

网络出版时间: 2025-07-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20250709.1153.004>

病小穗率及镰刀菌相对丰度与小麦赤霉病 DON 毒素累积相关性研究

丁芮, 周佳, 王楚义, 任宇航, 王强, 胡小平, 商文静

(西北农林科技大学植物保护学院, 植物资源与病虫害治理教育部重点实验室,
农业农村部西北黄土高原作物有害生物综合治理重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为明确病小穗率、镰刀菌相对丰度与小麦赤霉病 DON 毒素累积的关系, 2023 年从江苏、湖北、安徽、河南和陕西 5 省份 11 个环境中自然发病麦田采集 128 个小麦穗样本, 统计了样本病小穗率, 划分病害严重程度等级, 同时利用高通量测序和 LC/MS 技术测定了镰刀菌相对丰度和 DON 毒素含量, 并对三者的相关性进行了分析。结果表明, 病小穗率、镰刀菌相对丰度与 DON 毒素含量间均呈极显著正相关 ($P < 0.001$); 严重程度为 4 级的样本中镰刀菌相对丰度显著高于 0 级和 1 级 ($P < 0.05$), 严重程度为 4 级的样本 DON 毒素平均含量显著高于其他等级, 且在严重程度为 1、2、3 级样本间, 镰刀菌相对丰度和 DON 毒素平均含量均无显著差异, 病小穗率比严重程度等级更适合用于评估小麦穗中的镰刀菌相对丰度和 DON 毒素含量。经多元线性回归分析, 病小穗率和镰刀菌相对丰度对 DON 毒素累积的共同影响大于单一因子 ($R^2 = 0.364$), 二者可能同时在 DON 毒素含量预测模型的构建中发挥重要作用。

关键词: 小麦; 赤霉病; DON 毒素; 病小穗率; 镰刀菌相对丰度; 预测模型

中图分类号: S512.1; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)02-0234-07

Correlation between the Diseased Spikelet Rate, Relative Abundance of *Fusarium* Species, and Accumulation of DON Toxin in Fusarium Head Blight

DING Rui, ZHOU Jia, WANG Chuyi, REN Yuhang, WANG Qiang, HU Xiaoping, SHANG Wenjing

(Key Laboratory of Plant Protection Resources and Pest Integrated Management of Ministry of Education, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Northwestern Loess Plateau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To clarify the correlation between the diseased spikelet rate, the relative abundance of *Fusarium* species, and accumulation of DON toxin in Fusarium head blight, 128 wheat ears from naturally occurring wheat fields were collected in 11 environments in 5 provinces of Jiangsu, Hubei, Anhui, Henan and Shaanxi in 2023. We calculated the diseased spikelet rate in the samples, classified the disease severity, and used high-throughput sequencing and LC/MS technology to determine the relative abundance of *Fusarium* species and DON toxin content, and analyzed their correlation. The results showed that there was a significantly positive correlation between the diseased spikelet rate and relative abundance of *Fusarium* species and DON toxin content ($P < 0.001$). However, the relative abundance of fusarium species in samples with severity level 4 was significantly higher than that of level 0 and level 1; the average content of DON toxin in samples with severity level 4 was significantly higher than that of other levels ($P < 0.05$), and there was no significant difference in the relative a-

收稿日期: 2025-04-04

修回日期: 2025-04-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD1400101-1); 国家自然科学基金项目 (32202265); 国家现代农业 (小麦) 产业技术体系项目 (CARS-03-37); 西北农林科技大学推广项目 (TGZX2021-13)

第一作者 E-mail: 1910524633@qq.com (丁芮)

通讯作者 E-mail: shangwj@nwsuaf.edu.cn (商文静)

abundance of *Fusarium* species and average content of DON toxin among samples between severity levels 1, 2, and 3; the diseased spikelet rate is more suitable than the disease severity for evaluating the relative abundance of *Fusarium* species and DON toxin content in wheat spikes. The results of multiple linear regression analysis showed that the combined effect of diseased spikelet rate and relative abundance of *Fusarium* species on DON toxin accumulation was greater than that of a single factor ($R^2 = 0.364$), and both factors may play important roles in the construction of DON toxin content prediction model.

