黄淮冬麦区小麦主栽品种赤霉病综合抗性鉴定及其 *FHB*1 抗性基因检测

徐 飞， 王俊美， 杨共强， 宋玉立*， 刘露露，
李丽娟， 李亚红， 韩自行， 张姣姣

（河南省农业科学院植物保护研究所，农业农村部华北南部作物有害生物综合治理重点实验室，郑州 450002）

摘要 本研究明确了黄淮冬麦区主栽小麦品种对赤霉病的抗侵染、抗扩展、抗毒素积累和抗籽粒侵染能力以及几种抗性之间的相互关系，并检测了各品种是否带有 *FHB*1 抗性基因，旨在为该区小麦赤霉病抗性鉴定评价、抗性品种培育和利用提供科学依据。小麦赤霉病综合抗性鉴定结果表明：22 个黄淮冬麦区主栽品种中，有 20 个为感病品种，只有‘郑麦 9023’和‘西农 979’为中感品种，所有品种均不含 *FHB*1 基因；长江中下游麦区的 9 个品种中，‘扬麦 17’和‘宁麦 9 号’等 6 个品种表现中抗，‘扬麦 23’表现中感，‘苏麦 3 号’和‘扬麦 21’表现抗，‘扬麦 14’‘扬麦 17’和‘扬麦 23’不含有 *FHB*1 基因，其他品种均含 *FHB*1 基因。小麦品种的抗扩展能力与抗侵染能力无显著相关性（$r=0.27$，$P>0.05$）；两种接种条件下小麦品种的病粒率与抗脱氧雪腐镰刀菌烯醇（DON）毒素积累能力呈极显著正相关（$r=0.86$，$P<0.01$；$r=0.88$，$P<0.01$）；单小花滴注法接种条件下，小麦品种的平均病级与病粒率和籽粒中 DON 含量都呈极显著正相关（$r=0.71$，$P<0.01$；$r=0.81$，$P<0.01$）；喷雾接种条件下，小麦品种的病小穗率与平均病级、病粒率、籽粒中 DON 含量和 ZEN 含量都呈极显著正相关（$r=0.78$，$P<0.01$；$r=0.73$，$P<0.01$；$r=0.78$，$P<0.01$；$r=0.63$，$P<0.01$）。在毒素积累抗性上，DON 含量和 ZEN 含量呈极显著正相关（$r=0.70$，$P<0.01$）。在目前黄淮冬麦区没有中抗品种的情况下，可以增加育种和鉴定目标为抗籽粒侵染和抗毒素积累的品种，在小麦品种推广过程中加以运用，可以达到较好的效果。

关键词 小麦品种； 赤霉病； 抗病性； 病粒率； 脱氧雪腐镰刀菌烯醇； *FHB*1

中图分类号： S 435.12.45 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2019365

Evaluation of the comprehensive resistance to Fusarium head blight and detection of the resistance gene *FHB*1 in main wheat cultivars in the Huanghuai winter wheat region

XU Fei， WANG Junmei， YANG Gongqiang， SONG Yuli*， LIU Lulu，
LI Lijuan， LI Yahong， HAN Zihang， ZHANG Jiaojiao

（*Institute of Plant Protection*, *Henan Academy of Agricultural Sciences*; *Key Laboratory of Crop Integrated Pest Management in the Southern Part of North China*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Zhengzhou* 450002, *China*）

Abstract The purpose of this paper is to understand the comprehensive resistance of main wheat cultivars to Fusarium head blight (FHB) in the Huanghuai winter wheat region and detect their *FHB*1 resistance genes, so as to provide new ideas for FHB resistance identification and breeding strategies in this region. The evaluation results of the comprehensive resistance to FHB showed that 20 of the 22 main winter wheat cultivars in the Huanghuaihai region were susceptible, and only ‘Zhengmai 9023’ and ‘Xinong 979’ were moderately susceptible, and all the 22 wheat cultivars did not contain *FHB*1 gene. Six of the nine wheat cultivars in the middle and lower reaches of the Yangtze River, such as ‘Yangmai 17’ and ‘Ningmai 9’, were moderately resistant; ‘Yangmai 23’ was moderately susceptible, and ‘Sumai 3’ and ‘Yangmai 21’ were resistant. ‘Yangmai 14’ ‘Yangmai 17’ and ‘Yangmai 23’ did not

收稿日期： 2019-07-18 **修订日期**： 2019-09-10
基金项目： 国家重点研发计划(2017YFD0201700)；河南省现代农业产业技术体系(S2010-01-05)
* 通信作者 E-mail：songyuli2000@126.com

contain *FHB*1 gene, while other varieties contained *FHB*1 gene. There was no significant correlation between the disease severity under the single-spikelet point inoculation (the resistance to spread of blight symptoms within a spike) and infected spikelet rate under the spray inoculation (the resistance to initial infection) ($r=0.27$, $P>0.05$); the percentage of scabbed kernels of wheat cultivars was positively correlated with DON accumulation under the two inoculation conditions ($r=0.86$, $P<0.01$; $r=0.88$, $P<0.01$); the disease severity was significantly positively correlated with the percentage of scabbed kernels and DON accumulation under the single-spikelet point inoculation ($r=0.71$, $P<0.01$, $r=0.81$, $P<0.01$); under the spray inoculation conditions, infected spikelet rate was significantly positively correlated with the disease severity, percentage of scabbed kernels, content of DON, content of ZEN ($r=0.78$, $P<0.01$; $r=0.73$, $P<0.01$; $r=0.78$, $P<0.01$; $r=0.63$, $P<0.01$). There was a significant positive correlation between the DON content and ZEN accumulation under the spray inoculation ($r=0.70$, $P<0.01$). In the absence of moderately resistant cultivars in the Huanghuai winter wheat region, the cultivars with resistance to kernel infection and DON accumulation should be applied for a better production of wheat.

