

◆ 专论:杀菌剂(特约稿) ◆

我国小麦赤霉病流行与化学防控现状及控病降毒关键技术理论创新与应用

段亚冰^{1,2}, 周明国^{1,2*}

(1. 南京农业大学植物保护学院, 南京 210095; 2. 南京农业大学绿色农药创制与应用技术国家地方联合工程研究中心, 南京 210095)

摘要:概述了我国小麦赤霉病发生危害现状,深入剖析了该病流行危害的原因,回顾了近年来我国小麦赤霉病化学防控历程,综述了化学防控及其抗药性发生的现状,并总结了小麦赤霉病菌抗药性检测技术的发展过程。此外,对小麦赤霉病控病降毒关键技术理论创新与应用成果进行了分析和总结,展望了小麦赤霉病精准防控的科学用药技术方案,并对其可行性和有效性进行了阐释。旨在为小麦赤霉病的精准选药、科学用药提供重要的参考数据,保障我国的粮食生产安全和食品安全,进而推动我国农业实现可持续、高质量发展。

关键词:小麦赤霉病;化学防控;抗药性;DON毒素;抗病降毒

中图分类号:S 435.121 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2024.02.002

The current status of wheat scab epidemic and chemical control and theoretical innovation and application of key technologies for disease control and mycotoxin reduction in China

DUAN Yabing^{1,2}, ZHOU Mingguo^{1,2*}

(1. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. State & Local Joint Engineering Research Center of Green Pesticide Invention and Application, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The current occurrence and damage situation of wheat Fusarium head blight in China were outlined in this article, the causes of the disease epidemic were delved deeply, recent developments in chemical control strategies in China were reviewed, the current status of chemical control and fungicide resistance development were summarized. Additionally, the development process for detecting fungicide resistance technologies in wheat Fusarium head blight pathogens was summarized. Furthermore, the achievements in theoretical innovation and application of the key technologies for controlling wheat Fusarium head blight and reducing mycotoxin contamination were analyzed and summarized. Finally, scientific and precise technical schemes are presented to explore effective strategies for controlling wheat Fusarium head blight while elucidating their feasibility and effectiveness. This article aims to provide valuable references for precise selection and scientific use of fungicides in controlling wheat Fusarium head blight, thereby ensuring the safety of grain production and food safety in China, as well as promoting the sustainable and high-quality development of Chinese agriculture.

Key words: wheat Fusarium head blight; chemical control; fungicide resistance; DON; disease control and mycotoxin reduction

收稿日期:2024-04-07

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1400100);国家自然科学基金(32072448)

作者简介:段亚冰(1983—),男,河南商水人,博士,教授,主要从事杀菌剂生物与植物病害化学防控研究。E-mail:dyb@njau.edu.cn

通信作者:周明国(1958—),男,江苏南通人,博士,教授,主要从事杀菌剂生物与植物病害化学防控研究。E-mail:mgzhou@njau.edu.cn

以禾谷镰孢菌(*Fusarium graminearum*)为优势种群引起的小麦赤霉病是一种世界性重大病害,对我国小麦的安全生产构成巨大威胁。2020年9月,农业农村部已将其列入《一类农作物病虫害名录》。小麦赤霉病可在小麦生长的不同阶段发生,以穗腐危害最大,可导致小麦大幅减产甚至绝收。为了应对这一生产问题,长期以来,化学药剂一直是小麦赤霉病防控的主要应急措施。然而,随着现代选择性杀菌剂的长期使用,病原菌的抗药性问题日益突出,化学药剂的防效降低或失效。更为严重的是,病原菌在受感病粒中能分泌大量的脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON),其化学性质稳定,可随食物链进行传递,普遍存在于以麦粒为原料的加工食品(如面粉、馒头、啤酒等)及动物饲料制品(如肉、奶、蛋等)中。联合国粮农组织(FAO)和世界卫生组织(WHO)认定DON毒素为最危险的自然发生的食品污染物,对食品安全和人畜健康构成严重威胁。近年来,随着人们生活水平提高,对食品安全的要求不断提高,小麦赤霉病防控已引起各级政府的高度重视及社会的广泛关注,防控的重心已由“控病”转向为“降毒”。本文将对小麦赤霉病的发生危害现状、重发危害因素、化学防控历史与现状进行综述,并对小麦赤霉病控病降毒关键技术理论创新与应用、精准用药的科学防控技术方案进行了展望,以期对小麦赤霉病的精准选药、科学用药提供技术支撑。

1 小麦赤霉病发生危害现状

赤霉病是温暖多雨和气候湿润小麦种植区的世界性重大病害,其流行范围广,美国、加拿大、欧洲等地均有发生^[1-2]。在我国,小麦赤霉病已成为制约小麦高产稳产的首要病害,一旦发生流行,其造成的产量损失通常在10%~30%,严重时可导致绝收^[3]。同时,病原菌在感病麦粒中会分泌DON、玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)等多种真菌毒素,这些毒素统称为呕吐毒素,威胁小麦质量安全^[4-5]。当人畜过量食用含有呕吐毒素的小麦制品后,会出现呕吐、恶心、头晕、腹泻等中毒症状,严重时还会导致神经中枢系统紊乱、流产或死胎等^[6-7]。鉴于呕吐毒素的危害,许多国家和地区制定了食品中DON毒素的限量标准。我国规定,玉米、玉米面、大麦、小麦、麦片和小麦粉等谷物及谷物制品中呕吐毒素DON的限量指标为1 mg/kg(GB 2761—2011《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》)。美国食品及药物管

理局(FDA)也规定食品中呕吐毒素DON的限量标准是1 mg/kg,欧盟制定了严格的呕吐毒素DON限量标准,谷粉及玉米粉中允许限量 ≤ 0.75 mg/kg^[8]。

