

接种方法和接种时期对不同玉米杂交组合穗腐病抗性鉴定的影响

孟冰^{1,2}, 王山荭², 李文学², 刘甲成², 汤继华¹, 郭子锋²

(1. 河南农业大学农学院/省部共建小麦玉米作物学国家重点实验室, 郑州 450046; 2. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 为研究不同接种方法和接种时期对玉米拟轮枝镰孢穗腐病(*Fusarium verticillioides* ear rot, FER)抗性鉴定的影响, 选取高抗×高抗、高抗×高感、高感×高感组合各3份, 2022年在北京顺义和河南新乡分别用针刺果穗注射法与双牙签法在玉米吐丝后5、10、15 d进行接种。结果表明, 吐丝后5、10和15 d接种, 针刺果穗注射法分别比双牙签法的平均病情严重度高6.3%、3.9%和1.8%; 吐丝后5 d接种, 不同组合采用针刺果穗注射法接种未达到显著差异, 采用双牙签法达到极显著差异($P<0.01$); 吐丝后10 d和15 d接种, 不同组合使用针刺果穗注射法均达到极显著($P<0.01$)差异, 牙签法均未达到显著差异。采用双牙签法接种时, 建议吐丝后5 d接种; 采用针刺果穗注射法接种时, 建议吐丝后10~15 d接种。

关键词: 玉米; 拟轮枝镰孢穗腐病; 抗性鉴定; 接种方法; 接种时期

中图分类号: S435.131

文献标识码: A

Effects of Inoculation Methods and Inoculation Period on Resistance Evaluation of Ear Rot Diseases across Maize Hybrids

MENG Bing^{1,2}, WANG Shan-hong², LI Wen-xue², LIU Jia-cheng², TANG Ji-hua¹, GUO Zi-feng²

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University /

National Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, Zhengzhou 450046;

2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This study aimed to evaluate resistance of maize to *Fusarium verticillioides* ear rot(FER) by comparing different inoculation methods and periods using three combinations of maize crosses: high resistance × high resistance, high resistance × high susceptible and high susceptible × high susceptible. In the summer of 2022, maize was inoculated at 5 d, 10 d and 15 d after silking by kernel injection and two-toothpicks in Shunyi, Beijing and Xinxian, Henan, respectively. The results showed that the average FER severity by kernel injection was 6.3%, 3.9% and 1.8% higher than that by two-toothpicks method at 5 d, 10 d and 15 d after silking, respectively. Inoculation at 5 d after silking, there was no significant difference between different hybrids by kernel injection method, but there was highly significant difference by two-toothpicks method($P<0.01$). Inoculation at 10 d and 15 d after silking showed highly significant differences($P<0.01$) between different hybrids by kernel injection method, but not significant by two-toothpicks method. In conclusion, it is recommended to inoculate at 5 d after silking by the two-toothpick method, while inoculation at 10–15 d after silking by the kernel injection method.

Key words: Maize; *Fusarium verticillioides* ear rot; Resistance evaluation; Inoculation method; Inoculation period

录用日期: 2023-03-28

基金项目: 科技创新 2030—重大项目(2023ZD0402804-4)、中国农业科学院农业科技创新工程行动(CAAS-XTX2016009)

作者简介: 孟冰(1997-), 河北武安人, 硕士, 主要从事玉米抗病分子育种研究。E-mail: 1106433753@qq.com

郭子锋和汤继华为本文通信作者。

E-mail: guozifeng@caas.cn E-mail: tangjihua1@163.com

穗腐病是玉米的主要穗部病害, 不仅影响产量, 而且病原菌产生的毒素污染玉米子粒, 威胁人畜健康^[1,2]。近年来, 由于我国集中化管理程度小、玉米种植密度逐年提升以及不合理的轮作方式, 穗腐病逐年流行, 有些年份发病率达到30%~40%^[3], 造成巨大的经济损失。目前, 国内对于玉米穗腐病以化