Key words wheat cultivar; Fusarium head blight; resistance to Fusarium head blight; percentage of scabbed kernels; deoxynivalenol; *FHB*1

小麦赤霉病是由禾谷镰刀菌 *Fusarium graminearum* 引起的重要真菌病害,在北美洲、欧洲和亚洲广泛流行[1]。小麦赤霉病是我国长江中下游麦区和东北春麦区主要流行性病害,近年来,在黄淮冬麦区也频繁流行成灾[2-4]。小麦赤霉病不仅可造成产量损失,而且病菌产生的毒素污染小麦籽粒,危害人畜健康[2]。脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)和玉米赤霉烯酮(ZEN)是禾谷镰刀菌产生的主要毒素。

利用抗病品种是防治小麦赤霉病、减轻毒素危害最为经济、有效和安全的措施[5]。小麦对赤霉病的抗性包括抗侵染、抗扩展、抗籽粒侵染和抗毒素积累[6-7]。'苏麦 3 号'、扬麦系列和宁麦系列等小麦品种是小麦抗赤霉病育种中常用的抗源材料[8-10],其中扬麦系列和宁麦系列小麦品种也是长江中下游麦区的主栽品种[9-10]。对长江中下游地区小麦品种的抗侵染和抗扩展能力以及含有的抗性基因情况已有较多研究[10],对黄淮海冬麦区小麦品种的赤霉病抗性评价和籽粒中毒素积累水平也有报道[11-14],但是对小麦品种的赤霉病综合抗性评价(抗侵染、抗扩展、抗毒素积累和抗籽粒侵染能力)以及几种抗性之间的相关性研究较少。本研究旨在明确黄淮冬麦区主栽小麦品种对赤霉病的抗侵染、抗扩展、抗毒素积累和抗籽粒侵染能力以及这几种抗性之间的相互关系,为小麦品种抗性鉴定评价、抗病品种培育和利用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　供试小麦品种和田间试验设计

供试黄淮冬麦区主栽小麦品种:'郑麦 7698'、'矮抗 58'和'周麦 27'等 22 个(其中 3 个为对照品种),由河南省农业科学院植物保护研究所、河北省农业科学院植物保护研究所、山东省农业科学院植物保护研究所和安徽省农业科学院植物保护与农产品质量安全研究所提供;'扬麦 17'和'宁麦 9 号'等长江中下游麦区品种 9 个(其中 2 个为对照品种),由江苏省农业科学院种质资源与生物技术研究所提供。上述 5 个对照品种,包括抗病品种'苏麦 3 号'、中抗品种'扬麦 16',弱春性中感品种'郑麦 9023',半冬性中感品种'西农 979',感病品种'周麦 18'。对照品种'郑麦 9023'在黄淮南片和长江中下游都适宜种植,本文统计过程中只作为黄淮冬麦区品种计算。于 2017 年 10 月在河南省郑州市荥阳市试验地将供试 31 个小麦品种分别播种,每个品种 5 行,行长 2.0 m,行距 20 cm,每行播 10 g,按常规措施进行田间管理。

1.2　接种物的培养

试验菌株为 5 株毒素化学型为 15ADON 的禾谷镰刀菌,编号分别为 14LY9-2-4、14AY1-2、14YY1-3、14KF3-8、14ZK1-4(表 1),由河南省农业科学院植物保护研究所分离、鉴定和保存。将 −80℃冻存的镰刀菌菌株在新鲜的 PDA 平板上活化,25℃黑暗条件下培养 3 d,打取 10 块(5 mm)菌落边缘菌丝块转接到 150 mL 的羧甲基纤维素酯液体培养基(CMC)中,置于恒温摇床上,25℃ 150 r/min 摇培 5 d,每个菌株 3 瓶(每瓶 150 mL CMC)。分别将供试菌株的分生孢子悬浮液用双层纱布过滤,用血球计数板计数,用无菌水调整分生孢子浓度至 5×10^5 个/mL,然后将 5 个菌株的分生孢子悬浮液等体

积混合并置于－20℃的冰箱保存。单小花滴注接种和喷雾接种使用的分生孢子悬浮液浓度分别为 5×10^5 个/mL 和 5×10^4 个/mL。

表 1 供试禾谷镰刀菌的采集地和毒素化学型信息

Table 1 Origins and trichothecene types of *Fusarium graminearum* isolates in the study

菌株编号 Strain	来源 Source	种 Species	毒素化学型 Trichothecene type
14AY1-2	河南安阳	*F. graminearum* s. str.	15-ADON
14LY9-2-4	河南洛阳	*F. graminearum* s. str.	15-ADON
14YY1-3	河南原阳	*F. graminearum* s. str.	15-ADON
14KF3-8	河南开封	*F. graminearum* s. str.	15-ADON
14ZK1-4	河南周口	*F. graminearum* s. str.	15-ADON

1.3 田间接种方法

于小麦扬花初期，采用单小花滴注法和喷雾法两种方法分别接种。单小花滴注法：用剪刀剪去麦穗中部小穗的内外颖壳顶部少许，滴入镰刀菌分生孢子悬浮液(5×10^5 个/mL)20 μL，每个麦穗接种中部 1 个小穗，每个品种接种 30 穗，10 穗为 1 组，分别套塑料袋保湿，并记录接种后的天气情况，2 d 后去掉保湿袋，接种后 21 d 分别记录每穗的病级，病级标准参照《小麦抗病虫性评价技术规范 第 4 部分：小麦抗赤霉病评价技术规范》(NY/T 1443.4－2007)[15]中单小花滴注法的严重度分级来进行调查记载，以接种后 21 d 的平均病级作为小麦品种抗扩展性的评价标准，平均病级＝调查穗数总病级/总调查穗数。

