令利军,范阳楷,李瑶,等.玉米镰孢茎腐病致病机制及其防治的研究进展[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(5):3-10.
Ling L J, Fan Y K, Li Y, et al. Research progress on the pathogenic mechanism and control of fusarium stalk rot in maize[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(5):3-10.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202401061

玉米镰孢茎腐病致病机制及其防治的研究进展

令利军,范阳楷,李瑶,蒋宜娟,孔繁锦

(西北师范大学 生命科学学院,甘肃 兰州,730000)

摘　要:玉米作为主要的农作物,它的生产对保障粮食安全具有重要意义,而茎腐病多年来都是严重威胁世界玉米安全生产的主要病害。本文将针对玉米镰孢茎腐病侵染机制和致病机制进行总结,进一步阐述玉米致病后的抗性遗传机制和免疫机制,同时,结合近年来国内外的相关研究进展概述玉米镰孢茎腐病的科学防治措施,旨在为玉米镰孢茎腐病的有关研究提供参考思路。

关键词:玉米; 茎腐病; 发病机理; 防治
中图分类号:S435.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)05-0003-08

玉米(*Zea mays L.*)是世界上种植面积最大、产量最高的粮食作物,作为一种重要的饲料原料,玉米在保障全球粮食供应方面发挥着至关重要的作用[1-2]。根据联合国粮农组织(FAO)的报告,中国已成为全球第二大玉米生产大国,到2022年,全国玉米产量为27 720.3万吨,占中国谷类作物产量的43%,占全球玉米产量的22.5%[3-4]。随之产生的玉米秸秆产量也超过了20亿吨[5-6]。我国实施秸秆还田政策以处置玉米秸秆,但有研究发现,在实施秸秆还田政策的地区,土壤中病原菌的数量明显增加,与未还田地区相比,玉米茎腐病的发生率也显著升高[7]。

玉米茎腐病(Maize stalk rot),也叫玉米茎基腐病、玉米青枯病,是一种严重危害玉米生产的土传病害,全球均有分布,在中国玉米生产中尤其广泛[8-9]。茎腐病会引起灌浆受损、早衰和倒伏,从而限制穗的生产和收获,进而导致产量损失,致使我国玉米大幅减产[10-11]。通过对感染茎腐病的玉米组织进行检验,发现镰孢菌属的检出率为92.98%,其中禾谷镰孢菌和拟轮枝镰孢菌是引起我国大多数地区镰孢茎腐病的主要病原菌[12]。禾谷镰孢菌(*Fusarium graminearum*)为我国部分东北和中原地区玉米茎腐病的主要致病菌,而黄淮海夏玉米主产区茎腐病的主要病原菌是拟轮枝镰孢(*Fusarium verticillioides*)[13-14]。

目前有关玉米茎腐病的研究已有不少。郭成等[15]就我国玉米茎腐病的发生与危害、病原菌种类、抗性种质资源筛选、抗性遗传及抗性基因的挖掘与作图等进行了阐述,但对其侵染途径、抗病育种和分子调控机制方面描述不够完善。虽然韩佩玲等[16]从玉米茎腐病的病原菌种类与优势致病菌、侵染过程、致病力、致病机理、生物学特性以及玉米抗病性鉴定等方面完整叙述了国内玉米茎基腐病研究进展,但仍缺少抗性遗传、抗病育种和分子调控机制方面的阐述。因此,本文将针对玉米镰孢茎腐病侵染机制和致病机制进行总结,进一步阐述玉米致病后的抗性遗传机制和免疫机制,同时,结合近年来国内外的相关研究进展概述玉米镰孢茎腐病的科学防治措施,旨在为玉米镰孢茎腐病的有关研究提供参考思路。

1　镰孢菌对玉米茎腐病的侵染过程和致病机制

玉米茎腐病是一种重要的土传病害,其病原

收稿日期:2024-01-24　　**修回日期**:2024-04-07
基金项目:甘肃省科技计划项目(22CX8GA136)
作者简介:令利军(ORCID:0000-0002-8375-9076),副教授,博士,研究方向:微生物与植物互作,E-mail:13919343210@163.com

菌以卵孢子状存在于土壤中,作为次年病害的初侵染源[17]。如图1所示,病原菌还可以通过种子传播,存在于土壤中的病原菌侵染幼苗并导致根腐病,这种病菌会在植株体内向上蔓延,从根部向上部蔓延,进而引起后期茎腐病的发生[18]。玉米茎腐病主要危害的是玉米根系和茎基部1~3节,根系发病始于玉米灌浆期,发病高峰期为乳熟后期至蜡熟期[4]。

1.1 侵染过程

玉米茎腐病的病原菌在土壤或植株残体中越冬,产生子囊壳,次年的3月中旬以后,释放出子囊孢子,孢子先发芽,然后长出芽管,再分化为附生孢,形成侵染物,穿过角质层以及表皮细胞壁[19]。侵染菌丝分枝形成次生菌丝,并将其散布到宿主组织的细胞[20]。在温度等适宜时,子囊孢子在气流的作用下进行传播,造成初侵染,初侵染源有带菌的种子、田间病残体及含致病菌的土壤,病原菌侵入途径分为孔口、伤口和机械损伤,通过入侵根系使其腐烂(图1A)[4,21]。在灌浆期以前,病原菌只能侵染植株的根系,之后才能侵入植株的茎部组织直至乳熟期侵入到第三茎节。其中,禾谷镰孢菌侵染的主要是胚根[22]。

