

小麦种质对茎基腐病抗性评价及优异种质筛选

金京京¹, 齐永志¹, 王 丽¹, 王芳芳¹, 闫翠梅¹, 李保云²,
解超杰², 甄文超¹, 马 骏²

(¹ 河北农业大学农学院 / 河北省作物生长调控重点实验室, 保定 071001;

² 中国农业大学农学院, 北京 100193)

摘要: 小麦茎基腐病是由镰孢菌侵染引起的一种世界性土传病害, 近年来已严重威胁到我国小麦的安全生产。为筛选具有茎基腐病抗性的小麦种质资源, 本研究采用孢子悬浮液浸种法, 分别以国外抗病材料 Sunco 和中国品种陕 253 为抗病和感病对照, 对 670 份我国小麦品种(系)进行了茎基腐病温室苗期抗性鉴定。结果发现, 我国供试品种(系)感病材料(病情指数 >30)所占比例达到 84%, 且包含多个近年来小麦生产中的主推品种, 表明我国小麦品种总体抗性水平低是导致茎基腐病近年来发病频率与程度不断增加的重要原因之一。经多轮筛选, 发掘获得 15 份抗病表现稳定、抗性水平与抗病对照 Sunco 相仿的材料。15 份材料平均病情指数在 10.9~19.4 之间, 其株高、抽穗期等农艺性状表现出较为丰富的变异, 为我国小麦抗茎基腐病品种选育和抗性遗传研究提供了种质资源。

关键词: 假禾谷镰刀菌; 小麦茎基腐病; 抗病资源; 抗性评价

Evaluation of Chinese Wheat Germplasm Resources for Crown Rot Resistance

JIN Jing-jing¹, QI Yong-zhi¹, WANG Li¹, WANG Fang-fang¹, YAN Cui-mei¹,
LI Bao-yun², XIE Chao-jie², ZHEN Wen-chao¹, MA Jun²

(¹ College of Agronomy, Hebei Agricultural University/Key laboratory for crop growth and regulation of Hebei, Baoding 071001;

² College of Agronomy and biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193)

Abstract: Crown rot caused by *Fusarium* species is a worldwide soil-borne disease in several crop species. In recent years, crown rot became a common threat in many wheat-growing regions in China. However, the reports on large-scale screening of crown rot resistant resources remain rare. In this study, 670 Chinese wheat germplasms plus two genotypes Sunco and Shan253, which served as resistant and susceptible control, respectively, were evaluated for crown rot resistance at seedling stage under greenhouse conditions. The results showed that 84% of tested accessions were susceptible, including many widespread varieties that are deploying in farming practice. That implied a potential of the increasing incidence and degree of crown rot in China in future. Fifteen genotypes showed reliable moderate disease resistance as the resistant control Sunco in multiple rounds of selection, with an average disease index ranged from 10.9 to 19.4. Specifically, a variation on plant height and heading time was observed in those 15 genotypes. Thus, this study unlocked the diseased index of *Fusarium* crown rot in Chinese wheat cultivars, which will provide reference for wheat resistance breeding.

Key words: *Fusarium pseudograminearum*; wheat crown rot; resistant resources; resistance evaluation

收稿日期: 2019-07-03 修回日期: 2019-07-30 网络出版日期: 2019-08-13

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190703001>

第一作者主要从事小麦抗茎基腐病研究, E-mail: jingjing1809@yeah.net

通信作者: 甄文超, 主要从事农业生态学与植物生态病理学研究, E-mail: wenchao@hebau.edu.cn

马骏, 主要从事小麦遗传育种研究, E-mail: junma@cau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31872865);“十三五”国家重点研发计划(2017YFD0300906, 2018YFD0300501)

Foundation project: Natural Science Foundation of China(31872865), National Key R&D Program of China(2017YFD0300906, 2018YFD0300501)

