

网络出版时间:2025-03-13

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20250312.1626.006

## 孢子组成对小麦赤霉病发生及毒素污染程度影响

代程程<sup>1,2</sup>, 何灿<sup>2</sup>, 董飞<sup>2</sup>, 白青云<sup>1</sup>, 徐剑宏<sup>1,2</sup>

(1. 淮阴工学院生命科学与食品工程学院, 江苏淮安 223003; 2. 江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所, 农业农村部农产品质量安全控制技术与标准重点实验室, 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室, 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏省食品质量安全重点实验室, 江苏南京 210014)

**摘要:**为提高小麦赤霉病预测预报精准度,在江苏宜兴市、句容市、姜堰区等6个地区试验田开展抽穗扬花期间田间孢子捕捉及鉴定,调查不同田块赤霉病病情指数(disease index, DI),测定收获的小麦籽粒中镰刀菌毒素污染水平,分析孢子组成对小麦赤霉病发生及其镰刀菌毒素污染程度的影响。结果表明,2020年6个地区试验田共捕捉镰刀菌孢子650株,其中禾谷镰刀菌复合种(*Fusarium graminearum* species complex, FGSC)占总孢子数的35.5%。淮南地区(宜兴市、句容市、姜堰区、盐都区)捕捉到的FGSC占当地捕捉总孢子数量的比例均在35%以上,但淮北地区(宿豫区、铜山区)均在27%以下,淮南地区试验田小麦赤霉病DI及镰刀菌毒素含量均显著高于淮北地区( $P < 0.05$ )。6个地区DI与镰刀菌毒素含量均与FGSC孢子数呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),但与当地总孢子数量没有相关性。采用子囊孢子飞散数量法预测赤霉病时,应对捕捉孢子中FGSC数量予以明确。

**关键词:** 抽穗扬花期; 孢子; 小麦; 赤霉病; 镰刀菌毒素

中图分类号: S512.1; S435.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)04-0521-07

## Effect of Composition of *Fusarium* Spores on Fusarium Head Blight and Associated Mycotoxins in Wheat

DAI Chengcheng<sup>1,2</sup>, HE Can<sup>2</sup>, DONG Fei<sup>2</sup>, BAI Qingyun<sup>1</sup>, XU Jianhong<sup>1,2</sup>

(1. School of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223003, China; 2. Institute of Food Safety and Nutrition, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory for Control Technology and Standard for Agro-product Safety and Quality, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory for Agro-product Safety Risk Evaluation (Nanjing), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/ Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety/ Jiangsu Key Laboratory for Food Quality and Safety-State Key Laboratory Cultivation Base, Nanjing, Jiangsu 210014, China)

**Abstract:** To improve the prediction accuracy of Fusarium head blight (FHB), *Fusarium* spores were collected and identified in the experimental fields in Yixing, Jurong, Jiangyan, Yandu, Suyu, and Tongshan in Jiangsu Province during the heading and flowering period of wheat. Disease index (DI) was investigated and *Fusarium* mycotoxins in harvested seeds were tested in various fields. The effect of composition of *Fusarium* spores on FHB and associated mycotoxins in wheat was assessed. The results showed that among the 650 *Fusarium* spores collected from the six regions in 2020, the ratio of *Fusarium graminearum* species complex (FGSC) to all the collected spores was 35.5%. In addition, the ratio of FGSC to all the collected spores in the south of the Huai River was more than 35%, followed by that in the north of Huai River (less than 27%). Moreover, DI and the content of *Fusarium* mycotoxins in the harvested seeds in the south of Huai River were significantly higher than that in the

收稿日期: 2024-07-03

修回日期: 2024-11-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1400903); 国家自然科学基金项目(32001859, 31872914)

第一作者 E-mail: ccooo1998@126.com (代程程)

通讯作者 E-mail: baiqingyungg@163.com (白青云); xujianhongnj@126.com (徐剑宏)

north of Huai River ( $P < 0.05$ ). Among these fields, DI and the content of *Fusarium* mycotoxins were significantly positively correlated with the number of FGSC ( $P < 0.01$ ), yet they had no correlation with the number of total spores. The composition of FGSC spores are suggested to be confirmed when the spore dispersal model was used to predict the prevalent of FHB of wheat.