Keywords: Wheat; *Fusarium* head blight; DON toxin; Diseased spikelet rate; Relative abundance of *Fusarium* species; Prediction model

小麦赤霉病(*Fusarium* head blight, FHB)是由镰刀菌属(*Fusarium* spp.)真菌侵染引起的一种重要流行性病害^[1],主要危害小麦穗部,导致穗部腐烂甚至枯死,造成产量和品质下降^[2]。该病害在全球小麦种植区域内均有发生^[3],温暖潮湿地区尤为严重。近年来,受全球气候变化、农艺措施调整等因素影响,该病害发生范围持续扩展。近五年中国小麦赤霉病年均发生面积达 450 万 hm^2 ,已成为严重影响中国小麦生产安全的重大病害^[4-5]。

镰刀菌在侵染过程中会产生镰刀菌毒素,对人畜健康造成严重威胁^[6]。其中,脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)污染最为严重。据报道,中国主产区小麦中 DON 毒素检出率最高^[7],且 DON 毒素的累积与小麦赤霉病的发生密切相关^[8-10]。国内外多个研究团队通过田间采样、人工接种、实时荧光定量 PCR 及质谱-色谱联用等方法,证明了不论是镰刀菌含量、镰刀菌接种浓度或小麦赤霉病发生程度均与 DON 毒素浓度呈显著正相关^[11-15]。但 Morenocontreras 等^[16]研究认为, DON 毒素累积与镰刀菌菌量以及小麦赤霉病发生程度不存在显著相关性。目前多数研究均以气象因素作为关键变量构建 DON 毒素预测模型^[17-18],还有部分研究利用光谱技术实现 DON 毒素预测模型的构建^[19-20],少数研究结合农艺措施等因素进行建模^[21]。然而,基于病原菌相对丰度及病小穗率等因子的 DON 毒素预测模型研究较为缺乏。

现有研究虽已初步阐明小麦赤霉病发生与镰刀菌及 DON 毒素的相关性,但多数研究都集中于特定镰刀菌的绝对含量,而忽略了田间自然发病时多种镰刀菌的相对丰度,且目前尚未有关于病小穗率、镰刀菌相对丰度与 DON 毒素含量间的相关性研究。因此,本研究在自然发病麦田中随机采集麦穗,统计病小穗率,划分病害严重程度等级,采用高通量测序法得出镰刀菌相对丰度,结合

LC/MS 技术测定 DON 毒素含量,通过 Pearson 相关分析探讨病小穗率、镰刀菌相对丰度与 DON 毒素含量间的关系,同时利用多元线性回归得出病小穗率和镰刀菌相对丰度对 DON 毒素含量的影响,以期从新的角度为构建 DON 毒素预测模型奠定基础,为小麦赤霉病科学防控和食品安全保障提供重要理论依据。

1 材料与方法

1.1 样本采集

2023 年 5 月,在中国小麦赤霉病传统发生地区即江苏、湖北、安徽、河南、陕西等 5 省 11 块麦田,每块麦田随机采集发病小麦穗样本 4~15 个,健康穗样本 3 个,用吸水纸包裹,分别装入网袋中,记录采样信息,带回实验室后立即放于 -80°C 保存备用。

1.2 样本处理

按照《GB/T15796-2011 小麦赤霉病测报技术规范》^[22]进行样本病小穗率统计和病害严重程度等级划分。按照以下公式和标准计算病小穗率,划分病害严重程度等级:

病小穗率 = (麦穗发病小穗数/麦穗总小穗数) $\times 100\%$ 。

病害严重程度等级划分标准:无病,0 级;病小穗率小于 25%,1 级;病小穗率在 25%~50%之间,2 级;病小穗率在 50%~75%之间,3 级;病小穗率大于 75%,4 级。

