-520.
- [61] MAHLEIN A K, OERKE E C, STEINER U, et al. Recent Advances in Sensing Plant Diseases for Precision Crop Protection [J]. European Journal of Plant Pathology, 2012, 133(1): 197-209.
- [62] GAO J M, DING M L, SUN Q Y, et al. Classification of Southern Corn Rust Severity Based on Leaf-Level Hyperspectral Data Collected under Solar Illumination [J]. Remote Sensing, 2022, 14(11): 2551.
- [63] CHAERLE L, DE BOEVER F, VAN MONTAGU M, et al. Thermographic Visualization of Cell Death in Tobacco and Arabidopsis [J]. Plant, Cell & Environment, 2001, 24(1): 15-25.

- [64] BAURIEGEL E, HERPPICH W. Hyperspectral and Chlorophyll Fluorescence Imaging for Early Detection of Plant Diseases, with Special Reference to *Fusarium* Spec. Infections on Wheat [J]. *Agriculture*, 2014, 4(1): 32-57.
- [65] CHAERLE L, HAGENBEEK D, DE BRUYNE E, et al. Thermal and Chlorophyll-Fluorescence Imaging Distinguish Plant-Pathogen Interactions at an Early Stage [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2004, 45(7): 887-896.
- [66] SHENG B, HUANG X W, XIAO S, et al. Artificial Cervical Disk Replacement for the Treatment of Adjacent Segment Disease after Anterior Cervical Decompression and Fusion [J]. *Clinical Spine Surgery: A Spine Publication*, 2017, 30(5): E587-E591.
- [67] LETSOIN S M A, PURWESTRI R C, PERDANA M C, et al. Monitoring of Paddy and Maize Fields Using Sentinel-1 SAR Data and NGB Images: a Case Study in Papua, Indonesia [J]. *Processes*, 2023, 11(3): 647.
- [68] ZHANG J C, HUANG Y B, PU R L, et al. Monitoring Plant Diseases and Pests through Remote Sensing Technology: a Review [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 165: 104943.
- [69] KHAN A, VIBHUTE A D, MALI S, et al. A Systematic Review on Hyperspectral Imaging Technology with a Machine and Deep Learning Methodology for Agricultural Applications [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 69: 101678.
- [70] LOLADZE A, RODRIGUES F A, TOLEDO F, et al. Application of Remote Sensing for Phenotyping Tar Spot Complex Resistance in Maize [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 552.
- [71] ZHU W J, CHEN H, CIECHANOWSKA I, et al. Application of Infrared Thermal Imaging for the Rapid Diagnosis of Crop Disease [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(17): 424-430.
- [72] ASHAPURE A, JUNG J, YEOM J, et al. A Novel Framework to Detect Conventional Tillage and No-Tillage Cropping System Effect on Cotton Growth and Development Using Multi-Temporal UAS Data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 152: 49-64.
- [73] 姜玉英, 罗金燕, 罗德平, 等. 远程控制病菌孢子捕捉仪对小麦气传病害的监测效果 [J]. *植物保护*, 2015, 41(6): 163-168.
- [74] RIEUX A, SOUBEYRAND S, BONNOT F, et al. Long-Distance Wind-Dispersal of Spores in a Fungal Plant Pathogen: Estimation of Anisotropic Dispersal Kernels from an Extensive Field Experiment [J]. *PLoS One*, 2014, 9(8): e103225.
- [75] 闫征远, 范洁茹, 刘伟, 等. 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.
- [76] CAO X R, YAO D M, XU X M, et al. Development of Weather- and Airborne Inoculum-Based Models to Describe Disease Severity of Wheat Powdery Mildew [J]. *Plant Disease*, 2015, 99(3): 395-400.
- [77] 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.
- [78] 王晓鸣, 刘骏, 郭云燕, 等. 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.
- [79] 刘章雄, 王守才. 玉米锈病研究进展 [J]. *玉米科学*, 2003, 11(4): 76-79.
- [80] 董佳玉, 黄莉群, 马占鸿. 玉米南方锈病农业防治措施初探 [C]// 病虫害防护与生物安全——中国植物保护学会 2021 年学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021.
- [81] 高建孟, 黄莉群, 董佳玉, 等. 品种混种对玉米南方锈病发病情况的影响 [C]// 中国植物病理学会 2021 年论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021.
- [82] 邹元元, 贺长兴, 周文娟. 玉米大豆复合种植技术的应用研究 [J]. *中国粮油学报*, 2019, (6): 27-30.
- [83] 马晓丽, 吕慧, 郑洪江. 玉米大豆复合种植的优化模式与效益分析 [J]. *中国种业*, 2020, 37(4): 29-31.
