



83份西农系小麦品种(系)抗性鉴定 及抗病基因分子检测

程蓬* 郭璇 辛秀丽 仝嘉垚 解慕华 郭梦莹 郝肖娜
元魏魏 李强 王保通*

(西北农林科技大学植物保护学院,旱区作物逆境生物学国家重点实验室,陕西杨凌712100)

摘要:为西北农林科技大学小麦新育成品种(系)在黄淮海区的大面积推广,该研究对83份西农新育成的小麦品种(系)进行苗期抗条锈病和白粉病鉴定,成株期抗条锈病、白粉病、叶锈病和赤霉病鉴定,并在田间自然环境下对其抗性进行鉴定及对相关抗病基因进行分子检测。结果显示,在苗期人工接种鉴定中,有63、29和16份小麦品种(系)分别对条锈菌 *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* 生理小种CYR32、CYR33和CYR34表现出抗性,9份小麦品种(系)对3个条锈菌生理小种均表现出抗性;有10、3和0份小麦品种(系)分别对白粉菌 *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* 生理小种E15、E09和A13表现出抗性。在成株期人工接种鉴定中,有23、15、28和62份小麦品种(系)分别对条锈病、白粉病、叶锈病和赤霉病表现出抗性。在83份小麦品种(系)中有6份在苗期和成株期均对小麦条锈病表现出抗性。在田间抗性鉴定中,有57、6、65和40份小麦品种(系)分别对条锈病、白粉病、赤霉病及叶锈病表现出抗性。在83份小麦品种(系)中,3份含有Yr5基因,22份含有Yr9基因,3份含有Yr17基因,2份含有Pm24基因,14份含有Lr1基因,所占比例分别为3.6%、26.5%、3.6%、2.4%和16.8%。

关键词:小麦条锈病;小麦白粉病;小麦赤霉病;小麦叶锈病;分子检测;抗性;苗期;成株期

Disease resistance evaluation and molecular detection of resistance genes of 83 Xinong wheat varieties (lines)

Cheng Peng* Guo Xuan Xin Xiuli Tong Jiayao Xie Muhua Guo Mengying
Hao Xiaona Yuan Weiwei Li Qiang Wang Baotong*

(State Key Laboratory for Crop Stress Biology in Arid Areas, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: In order to promote the new wheat varieties (lines) developed by Northwest A&F University to a large area in the Huanghuai wheat-growing region, 83 newly developed wheat varieties (lines) of Northwest A&F University were evaluated for resistance to stripe rust and powdery mildew at the seedling stage, and resistant to stripe rust, powdery mildew, leaf rust, and *Fusarium* head blight (FHB), at the adult plant stage in this research; and their resistance was evaluated and molecular detection of related resistance genes was performed in the field. The results indicated that 63, 29 and 16 wheat varieties (lines) tested showed resistance to stripe rust physiological races CYR32, CYR33 and CYR34, respectively, and nine wheat varieties (lines) showed resistance to all three in the seedling with artificial inoculation; ten, three and 0 wheat varieties (lines) showed resistance to powdery mildew physiological

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1401000),国家自然科学基金面上项目(32072410),陕西省重点研发计划(2021ZDLNY01-01)

*通信作者(Authors for correspondence), E-mail:wangbt@nwsuaf.edu.cn, pengcheng@nwafu.edu.cn

收稿日期:2023-02-13

rices E15, E09 and A13, respectively. In the evaluation with artificial inoculation at the adult plant stage, 23, 15, 28 and 62 wheat varieties (lines) showed resistance to stripe rust, powdery mildew, leaf rust and FHB, respectively. Six out of the 83 wheat varieties (lines) showed resistance to wheat stripe rust at both seedling and adult plant stages. In field disease evaluation, 57, six, 65 and 40 out of 83 wheat varieties (lines) showed to stripe rust, powdery mildew, head blight and leaf rust, respectively. Of the 83 wheat varieties (lines) tested, three contained the *Yr5* gene, 22 contained the *Yr9* gene, three contained the *Yr17* gene, two contained the *Pm24* gene, and 14 contained the *Lr1* gene, with proportions of 3.6%, 26.5%, 3.6%, 2.4%, and 16.8%, respectively.

Key words: wheat stripe rust; wheat powdery mildew; wheat head blight; wheat leaf rust; molecular detection; resistance; seedling stage; adult stage

小麦属禾本科小麦属植物,是全球分布范围最广、种植面积最大、产量最高、贸易交易额最多的粮食作物之一,为第二大主粮作物,是我国最重要的粮食作物之一。根据国家统计局数据显示(https://www.gov.cn/xinwen/2022-12/12/content_5731454.htm),2022年我国小麦总产量可达13 772.3万t,总播种面积为2 351.85万hm²,单产为5 856 kg/hm²,而小麦条锈病、叶锈病、白粉病、赤霉病作为四大小麦重要病害,严重影响了我国小麦的产量和品质。

小麦条锈病是由担子菌门柄锈菌属 *Puccinia* sp. 的条形柄锈菌小麦专化型 *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* 引起的,属于气传病害,主要危害叶片,病害初期叶片上出现褪绿斑,后期叶片上出现条状黄色夏孢子堆,流行年份可导致小麦减产40%以上,甚至绝收,常在我国陕西、湖北和河南等省发生,防治措施主要以种植抗病品种为主,但大面积种植同一抗源的品种及病菌小种的改变均易造成其抗性丧失,病害流行(马占鸿,2018)。小麦叶锈病是由叶锈菌 *Puccinia triticina* 侵染引起的,被侵染叶片出现近圆形夏孢子堆,分布散乱,危害严重时产量损失可达50%以上,在全球各麦区均可发生,在我国主要发生在西南地区、西北地区、长江中下游地区、黄淮海流域的南部地区,目前尚无高抗小麦品种,主要依靠化学药剂进行防治(孙海燕等,2021; Ali et al., 2022)。小麦白粉病是由禾本科布氏白粉菌 *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* 引起的,主要危害叶片,被侵染叶片先出现圆形病斑,后出现白粉状霉层,最终变成浅褐色,生黑色小点,目前在我国华北和西北种植区发病日益严重,而白粉菌遗传变异速度快,易导致品种抗性丧失,主要通过药剂轮换或增效剂与常规杀菌剂组合进行防治(吴玉星等,2023)。小麦赤霉病主要由禾谷镰刀菌 *Fusarium graminearum* 引起,以穗腐为主要常见症状,先是出现粉红色霉层,后于病部出

现黑色颗粒物,可产生多种毒素,毒素不仅危害人畜健康,而且影响小麦产量,主要发生在我国长江中下游冬麦区以及东北春麦区,现也向黄淮麦区蔓延,目前无高抗小麦品种,以化学药剂防治为主(孙海燕等,2021)。

