

## 山东省小麦茎基腐病菌毒素化学型鉴定及其致病力相关性分析

毕卓玉,张仁杰\*,赵晨,吴真,宋佳乐,吴悦明,于金凤,张莉\*\*,崔海涛\*\*

山东农业大学植物保护学院,山东泰安271018

**摘要:**小麦茎基腐病在我国小麦主产区的发生日益严重,已成为威胁粮食安全的重大病害。假禾谷镰孢(*Fusarium pseudograminearum*)是该病的主要病原菌之一,其致病机制与产生的真菌毒素密切相关,其中脱氧雪腐镰孢菌烯醇(deoxynivalenol, DON)和雪腐镰孢菌烯醇(nivalenol, NIV)毒素是关键致病因子。本研究以山东省8个地区分离的125株假禾谷镰孢为材料,利用特异性引物进行PCR检测,系统分析了病原菌的毒素化学型。结果表明,产15-AcDON毒素的菌株占比最高,比例为56%(70/125);其次为产3-AcDON毒素的菌株,占38.4%(48/125);产NIV毒菌株占比最低(5.6%,7/125)。病原菌致病力测定显示,不同产毒类型菌株的致病力存在差异,其中产NIV毒素的菌株致病力最强。此外,DON毒素产量分析表明,产3-AcDON毒素菌株的毒素合成能力显著高于产15-AcDON毒素菌株,且毒素产量与其在小麦胚芽鞘上的致病力呈正相关。本研究揭示了山东省小麦茎基腐病菌的毒素化学型组成特征及其与致病力的关系,为小麦茎基腐病的综合防治提供了关键数据支持和理论依据。

**关键词:**假禾谷镰孢;毒素化学型;NIV;3-AcDON;15-AcDON;致病力

中图法分类号:S432.1

文献标识码:A

文章编号:1000-2324(2026)01-0131-08

## Identification of Toxin Chemotypes of *Fusarium pseudograminearum* in Shandong Province and Analysis of Their Correlation with Pathogenicity

BI Zhuo-yu, ZHANG Ren-jie\*, ZHAO Chen, WU Zhen, SONG Jia-le, WU Yue-ming, YU Jin-feng, ZHANG Li\*\*, CUI Hai-tao\*\*

College of Plant Protection/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

**Abstract:** The occurrence of wheat crown rot has become increasingly severe in China's major wheat-producing regions and has emerged as a major disease threatening food security. *Fusarium pseudograminearum*, one of the primary pathogens responsible for this disease, exhibits a pathogenic mechanism closely associated with the production of mycotoxins, among which deoxynivalenol (DON) and nivalenol (NIV) serve as key pathogenic factors. Using 125 strains of *F. pseudograminearum* strains from 8 regions of Shandong Province as materials, this study conducts PCR with specific primers to systematically analyze the toxin chemotypes of the pathogen. Results show that 15-AcDON-producing strains accounts for the highest proportion at 56% (70/125), followed by 3-AcDON-producing strains at 38.4% (48/125), while NIV-producing strains account for the lowest proportion at 5.6% (7/125). Pathogenicity assessments show differential virulence among toxin chemotypes, with NIV-producing strains exhibiting the strongest pathogenicity. Furthermore, DON production analysis indicates that 3-AcDON-producing strains exhibit significantly higher toxin synthesis capacity than 15-AcDON-producing strains, and toxin levels have a positive correlation with pathogenicity on wheat coleoptiles. This study elucidates the toxin chemotype composition of *F. pseudograminearum* in Shandong Province and their relationship with pathogenicity, providing critical data support and a theoretical basis for integrated management of wheat crown rot.

**Keywords:** *Fusarium pseudograminearum*; toxin chemotype; NIV; 3-AcDON; 15-AcDON; pathogenicity

小麦茎基腐病是目前小麦生产上最具毁灭性的土传病害之一,严重威胁我国小麦品质和粮食安全。该病害导致小麦年平均减产10%-35%,

在发病严重的地区减产可达70%以上<sup>[1,2]</sup>。近年来,该病害在我国华北小麦产区普遍发生,并且其发病程度和范围持续加剧和扩大<sup>[3,4]</sup>。

收稿日期:2025-02-25

修回日期:2025-12-29

基金项目:山东省小麦产业技术体系岗位专家项目(SDAIT-01-10);2024年山东省重点研发计划(重大科技创新工程)专项(2024CXGC010907)

第1作者简介:毕卓玉(2000-),男,博士研究生,研究方向:真菌与真菌病害。E-mail: zhuoyuta@163.com

\*同等贡献作者:张仁杰(1999-),男,硕士,研究方向:真菌与真菌病害。E-mail: 15066037747@163.com

\*\*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: zli@sdau.edu.cn; cuihaitao@sdau.edu.cn