近年来,受气候异常、秸秆还田、免耕栽培及稻麦和玉麦轮作等因素影响,我国小麦赤霉病发生流行危害日趋严峻。其主要呈现以下特点:(1)病害发生区域扩大。据我国近半个世纪以来的小麦赤霉病发生流行区域分析,我国小麦赤霉病发生呈“北扩西移”态势,由长江中下游和江淮流域冬麦区的传统发病区不断向黄淮麦区、华北麦区和西北麦区扩展。2000—2018年,有13个年份小麦赤霉病发生面积超过333.3万hm²,其中,2012年超过0.1亿hm²。(2)病害流行重发频率上升。2010年以来,长江中下游和江淮麦区为重发区域,黄淮麦区为常发区域。特别是在2012年、2014年、2015年、2017年和2018年,病害达到了大流行程度,年均实施防控面积超过0.13亿hm²次,其中,2023年达到了0.24亿hm²次。(3)危害损失加重。2010年以来,年均造成的产量损失在400余万吨。南京农业大学杀菌剂生物学实验室于2010年和2012年分别在江苏分布均匀的28个地点进行的田间调查显示,由赤霉病造成186.7万hm²小麦的粮食损失约为每年100万~120万吨。(4)毒素污染加剧。南京农业大学杀菌剂生物学实验室于2006—2007年检测了苏果超市74种面食品,发现其中50%样品中的呕吐毒素含量超过了国家规定的安全食用限量标准。2010年农业部对10个小麦主产省抽样检测,呕吐毒素检出率为32.1%,超标率为12.9%。虽然近年来我国小麦赤霉病实施防控面积逐年增加,病害得到了有效控制,但呕吐毒素检测结果仍然超标,主要原因是病原菌隐蔽性强,即使在麦粒中成功侵染未表现出病害症状,也会导致呕吐毒素的积累。

2 小麦赤霉病流行危害原因

农作物病害的发生,是病原菌与寄主相互适应、共同进化的结果。以小麦赤霉病为例,其发生是由于小麦抽穗扬花初期与病原菌子囊壳成熟期相吻合,遇到适宜的环境条件,会引起小麦赤霉病的流行暴发。因此,抽穗扬花期的适宜温、湿度是病害重发流行的主要原因。此外,抗病品种缺乏、稻麦和玉麦轮作加剧菌源积累,病原菌对多菌灵抗性上升等因素,也进一步加剧了病害的流行重发和毒素污染。

2.1 气候条件适宜

小麦赤霉病是典型的气候型流行性病害。抽穗

扬花期如遇连阴雨天气,病害将快速流行;而高温高湿天气会加剧病害流行。通过对2002—2017年江苏省13个市和3个区县小麦赤霉病病穗率、生育期观测资料及相应时段内逐日气象数据的综合统计分析,发现累计雨日、平均相对湿度和平均气温是影响小麦赤霉病发生流行的关键气象因子^[9]。长江中下游、江淮麦区的冬小麦一般在4月中下旬抽穗扬花,这一时期通常会遭遇连阴雨天气,有利于病害的发生流行。同时,受全球气候变暖、雨区北移的影响,黄淮麦区的气候条件也利于小麦赤霉病的发生。此外,土壤墒情、雾霾、寡照、昼夜温差大导致的结露等气象条件也可加重病害的发生流行。

2.2 抗性品种缺乏

目前,大部分麦区的多数种植品种均缺乏抗病性,仅长江中下游麦区种植的扬麦、宁麦、镇麦等部分品种具有一定的抗病性。据2013年河南省调查,该省种植的100余个品种均无抗病性。此外,在我国小麦赤霉病发生流行较重的江苏、安徽两省的北部麦区,大量种植一些来自河南、山东省的高产小麦品种,这些品种同样缺乏抗病性,进一步加剧了小麦赤霉病的发生流行风险。扬麦、宁麦、镇麦等品种虽具有一定的抗性,但在高强度的发病条件下也会被感染。

2.3 抗药性水平上升

苯并咪唑类杀菌剂多菌灵上世纪70年代在我国实现产业化。40多年来,多菌灵一直是防治小麦赤霉病的主要药剂,目前多个省份发现抗药性菌株,尤其是赤霉病常年重发的江苏、安徽,抗药性菌株检出率急剧上升。江苏抗药性菌株的平均检出率由2010年的19.8%上升到2023年的31.6%,沿海局部地区超过80%;而安徽2023年的检出率达16.64%。研究表明,与敏感菌株相比,对多菌灵产生抗性的菌株致病性和产毒素能力明显增强^[10-11]。因此,在多菌灵抗性发生区域继续使用多菌灵,不仅防治效果下降,还可能加重毒素污染。

2.4 耕作方式有利

小麦赤霉病菌腐生能力强,易在水稻、玉米等作物的病残体上营腐生生活,成为翌年小麦赤霉病的主要侵染源。我国普遍实施的秸秆还田、秸秆禁烧、土壤免耕等措施,导致植物病残体群体数量增加,田间菌源充足。同时,稻麦轮作区普遍采用撒播方式,播种量大,造成田间郁闭、湿度增大,利于小麦赤霉病发生和流行。尽管黄淮北部及华北南部麦区小麦扬花期未遭遇连阴雨天气,但灌溉会导致田

间湿度增加,形成了有利于赤霉病发生的田间小气候条件,从而加剧病害流行。

2.5 预防控制难度大

小麦赤霉病具有“可防而不可治”的特性。赤霉病在扬花期侵入,灌浆期显症,成熟期成灾。一旦错过防治“窗口期”,侵染危害会导致小麦产量减少、品质降低等问题。研究表明,小麦齐穗至扬花初期喷施药剂是预防和控制赤霉病的最佳措施。在常发区,如遇大发生年份,需隔3~5 d再次用药。错过这个关键时期将导致防效大幅下降,造成产量损失和毒素污染。然而,农民普遍缺乏主动预防意识,遇雨或见到病害才用药,往往错过最佳防治时机。虽然目前土地流转规模扩大,专业化统防统治比例提升,但一家一户分散防治仍是主要形式,防治时期把握不准、药剂选择不当、用水量不足、喷雾质量不高、防控作业效率低等现象较为普遍,难以取得良好的防治效果。此外,稻麦轮作区受到免耕、撒播、管理粗放等因素影响,小麦抽穗扬花期不一致,也加大了防控难度。