茎基腐病 (Crown rot) 是一种由镰孢菌属真菌 (*Fusarium* spp.) 引起的严重危害小麦生产的世界性土传病害^[1]。该病在小麦出苗、分蘖、成熟期均可发生,发病植株茎基部叶鞘和茎秆变褐,茎节坏死,造成植株死亡、穗部枯白,严重影响小麦籽粒形成和灌浆,甚至颗粒无收^[1-3]。茎基腐病最早于 1951 年发现于澳大利亚,多年来一直是当地小麦生产中的首要病害之一,平均每年造成高达 7900 万澳元的经济损失^[4]。美国、英国、加拿大、意大利、土耳其、伊朗、巴西等其他多个国家也有该病的相关报道^[5-6]。在中国,近年来茎基腐病已成为小麦生产中的一种新发病害,在江苏、山东、安徽、河南、河北等多个小麦主产省份迅速蔓延,呈不断加重趋势^[7-10]。据报道,2016 年河南全省小麦茎基腐病病田率达到 65.1%,部分病田的产量损失达到 51.6%^[11]。河北中南部地区小麦主产市县 2015 年部分地块白穗率达到 50%^[12]。

由于茎基腐病具有病原菌腐生性强、宿主广泛、主要发病部位为茎基部、全生育期都可发病等特点,采用杀菌剂等传统方法难以有效根治,因此,种植抗病品种成为防控茎基腐病发生和危害最为有效的措施之一。研究表明,茎基腐病田间接种后发病程度受到当地气候、土壤类型、耕作管理方式等多种因素影响,发病水平的可控性、重复性差,不利于大规模抗源筛选,因此苗期温室接种鉴定是目前国际范围内抗病鉴定的主要方法^[1, 13-14]。通过苗期温室接种鉴定,一些表现为中等抗性的种质材料如 Sunco、2-49、CSC6、EGA Wylie 等被先后发掘出来^[15-19]。在我国,由于茎基腐病是一种新发病害,针对该病的相关科学研究和抗病育种工作较少,仅有零星报道。杨云等^[14]对 88 份黄淮麦区主推小麦品种进行了茎基腐病抗性鉴定,发现所有材料在苗期都感病或高度感病。与之类似, Yang 等^[20]发现 2014 年以后黄淮麦区审定或育成的 234 份小麦品种(系)中,仅有 7 份材料病情指数低于 30,其余绝大多数材料病情指数大于 40,表现高度感病。

鉴于我国小麦茎基腐病日益蔓延且危害不断加重、抗病种质资源匮乏的现状,本研究通过温室抗性鉴定,对收集到的来自全国各地不同生态区的 670 份小麦材料进行了茎基腐病抗性鉴定,以丰富我国小麦抗茎基腐病遗传资源,为研究茎基腐病抗病机制和抗病育种等相关工作奠定基础。此外,由于前人研究表明茎基腐病抗性与株高和抽穗期存在明

显互作^[21-24],因此本研究对筛选出的抗病材料的株高、抽穗期等农艺性状也进行了调查与分析。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料包括来自全国各地不同生态区的 670 份小麦品种(系)(表 1)。接种菌株为河南农业大学植物保护学院小麦病害研究室李洪连教授课题组提供的假禾谷镰孢 (*Fusarium pseudograminearum*) WZ2-8A 菌株。抗病对照材料 Sunco 由国家小麦改良中心夏先春研究员提供,感病对照为陕 253。

表 1 670 份供试小麦材料来源
Table 1 Origin of 670 wheat genotypes assessed for crown rot resistance

来源 Origin	数量 Number	来源 Origin	数量 Number
河北 Hebei	187	山西 Shanxi	42
河南 Henan	110	陕西 Shaanxi	39
山东 Shandong	122	北京 Beijing	27
江苏 Jiangsu	40	四川 Sichuan	4
安徽 Anhui	17	其他 Other	82

1.2 小麦茎基腐病接种鉴定

1.2.1 孢子悬浮液制备 假禾谷镰孢 WZ2-8A 菌株置于 PDA 平板培养基上活化,待培养基布满菌丝后,从 PDA 平板培养基切取一小块带有菌丝的培养基,于羧甲基纤维素培养基 (CMC) 25 ℃振荡培养 72 h,4 层纱布过滤,于显微镜下观察,调节孢子悬浮液浓度至 1×10^6 个/mL,按体积比 1000:1 加入吐温 20,混匀,4 ℃保存备用。

1.2.2 茎基腐病温室苗期抗性鉴定 参照 Li 等^[25]提出的方法并做适当修改。第 1 次苗期抗性鉴定包括全部 670 份材料,于 2018 年 7 月在人工气候室进行。选取籽粒饱满,大小一致的小麦种子,75% 酒精消毒 2 min,无菌水冲洗 3 遍。消毒后的小麦种子在培养皿中 25 ℃催芽 2~3 d,待种子出芽 5 mm 以后,将种子在孢子悬浮液中浸泡 1 min,移栽至规格为 5×10 的穴盘中。每个品种接种 15 个单株。温室自然光照,昼夜温度分别设定为 25±2 ℃和 20±2 ℃。采用底部灌溉方法浇水。当感病对照陕 253 严重发病时(约接种 6 周后)调查发病情况。发病程度分级标准见表 2,其中 0 级为无明显症状,5 级为整株严重褐枯或全株枯死。根