学防治为主,效果不理想,因此,培育具有穗腐病抗性的玉米品种是最为经济的方式。在培育抗性品种的过程中,需要对植株进行接种以及抗性评价。

科学有效的接种方法是保证表型鉴定结果准确的前提^[4],不同的接种方法对同一个材料穗腐病的评价可能会有较大的差别^[5]。研究证明,在进行玉米穗腐病抗性评价时,仅仅靠自然发病遗传力低,难以达到理想的鉴定效果^[6,7]。目前,国内外使用过的接种方法有花丝通道注射法^[8-17]、针刺果穗注射法^[18-22]、花丝喷雾法^[23-26]、牙签法^[27-29]、苞叶注射法、BB颗粒法以及模仿鸟类损害和昆虫损害的接种方法。其中,BB颗粒法发病适中,较其他接种方法繁杂很多,很难在田间实际应用;模仿鸟类与昆虫损害的接种方法一般只在特定的环境中使用,适用范围小。通过花丝感染个体的花丝通道注射法和花丝喷雾法中,前者易于定量控制、误差小,后者操作简单,两者发病较轻,更接近自然发病。通过对子粒造成损伤感染个体的针刺果穗注射法和牙签法中,前者易于定量控制、误差小,后者操作简单,两者均发病充分,适合对不同抗性的个体进行鉴定,不适合模拟自然发病的结果。通过对苞叶造成伤口感染的苞叶注射法相比通过花丝感染的方法来说发病较重,相比通过对子粒造成伤口感染的方法来说发病较轻,注射法相对于喷雾法以及牙签法来说比较繁琐。牙签法的接种也多种多样,有些研究中使用1根牙签接种1个果穗,有些研究中使用6根牙签接种1个果穗,考虑到发病的充分情况与操作的简便性,本试验采用牙签法中的双牙签法进行研究。

接种时期也是影响抗性鉴定的重要因素。Clement等将接种时间选择在玉米的R2时期。也有一些研究按照开花日期选择接种时间,如 Drepper

等、Zila等和 Guo等^[30]将接种时间选择在吐丝后的7~10 d;有研究将接种时间选择在玉米的吐丝期、灌浆期、乳熟期和蜡熟期;也有研究根据授粉后的天数进行接种。考虑到在田间接种难以逐个判断子粒的特征及植株所处生长阶段。近年来,国内外学者大多根据吐丝后的天数选择接种时间,段灿星等和孙华等选择在吐丝后10 d左右进行针刺果穗注射法;Wen^[31]等选择在吐丝12 d进行针刺果穗注射法接种;Bush等选择在吐丝后两周进行针刺果穗注射法接种;张小飞等选择在吐丝15 d进行针刺果穗注射法接种;Gulya等选择在吐丝后10 d进行牙签法接种;Morales等选择在吐丝后14 d进行牙签法接种。国内外研究中接种时间大部分选择在吐丝后的5~15 d,本研究中选择5、10和15 d时间节点。

在前期鉴定基础上,选择高抗和高感玉米自交系组配成不同的杂交组合,研究两种接种方法在不同时期的接种效果,为玉米穗腐病抗性育种中准确的表型鉴定提供参考。对这9个组合的产量构成进行相关分析,寻找与穗腐病抗性相关的产量性状。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验材料为9份玉米杂交组合以及两份对照材料郑单958与先玉335(表1)。亲本为前期鉴定的高抗或者高感自交系^[32],其中,3份组合类型为高抗×高抗,3份组合类型为高抗×高感,3份组合类型为高感×高感。于2021年冬季在中国农业科学院作物科学研究所海南试验站种植亲本,控制授粉获得杂交组合。

试验于2022年分别在北京顺义和河南新乡进行。试验地均采用人工点播,每份材料均种植4行,

表1 9份玉米杂交组合及其系谱
Table 1 Nine maize hybrids and their pedigrees

杂交组合 Hybrid	系谱来源 Pedigree	组合类型 Hybrid type
MF01	LH196×Va35A	高抗×高抗
MF02	8107×LH196	高抗×高抗
MF03	Ping1P6Co×LH196	高抗×高抗
MF04	PHN73×PHW43	高抗×高感
MF05	835×PHW43	高抗×高感
MF06	中自03×PHW43	高抗×高感
MF07	5311×PHW43	高感×高感
MF08	吉63×PHW43	高感×高感
MF09	CML473×PHW43	高感×高感

行长3 m,行距60 cm,株距25 cm。其中,顺义试验基地于5月9日播种,新乡试验基地于6月11日播种,田间管理采用常规管理方式。待玉米开始抽雄时,每日观察记录各个单株的吐丝日期,分别于吐丝后5、10、15 d后进行针刺果穗注射法与双牙签法接种,每个处理至少接种10株。