此外,分生孢子和菌丝还能通过风雨、昆虫和机械等途径传播,在湿热的环境中造成再次侵染(如图1A)[23]。病原菌通过再感染,直接侵入地下茎、中化轴及根部,从而导致根系的腐烂,随后病原菌会向着玉米的茎部继续侵染,在玉米茎部的第一节产生病斑,会使得玉米的茎部变软,从而导致玉米茎腐病[24-25]。玉米患茎腐病在田间会表现出叶子枯黄产生病斑随后会萎蔫枯死,根部和茎基部呈现水状的软腐[26]。

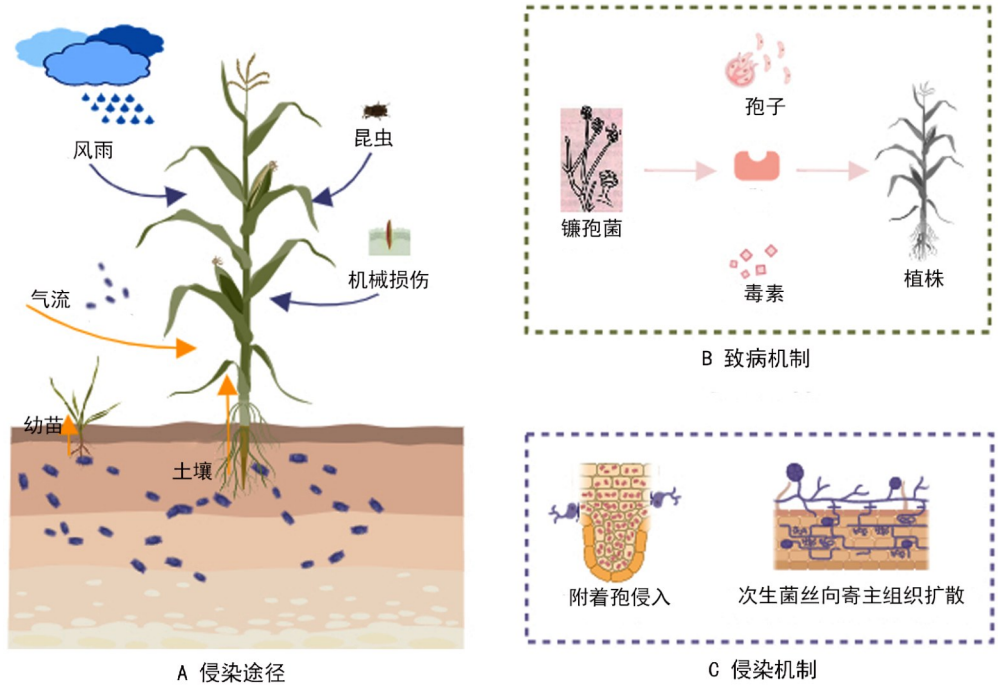
1.2 致病机制

病原菌导致玉米茎腐病患病的原因主要是以下三个方面:首先,病原菌能产生一系列细胞壁降解酶对玉米胚根和维管束产生影响。该酶能明显浸解胚根组织,使玉米胚根组织细胞质壁分离,并造成原生质外流[4,21]。但当宿主细胞壁被分解时,会形成大量的细胞壁碎屑和微纤丝,堵塞宿主维管束纹孔膜,导致植物枯萎[27]。其次,病原菌还能产生毒素。毒素在病原菌降解胚根细胞壁的初期有重要的作用,例如禾谷镰孢菌产生的玉米赤霉烯酮和脱氧雪腐镰刀菌烯醇以及拟轮枝镰孢菌产生的伏马菌素都能促进酶分解纤维素,使病菌更容易侵入植物(图1B)[28-29]。最终,病菌的孢子会快速发芽,形成菌丝,沿着根系表面扩散,然后穿过根系,进入表皮细胞、皮层甚至是寄主的维管组织,它可使寄主维管束的纹孔膜堵塞而导致萎焉症状(图1C)[30]。

2 玉米茎腐病抗性基因定位研究

不同的玉米品种具有不同的玉米茎腐病抗性位点[27]。研究发现,玉米茎腐病抗性可受一对或多对主效抗病基因控制,表现为多位点的加性效应和显性效应,呈数量性状遗传[31-32]。杨典洱等[20]用茎腐病的单一致病菌禾谷镰孢菌对玉米1145与Y331组合的F2群体进行分析鉴定,在第4染色体上找到了对禾谷镰孢菌引起茎腐病的玉米抗性基因。Pè等[33]对由抗病材料'B89'和感病材料'33-16'组配构建的150份F2:3家系进行抗性评估,最终在1、3、4、5、10号染色体上定位了5个玉米禾谷镰孢茎腐病抗性QTL(LOD值为4.0)。Jung等[34]以DE811ASR×DE811和DE811ASR×LH132杂交构建的2个分离群体,在4号染色体上定位到1个主效抗炭疽菌茎腐病QTL。Yang等[35,36]利用1145与Y331交配,在6号染色体上定位1个抗赤霉菌茎腐病QTL-*Rfg1*。Yang等[37]利用相同的玉米自交系构建回交群体,在10号染色体与1号染色体上定位到2个抗赤霉菌茎腐病QTL(*qRfg1*)与(*qRfg2*),其抗性增效基因均来自于抗病亲本1145。Song等[38]利用Qi319×Ye107构建的群体,在1号和10号染色体上分别定位到抗腐霉菌茎腐病QTL。Ma等[39]利用高抗自交系H127R与感病自交系昌7-2构建的群体,在3号染色体上定位到1个主效抗赤霉菌茎腐病QTL-*qRfg3*。Ye等[40]通过图位克隆方法获得了1个抗病QTL基因*ZmAuxRP1*,当病原菌侵染时,*ZmAuxRP1*对病原体的侵入做出快速反应,可在短期内迅速降低和抑制根系生长,从而提高对病原菌的抗病性。