据公式:病情指数(DI, disease index)= $100 \times \sum(\text{调查单株数} \times \text{各株代表值}) / (\text{调查总株数} \times \text{最高级代表值})$ 计算病情指数。将在第1轮抗性鉴定中抗性表现优异的15份材料分别于2019年3月和2019年5月在人工气候室进行第2次和第3次接种鉴定,以验证其抗病稳定性。2次鉴定各包括2个重复,每个重复每个品种接种10个单株。

表2 小麦茎基腐病抗性分级及评价标准

Table 2 Classification criteria for resistance to crown rot

分级 Disease	小麦病害程度 Description of symptom
0	外层叶鞘无明显症状
1	第1叶鞘褐枯小于叶鞘1/4长度以下
2	第1叶鞘褐枯占叶鞘长度1/4~1/2
3	第1叶鞘褐枯占叶鞘长度1/2~3/4
4	第1叶鞘完全脱绿腐烂,第2叶鞘有明显褐枯
5	第3叶鞘有明显褐枯或全株枯死

1.3 抗病材料株高、抽穗期调查

有研究表明抽穗期和株高对于抗病性可能有显著影响。因此,本研究调查了大田环境下抗病材料的抽穗期和株高等农艺性状。田间试验于2018年10月至2019年6月在河北望都县进行。耕种前施复合肥40 kg。每个品种2次重复,每个重复播种1行,行长1 m,行距15 cm,随机区组设计。田间管理按照一般麦田管理方法,在苗期和返青拔节期各浇1次水。

1.4 数据分析

用Excel和SPSS 21.0软件对测量数据进行统计分析^[26]。

2 结果与分析

2.1 小麦种质资源抗病性表现

第1次接种42 d后调查发现,670份供试材料病情指数呈正态分布(图1),极端抗病材料和极端感病材料差异明显(图2)。然而,供试材料整体偏感病,符合小麦茎基腐病是新发病害,长期以来在我国育种工作中受重视程度不够的现状。供试材料中病情指数在0~10的材料包括04中36和石优17号;病指在10~20的材料49份,包括冠麦1号、鲁麦13、俊达129等,约占供试材料的7%;病情指数在20~30的材料55份,包括晋麦54、金博士731、小偃6号等,约占供试材料的8%;病情指数大于30

的材料564份,占比最高,达到84%,包括新麦26、国麦301、衡5364等我国小麦生产中的主推品种。抗病对照Sunco的平均病情指数为14,表现为中抗;感病对照陕253的平均病情指数为90,表现为高感(表3)。

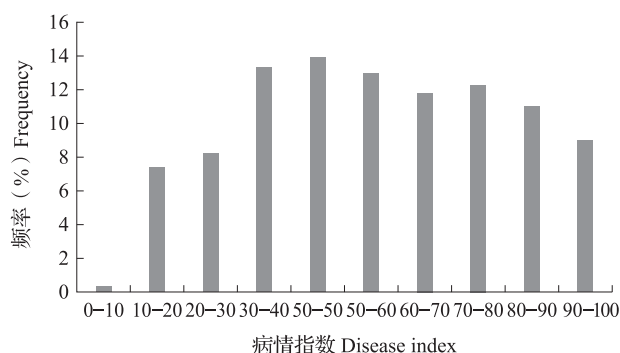
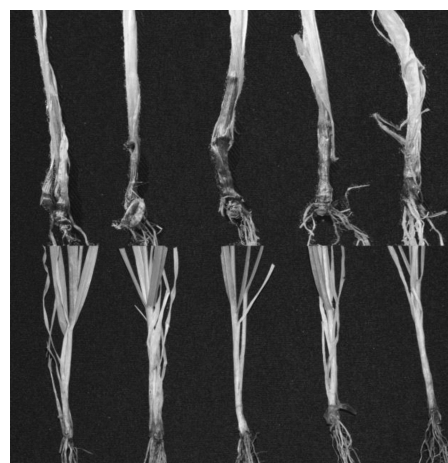


图1 670份供试品种(系)病情指数频率分布图

Fig. 1 The crown rot disease index in 670 varieties



上图为极端感病材料;下图为极端抗病材料。

接种后42 d进行抗病性鉴定

Top: Most resistant genotype, Below: Most susceptible genotype.