**Keywords:** Heading and flowering period; Spore; Wheat; *Fusarium* head blight; *Fusarium* mycotoxin

由禾谷镰刀菌复合种(*Fusarium graminearum* species complex, FGSC)等感染小麦引起的赤霉病(*Fusarium* head blight, FHB),是影响小麦生产的重大病害之一,禾谷镰刀菌(*Fusarium graminearum*)被评为全球十大病原真菌之一<sup>[1]</sup>。中国长江中下游麦区是小麦赤霉病常发重发区,年发生面积在 266.7 万~333.3 万  $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>,不仅会造成严重的产量损失,降低品质,还会产生多种镰刀菌毒素污染,如脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)、3-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(3-acetyldeoxynivalenol, 3ADON)、15-乙酰基脱氧雪腐镰刀菌烯醇(15-acetyldeoxynivalenol, 15ADON)、雪腐镰刀菌烯醇(nivalenol, NIV)和镰刀菌烯酮(fusarenon X, 4ANIV)等,严重威胁人畜健康<sup>[3]</sup>。

小麦赤霉病发生及其镰刀菌毒素污染程度受到菌源量、品种特性、环境条件、栽培措施等诸多因素影响<sup>[3]</sup>。尽管种植抗性品种是防控赤霉病及镰刀菌毒素最安全有效的措施之一<sup>[4-6]</sup>,但目前中国 90% 以上品种依然易感病<sup>[3]</sup>。小麦抽穗扬花期环境条件与赤霉病及其毒素污染密切相关,但随着长江中下游稻麦轮作区大面积推广中晚粳稻品种,小麦播期不断延迟,小麦在抽穗扬花期遭遇暖湿气候的概率加大<sup>[7-9]</sup>。此外,秸秆直接还田已成为农业生产过程中秸秆利用的主要方式,2021 年全国秸秆直接还田量占秸秆可收集量的 54.7%,其中长江中下游地区秸秆直接还田率达到 60.5%<sup>[10]</sup>。但是,低质量的秸秆还田不仅会导致小麦出苗率降低、生态态势减弱,还为镰刀菌越冬提供了充足的载体,显著增加菌源量,有利于赤霉病爆发成灾,导致镰刀菌毒素污染程度加剧<sup>[10-15]</sup>。

小麦赤霉病扩展迅速,防治周期短,及时准确预测预报对小麦赤霉病及其镰刀菌毒素的防治十分重要<sup>[2]</sup>。目前,赤霉病的预测预报主要分为菌量预测法、气象预测法、气象因素结合菌量的预测法<sup>[16]</sup>。以菌量为主的预测法又包括子囊孢子飞散数量、稻桩子囊壳成熟度和稻桩带菌率,其中应用最广泛的是子囊孢子捕捉<sup>[17]</sup>。该方法通过孢

子捕捉装置连续捕捉田间子囊孢子数来预测病情,主要用于中、短期测报。但是,孢子捕捉设备无差别捕捉田间飞散孢子,无法快速识别引致赤霉病的 FGSC 孢子种类及数量,而且孢子种类及数量对赤霉病发生及镰刀菌毒素污染程度的影响目前也尚不明确。为此,本研究在江苏设置 6 个不同孢子采集点,连续捕捉抽穗扬花期间的田间孢子,分析镰刀菌孢子种类及数量对赤霉病病情指数(disease index, DI)及镰刀菌毒素污染程度的影响,以期为提高预测预报精准度提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验布置

本试验于 2020 年在江苏省宜兴市(31°18'54.3899"N, 119°37'14.6701"E)、句容市(31°58'44.5901"N, 119°16'55.0402"E)、姜堰区(32°36'10.0901"N, 120°8'9.4700"E)、盐都区(33°14'56.1199"N, 119°52'24.8099"E)、宿豫区(33°57'14.4500"N, 118°31'21.1001"E)、铜山区(34°12'41.0198"N, 117°36'4.2098"E)开展。每个县区设置 1 个田块,前茬作物均为水稻,水稻秸秆全量覆盖还田。为获得田间最大孢子数量,在小麦抽穗扬花期不施用杀菌剂。同时,为避免造成由于赤霉病重发生而导致病害发生程度没有差异,选择具有赤霉病中等抗性的宁麦 16 作为供试材料<sup>[18]</sup>,每个田块面积 10 m×10 m,3 个重复,隔离带宽大于 0.5 m,除抽穗扬花期不施用杀菌剂外,其他正常管理。

### 1.2 孢子采集

采用水盘琼脂培养法<sup>[19]</sup>捕捉孢子,对角线 5 点采集法,每个点设置 1 个采集平台,距离地面 80 cm 左右。4 月 10 日至 5 月 10 日期间,每隔 5 d 于上午 8:00 时将含有无菌水的培养皿(直径 9 cm)放置于采集平台,上午 10:00 时取回;下午 14:00 时放置,16:00 时取回。将预冷的 PDA 培养基在超净台中加入培养皿,于 25 °C 培养箱中培养 3 d,参考 Leslie 等<sup>[20]</sup>的镰刀菌分类系统,将培养皿中所有疑似镰刀菌转移至新鲜 PDA 平板。采用单孢分离法对所有分离菌株进