综上并结合表1,可发现同一种材料,对不同的病原菌,或对不同的材料,其抗性部位都不一样,但也可以在同一位置定位到对不同病原菌的抗性位点,其中在玉米1号、3号、4号、6号、10号染色体上定位到多个茎腐病抗性QTL,说明在这些染色体可能存在多抗位点[41]。



A:病原菌的侵染途径,其中橙色箭头表示初侵染,灰色箭头表示再次侵染;B病原菌的致病机制;C病原菌的侵染机制

A: the infection path of the pathogen, where the orange arrow represents the primary infection, the gray arrow represents the secondary infection; B: the pathogenic mechanism of the pathogen; C: the infection mechanism of the pathogen

图 1　玉米茎腐病的侵染过程和致病机制

Fig.1　Infection process and pathogenic mechanism of maize stalk rot

表 1　玉米茎腐病抗性相关基因及位置

Table 1　Stalk rot resistance related genes and locations in maize

致病菌 Pathogens	实验材料 Materials	染色体 Chromosome	抗性基因 Resistance genes	文献来源 Reference
Fusarium graminearum	1145×Y331	chr. 4		[20]
Fusarium graminearum	B89×33−16	chr. 1、3、4、5、10		[33]
Colletotrichum graminicola	DE811ASR×DE811和DE811ASR×LH132	chr. 4		[34]
Fusarium graminearum	1145×Y331	chr. 6	*Rfg1*	[35, 36]
Fusarium graminearum	1145×Y331	chr. 1、10	*qRfg 1*、*qRfg2*	[37]
Pythium aphanidermatum	Qi319×Ye107	chr. 1、10		[38]
Fusarium graminearum	H127R×RIL	chr. 3	*qRfg3*	[39]
Fusarium graminearum			*ZmAuxRP1*	[40]

3　玉米抗茎腐病的免疫机制研究

自然界中,多种病原微生物对植物造成了严重的伤害[42]。由病原真菌引起的作物病害已成为一个全球性的问题,对农作物的生产与食品安全造成了极大的威胁[43]。在长期的协同演化中,病原细菌形成了复杂的致病机理,而植物也形成了一套完善的防卫机制[44]。因此,研究玉米对病害的抗性机理对于防治玉米茎腐病害至关重要[45-46]。在主要的致病菌中,禾谷镰孢菌和轮枝镰孢菌是茎腐病原中致病力最强的2类镰孢菌[47]。

镰孢菌侵入玉米组织内部时,玉米首先通过细胞壁进行防御,当病原菌入侵时,玉米细胞会形成大量的胞间和胞内包涵体,并在侵入部位形成大量非晶质或纤维质组成的浆网包绕住侵入的菌丝,抑制其生长[20, 48-50]。

玉米对镰孢菌侵染的防御反应除了通过细胞壁反应,还涉及多种免疫相关途径的蛋白诱导[51]。例如,玉米会分泌蛋白*ZmWAK17ET*,过表达*Zm-*

*WAK17*的转基因玉米显示出对禾谷镰孢菌的抗性增加[52]。主要调控玉米对禾谷镰孢菌感染的抗性机制是丝裂原激活蛋白激酶信号通路和过氧化物酶体通路[53]。在拟轮枝镰孢菌与玉米的相互作用中,玉米也通过分泌抗病相关蛋白来抵御拟轮枝镰孢菌的侵染[54]。

4 玉米茎腐病的防治

玉米茎腐病通常是前期侵染后期发病,而一个地区的气候条件、主推品种及大田管理措施等均与茎腐病的发生流行密切相关[55]。因此,对于茎腐病的防治措施主要包括抗性品种的利用、良好的田间管理措施并辅以生化药剂防控等[56]。玉米茎腐病的防治可分为生物防治和非生物防治2类,生物防治因其环境友好性备受人们关注,受到国内外的广泛研究,非生物防治则包括推广和种植抗病品种,化学药剂防治和农业防治[57]。

4.1 生物防治

生物防治是利用一种或一类生物来防治另一种生物的方法,主要利用2个方面,即生物物种间相互制约关系和生物体本身的功能[58]。生物防治技术由于具有资源丰富、绿色环保、对环境及人畜无害的特点,对病原菌具有较强的抑菌能力,并且不会使病原菌产生耐药性,因此具有广阔的应用前景[4,59]。