Disease index were assessed at 42 days after inoculation

图2 670份材料极端抗、感材料病状

Fig. 2 Examples of resistant and susceptible genotypes in subset of 670 genotypes

2.2 15份抗性品种抗病性验证及株高、抽穗期调查

在第1次接种鉴定基础上,选取抗性表现最为优异的15份材料于2019年3月和2019年5月在人工气候室分别进行了第2次和第3次抗病鉴定。15份材料的病情指数平均值与抗病对照Sunco差异不显著,病情指数介于10.9~19.4之间,表明这些材料抗性表现较为稳定。感病对照陕253病情指数为85.0,抗病对照Sunco病情指数为16.0。在大田环境下对15份材料的部分农艺性状进行了测量,发现株高、抽穗期等农艺性状差异较大。其中,浚

表 3 第 1 次接种鉴定不同小麦品种对茎基腐病的抗性(仅代表品种)

Table 3 Representative resistant wheat cultivars in first round of inoculation

病情指数 Disease index	品种 Cultivars
DI ≤ 10	04 中 36, 石优 17 号
10<DI ≤ 20	冠麦 1 号, 鲁麦 13, 俊达 129, 淮麦 26, 新麦 18, 连 0756, Sunco
20<DI ≤ 30	晋麦 54, 金博士 731, 小偃 6 号, 藁优 9908, 石 03-5285, 晋麦 70, 淮麦 33, 烟 2070, 晋麦 59, 濮兴 5 号
DI>30	新麦 26, 国麦 301, 陕 253, 衡 5364, 郑麦 7698, 郑麦 0856, 周麦 16, 周麦 18, 邯 4589, 豫麦 34 号

2016 株高为 60 cm, 而石优 17 株高达到 85 cm。在抽穗时间上, 烟农 25 抽穗最早, 为播种后 201 d; 淮麦 26 抽穗时间最晚, 为播种后 211 d(表 4)。15 份材料株高、抽穗期与抗病性相关系数分别为 -0.17 和 0.26, 没有达到显著水平(表 5)。

表 4 15 份抗性材料抗病鉴定结果

Table 4 Disease index of 15 resistant cultivars

品种 Cultivars	病情指数 Disease index			株高 (cm) Plant height	抽穗期 (d) Days to heading
	2019 年 3 月 March 2019	2019 年 5 月 May 2019	平均值 Average		
秦农 142	12.3	9.5	10.9b	63	203
石优 17	13.8	8.8	11.3b	85	202
冠麦 1	12.5	10.7	11.6b	62	202
予粮 1688	12.9	11.3	12.1b	67.3	205
石新 733	12.6	11.5	12.1b	70	208
连 0756	15.5	11.1	13.3b	75.4	202
04 中 36	14.4	12.6	13.5b	77	203
衡观 35	16.2	12.8	14.5b	66.6	203
鲁麦 13	15.0	16.6	15.8b	74	203
俊达 129	19.9	12.5	16.2b	71	204
烟农 25	20.0	12.5	16.3b	70	201
新麦 18	21.1	11.8	16.5b	62.6	202
浚 2016	18.3	15	16.7b	60	206
泛麦 5 号	18.5	15.5	17.0b	64	208
淮麦 26	27.3	11.5	19.4b	75.8	211
Sunco	17.8	14.2	16.0b	—	—
陕 253	80.0	90.0	85.0a	77.7	201

病情指数后相同字母表示差异不显著 (P<0.05)。— : 未鉴定

The average disease index (DI) followed by the same lowercase letter is not significantly different (at P<0.05) according to Duncan's multiple range test.— : Data are not available

表 5 15 份抗病材料株高、抽穗期与茎基腐病病情指数之间的相关系数

Table 5 The correlation analysis between plant height, days to heading and disease index in 15 resistant genotypes

性状 Traits	病情指数 Disease index	抽穗期 Days to heading
抽穗期 Days to heading	0.26	1
株高 Plant height	-0.17	-0.13

