

◆ 专论:农药残留与生物毒素(特约稿) ◆

我国谷物镰刀菌毒素污染风险评估研究进展

周允允¹, 刘馨^{1,2*}, 徐剑宏^{1,2}, 史建荣^{1,2}

(1. 南京农业大学植物保护学院, 南京 210095; 2. 江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所, 南京 210014)

摘要: 镰刀菌毒素污染小麦、水稻、玉米等谷物, 威胁主粮安全和人民生命健康。本文综述了我国谷物镰刀菌毒素污染分布特征及规律, 阐述了不同谷物镰刀菌种群结构及产毒特征差异, 并详细评述了镰刀菌毒素污染风险形成的影响因素, 以为谷物镰刀菌毒素污染防控技术的研发提供依据和思路。

关键词: 谷物; 产毒镰刀菌; 镰刀菌毒素污染; 风险评估

中图分类号: TQ 450.2 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-5284.2025.01.002

Risk assessment of *Fusarium* toxins in grains in China

ZHOU Yunyun¹, LIU Xin^{1,2*}, XU Jianhong^{1,2}, SHI Jianrong^{1,2}

(1. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Food Safety and Nutrition, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: *Fusarium* toxins contaminate grains such as wheat, rice and corn, threatening the security of staple food and human health. The distribution characteristics and patterns of *Fusarium* toxins contamination in grains in China were reviewed in this paper, the differences in the population structure and toxin-producing characteristics of the toxigenic *Fusarium* species in grains were clarified, and the influencing factors to contribute the formation of the risk of *Fusarium* toxins contamination were commented in detail. This review would provide insights for developing control strategies of *Fusarium* toxins contamination in grains.

Key words: grain; toxigenic *Fusarium*; *Fusarium* toxin contamination; risk assessment

镰刀菌侵染小麦、玉米、水稻等多种谷物, 引起赤霉病、穗腐病、茎基腐病等病害, 造成粮食严重减产和巨大经济损失。此外, 在侵染谷物过程中, 镰刀菌还会产生多种真菌毒素, 常见的包括单端孢霉烯B族毒素如脱氧雪腐镰刀烯醇(Deoxynivalenol, DON)和玉米赤霉烯酮(Zearalenone, ZEN), 威胁谷物食用和饲用安全及人民生命健康。2010年以来, 受全球气候变化及耕作方式改变等因素影响, 谷物中镰刀菌毒素污染频率增加、程度加剧, 严重制约谷物质量和产业发展。镰刀菌毒素对长江流域、黄淮流域重要粮食产区造成的危害尤其严重, 因其污染而出现收储与利用难题。

为有效控制污染风险, 我国制定了相应的限量标准, 并对谷物镰刀菌毒素污染风险进行了持续监测与评估。近年来, 谷物镰刀菌毒素风险检测、预警技术研发、产毒菌群遗传结构及产毒特征研究取得系统进展。本文将依据风险评估报告与数据、污染风险形成机制相关报道, 综述了近年来谷物镰刀菌毒素污染风险评估取得的研究进展, 以为谷物镰刀菌毒素风险评估、监管及高效防控提供参考依据。

1 我国谷物镰刀菌毒素污染特征及规律

江苏省农业科学院粮油团队长期对谷物镰刀菌毒素污染风险进行监测, 通过连续跟踪评估, 明

收稿日期: 2024-12-26

基金项目: 国家重点研发项目(2023YFD1400900); 江苏省农业自主创新资金项目(CX(23)1002)

作者简介: 周允允(2002—), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为真菌产毒调控。E-mail: yunyun_zhou1214@163.com

通信作者: 刘馨(1985—), 女, 江苏盐城人, 研究员, 研究方向为谷物真菌毒素风险评估与防控。E-mail: xinliu@jaas.ac.cn

确我国小麦镰刀菌毒素污染时空分布特征,发现小麦中存在DON及其衍生物3Ac-DON、15Ac-DON,雪腐镰刀菌烯醇(Nivalenol, NIV)及其衍生物4Ac-NIV, ZEN以及B族伏马毒素(B-type fumonisins, FBs)等多毒素的复合污染。位于长江流域的江苏、安徽、湖北等麦区毒素污染发生风险较高^[1-2]。DON、ZEN是最主要的毒素污染类型。2012年、2015—2016年, DON、ZEN污染超标严重,部分省份小麦样品中DON的平均质量分数达2.3 mg/kg^[3-4]。NIV及4Ac-NIV在四川小麦样品中检出率更高,污染程度显著高于DON^[5]。近年来,小麦镰刀菌毒素污染还呈现北扩西延的趋势,豫南麦区、关中美区的毒素污染风险呈上升趋势。