小麦茎基腐病包括假禾谷镰孢 (*Fusarium pseudograminearum*)、禾谷镰孢 (*F. graminearum*)、尖孢镰孢 (*F. oxysporum*)、黄色镰孢 (*F. culmorum*)、亚洲镰孢 (*F. asiaticum*) 等镰孢菌<sup>[4]</sup>。在山东省分离的小麦茎基腐病菌中,假禾谷镰孢的分离频率最高,为优势病原菌种<sup>[5-7]</sup>。此外,假禾谷镰孢在适宜环境下还可引起小麦穗部发生赤霉病<sup>[8]</sup>。其产生的毒素在小麦的秸秆和谷物中积累,对农业安全生产和人畜健康构成较大的潜在威胁。

假禾谷镰孢在侵染小麦过程中会合成单端孢霉烯(trichothecene)类真菌毒素等多种次生代谢物,如脱氧雪腐镰孢菌烯醇(DON)、3-乙酰脱氧雪腐镰孢菌烯醇(3-AcDON)、15-乙酰脱氧雪腐镰孢菌烯醇(15-AcDON)和雪腐镰孢菌烯醇(NIV)等<sup>[9,10]</sup>研究表明,在假禾谷镰孢引起的小麦茎基腐病中,秸秆中分离得到的病菌致病性较强,产生的DON含量较高。不同地区的假禾谷镰孢产生的毒素种类有所差异,例如江苏省主要以3-AcDON型毒素为主,河北省与河南省则以15-AcDON为主<sup>[3]</sup>。其他国家和地区(如澳大利亚、新西兰、德国等)也观察到DON毒素的高浓度污染,该毒素能通过食物链对人类和动物健康构成威胁<sup>[11,12]</sup>。小麦秸秆中毒素的积累,尤其是在第3茎节及部分第4-5茎节中,可能对饲料安全产生潜在风险<sup>[11]</sup>。

通过对比分析产NIV毒素和DON毒素菌株的基因簇,LEE等人发现 *TRI13* 和 *TRI7* 基因是决定菌株产生DON毒素或NIV毒素的关键因素。在产NIV毒素的菌株中, *TRI13* 和 *TRI7* 基因是最为活跃的,其中 *TRI13* 基因编码C4氧化酶,而 *TRI7* 基因负责C4乙酰化转化。相比之下,在产DON毒素的菌株中, *TRI7* 基因可能缺失,或者 *TRI7* 和 *TRI13* 基因都缺失,或者这两个基因均不表达<sup>[13]</sup>。近年来,基于毒素合成相关基因序列的分析已成为一种快速且高效的毒素类型鉴定方法。Zhang通过对禾谷镰孢毒素生物合成途径中的 *TRI6* 和 *TRI5* 基因的保守序列进行分析和比较,设计出了特异性引物 TOXP1/P2<sup>[14]</sup>。该方法通过PCR扩增产物片段的大小来区分DON毒素(300 bp)和NIV毒素(360 bp)的化学型,并且经过验证,证明该检测方法表现出良好的稳定性。为了进一步区分DON毒素的两种衍生物,

Jennings 基于 *TRI3* 基因设计了两对引物: TRI303F/TRI303R 和 TRI315F/TRI315R<sup>[15]</sup>。这两对引物能够在3-AcDON和15-AcDON菌株中分别扩增出586 bp和864 bp的片段,从而实现对这两种衍生物体的准确区分。

山东省作为我国冬小麦的主要产区,小麦种植面积约400万hm<sup>2</sup>。自2012年以来,小麦茎基腐病的发病面积逐年增加,导致每年小麦产量遭受不同程度的损失。研究表明,假禾谷镰孢是山东省小麦茎基腐病的主要致病菌。然而,关于假禾谷镰孢的毒素化学型在山东省不同地区是否存在差异,以及不同毒素类型的病菌对小麦致病力是否有所区别,目前尚不明确。为了探究山东省不同地区小麦茎基腐病菌的毒素化学型分布及其与致病力的关联,本文对采自8个地市的假禾谷镰孢共125个菌株进行了毒素化学型分析,并研究了不同毒素化学型菌株对小麦致病力的影响,为小麦茎基腐病的综合防治提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 菌株来源 来自山东济南、潍坊、德州、烟台、济宁、泰安、临沂、菏泽共8地市的125株假禾谷镰孢,本实验室分离保存。