3 讨论

作为小麦生产中的一种新发病害,近年来茎基腐病在我国各小麦主产省份迅速蔓延,危害日益严重。2019 年笔者多地进行茎基腐病发病情况调查发现,该病害发生普遍,已经受到广大农业相关人员的广泛重视。然而,现阶段我国针对该病害的相关研究较少,仍处于起步阶段。大规模抗源筛选是实现小麦对茎基腐病抗病性改良和抗病遗传研究的前提之一。本研究以我国茎基腐病优势菌种假禾谷镰孢菌为接种物,对 670 份小麦品种(系)进行了温室苗期抗病鉴定。经过 3 轮筛选,共发现 15 份茎基腐病苗期抗性表现稳定、抗性水平与抗病对照 Sunco 相仿的小麦品种(系)。这些材料来自于不同生态区,丰富了我国小麦茎基腐病抗病资源,为小麦茎基腐病抗病遗传研究和抗病育种奠定了材料基础。

前人研究中发现株高和抽穗期与茎基腐病抗性存在明显互作。在大麦中,部分茎基腐病抗性相关位点和控制株高、抽穗期等位点在遗传位置上非常接近^[22-23]。Liu 等^[24]结果表明,1047 份大麦自然群体中晚熟材料的病情指数平均值显著优于早熟材料。Chen 等^[21]利用大麦株高 *Uzu* 基因的 15 对近等基因系研究发现,相较高秆近等基因系,矮秆近等基因系的细胞密度更大,可能使得病原菌在植株内部的扩散变得更加困难,进而导致矮秆近等基因系发病症状相对较轻,表现出优于高秆近等基因系的抗病性。因此,在茎基腐病遗传改良研究中,应该谨慎选择与控制株高、抽穗期等农艺性状位点紧密连锁的抗茎基腐病位点,避免因连锁累赘在导入抗病位点的同时对其他重要农艺性状带来不利影响。在本试验中,15 份抗病材料的株高和抽穗期差异较大,株高变化范围 60~85 cm,抽穗期变化范围从播种后 201~211 d,且病情指数和株高、抽穗期相关不显著,表明材料中存在着较为丰富的株高、抗病位点变异。综合系谱等信息,利用这些材料选配双亲群体,解析其控制抗病、株高、抽穗期等性状的位点及其互作关系,可以为小麦抗茎基腐病优异等位基因聚合指明方向。

在国际范围内,大规模的茎基腐病抗源筛选工作中得到的达到中抗水平的抗源所占比例较少^[2,27]。Liu 等^[24]对 1047 份收集于世界各地的大麦种质资源进行了茎基腐病抗病鉴定,最终共 13 份材料经多轮鉴定后病情指数低于 20。与此类似,本研究中 670 份我国供试品种(系)整体抗性较差,病

情指数大于 30 的感病材料所占比例达到 84%,且包含多个近年来小麦生产中的主推品种,表明我国小麦整体抗茎基腐病水平不容乐观。研究表明,茎基腐病致病菌可侵染小麦、玉米、大麦等多种禾谷类作物,在田间收获后的残留秸秆上可以生存数年之久,在合适的环境条件下再次引发病害^[1,28]。伴随着秸秆还田、玉米小麦轮作等耕作方式的持续应用,感病品种的大量种植有利于发病田土壤含菌量的持续累积,长久下去,小麦承受病菌压力越来越大,发病频率和严重度不断增加,防治愈加困难。鉴于我国现有小麦品种(系)中抗源分布不够理想,应该继续加大抗源筛选范围,从近缘或者野生材料中发掘抗病材料,导入到六倍体小麦中以改良抗病性。

尽管温室苗期鉴定具备便于操作、可以对大批材料进行抗性评价、鉴定结果与大田抗病表现高度相关等优点,已经是当前抗病材料筛选、抗病位点发掘中主要应用的方法,但是经温室苗期抗病鉴定筛选出的抗病材料仍需要进一步在田间进行接种鉴定,这依然是必不可少的一步^[1,14]。因此,本研究下一步工作将对在苗期鉴定中表现稳定的抗病材料进行多年多点的田间接种鉴定,明确其在生产环境中的抗性表现。