将样本分别置于液氮中进行充分研磨,并将粉状样品置于 -20°C 保存备用。

1.3 样品镰刀菌相对丰度测定

采用高通量测序法进行样品镰刀菌相对丰度测定。具体步骤:取供试样品 0.1 g,采用 CTAB 法^[23]提取基因组 DNA,使用真菌 ITS 区段通用引物 ITS5-1737F 和 ITS2-2043R^[24]进行 PCR 扩增。50 μL PCR 扩增体系:2 $\times$ Phanta Max Mas-

ter Mix 25 μL , dNTPs 1 μL , Phanta Max Polymerase 1 μL , 正反向引物各 2 μL , DNA 模板 1 μL , ddH₂O 补足。PCR 程序: 95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 3 min; 95 $^{\circ}\text{C}$ 变性 15 s, 56 $^{\circ}\text{C}$ 退火 15 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 45 s, 共 35 个循环; 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 5 min。扩增产物经 1.2% 琼脂糖凝胶电泳验证后, 使用 HiPure Gel Pure DNA Mini Kit (Magen) 纯化目的片段。送至北京诺禾致源生物信息科技有限公司 (NovaSeq6000 PE250) 测序。

拆分测序数据并去除 Barcode 和引物序列, 使用 FLASH^[25] (V 1.2.11) 进行序列拼接, 获得 Raw Tags。利用 Fastp (V 0.23.1) 对 Raw Tags 进行质量控制, 得到 Clean Tags^[26]。将 Clean Tags 与物种注释数据库 (Unite database <https://unite.ut.ee/> for ITS) 进行比对, 去除嵌合体序列, 获得 Effective Tags^[27]。使用 Vsearch^[28] 对 Effective Tags 在 97% 相似度水平下进行聚类并获得 (operational taxonomic units, OTUs)。通过 QIIME^[29] 将代表性 OTUs 序列与 Unite 数据库比对, 完成物种注释。

1.4 样品 DON 毒素含量测定

参考 Juan 等^[30] 方法并稍作修改, 采用液相质谱联用仪 (LC/MS) 进行样品 DON 毒素含量测定。具体步骤如下: 取供试样品 0.2 g, 加入 10 mL 提取溶剂 (乙腈: 水: 甲酸 = 84: 15: 1), 于 25 $^{\circ}\text{C}$, 200 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇培 4 h。超声振荡 30 min, 10 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 收集上清液, 自然

风干后加入 1 mL 有机溶剂 (甲醇: 水 = 70: 30) 复溶, 使用 0.22 μm 细菌过滤器过滤至样品瓶中, 上机分析。流动相组成: 流动相 A (0.1% 甲酸, 5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 甲酸铵、水) 和流动相 B (0.1% 甲酸, 5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 甲酸铵、甲醇)。梯度洗脱设置: 90% A 0.25 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (0~2 min), 80%~20% A 0.25 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (2~5 min), 20% A 0.25 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (5~6 min), 20%~10% A 0.25 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (6~8 min), 10% A 0.25 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (8~14 min), 10%~0% A 0.25 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (14~17 min), 100% B 0.35 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (17~18 min), 100%~50% B 0.4 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (18~21 min), 进样总量为 20 μL , 总计运行时间为 21 min。

1.5 数据处理与分析

利用 Excel 进行数据处理; 运用 SPSS 26.0 进行 Pearson 相关分析和多元线性回归, 将数据对数转换后使用单因素方差分析 (ANOVA) 和最小显著差异法 (least significant difference, LSD) 进行数据比较。

2 结果与分析

2.1 样本采集信息及病小穗率统计

在 128 个蜡熟期小麦穗样本中, 发病穗样 95 个, 健康穗样 33 个 (表 1)。其中, 严重度为 1、2、3 和 4 级的样本平均病小穗率分别为 19.54%、39.24%、63.18% 和 90.56%, 对应的样本数量分别为 16、23、28 和 28 个 (表 2)。