1.1.2 供试小麦品种 济麦22。

1.1.3 培养基 PDA培养基(马铃薯200g,葡萄糖20g,琼脂粉15g,蒸馏水定容至1L)用于病原真菌的培养,CMC培养基(CMC 1.5g,NaNO<sub>3</sub> 0.2g,KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.1g,MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.05g,酵母提取物0.1g,蒸馏水定容至1L)用于病原真菌孢子的培养,TBI培养基(蔗糖30g,腐胺盐酸盐0.8g,KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1g,MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.5g,KCl 0.5g,FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 10mg,蒸馏水定容至950mL,加入200μL Traceelements,混合均匀,调节溶液pH为4.5,蒸馏水定容至1L)用于病原真菌毒素的产生。

### 1.2 假禾谷镰孢DNA的提取

将菌株接种于PDA平板培养3-5d,刮取菌丝加入液氮研磨使其成为粉末状,将研磨好的菌株置于离心管中并加入预热至65℃的CTAB溶液,置于65℃水浴中加热40min,每隔10min轻轻震荡;加入苯酚:氯仿:异戊醇混合物,离心分

层,取上清液;重复氯仿:异戊醇的提取和离心过程,加入无水乙醇并在-20℃冰箱沉淀过夜;离心去除上清液,用75%乙醇清洗DNA;DNA沉淀干燥后,加入ddH<sub>2</sub>O溶解。

### 1.3 假禾谷镰孢的毒素化学型鉴定

1.3.1 引物设计 采用 TOXP1/P2、TRI303F/TRI303R、TRI315F/TRI315R<sup>[15]</sup> 三对引物来鉴定假禾谷镰孢所产的毒素类型。

表1 毒素化学型鉴定所需引物

Table 1 Primers and their sequences for toxin chemotype determination

引物 Primer	序列(5'-3') Sequence(5'-3')	条带大小/bp Band size	鉴定类型 Primer type
TOXP1	GCCGTGGGGRTAAAAGTCAAA	300/360	DON/NIV
TOXP2	TGACAAGTCCGGTGCCTAGCA		
TRI303F	GATGGCCGAAGTGGA	586	3-AcDON
TRI303R	GCCGGACTGCCCTATTG		
TRI315F	CTCGCTGAAGTTGGACGTAA	864	15-AcDON
TRI315R	GTCTATGCTCTCAACGGACAAC		

1.3.2 目的片段扩增 以假禾谷镰孢DNA为模板,用引物TOXP1/P2对目的片段进行扩增。PCR扩增体系为:2×Accurate Taq Master Mix 12.5 μL,正向引物(Primer-F)和反向引物(Primer-R)各1 μL,DNA模板1 μL,ddH<sub>2</sub>O 9.5 μL。反应条件设置如下:95℃预变性5 min;95℃变性1 min、55℃退火1 min、72℃延伸50 s,35个循环;72℃延伸6 min。扩增产物利用1%琼脂糖凝胶开展电泳分析。若目的条带大小为300 bp,则所产毒素类型为DON毒素;若目的条带大小为360 bp,则所产毒素类型为NIV毒素。

选择上述扩增出300 bp片段的菌株,以这些菌株的DNA为模板,分别使用引物对TRI303F/TRI303R和TRI315F/TRI315R对目的片段进行扩增。PCR扩增体系同上。反应条件设定如下:95℃预变性4 min;94℃变性1 min、58℃退火50 s、72℃延伸50 s,35个循环;72℃延伸10 min。扩增所得产物使用1%琼脂糖凝胶进行电泳检测。引物TRI303F/TRI303R扩增出目的片段586 bp,产毒素类型为3-AcDON;引物TRI315F/TRI315R扩增出目的片段864 bp,产毒素类型为15-AcDON。

1.3.3 DON毒素产量测定 菌株置于CMC液体培养基中震荡培养获得分生孢子,将孢子浓度调整为1×10<sup>6</sup> spores·mL<sup>-1</sup>并接种至TBI产毒培养基中震荡培养72 h。收集菌丝烘干并称量干重。预处理试剂和微孔板后,将样本和标准品分别加入对应微孔,酶标反应30 min。随后进行洗涤并加入底物液、显色液和终止液,在450 nm波长处

使用酶标仪测定其吸光度(OD值)。根据酶标仪测得的光密度值绘制标准曲线,计算得到定量样品中的DON含量。

1.3.4 小麦胚芽鞘接种致病力测定 选取籽粒饱满的济麦22小麦种子进行催芽处理。待种子发芽后,将其播种于灭菌土壤中,每盒播种9粒,并覆盖适量灭菌土,实验设置3组重复。同时,利用CMC液体培养基培养真菌,收集分生孢子沉淀,并将孢子浓度调整至1×10<sup>6</sup>孢子·mL<sup>-1</sup>。当小麦胚芽鞘生长至约1 cm时,进行接种处理:剪去胚芽鞘尖端以制造伤口,每株接种3 μL孢子悬浮液。随后将接种后的植株置于25℃培养箱中培养。6 d后测量胚芽鞘的侵染长度,计算病情指数,并记录实验结果。实验重复3次。