玉米茎腐病的生物防治主要通过生防菌进行防治[19]。生防菌通过营养和空间竞争以及产生抗菌物质等机制抑制病原菌的生长[60]。

生防菌包括生防真菌和生防细菌。对玉米茎腐病菌抑制作用较好的生防真菌为木霉菌,将木霉单独或混合进行拌种可有效控制茎腐病的发生[61-62]。木霉菌能在土壤及玉米根系中定殖,丰富了土壤微生物群落,降低了病原菌镰孢菌的数量,实现了对玉米全生育期的可持续防治,同时还能促进玉米的生长发育[6,63]。目前,对玉米茎腐病具有良好的抑菌效果的生防菌是芽孢杆菌,其分泌的脂肽类成分可破坏病原菌的细胞膜及细胞壁完整性,引起菌体变形、顶端囊泡化、细胞膜通透性增加、胞质泄漏,进而影响病原菌的生长、产孢及孢子萌发,使用芽孢杆菌包衣种子可有效防控玉米茎腐病[13,64]。

4.2 非生物防治

4.2.1 玉米对茎腐病的抗病育种

选育和引种优良的抗病品种,是防治玉米茎腐病的经济有效措施[65]。抗性品种往往具有叶面积较大,低茎节密度偏高,茎秆较硬,根系拔力较大,髓组织密度较大以及植株干物质积累多等特点[41]。

目前,对玉米茎腐病的抗病育种的选育大多数采用自交和回交转育方法,并结合分子标记辅助选择技术促进选育。王富荣等[66]通过对1550份玉米材料进行自然侵染及土传病害的检测,发现各品种对该病害的抗性有显著差异,并已获得76个优异的抗性材料。王振华[67]在前期研究基础上,根据玉米抗茎腐病机理,提出对部分病原具有品质特性的玉米材料,可将该材料与优异抗源进行回交,或者通过交替自交或回交等方式以提高抗病性。苏俊等[68]研究表明,杂种F1代对茎腐病的抗性指数总体上比亲本高,但杂种F1的抗性倾向于母系。丰光等[69]研究发现,利用回交技术,对少数主基因控制的数量性状进行改良,选择高抗茎腐病材料作为抗病基因供体的非轮回亲本,有很大概率选育出目标抗性材料。黎东亮等[70]通过对黄淮海5个主要玉米品种(浚单0898,浚单20,郑单958,鲁单9814,先玉335)进行了茎基腐病抗性鉴定,其中浚单0898表现出良好抗性。余辉等[71]通过回交转育方法,结合分子标记辅助选择技术,选育出了一批单抗茎腐病的京24抗病改良材料。

4.2.2 玉米茎腐病化学药剂防治

化学杀菌剂对玉米茎腐病具有较好的防治效果。玉米茎腐病的化学防治通常采用种衣剂拌种或者喷雾的方式[19]。喷洒农药防治病虫害有2个时期,一是播种前,二是生长中后期[72]。播前用先正达生产的瑞胜(70%噻嗪酮)和满适金(2.5%咯菌腈+1%精甲霜灵)等杀虫杀菌种衣剂进行种子包衣,对玉米茎腐病有一定预防效果[73]。生长中后期在田间使用6%寡糖·链蛋白可湿性粉剂、0.62%聚β-羟基丁酸盐,对玉米的防治和产量方面均有较好的效果[74]。

4.2.3 玉米茎腐病农业防治措施

适时播种,合适的种植密度以及合理灌溉,并及时清理田间杂草、秸秆及覆盖物等措施可打破禾谷镰孢菌和拟轮枝镰孢菌在土中的寄生环境使

其无法存活,有效减轻玉米茎腐病的发生[41,75]。连作会导致土壤中的细菌数量逐年增长5~10倍,因此采用轮作的方式可有效降低玉米茎腐病发病率[76]。通过与非禾本科、蔬菜等作物的轮作,降低土壤中的病原菌含量,可以有效地防治该病,降低其发生几率[77]。此外,合理施肥并适当的增加钾肥的施用量,也可减少茎腐病的发生,实现玉米增产增收[78]。

5　展望

目前,对于禾谷镰孢菌与拟轮枝镰孢菌引起的玉米茎腐病相关研究已经从侵染过程、致病机理、抗性基因定位和防控治理等多个方面进行,但对禾谷镰孢菌和拟轮枝镰孢菌与寄主玉米之间分子互作的机制尚缺乏深入研究。因此,今后或许可对分子机制展开研究,如对玉米茎腐病的功能基因的研究,其本身的某些抗性基因功能以及涉及到的代谢途径,还可利用已发掘的抗性基因,通过转基因等手段培育抗性品系,为培育抗性新品种提供理论依据和实践指导。

参　考　文　献

[1]Gwirtz J A, Garcia-Casal M N. Processing maize flour and corn meal food products[J]. Ann N Y Acad Sci, 2014,1312(1):66-75.

[2]Wang Y, Tang Q, Kang Y, et al. Analysis of the Utilization and Prospects of CRISPR-Cas Technology in the Annotation of Gene Function and Creation New Germplasm in Maize Based on Patent Data[J]. Cells, 2022,11(21).

[3]齐驰名. 2022年以来国内外玉米市场回顾与2023下半年展望[J]. 中国国情国力, 2023(6):76-79.
Qi C M. Review of domestic and international corn markets since 2022 and outlook for the second half of 2023[J]. China′s National Condition and Strength, 2023(6):76-79.

[4]刘芳婷. 玉米茎腐病生防菌株筛选及应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
Liu F T. Screening and application of biocontrol strains of corn stem rot [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023.