- [84] KUHLMAN E G. Efficacy of *Darluca Filum* for Biological Control of *Cronartium fusiforme* and *C. strobilinum* [J]. *Phytopathology*, 1978, 68(3): 507.
- [85] PEI M H, HUNTER T, RUIZ C, et al. Quantitative Inoculation of Willow Rust *Melampsora larici-epitea* with the *Mycoparasite sphaerellopsis Filum* (Teleomorph *Eudarluca caricis*) [J]. *Mycological Research*, 2003, 107(1): 57-63.

- [86] NISCHWITZ C, NEWCOMBE G, ANDERSON C L. Host Specialization of the Mycoparasite *Eudarlucacaricis* and Its Evolutionary Relationship to *Ampelomyces*[J]. *Mycological Research*, 2005, 109(4): 421-428.
- [87] ZAPATA P A G. Characterization of the natural enemies of rust fungi (*Pucciniales*)[D]. Purdue University Graduate School, 2022.
- [88] 孙志强,董佳玉,马占鸿.一种玉米南方锈病生防真菌的开发研究[C]//中国植物病理学会2021年学术年会论文集.北京:中国农业科学技术出版社,2021.
- [89] 赵晨晨,焦铸锦,庞发虎,等.生防菌R-4的鉴定及其对玉米南方锈病的防效[J].*玉米科学*,2017,25(2): 136-141.
- [90] HAMMOND P M, LAWRENCE J F. Mycophagy in Insects: A Summary [M]//*Insect-fungus Interactions*. Amsterdam: Elsevier, 1989: 275-324.
- [91] BRUNS T D. Insect mycophagy in the Boletales: fungivore diversity and the mushroom habitat[J]. *Fungus-Insect Relationships-Perspectives in Ecology and Evolution*, 1984(1), 446-479.
- [92] HENK D A, FARR D F, AIME M C. *Mycodiplosis* (Diptera) Infestation of Rust Fungi is Frequent, Wide Spread and Possibly Host Specific [J]. *Fungal Ecology*, 2011, 4(4): 284-289.
- [93] Revision in Mitteleuropa Vorkommender Mycophage Gallmücken der *Mycodiplosis*-Gruppe (Diptera, Cecidomyiidae) unter Berücksichtigung ihrer Wirtsspezifität[M]. Universität Stuttgart, 1970.
- [94] SILVA D D, MENDES S M, PARREIRA D F, et al. Fungivory: a New and Complex Ecological Function of *Doru luteipes* (Scudder) (Dermaptera: Forficulidae) [J]. *Brazilian Journal of Biology*, 2022, 82: e238763-e238763. .
- [95] ANAGNOSTAKIS S L. Biological Control of Chestnut Blight [J]. *Science*, 1982, 215(4532): 466-471.
- [96] DARISSA O, ADAM G, SCHÄFER W. A dsRNA Mycovirus Causes Hypovirulence of *Fusarium graminearum* to Wheat and Maize [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2012, 134(1): 181-189.
- [97] URAYAMA S, KATO S, SUZUKI Y, et al. Mycoviruses Related to Chrysovirus Affect Vegetative Growth in the Rice Blast Fungus *Magnaporthe oryzae* [J]. *Journal of General Virology*, 2010, 91(12): 3085-3094.
- [98] LIU H, WANG H, LIAO X L, et al. Mycoviral Gene Integration Converts a Plant Pathogenic Fungus into a Biocontrol Agent [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(50): e2214096119.
- [99] ZHENG L, LU X A, LIANG X F, et al. Molecular Characterization of Novel Totivirus-Like Double-Stranded RNAs from *Puccinia striiformis* F. Sp. Tritici, the Causal Agent of Wheat Stripe Rust [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 1960.
- [100] ZHANG Y H, LIANG X F, ZHAO M X, et al. A Novel Ambigrammatic Mycovirus, PsV5, Works Hand in Glove with Wheat Stripe Rust Fungus to Facilitate Infection [J]. *Plant Communications*, 2023, 4(3): 100505.
- [101] PRYOR A, BOELEN M G. A Double-Stranded RNA Mycovirus from the Maize Rust *Puccinia sorghi*[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1987, 65(11): 2380-2383.
- [102] AN C F, MOU Z L. Salicylic Acid and Its Function in Plant Immunity [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2011, 53(6): 412-428.
- [103] WASTERNAK C, HAUSE B. Jasmonates: Biosynthesis, Perception, Signal Transduction and Action in Plant Stress Response, Growth and Development. an Update to the 2007 Review in *Annals of Botany* [J]. *Annals of Botany*, 2013, 111(6): 1021-1058.
- [104] LIU S F, JIANG J C, MA Z H, et al. The Role of Hydroxycinnamic Acid Amide Pathway in Plant Immunity [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 922119.