病情分级标准参考<sup>[16]</sup>:

0级:无病斑或者病斑扩散长度小于0.5 cm。

1级:病斑扩散长度超过0.5 cm但不超过1.5 cm。

3级:病斑扩散长度超过1.5 cm但不超过2.5 cm。

5级:病斑扩散长度超过2.5 cm但不超过3.5 cm。

7级:病斑扩散长度超过3.5 cm或者枯死。

病情指数=Σ(各级病株数×病级代表数值)/  
(调查总株数×最高级的代表数值)×100

## 2 结果与分析

### 2.1 山东假禾谷镰孢的毒素化学型鉴定

2.1.1 DON毒素和NIV毒素鉴定 使用毒素化

学型鉴定特异性引物 TOXP1/TOXP2 对 125 株假禾谷镰孢的 DNA 进行扩增。结果显示,在 125 株菌株中,118 株可扩增到 300 bp 的片段,而其余 7 株的片段大小为 360 bp (图 1A)。

表明在这 125 株假禾谷镰孢中,94.4% 的假禾谷镰孢(118 株)所产毒素类型为 DON 毒素,5.6% 的假禾谷镰孢(7 株)所产毒素类型为 NIV 毒素。

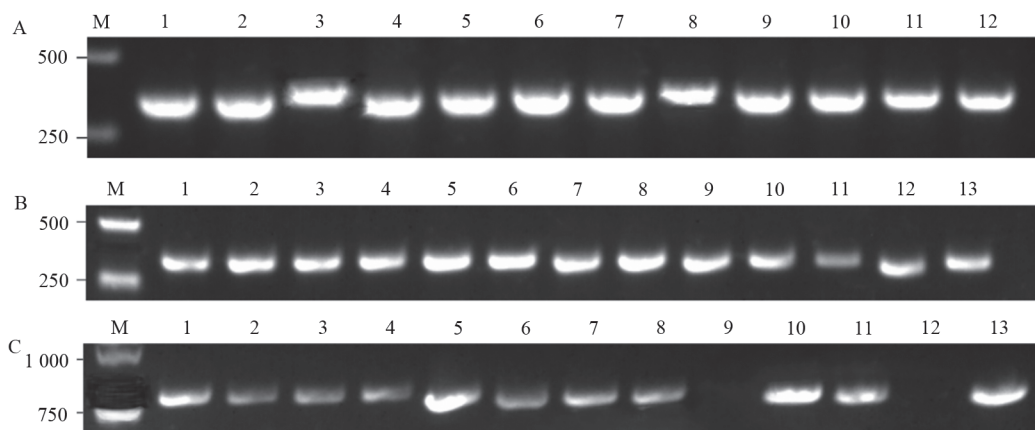


图 1 PCR 检测毒素化学型  
Fig. 1 PCR detection of toxin chemotypes

注:A:1~2,4~7,9~12泳道为 300 bp,3,8 泳道为 360 bp;B:1~13 泳道为 300 bp;C:1~8,10~11,13 泳道为 864 bp,9,12 泳道无条带。M:2 000 bp DNA maker。

Note: A: 300 bp for lanes 1~2,4~7,9~12 and 360 bp for lanes 3,8;B: 300 bp for lanes 1~13;C: 864 bp for lane 1~8,10~11,13, no bands for lane 9,12.

2.1.2 3-AcDON 毒素和 15-AcDON 毒素鉴定  
DON 毒素化学型鉴定特异性引物 TRI303F/TRI303R、TRI315F/TRI315R 对 118 株假禾谷镰孢的 DNA 进行扩增,结果显示 118 株菌株中,48 株的扩增产物大小为 586 bp,表明其产毒素类型为 3-AcDON 毒素(图 1B);70 株的扩增产物大小为 864 bp,表明其毒素类型为 15-AcDON 毒素(图 1C)。

上述结果表明,产 15-AcDON 毒素的菌株最多,占总数的 56%;产 3-AcDON 毒素的菌株次之,占总数的 38.4%;产 NIV 毒素的菌株最少,占总数的 5.6%。值得注意的是,产 NIV 毒素的菌株仅在菏泽和德州两个地区中检测到,其他地区未发现。在所检测的 8 个地区中,除德州外(以 3-AcDON 为主),其他七个地区均以产 15-AcDON 毒素的菌株居多(表 2)。因此,山东假禾谷镰孢主要产毒类型是 15-AcDON 毒素。