1.2 菌液配制与接种方法

病原菌为拟轮枝镰孢(*Fusarium verticillioides*),由云南省农业科学院和中国农业科学院农产品加工研究所提供。将拟轮枝镰孢的菌株接种在PDA培养基上,恒温箱中25℃暗培1周,直至菌丝铺满整个培养基;然后将菌丝连同培养基倒入灭菌的玉米雄穗中进行再培养。接种时,将孢子悬浮液浓度调节为 5×10^5 个孢子/mL。

针刺果穗注射法:先用消过毒一字螺丝刀在穗部上1/3处向下扎,然后用注射器将孢子悬浮液注射1.5 mL,随后用牛皮纸袋套上,待完全成熟后,统计其发病面积。

双牙签法:先将木牙签在120℃高温灭菌锅中进行灭菌,之后将其浸泡在4℃的孢子悬浮液中24 h。接种前,在穗部上1/3处对称扎上两个牙签,待完全成熟后,统计其发病面积。

收获之后进行充分晾晒,每个材料选取3穗穗型相似的穗子进行考种,对其产量构成进行分析,并根据抗性鉴定结果分析产量构成性状与穗腐病之间的相关性。

1.3 数据处理与分析

表型数据分析在Excel 2019中进行,方差分析使用IciMapping4.2软件^[3]中的ANOVA功能。由于河南新乡2022年夏季遭遇大风,玉米倒伏严重,除对照外,其他数据仅用北京顺义的结果进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同接种方法和接种时期对玉米穗腐病的表型影响

图1结果表明,采用针刺果穗注射法接种时,玉米穗腐病的病情严重度大于双牙签法。北京顺义郑单958采用两种接种方法均没有表现感病,先玉335采用针刺果穗注射法和双牙签法的病情严重度平均值分别为80.0%和40.0%;在河南新乡,郑单958采用针刺果穗注射法和双牙签法的病情严重度平均值分别为32.3%和8.9%,先玉335分别为71.5%和25.9%。

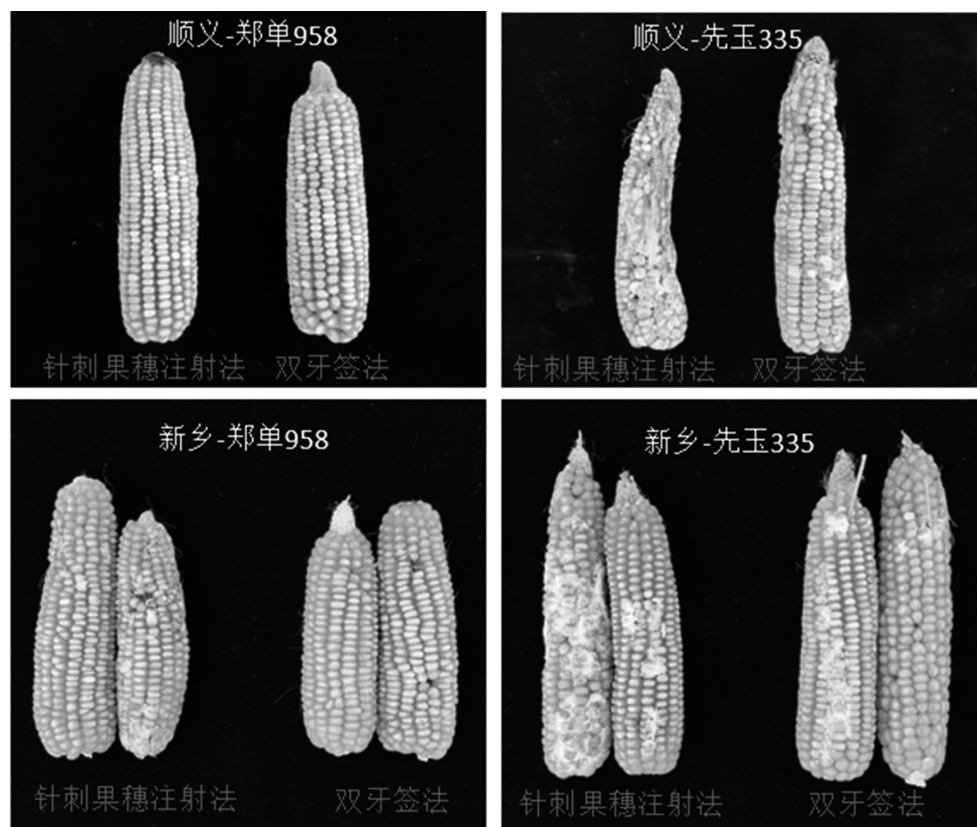


图1 采用针刺果穗注射法与双牙签法接种下郑单958和先玉335的发病情况

Fig.1 FER severity of Zhengdan958 and Xianyu335 with two-toothpicks and kernel injection methods