参考文献

- [1] Liu C J, Ogonnaya F C. Resistance to *Fusarium* crown rot in wheat and barley: a review. *Plant Breeding*, 2015, 134(4): 365-372
- [2] Purss S S. Studies of varietal resistance to crown rot of wheat caused by *Fusarium graminearum* Schw. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Science*, 1966, 23: 475-498
- [3] 周森平,姚金保,张鹏,余桂红,马鸿翔. 小麦抗茎腐病种质筛选及鉴定新方法的建立. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(2): 377-382
Zhou M P, Yao J B, Zhang P, Yu G H, Ma H X. Screening of germplasm and establishment of new evaluation method for the resistance to wheat crown rot. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(2): 377-382
- [4] Murray G, Brennan J. Estimating disease losses to the Australian wheat industry. *Australasian Plant Pathology*, 2009, 38: 558-570
- [5] Poole G J, Smiley R W, Paulitz T C, Walker C A, Carter A H, See D R, Garland-Campbell K. Identification of quantitative trait loci (QTL) for resistance to *Fusarium* crown rot (*Fusarium pseudograminearum*) in multiple assay environments in the Pacific Northwestern US. *Theoretical and Applied Genetics*, 2012, 125(1): 91-107
- [6] Gebremariam E S, Sharma-Poudyal D, Paulitz T C, Erginbas-Orakci G, Karakaya A, Dababat A A. Identity and pathogenicity of *Fusarium* species associated with crown rot on wheat (*Triticum* spp.) in Turkey. *European Journal of Plant*