[5]王宝宝, 夏玉生, 王绍新, 等. 玉米茎腐病研究领域可视化分析[J]. 安徽农业科学, 2022,50(19):217-222.
Wang B B, Xia Y S, Wang S X, et al. Visualization and analysis of maize stem rot research areas[J]. Anhui Agricultural Science, 2022,50(19):217-222.

[6]Xu J, Wang X, Zhu H, et al. Maize genotypes with different zinc efficiency in response to low zinc stress and heterogeneous zinc supply[J]. Front Plant Sci, 2021,12:736658.

[7]董怀玉, 董智, 刘可杰, 等. 不同秸秆还田模式对玉米主要病害发生为害的影响[J]. 作物杂志, 2020(06):104-108.
Dong H Y, Dong Z, Liu K J, et al. Effects of different straw return modes on the occurrence and damage of major corn diseases[J]. Journal of Crops, 2020(06):104-108.

[8]樊伟民. 玉米茎腐病的研究现状及防治策略[J]. 黑龙江农业科学, 2022(03):76-80.
Fan W M. Research status and control strategy of corn stem rot [J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2022(03):76-80.

[9]Varela C P, Casal O A, Padin M C, et al. First report of *Fusarium temperatum* causing seedling blight and stalk rot on maize in spain[J]. Plant Dis, 2013,97(9):1252.

[10]吴沁. 解淀粉芽孢杆菌OR2-30对禾谷镰孢菌的抑菌机理研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
Wu Q. Inhibition mechanism of *Fusarium graminearum* by *Bacillus amyloliquefaciens* OR2-30 [D]. Heifei: Anhui Agricultural University, 2023.

[11]Quesada-Ocampo L M, Al-Haddad J, Scruggs A C, et al. Susceptibility of maize to stalk rot caused by *Fusarium graminearum* Deoxynivalenol and Zearalenone Mutants [J]. Phytopathology, 2016,106(8):920-927.

[12]贺安乐. 木霉菌诱导玉米抗镰孢菌病害机理[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
He A L. Mechanism of *Fusarium oxysporum*-induced resistance to *Fusarium oxysporum* disease in maize [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

[13]杨冰娟, 陶睿泽, 林丽, 等. 芽孢杆菌抑制玉米茎腐病菌禾谷镰孢菌和拟轮枝镰孢菌的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023,51(12):42-49.
Yang B J, Tao R Z, Lin L, et al. Inhibition of *Fusarium graminearum* and *Fusarium verticillioides* by Bacillus sp. on corn stem rot[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2023,51(12):42-49.

[14]刘树森, 马红霞, 郭宁, 等. 黄淮海夏玉米主产区茎腐病主要病原菌及优势种分析[J]. 中国农业科学, 2019,52(2):262-272.
Liu S S, Ma H X, Guo N, et al. Analysis of major pathogenic bacteria and dominant species of stem rot in the main production areas of summer maize in the Yellow and Huaihai Seas[J]. Chinese Agricultural Science, 2019,52(2):262-272.

[15]郭成, 王宝宝, 杨洋, 等. 玉米茎腐病研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2019,20(5):1118-1128.
Guo C, Wang B B, Yang Y, et al. Progress of research on corn stem rot[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019,20(5):1118-1128.

[16]韩佩珀, 陈晓露, 李东育, 等. 玉米茎基腐病研究进展[J]. 现代农业科技, 2023(12):103-108.
Han P Y, Chen X L, Li D Y, et al. Progress of corn stem rot [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(12):103-108.

[17]谢富欣, 黄秋平, 赵花周, 等. 我国玉米茎基腐病研究进展[J]. 陕西农业科学, 2005(3):93-94.
Xie F X, Huang Q P, Zhao H Z, et al. Progress of maize stem rot in China[J]. Shaanxi Agricultural Science, 2005(3):93-94.

[18]邹庆道，陈捷，张子君．玉米镰孢菌穗、茎腐病侵染循环的相互关系[J]．植物保护学报，2003(4)：435-436.
Zou Q D，Chen J，Zhang Z J. Interrelationships between the infestation cycles of *Fusarium oxysporum* and *Fusarium oxysporum* stem rot of maize[J]. Journal of Plant Protection，2003(4)：435-436.

[19]王志伟．玉米茎腐病和纹枯病的有效防治药剂筛选及田间防治试验[D]．泰安：山东农业大学，2020.
Wang Z W. Screening of effective control agents for corn stem rot and blight and field control trials [D]. Taian：Shandong Agricultural University，2020.

[20]杨典洱，王岳光，陈翠霞，等．玉米茎基腐研究进展[J]．玉米科学，2002(1)：88-90.
Yang D E，Wang Y G，Chen C X，et al. Progress on corn stem rot[J]. Corn Science，2002(1)：88-90.

[21]陈捷，高洪敏，纪明山，等．玉米茎腐病菌产生的细胞壁降解酶的致病作用[J]．植物病理学报，1998(3)：30-35.
Chen J，Gao H M，Ji M S，et al. Pathogenicity of cell wall-degrading enzymes produced by corn stem rot fungi[J]. Journal of Plant Pathology，1998(3)：30-35.

[22]晋齐鸣，潘顺法，姜晶春，等．玉米茎腐病病原菌致病性及侵染规律的研究[J]．玉米科学，1995(2)：74-78.
Jin Q M，Pan S F，Jiang J C，et al. Studies on the pathogenicity and infestation pattern of corn stem rot[J]. Corn Science，1995(2)：74-78.