表 1 样本采集信息
Table 1 Samples information

省份 Province	采样地点 Sampling site	麦穗总样本数 Number of wheat spike samples	病穗样本数 Number of diseased wheat spike samples
湖北 Hubei	襄阳市南漳县 Nanzhang county, Xiangyang city	17	14
	天门市 Tianmen city	10	7
江苏 Jiangsu	泰州市姜堰区 Jiangyan district, Taizhou city	7	4
	淮安市洪泽区 Hongze district, Huai'an city	15	12
	苏州市张家港市 Zhangjiagang city, Suzhou city	8	5
	苏州市太仓市 Taicang city, Suzhou city	8	5
安徽 Anhui	合肥市庐江县 Lujiang county, Hefei city	8	5
	淮南市凤台县 Fengtai county, Huainan city	13	10
河南 Henan	南阳市唐河县 Tanghe county, Nanyang city	15	12
陕西 Shaanxi	渭南市蒲城县 Pucheng county, Weinan city	14	11
	渭南市富平县 Fuping county, Weinan city	13	10
总计 Totul		128	95

表 2 病小穗率及病害严重度统计

样本总数 Number of samples	平均病小穗率 Average diseased spikelet rate/%	严重度等级 Grade of severity
33	0.00	0
16	19.54	1
23	39.24	2
28	63.18	3
28	90.56	4

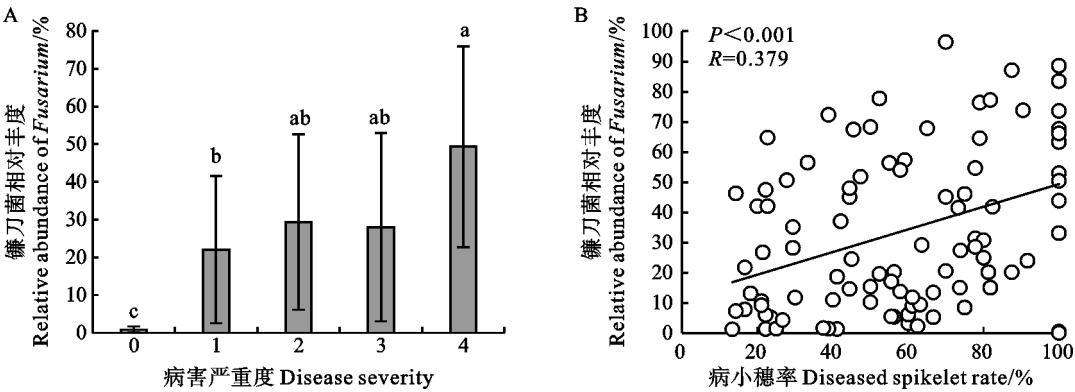
2.2 样本镰刀菌相对丰度与病小穗率相关性

通过高通量测序分析,严重度为 1、2、3 级的样本中,镰刀菌相对丰度分别为 22.04%、29.40%和 28.02%,且 3 个等级样本间无显著差异;严重度 4 级的样本镰刀菌相对丰度最高,为 49.36%,显著高于 0 级和 1 级;健康麦穗样本中也存在少量镰

刀菌,但其相对丰度仅为 0.86%,显著低于其他等级(图 1A)。病小穗率与镰刀菌相对丰度间呈极显著正相关($P<0.001$),Pearson 相关系数为 0.379(图 1B)。这说明病小穗率比严重度等级更适合用于评估麦穗中镰刀菌相对丰度。

2.3 样本 DON 毒素含量与病小穗率相关性

测定结果显示,严重度为 1、2、3 级的样本中,DON 毒素平均含量分别为 19.95、25.69 和 21.79 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,且等级间无显著差异;严重度为 4 级的样本中,DON 毒素平均含量最高,为 53.11 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,与其他等级差异显著;健康麦穗样本不存在 DON 毒素污染(图 2A);病小穗率与 DON 毒素平均含量间呈极显著正相关($P<0.001$),Pearson 相关系数为 0.380,拟合表达式为 $Y=0.441X+6.019$,决定系数 R^2 仅为 0.144(图 2B)。



图柱上不同小写字母表示各严重度等级间在 0.05 水平差异显著,下同。
Different letters above the columns indicate significant differences among different disease severity grades at 0.05 level, the same in below.