喷雾法接种：采用禾谷镰刀菌分生孢子悬浮液(5×10^4 个/mL)喷雾 50 mL/m^2。使用背负式电动喷雾器(型号：3WBS-16A2，西安乐鑫电子科技有限公司)进行均匀喷雾，接种前先喷水保湿，每个品种接种 30 穗，10 穗为 1 组，分别套透明塑料袋保湿，2 d后去掉保湿袋，接种后第 5～10 天不断观察(本次试验调查时间为接种后第 10 天)，在小穗完全发病但穗轴没有发病时记录每个品种的病小穗数和总小穗数，从而明确不同小麦品种的抗侵染能力，接种后 21 d 分别记录每穗的病级，病级标准参照《小麦抗病虫性评价技术规范 第 4 部分：小麦抗赤霉病评价技术规范》(NY/T 1443.4－2007)[15]中土表接种法的严重度分级来进行调查记载，接种后 10 d 的病小穗率＝病小穗数/总小穗数×100%，平均病级＝调查穗数总病级/总调查穗数，病情指数 ＝∑(各级病穗数×病级数值)/(调查总穗数×4)×100；小麦成熟后，将两个接种方法每个处理的病穗分别装入网袋，晾干后 4℃冰箱中保存。使用前剥出病穗中小麦籽粒，并记录病粒数和总粒数，计算病粒率，病粒率＝病粒数/总粒数×100%。

1.4 DON 和 ZEN 毒素含量测定方法

将不同接种方法接种后收获的病穗中小麦籽粒剥出，籽粒样本用德国莱驰粉碎仪(ZM200，1.5 mm 不锈钢环筛)进行粉碎，过 20 目筛，然后称取粉碎后的样本 5 g 两份分别装入 50 mL 离心管中用于 DON 和 ZEN 测定，每个样品粉碎后，严格清理以避免相互污染，最后放入 4℃冰箱中保存。

DON 测定：将装有 5 g 样品的离心管中加入 25 mL的蒸馏水，用力振荡 3 min，并使用 Whatman No.1 滤纸过滤，收集滤液，然后用蒸馏水稀释 10、100、1 000 和 10 000 倍备用。使用 RIDASCREEN® DON 酶联免疫法呕吐毒素定量检测(R5906)试剂盒检测样品中 DON 毒素，操作步骤按照 ELISA 试剂盒说明书进行。标准样品浓度为 0、3.7、11.1、33.3、100 μg/L。在酶标仪上同时测定标准样品和待测样品 450 nm 处的吸光度值，每个样品重复测定 3 次。当滤液中 DON 毒素浓度超出检测范围时，使用其不同倍数的稀释液进行测定。使用 R-Biopharm 德国拜发应用软件 RIDA® SOFT Win(Z9999)中 DON 分析程序进行结果评估。并按照单次检测的 Logit/log 曲线进行分析，然后计算 3 次检测结果的平均值。

ZEN 测定：将装有 5 g 样品的离心管中加入 25 mL的 70%甲醇溶液，用力振荡 3 min，并使用 Whatman No.1 滤纸过滤，收集滤液，吸取 1 mL 滤液加入 1 mL 蒸馏水稀释，然后用 35%的甲醇溶液稀释 10 倍和 100 倍备用。使用 RIDASCREEN® FAST Zearalenon 酶联免疫法 ZEN 毒素定量检测(R5502)试剂盒检测样品中 ZEN 毒素，操作步骤按照 ELISA 试剂盒说明书进行。标准样品浓度为 0、

50、100、200、400 μg/L。在酶标仪上同时测定标准样品和待测样品 450 nm 处的吸光度值,每个样品重复测定 3 次。当滤液中 ZEN 毒素浓度超出检测范围时,使用其不同倍数的稀释液进行测定。使用 R-Biopharm 德国拜发应用软件 RIDA® SOFT Win (Z9999)中 FASTzea 分析程序进行结果评估。并按照单次检测的 Logit/log 曲线进行分析,然后计算 3 次检测结果的平均值。

1.5　抗性综合评价

依据单小花滴注法和喷雾法接种条件下的发病程度来综合评定其对赤霉病的抗性,通常以最高级别为准。本研究小麦赤霉病抗性鉴定使用的对照品种包括:抗病品种'苏麦 3 号',中抗品种'扬麦 16',弱春性中感品种'郑麦 9023',半冬性中感品种'西农 979'。其中平均病级≤'苏麦 3 号'的平均病级,为抗;'苏麦 3 号'的平均病级<平均病级<两个中感对照中平均病级的低值,为中抗;两个中感对照中平均病级的低值≤平均病级≤两个中感对照中平均病级的高值,为中感;平均病级>两个中感对照中平均病级的高值,为感。在本研究中具体的级别为单小花滴注条件下,平均病级≤1.0 为抗,1.0<平均病级<1.5 之间为中抗,1.5≤平均病级≤1.8 为中感,平均病级>1.8 为感;喷雾接种条件下,平均病级≤0.5 为抗,0.5<平均病级<1.7 为中抗,1.7≤平均病级≤2.0 为中感,平均病级>2.0 为感。

1.6　*FHB*1 抗性基因检测方法

将各个品种分别在室内盆栽条件下种植至三叶期,然后剪取幼嫩叶片,液氮速冻后置于−70℃冰箱保存备用。小麦幼嫩叶片基因组 DNA 以上海生工植物基因组试剂盒方法提取。用 His-InDel 标记来检测 *His* 基因类型。用引物 His3B-4 (F: 5′-ATGCGT-GCGCTGTACTTG-3′, R: 5′-CGTCACAGAGTC-CAGTGAAA-3′)对 *His* 基因进行扩增,PCR 体系和扩增程序参考朱展望等[16]的方法。扩增程序为:95℃预变性 3 min;94℃变性 30 s,65℃退火 30 s,68℃延伸2 min 30 s,共 35 个循环;最后 68℃延伸 7 min,4℃保存。用 1.5%琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物。扩增产物长度有两种类型 *His*-I (1 309 bp)、非 *His*-I (2 061 bp)。对照品种中'苏麦 3 号'含有的 *FHB*1 基因为 *His*-I 类型。