9份杂交组合及2份对照接种表明,吐丝后5 d接种,采用针刺果穗注射法和双牙签法的平均病情严重度分别为12.8%和6.5%;吐丝后10 d接种,平均病情严重度分别为6.5%和2.6%;吐丝后15 d接种,平均病情严重度分别为4.6%和2.8%,即吐丝后5、10和15 d接种,针刺果穗注射法分别比双牙签法高6.3%、3.9%和1.8%(图2)。高抗×高抗组合采用针刺

果穗注射法和双牙签法的平均病情严重度分别为5.2%和1.1%,高抗×高感的平均病情严重度分别为3.3%和1.8%,高感×高感组合的平均病情严重度分别为11.5%和6.1%,即高抗×高抗、高抗×高感和高感×高感组合针刺果穗注射法分别比双牙签法高4.1%、1.3%和5.4%。

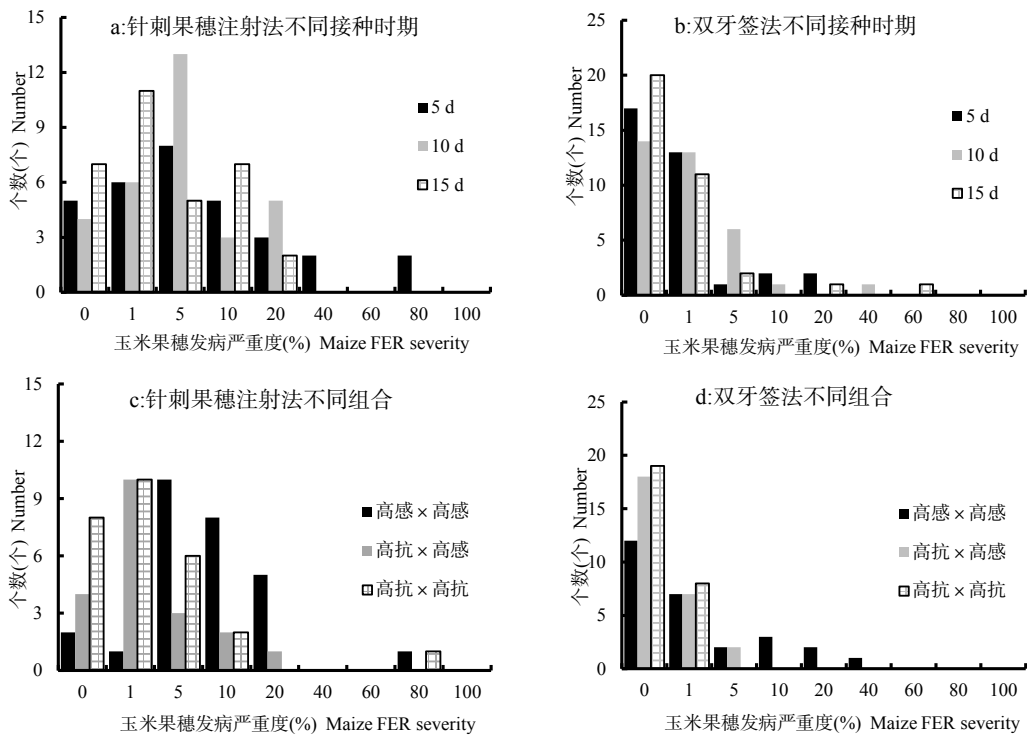


图2 不同发病面积的玉米果穗个数分布直方图
Fig.2 Number of maize ears with different FER under different inoculation methods

2.2 不同接种方法和接种时期玉米穗腐病方差分析

方差分析表明(表2),在控制接种时期和接种方法下,不同组合之间穗腐病抗性达到极显著差异($P<0.01$)。在控制不同组合和接种方法下,接种时期

之间穗腐病抗性未达到显著差异;在控制不同组合和接种时期下,接种方法之间存在极显著差异($P<0.01$)。不同组合与接种时期之间的交互未达到显著差异,不同组合与接种方法、接种时期与接种方法之间的交互均达到显著差异($P<0.05$)。因此,有必