玉米因其食用、饲用“两栖”特征,在保障粮食安全中具有重要的战略地位。我国是全球第二大玉米生产国,年产量在2.3亿吨,镰刀菌造成的穗腐病及其毒素污染严重威胁玉米安全生产。监测数据显示,B族伏马毒素FB₁和FB₂在玉米样品中的污染程度最重^[6]。Li等^[7]监测了我国3个玉米产区(甘肃、四川和贵州)玉米样品中FB₁、FB₂的污染水平。监测结果显示,3.4%的样品中伏马毒素残留超标(>2 000 ng/g,美国FDA限量标准),平均值为497 μg/kg。Wei等^[8]报告了FB₁、FB₂在我国北部4个玉米产区(甘肃、山东、宁夏和内蒙古)玉米样品中的污染情况,FB₁、FB₂的平均质量分数为703 μg/kg,最高值达到13 110 μg/kg。2012年,Fu等^[9]检测了9个省的玉米样品中伏马毒素污染水平,其中云南玉米样品中的污染最重,平均质量分数5 191 μg/kg。储藏期的玉米样品中毒素污染水平更高,FBs的平均质量分数高达9 638 μg/kg^[10]。

稻谷上镰刀菌毒素污染风险同样不容忽视。2017年,Dong等^[11]测定了江苏省稻麦轮作区的水稻样品中镰刀菌毒素含量,发现DON及其乙酰化衍生物3Ac-DON、15Ac-DON, NIV及其乙酰化衍生物4Ac-NIV, ZEN, FBs (FB₁、FB₂、FB₃)及白僵菌素(beauvericin, BEA)在稻谷样品中复合污染。其中, DON的检出率为30.9%,平均质量分数为95.9 μg/kg; NIV的检出率为22.9%,平均质量分数为34.1 μg/kg。上述毒素在稻谷中的平均检测质量分数低于小麦样品,但一些毒性更高、在小麦上较少检出的毒素在水稻样品中的检出频次更高。2021—2023年,Qiu等^[12]采集了江苏省1 381份稻谷样品,镰刀菌毒素检出率为64.2%,527份样品中存在2种以上镰刀菌毒素的复合污染,检出最多的毒素种类有ZEN、DON、

FB₁、BEA、FB₂、FB₃和NIV。

2 镰刀菌菌群遗传结构及产毒特征研究

2.1 产毒菌群遗传结构研究

小麦、玉米和水稻上的产毒镰刀菌种群差异较大,产毒特征也各有差异。Qiu等^[13]采集了我国玉米、水稻和小麦主产区样品,并利用镰刀菌种和产毒化学型特异性PCR对分离的镰刀菌菌株进行鉴定。研究发现,小麦赤霉病及毒素污染主要来自接骨木镰刀菌复合种禾谷镰刀菌进化枝(*Fusarium sambucinum* species complex, FSAMSC, *Graminearum* Clade)中的菌群,我国小麦的产毒菌主要为禾谷镰刀菌(*F. graminearum*)、亚洲镰刀菌(*F. asiaticum*)及南方镰刀菌(*F. meridionale*)等。相比小麦,玉米和水稻上的镰刀菌种群的丰富度及多样性水平更高。Qiu等^[14]从我国玉米主产区分离产毒镰刀菌,发现除FSAMSC外,藤仓镰刀菌复合种(*Fusarium fujikuroi* species complex, FFSC)在玉米上也高频检出。FFSC为玉米优势产毒群体,轮枝镰刀菌(*F. verticillioides*)分离频率最高(56.5%),层出镰刀菌(*F. proliferatum*)、藤仓镰刀菌(*F. fujikuroi*)和新知镰刀菌(*F. andiyazi*)也有分离,但分离比例较低。