为有效防治小麦条锈病、叶锈病、白粉病和赤霉病这四大小麦重要病害,我国普遍种植抗病品种。西北农林科技大学选育的小麦品种(系)具有优质、抗病和高产的特点。建国以来,黄淮麦区6次大的小麦品种更新换代,其中4次主导品种都是由西北农林科技大学选育。为客观有效掌握西北农林科技大学小麦新育成品种抗性水平,对83份西北农林科技大学新育成的小麦品种(系)进行苗期抗条锈病和白粉病鉴定,成株期抗条锈病、白粉病、叶锈病和赤霉病鉴定,以及田间自然环境下抗病性鉴定及相关抗病基因的分子检测,以期小麦新品种在黄淮麦区的大面积推广提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试小麦品种:83份小麦品种(系)均来自西北农林科技大学农学院,其中7份含有已知抗条锈病基因的载体品种,3份含有已知抗白粉病基因的载体品种及1份含有已知抗赤霉病基因的载体品种;对照品种铭贤169、京双16和苏麦3均由西北农林科技大学小麦病原真菌监测与抗病遗传实验室提供。

供试病原菌:小麦条锈菌生理小种CYR32、CYR33和CYR34,小麦白粉菌生理小种E09、E15和A13,由本实验室提供;小麦条锈菌生理小种CYR32、CYR33和CYR34的混合菌株由本实验室所持小种等量混合获得,小麦白粉菌混合菌株采自曹新庄农场田间自然发病植株(不确定具体为何株系混合),小麦叶锈菌与赤霉病菌也为从曹新庄农场

分离的混合菌系(不确定具体为何株系混合),均由西北农林科技大学小麦病原真菌监测与抗病遗传实验室提供。

试剂和仪器:DNA专用抽提试剂盒,生工生物工程(上海)股份有限公司;其余试剂均为国产分析纯。DYCZ-20D型DNA序列分析电泳仪、JY-SPCT型水平电泳槽,北京君意东方电泳设备有限公司;QUANTUM ST4凝胶成像系统,北京五洲东方科技发展有限公司;Thermo高速冷冻离心机、S1000 PCR仪,赛墨飞世尔科技(中国)有限公司;BX53荧光显微镜,日本奥林巴斯株式会社;DRGL-P1000-B3人工气候箱,合肥华德利科学器材有限公司;GHX-9270B恒温培养箱,上海福玛实验设备有限公司;MF36+NB193制冰机,斯科茨曼制冰系统(上海)有限公司;FLUOstar® Omega酶标仪,德国BMG公司;BioSpec-nano微量分光光度计,岛津企业管理(中国)有限公司。

1.2 方法

1.2.1 苗期小麦品种(系)抗条锈病鉴定

用普通水分别将条锈菌生理小种CYR32、CYR33和CYR34配成浓度为4 mg/mL的孢子悬浮液。2019年在西北农林科技大学小麦病原真菌监测与抗病遗传实验室的人工气候箱内进行苗期小麦抗条锈病鉴定。每个供试小麦品种(系)挑选数粒饱满种子,将其播种在边长5 cm、高7.5 cm的方形盆中,置于12℃人工气候箱中培养7~10 d,待幼苗长到1心1叶时采用涂抹法接种条锈菌生理小种。清洗手部,蘸取清水轻轻摩擦叶片表面,脱去叶面蜡质层,再用接种针蘸取孢子悬浮液,将其涂抹到叶片上,接种后将幼苗置于7℃培养箱中黑暗培养24 h,取出后置于人工气候箱中培养,光照时间14~16 h,光照时温度为15~17℃,非光照时温度为12~16℃。每个品种每个小种接种10株,重复3次。待感病对照品种铭贤169充分发病时,调查供试小麦品种(系)的发病情况,参照Line & Chen(1995)方法对发病情况进行分级,根据分级确定反应型,其中0~5级为抗病,6~9级为感病。

1.2.2 苗期小麦品种(系)抗白粉病鉴定

将京双16小麦提前种植到直径9 cm、高8.6 cm的圆形盆中,待长到1叶1心时喷湿叶面,采用抖接法扩繁小麦白粉菌生理小种E09、E15和A13,备用。2019年在西北农林科技大学小麦病原真菌监测与抗病遗传实验室的人工气候箱内进行苗期小麦抗白粉病鉴定。每个供试小麦品种(系)挑选数粒饱满种

子,将其播种于边长5 cm、高7.5 cm的方形盆中,置于12℃人工气候箱中培养7~10 d,待幼苗长到1心1叶时喷湿叶面,采用抖接法将扩繁好的白粉菌生理小种E09、E15和A13均匀撒落到叶片上,再稍微喷湿叶面,盖上透明塑料罩子,置于温度15℃、光周期16 L:8 D的人工气候箱中,每个品种每个小种接种10株,重复3次,7~10 d后待感病对照京双16充分发病后调查供试小麦品种(系)的发病情况,参考盛宝钦(1988)方法对发病情况进行分级,根据分级确定反应型,其中0~2级为抗病,3~4级为感病。

1.2.3 成株期小麦品种(系)抗条锈病鉴定

于2019—2020年在西北农林科技大学曹新庄试验农场进行成株期供试小麦品种(系)抗条锈病鉴定。2019年10月开始播种,每个供试小麦品种(系)种植1行,行长1 m,采用条播法,每行约35粒种子,单粒均匀播种,行距25 cm,每20行种植2行保护行,保护行种植感病对照品种铭贤169,待小麦拔节初期,参照全国农业行业标准NY/T1443.1—2007采用撒粉法接种小麦条锈菌生理小种CYR32、CYR33和CYR34的混合菌株。将小麦条锈菌混合菌株与玉米粉按1:20体积比于25 mL试管中混匀,用纱布包住试管口,将其撒在小麦叶片上后喷水,随即迅速覆盖塑料布,四周压严,次日清晨揭去。待感病对照铭贤169充分发病时,调查供试小麦品种(系)的发病情况,共调查2次,2次调查间隔7~10 d。按照发病情况进行分级,0级,叶片上无任何症状;0级,叶片产生小型斑点;1级,叶片上有坏死斑和很少的夏孢子堆;2级,叶片上有较少的夏孢子堆;3级,叶片上有较大夏孢子堆;4级,叶片上夏孢子堆大而且周围叶组织不褪绿。按照0~4级标准记录反应型,0级为免疫,0级为近免疫,1级为高抗,2级为中抗,3级为中感,4级为高感。

1.2.4 成株期小麦品种(系)抗白粉病鉴定

于2019—2020年在西北农林科技大学曹新庄试验农场进行成株期供试小麦品种(系)抗白粉病鉴定。2019年10月开始播种,每个供试小麦品种(系)种植1行,行长1 m,采用条播法,每行约35粒种子,单粒均匀播种,行距25 cm,每20行种植2行保护行,保护行品种选用京双16。接种前5~7 d和接种后5~7 d分别进行田间灌溉以确保田间湿度。待小麦拔节后期将小麦白粉菌混合菌株在感病品种京双16幼苗上扩繁,当田间感病品种充分发病后采用扫抹法将扩繁的小麦白粉菌混合菌株分生孢子接到病圃诱发。小麦扬花期与灌浆期各鉴定1次抗性,每