图 1 镰刀菌相对丰度及其与病小穗率的相关性

Fig. 1 Relative abundance of *Fusarium* species and correlation with diseased spikelet rate

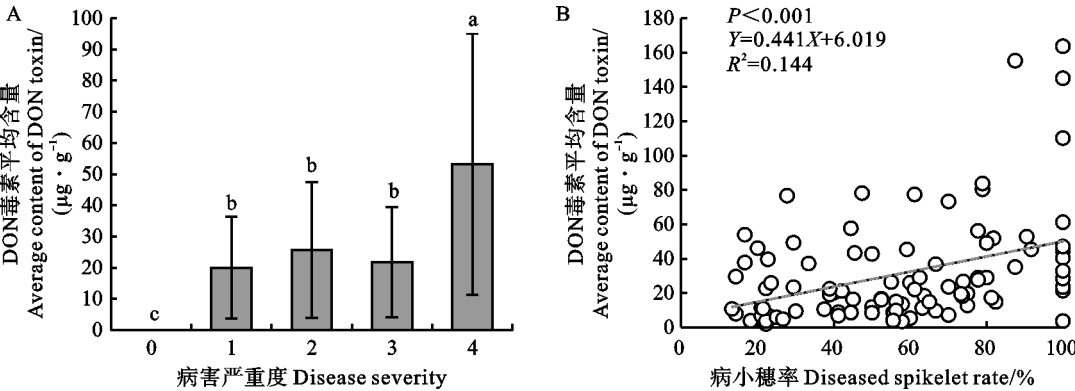


图 2 DON 毒素平均含量及其与病小穗率的相关性

Fig. 2 Average content of DON toxin and correlation with diseased spikelet rate

2.4 病小穗率及镰刀菌相对丰度与 DON 毒素含量相关性

镰刀菌相对丰度与 DON 毒素含量间呈极显著正相关($P<0.001$), Pearson 相关系数为 0.592, 拟合表达式为 $Y=0.696X+8.251$, 决定系数 R^2 为 0.350(图 3)。

利用病小穗率和镰刀菌相对丰度两个因子建立 DON 毒素含量多元线性回归模型:

$Y=0.211\text{ DSR}+0.615\text{ RAF}-1.277, R^2=0.364$

式中, Y 为 DON 毒素含量, DSR 为病小穗率, RAF 为镰刀菌相对丰度。该模型 DSR 和 RAF 的 VIF 值均小于 10(表 3), 说明这两个因子之间不存在共线性, 可以用于模型的建立。决定系数 R^2 说明病小穗率和镰刀菌相对丰度能解释 DON 毒素含量变异的 36.4%。与上述结果相比,

病小穗率和镰刀菌相对丰度共同对 DON 毒素累积的影响大于单一因子。

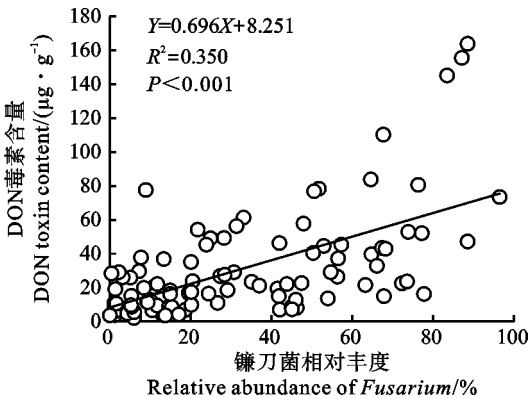


图 3 镰刀菌相对丰度与 DON 毒素含量的相关性
Fig. 3 Correlation between relative abundance of *Fusarium* species and DON toxin content

表 3 DON 毒素多元线性回归模型具体信息
Table 3 Specific information of DON toxin in multiple linear regression model