水稻上引起穗腐病和毒素污染的镰刀菌种群更加多样。2021—2023年采集的1 381份江苏稻谷和稻桩样品中分离鉴定频率最高的4个复合种分别是砖红-木贼镰刀菌复合种(*Fusarium incarnatum-equiseti* species complex, FIESC)、三线镰刀菌复合种(*Fusarium tricinctum* species complex, FTSC)、FFSC和FSAMSC^[12]。其中,分离频率最高的镰刀菌种为苏拉威镰刀菌(*F. sulawesiense*),频率为31.0%;亚洲镰刀菌(*F. asiaticum*)为18.0%,丝瓜镰刀菌(*F. luffae*)为16.4%,藤仓镰刀菌为10.6%。稻桩和稻谷上的镰刀菌种群组成差异显著,且群体组成相对稳定。

2.2 镰刀菌产毒特征研究

小麦上镰刀菌菌群主要有2种产毒类型(又称产毒化学型),即DON产毒化学型和NIV产毒化学型。禾谷镰刀菌主要产毒为DON及其衍生物15Ac-DON;亚洲镰刀菌主要产DON及其衍生物3Ac-DON或NIV及其衍生物4Ac-NIV;南方镰刀菌主要合成NIV及其衍生物4Ac-NIV。以上镰刀菌种均能合成ZEN。小麦镰刀菌种群和产毒化学型具有明显的地理分化特征,北部黄淮海、东北、西北麦区的菌株主要为15Ac-DON化学型的禾谷镰刀菌,长江中下游麦区主要为3Ac-DON化学型的亚洲镰刀菌,西南麦区优势

群体是NIV化学型的亚洲镰刀菌和南方镰刀菌^[14-16]。

玉米优势产毒菌轮枝镰刀菌主要合成FBs (FB₁、FB₂、FB₃)且产毒量较高。层出镰刀菌和藤仓镰刀菌除了产生FBs外,还可以合成白僵菌素和串珠镰刀菌素(Moniliformin, MON),产毒量较高。胶孢镰刀菌(*F. subglutinans*)和新知镰刀菌可合成微量的伏马毒素。胶孢镰刀菌还能合成一定量的BEA和MON。此外,FSAMSC中的玉米产毒菌主要产生DON、15Ac-DON和ZEN。禾谷镰刀菌在玉米上分离频率高,绝大多数分布在东北玉米产区。布氏镰刀菌(*F. boothii*)在西南、西北、东北等玉米种植地区均有检出,南方镰刀菌及亚洲镰刀菌仅在西南和东北玉米样品中分离得到。

产毒化学谱测定结果显示,水稻镰刀菌群体产毒种类更为多样。FFSC菌群主要产生MON、BEA和FBs。FIESC菌群产生单端孢霉烯B族毒素的能力较强,如NIV和蛇形毒素(diacetoxyscirpenol, DAS)、ZEN。FSAMSC菌群主要产单端孢霉烯毒素,如A族的T-2毒素、HT-2毒素,B族的DON、NIV及其乙酰化衍生物以及BEA、ZEN等^[12]。

3 谷物镰刀菌毒素污染风险的影响因素

3.1 不同品种的抗毒素累积能力差异较大

谷物镰刀菌毒素污染程度受品种抗性、温湿度等环境因子、轮作方式、秸秆还田方式、药剂防控等多种因素的综合影响。就小麦而言,目前尚未见对赤霉病或毒素完全免疫的品种,赤霉病抗性较好的品种一般抗毒素累积的能力较强,DON毒素的抗性与抗扩展相关^[17]。曹淑琳等^[18]比较了280个江苏省小麦品种对赤霉病的抗性及其籽粒中DON毒素的含量,发现淮南品种对赤霉病的抗性整体较淮北品种高,籽粒中DON积累量低。徐飞等^[19]评估了黄淮冬麦区主栽小麦品种对赤霉病的抗性及其抗毒素累积能力的相互关系,发现小麦品种的病粒率与抗DON毒素累积能力呈极显著正相关。陈祥祥等^[20]首次针对水稻品种开展赤霉病抗性评价,水稻品种同样没有对赤霉病表现稳定免疫的品种,籼稻对赤霉病的抗性水平显著高于粳稻。水稻赤霉病病情指数与侵染籽粒中的单端孢霉烯族毒素的积累量呈极显著正相关。