行纯化,纯化菌株转移到 PDA 斜面上,于 4℃ 保存备用。同时,存储于 30% 甘油中于 -80℃ 冰箱保存。

### 1.3 孢子鉴定

采用 CTAB 法提取所有纯化菌株的 DNA,于 -20℃ 保存备用,利用翻译延伸因子(translation elongation factor-1 $\alpha$ , *TEF-1 $\alpha$* )基因进行鉴定,引物为 EF1(5'-ATGGGTAAGGARGACAAGAC-3')和 EF2(5'-GGARGTACCAGTSATCATGTT-3'),DNA 提取、反应体系参照陈祥祥等报道<sup>[21]</sup>,以无菌水做阴性对照。利用 PCR 产物纯化试剂盒对扩增产物进行纯化后,送生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。测序结果在 NCBI 进行 Blast 同源性检索序列比对后,下载标准参考菌株的 *TEF-1 $\alpha$*  序列,随机挑选不同镰刀菌种菌株各 4 株,利用 MEGA 7.0 软件采用最大似然法构建系统发育树,进行 1 000 次自检,对分离菌株种群组成进行鉴定。

### 1.4 小麦赤霉病调查

参照小麦赤霉病测报技术规范标准 GB/T 15796-2011,采用 5 点取样法在齐穗期至灌浆期对小麦赤霉病严重度调查,每个田块 5 个重复,每个重复调查 500 个麦穗,记录各级病穗数和相应级数。小麦赤霉病严重度分级标准:0 级:无病;1 级:病小穗数/总小穗 $\leq 1/4$ ;2 级: $1/4 <$ 病小穗数/总小穗 $\leq 1/2$ ;3 级: $1/2 <$ 病小穗数/总小穗 $\leq 3/4$ ;4 级:病小穗数/总小穗 $> 3/4$ 。病情指数(DI)计算公式如下:

$$DI = \frac{\sum(\text{各级病穗数} \times \text{相应级值})}{\text{调查总穗数} \times 4} \times 100$$

### 1.5 镰刀菌毒素检测

小麦成熟期每个田块采用 5 点法取样方(5 m<sup>2</sup>),每个田块重复 3 次。人工收割脱粒后晒干,将每个样品用四分法取 2 kg 籽粒,完全粉碎过 20 目筛;称取过筛后混匀的样本 5.0 g,装入 50 mL 离心管,每个样品重复 3 次。每个样品加入 20 mL 的 80% 乙腈水溶液,180 r·min<sup>-1</sup> 摇床振荡 30 min 后,5 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 10 min,取上清。上清过氨基固相萃取柱后,收集过柱液,向萃取柱中加入 10 mL 的 80% 甲醇水溶液洗脱,收集全部洗脱液,合并过柱液和洗脱液,氮气吹干后加入 1 mL 流动相溶液,涡旋振荡后过 0.22  $\mu$ m 滤膜,供

高效液相色谱-串联质谱检测。DON、3ADON、15ADON、NIV 和 4ANIV 等单端孢霉烯族化合物检测的液相色谱和质谱参数条件参考 Dong 等<sup>[22]</sup>报道的方法。

### 1.6 数据处理

采用 Excel 2016 进行试验数据分析,图表中数据均为平均值 $\pm$ 标准误。采用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析和皮尔逊相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 镰刀菌孢子的分离鉴定

2020 年在江苏省 6 个地区共捕捉到疑似镰刀菌孢子 650 株,其中宜兴市 106 个,句容市 72 个,姜堰区 150 个,盐都区 96 个,宿豫区 128 个,铜山区 98 个。所有纯化菌株进行 *TEF-1 $\alpha$*  序列测序后,经 Blast 比对鉴定全部为镰刀菌,且同源性均在 99% 以上。基于比对结果,650 株镰刀菌共包含 9 个种。其中,亚洲镰刀菌(*F. asiaticum*) 227 株,木贼镰刀菌(*F. equiseti*) 128 株,藤仓镰刀菌(*F. fujikuroi*) 98 株,轮枝镰刀菌(*F. verticillioides*) 83 株,层出镰刀菌(*F. proliferatum*) 69 株,燕麦镰刀菌(*F. avenaceum*) 23 株,尖孢镰刀菌(*F. oxysporum*) 11 株,砖红镰刀菌(*F. incarnatum*) 7 株,禾谷镰刀菌(*F. graminearum*) 4 株(图 1)。