行随机选择10株进行发病情况调查,参照陕西省地方标准(DB61/T 1014—2016)对发病情况进行分级。根据分级结果确定反应型,其中0级为免疫,1~2级为高抗,3~4级为中抗,5~6级为中感,7~8级为高感,9级为极感。

1.2.5 成株期小麦品种(系)抗叶锈病鉴定

2019—2020年在西北农林科技大学曹新庄试验农场进行成株期供试小麦品种(系)抗叶锈病鉴定。2019年10月开始播种,每行种植5个供试小麦品种(系),采用条播法,行长1 m,每20 cm内播种1个品种,每个品种播种8~10粒,行距为25 cm,每20行种植1行感病对照小麦品种铭贤169。待小麦拔节初期,利用撒粉法将叶锈菌混合菌系接种到叶片上,接种后用塑料纸覆盖叶片保湿14~16 h,第2天在太阳出来前揭开塑料纸。待铭贤169充分发病时调查供试小麦品种(系)的发病情况,按照中华人民共和国农业行业标准(NY/T1443.1—2007)分别记录各品种反应型、严重度和发病率,反应型采用0、0₁、1、2、3和4的6级标准进行统计,其中0~2级为抗病,3~4级为感病。

1.2.6 成株期小麦品种(系)抗赤霉病鉴定

2019—2020年在西北农林科技大学曹新庄试验农场进行成株期供试小麦品种(系)抗赤霉病鉴定。每个供试小麦品种(系)种植1行,采用条播法,每行约35粒,每行长1 m,行距25 cm,每20行种植2行对照品种苏麦3号,待小麦扬花初期,于阴天人工将小麦赤霉病菌混合菌系接种到麦穗中部的1个小花内,并对接种穗进行剪芒标记,每份材料至少接种10穗,接种后喷灌进行保湿。于乳熟后期调查各小麦品种的发病情况,参照国家农业行业标准(NY/T1443.4—2007)对严重度进行分级,分级标准:0级,无病;1级,发病小穗数占全穗1/4以下;2级,发病小穗占全穗1/4~2/4;3级,发病小穗占全穗2/4~3/4;4级,发病小穗占全穗3/4以上。计算3次重复的平均严重度,根据平均严重度确定品种(系)的抗性水平,其中0≤平均严重度<2为高抗,2≤平均严重度<3为中抗,3≤平均严重度<3.5为中感,3.5≤平均严重度<4为高感。

1.2.7 小麦品种(系)田间抗性鉴定

2020年在19个西北农林科技大学示范园共建单位进行田间抗性鉴定。19个共建单位分别为陕西省宝鸡市、渭南市、咸阳市和三原县,河南省长葛市、南阳市、永城市、平顶山市、周口市、驻马店市、洛

阳市和辉县,安徽省宿州市、合肥市和蚌埠市,江苏省连云港市和宿迁市,湖北省襄阳市、甘肃省平凉市,小麦条锈病成株期抗性鉴定方法和标准同1.2.3,小麦白粉病成株期抗性鉴定方法和标准同1.2.4,小麦叶锈病成株期抗性鉴定方法和标准同1.2.5,小麦赤霉病成株期抗性鉴定方法和标准同1.2.6。

1.2.8 小麦品种(系)抗病基因的分子检测

待苗期鉴定材料长至1叶1心期,剪取小麦叶片,采用CTAB法提取83份小麦品种(系)的DNA,采用分光光度法用ddH₂O将DNA浓度调至100 ng/μL。分别利用抗小麦条锈病基因*Yr5*、*Yr9*、*Yr10*、*Yr15*、*Yr17*、*Yr18*和*Yr26*,抗小麦白粉病基因*Pm2a*、*Pm21*和*Pm24*,抗小麦抗叶锈病基因*Lr1*及抗小麦赤霉病基因*Fhb1*的特异性分子标记引物(表1)对83份小麦品种(系)进行PCR检测,引物均委托生工生物工程(上海)股份有限公司合成。*Yr5*、*Pm2a*和*Fhb1*基因同时用普通PCR引物及KASP引物*Yr5-candidate*、*ctg_81718*、*TAHRC*进行检测(Lagudah et al., 2009; Marchal et al., 2018; Su et al., 2018)。KASP引物共有3条,其中1条引物为通用下游引物,另2条引物带有荧光接头,因此其结果可通过荧光检测进行直观判断。

7.57 μL KASP反应体系:2.5 μL DNA、2.5 μL 2×KASP Master Mix、0.07 μL 引物 MIX及2.5 μL ddH₂O。KASP扩增程序:94 °C预变性15 min;94 °C变性20 s,55~61 °C退火60 s,10个循环数;94 °C变性20 s,55 °C退火60 s,26个循环数。*Yr5*基因PCR扩增体系和程序参考Marchal et al.(2018),*Yr9*基因PCR扩增体系和程序参考Liu et al.(2008)和Francis et al.(1995),*Yr10*基因PCR扩增体系和程序参考Singh et al.(2009),*Yr15*基因PCR扩增体系和程序参考Klymiuk et al.(2018),*Yr17*基因PCR扩增体系和程序参考Helguera et al.(2003),*Yr26*基因PCR扩增体系和程序参考Lagudah et al.(2006; 2009),*Pm2a*基因PCR扩增体系和程序参考Chen et al.(2019),*Pm21*基因PCR扩增体系和程序参考董娜等(2018),*Pm24*基因PCR扩增体系和程序参考延荣等(2020),*Lr1*基因PCR扩增体系和程序参考Qiu et al.(2007)、*Fhb1*基因PCR扩增体系和程序参考Su et al.(2018)。PCR扩增产物采用琼脂糖凝胶电泳及聚丙烯酰胺凝胶电泳进行检测。将KASP产物在酶标仪上进行荧光检测,当荧光与阳性对照聚集在一起即含有该抗病基因。

表1 小麦抗病基因检测所用特异性引物

Table 1 Specific primers used in the detection of disease resistance genes in wheat