此外,小麦赤霉病具有潜伏侵染的特性,如果抽穗扬花期预防控制措施不到位,虽然前期田间不显症,但后期一旦温、湿度适宜就会出现集中显症现象,甚至小麦收获后,晾晒不及时、收储麦粒含水量过高,也会造成病菌继续侵染,增加毒素含量。

3 小麦赤霉病化学防控历史与现状

小麦赤霉病的化学防控历史随着新型内吸性杀菌剂的出现而不断演变。自20世纪70年代初,多菌灵等苯并咪唑类杀菌剂被用于小麦扬花初期的喷雾防治,有效控制了小麦赤霉病,并成为小麦赤霉病常发地区的主要防治措施。这些杀菌剂广谱、高效,且具有内吸性,提高了防治效果,解决了保护性杀菌剂环境污染的问题,同时用药技术和用药时间的要求得到降低,对小麦安全。然而,随着多菌灵等杀菌剂使用时间的延长和剂量的增加,抗药性群体逐渐出现。南京农业大学于1992和1994年先后在浙江和江苏地区检测到抗药性菌株,随后,抗药性频率和分布逐年上升^[12-16]。进一步研究发现,多菌灵在防治效果较低时,能刺激病菌DON毒素的生物合成,加剧粮食和食品污染^[10-11]。

为了应对这一问题,以三唑酮为代表的麦角甾醇生物合成抑制剂类杀菌剂在20世纪80年代开始应用于小麦赤霉病的化学防治。这类杀菌剂具有保护、治疗和铲除作用,药效高、持效期长、杀菌谱广。

戊唑醇、苯醚甲环唑、氟环唑、叶菌唑、丙硫菌唑、咪唑胺、己唑醇、丙环唑等的问世丰富了小麦赤霉病的化学防治药剂种类。虽然不同品种药剂对小麦赤霉病菌的抑菌活性及田间防效差异较大,但这类杀菌剂具有生长调节作用,小麦生长期使用安全。目前,该类药剂及其复配剂在小麦赤霉病化学防治药剂中已占近一半的市场份额,市场潜力巨大。

此外,甲氧基丙烯酸酯(quinone outside inhibitor, QoI)类杀菌剂也是一类具有发展潜力和市场活力的新型杀菌剂。该类药剂对小麦赤霉病菌具有较好的室内抑菌活性和田间防效。在我国,已被登记用于小麦赤霉病化学防控的甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂主要有吡唑醚菌酯、嘧菌酯、醚菌酯、烯炔菌酯、肟菌酯、氟唑菌酯、啉氧菌酯。然而,研究也表明,该类药剂能刺激小麦赤霉病菌DON毒素的生物合成,加剧粮食和食品污染^[17-18]。

近年来,琥珀酸脱氢酶抑制剂(succinate dehydrogenase inhibitor, SDHI)类杀菌剂是继麦角甾醇生物合成抑制剂类和甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂之后,发展最为迅速、上市品种最多的一类内吸性杀菌剂^[19]。这类药剂大多数品种对小麦赤霉病菌的离体活性较差,南京农业大学深入研究发现:镰孢菌呼吸链系统复合物Ⅱ组成亚基SDHC遗传分化为2个亚基SDHC1和SDHC2,其中,SDHC2遗传分化导致镰孢菌对SDHI类杀菌剂的药敏性显著降低^[20];但一些品种如先正达公司创制的氟唑菌酰胺、苯并烯氟菌唑和拜耳公司创制的氟吡菌酰胺对小麦赤霉病菌具有较高的抑菌活性和田间防效^[21-22]。另外,该类药剂可通过内质网与线粒体偶联亚细胞结构调控产毒小体的结构形成,从而显著降低DON毒素的生物合成^[23]。目前,SDHI类杀菌剂萎锈灵、吡唑萘菌胺、氟唑菌酰胺单剂或复配制剂已在我国登记用于防治小麦赤霉病,其中氟唑菌酰胺已成为我国防治小麦赤霉病的主要药剂之一。然而,2020年氟唑菌酰胺登记,2022年首次在我国监测到高抗群体,抗性风险高^[24]。

杀菌剂抗性行动委员会(FRAC)建议将不同作用机制的药剂进行混用或轮换使用,以延缓或治理抗药性。通过复配不同作用机理的杀菌剂,开发用于小麦赤霉病防控的新型杀菌剂,如三唑酮、福美双和多菌灵三元复配产品(抗菌灵),在已对多菌灵产生抗性的地区进行了田间防效试验,并表现出显著的防效。此后,人们相继研发了多种针对小麦赤霉病的抗性治理技术,但这些药剂主要是以多菌灵

为主的复配剂,如多菌灵·三唑酮、戊唑醇·多菌灵、咪唑胺·多菌灵等(中国农药信息网<http://www.chinapesticide.org.cn/>)。自2015年以来,随着用药年限的增长,多菌灵抗性日益突出。为了有效控制小麦赤霉病,往往加大使用剂量及施药次数,但防效仍不理想,同时也加剧了环境污染。尤为严重的是,多菌灵抗药性群体DON毒素的生物合成能力显著上升,达到敏感菌株的2.4~3.2倍,进一步加剧了食品安全问题^[10-11]。因此,寻找和开发多菌灵的替代药剂,有效治理小麦赤霉病对多菌灵的抗药性已成为目前面临的严峻挑战。