表2 不同接种方法和接种时期的方差分析
Table 2 Analysis of variance for different inoculation methods and periods

处 理 Treatment	自由度 Df	总方差 SS	均 方 MS	F 值 F value	P 值 P value
不同组合	4	1582.193	395.548	3.985	0.004**
接种时期	2	412.374	206.187	2.017	0.136
接种方法	1	1440.559	1440.559	14.515	0.000**
不同组合×接种时期	8	856.352	107.044	1.047	0.403
不同组合×接种方法	4	978.192	244.548	2.464	0.047*
接种时期×接种方法	2	1165.555	582.778	5.872	0.022*

注:*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$ 。下表同。
Note: *means $P<0.05$, **means $P<0.01$. The same below.

要进一步对不同接种方法下的组合和接种时期进行方差分析(表3)。

表3结果表明,采用针刺果穗注射法和双牙签法接种,不同组合之间的差异均达到显著水平($P<0.05$)。采用针刺果穗注射法,不同接种时期之间具有显著差异($P<0.05$);采用双牙签法,不同接种时期

未达到显著差异。吐丝后5 d接种,不同组合使用针刺果穗注射法接种未达到显著差异,而双牙签法达到极显著差异($P<0.01$);吐丝后10 d和15 d接种,不同组合使用针刺果穗注射法均达到极显著($P<0.01$)差异,而双牙签法均未达到显著差异。

表3 不同接种方法下接种时期的方差分析
Table 3 Analysis of variance for inoculation periods under different inoculation methods

处 理 Treatment	针刺果穗注射法 Kernel injection method					双牙签法 Two-toothpicks method				
	自由度	总方差	均 方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	自由度	总方差	均 方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
	Df	SS	MS	<i>F</i> value	<i>P</i> value	Df	SS	MS	<i>F</i> value	<i>P</i> value
组 合	4	1878.2	469.5	3.1	0.019*	4	662.7	165.7	3.0	0.021*
接种时期	2	1168.7	584.4	3.9	0.024*	2	8.5	4.3	0.1	0.925
接种时期(5 d)	4	2157.2	539.3	1.3	0.292	4	516.9	129.2	4.1	0.010**
接种时期(10 d)	4	516.9	129.2	4.1	0.010**	4	246.6	61.7	1.4	0.259
接种时期(15 d)	4	400.5	100.1	4.9	0.004**	4	711.1	177.8	1.8	0.154

2.3 玉米穗腐病与产量构成因素的相关分析

表4结果表明,在包含对照的11份育种材料中,穗长与百粒重呈显著相关性($P<0.05$),穗粗与穗行数

呈显著相关性($P<0.05$),穗行数与行粒数呈极显著相关性($P<0.01$),而穗腐病与产量构成因素无显著相关性。

表4 玉米穗腐病病情严重度与农艺性状之间的相关性
Table 4 Phenotypic correlation among FER severity and agronomic traits

相关系数 Correlation coefficient	穗 长 Ear length	穗 粗 Ear diameter	穗行数 Ear row number	行粒数 Kernels per row	百粒重 100-kernels weigh	产 量 Yield	穗腐病 FER
穗 长	—						
穗 粗	0.164	—					
穗行数	−0.170	0.410*	—				
行粒数	0.221	0.114	−0.514**	—			
百粒重	0.631*	0.395	0.056	−0.402	—		
产 量	−0.258	0.248	−0.291	0.323	−0.058	—	
穗腐病	0.002	−0.116	−0.197	0.240	−0.322	0.483	—

3 结论与讨论

玉米穗腐病是多基因控制的数量性状,单个基因的效应小^[34,35],且受环境的影响大,精准的表型鉴定是进行基因定位和基因克隆的关键影响因素。本试验中,针对9份不同穗腐病抗性玉米杂交组合及2份对照分别采用针刺果穗注射法及双牙签法进行接种。结果表明,针刺果穗注射法接种后发病程度均高于双牙签法,且随着吐丝后接种时间的推迟,两种接种方法之间的差异有逐渐减小趋势,感病组合比抗病组合使用两种方法的差异更大。使用针刺果穗

注射法接种在吐丝后的一定时期内发病较重,且接种时期越早,发病越重。原因可能是针刺果穗注射法直接注射菌液,提供了浓度更高的孢子浓度,针刺的同时破坏了细胞壁,使病菌更易侵染。因此,在对玉米种质资源进行精准抗性评价时,建议采用针刺果穗注射法,因其对不同组合材料具有更好的鉴定效果;双牙签法虽不如针刺果穗注射法精准,但如果考虑到田间大面积进行接种,拥有简便性的双牙签法仍是较好的选择^[36],可以避免工作量太大而错过最佳接种时期。