基因 Gene	引物名称 Primer name	引物序列(5'-3') Primer sequence (5'-3')	退火温度 Annealing temperature/°C	特异性片段 Specific fragment/bp	参考文献 Reference
<i>Yr5</i>	S19M93-100	F: TAATTGGGACCGAGAGACG R: TTCTTGCAGCTCCAAAACCT	62	100	Donini et al., 2007
	<i>Yr5</i> -candidate	A: GAAGGTGACCAAGTTCATGCTGCG- CCCCGTTTTTCGAAAAAATA B: AAGGTCGGAGTCAACGGATTCTAG- CATCAAACAAGCTAAATA A: ATGTCGAAATATTGCATAACATGG		-	Marchal et al., 2018
<i>Yr9</i>	H20	F: GTTGAAGGGAGCTCGAGCTG R: GTTGGGCAGAAAGGTCGACATC	60	1 598	Liu et al., 2008
	AF1	F: GGAGACATCATGAAACATTTG	60	1 500	Francis et al., 1995
	AF4	R: CTGTTGTTGGGCAGAAAAG			
<i>Yr10</i>	Yr10F	F: TCAAAGACATCAAGAGCCGC	64	540	Singh et al., 2009
	Yr10R	R: TGGCCTACATGAACTCTGGAT			
	Yr10F1 Yr10R1	F: TTGGAATTGGCGACAAGCGT R: GTGATGATTACCCACTTCCTC	64	755	Singh et al., 2009
<i>Yr15</i>	uhw300	F: CCGTGTCAGCCACCTACAAT R: GCACTCTACCACCGAACACA	58	936	Klymiuk et al., 2018
	uhw301R	F: GGAGATAGAGCACATTACAGAC R: TTTCGCATCCCACCCTACTG	60	936	Klymiuk et al., 2018
<i>Yr17</i>	VENTRIUP	F: AGGGGCTACTGACCAAGGCT	65	262	Helguera et al., 2003
	LN2	R: GCAGCTACAGCAGTATGTACACAAAA			
	SC385	F: CTGAATACAAACAGCAAACCAG R: ACAGAAAAGTGATCATTTCCATC	54	400	Helguera et al., 2003
<i>Yr18</i>	Cslv34	F: GTTGGTTAAGACTGGTGATGG R: TGCTTGCTATTGCTGAATAGT	58	150	Lagudah et al., 2006
		F: TTGATGAAACCAGTTTTTTTTCTA R: GCCATTTAACATAATCATGATGGA	58	517	Lagudah et al., 2009
	Csfvrs3	F: GTTGGTTAAGACTGGTGATGG R: TGCTTGCTATTGCTGAATAGT	58	150	Lagudah et al., 2006
<i>Yr26</i>	WE173	F: GGGACAAGGGGAGTTGAAGC R: GAGAGTTCCAAGCAGAACACA	55	510	Wang et al., 2008
<i>Pm2a</i>	ctg_81718	A: AGTCTCTCGGAGATGCTCATAGA B: GTCTCTCGGAGATGCTCATAGG A: CATATGAACACACGCACACACTCTT		-	Chen et al., 2019
<i>Pm21</i>	SCAR1400	F: CACTCTCCTCAAACCTTGAAG R: CACTCTCCTCCACTAACAGAGG	55	1 400	董娜等, 2018 Dong et al., 2018
	SCAR1256	F: CACTCTCCTCCACTAACAGAGG R: GTTTGTTACGTTGAATGAATTC		1 256	
<i>Pm24</i>	Xgwm337	F: CCTCTCCTCCCTCACTTAGC R: TGCTAACTGGCCTTTGCC	57	204	延荣等, 2020 Yan et al., 2020
<i>Fhb1</i>	His-indel	F: ATGCGTGCCTGTACTTG R: CGTCACAGAGTCCAGTGAAA	65	1 309	Su et al., 2018
	TAHRC	A: TTGGGCTCACGTCGTGCAAATGGT B: TGTCTGTTTCGCTGGGATG A: CTTCCAGTTTCTGCTGCCAT		-	Su et al., 2018
<i>Lr1</i>	WR003	F: GGGACAGAGACCTTGGTGGA R: GACGATGATGATTTGCTGCTGG	58		Qiu et al., 2007

2 结果与分析

2.1 苗期83份小麦品种(系)的抗性鉴定结果

2.1.1 对条锈病的抗性鉴定结果

在83份小麦品种(系)中,西农1号、西农38、西农66等61份小麦品种(系)对小麦条锈菌生理小种CYR32表现出高抗,秦蓝1号和西农8852对其表现为中抗;西农239、西农253及西农530等11份品种(系)对小麦条锈菌生理小种CYR33表现出高抗,西农569、西农6628及西农8087等18份小麦品种(系)对其表现为中抗;西农253、西农853和西农256等6份小麦品种(系)对小麦条锈菌生理小种CYR34表现为高抗,西农530、西农281和西农286等10份小麦品种(系)对其表现为中抗(表2)。西农253、西农530、西农853、西农1353、西农256、西农518、西农

8208、西农936及普冰037共9份小麦品种(系)对小麦条锈菌3个生理小种均表现出抗性,占有供试品种(系)的9.6%(表2)。

2.1.2 对白粉病的抗性鉴定结果

在83份小麦品种(系)中,西农132、西农1号、西农286、西农684、秦紫1号、普冰9945、西农837、秦蓝1号、西农286和西农287共10份小麦品种(系)对小麦白粉菌生理小种E15表现出抗性,占有供试材料的12.1%,其中西农132表现为高抗,其余9份表现为中抗;西农878、Hm162及Hm161对小麦白粉菌生理小种E09表现出抗性,占有供试品种的3.6%,其中西农878表现为高抗,其余2份均表现为中抗;无小麦品种(系)对小麦白粉菌生理小种A13表现出抗性;无小麦品种(系)同时抗小麦白粉菌3个生理小种(表2)。

表2 苗期及成株期83份小麦品种(系)抗性鉴定结果和携带的抗病基因

Table 2 Identification of disease resistance and relevant genes of 83 wheat varieties (lines) at seedling and adult stages

品种(系) Variety (lines)	苗期抗性评价 Resistance evaluation at seedling stage						成株期抗性评价 Resistance evaluation at adult stage				携带 基因 Carrier gene
	条锈菌生理小种 <i>Puccinia striiformis</i> f. <i>sp. tritici</i>			白粉菌生理小种 <i>Blumeria graminis</i> f. <i>sp. tritici</i>			抗条锈病 Stripe rust resistance	抗白粉病 Powdery mildew resistance	抗叶锈病 Leaf rust resistance	抗赤霉病 <i>Fusarium</i> head blight resistance	
	CYR32	CYR33	CYR34	E09	E15	A13					
西农1号 Xinong 1	HR	MS	MS	HS	MR	HS	MS	HS	HS	MR	
西农38 Xinong 38	HR	HS	HS	HS	MS	HS	MS	MS	MS	MR	<i>Lr1</i>
西农66 Xinong 66	HR	MS	MS	HS	MS	HS	MS	HS	HS	MS	<i>Yr9, Lr1</i>
西农132 Xinong 132	MS	MS	MS	HS	HR	HS	HS	MR	HS	MR	<i>Pm24</i>
西农239 Xinong 239	HR	HR	MS	HS	MS	HS	MR	HS	MS	MR	<i>Yr17</i>
西农253 Xinong 253	HR	HR	HR	MS	MS	HS	HR	HS	MS	MR	<i>Yr9</i>
西农261 Xinong 261	MS	MS	MS	MS	MS	HS	MS	HS	HS	MS	
西农281 Xinong 281	MS	MS	MR	HS	HS	HS	HR	HS	MS	HR	
西农286 Xinong 286	HR	MS	MR	HS	MR	HS	MS	HS	MS	HR	<i>Yr9</i>
西农368 Xinong 368	HS	MS	MS	MS	HS	HS	HS	HS	MR	MS	
西农418 Xinong 418	HS	MS	MS	HS	HS	HS	HS	MR	HS	HS	
西农419 Xinong 419	MS	MS	MS	HS	MS	HS	HS	MS	MR	HR	<i>Pm24, Lr1</i>
西农530 Xinong 530	HR	HR	MR	HS	HS	HS	HR	HS	MS	HR	
西农569 Xinong 569	HR	MR	MS	MS	MS	HS	MR	MS	HR	HR	<i>Yr9, Yr17</i>