- Pathology, 2017, 150(2): 387-399
- [7] Li H L, Yuan H X, Fu B, Xing X P, Sun B J, Tang W H. First report of *Fusarium pseudograminearum* causing crown rot of wheat in Henan, China. *Plant Disease*, 2012, 96(7): 1065
- [8] 张向向, 孙海燕, 李伟, 邓渊钰, 张爱香, 于汉寿, 陈怀谷. 我国冬小麦主产省小麦茎基腐镰孢菌的组成及其致病力. *麦类作物学报*, 2014, 34(2): 272-278
Zhang X X, Sun H Y, Li W, Deng Y Y, Zhang A X, Yu H S, Chen H G. Composition and pathogenicity of *Fusarium* crown rot pathogens of wheat in major winter wheat production areas of China. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(2): 272-278
- [9] 周海峰, 杨云, 牛亚娟, 袁虹霞, 李洪连. 小麦茎基腐病的发生动态与防治技术. *河南农业科学*, 2014, 43(5): 114-117
Zhou H F, Yang Y, Niu Y J, Yuan H X, Li H L. Occurrence and control methods of crown rot of wheat. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(5): 114-117
- [10] 贺小伦, 周海峰, 袁虹霞, 施艳, 孙炳剑, 李洪连. 河南和河北冬小麦区假禾镰孢的遗传多样性. *中国农业科学*, 2016, 49(2): 272-281
He X L, Zhou H F, Yuan H X, Shi Y, Sun B J, Li H L. Genetic diversity of *Fusarium pseudograminearum* collected from Henan and Hebei winter wheat regions. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(2): 272-281
- [11] 徐飞, 宋玉立, 周益林, 张昊, 王俊美, 李亚红, 韩自行. 2013-2016 年河南省小麦茎基腐病的发生危害情况及特点. *植物保护*, 2016, 42(6): 23
Xu F, Song Y L, Zhou Y L, Zhang H, Wang J M, Li Y H, Han Z X. Occurrence dynamics and characteristics of *Fusarium* root and crown rot of wheat in Henan province during 2013-2016. *Plant Protection*, 2016, 42(6): 23
- [12] 纪莉景, 栗秋生, 王连生, 孙梦伟, 王亚娇, 孔令晓. 河北省小麦冠腐病发生现状 & 病原菌初探. *植物保护*, 2016, 42(5): 28
Ji L J, Li Q S, Wang L S, Sun M W, Wang Y J, Kong L X. Occurrence and pathogen composition of wheat crown rot in Hebei province. *Plant Protection*, 2016, 42(5): 28
- [13] 张鹏, 霍燕, 周森平, 姚金保, 马鸿翔. 小麦禾谷镰孢菌茎基腐病抗源的筛选与评价. *植物遗传资源学报*, 2009, 10(3): 431-435
Zhang P, Huo Y, Zhou M P, Yao J B, Ma H X. Identification and evaluation of wheat germplasm resistance to crown rot caused by *Fusarium graminearum*. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2009, 10(3): 431-435
- [14] 杨云, 贺小伦, 胡艳峰, 侯莹, 牛亚娟, 代君丽, 袁虹霞, 李洪连. 黄淮麦区主推小麦品种对假禾镰孢菌所致茎基腐病的抗性. *麦类作物学报*, 2015, 35(3): 339-345
Yang Y, He X L, Hu Y F, Hou Y, Niu Y J, Dai J L, Yuan H X, Li H L. Resistance of wheat cultivars in Huang-Huai Region of China to crown rot caused by *Fusarium pseudograminearum*. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(3): 339-345
- [15] Willdermuth G, McNamara R B. Testing wheat seedlings for resistance to crown rot caused by *Fusarium graminearum* group 1. *Plant Disease*, 1994, 78(10): 949-953
- [16] Collard B C Y, Grams R A, Bovill W D, Percy C D, Jolley R, Lehmensiek A, Wildermuth G, Sutherland M W. Development of molecular markers for crown rot resistance in wheat: mapping of QTLs for seedling resistance in a '2-49' × 'Janz' population. *Plant Breeding*, 2005, 124(6): 532-537
- [17] Collard B C Y, Jolley R, Bovill W D, Grams R A, Wildermuth G B, Sutherland M W. Confirmation of QTL mapping and marker validation for partial seedling resistance to crown rot in wheat line '2-49'. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2006, 57(9): 967-973
- [18] Ma J, Li H B, Zhang C Y, Yang X M, Liu Y X, Yan G J, Liu C J. Identification and validation of a major QTL conferring crown rot resistance in hexaploid wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 2010, 120(6): 1119-1128
- [19] Zheng Z, Kilian A, Yan G, Liu C. QTL conferring *Fusarium* crown rot resistance in the elite bread wheat variety EGA Wylie. *PLoS One*, 2014, 9(4): e96011
- [20] Yang X, Pan Y, Singh P K, He X, Ren Y, Zhao L, Zhang N, Chen S H, Chen F. Investigation and genome-wide association study for *Fusarium* crown rot resistance in Chinese common wheat. *BMC Plant Biology*, 2019, 19: 153
- [21] Chen G D, Yan W, Liu Y X, Wei Y M, Zhou M X, Zheng Y L. The non-gibberellic acid-responsive semi-dwarfing gene *uzu* affects *Fusarium* crown rot resistance in barley. *Bmc Plant Biology*, 2014, 14(1): 22
- [22] Li H B, Zhou M X, Liu C J. A major QTL conferring crown rot resistance in barley and its association with plant height. *Theoretical & Applied Genetics*, 2009, 118(5): 903-910
- [23] Chen G D, Liu Y X, Ma J, Zheng Z, Wei Y, McIntyre C L. A novel and major quantitative trait locus for *Fusarium* crown rot resistance in a genotype of wild barley (*Hordeum spontaneum* L.). *PLoS One*, 2013, 8(3): e58040
- [24] Liu Y X, Zheng Y L, Wei Y M, Zhou M X, Liu C J. Genotypic differences to crown rot caused by *Fusarium pseudograminearum* in barley (*hordeum vulgare* L.). *Plant Breeding*, 2012, 131(6): 728-732
- [25] Li X, Liu C, Chakraborty S, Manners J M, Kazan K. A simple method for the assessment of crown rot disease severity in wheat seedlings inoculated with *Fusarium pseudograminearum*. *Journal of Phytopathology*, 2008, 156(11-12): 751-754
- [26] 张力. SPSS 19.0(中文版)在生物统计中的应用. 厦门: 厦门大学出版社, 2013: 166-179
Zhang L. Application of SPSS 19.0(Chinese Version) in biostatistics. Xiamen: Xiamen University Press, 2013: 166-179
- [27] Liu C J, Ma J, Li H B, Liu Y X, Liu G R, Wen S M, Zhou M X, Yan G J, Chakraborty S. The homoeologous regions on long arms of group 3 chromosomes in wheat and barley harbour major crown rot resistance loci. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 2011, 47: S109-S114
- [28] 张政文, 孙秀娟, 胡乃娟, 黄卉, 朱利群, 卞新民. 麦秸掩埋还田对赤霉菌 (*Fusarium graminearum* Schw.) 存活率和水稻带菌的影响. *植物病理学报*, 2014, 44(4): 443-448
Zhang Z W, Sun X J, Hu N J, Huang H, Zhu L Q, Bian X M. Effects of wheat straw burial and returned to the field on the survival rate of *Fusarium graminearum* Schw. *Journal of Plant Pathology*, 2014, 44(4): 443-448