[23]时家伟．ZmPrx5在玉米茎腐病抗性中的功能及初步机制研究[D]．郑州：河南农业大学，2023.
Shi J W. Functions and preliminary mechanisms of ZmPrx5 in maize stem rot resistance [D]. Zhengzhou：Henan Agricultural University，2023.

[24]贾曦．玉米茎腐病综合防治技术研究[D]．泰安：山东农业大学，2017.
Jia X. Research on comprehensive control technology of corn stem rot [D]. Taian：Shandong Agricultural University，2017.

[25]吴海燕，孙淑荣，范作伟，等．玉米茎腐病研究现状与防治对策[J]．玉米科学，2007(4)：129-132.
Wu H Y，Sun S R，Fan Z W，et al. Current status of corn stem rot research and control measures[J]. Corn Science，2007(4)：129-132.

[26]何奇瑾，周广胜．我国玉米种植区分布的气候适宜性[J]．科学通报，2012，57(4)：267-275.
He Q J，Zhou G S. Climatic suitability of maize growing areas in China[J]. Science Bulletin，2012，57(4)：267-275.

[27]程玉静，陈国清，薛林，等．玉米茎腐病研究进展[J]．安徽农业科学，2013，41(20)：8557-8559.
Chen Y J，Chen G Q，Xue L，et al. Progress of corn stem rot [J]. Anhui Agricultural Science，2013，41(20)：8557-8559.

[28]Li L，Qu Q，Cao Z，et al. The relationship analysis on corn stalk rot and ear rot according to Fusarium Species and Fumonisin Contamination in Kernels [J]. Toxins (Basel)，2019，11(6).

[29]Arce-Lopez B，Lizarraga E，Vettorazzi A，et al. Human biomonitoring of mycotoxins in blood，plasma and serum in recent years：a review[J]. Toxins (Basel)，2020，12(3).

[30]张凤丽．玉米茎腐病研究进展[J]．河南农业，2016(13)：37-39.
Zhang F L. Research progress on corn stem rot [J]. Henan Agriculture，2016(13)：37-39.

[31]Chen Q，Song J，Du W P，et al. Identification，mapping，and molecular marker development for Rgsr8.1：a new quantitative trait locus conferring resistance to gibberella stalk rot in maize (*Zea mays* L.)[J]. Front Plant Sci，2017，8：1355.

[32]Lal S，Singh I S. Breeding for resistance to downy mildews and stalk rots in maize[J]. Theor Appl Genet，1984，69(2)：111-119.

[33]Pe M E，Gianfranceschi L，Taramino G，et al. Mapping quantitative trait loci (QTLs) for resistance to Gibberella zeae infection in maize[J]. Mol Gen Genet，1993，241(1-2)：11-16.

[34]Jung M，Weldekidan T，Schaff D，et al. Generation-means analysis and quantitative trait locus mapping of anthracnose stalk rot genes in maize[J]. Theor Appl Genet，1994，89(4)：413-418.

[35]Yang D E，Jin D M，Wang B，et al. Characterization and mapping of *Rpi1*，a gene that confers dominant resistance to stalk rot in maize[J]. Mol Genet Genomics，2005，274(3)：229-234.

[36]Yang D E，Zhang C L，Zhang D S，et al. Genetic analysis and molecular mapping of maize (*Zea mays* L.) stalk rot resistant gene *Rfg1*[J]. Theor Appl Genet，2004，108(4)：706-711.

[37]Yang Q，Yin G，Guo Y，et al. A major QTL for resistance to Gibberella stalk rot in maize[J]. Theor Appl Genet，2010，121(4)：673-687.

[38]Song F J，Xiao M G，Duan C X，et al. Two genes conferring resistance to Pythium stalk rot in maize inbred line Qi319[J]. Mol Genet Genomics，2015，290(4)：1543-1549.

[39]Ma C，Ma X，Yao L，et al. qRfg3，a novel quantitative resistance locus against Gibberella stalk rot in maize[J]. Theor Appl Genet，2017，130(8)：1723-1734.

[40]Ye J，Zhong T，Zhang D，et al. The auxin-regulated protein ZmAuxRP1 coordinates the balance between root growth and stalk rot disease resistance in maize[J]. Mol Plant，2019，12(3)：360-373.

[41]杨校文．玉米禾谷镰孢穗腐病和茎腐病抗性遗传解析及应用[D]．杨凌：西北农林科技大学，2023.
Yang X W. Genetic analysis and application of resistance to Fusarium spike rot and stem rot in maize [D]. Yangling：Northwest Agriculture and Forestry University，2023.

[42]Liu C，Wang Y，Wang Y，et al. Glycine-serine-rich effector PstGSRE4 in *Puccinia striiformis* f. sp. tritici inhibits the activity of copper zinc superoxide dismutase to modulate immunity in wheat[J]. PLoS Pathog，2022，18(7)：e1010702.

[43]Vasudevan K，Vera C C，Gruissem W，et al. Large scale germplasm screening for identification of novel rice blast resistance sources[J]. Front Plant Sci，2014，5：505.