“戊福”是南京农业大学研发的新型低毒杀菌剂产品,用于治理小麦赤霉病对多菌灵的抗药性,具有增效作用^[25]。该药剂以戊唑醇和福美双为有效成分。戊唑醇是一种内吸性杀菌剂,对小麦赤霉病具有较高的防治效果,而福美双是生物能量抑制剂,能强烈抑制依赖能量代谢的孢子萌发,从而保证对赤霉病的防治效果。当两者复配使用时,戊唑醇对麦角甾醇生物合成的抑制作用会增加细胞膜透性,从而促进福美双进入菌体细胞,增加其对能量的抑制作用,使抑菌活性显著增强。这一药剂的研发成为小麦赤霉病抗性综合治理的有效手段,尤其在多菌灵抗性较为严重的江淮地区表现出色。同时,对小麦白粉病、锈病等病害也具有较好的防效。此外,该药剂还能有效延缓叶片的衰老,增强光合作用,促进小麦自身的营养生长和生殖生长,增强小麦抗干热风能力,改善其色泽,延长灌浆时间,从而显著增加小麦的千粒重。和常规药剂多菌灵相比,“戊福”还能有效降低小麦DON毒素,提高小麦商品品质。因此,“戊福”受到了政府推广部门及农民的高度认可,并多次进入江苏省政府防治小麦赤霉病的招标产品目录,市场占有率逐年提升,推广使用面积逐年增加,目前已成为小麦赤霉病的主流防控药剂之一,对于保障食品安全和提高小麦产量与质量具有重要意义。

南京农业大学与国家南方农药创制中心江苏基地合作研发的抗药性小麦赤霉病治理新药剂——氟烯菌酯,是一种高效、低毒、对环境友好且专业化性极强的选择性杀菌剂,对防治镰孢菌属引起的植物病害有特效,尤其是小麦赤霉病。自2007年取得临时登记以来,氟烯菌酯在小麦赤霉病防治方面表现出优异的效果,赢得了学术界、政界和市场的广泛认可^[26]。政府采购量和市场销量逐年提高,2013年开始进入政府采购项目,现已成为各省、市、

县植保站防治小麦赤霉病的首选药剂以及小麦主产区政府的采购产品。然而,有研究报道显示,在特定条件下(紫外照射或药剂驯化),小麦赤霉病菌对氰烯菌酯极易产生抗性,抗药性风险高。为了延缓氰烯菌酯抗药性产生及延长其在水稻赤霉病防治中的使用年限,南京农业大学研发了氰烯菌酯与戊唑醇的复配剂,从而降低了氰烯菌酯的使用剂量。2014年,48%氰烯·戊唑醇悬浮剂(商品名劲兴)正式登记并推向市场^[27];同时,氰烯菌酯与己唑醇的复配剂(商品名实粒)也获得农药正式登记^[28]。目前,氰烯菌酯、丙硫菌唑复配剂也在登记中。氰烯菌酯曾被江苏省和国家有关部门评为高新技术产品,并被农业农村部列入重点推广新产品。其市场销量逐年增长,2017年上半年氰烯菌酯的销售额突破亿元大关,成为我国农药创制产品中的佼佼者。2016年和2017年连续2年被评为“全国植保市场杀菌剂畅销品牌”,并荣获“2016年中国农民喜爱的农药品牌之创新产品品牌”及“2016年植保产品贡献奖”等殊荣。2018年,“创制杀菌剂氰烯菌酯选择性新靶标的发现及产业化应用”成果获得国家科学技术进步二等奖^[29]。

我国小麦赤霉病防控工作取得了显著成效。近年来,我国在小麦赤霉病防控方面登记的高效、低毒药剂数量逐年增加,成功解决了过去登记药剂品种单一、药剂种类陈旧及新药剂更新换代慢等突出问题。目前,以多菌灵、甲基硫菌灵为主的单剂或复配剂已逐步退出小麦赤霉病防控的舞台,取而代之的是一些高效、控病降毒的药剂品种,如氰烯菌酯、丙硫菌唑、叶菌唑、氟唑菌酰胺、戊唑醇及其复配剂。这些新药剂已成为我国防治小麦赤霉病的主流产品。

4 抗药性发生现状

南京农业大学自1985年起,在江苏、上海、浙江、安徽等地持续开展小麦赤霉病对多菌灵的抗药性监测工作。1992年,在浙江海宁小麦产区,周明国等^[12]从405个病穗中分离得到1株对多菌灵产生抗性的禾谷镰孢菌菌株,这是多菌灵用于防治小麦赤霉病近20年首次在田间检测到抗药性菌株。南京农业大学连续系统监测结果显示,抗药性菌株的频率呈上升趋势,但并非逐年增加。1994年,江苏地区抗多菌灵禾谷镰孢菌菌株的频率为0.29%;1995年、1996年未检测到抗药性菌株^[30];1997年,抗药性菌株频率上升至0.45%;2002年,抗药性菌株频率缓慢递增;

2003—2004年,抗药性频率迅速上升,抗药性频率均超过20%;此后几年抗性频率有所降低,2007年降至2.84%。

研究人员发现,抗药性菌株频率持续上升与病害发生程度和杀菌剂的选择压力密切相关,特别是在赤霉病暴发、用药水平较高的年份,抗药性上升更为明显。抗药性菌株在一些地区已发展成为主要的致病优势种群,1998年和1999年全国小麦赤霉病连续2年大暴发。浙江地区抗药性频率从1997年的2.7%迅速上升到1998年的18.8%,1999年又上升到25.6%;在海宁县盐官乡,菌株的抗药性频率最高达50.9%。然而,到2000年,由于发病程度较轻,加之农业产业结构的调整和小麦市场价格的影响,这些地区小麦种植面积减少,用药水平下降,抗药性菌株的频率也随之回落到9.0%。

目前,由于近几年赤霉病发生程度较轻,江苏和上海两地抗性群体发展较平缓;而在河南、陕西、山东等赤霉病发生较重地区,已检测到多菌灵抗性群体。南京农业大学通过对河南、湖北、江苏、山东、安徽、四川和河北等7个省份小麦赤霉病菌抗多菌灵菌株检出时序性进行分析,初步推测了小麦赤霉病菌对多菌灵抗性群体在中国麦区的扩散路径。研究认为,山东和河南麦区出现的抗多菌灵菌株可能是通过种子调运及联合收割机跨区作业等方式从抗药性发生较早的江淮麦区流入^[31]。随后,抗药性菌株在赤霉病菌群体中的比例不断增加,以致多菌灵防治小麦赤霉病的效果显著下降^[15,32]。随着抗性群体的发展,2010—2019年,在江苏、安徽、河南南部等麦区,多菌灵对赤霉病防治失败,损失惨重。目前,在上海、浙江、安徽、山东和河南南部已经形成足以造成多菌灵防治失败的抗药性群体,在湖北、河北、重庆、陕西、山西等地也均检测到多菌灵抗性菌株(还不足以引起多菌灵失效)。另外,多菌灵抗性还可引起毒素污染加剧和农药残留超标风险。因此,我国各级农业主管部门也相继发文禁止多菌灵及其复配药剂在小麦赤霉病上的化学防控。