系统发育树结果表明,9 个种分属于 5 个镰刀菌复合种(图 2)。其中,藤仓镰刀菌复合种(*Fusarium fujikuroi* species complex, FFSC)包括藤仓镰刀菌(*F. fujikuroi*)、轮枝镰刀菌(*F. verticillioides*)和层出镰刀菌(*F. proliferatum*);FGSC 包括亚洲镰刀菌(*F. asiaticum*)和禾谷镰刀菌(*F. graminearum*);砖红木贼镰刀菌复合种(*Fusarium incarnatum-equiseti* species complex, FIESC)包括木贼镰刀菌(*F. equiseti*)和砖红镰刀菌(*F. incarnatum*);三线镰刀菌复合种(*Fusarium tricinctum* species complex, FTSC)包括燕麦镰刀菌(*F. avenaceum*);尖孢镰刀菌复合种(*Fusarium oxysporum* species complex, FO SC)包括尖孢镰刀菌(*F. oxysporum*)。进一步分析不同镰刀菌复合种占比发现,FFSC、FGSC、FIESC、FTSC 和 FO SC 分别占全部捕捉菌株的 38.5%、35.5%、20.8%、3.5% 和 1.7%。

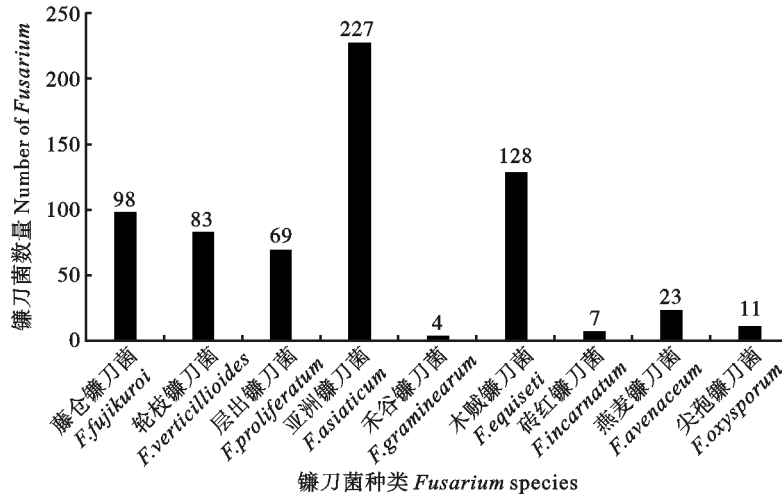


图 1 所有捕捉孢子的镰刀菌组成  
Fig. 1 Composition of *Fusarium* species of all the collected spores