续表 2 Continued

品种(系) Variety (lines)	苗期抗性评价 Resistance evaluation at seedling stage						成株期抗性评价 Resistance evaluation at adult stage				携带 基因 Carrier gene
	条锈菌生理小种 <i>Puccinia striiformis</i> f. <i>sp. tritici</i>			白粉菌生理小种 <i>Blumeria graminis</i> f. <i>sp. tritici</i>			抗条锈病 Stripe rust resistance	抗白粉病 Powdery mildew resistance	抗叶锈病 Leaf rust resistance	抗赤霉病 <i>Fusarium</i> head blight resistance	
	CYR32	CYR33	CYR34	E09	E15	A13					
西农 599 Xinong 599	HR	MS	MS	MS	HS	HS	MS	HS	HR	MR	
西农 681 Xinong 681	HR	HR	MS	MS	HS	HS	HS	MS	HS	MR	<i>Yr9</i>
西农 684 Xinong 684	HS	MS	MS	HS	MR	HS	MS	MR	HS	HR	
西农 833 Xinong 833	MS	MS	MS	HS	HS	HS	MS	HS	HS	MS	<i>Yr9, Lr1</i>
西农 834 Xinong 834	HR	HS	MS	HS	HS	HS	MS	HS	MS	HR	
西农 835 Xinong 835	HS	HS	MS	HS	HS	HS	HS	HS	MS	MR	
西农 853 Xinong 853	HR	HR	HR	MS	HS	HS	MS	HS	HS	MR	<i>Yr5</i>
西农 864 Xinong 864	HR	MS	HS	HS	HS	HS	MS	MR	HS	MR	
西农 875 Xinong 875	HR	MS	MS	HS	MS	HS	HS	HS	HS	MR	
西农 878 Xinong 878	HR	MS	MS	MR	HS	HS	HS	HS	HS	MR	<i>Lr1</i>
西农 879 Xinong 879	HR	MS	MS	MS	HS	HS	MS	HS	HS	MR	<i>Yr9</i>
西农 883 Xinong 883	HR	MR	MS	HS	HS	HS	MS	HS	HR	HR	<i>Yr9</i>
西农 884 Xinong 884	MS	HS	HS	HS	HS	HS	MS	HS	MS	MR	
西农 885 Xinong 885	MS	HS	MS	MS	HS	HS	HS	HS	MR	MR	
西农 890 Xinong 890	HR	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	MR	MS	<i>Lr1</i>
西农 891 Xinong 891	MS	MR	MS	HS	HS	HS	HS	HS	MR	MR	<i>Lr1</i>
西农 892 Xinong 892	MS	HS	MS	HS	HS	HS	MS	HS	HR	MR	<i>Lr1</i>
西农 908 Xinong 908	MS	HS	HS	HS	MS	HS	MR	HS	MS	HR	
西农 916 Xinong 916	MS	HS	MS	HS	MS	HS	MS	HS	MR	MR	<i>Yr9</i>
西农 935 Xinong 935	HR	MS	MS	HS	MS	HS	MS	HS	MS	MR	
西农 937 Xinong 937	HR	HS	MS	HS	HS	HS	MS	HS	HS	HR	
西农 1066 Xinong 1066	HR	MR	MS	HS	HS	HS	MS	HS	MR	MR	
西农 1098 Xinong 1098	HR	MR	MS	HS	MS	HS	MS	HS	MR	MS	<i>Yr9</i>
西农 1401 Xinong 1401	HR	MR	MS	HS	HS	HS	MR	MS	MS	MR	<i>Yr9</i>
西农 1353 Xinong 1353	HR	MR	MR	HS	HS	HS	MR	MR	HS	MR	<i>Yr9</i>
西农 1355 Xinong 1355	HR	MR	HS	HS	MS	HS	MS	MS	HS	HR	<i>Yr9</i>

续表 2 Continued

品种(系) Variety (lines)	苗期抗性评价 Resistance evaluation at seedling stage						成株期抗性评价 Resistance evaluation at adult stage				携带 基因 Carrier gene
	条锈菌生理小种 <i>Puccinia striiformis</i> f. sp. <i>tritici</i>			白粉菌生理小种 <i>Blumeria graminis</i> f. sp. <i>tritici</i>			抗条锈病 Stripe rust resistance	抗白粉病 Powdery mildew resistance	抗叶锈病 Leaf rust resistance	抗赤霉病 <i>Fusarium</i> head blight resistance	
	CYR32	CYR33	CYR34	E09	E15	A13					
西农 1688 Xinong 1688	HR	MS	MS	HS	MS	HS	MS	HS	HS	MR	<i>Yr9</i>
西农 6628 Xinong 6628	HR	MR	MS	HS	MS	HS	MR	HS	HS	MR	<i>Yr9</i>
西农 8087 Xinong 8087	HR	MR	MS	HS	MS	HS	HR	HS	HS	MR	<i>Yr9</i>
西农 8097 Xinong 8097	HR	MS	MR	MS	HS	HS	HR	HS	HS	HR	<i>Yr9</i>
西农 8631 Xinong 8631	HR	MS	MS	MS	HS	HS	MS	HS	MR	HR	<i>Yr9</i>
西农 8806 Xinong 8806	HR	MS	MS	MS	HS	HS	HS	HS	HS	HR	<i>Lr1, Yr9</i>
西农 9811 Xinong 9811	HR	MR	MS	MS	HS	HS	MR	HS	MR	HR	
Hm162	HR	HS	MS	MR	HS	HS	HR	HS	HR	HR	
Hm161	HR	MS	MS	MR	MS	HS	MS	HS	HS	MR	
秦紫 1 号 Qinzi 1	HR	HS	MR	MS	MR	HS	MR	HS	MR	HR	
秦紫 2 号 Qinzi 2	HR	MS	MS	MS	HS	HS	HS	HS	HS	HR	<i>Yr9</i>
小偃 17 Xiaoyan 17	HR	MS	MS	MS	HS	HS	MS	HS	HS	HR	<i>Yr9</i>
普冰 096 Pubing 096	HR	MS	HS	MS	MS	HS	MS	MS	MR	HR	
普冰 125 Pubing 125	MS	HS	HS	MS	HS	HS	HS	HS	MR	HR	
普冰 167 Pubing 167	HR	MS	MR	MS	MS	HS	HS	HS	MS	MR	<i>Yr9</i>
普冰 9945 Pubing 9945	HR	MR	MS	HS	MR	HS	HS	MS	MR	MR	
西农 256 Xinong 256	HR	HR	HR	MS	MS	HS	HR	MR	MS	MR	
西农 287 Xinong 287	HR	HR	MS	MS	MR	HS	MR	MS	HS	MR	
西农 288 Xinong 288	MS	HR	MS	HS	HS	HS	MS	MR	MS	HS	
西农 518 Xinong 518	HR	MR	MR	HS	HS	HS	HR	MS	MS	MS	
西农 528 Xinong 528	HR	MS	MS	MS	MS	HS	HR	MR	HR	MS	
西农 531 Xinong 531	HR	MS	MS	HS	MS	HS	HS	HS	HR	HS	
西农 537 Xinong 537	HR	MS	MR	HS	MS	HS	HR	MR	MS	HS	
西农 579 Xinong 579	HR	MS	HR	HS	MS	HS	MS	MR	MS	MS	
西农 612 Xinong 612	HR	MS	HS	HS	MS	HS	HS	HS	MS	MS	<i>Yr17</i>
西农 635 Xinong 635	HR	MS	MS	HS	HS	HS	MS	MR	MS	MS	
西农 8208 Xinong 8208	HR	MR	MR	HS	HS	HS	MR	MR	MS	MR	