2　结果与分析

2.1　抗扩展鉴定

单小花滴注条件下的抗扩展鉴定结果(表 2)分析表明:黄淮冬麦区 19 个主栽品种和 3 个对照品种'郑麦 9023''西农 979'和'周麦 18'的平均病级为 1.5～3.8,而长江中下游麦区的 9 个小麦品种的平均病级为 1.0～1.6。

2.2　抗侵染鉴定

喷雾接种条件下(当小穗完全发病但穗轴没有症状时调查,本研究是接种后 10 d)的抗侵染鉴定结果(表 2)表明:包括黄淮冬麦区对照品种'郑麦 9023''西农 979'和'周麦 18'在内的 22 个黄淮冬麦区品种的病小穗率在 1.2%～48.6%之间;而长江中下游麦区的 9 个小麦品种的病小穗率在 0.8%～13.4%之间。

2.3　抗籽粒侵染鉴定

单小花滴注条件下的抗籽粒侵染鉴定结果(表 2)表明:黄淮冬麦区 19 个主栽品种和 3 个对照品种'郑麦 9023''西农 979'和'周麦 18'的病粒率为 1.5%～26.5%,其中病粒率在 5%以下的品种有'百农 207'(病粒率为 1.5%)、'西农 979'(病粒率为 2.0%)、'豫保 1 号'(病粒率为 2.0%)、'郑麦 9023'(病粒率为 3.0%)、'衡观 35'(病粒率为 5.0%)和'安科 157'(病粒率为 5.0%)等 6 个,占 27.3%;而长江中下游麦区的 9 个小麦品种的病粒率为 0～4.5%,其中'苏麦 3 号''扬麦 16'和'扬麦 23'的病粒率为 0。

喷雾接种条件下的抗籽粒侵染鉴定表明:黄淮冬麦区 19 个主栽品种和 3 个对照品种的病粒率为 1.0%～67.0%,其中病粒率在 10%以下的品种有'泰山 27'(病粒率为 1.0%)、'衡观 35'(病粒率为 2.0%)、'华成 3366'(病粒率为 3.0%)''郑麦 9023'(病粒率为 6.0%)和'良星 66'(病粒率为 9.0%)共 5 个,占 23%;而长江中下游麦区的 9 个小麦品种的病粒率为 0～22.5%,其中'苏麦 3 号'和'扬辐麦 4 号'的病粒率为 0。

2.4　抗毒素积累鉴定

单小花滴注条件下的抗毒素积累鉴定表明:黄淮冬麦区 19 个主栽品种和 3 个对照品种籽粒中的 DON 毒素含量为 2.95～30.53 mg/kg,其中籽粒中的 DON 毒素含量在 10 mg/kg 以下的品种有'郑麦 9023'(2.95 mg/kg)、'衡观 35'(5.16 mg/kg)、'豫

保 1 号'(5.28 mg/kg)、'西农 979'(6.79 mg/kg)、'周麦 27'(7.58 mg/kg)、'鲁原 502'(7.61 mg/kg)和'矮抗 58'(8.72 mg/kg)等7 个;而长江中下游麦区的 9 个小麦品种籽粒中的 DON 毒素含量为 0.90～3.78 mg/kg,其中'苏麦 3 号'籽粒中的 DON 毒素含量最低,为 0.90 mg/kg(表 2)。

喷雾接种条件下的抗毒素积累鉴定表明:黄淮冬麦区 19 个主栽品种和 3 个对照品种籽粒的 DON 毒素含量为 3.84～74.40 mg/kg,其中籽粒中 DON 毒素含量在 10 mg/kg 以下的品种有'泰山 27'(3.84 mg/kg)、'郑麦 9023'(6.10 mg/kg)和'衡观 35'(6.41 mg/kg);而长江中下游麦区的 9 个小麦品种籽粒的 DON 毒素含量为 0.40～14.72 mg/kg,其中'扬辐麦 4 号'籽粒中 DON 毒素含量最低,为 0.40 mg/kg。黄淮冬麦区 19 个主栽品种和 3 个对照品种籽粒中的 ZEN 毒素含量为 0.06～2.65 mg/kg,其中籽粒中 ZEN 毒素含量最低的为'郑麦 9023'。而长江中下游麦区的 9 个小麦品种籽粒中 ZEN 毒素含量为 0.04～0.46 mg/kg,其中籽粒中 ZEN 毒素含量最低的为'扬辐麦 4 号'和'扬麦 21'(表 2)。

2.5 抗性综合评价

依据单小花滴注法和喷雾法来确定小麦品种对赤霉病的抗性,黄淮冬麦区 22 个小麦品种中,'郑麦 7698''矮抗 58'和'周麦 27'等 20 个品种为感,占总数 91%,只有'郑麦 9023'和'西农 979' 2 个品种为中感,没有中抗和抗的品种;长江中下游麦区的9 个品种中'苏麦 3 号'和'扬麦 21'为抗性品种,'扬麦 23''宁麦 9 号'和'宁麦 13 号'等 6 个品种为中抗品种,'扬麦 14'为中感品种。