模型 Model	未标准化系数 Non-standardized coefficient		标准化系数 Standardized coefficient		共线性统计 Collinearity statistics	
	B	标准错误 Standard error	Beta	t	容差 Tolerance	VIF
常量 Constant	-1.277	6.244	/	-0.204		
DSR	0.211	0.103	0.181	2.037	0.857	1.168
RAF	0.615	0.105	0.523	5.885	0.857	1.168

3 讨论

小麦赤霉病是一种全球重大农作物病害, 其发生流行与镰刀菌侵染及其次生代谢产物 DON 毒素积累密切相关。目前有部分研究聚焦于小麦赤霉病的发生与镰刀菌侵染及 DON 毒素积累之间的相关性, 但研究结果存在一定差异。研究发现, 小麦赤霉病平均病害严重度与籽粒中 DON 毒素含量间呈极显著正相关^[31-32], DON 毒素浓度与病小穗率和镰刀菌生物量之间呈显著正相关^[33], 这与本研究结论基本一致。然而不同条件下此方面的研究结论会存在一定差异。如, 陈利锋等^[34]研究表明, DON 毒素含量与发病程度的相关性在不同抗性品种中存在差异, 感病品种中呈现显著相关, 而在抗病品种中则不显著。本研究中, 病小穗率和镰刀菌相对丰度与 DON 毒素含量之间均呈极显著正相关($P<0.001$)。鉴于田间普遍存在镰刀菌复合侵染现象, 后续研究将重点解析镰刀菌群落组成对病害发生及毒素积累的影响。此外, 本研究结果显示, 严重度等级为

1、2、3 级样本间, 镰刀菌相对丰度和 DON 毒素平均含量均无显著差异($P>0.05$)。由此推测, 基于病小穗率进行病害严重度等级划分虽然可以为赤霉病的发生情况提供基础评估, 但此分级方法在评估镰刀菌相对丰度和 DON 毒素含量方面存在明显局限性, 因此应建立多维度评估指标, 细化分级标准。

基于关键因子建立 DON 毒素含量预测模型对小麦赤霉病的精准科学防控至关重要。目前多数 DON 毒素含量预测模型都是基于气象因子进行构建, 尚未见关于病原菌相对丰度及病小穗率的 DON 毒素预测模型报道。本研究分别将病小穗率和镰刀菌相对丰度与 DON 毒素含量进行线性回归拟合, 但 R^2 较低。利用多元线性回归分析病小穗率和镰刀菌相对丰度对 DON 毒素含量的影响, 结果表明, 病小穗率和镰刀菌相对丰度两个因子对 DON 毒素累积的共同影响大于单一因子($R^2=0.364$)。由此推测, 二者可能同时在 DON 毒素含量预测模型的构建中发挥重要作用。但其拟合效果相对较弱, 这可能因为本研究仅针