续表 2 Continued

品种(系) Variety (lines)	苗期抗性评价 Resistance evaluation at seedling stage						成株期抗性评价 Resistance evaluation at adult stage				携带 基因 Carrier gene
	条锈菌生理小种 <i>Puccinia striiformis</i> f. sp. <i>tritici</i>			白粉菌生理小种 <i>Blumeria graminis</i> f. sp. <i>tritici</i>			抗条锈病 Stripe rust resistance	抗白粉病 Powdery mildew resistance	抗叶锈病 Leaf rust resistance	抗赤霉病 <i>Fusarium</i> head blight resistance	
	CYR32	CYR33	CYR34	E09	E15	A13					
西农 8226 Xinong 8226	HR	MR	MS	HS	MS	HS	HS	HS	MS	MR	<i>Lr1</i>
西农 823 Xinong 823	HR	MS	HS	HS	MS	HS	MR	HS	MS	MR	
西农 837 Xinong 837	MS	HR	MS	HS	MR	MS	HS	MS	MS	MR	
西农 863 Xinong 863	MS	MS	MS	HS	MS	HS	HS	MS	MS	MS	
西农 8852 Xinong 8852	MR	MS	HS	HS	HS	HS	MR	MR	MR	MR	
西农 921 Xinong 921	HS	MS	HS	HS	MS	HS	MS	HS	MR	MS	
西农 936 Xinong 936	HR	HR	HR	HS	HS	MS	MS	HS	MR	HR	<i>Lr1</i>
Hm158	HR	HR	HS	HS	HS	HS	MR	HS	MS	MS	
Hm939	HR	MR	HS	MS	HS	MS	HS	HS	MR	HS	<i>Yr5</i>
M07-562	HR	MS	HS	HS	MS	HS	MS	MR	MS	HR	<i>Lr1</i>
普冰 037 Pubing 037	HR	MR	HR	HS	MS	HS	HS	HS	MS	HR	<i>Yr5</i>
普冰 116 Pubing 116	HR	HS	MS	HS	MS	MS	MS	HS	MR	MR	
普冰 324 Pubing 324	HR	MR	MS	MS	MS	HS	HS	HS	MS	MS	
普冰 802 Pubing 802	HR	HS	MS	HS	MS	MS	MS	MR	HR	MR	<i>Lr1</i>
秦蓝 1号 Qinlan 1	MR	MS	MS	HS	MR	MS	HS	HS	HS	MR	<i>Lr1</i>
西农 628 Xinong 628	HR	MS	MS	HS	MR	HS	HS	HS	MR	MS	

HR: 高抗; MR: 中抗; MS: 中感; HS: 高感。HR: High resistance; MR: medium resistance; MS: medium susceptibility; HR: high susceptibility.

2.2 成株期83份小麦品种(系)的抗性鉴定结果

在83份小麦品种(系)中,西农239、西农253、西农281、西农530、西农569、西农908、西农1401、西农1353、西农6628、西农8087、西农8097、西农9811、Hm162、秦紫1号、西农256、西农287、西农518、西农528、西农537、西农8208、西农823、西农8852和Hm158共23份小麦品种(系)对小麦条锈病表现出抗性,占有供试品种(系)的27.7%,其中西农253、西农530、西农1353、西农518、西农8208、西农256六份在苗期也表现为抗性。西农368、西农419、西农569、西农599、西农883、西农885、西农890、西农891、西农892、西农916、西农1066、西农1098、西农8631、西农9811和Hm162等28份小麦品种(系)对小麦叶锈病表现出抗性,占有供试品种

(系)的33.7%。西农132、西农418、西农684、西农864、西农1353、西农256、西农288、西农528、西农537、西农579、西农635、西农8208、西农8852、M07-562和普冰802共15份小麦品种(系)对小麦白粉病表现出抗性,占有供试品种(系)的18.0%。西农1号、西农38、西农132、西农239、西农253、西农281和西农286等62份小麦品种(系)对小麦赤霉病表现出抗性,占有供试品种(系)的74.6%(表2)。

在83份小麦品种(系)中,10份小麦品种(系)表现兼抗3种及以上病害,其中1份小麦品种(系)同时抗小麦条锈病、叶锈病、白粉病及赤霉病这4种病害,为西农8852;其他9份小麦品种(系)同时抗3种病害,其中西农528同时抗小麦条锈病、叶锈病和白粉病,西农569、西农9811、Hm162及秦紫1号同时

抗小麦条锈病、叶锈病和赤霉病,西农 8208、西农 1353 和西农 256 同时抗小麦条锈病、白粉病和赤霉病,普冰 802 同时抗小麦白粉病、叶锈病和赤霉病(表 2)。

2.3 83份小麦品种(系)的田间抗性鉴定结果

在黄淮麦区 19 个市(县)种植区中,57 份小麦品种(系)均对小麦条锈病表现出抗性,40 份小麦品种(系)均对小麦叶锈病表现出抗性,6 份小麦品种

(系)均对小麦白粉病表现出抗性,有 65 份小麦品种(系)均对小麦赤霉病表现出抗性。在黄淮麦区 19 个市(县)种植区中,有 34 份小麦品种(系)对 2 种或 3 种病害表现出抗性,其中普冰 802 对 3 种病害表现出抗性。在黄淮麦区 19 个市县种植区中,西农小麦品种抗小麦条锈病水平最高,抗小麦白粉病水平最低(表 3)。