除了接种方法,接种时期也是影响玉米穗腐病

鉴定效果的重要方面,玉米种质或品种之间往往生育期差异较大,如果严格控制吐丝后某天接种,会加大接种的工作量。在控制不同组合和接种方法下,接种时期之间穗腐病抗性未达到显著差异,且不同组合与接种时间的互作也未达到显著差异,这表明在吐丝后一定时间内,接种时期对鉴定结果的影响相对较小。在使用针刺果穗注射法时,吐丝后10 d或15 d接种,不同组合之间的差异达到显著水平,吐丝后5 d接种未达到显著水平;双牙签法则相反。建议使用双牙签法时,在吐丝后5 d左右进行接种;在使用针刺果穗注射法时,在吐丝后10~15 d内接种。

在产量构成分析中,玉米FER抗性与农艺性状之间均未达到显著相关,与穗粗、穗行数和百粒重呈负相关,原因可能是在接种的时候统一注射一定的菌液或者采用双牙签,没有考虑玉米穗子的大小,穗子较大的果穗按照比例接种的孢子量较少。因此,在玉米穗腐病精准鉴定时,除了考虑接种时期和接种方法,还应该考虑穗子的大小,保证每个穗子获得同样的孢子量。

参考文献:

- [1] LOGRIECO A, BATTILANI P, LEGGIERI M C, et al. Perspectives on global mycotoxin issues and management from the MycoKey maize working group[J]. Plant Disease, 2021, 105: 525–537.
- [2] MESTERHÁZY Á, LEMMENTS M, REID L M. Breeding for resistance to ear rots caused by *Fusarium* spp. in maize— a review[J]. Plant Breeding, 2012, 131: 1–19.
- [3] 段灿星,王晓鸣,宋风景,等. 玉米抗穗腐病研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(11): 2152–2164.
DUAN C X, WANG X M, SONG F J, et al. Advances in research on maize resistance to ear rot[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(11): 2152–2164. (in Chinese)
- [4] 段灿星,崔丽娜,夏玉生,等. 玉米种质资源对拟轮枝镰孢与禾谷镰孢穗腐病的抗性精准鉴定与分析[J]. 作物学报, 2022, 48(9): 2155–2167.
DUAN C X, CUI L N, XIA Y S, et al. Precise characterization and analysis of maize germplasm resources for resistance to *Fusarium* ear rot and *Gibberella* ear rot[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(9): 2155–2167. (in Chinese)
- [5] CHUNG C, MATHER D, REID L M, et al. Comparison of techniques for inoculating maize silk, kernel, and cob tissues with *Fusarium graminearum*[J]. Plant Disease, 1996, 80: 81–84.
- [6] BUTOTO E N, MARINO T P, HOLLAND J B. Effects of artificial inoculation on trait correlations with resistance to *Fusarium* ear rot and fumonisin contamination in maize[J]. Crop Science, 2021, 61: 2522–2533.
- [7] ROSE L J, MOUTON M, BEUKES I. Multi-environment evaluation of maize inbred lines for resistance to *Fusarium* ear rot and fumonisins[J]. Plant Disease, 2016, 100: 2134–2144.
- [8] DREPPER W J, RENFRO B L. Comparison of methods for inoculation of ears and stalks of maize with *Fusarium moniliforme*[J]. Plant Disease, 1990, 74: 952–956.
- [9] SCHAAFSMA A W, MILLER J D, SAVARD M E, et al. Ear rot development and mycotoxin production in corn in relation to inoculation method, corn hybrid, and species of *Fusarium*[J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 1993, 15: 185–192.
- [10] CLEMENTS M J, ELEINSCHMIDT C E. Evaluation of inoculation techniques for *Fusarium* ear rot and fumonisin contamination of corn[J]. Plant Disease, 2003, 87: 147–153.
- [11] DONG C, WU Y, GAO J, et al. Field inoculation and classification of maize ear rot caused by *Fusarium verticillioides*[J]. Bio-protocol, 2018, 8(23): e3099.
- [12] 张小飞,邹成佳,崔丽娜,等. 西南地区玉米穗腐病病原分离鉴定及接种方法研究[J]. 西南农业学报, 2012, 25(6): 2078–2082.
ZHANG X F, ZOU C J, CUI L N, et al. Identification of Pathogen causing maize ear rot and inoculation technique in Southwest China [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(6): 2078–2082. (in Chinese)
- [13] 贾 娇,隋 晶,张 伟,等. 玉米禾谷镰孢穗腐病抗性鉴定接种方法比较[J]. 玉米科学, 2022, 30(5): 149–155.
JIA J, SUI J, ZHANG W, et al. Comparison of two inoculation methods for resistance of *Fusarium graminearum* ear rot[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(5): 149–155. (in Chinese)
- [14] MORALES L, MARINO T P, WENNDT A J, et al. Dissecting symptomatology and fumonisin contamination produced by *Fusarium verticillioides* in maize ears[J]. Phytopathology, 2018, 108: 1475–1485.
- [15] 王宝宝,郭 成,孙素丽,等. 玉米穗腐病致病禾谷镰孢复合种的遗传多样性、致病力与毒素化学型分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4777–4790.
WANG B B, GUO C, SUN S L, et al. The genetic diversity, pathogenicity, and toxigenic chemotypes of *Fusarium graminearum* species complex causing maize ear rot[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(23): 4777–4790. (in Chinese)
- [16] 席靖豪. 黄淮海夏玉米穗腐病病原多样性分析及玉米新品种抗病性鉴定[D]. 郑州:河南农业大学, 2018.
- [17] ROBERTSON-HOYT L A, JINES M P, BALINT-KURTI P J, et al. QTL mapping for *Fusarium* ear rot and fumonisin contamination resistance in two maize populations[J]. Crop Science, 2006, 46: 1734–1743.
- [18] 马秉元,李亚玲,龙书生,等. 玉米穗粒腐病接种技术及品种抗病性鉴定[J]. 植物保护学报, 1999, 26(2): 121–124.
MA B Y, LI Y L, LONG S S, et al. Inoculation technique of corn kernel or ear rot and identification of variety resistance[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 1999, 26(2): 121–124. (in Chinese)
- [19] 孙 华,石 洁,马红霞,等. 部分玉米骨干种质对木霉穗腐病抗性及其产量性状分析[J]. 玉米科学, 2022, 30(6): 179–184.
SUN H, SHI J, MA H X, et al. Analysis of resistance to trichoderma ear rot and yield traits of some maize core germplasms[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(6): 179–184. (in Chinese)
- [20] 段灿星,朱振东,武小菲,等. 玉米种质资源对六种重要病虫害的抗性鉴定与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(2): 169–174.
DUAN C X, ZHU Z D, WU X F, et al. Screening and evaluation of