3.2 温湿度等环境因素影响毒素污染程度

镰刀菌毒素的污染程度受到温湿度等环境因素的影响。小麦抽穗扬花期及灌浆后期的暖湿气候是导致小麦镰刀菌毒素高污染的重要原因。Dong等^[21]

基于2013—2015年的降雨量、温度与小麦DON毒素污染的历史数据,明确了小麦抽穗扬花期降雨量与DON毒素污染水平呈显著正相关,短期内的气温差异并不能显著影响毒素污染程度。李世雄等^[22]分析了温度、水活度对伏马毒素FBs产生及合成基因表达的影响,产毒最适温度为30℃、水活度为0.99。Dong等^[23]比较了水活度、温度、培养时间对FFSC的毒素合成的影响,发现镰刀菌酸(Fusaric acid, FA)和FB₁的适宜产毒温度为20~25℃,新知镰刀菌产生MON的最适温度相较于藤仓镰刀菌略低。

3.3 耕作栽培制度对毒素累积的影响

除了环境因素外,现行的耕作栽培模式有利于镰刀菌田间菌源量的维持并加重毒素污染程度。FSAMSC中的多数镰刀菌腐生能力强,通常以腐生状态在稻桩、玉米等农作物残体上以子囊壳形式越冬,成为翌年初侵染源^[24]。近年来,我国普遍实行的秸秆还田,因土壤条件不允许,播种前无法做到深翻,造成田间菌源基数较大^[25]。此外,研究发现,轮作方式影响小麦镰刀菌毒素的污染种类及程度。北方麦区小麦通常与玉米、大豆轮作,南方则主要是稻麦轮作。与稻麦轮作相比,豆麦轮作模式下小麦中总单端孢霉烯族毒素的含量显著降低^[16]。稻麦轮作模式下采集的小麦样品中DON毒素含量相对更高,而当与玉米轮作的时候,小麦样品中ZEN的污染程度更重^[26]。

3.4 化学药剂防控要突出对防病控毒的协同作用

化学药剂防控是控制镰刀菌毒素污染的重要措施。不同化学药剂对镰刀菌毒素的防控效果差异较大。我国自主研发的氰烯菌酯通过抑制镰刀菌I型肌球蛋白的ATPase活性起到抑菌作用。I型肌球蛋白还参与毒素小体形成,因此氰烯菌酯还表现出显著的抑制毒素合成活性,已在我国部分麦区推广应用^[27]。甾醇脱甲基抑制剂对多种镰刀菌具有显著的抑菌活性,丙硫菌唑、戊唑醇复配剂及叶菌唑等药剂在小麦抽穗扬花期使用,可以有效控制病害流行与毒素累积。Audenaert等^[28]报道,实验室培养条件下,亚致死剂量的丙硫菌唑可以通过诱导过氧化氢形成,进而刺激DON毒素累积。低剂量戊唑醇、叶菌唑等药剂可以诱导单端孢霉烯族毒素合成基因TRI的过表达^[29-30]。浙江大学研究发现,先锋转录因子FgSR受低剂量戊唑醇诱导激活,调控DON毒素合成前体基因高表达,进而刺激了毒素的合成^[31]。

氟唑菌酰胺等琥珀酸脱氢酶抑制剂类杀菌

剂对镰刀菌表现出较好的抑菌活性,200 g/L氟唑菌酰胺悬浮剂(750 mL/hm²)与丙环唑联用,可有效控制赤霉病发生及毒素污染^[32-33]。自2019年氟唑菌酰胺登记用于小麦赤霉病防治后,已有田间抗药性的报道。Shao等^[34]从6 468株禾谷镰刀菌菌株中筛选得到6株氟唑菌酰胺抗性菌株,发现了药靶基因*AdhC1*第78位氨基酸点突变。Liu等^[35]评估了氟唑菌酰胺与氰烯菌酯双抗药性的形成风险,双抗突变体的适合度和产毒能力下降。目前镰刀菌引起的玉米穗腐病及水稻赤霉病的防控药剂登记种类很少。He等^[36]报道,异丙醇类新三唑药剂氟唑菌酰胺对轮枝镰刀菌引起的玉米穗腐病及伏马毒素污染具有较好的抑制作用。叶菌唑对假禾谷镰刀菌引起的小麦茎基腐病、FSAMSC和FFSC中的7种镰刀菌引起的水稻赤霉病及毒素污染防控效果显著^[29,37-38]。