表 3 在黄淮麦区 19 个市(县)种植区中 83 份小麦品种(系)的田间抗性鉴定结果

Table 3 Results of field resistance identification of 83 wheat varieties (lines) in 19 cities or counties in the Huanghuai wheat-growing region

种植区 Planting area	抗条锈病 Stripe rust resistance		抗叶锈病 Leaf rust resistance		抗白粉病 Powdery mil- dew resistant		抗赤霉病 <i>Fusarium</i> head blight resistance		兼抗品(系)数 No. of resistant lines
	HR	MR	HR	MR	HR	MR	HR	MR	
宝鸡市 Baoji City	30	23	21	39	2	22	24	34	17
三原县 Sanyuan County	15	31	11	32	1	7	38	16	6
渭南市 Weinan City	13	39	15	29	1	7	16	40	7
长葛市 Changge City	3	15	4	12	0	2	8	13	1
辉县 Hui County	1	15	4	12	0	8	8	8	8
永城市 Yongcheng City	15	2	12	5	3	13	7	10	15
南阳市 Nanyang City	2	13	9	3	4	13	4	14	7
平顶山市 Pingdingshan City	4	15	6	11	3	6	19	0	7
驻马店市 Zhumadian City	2	16	0	9	2	17	16	3	8
宿州市 Suzhou City	6	10	4	10	3	12	1	15	4
蚌埠市 Bengbu City	10	5	1	2	4	9	0	10	2
连云港市 Lianyungang City	7	6	4	9	8	5	11	2	13
宿迁市 Suqian City	11	3	13	1	0	0	14	0	0
合肥市 Hefei City	12	0	0	8	2	10	0	1	1
襄阳市 Xiangyang City	7	2	4	1	8	1	3	3	4
周口市 Zhoukou City	3	10	0	2	0	4	13	2	0
泾阳县 Jingyang County	4	1	0	1	0	1	5	0	0
洛阳市 Luoyang City	3	11	2	12	0	5	14	6	3
平凉市 Pingliang City	2	18	2	13	1	7	10	10	4

HR: 高抗; MR: 中抗。HR: High resistance; MR: medium resistance.

2.4 83份小麦品种(系)携带的抗病基因

在 83 份小麦品种(系)中,只有西农 853、Hm939 及普冰 037 共 3 份小麦品种(系)含有 *Yr5* 基因,所占比例为 3.6%;小麦品种(系)含有小麦抗条锈病基因 *Yr9* 的有 22 份,分别为西农 66、西农 286、西农 253、西农 569、西农 681、西农 833、西农 879、西农 883、西农 916、西农 1098、西农 1401、西农 1353、西农 1355、西农 1688、西农 6628、西农 8087、西农 8097、西农 8631、西农 8806、秦紫 2 号、小偃 17 和普冰 167,所占比例为 26.5%;所有小麦品种(系)均不含抗小麦条

锈病基因 *Yr10* 和 *Yr15*;西农 239、西农 569 以及西农 612 共 3 份品种(系)可能含有 *Yr17*,所占比例为 3.6%;83 份小麦品种(系)中均不含有抗病基因 *Yr18*、*Yr26*、*Pm2a* 和 *Pm21*;西农 132 及西农 419 这 2 份小麦品种(系)可能含有 *Pm24* 基因,所占比例为 2.4%;西农 38、西农 66、西农 419、西农 833、西农 878、西农 890、西农 891、西农 892、西农 8806、西农 8226、西农 936、M07-562、普冰 802 和秦蓝 1 号共 14 份小麦品种(系)可能含有 *Lr1* 基因,所占比例为 16.8%;所有 83 份品(系)均不含有抗小麦赤霉病基

因 *Fhb1* (表2)。

结合所有分子检测结果可以得出,在83份小麦品种(系)中,5份小麦品种(系)同时含有2个基因,即西农66、西农833及西农8806同时含有 *Yr9* 和 *Lr1* 基因,西农569同时含有 *Yr9* 和 *Yr17* 基因,西农419同时含有 *Pm24* 和 *Lr1* 基因。

3 讨论

根据苗期抗病性鉴定结果可知,在83份小麦品种(系)中对条锈菌生理小种CYR32表现出抗性的品种(系)较多,但对CYR32、CYR33和CYR34三个生理小种均表现出抗性的只有西农253、西农530、西农853、西农1353、西农256、西农518、西农8208、西农936及普冰037这9份小麦品种(系);而在对白粉病进行抗性鉴定时,未发现对小麦白粉菌E15、E09和A13三个生理小种均表现出抗性的小麦品种(系),唐玮等(2016)认为直播麦种植面积扩大,错过播种适期;小麦全量还田,田间菌源量增加;偏施氮肥适宜病菌繁殖侵染等是近些年来小麦白粉病难以防治的主要原因,此外近年来气温偏高,光照偏少,雨量偏多,这可能也是白粉病大发生且难以防治的另一个主要原因。因此在以后工作中应加大对条锈菌、白粉菌各生理小种兼具抗性的苗期小麦品种(系)研究。

在田间进行成株期鉴定时发现抗赤霉病小麦品种(系)占比可以达到70.0%以上,对叶锈病表现为抗性的品种可占到1/3,虽然近些年来对于小麦抗条锈病和抗白粉病的研究较多,但在83份小麦品种(系)中对条锈病表现出抗性的只有27.7%,对白粉病表现出抗性的仅占供试品种(系)的18.0%,由此可见仍需加大小麦对条锈病和白粉病的抗性研究。在黄淮麦区19个市(县)自然环境下的鉴定结果显示,西农品种在麦区抗条锈病比例达到90.0%以上,在黄淮麦区大面积推广种植抗病品种能够有效保障中国粮食安全,而小麦对白粉病的抗性水平仍是最低。近年来由于耕作方式改变、种植密度提高、感病半矮秆品种的广泛推广以及病原菌的种群独立结构不断发生改变,小麦白粉病的发生在田间有逐年加重的迹象,已经严重影响小麦生产,为控制小麦白粉病的发生流行,确保小麦稳产高产,在今后的育种工作中,应加强对抗白粉病基因的利用,合理规划抗病品种的田间布局,减轻小麦白粉病的危害。

本研究结果表明,在83份小麦品种(系)中,苗期和成株期的西农253、西农530、西农1353、西农

256、西农518及西农8208共6份小麦品种(系)对小麦条锈病表现出抗性且在田间均表现出良好抗性,有23份小麦品种(系)对小麦条锈病表现出抗性,经分子检测结果显示这23份小麦品种(系)中的西农253、西农569、西农1401、西农1353、西农6628、西农8087及西农8097含有 *Yr9* 基因。王力成(2017)对西北农林科技大学育成的不同小麦品种(系)的鉴定结果与本研究结果基本一致,其认为携带 *Yr9* 基因的小麦品种(系)有较高的产量以及较好的环境适应能力,但苗期和成株期对小麦条锈病多表现为感病,所以在抗条锈基因布局过程中利用价值不大。