- maize germplasm for resistance to five diseases and Asian corn borer[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(2): 169–174. (in Chinese)
- [21] 李亚玲, 马秉元, 李多川, 等. 玉米穗粒腐病接种技术及品种抗病性鉴定研究[J]. 西北农业大学学报, 1994(1): 124–127.
- LI Y L, MA B Y, LI D C, et al. Inoculating technique of corn ear-rot and identifying resistance varieties[J]. Journal of Northwest A & F University, 1994(1): 124–127. (in Chinese)
- [22] BUSH B J, CARSON M L, CUBETA M A, et al. Infection and fumonisin production by *Fusarium verticillioides* in developing maize kernels[J]. Phytopathology, 2004, 94(1): 88–93.
- [23] 文成敬, 陈晓娟, 陈文瑞. 玉米镰刀菌性穗腐及其抗病性测定方法[J]. 四川农业大学学报, 2002(4): 321–323.
- WEN C J, CHEN X J, CHEN W R. *Fusarium* ear rots of corn and methods used in resistance test [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2002(4): 321–323. (in Chinese)
- [24] GULYA T J, MARTINSON C A, LOESCH P J. Evaluation of inoculation techniques and rating dates for *Fusarium* ear rot of opaque-2 maize[J]. Phytopathology, 1980, 70: 1116–1118.
- [25] HEADRICK J M, PATAKY J K. Resistance to kernel infection by *Fusarium moniliforme* in inbred lines of sweet corn and the effect of infection on emergence[J]. Plant Disease, 1989, 73: 887–892.
- [26] HEADRICK J M, PATAKY J K. Maternal influence on the resistance of sweet corn lines to kernel infection by *Fusarium moniliforme*[J]. Phytopathology, 1991, 81: 268–274.
- [27] 陈晓娟, 文成敬. 四川省玉米穗腐病研究初报[J]. 西南农业大学学报, 2002, 21(1): 21–23, 25.
- CHEN X J, WEN C J. Preliminary study of maize ear rot in Sichuan [J]. Journal of Northwest A & F University, 2002, 21(1): 21–23, 25. (in Chinese)
- [28] 姚瑞丽. 玉米穗腐病原鉴定、产毒条件及田间防控研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2015.
- [29] ZILA C T, SAMAYOA L F, SANTIAGO R, et al. A genome-wide association study reveals genes associated with *Fusarium* ear rot resistance in a maize core diversity panel[J]. G3-Genes Genomes Genetics, 2013, 3: 2095–2104.
- [30] GUO Z, WANG S, LI W X et al. QTL mapping and genomic selection for *Fusarium* ear rot resistance using two F_{23} populations in maize[J]. Euphytica, 2022, 218: 131.
- [31] WEN J, SHEN Y, XING Y, et al. QTL mapping of *Fusarium* ear rot resistance in maize[J]. Plant Disease, 2021, 105: 558–565.
- [32] GUO Z, ZOU C, LIU X, et al. Complex genetics system involved in *Fusarium* ear rot resistance in maize as revealed by GWAS, bulked sample analysis, and genomic prediction[J]. Plant Disease, 2020, 104: 1725–1735.
- [33] LI H H, HEARNE S, BÄNZIGER M, et al. Statistical properties of QTL linkage mapping in biparental genetic populations[J]. Heredity, 2010, 1505(3): 257–267.
- [34] MA P, LI H, LIU E, et al. Evaluation and identification of resistance lines and QTLs of maize to seedborne *Fusarium verticillioides* [J]. Plant Disease, 2022, 106: 2066–2073.
- [35] LIU C, KONG M, ZHU J, et al. Engineering null mutants in Zm-FER1 confers resistance to ear rot caused by *Fusarium verticillioides* in maize[J]. Plant Biotechnology Journal, 2022, 20: 2045–2047.
- [36] 王丽娟, 徐秀德, 刘志恒, 等. 玉米抗镰刀菌穗腐病接种方法及抗病资源筛选研究[J]. 植物遗传资源学报, 2007, 8(2): 145–148.
- WANG L J, XU X D, LIU Z H, et al. Inoculation technique and screening maize germplasm resistance to *Fusarium* ear rot[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2007, 8(2): 145–148. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)