[44]Geng X，Gao Z，Zhao L，et al. Comparative transcriptome analysis of resistant and susceptible wheat in response to

Rhizoctonia cerealis[J]. BMC Plant Biol, 2022,22(1):235.

[45]杨宇晨. 一个跨膜小肽诱导植物免疫应答的功能及机制研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2023.
Yang Y C. Functional and mechanistic study of a transmembrane small peptide inducing immune response in plants[D].Shanghai: Shanghai Normal University, 2023.

[46]郝群群. 大麦水杨酸合成途径及其应答赤霉菌侵染的机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
Hao Q Q. Research on the synthesis pathway of barley salicylic acid and its mechanism in response to the infestation of Aspergillus erythropolis [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019.

[47]王石. 茉莉酸/乙烯途径参与调控玉米茎腐病/粒腐病抗性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
Wang Shi. Involvement of jasmonic acid/ethylene pathway in the regulation of maize stem rot/grain rot resistance [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.

[48]Jansen C, von Wettstein D, Schafer W, et al. Infection patterns in barley and wheat spikes inoculated with wild-type and trichodiene synthase gene disrupted Fusarium graminearum [J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2005,102(46):16892-16897.

[49]张永红, 叶华智. 小麦品种抗赤霉病的组织学研究[J]. 四川农业大学学报, 1993(3):444-450.
Zhang Y H, Ye H Z. Histological studies on the resistance of wheat varieties to downy mildew [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 1993(3):444-450.

[50]Huckelhoven R. Cell wall-associated mechanisms of disease resistance and susceptibility[J]. Annu Rev Phytopathol, 2007, 45:101-127.

[51]Bai H, Si H, Zang J, et al. Comparative proteomic analysis of the defense response to Gibberella stalk rot in maize and reveals that ZmWRKY83 is involved in plant disease resistance [J]. Front Plant Sci, 2021,12:694973.

[52]Zuo N, Bai W Z, Wei W Q, et al. Fungal CFEM effectors negatively regulate a maize wall-associated kinase by interacting with its alternatively spliced variant to dampen resistance[J]. Cell Rep, 2022,41(13):111877.

[53]Zhang X, Yu M, Zheng S, et al. Evaluation of resistance resources and analysis of resistance mechanism of maize to stalk rot caused by *Fusarium graminearum* [J]. Plant Dis, 2023.

[54]Haseeb Hafiz Abdul. 影响玉米-拟轮枝镰孢菌互作的环境因子以及两者互作中质外体蛋白的分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
Haseeb Hafiz Abdul. Environmental factors affecting maize-Fusarium verticillioides interactions and analysis of ectoplasmic proteins in the two interactions[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.

[55]黄子豪. 玉米抗茎腐病种质资源评价及血缘关系分析[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2022.
Huang Z H. Evaluation of maize germplasm resources for stem rot resistance and analysis of pedigree relationship[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2022.

[56]杨洋. 玉米种质抗腐霉茎腐病鉴定及抗病基因挖掘[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
Yang Y. Identification of maize germplasm resistant to Phytophthora stem rot and mining of resistance genes [D]. Chongqin: Southwest University, 2020.

[57]陈斌, 韩海亮, 侯俊峰, 等. 玉米细菌性茎腐病研究进展[J]. 中国植保导刊, 2021,41(8):25-29.
Chen B, Han H L, Hou J F, et al. Progress in the study of bacterial stem rot of corn [J]. Chinese Journal of Plant Protection, 2021,41(8):25-29.

[58]王旭萍, 刘强. 中国植物入侵防治研究[J]. 湖北农业科学, 2018,57(7):5-10.
Wang X P, Liu Q. Research on plant invasion control in China [J]. Hubei Agricultural Science, 2018,57(7):5-10.

[59]李想, 王欢欢, 郭秋翠, 等. 玉米茎腐病病原禾谷镰孢拮抗菌筛选及分子鉴定[J]. 玉米科学, 2020,28(5):169-175.
Li X, Wang H H, Guo Q C, et al. Screening and molecular characterization of *Fusarium graminearum* antagonist bacteria as the causal agent of corn stem rot[J]. Corn Science, 2020,28 (5):169-175.

[60]李志普. 玉米镰孢茎腐病生防菌株的筛选鉴定与菌剂研发[D]. 保定: 河北农业大学, 2023.
Li Z P. Screening and characterization of Fusarium stem rot resistant strains of maize and development of fungicides [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2023.

[61]唐升田. 玉米病害生物防治中木霉菌的应用研究[J]. 农业技术与装备, 2022(3):91-92.
Tang S T. Application of *Mycosphaerella xylostella* in biological control of maize diseases [J]. Agricultural Technology and Equipment, 2022(3):91-92.

[62]吴晓儒, 陈硕闻, 杨玉红, 等. 木霉菌颗粒剂对玉米茎腐病防治的应用[J]. 植物保护学报, 2015,42(6):1030-1035.
Wu X R, Chen S W, Yang Y H, et al. Application of Xylococcus granules for corn stem rot control [J]. Journal of Plant Protection, 2015,42(6):1030-1035.

[63]Saravanakumar K, Li Y, Yu C, et al. Effect of *Trichoderma harzianum* on maize rhizosphere microbiome and biocontrol of Fusarium Stalk rot[J]. Sci Rep, 2017,7(1):1771.