- [105] YANG Y H, ZHAO J, LIU P, et al. Glycerol-3-Phosphate Metabolism in Wheat Contributes to Systemic Acquired Resistance Against *Puccinia striiformis* F. Sp. Tritici [J]. *PLoS One*, 2013, 8(11): e81756.
- [106] 马金慧,杨克泽,徐志鹏,等.不同植物免疫诱抗剂对玉米茎基腐病菌的抑制效果和田间防效[J].*农药*, 2022, 61(11): 840-844.

- [107]SRIVASTAVA M P, GUPTA S, SHARMA Y K. Detection of Siderophore Production from Different Cultural Variables by CAS-Agar Plate Assay [J]. Asian Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2018, 4(1): 66-69.
- [108]DE PALMA M, SALZANO M, VILLANO C, et al. Transcriptome Reprogramming, Epigenetic Modifications and Alternative Splicing Orchestrate the Tomato Root Response to the Beneficial Fungus *Trichoderma harzianum* [J]. Horticulture Research, 2019, 6: 5.
- [109]MALINICH E A, WANG K, MUKHERJEE P K, et al. Differential Expression Analysis of *Trichoderma Virrens* RNA Reveals a Dynamic Transcriptome during Colonization of *Zea mays* Roots [J]. BMC Genomics, 2019, 20(1): 1-19.
- [110]张广志, 文成敬. 木霉对玉米纹枯病的生物防治 [J]. 植物保护学报, 2005, 32(4): 353-356.
- [111]LIMDOLTHAMAND S, SONGKUMARN P, SUWANNARAT S, et al. Biocontrol Efficacy of Endophytic *Trichoderma* SPP. in Fresh and Dry Powder Formulations in Controlling Northern Corn Leaf Blight in Sweet Corn [J]. Biological Control, 2023, 181: 105217.
- [112]ESMAIL S M, OMAR G E, MOURAD A M I. In-Depth Understanding of the Genetic Control of Stripe Rust Resistance (*Puccinia striiformis* F. sp. *tritici*) Induced in Wheat (*Triticum aestivum*) by *Trichoderma asperellum* T34 [J]. Plant Disease, 2023, 107(2): 457-472.
- [113]AMARA A A, SALEM-BEKHIT M M, ALANAZI F K. Sponge-Like: a New Protocol for Preparing Bacterial Ghosts [J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 545741.
- [114]AMARA A A, SALEM-BEKH M M, ALANAZI F K. Preparation of Bacterial Ghosts for *E. Coli* JM109 Using “Sponge-Like Reduced Protocol” [J]. Asian Journal of Biological Sciences, 2013, 6(8): 363-369.
- [115]SHEWEITA S A, BATAH A M, GHAZY A A, et al. A New Strain of *Acinetobacter baumannii* and Characterization of Its Ghost as a Candidate Vaccine [J]. Journal of Infection and Public Health, 2019, 12(6): 831-842.
- [116]EL-BAKY N, SHARAF M M, AMER E, et al. Protein and DNA Isolation from *Aspergillus niger* as Well as Ghost Cells Formation [J]. SOJ Biochemistry, 2018, 4(1): 1-7.
- [117]EL-BAKY N, SHARAF M M, AMER E, et al. The Minimum Inhibition and Growth Concentrations for Controlling Fungal Infections as Well as Ghost Cells Preparation: *Aspergillus Flavus* as a Model [J]. Biomedical Journal of Scientific & Technical Research, 2018, 10(2): 1-5.
- [118]EL-BAKY N A, ABDEL RAHMAN R A, SHARAF M M, et al. The Development of a Phytopathogenic Fungi Control Trial: *Aspergillus flavus* and *Aspergillus niger* Infection in Jojoba Tissue Culture as a Model [J]. The Scientific World Journal, 2021, 2021: 1-8.
- [119]VINITHAS, SWEETLIN S, VINUSHAH, et al. Disease Prediction Using Machine Learning over Big Data [J]. SSRN Electronic Journal, 2017, 17(1): 26-34.
- [120]JAIN R, MINZ S, RAMASUBRAMANIAN V. Machine Learning for Forewarning Crop Diseases [J]. Journal of the Indian Society of Agricultural Statistics, 2009, 63(1): 97-107.
- [121]谭文学. 基于机器学习的作物病害图像处理及病变识别方法研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [122]许世卫, 王东杰, 李哲敏. 大数据推动农业现代化应用研究 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3429-3438.
- [123]濮永仙. 计算机视觉在作物病害诊断中的研究进展 [J]. 智能计算机与应用, 2015, 5(2): 68-72.

责任编辑 王新娟