(上接第106页)

- [26] 王丽娟, 刘可杰, 刘丽云, 等. 外引玉米种质资源对丝黑穗病抗性鉴定与评价[J]. 辽宁农业科学, 2016(5): 17–19.
- WANG L J, LIU K J, LIU L Y, et al. Identification and evaluation of maize germplasms resistance to head smut in maize[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2016(5): 17–19. (in Chinese)
- [27] 孟 剑, 裴二芹, 宋艳春, 等. 引进美国 GEM 材料的抗玉米青枯病和丝黑穗病种质资源筛选鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(5): 1098–1102.
- MENG J, PEI E Q, SONG Y C, et al. Resistant identification of stalk rot and head smut for introduced U. S. GEM germplasm in maize[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(5): 1098–1102. (in Chinese)
- [28] 马宝新. 引进美国玉米自交系材料的丝黑穗病抗性种质资源鉴定[J]. 黑龙江农业科学, 2017(1): 9–11.
- MA B X. Resistant identification of *Sporisorium reilianum* for maize germplasm introduced from USA[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2017(1): 9–11. (in Chinese)
- [29] 王春明, 郭 成, 周天旺, 等. 629 份国内外玉米种质及杂交种对丝黑穗病的抗性评价[J]. 草地学报, 2019, 27(4): 1075–1082.
- WANG C M, GUO C, ZHOU T W, et al. Evaluation on resistance to head smut of 629 maize germplasm resistance and hybrids from domestic and overseas[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(4): 1075–1082. (in Chinese)
- [30] 张小杰, 曲洁琼, 周天旺, 等. 337 份外引种质对玉米丝黑穗病的抗性评价[J]. 西北农业学报, 2021, 30(6): 901–906.
- ZHANG X J, QU J Q, ZHOU T W, et al. Resistance of 337 introduced germplasms to head smut in maize and its evaluation[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021, 30(6): 901–906. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)