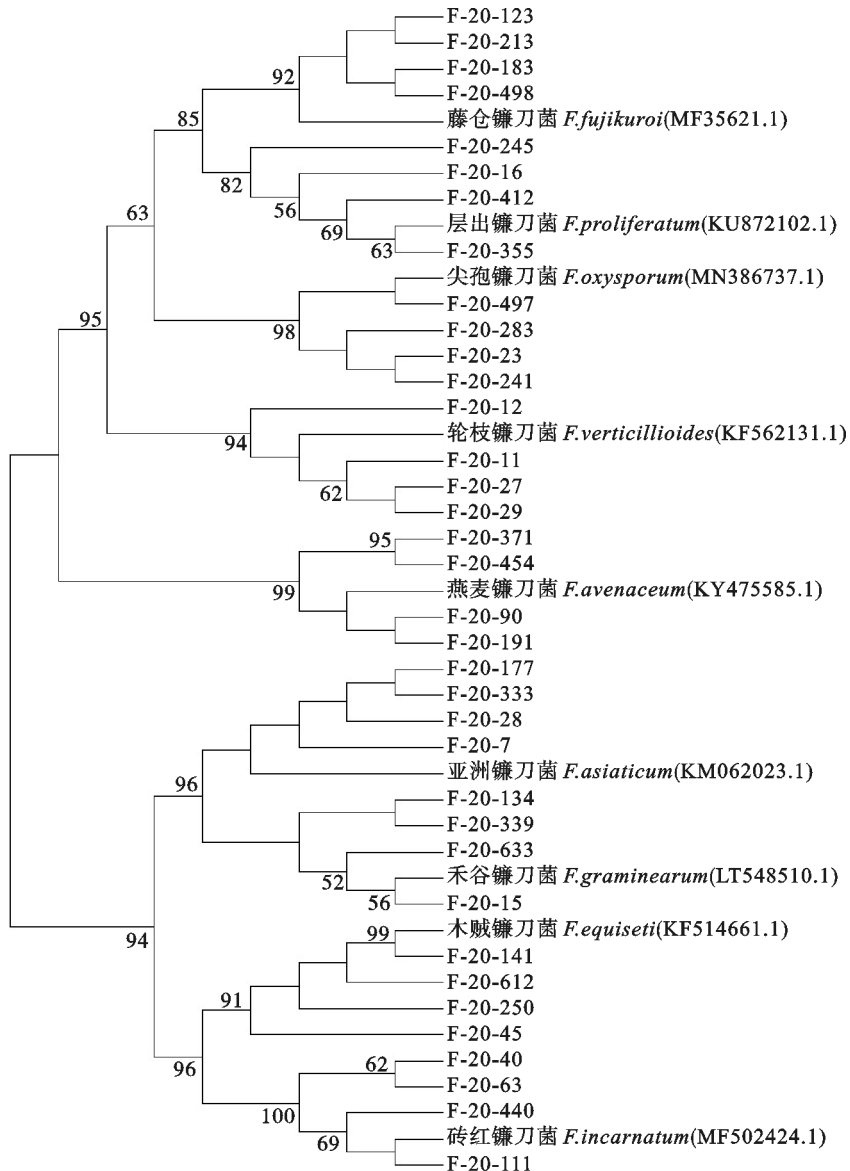


图 2 镰刀菌系统发育树  
Fig. 2 Phylogenetic tree of *Fusarium* species

## 2.2 不同地区镰刀菌组成

不同地区之间镰刀菌组成存在一定差异,淮南地区(宜兴市、句容市、姜堰区和盐都区)镰刀菌以亚洲镰刀菌(*F. asiaticum*)、藤仓镰刀菌(*F. fujikuroi*)和木贼镰刀菌(*F. equiseti*)为主,但在淮北地区(宿豫区和铜山区)以亚洲镰刀菌(*F. asiaticum*)、轮枝镰刀菌(*F. verticillioides*)和木贼镰刀菌(*F. equiseti*)为主(表 1)。FGSC 孢子数占捕捉总孢子数在地区之间同样存在一定差异,位于淮南地区的宜兴市、句容市、姜堰区和盐都区,FGSC 占比均超过 35.0%,其中姜堰区达到 49.3%;但是,位于淮北地区的宿豫区和铜山区,FGSC 占比明显下降,仅占捕捉总孢子数的 26.6%和 21.4%(表 1)。

## 2.3 不同地区病情指数及总镰刀菌毒素含量

比较不同地区赤霉病的 DI 发现,2020 年姜堰地区 DI 最高,达(9.8±0.7),显著高于其他地

区( $P<0.05$ );宜兴市、句容市和盐都区 DI 均显著高于宿豫区和铜山区( $P<0.05$ )(表 2)。比较不同地区总镰刀菌毒素(DON+3ADON+15ADON+NIV+4ANIV)含量发现,2020 年姜堰地区总镰刀菌毒素含量最高,达 $1\,956.3\pm 73.6\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,显著高于其他地区( $P<0.05$ );宜兴市、句容市和盐都区镰刀菌毒素含量同样显著高于宿豫区和铜山区( $P<0.05$ )(表 2)。

## 2.4 孢子种类对病情指数及总镰刀菌毒素含量的影响

进一步分析总孢子数和 FGSC 孢子数对病情指数和总镰刀菌毒素含量的影响发现,病情指数与总镰刀菌毒素含量与捕捉到的 FGSC 孢子数均呈极显著正相关( $P<0.01$ ),相关系数分别达到 0.938 和 0.920,但与总孢子数没有相关性,相关系数仅为 0.586 和 0.564(表 3)。