近年来,南京农业大学持续监测了我国小麦赤霉病菌对已登记药剂氰烯菌酯、氟唑菌酰胺、戊唑醇、吡唑醚菌酯、咯菌腈等的抗性发生状况。2017年,在淮安白马湖农场及三河农场首次监测到戊唑醇抗性菌株^[33];2023年,在江苏省和安徽省监测到5株对氰烯菌酯产生抗性的菌株,并已鉴定为亚洲镰孢菌。同时,江苏省镇江市农业科学院也在江苏省监测到1株亚洲镰孢菌对氰烯菌酯的抗性菌株。

2022年,浙江大学马忠华教授团队监测到小麦赤霉病菌对氟唑菌酰胺的抗药性菌株^[24]。2023年,南京农业大学杀菌剂生物学团队段亚冰教授课题组也监测到小麦赤霉病菌对氟唑菌酰胺的抗药性菌株(未发布数据)。

5 抗药性检测与监测

病原菌在自然界的数量庞大,当抗药性个体在群体中的占比达到3%时,便可引起抗药性病害流行,从而导致药剂防治失败。目前,大多数选择性杀菌剂的作用位点单一,容易产生抗药性。因此,在新农药产品投放市场前或田间未出现抗药性时,需要进行室内抗性风险评估,并建立标准抗性检测方法,为以后的田间抗药性监测和检测提供理论依据。抗药性的产生不仅会导致病害防治失败,还会增加药剂用量,从而加剧环境及生态污染。为了应对这一问题,欧美等发达国家农药管理部门和农药跨国公司不仅对已有杀菌剂的抗药性进行监测,还在新农药投放市场前进行室内抗性风险评估。根据评估结果,修订农药使用技术,及时调整用品种和防治策略,既保证防治效果,又避免因加大用药量而产生的环境问题。因此,开展抗药性检测与监测不仅能为植物病害的综合防治提供用药指导,还能为抗药性治理提供重要参考。

对于小麦赤霉病菌,常用的抗药性检测与监测方法是菌丝生长抑制法。该方法通过计算病原菌在不同杀菌剂剂量下的抑制率来评估抗药性水平,准确性高^[30,34]。由于小麦赤霉病感染的病穗具有典型的粉红色霉层,因此可以通过直接检测病穗来进行。具体操作是,从病穗上挑取粉红色霉层,在含有区分剂量药剂(多菌灵10 μg/mL、吡唑醚菌酯5 μg/mL、氟唑菌酰胺5 μg/mL、戊唑醇5 μg/mL、咯菌腈2 μg/mL、氰烯菌酯5 μg/mL)的培养基上进行培养。根据能否在含药平板上形成菌落或抑制率大小,判断菌株是否具有抗药性。该方法快速、简便,省去了菌株分离的繁琐过程,适用于大范围、大批量样本的抗药性监测。

随着分子生物学技术的快速发展,基于小麦赤霉病菌对多菌灵的抗性分子机制,以PCR技术为基础研发了多种适用于小麦赤霉病菌对多菌灵抗性的快速分子检测技术,如PCR-限制性内切酶技术(PCR-RFLP)、四引物扩增受阻突变体系PCR(Tetra-primer ARMS PCR)、实时定量PCR技术(Real-time quantity PCR)和Cycling Probe荧光探针实时定量

PCR检测技术等,实现了小麦赤霉病菌对多菌灵抗性的快速检测^[35];可直接从收集的小麦赤霉病菌孢子群体中检测抗药性基因频率和基因型,实现了小麦赤霉病菌对多菌灵的抗性早期预警,为小麦赤霉病的精准选药、科学用药提供了技术保障。

然而,尽管PCR技术对植物病原菌的抗药性检测具有快速、灵敏、准确的优势,但其实验仪器昂贵,电泳过程繁琐,检测时间长且成本高昂,不能满足检测的经济、高效需求。此外,检测过程中实验人员接触大量有毒有害试剂,存在较大的安全隐患。因此,开发对植物病原菌抗药性检测的新技术迫在眉睫。

环介导恒温扩增技术(loop-mediated isothermal amplification, LAMP)是一种新颖的恒温核酸体外扩增技术,能在等温(60~65℃)条件下短时间(通常在1 h内)内进行核酸扩增。其特点是针对靶基因上的6个区域设计4条特异引物,利用链置换DNA聚合酶在恒温条件下进行扩增反应。LAMP应用时,从脱氧核酸三磷酸基质(dNTP)中析出的焦磷酸离子与反应溶液中Mg²⁺结合,产生大量的焦磷酸镁衍生物并出现白色沉淀。根据副产物——焦磷酸镁沉淀及Mg²⁺浓度变化,通过浊度检测或添加显色剂观察颜色变化来判定扩增结果。其中,HNB是Mg²⁺的滴定剂,其颜色随溶液pH变化而改变。因此,可以通过监测LAMP反应体系中Mg²⁺浓度的变化及溶液pH而起到颜色指示剂的作用。该方法具有操作简单、特异性强、灵敏度高、产物易检测等优点,且不需要昂贵的仪器和繁琐的电泳操作。自2000年开发以来,LAMP受到了世界卫生组织、各国学者、相关科研机构及政府部门的高度关注,在病原菌、寄生虫、病毒等引起的疾病诊断、转基因产品检测、环境监测及食品安全等方面获得了很多成就。近年来,该技术在植物病害的快速诊断及植物病原的鉴定方面已成为植物病理学工作者研究的热点。2014年,南京农业大学周明国教授研究团队首次将LAMP应用于植物病原物对杀菌剂的抗性检测领域,成功建立了小麦赤霉病菌对多菌灵抗性基因型F167Y、F200Y的LAMP快速、高通量分子检测技术,并成功应用于田间抗药性群体的监测,为植物病原物抗药性的简便、快速、高通量分子检测开创了新纪元^[32,36]。这一成果的应用大大提高了检测效率,具有简单、快速,成本低,灵敏性高等特点。近几年,在抗药性检测方面的应用证实,LAMP能准确监测小麦赤霉病菌对多菌灵的抗药性,为了解我国小麦赤霉病