2.2 DON 毒素产量测定结果

为测定不同产毒类型菌株的毒素合成能力,首先检测了不同菌株的菌丝生物量及毒素浓度。毒素浓度测定结果可见 3-AcDON 菌株的产毒浓度整体高于 15-AcDON 菌株的产毒浓度,表明不同菌株之间的毒素浓度存在显著差异(图 2A)。菌丝生物量的测定结果可见 3-AcDON-3 菌株的

表 2 毒素化学型 PCR 鉴定结果  
Table 2 Results of PCR identification of toxin chemotype

地区 Location	数量 Amount	毒素化学型 Toxin chemotype		
		NIV	3-AcDON	15-AcDON
泰安	44	0	25	19
潍坊	21	0	2	19
菏泽	17	5	0	12
德州	21	2	17	2
烟台	6	0	1	5
济宁	5	0	0	5
临沂	4	0	0	4
济南	7	0	3	4
总计	125	7	48	70

菌丝量最高,而 15-AcDON-1 菌株的菌丝量最低,且不同产毒类型菌株的菌丝生物量存在显著差异(图 2B)。

以毒素浓度对菌丝生物量的比值计算 DON 毒素合成能力可见,3-AcDON-3 菌株的毒素合成能力最强,而 3-AcDON-1 菌株的毒素合成能力最低(图 2C)。从整体来看,产 3-AcDON 毒素的菌株平均毒素产量高于产 15-AcDON 毒素的菌株,表明产 3-AcDON 型毒素的菌株比 15-AcDON 型具有更强的产毒能力。

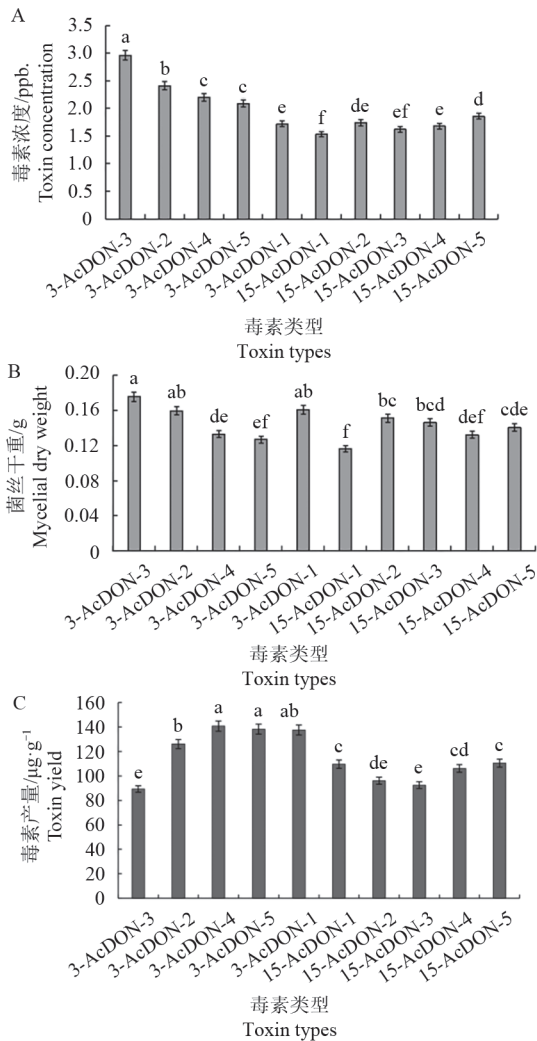


图 2 毒素浓度、菌丝干重及毒素产量

Fig. 2 Toxin concentration, mycelial dry weight and toxin yield

注:A:不同菌株的毒素浓度。B:不同产毒类型菌株的菌丝干重。C:毒素产生能力。字母相同者表示差异未达显著水平( $P>0.05$ ),字母不同者表示差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

Note: A: Toxin concentration of strains with different toxin-producing types. B: The mycelial dry weight of strains with different toxin-producing types after 3 days of cultivation on TBI medium. C: The toxin yield was calculated based on the ratio of toxin concentration and dry mycelial weight. The same letter indicates that the difference did not reach the significant level ( $P>0.05$ ), and the different letters indicate that the difference reached the significant level ( $P<0.05$ ).