对小麦蜡熟期的病小穗率、镰刀菌相对丰度及 DON 毒素含量进行分析,未考虑气象因子等其他关键变量,研究周期和变量选择的局限性可能影响了模型的预测效能。在后续研究中,采样时间应涵盖小麦多个关键生育时期,以更全面地解析 DON 毒素积累的动态变化规律,同时整合气象因子、栽培管理措施及寄主抗性等关键变量,构建多因子协同作用的预测模型,从而为小麦赤霉病 DON 毒素的风险预警和病害科学防控提供理论依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] DWEBB C C, FIGLAN S, SHIMELIS H A, *et al.* Fusarium head blight of wheat: Pathogenesis and control strategies [J]. *Crop Protection*, 2017, 91: 114.
- [2] 胡小平. 小麦赤霉病 [M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2017: 1.
HU X P. Wheat fusarium head blight [M]. Yangling: Northwest A&F University Press, 2017: 1.
- [3] MCMULLEN M, JONES R, GALLENBERG D. Scab of wheat and barley: A re-emerging disease of devastating impact [J]. *Plant Disease*, 1997, 81(12): 1340.
- [4] 马忠华, 陈云, 尹燕妮. 小麦赤霉病流行成灾原因分析及防控对策探讨 [J]. 中国科学基金, 2020, 34(4): 464.
MA Z H, CHEN Y, YIN Y N. Epidemiological analysis and management strategies of fusarium head blight of wheat [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2020, 34(4): 464.
- [5] CHEN Y, KISTLER H C, MA Z H. *Fusarium graminearum* trichothecene mycotoxins: Biosynthesis, regulation, and management [J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2019, 57(1): 15.
- [6] BUERSTMAYR M, STEINER B, BUERSTMAYR H. Breeding for fusarium head blight resistance in wheat: Progress and challenges [J]. *Plant Breeding*, 2020, 139(3): 429.
- [7] 郭浩, 李萌萌, 王瑞虎, 等. 小麦中真菌毒素污染现状及色谱同时检测技术研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(6): 347.
GUO H, LI M M, WANG R H, *et al.* Contamination status of mycotoxins in wheat and research progress of chromatographic simultaneous detection techniques [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(6): 347.
- [8] MESTERHÁZY Á, BARTÓK T, KÁSZONYI G, *et al.* Common resistance to different *Fusarium* spp. causing fusarium head blight in wheat [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2005, 112(3): 267.
- [9] TITTMER S A, BLAGDEN R, CHAN J, *et al.* Fusarium and Alternaria mycotoxins present in Canadian wheat and durum harvest samples [J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2019, 41(3): 403.
- [10] 谢茂昌, 王明祖. 小麦赤霉病发病程度与 DON 含量的关系 [J]. 植物病理学报, 1999, 29(1): 41.
XIE M C, WANG M Z. Relationship between wheat scab disease severity and DON content [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 1999, 29(1): 41.
- [11] SCHNERR H, VOGEL R F, NIESSEN L. Correlation between DNA of trichothecene-producing *Fusarium* species and deoxynivalenol concentrations in wheat samples [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, 35(2): 121.
- [12] PIRGOZLIEV S R, EDWARDS S G, HARE M C, *et al.* Effect of dose rate of azoxystrobin and metconazole on the development of fusarium head blight and the accumulation of deoxynivalenol (DON) in wheat grain [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2002, 108(5): 469.
- [13] 封薇, 刘太国, 张敏, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (DON) 在小麦籽粒中的积累分析 [J]. 植物病理学报, 2012, 42(1): 25.
FENG W, LIU T G, ZHANG M, *et al.* Analysis of deoxynivalenol (DON) accumulation in wheat grains [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2012, 42(1): 25.
- [14] GÓRAL T, WIŚNIEWSKA H, OCHODZKI P, *et al.* Relationship between fusarium head blight, kernel damage, concentration of *Fusarium* biomass, and *Fusarium* toxins in grain of winter wheat inoculated with *Fusarium culmorum* [J]. *Toxins*, 2019, 11(1): 2.
- [15] SCHIRO G, MÜLLER T, VERCH G, *et al.* The distribution of mycotoxins in a heterogeneous wheat field in relation to microclimate, fungal and bacterial abundance [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2019, 126(1): 177.
- [16] MORENOCONTRERAS M C, MARTÍNEZ YEPEZ A J, MARTÍNEZ R R. Determination of deoxynivalenol (DON) in wheat, barley and corn and its relationship with the levels of total molds, *Fusarium* spp., colonization percentage and water activity [J]. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 2000, 50(2): 183.
- [17] XU X M, MADDEN L V, EDWARDS S G, *et al.* Developing logistic models to relate the accumulation of DON associated with fusarium head blight to climatic conditions in Europe [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2013, 137(4): 689.
- [18] 熊超平. 江苏省小麦中呕吐毒素的影响因素研究及污染预警模型的建立 [D]. 南京: 南京财经大学, 2021.
XIONG C P. Study on the impact of meteorological factors on the production of deoxynivalenol in wheat and establishment of predictive model for deoxynivalenol in Jiangsu Province [D]. Nanjing: Nanjing University of Finance & Economics, 2021.
- [19] ALMOUJAHED M B, APOLO-APOLO O E, ALHUSSEIN M, *et al.* Prediction of deoxynivalenol contamination in wheat kernels and flour based on visible near-infrared spectroscopy, feature selection and machine learning modelling [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2025, 330: 125718.