菌的抗药性群体分布规律、抗药性流行预警及抗药性治理提供丰富的理论数据和参考资料,改变了我国在病害抗药性流行年份因无法快速监测抗性动态而导致的农药滥用和生态环境污染加剧的局面。

6 小麦赤霉病控病降毒关键技术

小麦赤霉病不仅造成严重的产量损失,而且病原菌在感病麦粒中分泌的DON毒素,严重威胁着食品安全和人畜健康。同时,DON毒素也是赤霉病菌至关重要的致病因子,加剧病菌侵染,导致病害流行频发。因此,降低DON毒素污染水平,不仅能减轻病害发生与流行,还可保障粮食生产安全。南京农业大学在大量筛选抑制小麦赤霉病菌的化学或生物因子试验中发现,井冈霉素对小麦赤霉病菌的抑菌活性较差,但能显著降低小麦赤霉病菌DON毒素的生物合成,降低谷物毒素污染^[37]。进一步研究发现,井冈霉素可诱导小麦产生广谱抗性,提高病害防效^[38]。田间试验表明,井冈霉素可达到50%的田间防效^[39]。深入研究井冈霉素的药理学机制发现,井冈霉素可与小麦赤霉病菌的中性海藻糖酶和酸性海藻糖酶结合,干扰小麦赤霉病菌的中性海藻糖酶与丙酮酸激酶的互作,抑制病菌经异戊二烯途径的DON毒素生物合成。同时,井冈霉素通过与中性海藻糖酶结合,能够干扰海藻糖酶与唑类杀菌剂作用靶标FgCYP51s的互作,下调麦角甾醇生物合成,从而与唑类杀菌剂具有协同增效作用^[40]。基于药靶互作的毒理学研究成果,研发了具有广谱、低毒、低残留,降低DON毒素污染,促进小麦增产和治理抗药性,以防治赤霉病为重点的小麦病害综合防控减量用药技术。该技术已在江苏省南通市农业科学研究院、新洋农场、白马湖农场、洪泽县小麦高产示范基地、南京市六合小麦高产栽培示范基地、泰兴市小麦高产栽培示范基地和泰州市农科所等地,以及安徽、湖北、河南等省进行田间核心试验示范及大面积应用示范,累计示范面积超过0.33万hm²。与现有防控技术相比,该技术防效增加15~20百分点,而且用药量减少30%以上,毒素污染降低50%以上,千粒重增加5%以上。该技术解决了我国小麦病害防治技术单一、用工用药成本高、抗药性发展快、产品生命周期短、市场竞争力低等问题,提升了我国麦类病害综合防控的科技水平。目前,该系列技术已获得国家发明专利10余项和美国、欧盟、英国、加拿大、澳大利亚、日本等国际发明专利8项。其中,井冈霉素、叶菌唑复配已成果转化至南京南农农药科技

发展有限公司,井冈霉素、丙硫菌唑复配已独家许可给青岛瀚生生物科技股份有限公司,井冈霉素、戊唑醇复配拟许可至南京南农农药科技发展有限公司,这些产品进入市场后将表现出极强的市场竞争力和较长的使用寿命,成为我国防治小麦赤霉病和治理DON毒素污染最重要的应用推广技术。

此外,南京农业大学研究表明,尽管大多数SDHI类杀菌剂对小麦赤霉病菌的抑菌活性差,但其能显著降低DON毒素的生物合成^[41]。因此,在小麦赤霉病菌防控降毒技术研发中,可以将SDHI类杀菌剂与麦角甾醇生物合成抑制剂类杀菌剂组合使用,在小麦赤霉病控病降毒中发挥重要作用。

7 小麦赤霉病精准防控技术展望

小麦赤霉病是典型的气候性流行真菌病害。初侵染源主要来源于在稻桩或病残体上越冬的子囊壳产生的成熟子囊孢子,少数来源于病菌的分生孢子。这些孢子在扬花初期实现潜伏侵染,随着小麦生长,如遇到适宜的病害发生条件,病菌菌丝侵入麦粒进行生长繁殖,导致穗部病斑的扩展。基于小麦赤霉病发生流行规律和小麦赤霉病2次用药防控方案,南京农业大学提出了小麦赤霉病精准防控的科学用药技术方案。第1次用药选择抑制孢子萌发的呼吸抑制剂,此时子囊孢子处于初侵染阶段,由于孢子萌发对能量需求大,使用呼吸抑制剂能有效抑制病原菌孢子的萌发,从而降低病原菌侵染和病害发生概率。第2次用药(5~7 d后)选择抑制菌丝生长的麦角甾醇生物合成抑制剂类杀菌剂,此时子囊孢子已萌发,进入菌丝的营养生长阶段。菌丝是DON毒素生物合成的重要营养体,使用麦角甾醇生物合成抑制剂类杀菌剂能有效抑制病菌的菌丝生长,进而减缓病斑的扩展,降低病情指数。呼吸抑制剂对孢子萌发抑制率较高,但对菌丝生长抑制率较差;而麦角甾醇生物合成抑制剂类杀菌剂对菌丝生长的抑制率较高,但对孢子萌发几乎无活性,但能延缓孢子萌发速度。根据两类药剂的特性,这一技术方案能在小麦赤霉病防控的关键窗口期实现精准选药和科学用药,不仅提高病害防效,减少农药的使用量,还有利于对毒素污染的控制和保障农业生态环境安全。