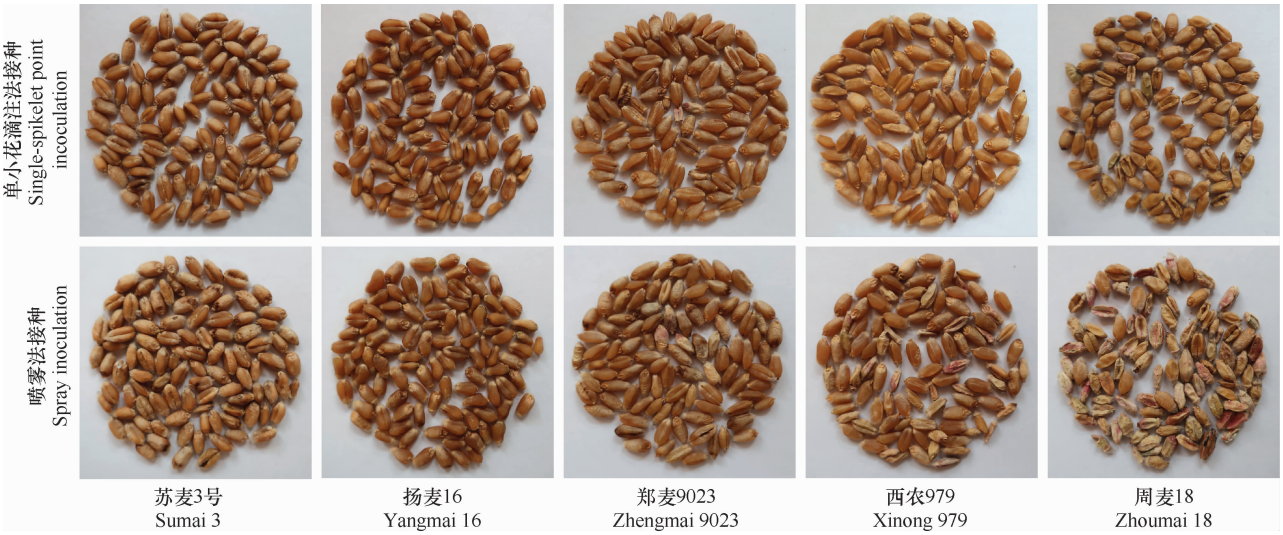


图 1 单小花滴注法接种和喷雾法接种条件下'苏麦 3 号''扬麦 16''郑麦 9023''西农 979'和'周麦 18'的籽粒

Fig. 1 Wheat kernels of 'Sumai 3' 'Yangmai 16' 'Zhengmai 9023' 'Xinong 979' and 'Zhoumai 18' under single-spikelet point inoculation and spray inoculation

2.6 不同抗性指标的相关分析

以单小花滴注法接种条件下的平均病级作为品种抗扩展指标,喷雾条件下接种 10 d 后的病小穗率作为品种抗侵染的指标,两种接种条件下的病粒率和籽粒中 DON 含量作为品种抗籽粒侵染和毒素积累的指标,将各个指标进行相关性分析表明:小麦品种的抗扩展能力与抗侵染能力没有显著相关性(r=0.27, P>0.05);两种接种条件下小麦品种的病粒率与 DON 毒素积累量呈极显著正相关(r=0.86, P<0.01;r=0.88, P<0.01);单小花滴注法接种条件下,小麦品种的病害严重度与病粒率、籽粒中 DON 含量都呈极显著正相关(r=0.71, P<0.01;r=0.81, P<0.01);喷雾接种条件下,小麦品种的病小穗率与平均病级、病粒率、籽粒中 DON 含量和 ZEN 含量都呈极显著正相关(r=0.78, P<0.01;r=0.73, P<0.01;r=0.78, P<0.01;r=0.63, P<0.01)。在毒素积累抗性上,DON 含量和 ZEN 含量呈极显著正相关(r=0.70, P<0.01)(表 3)。

表 2　黄淮冬麦区小麦品种抗侵染、抗扩展、抗籽粒侵染和抗毒素积累的综合抗性鉴定和 *His* 等位基因检测[1)]

Table 2　Identification of the comprehensive FHB resistance of wheat cultivars in the NCP to initial infection, spread of blight symptoms within a spike, kernel infection, DON accumulation and *His* allele detection

品种名称 Cultivar	适宜种植区域 Suitable for planting area	单小花滴注接种 Single-spikelet point inoculation			喷雾接种 Spray inoculation							*His* 等位基因检测 *His* allele detection
		平均病级 Average disease severity (ADS)	病粒率/% Percentage of scabbed kernels	籽粒中 DON 含量/mg·kg^{-1} Content of DON	病小穗率/% Infected spikelet rate	平均病级 ADS	平均病指 Average disease index	病粒率/% Percentage of scabbed kernels	籽粒中 DON 含量/mg·kg^{-1} Content of DON	籽粒中 ZEN 含量/mg·kg^{-1} Content of ZEN	综合抗性评价 Comprehensive evaluation of FHB resistance	
良星 66 Liangxing 66	黄淮北片	3.8	26.5	30.53	17.6	2.5	61.3	9.0	10.47	0.53	感 S	非 *His*-Ⅰ
泰山 27 Taishan 27	山东省	3.2	11.5	17.26	7.4	1.3	32.5	1.0	3.84	0.45	感 S	非 *His*-Ⅰ
安农 0711 Annong 0711	淮北区和淮北沿淮区	2.9	15.5	15.44	24.1	2.8	70.0	16.5	27.33	—	感 S	非 *His*-Ⅰ
百农 207 Bainong 207	黄淮南片	2.8	1.5	16.48	20.9	3.3	81.3	32.0	39.23	0.85	感 S	非 *His*-Ⅰ
泰农 18 Tainong 18	山东省	2.7	11.0	13.12	6.0	2.5	61.3	16.5	24.21	1.25	感 S	非 *His*-Ⅰ
济麦 23 Jimai 23	黄淮北片	2.6	13.0	11.31	21.4	3.1	76.3	34.5	24.85	0.60	感 S	非 *His*-Ⅰ
鲁原 502 Luyuan 502	黄淮北片	2.6	10.5	7.61	14.3	2.8	68.8	17.5	17.75	0.58	感 S	非 *His*-Ⅰ
华成 3366 Huacheng 3366	黄淮南片	2.4	7.5	10.67	1.2	1.4	35.0	3.0	15.87	0.24	感 S	非 *His*-Ⅰ
中麦 895 Zhongmai 895	黄淮南片	2.3	18.0	18.88	32.3	3.7	92.5	23.5	34.22	2.01	感 S	非 *His*-Ⅰ
周麦 27 Zhoumai 27	黄淮南片	2.2	13.5	7.58	34.0	4.0	100.0	40.0	34.42	2.65	感 S	非 *His*-Ⅰ
郑麦 379 Zhengmai 379	黄淮南片	2.2	22.0	23.71	10.3	2.8	70.0	22.0	22.82	0.18	感 S	非 *His*-Ⅰ
豫麦 49-198 Yumai 49-198	河南省	2.2	15.5	20.53	21.7	3.8	93.8	18.0	18.63	0.34	感 S	非 *His*-Ⅰ
山农 28 Shannong 28	黄淮北片	2.2	12.5	13.78	21.6	3.1	76.3	40.0	36.34	1.10	感 S	非 *His*-Ⅰ
良星 99 Liangxing 99	黄淮北片	2.2	14.0	15.09	26.5	3.5	86.3	21.5	21.02	1.23	感 S	非 *His*-Ⅰ
郑麦 7698 Zhengmai 7698	黄淮南片	2.0	7.5	11.96	48.6	3.8	95.0	67.0	74.40	—	感 S	非 *His*-Ⅰ
安科 157 Anke 157	沿淮、淮北地区	2.0	5.0	16.48	30.3	2.8	68.8	13.0	27.18	0.73	感 S	非 *His*-Ⅰ
豫保 1 号 Yubao 1	河南省	2.0	2.0	5.28	25.1	2.3	56.3	11.5	28.07	2.04	感 S	非 *His*-Ⅰ