表 1 不同地区镰刀菌组成  
Table 1 Species composition of *Fusarium* in various regions

镰刀菌 <i>Fusarium</i>	不同地区镰刀菌数量 Number of <i>Fusarium</i> isolates						
	宜兴市 Yixing	句容市 Jurong	姜堰区 Jiangyan	盐都区 Yandu	宿豫区 Suyu	铜山区 Tongshan	
FFSC	藤仓镰刀菌 <i>F. fujikuroi</i>	22	17	22	19	10	8
	轮枝镰刀菌 <i>F. verticillioides</i>	3	5	13	8	27	27
	层出镰刀菌 <i>F. proliferatum</i>	5	12	13	11	14	14
FGSC	亚洲镰刀菌 <i>F. asiaticum</i>	42	26	74	34	34	17
	禾谷镰刀菌 <i>F. graminearum</i>	0	0	0	0	0	4
FIESC	木贼镰刀菌 <i>F. equiseti</i>	32	12	24	20	12	28
	砖红镰刀菌 <i>F. incarnatum</i>	2	0	0	0	5	0
FOSC	尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i>	0	0	4	4	3	0
FTSC	燕麦镰刀菌 <i>F. avenaceum</i>	0	0	0	0	23	0
	总计 Total	106	72	150	96	128	98
	不同地区分离的 FGSC 比例 Ratio of FGSC to total <i>Fusarium</i> isolates in various region/%	39.6	36.1	49.3	35.4	26.6	21.4

表 2 不同地区赤霉病病情指数及镰刀菌毒素含量  
Table 2 Disease index and total content of *Fusarium* mycotoxins in various regions

地区 Region	病情指数 Disease index	总毒素含量 Content of total <i>Fusarium</i> mycotoxins/( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	病情指数与毒素相关性 Correlation between disease index and total <i>Fusarium</i> mycotoxin
宜兴市 Yixing	5.6±0.3b	1 223.3±53.3b	0.990**
句容市 Jurong	3.6±0.4c	727.3±73.3c	
姜堰区 Jiangyan	9.8±0.7a	1 956.3±73.6a	
盐都区 Yandu	3.0±0.1c	518.0±20.4d	
宿豫区 Yusu	1.8±0.1d	334.7±15.9e	
铜山区 Tongshan	1.6±0.2d	287.3±9.0e	

同列数据后不同小写字母表示地区间差异显著( $P<0.05$ ); \*\*:  $P<0.01$ 。下同。

Different letters following data in same column indicate significant difference between regions( $P<0.05$ ); \*\*:  $P<0.01$ . The same in table 3.

表 3 孢子数量与病情指数及镰刀菌毒素含量相关性  
Table 3 Correlation between type of spores and disease index and the total content of *Fusarium* mycotoxins

孢子类型 Type of spores	病情指数 Disease index	镰刀菌毒素 <i>Fusarium</i> mycotoxin
总孢子数 Number of total spores	0.586	0.564
禾谷镰刀菌复合种孢子数 Number of FGSC spores	0.938**	0.920**

### 3 讨论

田间致病镰刀菌孢子数量是引致赤霉病及其镰刀菌毒素污染的关键因素之一,明确田间孢子种类及数量,对开展赤霉病预测预报及指导防控具有重要意义<sup>[16]</sup>。中国早在 20 世纪 80 年代就开始运用子囊孢子飞散数量法开展小麦赤霉病的预测预报研究工作<sup>[2,19]</sup>,但现有孢子捕捉设备无差别捕捉田间飞散孢子,并且无法快速识别引致小麦赤霉病的孢子种类和数量。张昊等<sup>[2]</sup>发现,能引致中国小麦赤霉病的优势真菌是 FGSC,主要包括 *F. asiaticum* 和 *F. graminearum*。其中, *F. graminearum* 主要分布在年平均气温低于 15 °C 的地区,而 *F. asiaticum* 则是分布在年平均气温高于 15 °C 的地方<sup>[8,22-24]</sup>。Qiu 等<sup>[25]</sup>研究发现,江苏省和安徽省能够引致小麦赤霉病的真菌是 FGSC,在分离得到的 FGSC 中 *F. asiaticum* 占 90.7%, *F. graminearum* 占 9.3%。Dong 等<sup>[8]</sup>研究发现,能够引起江苏地区小麦赤霉病的病原真菌同样是 FGSC,其中 *F. asiaticum* 占 FGSC 总数的 97.5%,而 *F. graminearum* 仅占 2.5%。本研究在小麦抽穗扬花期间,通过水盘琼脂培养法在江苏省六个地区开展田间孢子捕捉及鉴定工作,结果表明不同县(市、区)采集到的能够引致赤霉病的 FGSC 数量仅占全部孢子的 21.4%~49.3%,主要由 *F. asiaticum* 和 *F. graminearum* 组成,其中 *F. asiaticum* 占 FGSC 总数的 98.3%,而 *F. graminearum* 仅占 1.7%,其他均为不能引致赤霉病的腐生菌。本研究结果与前人研究一致。

明确田间孢子在田间释放的影响因素,对开展小麦赤霉病防控具有重要指导作用。David 等<sup>[26]</sup>通过调查了可控温室条件下,温湿度对 *F. graminearum* 子囊孢子释放影响,发现子囊孢子释放量在 15 °C 时随着湿度的增加。Manstretta 等<sup>[27]</sup>通过连续三年的田间调查发现,子囊孢子数