基于上述基础理论,南京农业大学于2023年在淮安市洪泽区开展了田间示范验证试验。具体方案及试验结果如表1所示。1次用药方案中,扬花初期分别选用麦角甾醇生物合成抑制剂类杀菌剂戊唑

醇和呼吸抑制剂噁菌酯时,防效分别为43.29%和52.33%。由于该阶段是抑制子囊孢子萌发的关键阶段,因此,噁菌酯的防效高于戊唑醇。扬花盛期分别选用戊唑醇或噁菌酯时,防效分别为46.98%和21.34%。此阶段为菌丝生长繁殖阶段,戊唑醇的防效显著高于噁菌酯。这一结果进一步证实了扬花初期是赤霉病防控的关键窗口期。与1次用药方案相比,2次用药方案分别选用戊唑醇或噁菌酯时,防效显著提高,分别为64.55%和61.43%,但两者无显著性差异。然而,当第1次选用噁菌酯,第2次选用戊唑醇时,防效显著提高,达83.61%。相反,第1次选用戊唑醇,第2次选用噁菌酯时,防效仅为42.51%。这一试验结果进一步证实了该精准防控用药技术方案的可行性。

此外,毒素检测结果显示,DON毒素污染水平与病害防效呈负相关。当第1次选用噁菌酯,第2次选用戊唑醇时,防效最高,其毒素含量最低,仅为0.24 mg/kg,低于食品安全限量标准;而扬花盛期1次施用噁菌酯时,防效最低,DON毒素含量最高,达到2.58 mg/kg。这些结果进一步证实了该精准防控技术方案在小麦赤霉病控病降毒方面的有效性。特别值得注意的是,扬花初期1次使用噁菌酯进行防控并未导致DON毒素污染水平上升。因此,建议在小麦扬花初期第1次用药时,可选用甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂,特异性抑制病原菌子囊孢子的萌发,从而降低病害发生率;而在扬花盛期进行第2次用药时,应避免使用甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂,以降低因使用该药剂而增加DON毒素污染的风险。

表 1 小麦赤霉病精准防控技术方案田间药效示范(江苏淮安)

处理	第1次用药(有效成分用量)	第2次用药(有效成分用量)	防效/%	DON质量分数/(mg/kg)
1	430 g/L戊唑醇SC 150 g/hm ²	430 g/L戊唑醇SC 150 g/hm ²	64.55	0.56
2	250 g/L噁菌酯SC 150 g/hm ²	250 g/L噁菌酯SC 150 g/hm ²	61.43	0.87
3	430 g/L戊唑醇SC 150 g/hm ²	250 g/L噁菌酯SC 150 g/hm ²	42.51	1.77
4	250 g/L噁菌酯SC 150 g/hm ²	430 g/L戊唑醇SC 150 g/hm ²	83.61	0.24
5	250 g/L噁菌酯SC 150 g/hm ²		52.33	1.16
6	430 g/L戊唑醇SC 150 g/hm ²		43.29	1.44
7		250 g/L噁菌酯SC 150 g/hm ²	21.34	2.58
8		430 g/L戊唑醇SC 150 g/hm ²	46.98	1.30
9	25%氰烯菌酯SC 375 g/hm ²	25%氰烯菌酯SC 375 g/hm ²	75.19	0.37

参考文献

- [1] LEONARD K J, BUSHNELL W R. Fusarium head blight of wheat and barley[M]. St. Paul: APS Press, 2003.
- [2] GILBERT J, TEKAUZ A. Recent developments in research on Fusarium head blight of wheat in Canada[J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2000, 22(1): 1-8.
- [3] 马鸿翔,周明国,陈怀谷. 小麦赤霉病[M]. 南京:江苏凤凰科学技术出版社, 2019.
- [4] SNIJDERS C H A. Fusarium head blight and mycotoxin contamination of wheat, a review[J]. Netherlands Journal of Plant Pathology, 1990, 96: 187-198.
- [5] CHAMPEIL A, DORÉ T, FOURBET J F. Fusarium head blight: epidemiological origin of the effects of cultural practices on head blight attacks and the production of mycotoxins by *Fusarium* in wheat grains[J]. Plant science, 2004, 166(6): 1389-1415.
- [6] D'MELLO J P F, PLACINTA C M, MACDONALD A M C. Fusarium mycotoxins: a review of global implications for animal health, welfare and productivity[J]. Animal Feed Science and Technology, 1999, 80(3-4): 183-205.
- [7] RAI A, DAS M, TRIPATHI A. Occurrence and toxicity of a fusarium mycotoxin, zearalenone[J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2020, 60(16): 2710-2729.
- [8] COMMISSION E. Commission Regulation (EC) No 401/2006 of 23 February 2006 laying down the methods of sampling and analysis for the official control of the levels of mycotoxins in foodstuffs[J]. Official Journal of the European Union, 2006(3): 1-19.
- [9] 徐敏,高苹,徐经纬,等. 江苏省小麦赤霉病综合影响指数构建及时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1774-1782.
- [10] ZHOU Z H, DUAN Y B, ZHOU M G. Carbendazim - resistance associated β_2 -tubulin substitutions increase deoxynivalenol biosynthesis by reducing the interaction between β_2 -tubulin and IDH3 in *Fusarium graminearum*[J]. Environmental Microbiology, 2020, 22: 598-614.
- [11] ZHANG Y J, YU J J, ZHANG Y N, et al. Effect of carbendazim resistance on trichothecene production and aggressiveness of *Fusarium graminearum*[J]. Molecular Plant-microbe Interactions, 2009, 22(9): 1143-1150.
- [12] 周明国,王建新. 禾谷镰孢菌对多菌灵的敏感性基线及抗药性菌株生物学性质研究[J]. 植物病理学报, 2001, 31(4): 365-370.
- [13] 王建新,周明国,陆悦健,等. 小麦赤霉病菌抗药性群体动态及其