续表 2　Table 2(Continued)

品种名称 Cultivar	适宜种植区域 Suitable for planting area	单小花滴注接种 Single-spikelet point inoculation			喷雾接种 Spray inoculation							*His* 等位基因检测 *His* allele detection
		平均病级 Average disease severity (ADS)	病粒率/% Percentage of scabbed kernels	籽粒中 DON 含量/mg·kg^{-1} Content of DON	病小穗率/% Infected spikelet rate	平均病级 ADS	平均病指 Average disease index	病粒率/% Percentage of scabbed kernels	籽粒中 DON 含量/mg·kg^{-1} Content of DON	籽粒中 ZEN 含量/mg·kg^{-1} Content of ZEN	综合抗性评价 Comprehensive evaluation of FHB resistance	
衡观 35 Hengguan 35	黄淮冬麦区	1.9	5.0	5.16	11.8	1.2	28.8	2.0	6.41	0.27	感 S	非 *His*-Ⅰ
矮抗 58 Aikang 58	黄淮冬麦区	1.8	6.0	8.72	44.9	2.6	65.0	17.5	28.55	0.40	感 S	非 *His*-Ⅰ
扬麦 14 Yangmai 14	江苏省	1.6	4.5	2.61	3.2	0.6	13.8	22.5	13.27	0.46	中感 MS	非 *His*-Ⅰ
扬麦 17 Yangmai 17	长江中下游	1.3	3.5	2.26	9.2	0.8	18.8	7.5	6.39	0.44	中抗 MR	非 *His*-Ⅰ
宁麦 9 号 Ningmai 9	江苏省	1.2	4.0	3.78	2.8	0.3	7.5	3.0	2.82	0.07	中抗 MR	*His*-Ⅰ
宁麦 13 Ningmai 13	长江中下游	1.1	2.5	1.48	4.8	0.5	11.3	3.5	3.96	0.25	中抗 MR	*His*-Ⅰ
扬辐麦 4 号 Yangfumai 4	江苏省	1.1	3.0	1.31	2.1	0.3	6.3	0.0	0.40	0.04	中抗 MR	*His*-Ⅰ
扬麦 21 Yangmai 21	长江中下游	1.0	1.5	1.23	0.8	0.2	3.8	2.0	3.94	0.04	抗 R	*His*-Ⅰ
扬麦 23 Yangmai 23	长江中下游	1.0	0.0	1.41	13.4	0.8	18.8	7.0	11.19	0.19	中抗 MR	非 *His*-Ⅰ
苏麦 3 号 Sumai 3	长江中下游	1.0	0.0	0.90	2.0	0.5	12.5	0.0	10.34	0.08	抗 R	*His*-Ⅰ
扬麦 16 Yangmai 16	江苏省	1.4	0.0	1.96	1.3	0.6	16.3	1.0	14.72	0.05	中抗 MR	非 *His*-Ⅰ
郑麦 9023 Zhengmai 9023	黄淮南片、长江中下游	1.8	3.0	2.95	7.1	1.7	42.5	6.0	6.10	0.06	中感 MS	非 *His*-Ⅰ
西农 979 Xinong 979	黄淮南片	1.5	2.0	6.79	24.3	2.0	50.0	33.0	20.55	0.70	中感 MS	非 *His*-Ⅰ
周麦 18 Zhoumai 18	黄淮南片	1.9	17.5	16.79	15.8	3.2	78.8	20.5	34.56	0.89	感 S	非 *His*-Ⅰ

1) 单小花滴注接种和喷雾接种条件下的小麦赤霉病严重度分级标准参照《小麦抗病虫性评价技术规范 第 4 部分:小麦抗赤霉病评价技术规范》(NY/T 1443.4—2007)。喷雾接种条件下的病小穗率为在小穗完全发病但穗轴没有发病时的病小穗数占总小穗数的比例,本次试验调查时间为接种后第 10 天。NCP=黄淮地区。符号"—"代表未检测。

The FHB disease grades for single-spikelet point inoculation and spray inoculation are based on the "Rules for resistance evaluation of wheat to disease and insect pests Part 4: Rule for resistance evaluation of wheat to wheat scab {*Fusarium graminearum* Schwabe [Teleomorph *Gibberella zeae* (Schwein) Petch]}" (NY/T 1443.4—2007). The FHB resistance to initial infection for spray inoculation is detected on the 10th day after inoculation. NCP=North China Plain. The symbol "—" represents not detected.