4 谷物镰刀菌病害及毒素污染风险的早期预警

镰刀菌引起的小麦赤霉病发生及毒素污染受菌源、气候因素、品种及防控措施等多种因素影响。病害发生与流行及毒素的累积速度快,防治窗口期短。因此,国内外学者研发了多项基于区域气象因素的赤霉病或毒素的预测预警模型。De Wolf等^[39]基于小麦扬花期前后17 d的温度、相对湿度及降雨量构建了赤霉病严重度预测模型,准确率达到70%。Shah等^[40]基于随机森林构建了赤霉病流行预测模型,发现扬花前20 d温度稳定性是决定病害发生程度的重要变量,预测准确率高于简单逻辑回归构建的测报模型。张平平^[41]构建了基于麦田产壳玉米秸秆密度的小麦赤霉病预测模型并研制了测报器。宋瑞等^[42]对上述测报器的应用效果进行评价,预测准确度达到71.8%。Xu等^[43]比较了气象因子与赤霉病病穗率的相关性,构建了综合气象风险指数,用于赤霉病病穗率的预测及病害发生后定量评估气象条件对其的影响程度。毒素发生风险预警模型的研究国内报道相对较少,Li等^[44]基于黄淮海麦区样品毒素污染程度与气候、农艺因子的相关性,构建了DON毒素发生预警模型,预测精准度可达86.6%。

5 结论与展望

镰刀菌毒素污染已经成为威胁我国谷物产品质量安全及产业发展的重要风险因子。近年来该领域学者通过连续监测与评估,基本掌握了谷物毒素污染分布特征及规律,明确了不同作物镰刀菌种群

结构及产毒特征,并系统评估了镰刀菌毒素污染风险形成的影响因素,为谷物镰刀菌毒素污染防控提供了指导和依据。高效防控毒素污染还需要从全产业链的角度,在抗性品种的布局下,通过早期预警、产中高效防控及产后风险监测多措并举来降低毒素污染风险。尤其要在筛选“控病减毒”协同杀菌剂、科学用药等方面开展研究,在防控关键时期精准用药,从而压低田间菌源量,降低初侵染,减少毒素累积,在确保谷物质量安全的同时,为环境可持续发展提供有效路径。