量与环境因子,尤其是湿度条件成显著正相关( $P < 0.001$ )。Crandall 和 Gilbert<sup>[28]</sup>研究发现,田间采集的孢子量与降雨量密切相关,与种植的作物种类没有相关性。张春云<sup>[29]</sup>通过分析 2000—2017 年仪征市赤霉病大流行各发生影响因子量,发现在正常年份温度都能满足病害流行的要求,而雨水是赤霉病发生的主导影响因子。张曼玉<sup>[30]</sup>通过孢子捕捉器进行孢子捕捉,发现在相对湿度无明显差异下,温度高则孢子释放量较大;在温度无明显差异下,相对湿度大则孢子的释放量大。由此可见,镰刀菌孢子释放量与温湿度密切相关。

研究表明,通过子囊孢子数量法捕捉的孢子数量与病穗率有极显著相关性,建立的预测模型具有较高的赤霉病发生程度预测准确率,确保实现赤霉病的精准防控<sup>[19]</sup>。但是与以往研究不同的是,本研究通过分别比较总孢子数、FGSC 孢子数与赤霉病病情指数、镰刀菌毒素污染程度相关性发现,尽管不同地区调查的病情指数与收获期籽粒样品中镰刀菌毒素污染程度呈极显著正相关,但是总孢子数与赤霉病病情指数和镰刀菌毒素污染程度之间均没有显著相关性,而 FGSC 孢子数与赤霉病病情指数和镰刀菌毒素污染程度均表现极显著正相关。由此可见,为了进一步提高赤霉病发生及其镰刀菌毒素污染程度的预测预报准确度,亟需提高田间飞散孢子种类及数量的鉴定能力。

#### 参考文献:

[1] DEAN R, VAN KAN J A L, PRETORIUS Z A, et al. The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology [J]. *Molecular Plant Pathology*, 2012, 13(4): 414.

[2] 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.

ZHANG H, CHEN W Q. Research progresses on population structure of pathogen and monitoring and controlling technology of *Fusarium* head blight in wheat [J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49(1): 250.

[3] 董飞, 徐剑宏, 仇剑波, 等. 我国小麦镰刀菌毒素污染发生风险分析[J]. *农产品质量与安全*, 2020(5): 7.

DONG F, XU J H, QIU J B, et al. Risk analysis of *Fusarium* toxin contamination of wheat in China [J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, 2020(5): 7.

[4] 史建荣, 仇剑波, 董飞, 等. 小麦镰刀菌毒素及其发生风险研究进展[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(2): 129.

SHI J R, QIU J B, DONG F, et al. Risks of *Fusarium* toxins of wheat in China [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(2): 129.

[5] 姚金保, 陆维忠. 中国小麦抗赤霉病育种研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2000, 16(4): 242.