- 治理药剂[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(1): 43-47.
- [14] 邵振润, 周明国, 仇剑波, 等. 2010年小麦赤霉病发生与抗性调查研究及防控对策[J]. 农药, 2011, 50(5): 385-389.
- [15] 张雁南, 樊坪升, 陈长军, 等. 禾谷镰刀菌对多菌灵抗性的监测及其演变规律[J]. 农药, 2009, 48(8): 603-605; 613.
- [16] ZHANG L G, JIA X J, CHEN C J, et al. Characterization of carbendazim sensitivity and trichothecene chemotypes of *Fusarium graminearum* in Jiangsu Province of China[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2013, 84, 53-60.
- [17] ZHANG Y J, ZHANG X, CHEN C J, et al. Effects of fungicides JS399-19, azoxystrobin, tebuconazole, and carbendazim on the physiological and biochemical indices and grain yield of winter wheat[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2010, 98(2): 151-157.
- [18] DUAN Y B, LU F, ZHOU Z H, et al. Quinone outside inhibitors affect DON biosynthesis, mitochondrial structure and toxosome formation in *Fusarium graminearum* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 398: 122908.
- [19] 毛玉帅, 段亚冰, 周明国. 琥珀酸脱氢酶抑制剂类杀菌剂抗性研究进展[J]. 农药学报, 2022, 24(5): 937-948.
- [20] 毕莲玉. 小麦赤霉病菌琥珀酸脱氢酶C亚基遗传分化对SDHI类杀菌剂药敏性的调控研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
- [21] 陈培红, 秦建华, 伏进, 等. 新型杀菌剂氟唑菌酰胺对小麦赤霉病的防治效果[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(3): 130-132.
- [22] SUN H Y, CUI J, TIAN B, et al. Resistance risk assessment for *Fusarium graminearum* to pydiflumetofen, a new succinate dehydrogenase inhibitor[J]. *Pest management science*, 2020, 76(4): 1549-1559.
- [23] KANG J B, ZHANG J, LIU Y K, et al. Mitochondrial dynamics caused by QoIs and SDHIs fungicides depended on FgDnm1 in *Fusarium graminearum* [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(2): 481-494.
- [24] SHAO W Y, WANG J R, WANG H Y, et al. *Fusarium graminearum* FgSdhC1 point mutation A78V confers resistance to the succinate dehydrogenase inhibitor pydiflumetofen [J]. *Pest Management Science*, 2022, 78(5): 1780-1788.
- [25] 徐宝玉, 刘学进, 徐加健, 等. 30%戊·福WP防治小麦赤霉病试验简报[J]. 上海农业科技, 2009(4): 138.
- [26] 李恒奎, 周明国, 王建新, 等. 氟烯菌酯防治小麦赤霉病及治理多菌灵抗药性研究[J]. 农药, 2006, 45(2): 92-94; 103.
- [27] 刁亚梅, 周明国, 王建新, 等. 48%氟烯菌酯·戊唑醇悬浮剂防治小麦赤霉病的开发[J]. 农药, 2012, 51(5): 375-376; 384.
- [28] 杨广强. 20%己唑醇·氟烯菌酯悬浮剂防治小麦赤霉病药效试验[J]. 北京农业, 2015(12): 126.
- [29] 中华人民共和国科学技术部. 2018年国家科学技术进步奖获奖项目目录及简介[DB/OL]. [2024-03-10]. https://www.most.gov.cn/ztlz/gjksxjsjldh/jldh2019/jldh19jlgg/202001/t20200103_150916.html.
- [30] 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.
- [31] 戴大凯, 贾晓静, 武东霞, 等. 小麦赤霉病菌多菌灵抗性群体的扩散路径分析——基于致病菌种类及所产毒素化学型鉴定和抗药性检出的时序性[J]. 农药学报, 2013, 15(3): 279-285.
- [32] DUAN Y B, ZHANG X K, GE C Y, et al. Development and application of loop-mediated isothermal amplification for detection of the F167Y mutation of carbendazim-resistant isolates in *Fusarium graminearum*[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7094.
- [33] ZHAO H H, TAO X, SONG W, et al. Mechanism of *Fusarium graminearum* resistance to ergosterol biosynthesis inhibitors: G443S substitution of the drug target FgCYP51A[J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2022, 70(6): 1788-1798.
- [34] 周明国. 杀菌剂毒力及其生物测定[J]. 农药学报, 2022, 24(5): 904-920.
- [35] 罗卿权. 抗多菌灵小麦赤霉病菌(*Fusarium graminearum*)高通量分子检测技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [36] DUAN Y B, YANG Y, LI T, et al. Development of a rapid and high-throughput molecular method for detecting the F200Y mutant genotype in benzimidazole-resistant isolates of *Fusarium asiaticum* [J]. *Pest Management Science*, 2016, 72: 2128-2135.
- [37] LI J, DUAN Y B, BIAN C H, et al. Effects of validamycin in controlling *Fusarium* head blight caused by *Fusarium graminearum*: inhibition of DON biosynthesis and induction of host resistance[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2019, 153: 152-160.
- [38] BIAN C H, DUAN Y B, WANG J Y, et al. Validamycin A induces broad-spectrum resistance involving salicylic acid and jasmonic acid/ethylene signaling pathways [J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2020, 33: 1424-1437.
- [39] DUAN Y B, TAO X, ZHAO H H, et al. Activity of demethylation inhibitor fungicide metconazole on Chinese *Fusarium graminearum* species complex and its application in carbendazim-resistance management of *Fusarium* head blight in wheat[J]. *Plant Disease*, 2019, 103: 929-937.
- [40] BIAN C H, DUAN Y B, XIU Q, et al. Mechanism of validamycin A inhibiting DON biosynthesis and synergizing with DMI fungicides against *Fusarium graminearum* [J]. *Molecular Plant Pathology*, 2021, 22, 769-785.
- [41] XU C, LI M X, ZHOU Z H, et al. Impact of five succinate dehydrogenase inhibitors on DON biosynthesis of *Fusarium asiaticum*, causing *Fusarium* head blight in wheat[J]. *Toxins*, 2019, 11: 272.

(编辑:顾林玲)