参考文献

- [1] 徐哲,刘太国,刘博,等.我国四大麦区小麦籽粒镰刀菌毒素检测与污染分析[J].植物保护,2021,47(3):200-205.
- [2] 马玉彤,刘太国,文才艺,等.我国不同麦区小麦镰刀菌毒素检测及毒素污染分析[J].植物保护学报,2019,46(2):266-273.
- [3] Ji F, XU J, LIU X, et al. Natural occurrence of deoxynivalenol and zearalenone in wheat from Jiangsu province, China[J]. Food Chem, 2014, 157: 393-397.
- [4] DONG F, WANG S, YU M, et al. Natural occurrence of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-glucoside in various wheat cultivars grown in Jiangsu province, China[J]. World Mycotoxin J, 2017, 10(3): 285-293.
- [5] 陈新元,董飞,仲伶俐,等.四川省主要粮食作物中镰刀菌毒素污染规律分析[J].四川农业大学学报,2021,39(2):141-148;172.
- [6] SUN X D, SU P, SHAN H. Mycotoxin contamination of maize in China[J]. Compr Rev Food Sci F, 2017, 16(5): 835-849.
- [7] LI R, TAO B, PANG M, et al. Natural occurrence of Fumonisin B₁ and B₂ in maize from three main maize-producing provinces in China[J]. Food Control, 2015, 50: 838-842.
- [8] WEI T, ZHU W, PANG M, et al. Natural occurrence of Fumonisin B₁ and B₂ in corn in four provinces of China[J]. Food Addit Contam B, 2013, 6(4): 270-274.
- [9] FU M, LI R, GUO C, et al. Natural incidence of *Fusarium* species and Fumonisin B₁ and B₂ associated with maize kernels from nine provinces in China in 2012[J]. Food Addit Contam A, 2015, 32(4): 503-511.
- [10] LIU Z, ZHANG G, ZHANG Y, et al. Factors controlling mycotoxin contamination in maize and food in the Hebei province, China[J]. Agron Sustain Dev, 2016, 36(2): 1-10.
- [11] DONG F, XING Y J, LEE Y W, et al. Occurrence of *Fusarium* mycotoxins and toxigenic *Fusarium* species in freshly harvested rice in Jiangsu, China[J]. World Mycotoxin J, 2020, 13(2): 201-212.
- [12] QIU J, GU H, WANG S, et al. A diverse *Fusarium* community is responsible for contamination of rice with a variety of *Fusarium* toxins[J]. Food Res Int, 2024, 195: 114987.
- [13] QIU J, LU Y, HE D, et al. *Fusarium fujikuroi* species complex associated with rice, maize, and soybean from Jiangsu province,