### 2.3 致病力测定结果

为探究不同产毒类型菌株的致病力是否存在差异,我们进行了小麦胚芽鞘接种实验。随机选取 NIV、3-AcDON、15-AcDON 毒素类型菌株各 5 株,在小麦胚芽鞘进行接种,统计胚芽鞘的病斑长度,并计算病情指数,接种 6 d 后,不同产

毒类型菌株的致病力存在差异,其中产 NIV 毒素菌株的致病力最强,平均病情指数最高,为 47.57,其次是 3-AcDON 毒素菌株,平均病情指数为 41.83,而 15-AcDON 毒素菌株的致病力最低,平均病情指数为 37.98(图 3 和表 3)。

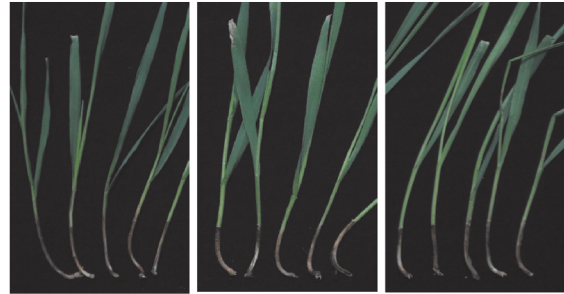


图 3 不同产毒类型菌株的致病力

Fig. 3 Pathogenicity of different toxin-producing strains on wheat coleoptiles

注:不同产毒类型菌株接种小麦胚芽鞘 6 d 后的发病情况。从左向右依次为 NIV 型毒素接种后发病情况,3-AcDON 型毒素接种后发病情况,15-AcDON 型毒素接种后发病情况。

Note: Disease symptoms of wheat coleoptiles at 6 days post-inoculation with different toxin-producing strains. From left to right are the disease symptoms after inoculation with NIV-type toxin, 3-AcDON-type toxin, and 15-AcDON - type toxin.

表 3 接种后 6 天小麦茎基部的病情指数

Table 3 Disease index of wheat crown base at 6 days post-inoculation

菌株	病情指数	平均病情指数
Strain	Disease index	Average disease index
NIV-1	42.85	
NIV-2	51.95	
NIV-3	46.94	47.57
NIV-4	42.86	
NIV-5	53.25	
3-AcDON-1	29.68	
3-AcDON-2	40.66	
3-AcDON-3	54.76	41.83
3-AcDON-4	42.43	
3-AcDON-5	41.61	
15-AcDON-1	39.29	
15-AcDON-2	36.63	
15-AcDON-3	35.51	37.98
15-AcDON-4	38.7	
15-AcDON-5	39.76	

### 2.4 毒素产量与致病力相关性分析

为探究不同产毒类型的假禾谷镰孢在毒素产量与致病力方面是否存在关联,对毒素产量与胚芽鞘病情指数进行了相关性分析(表 4)。结

果表明,假禾谷镰孢毒素产量与其在胚芽鞘上的致病力存在显著的正相关性,菌株毒素产量越高,其致病力越强。

表 4 毒素产量与胚芽鞘发病情况相关性分析  
Table 4 Correlation analysis of toxin yield with wheat coleoptile disease severity

变量 Variable	胚芽鞘病情指数 Coleoptile disease index	毒素产量 Toxin production
胚芽鞘病情指数 Coleoptile disease index	1	0.818**
毒素产量 Toxin production	0.818**	1

注:\*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。P<0.01。

Note: \*\* The correlation is highly significant at the 0.01 level (two-tailed). P<0.01.

### 3 结论

本研究通过采集山东省不同地区的假禾谷镰孢菌,明确了山东省不同毒素化学型的假禾谷镰孢菌的分布情况,通过室内接种及田间试验,明确了不同毒素化学型由病原菌与致病力的关系,为以后小麦茎基腐病的防治提供了一定的理论基础。本实验得出的结论如下:山东省假禾谷镰孢中产 15-AcDON 型毒素的菌株是优势种群,产 3-AcDON 型毒素的菌株次之,产 NIV 型毒素的菌株所占比例最低。不同产毒类型的菌株,在小麦穗上及茎基部所表现出的致病力相同。其中产 NIV 型毒素的假禾谷镰孢菌致病力最强,产 3-AcDON 型毒素的菌株次之,产 15-AcDON 型毒素的菌株的致病力最弱。产 3-AcDON 型毒素的假禾谷镰孢菌菌株的平均产毒量高于产 15-AcDON 型毒素的假禾谷镰孢菌菌株,且菌株的毒素产量与其在小麦茎基部的致病情况存在着显著的相关性。