表 3　单小花滴注法接种和喷雾接种条件下平均病级、病粒率、DON 含量、ZEN 含量和病小穗率的相关系数[1)]

Table 3　Coefficients of correlation among average disease severity (ADS), percentage of scabbed kernels (PSK), content of DON (DON), content of ZEN (ZEN), and infected spikelet rate (ISR) under single-spikelet point inoculation and spray inoculation

		单小花滴注法接种 Single-spikelet point inoculation			喷雾接种 Spray inoculation			
		平均病级 ADS	病粒率 PSK	DON 含量 DON	病小穗率 ISR	平均病级 ADS	病粒率 PSK	DON 含量 DON
单小花滴注法接种 Single-spikelet point inoculation	病粒率	0.71**	1	0.86**	0.29	0.64**	0.29	0.26
	DON 含量	0.81**	0.86**	1	0.38*	0.69**	0.32	0.38*
喷雾接种 Spray inoculation	病小穗率	0.3	0.29	0.38*	1	0.78**	0.73**	0.78**
	平均病级	0.62**	0.64**	0.69**	0.78**	1	0.74**	0.77**
	病粒率	0.27	0.29	0.32	0.73**	0.74**	1	0.88**
	DON 含量	0.3	0.26	0.38*	0.78**	0.77**	0.88**	1
	ZEN 含量	0.35	0.33	0.26	0.63**	0.66**	0.61**	0.70**

1) 单小花滴注接种条件下的鉴定指标有平均病级、病粒率和 DON 含量;喷雾接种条件下的鉴定指标有病小穗率、平均病级、病粒率、DON 含量和 ZEN 含量,喷雾接种条件下的病小穗率为在小穗完全发病但穗轴没有发病时的病小穗数占总小穗数的比例,本次试验调查时间为接种后第 10 天。“*”“**”分别代表 $P\leqslant0.05$ 和 $P\leqslant0.01$。

Identification indicators of FHB resistance under single-spikelet point inoculation are disease severity, percentage of scabbed kernels, and content of DON. Identification indicators of FHB resistance under spray inoculation are infected spikelet rate, disease severity, percentage of scabbed kernels, content of DON, and content of ZEN. FHB resistance to initial infection is detected on the 10th day after inoculation, when the rachis is not infected and the spikelets are fully infected. The symbols "*" and "**" indicate that $P\leqslant0.05$ and $P\leqslant0.01$ repectively.

2.7　*FHB*1 抗性基因检测

黄淮冬麦区 19 个品种和 3 个对照品种中‘西农 979’‘郑麦 9023’和‘周麦 18’通过 His-InDel 标记中引物 His3B-4 对 *His* 基因扩增得到片段长度均为 2 000 bp左右,均属于非 *His*-Ⅰ类型,不含有 *FHB*1 基因。长江中下游麦区的‘宁麦 9 号’‘宁麦 13’‘扬辐麦 4 号’‘扬麦 21’和对照品种‘苏麦 3 号’扩增得到 *His* 基因片段长度均为 1 300 bp 左右,属于 *His*-Ⅰ类型,含有 *FHB*1 基因;长江中下游麦区的‘扬麦 14’‘扬麦 17’‘扬麦 23’和对照品种中的‘扬麦 16’扩增得到 *His* 基因片段长度均为 2 000 bp 左右,属于非 *His*-Ⅰ类型,不含有 *FHB*1 基因。

3　讨论

本研究中赤霉病综合鉴定结果表明:‘郑麦 7698’‘矮抗 58’和‘周麦 27’等黄淮冬麦区主栽品种中 20 个为感病品种,只有‘郑麦 9023’和‘西农 979’为中感品种,没有中抗和抗病品种,此结果与各个品种审定时的结论一致。长江中下游麦区的 9 个品种中‘扬麦 17’和‘宁麦 9 号’等 6 个品种为中抗品种,‘扬麦 14’为中感品种,‘苏麦 3 号’和‘扬麦 21’为抗病品种,其中‘扬麦 21’和‘扬麦 14’在品种审定时为中抗,‘扬麦 23’ 在品种审定时为中感,结论与长江中下游鉴定结果略有不同,可能是由于两个区域之间病原菌优势种群和气候差异造成。

单小花滴注条件下的平均病级与病粒率,籽粒中 DON 含量呈显著正相关($r=0.71$, $P<0.01$;$r=0.81$, $P<0.01$);喷雾条件下的平均病级与同样条件下的病粒率和籽粒中 DON 含量呈显著正相关($r=0.74$, $P<0.01$;$r=0.77$, $P<0.01$)。因此通过两种接种方法的平均病级进行抗性评价是可靠的。但是小麦品种平均病级并不能完全反映抗毒素积累能力[18-19]和其他抗性水平。例如,虽然不同抗感小麦品种间平均病级有差异,但在单小花滴注条件下,感病品种‘百农 207’‘豫保 1 号’‘衡观 35’和‘安科 157’的病粒率和中感对照品种‘西农 979’及‘郑麦 9023’的病粒率均≤5%。

小麦品种的抗扩展能力与抗侵染能力没有显著的相关性($r=0.27$, $P>0.05$)(表 3)。虽然长江中下游麦区的 9 个品种的抗扩展能力均高于黄淮冬麦区的 22 个品种。但在抗侵染能力上,病小穗率<5%的品种有 8 个,包括 1 个感病品种‘华成 3366’,5 个中抗品种(‘扬麦 21’‘扬辐麦 4 号’‘宁麦 9 号’‘扬麦 14’和‘宁麦 13’)以及对照抗病品种‘苏麦 3 号’和中抗品种‘扬麦 16’。此外,本研究中两种接种条件下,病粒率与籽粒中 DON 毒素含量呈极显著正相关的结论与徐飞等[17]的结论一致。