- China: phylogenetic, pathogenic, and toxigenic analysis[J]. Plant Dis, 2020, 104(8): 2193-2201.
- [14] QIU J, SHI J. Genetic relationships, carbendazim sensitivity and mycotoxin production of the *Fusarium graminearum* populations from maize, wheat and rice in Eastern China[J]. Toxins, 2014, 6(8): 2291-2309.
- [15] QIU J, SUN J T, YU M Z, et al. Temporal dynamics, population characterization and mycotoxins accumulation of *Fusarium graminearum* in Eastern China[J]. Sci Rep-Uk, 2016, 6(1): 36350.
- [16] DONG F, CHEN X, LEI X, et al. Effect of crop rotation on *Fusarium* mycotoxins and *Fusarium* species in cereals in Sichuan province (China)[J]. Plant Dis, 2023, 107(4): 1060-1066.
- [17] 张凯鸣, 马鸿翔, 陆维忠, 等. 小麦赤霉病与DON积累的抗性及其相关SSR位点差异[J]. 作物学报, 2006(12): 1788-1795.
- [18] 曹淑琳, 杨红福, 冷苏凤, 等. 江苏省主推及新育成小麦品种抗赤霉病评价及毒素积累分析[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(8): 958-968.
- [19] 徐飞, 王俊美, 杨共强, 等. 黄淮冬麦区小麦主栽品种赤霉病综合抗性鉴定及其*FHB1*抗性基因检测[J]. 植物保护, 2020, 46(5): 84-92.
- [20] 陈祥祥, 钱保陆, 吴季荣, 等. 江苏省主栽水稻品种抗赤霉病鉴定及毒素积累分析[J]. 植物病理学报, 2024, 54(2): 377-384.
- [21] DONG F, QIU J, XU J, et al. Effect of environmental factors on *Fusarium* population and associated trichothecenes in wheat grain grown in Jiangsu province, China[J]. Int J Food Microbiol, 2016, 230: 58-63.
- [22] 李世雄, 李人杰, 刘颖超, 等. 不同环境因素对拟轮生镰孢产毒及*FUM*基因表达的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(2): 141-146.
- [23] DONG T, QIAO S, XU J, et al. Effect of abiotic conditions on growth, mycotoxin production, and gene expression by *Fusarium fujikuroi* species complex strains from maize[J]. Toxins, 2023, 15(4): 260.
- [24] KAZAN K, GARDINER D M, MANNERS J M. On the trail of a cereal killer: recent advances in *Fusarium graminearum* pathogenomics and host resistance[J]. Mol Plant Pathol, 2012, 13(4): 399-413.
- [25] 张昊, 陈万权. 小麦赤霉菌群体结构和病害监控技术研究进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 250-262.
- [26] QIU J, DONG F, YU M, et al. Effect of preceding crop on *Fusarium* species and mycotoxin contamination of wheat grains[J]. J Sci Food Agr, 2016, 96(13): 4536-4541.
- [27] ZHANG C, CHEN Y, YIN Y, et al. A small molecule species specifically inhibits *Fusarium myosin* II[J]. Environ Microbiol, 2015, 17(8): 2735-2746.
- [28] AUDENAERT K, CALLEWAERT E, HOFTE M, et al. Hydrogen peroxide induced by the fungicide prothioconazole triggers deoxynivalenol (DON) production by *Fusarium graminearum*[J]. BMC Microbiol, 2010, 10: 1-14.
- [29] LIU X, WANG S, FAN Z, et al. Antifungal activities of metconazole against the emerging wheat pathogen *Fusarium pseudograminearum*[J]. Pestic Biochem Phys, 2023, 190: 105298.
- [30] LIU X, JIANG J, SHAO J, et al. Gene transcription profiling of *Fusarium graminearum* treated with an azole fungicide tebuconazole[J]. Appl Microbiol Biot, 2010, 85: 1105-1114.
- [31] LIU Z, JIAN Y, CHEN Y, et al. A phosphorylated transcription factor regulates sterol biosynthesis in *Fusarium graminearum*[J]. Nat Commun, 2019, 10(1): 1-17.
- [32] 朱友理, 何东兵, 吴小美, 等. 品种抗性和杀菌剂对小麦赤霉病及DON毒素的协同防效[J]. 大麦与谷类科学, 2023, 40(4): 33-38.
- [33] 顾月萍, 张海燕, 李莲, 等. 不同小麦品种, 不同药剂处理对小麦赤霉病及呕吐毒素控制效果的试验研究[J]. 上海农业科技, 2023(1): 112-114.
- [34] SHAO W, WANG J, WANG H, et al. *Fusarium graminearum* FgSdhC1 point mutation A78V confers resistance to the succinate dehydrogenase inhibitor pydiflumetofen[J]. Pest Manag Sci, 2022, 78(5): 1780-1788.
- [35] LIU C, SHAO W, DUAN Y, et al. Biological and molecular characterization of pydiflumetofen and phenamacril dual-resistant *Fusarium graminearum* strains[J]. Pest Manag Sci, 2024, 80(10): 4959-4966.
- [36] HE D, SHI J, QIU J, et al. Antifungal activities of a novel triazole fungicide, mefentrifluconazole, against the major maize pathogen *Fusarium verticillioides*[J]. Pestic Biochem Phys, 2023, 192: 105398.
- [37] WANG B, WANG S, HE D, et al. Metconazole inhibits fungal growth and toxin production in major *Fusarium* species that cause rice panicle blight[J]. Pestic Biochem Phys, 2024, 204: 106092.
- [38] 赫丹, 徐剑宏, 仇剑波, 等. 叶菌唑对轮枝镰刀菌的活性及作用机制[J]. 农药学报, 2023, 25(2): 353-363.
- [39] DE WOLF E D, MADDEN L V, LIPPS P E. Risk assessment models for wheat *Fusarium* head blight epidemics based on within-season weather data[J]. Phytopathology, 2003, 93(4): 428-435.
- [40] SHAH D A, DE WOLF E D, PAUL P A, et al. Into the trees: random forests for predicting *Fusarium* head blight epidemics of wheat in the United States[J]. Phytopathology, 2023, 113(8): 1483-1493.
- [41] 张平平, 宋金东, 冯小军, 等. 关麦田产壳玉米秸秆密度与小麦赤霉病穗率的关系[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(7): 1022-1028.
- [42] 宋瑞, 王嘉芸, 袁冬贞, 等. 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.
- [43] XU M, XU Y, XU J, et al. Construction of a comprehensive meteorological risk index for wheat *Fusarium* head blight prediction based on more than a half-century of monitoring data. [J]. Plant Dis, 2024, 4: 1-11.
- [44] LI S, LIU N, CAI D, et al. A predictive model on deoxynivalenol in harvested wheat in China: revealing the impact of the environment and agronomic practicing[J]. Food Chem, 2023, 405: 134727.

(编辑:顾林玲)