- YAO J B, LU W Z. Research advances in wheat breeding for scab resistance in China [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2000, 16(4): 242.
- [6] 马鸿翔, 王永刚, 高玉姣, 等. 小麦抗赤霉病育种回顾与展望 [J]. 中国农业科学, 2022, 55(5): 837.
- MA H X, WANG Y G, GAO Y J, *et al.* Review and prospect on the breeding for the resistance to *Fusarium* head blight in wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(5): 837.
- [7] SUBEDI K D, MA B L, XUE A G. Planting date and nitrogen effects on *Fusarium* head blight and leaf spotting diseases in spring wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99(1): 113.
- [8] DONG F, QIU J B, XU J H, *et al.* Effect of environmental factors on *Fusarium* population and associated trichothecenes in wheat grain grown in Jiangsu province, China [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 230: 58.
- [9] 张海燕, 董飞, 徐剑宏, 等. 江苏姜堰不同品种与播期小麦赤霉病抗性比较 [J]. 中国植保导刊, 2019, 39(3): 52.
- ZHANG H Y, DONG F, XU J H, *et al.* Comparison of wheat scab resistance of different varieties and sowing dates in Jiangyan, Jiangsu Province [J]. *China Plant Protection*, 2019, 39(3): 52.
- [10] 严东权, 薛颖昊, 徐志宇, 等. 我国农作物秸秆直接还田利用现状、技术模式及发展建议 [J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(4): 1.
- YAN D Q, XUE Y H, XU Z Y, *et al.* Current utilization status, technical models and development proposals for direct crop straw returning to field in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(4): 1.
- [11] SCHAAFSMA A W, TAMBURIC-ILINCIC L, HOOKER D C. Effect of previous crop, tillage, field size, adjacent crop, and sampling direction on airborne propagules of *Gibberella zeae*/*Fusarium graminearum*, *Fusarium* head blight severity, and deoxynivalenol accumulation in winter wheat [J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2005, 27(2): 217.
- [12] QIU J, DONG F, YU M, *et al.* Effect of preceding crop on *Fusarium* species and mycotoxin contamination of wheat grains [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(13): 4536.
- [13] 李兵, 梁晋刚, 朱育攀, 等. 我国小麦赤霉病成灾原因分析及防控策略探讨 [J]. 生物技术进展, 2021, 11(5): 647.
- LI B, LIANG J G, ZHU Y P, *et al.* Epidemiological analysis and management strategies of *Fusarium* head blight of wheat [J]. *Current Biotechnology*, 2021, 11(5): 647.
- [14] 陈云, 王建强, 杨荣明, 等. 小麦赤霉病发生危害形势及防控对策 [J]. 植物保护, 2017, 43(5): 11.
- CHEN Y, WANG J Q, YANG R M, *et al.* Current situation and management strategies of *Fusarium* head blight in China [J]. *Plant Protection*, 2017, 43(5): 11.
- [15] 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.
- [16] 邢瑜琪. 稻麦轮作区小麦赤霉病的监测与预警 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- XING Y Q. Monitoring and early warning of wheat scab in rice-wheat rotation area [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [17] 马志荣. 小麦赤霉病预测模型研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010.
- MA Z R. Study on prediction model of wheat scab [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010.
- [18] 姚金保, 马鸿翔, 姚国才, 等. 国审小麦新品种宁麦 16 表现及应用前景 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(12): 118.
- YAO J B, MA H X, YAO G C, *et al.* Performance of national authorized wheat cultivar ningmai 16 and its prospects [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(12): 118.
- [19] 胡小平, 卢雪敏, 马丽杰, 等. 作物病害监测预警研究进展 [J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 298.
- HU X P, HU X M, MA L J, *et al.* Research progresses in monitoring and prediction of crop diseases [J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49(1): 298.
- [20] LESLIE J F, SUMMERELL B A. *The fusarium laboratory manual* [M]. Ames, Iowa: Blackwell Pub., 2006.
- [21] 陈祥祥, 吴季荣, 武德亮, 等. 江苏省水稻赤霉病原菌分离鉴定与致病力分析 [J]. 植物保护学报, 2022, 49(6): 1612.
- CHEN X X, WU J R, WU D L, *et al.* Identification and pathogenicity test of *Fusarium* isolates causing *Fusarium* head blight in rice in Jiangsu Province [J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49(6): 1612.
- [22] DONG F, ZHANG X, XU J H, *et al.* Analysis of *Fusarium graminearum* species complex from freshly harvested rice in Jiangsu Province (China) [J]. *Plant Disease*, 2020, 104(8): 2138.
- [23] QIU J B, XU J H, SHI J R. *Fusarium* toxins in Chinese wheat since the 1980s [J]. *Toxins*, 2019, 11(5): 248.
- [24] QU B, LI H P, ZHANG J B, *et al.* Geographic distribution and genetic diversity of *Fusarium graminearum* and *F. asiaticum* on wheat spikes throughout China [J]. *Plant Pathology*, 2008, 57(1): 18.
- [25] QIU J B, XU J H, SHI J R. Molecular characterization of the *Fusarium graminearum* species complex in Eastern China [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2014, 139: 814.
- [26] DAVID R F, MARR L C, SCHMALE D G. Ascospore release and discharge distances of *Fusarium graminearum* under controlled temperature and relative humidity [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2016, 146: 64.
- [27] MANSTRETTA V, ROSSI V. Effects of weather variables on ascospore discharge from *Fusarium graminearum* perithecia [J]. *PloS one*, 2015, 10(9): 1.
- [28] CRANDALL S G, GILBERT G S. Meteorological factors associated with abundance of airborne fungal spores over natural vegetation [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 162: 93.
- [29] 张春云. 小麦赤霉病发生与菌源·气象因子量关系分析 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45(6): 153.
- ZHANG C Y. Analysis on relationship of occurrence of wheat gibberellic disease with bacteria source and meteorological factors [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(6): 153.
- [30] 张曼玉. 小麦赤霉病菌孢子释放规律研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- ZHANG M Y. Study on the spores release of *Fusarium graminearum* [D]. Hefei: Anhui agricultural University, 2021.