目前,在长江中下游麦区主要通过导入 *FHB*1 基因提高小麦品种的赤霉病抗性,并由此育成大量品种[9,20-21],本研究发现目前黄淮冬麦区主栽的小

麦品种都为感病和中感品种，且都不含有 *FHB1* 基因，与前人研究工作结果一致[16]。通过导入 *FHB1* 基因来提高黄淮冬麦区小麦品种的赤霉病抗性还在材料创制阶段[20]，但是黄淮冬麦区目前拥有较好赤霉病综合抗性的品种也存在，例如：弱春性中感品种‘郑麦 9023’、半冬性中感品种‘西农 979’。在目前黄淮冬麦区没有中抗品种的情况下，可以增加育种和鉴定目标为抗籽粒侵染和抗毒素积累的品种，在小麦品种推广过程中加以运用，可以达到较好的效果。

参考文献

[1] BAI Guihua, SHANER G. Scab of wheat: prospects for control [J]. Plant Disease, 1994, 78(8): 760 - 766.

[2] 陆维忠，程顺和，王裕中. 小麦赤霉病研究[M]. 北京：科学出版社，2001.

[3] 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 - 17.

[4] 黄冲，姜玉英，吴佳文，等. 2018 年我国小麦赤霉病重发特点及原因分析[J]. 植物保护，2019，45(2)：160 - 163.

[5] BAI Guihua, SHANER G. Management and resistance in wheat and barley to *Fusarium* head blight [J]. Annual Review of Phytopathology, 2004, 42: 135 - 161.

[6] MESTERHAZY A. Types and components of resistance to *Fusarium* head blight of wheat [J]. Plant Breeding, 1995, 114(5): 377 - 386.

[7] 刘易科，佟汉文，朱展望，等. 小麦赤霉病抗性机理研究进展[J]. 中国农业科学，2016，49(8)：1476 - 1488.

[8] 王裕中，杨新宁，肖庆璞. 小麦赤霉病抗性鉴定技术的改进及其抗源的开拓[J]. 中国农业科学，1982，15(5)：67 - 77.

[9] 张旭，姜朋，叶人元，等. 宁麦 9 号及其衍生品种的赤霉病抗性分析及抗性溯源[J]. 分子植物育种，2017，15(3)：279 - 286.

[10] 常蕾，张瑜，曲若端，等. 江苏省小麦新品系赤霉病抗性鉴定与评价[J]. 江苏农业科学，2018，46(16)：87 - 91.

[11] 封薇，刘太国，张敏，等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)在小麦籽粒中的积累分析[J]. 植物病理学报，2012，42(1)：25 - 31.

[12] 陈怀谷，蔡志祥，陈飞，等. 不同小麦品种抗赤霉病性类型和抗毒素积累能力分析[J]. 植物保护学报，2007，34(1)：32 - 36.

[13] 徐飞，杨共强，宋玉立，等. 不同小麦品种(系)对赤霉病的抗性和麦穗组织中 DON 毒素积累分析[J]. 植物病理学报，2014，44(6)：651 - 657.

[14] 张彬，李金秀，王震，等. 黄淮南片麦区主栽小麦品种对赤霉病抗性分析[J]. 植物保护，2018，44(2)：190 - 194.

[15] 中华人民共和国农业部. 小麦抗病虫性评价技术规范—第 4 部分：小麦抗赤霉病评价技术规范 NY/T 1443.4 - 2007 [S]. 北京：中国标准出版社，2007：1 - 6.

[16] 朱展望，徐登安，程顺和，等. 中国小麦品种抗赤霉病基因 *Fhb1* 的鉴定与溯源[J]. 作物学报，2018，44(4)：473 - 482.

[17] 徐飞，杨共强，王俊美，等. DON 毒素在小麦赤霉病抗感品种麦穗组织中的积累分析[J]. 植物保护，2016，42(1)：125 - 128.

[18] JI Fang, WU Jirong, ZHAO Hongyan, et al. Relationship of deoxynivalenol content in grain, chaff, and straw with Fusarium head blight severity in wheat varieties with various levels of resistance [J]. Toxins, 2015, 7(3): 728 - 742.

[19] 陈利锋，宋玉立，徐雍皋. 小麦赤霉病穗中脱氧雪腐镰刀菌烯醇量的变化[J]. 植物病理学报，1996，26(1)：25 - 28.

[20] 周淼平，姚金保，张平平，等. 黄淮麦区小麦抗赤霉病新种质的创制和筛选[J]. 麦类作物学报，2018，38(3)：268 - 274.

[21] 张宏军，宿振起，柏贵华，等. 利用 *Fhb1* 基因功能标记选择提高黄淮冬麦区小麦品种对赤霉病的抗性[J]. 作物学报，2018，44(4)：505 - 511.

（责任编辑：田 喆）

征订启事

欢迎订阅 2021 年《中国稻米》杂志

《中国稻米》是由农业农村部主管，中国水稻研究所主办，全国农业技术推广服务中心等单位协办的全国性水稻科学技术期刊，兼具学术性、技术性、知识性、信息性等特点。为国家新闻出版广电总局认定的首批学术类期刊，为中国科技核心期刊，还荣获全国农业期刊金犁奖技术类一等奖、浙江省优秀科技期刊一等奖等奖项。适合我国水稻产区各级技术人员及农业与粮食行政管理人员、科研教学人员和稻农阅读。本刊为双月刊，标准大 16 开本，单月 20 日出版。每期定价 10.00 元，全年 60.00 元，全国公开发行，**邮发代码**：32－31，国内刊号：CN33－1201/S，国际统一刊号：ISSN 1006－8082。欢迎新老读者到**当地邮局订阅**，也可直接汇款到本刊**编辑部订阅**。E-mail：zgdm@163.com，网址：www.zgdm.net；地址：浙江省杭州市富阳区新桥水稻所路 28 号；邮政编码：311400；电话(传真)：0571－63370271，63370368。

微信搜一搜 中国稻米