- [20]邢常瑞,赵双玲,孙钰莹,等. 基于高光谱成像技术的全麦粉中 DON 含量预测方法研究[J]. 中国粮油学报,2024,39(8):82.
- XING C R,ZHAO S L,SUN Y Y,*et al.* Prediction method development for detection of DON content in whole wheat flour based on hyperspectral imaging technology [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(8):82.
- [21]SCHAAFSMA A W,HOOKE D C. Climatic models to predict occurrence of *Fusarium* toxins in wheat and maize [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2007, 119(1-2):116.
- [22]国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 小麦赤霉病测报技术规范:GB/T 15796—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- National Quality Supervision, Inspection and Quarantine Administration, Standardization Administration of China. Guidelines for monitoring wheat fusarium head blight:GB/T 15796—2011 [S]. Beijing, China Standards Press, 2011.
- [23]MURRAY M G,THOMPSON W F. Rapid isolation of high molecular weight plant DNA [J]. *Nucleic Acids Research*, 1980,8(19):4321.
- [24]JIAO S,CHEN W M,WANG J L,*et al.* Soil microbiomes with distinct assemblies through vertical soil profiles drive the cycling of multiple nutrients in reforested ecosystems [J]. *Microbiome*, 2018,6(1):146.
- [25]MAGOC T,SALZBERG S L. FLASH: Fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies [J]. *Bioinformatics*, 2011,27(21):2957.
- [26]BOKULICH N A,SUBRAMANIAN S,FAITH J J,*et al.* Quality-filtering vastly improves diversity estimates from Illumina amplicon sequencing [J]. *Nature Methods*, 2013,10(1):57.
- [27]EDGAR R C,HAAS B J,CLEMENTE J C,*et al.* UCHIME improves sensitivity and speed of *Chimera* detection [J]. *Bioinformatics*, 2011,27(16):2194.
- [28]ROGNES T,FLOURI T,NICHOLS B,*et al.* VSEARCH: A versatile open source tool for metagenomics [J]. *PeerJ*, 2016,4:e2584.
- [29]CAPORASO J G,KUCZYNSKI J,STOMBAUGH J,*et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. *Nature Methods*, 2010,7(5):335.
- [30]JUAN C,RITIENI A,MAÑES J. Occurrence of *Fusarium mycotoxins* in Italian cereal and cereal products from organic farming [J]. *Food Chemistry*, 2013,141(3):1747.
- [31]徐飞,杨共强,宋玉立,等. 不同小麦品种(系)对赤霉病的抗性和麦穗组织中 DON 毒素积累分析[J]. 植物病理学报, 2014,44(6):651.
- XU F,YANG G Q,SONG Y L,*et al.* Resistance to fusarium head blight and deoxynivalenol accumulation in various tissues of wheat heads [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2014,44(6):651.
- [32]徐飞,宋玉立,王俊美,等. 不同侵染时期对小麦赤霉病发生和籽粒中 DON 积累的影响[J]. 植物保护, 2018,44(6):129.
- XU F,SONG Y L,WANG J M,*et al.* Effect of inoculation timing on fusarium head blight and the accumulation of deoxynivalenol in winter wheat [J]. *Plant Protection*, 2018,44(6):129.
- [33]ZHANG Y J,FAN P S,ZHANG X,*et al.* Quantification of *Fusarium graminearum* in harvested grain by real-time polymerase chain reaction to assess efficacies of fungicides on fusarium head blight, deoxynivalenol contamination, and yield of winter wheat [J]. *Phytopathology*, 2009,99(1):95.
- [34]陈利锋,宋玉立,徐雍皋. 小麦赤霉病穗中脱氧雪腐镰刀菌烯醇量的变化[J]. 植物病理学报, 1996,26(1):25.
- CHEN L F,SONG Y L,XU Y G. Variation in the concentrations of deoxynivalenol in the spikes of winter wheat infected by *Fusarium graminearum* schw [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 1996,26(1):25.