[64]沙欣尧. 解淀粉芽孢杆菌引发处理种子对玉米农艺与产量性状的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
Sha X Y. Effects of seed treatment initiated by *Bacillus amyloliquefaciens* on agronomic and yield traits of maize [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023.

[65]闵营辉. 玉米茎基腐病菌侵染时期研究及品种抗病性鉴定[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
Min Y H. Study on the infestation period of maize stem rot fungus and identification of varietal resistance to the disease [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013.

[66]王富荣, 冯未娥, 傅玉红, 等. 玉米茎腐病综合防治措施研究与应用[J]. 山西农业科学, 1996(04):31-35.
Wang F R, Feng W E, Fu Y H, et al. Research and application of comprehensive control measures for corn stem rot [J]. Shanxi Agricultural Science, 1996(4):31-35.

[67]王振华. 玉米茎腐病与品种抗性的研究进展[J]. 种子, 1997(4):43-46.
Wang Z H. Research progress on corn stem rot and variety resistance[J]. Seed, 1997(04):43-46.

[68]苏俊, 张瑞英, 张坪, 等. 玉米自交系和杂交种抗茎腐病鉴定及其间抗性遗传关系的研究[J]. 玉米科学, 1994(4):59-63.
Su J, Zhang R Y, Zhang P, et al. Identification of maize inbred lines and hybrids resistant to stem rot and genetic relationships among them[J]. Maize Science, 1994(4):59-63.

[69]丰光, 王孝杰, 吕春波, 等. 玉米组合M9916×D472抗镰孢茎腐病的六世代联合数量遗传研究[J]. 玉米科学, 2018,26(3):50-55.
Feng G, Wang X J, Lü C B, et al. Six-generation joint quantitative genetic study of maize combination M9916×D472 for resistance to fusarium stem rot[J]. Maize Science, 2018,26(3):50-55.

[70]黎东亮, 鹿红卫, 李保峰, 等. 豫北地区主推玉米品种抗茎基腐病分析[J]. 安徽农业科学, 2015,43(5):146-147.
Li D L, Lu H W, Li B F, et al. Analysis of stem rot resistance of maize varieties mainly promoted in northern Henan [J]. Anhui Agricultural Science, 2015,43(5):146-147.

[71]余辉, 宋伟, 赵久然, 等. 分子标记辅助选择育成的玉米自交系京24单抗丝黑穗病和茎腐病改良材料性状分析[J]. 分子植物育种, 2014,12(1):56-61.
Yu H, Song W, Zhao J R, et al. Trait analysis of improved materials of maize inbred line Jing24 with single resistance to silky smut and stem rot bred by molecular marker-assisted selection[J]. Molecular Plant Breeding, 2014,12(1):56-61.

[72]董婉. 玉米病虫害防治与种植技术要点探析[J]. 种子科技, 2022,40(17):111-113.
Dong W. Exploration of corn pest control and planting technology[J]. Seed Science and Technology, 2022,40(17):111-113.

[73]贾冰. 玉米茎腐病的发生与防治[J]. 新农业, 2021(16):51.
Jia B. Occurrence and control of corn stem rot [J]. New Agriculture, 2021(16):51.

[74]马金慧, 杨克泽, 徐志鹏, 等. 不同植物免疫诱抗剂对玉米茎基腐病菌的抑制效果和田间防效[J]. 农药, 2022,61(11):840-844.
Ma J H, Yang K Z, Xu Z P, et al. Inhibitory effects of different plant immune-inducing antagonists against *Phytophthora infestans* of maize and their efficacy against the disease in the field[J]. Pesticide, 2022,61(11):840-844.

[75]马培培. 玉米对种传拟轮枝镰孢菌抗性关键基因克隆及功能研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
Ma P P. Cloning and functional study of key genes for maize resistance to the seed-borne *Fusarium oxysporum* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.

[76]王冲. 玉米茎腐病防治技术研究初探[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
Wang C. A preliminary study on the control technology of corn stem rot [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013.

[77]杨松. 玉米土传病害的种类以及防治技术[J]. 种子科技, 2022,40(15):82-84.
Yang S. Types of soil-borne diseases of maize and their control techniques[J]. Seed Science and Technology, 2022,40(15):82-84.

[78]孔晓民, 韩成卫, 宋春林, 等. 不同营养元素对玉米茎腐病的调控效果[J]. 河南农业科学, 2016,45(9):69-72.
Kong X M, Han C W, Song C L, et al. Regulatory effects of different nutrient elements on corn stem rot [J]. Henan Agricultural Science, 2016,45(9):69-72.

Research progress on the pathogenic mechanism and control of fusarium stalk rot in maize

Ling Lijun, Fan Yangkai, Li Yao, Jiang Yijuan, Kong Fanjin

(*School of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Corn, as a main crop, play a crucial role in ensuring food security. However, stalk rot has been a serious threat to corn production worldwide for many years. This paper summarized the infection and pathogenic mechanisms of *Fusarium oxysporum* stem rot in maize were summarized, and the genetic mechanism and immune mechanism of resistance to *Fusarium oxysporum* stem rot in maize, and further explained the genetic resistance and immune mechanism in corn after infection. Additionally, the paper reviewed recent domestics and international research advances on the scientific control measures for *F. oxysporum* in maize, aiming to provide reference ideas for related research on this disease.

Keywords: Maize, Stalk rot, Pathogenesis, Prevention and control

(编辑:吕俊俐)