### 4 讨论

在我国小麦产区,禾谷镰孢的毒素化学型从北向南逐渐由 15-AcDON 型毒素向 3-AcDON 型毒素转变<sup>[17]</sup>。北方麦区(黑龙江、河北)的禾谷镰孢主要产 15-AcDON 型毒素<sup>[18,19]</sup>,向南至黄淮麦区(河南)仍以 15-AcDON 型毒素为主,但开始出现 NIV 和 3-AcDON 型菌株<sup>[20]</sup>。高先悦等对山东小麦赤霉病菌的种群组成和毒素化学型鉴定中

发现,分离自山东地区的禾谷镰孢中大部分菌株产毒类型为 15-AcDON,3-AcDON 型毒素次之,NIV 型毒素最少<sup>[21]</sup>。

禾谷镰孢和假禾谷镰孢作为小麦茎基腐病的致病菌,在产毒特征方面存在相似性。黄淮麦区的假禾谷镰孢中,3-AcDON 毒素和 15-AcDON 毒素是主要毒素类型,NIV 型毒素菌株极为稀少<sup>[22]</sup>。该现象可能与 DON 型菌株具有更强的生态适应性有关:相较于 NIV 型菌株,DON 型菌株不仅表现出更高的毒素生物合成能力,同时在群体增殖速率和生存竞争力方面更具优势<sup>[23]</sup>。Deng 等对山东省和江苏省小麦茎基腐病病样中分离得到的 300 余株假禾谷镰孢进行毒素类型鉴定,发现 3-AcDON 和 15-AcDON 为主要的产毒类型,仅发现 1 株疑似 NIV 型菌株。分离自江苏省的菌株主要产 3-AcDON 型毒素,而分离自山东省的菌株主要产 15-AcDON 型毒素<sup>[3]</sup>。对陕西省小麦不同部位镰刀菌分离鉴定及毒素化学型分析发现,分离自小麦茎基部的假禾谷镰孢中,产 3-AcDON 型毒素和 15-AcDON 型毒素的菌株占比差异小,未检测到产 NIV 型毒素的菌株<sup>[24]</sup>。多地域研究数据共同表明,DON 型菌株在我国主产麦区已形成稳定的生态位优势。本研究自山东 8 个地区采集并分离获得假禾谷镰孢 125 株,毒素化学型分析显示,供试菌株存在 NIV、3-AcDON 和 15-AcDON 三种毒素化学型,其中 15-AcDON 型菌株为绝对优势菌株(占菌株总数的 56.0%)。这一分布特征与 Deng 等关于山东省菌株以 15-AcDON 型为主的报道相一致。

关于禾谷镰孢毒素类型与致病力的相关性研究存在较大差异,DON 型禾谷镰孢菌株对小麦的致病力显著高于 NIV 型,而 3-AcDON 型和 15-AcDON 型菌株间致病力无显著差异<sup>[25]</sup>。张洪滨等的研究结果表明 3-AcDON 型菌株致病力最强,15-AcDON 型和 NIV 型的禾谷镰孢致病力无显著差异<sup>[26]</sup>。在本研究中,我们采用济麦 22 品种的胚芽鞘接种体系观察到 NIV 型菌株致病力最强,15-AcDON 型致病力最弱。值得注意的是,由于本研究中所用小麦品种与张洪滨等研究所用小麦品种存在差异,而前人研究已证实不同小麦品种对茎基腐病的抗性存在显著种质特异性,因此我们推测菌株致病力的表型差异可能

受到宿主遗传背景的影响,这一推测有待通过多品种平行试验进一步验证。

### 参考文献

- [1] Kazan K, Gardiner D M. *Fusarium* crown rot caused by *Fusarium pseudograminearum* in cereal crops: recent progress and future prospects[J]. *Molecular Plant Pathology*, 2018, 19(7):1547-1562.
- [2] Li H L, Yuan H X, Fu B, et al. First report of *Fusarium pseudograminearum* causing crown rot of wheat in Henan, China[J]. *Plant Disease*, 2012, 96(7):1065-1065.
- [3] Deng Y Y, Li W, Zhang P, et al. *Fusarium pseudograminearum* as an emerging pathogen of crown rot of wheat in eastern China[J]. *Plant Pathology*, 2020, 69(2):240-248.
- [4] Zhou H, He X, Wang S, et al. Diversity of the *Fusarium* pathogens associated with crown rot in the Huanghuai wheat-growing region of China[J]. *Environmental Microbiology*, 2019, 21(8):2740-2754.
- [5] Balmas V, Burgess L W, Summerell B A. Reaction of durum wheat cv. Yallaroi to crown and root rot caused by *Fusarium graminearum* Group 1 and *Fusarium crookwellense*[J]. *Australasian Plant Pathology*, 1995, 24:233-237.
- [6] Schilling A G, Moller E M, Geiger H H. Polymerase chain reaction-based assays for species-specific detection of *Fusarium culmorum*, *F. graminearum*, and *F. avenaceum*[J]. *Phytopathology*, 1996, 86(5):515-522.
- [7] 孟程程, 孙晓凤, 张莉, 等. 山东省小麦茎基腐病的病原鉴定[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(05):753-757.
- [8] Xu F, Song Y L, Yang G Q, et al. First report of *Fusarium pseudograminearum* from wheat heads with *Fusarium* head blight in North China Plain[J]. *Plant Disease*, 2015, 99(1):156-156.
- [9] Suzuki T, Iwahashi Y. Comprehensive gene expression analysis of type B trichothecenes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(37):9519-9527.
- [10] Mert-Türk F, Gencer R. Distribution of the 3-AcDON, 15-AcDON, and NIV chemotypes of *Fusarium culmorum* in the north-west of turkey[J]. *Plant Protection Science*, 2013, 49(2):57-64.
- [11] Khudhair M, Thatcher L F, Gardiner D M, et al. Comparative analysis of genetic structures and aggressiveness of *Fusarium pseudograminearum* populations from two surveys undertaken in 2008 and 2015 at two sites in the wheat belt of Western Australia[J]. *Plant Pathology*, 2019, 68(7):1337-1349.
- [12] Placinta C M, D'mello J P F, Macdonald A M C. A review of worldwide contamination of cereal grains and animal feed with *Fusarium* mycotoxins[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1999, 78(1-2):21-37.
- [13] Lee T, Han Y K, Kim K H, et al. Tri13 and Tri7 determine deoxynivalenol-and nivalenol-producing chemotypes of *Gibberella zeae*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68(5):2148-2154.
- [14] Zhang J B, Li H P, Dang F J, et al. Determination of the trichothecene mycotoxin chemotypes and associated geographical distribution and phylogenetic species of the *Fusarium graminearum* clade from China[J]. *Mycological Research*, 2007, 111(8):967-975.
- [15] Jennings P, Coates M E, Walsh K, et al. Determination of deoxynivalenol-and nivalenol-producing chemotypes of *Fusarium graminearum* isolated from wheat crops in England and Wales[J]. *Plant Pathology*, 2004, 53(5):643-652.
- [16] 江航. 黄淮地区禾谷镰刀菌毒素化学型及对小麦致病性的研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2016.
- [17] Zhang H, Zhang Z, Van Der Lee T, et al. Population genetic analyses of *Fusarium asiaticum* populations from barley suggest a recent shift favoring 3ADON producers in southern China[J]. *Phytopathology*, 2010, 100(4):328-336.
- [18] Ji L, Cao K, Hu T, et al. Determination of deoxynivalenol and nivalenol chemotypes of *Fusarium graminearum* isolates from China by PCR assay[J]. *Journal of Phytopathology*, 2007, 155(7-8):505-512.
- [19] 李伟, 陈莹, 张晓祥, 等. 小麦茎基褐腐病病原菌组成及其致病力研究[J]. *麦类作物学报*, 2011(01):170-175.
- [20] 江航, 汤蒙蒙, 袁虹霞, 等. 河南省小麦赤霉病禾谷镰刀菌的毒素化学型及SCAR类型分析[J]. *河南科学*, 2016(04):506-510.
- [21] 高先悦, 高淑敏, 刘少杰, 等. 山东省小麦赤霉病菌的种群组成及毒素化学型分析[J]. *华北农学报*, 2017, 32(S1):37-42.
- [22] 邓渊钰, 刘振国, 陈琛, 等. 假禾谷镰孢毒素化学型快速鉴定及在分析黄淮麦区分离物中的应用[J]. *植物病理学报*, 2024, 54(03):481-492.
- [23] Ward T J, Clear R M, Rooney A P, et al. An adaptive evolutionary shift in *Fusarium* head blight pathogen

- populations is driving the rapid spread of more toxigenic *Fusarium graminearum* in North America[J]. *Fungal Genetics and Biology*, 2008, 45(4):473-484.
- [24] 左宏旭, 雷琼, 刘叩晗, 等. 陕西省小麦不同部位镰刀菌分离鉴定及毒素化学型分析[J]. *麦类作物学报*, 2023, 43(10): 1282-1287.
- [25] 胡迎春, 李伟, 陈怀谷, 等. 中国冬小麦主产区小麦赤霉病菌种群组成及其致病力[J]. *江苏农业学报*, 2010, 26(05):954-960.
- [26] 张洪滨, 柳金伟, 刘秉江, 等. 山东省小麦赤霉病菌种群组成及其致病力分化[J]. *植物保护学报*, 2013, 40(01):27-32.