到目前为止,已在小麦中正式命名了82个抗叶锈病基因,*Lr1*作为其中一个重要的抗叶锈病基因,是一百多年前从小麦品种Malakof和Webster中鉴定出来的(盛德策,2022),其定位在5DL染色体上,目前*Lr1*基因对我国多数叶锈菌流行小种已丧失抗性,但该基因还可以用于基因聚合或基因布局(王佳荣等,2022)。本研究通过分子检测发现,在83份小麦品种(系)中有14份含有抗病基因*Lr1*,这14份小麦品种(系)在成株期抗性鉴定中均表现为感病,说明含有*Lr1*基因的小麦品种(系)在田间已经丧失抗性,育种工作中应当注意含有*Lr1*基因的小麦品种(系)的应用。在成株期人工接种鉴定试验中,10份西农品种(系)表现兼抗3种及以上病害,其抗病基因尚未明确,有待进一步深入研究。

参 考 文 献 (References)

- Ali Y, Raza A, Iqbal S, Khan AA, Aatif HM, Hassan Z, Hanif CMS, Ali HM, Mosa WFA, Mubeen I, et al. 2022. Stepwise regression models-based prediction for leaf rust severity and yield loss in wheat. *Sustainability*, 14(21): 13893
- Chen F, Jia HY, Zhang XJ, Qiao LY, Li X, Zheng J, Guo HJ, Powers C, Yan LL, Chang ZJ. 2019. Positional cloning of *PmCHI357* reveals the origin and allelic variation of the *Pm2* gene for powdery mildew resistance in wheat. *The Crop Journal*, 7(6): 771-783
- Dong N, Chen XD, Hu TZ, Li G, Zhang YJ, Ru ZG. 2018. Molecular detection and evaluation of disease resistance genes of 39 introduced wheat germplasms. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 33(6): 49-55 (in Chinese) [董娜, 陈向东, 胡铁柱, 李淦, 张亚娟, 茹振钢. 2018. 39份外引小麦种质抗病基因的分子标记检测及其抗病性评价. *华北农学报*, 33(6): 49-55]
- Donini S, Clerici M, Wengel J, Vester B, Peracchi A. 2007. The advantages of being locked: assessing the cleavage of short and long RNAs by locked nucleic acid-containing 8-17 deoxyribozymes. *The Journal of Biological Chemistry*, 282(49): 35510-35518
- Francis HA, Leitch AR, Koebner RMD. 1995. Conversion of a RAPD-

- generated PCR product, containing a novel dispersed repetitive element, into a fast and robust assay for the presence of rye chromatin in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 90(5): 636–642
- Helguera M, Khan IA, Kolmer J, Lijavetzky D, Zhong QL, Dubcovsky J. 2003. PCR assays for the *Lr37-Yr17-Sr38* cluster of rust resistance genes and their use to develop isogenic hard red spring wheat lines. *Crop Science*, 43(5): 1839–1847
- Klymiuk V, Yaniv E, Huang L, Raats D, Fatiukha A, Chen SS, Feng LH, Frenkel Z, Lidzbarsky G, et al. 2018. Cloning of the wheat *Yr15* resistance gene sheds light on the plant tandem kinase-pseudokinase family. *Nature Communications*, 9: 3735
- Lagudah ES, Krattinger SG, Herrera-Foessel S, Singh RP, Huerta-Espino J, Spielmeier W, Brown-Guedira G, Selter LL, Keller B. 2009. Gene-specific markers for the wheat gene *Lr34/Yr18/Pm38* which confers resistance to multiple fungal pathogens. *Theoretical and Applied Genetics*, 119(5): 889–898
- Lagudah ES, McFadden H, Singh RP, Huerta-Espino J, Bariana HS, Spielmeier W. 2006. Molecular genetic characterization of the *Lr34/Yr18* slow rusting resistance gene region in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 114(1): 21–30
- Line RF, Chen X. 1995. Successes in breeding for and managing durable resistance to wheat rusts. *Plant Disease*, 79(12): 1254–1255
- Liu C, Yang ZJ, Li GR, Zeng ZX, Zhang Y, Zhou JP, Liu ZH, Ren ZL. 2008. Isolation of a new repetitive DNA sequence from *Secale africanum* enables targeting of *Secale* chromatin in wheat background. *Euphytica*, 159(1): 249–258
- Ma ZH. 2018. Researches and control of wheat stripe rust in China. *Journal of Plant Protection*, 45(1): 1–6 (in Chinese) [马占鸿. 2018. 中国小麦条锈病研究与防控. *植物保护学报*, 45(1): 1–6]
- Marchal C, Zhang JP, Zhang P, Fenwick P, Steuernagel B, Adamski NM, Boyd L, McIntosh R, Wulff BBH, Berry S, et al. 2018. BED-domain-containing immune receptors confer diverse resistance spectra to yellow rust. *Nature Plants*, 4(9): 662–668
- Qiu JW, Schürch AC, Yahiaoui N, Dong LL, Fan HJ, Zhang ZJ, Keller B, Ling HQ. 2007. Physical mapping and identification of a candidate for the leaf rust resistance gene *Lr1* of wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 115(2): 159–168
- Sheng BQ. 1988. Wheat powdery mildew was recorded using infection type in seedling stage. *Plant Protection*, (1): 49 (in Chinese) [盛宝钦. 1988. 用反应型记载小麦苗期白粉病. *植物保护*, (1): 49]
- Sheng DC. 2022. Characterization of leaf rust resistance and the causal gene/QTL mapping in wheat-*Thinopyrum* amphiploid-derived lines. PhD thesis. Taiyuan: Shanxi University (in Chinese) [盛德策. 2022. 偃麦衍生系的叶锈病抗性鉴定及抗性基因定位. 博士学位论文. 太原: 山西大学]
- Singh R, Datta D, Priyamvada, Singh S, Tiwari R. 2009. A diagnostic PCR based assay for stripe rust resistance gene *Yr10* in wheat. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 44(1): 11–18
- Su ZQ, Jin SJ, Zhang DD, Bai GH. 2018. Development and validation of diagnostic markers for *Fhb1* region, a major QTL for *Fusarium* head blight resistance in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 131(11): 2371–2380
- Sun HY, Yuan Z, Shu Y, Zhang X, Zhang AX, Chen HG. 2021. Control efficacy of different fungicides against *Fusarium* head blight and leaf rust in wheat. *Plant Protection*, 47(1): 273–276 (in Chinese) [孙海燕, 原征, 疏燕, 张兴, 张爱香, 陈怀谷. 2021. 不同杀菌剂对小麦赤霉病和叶锈病的防治效果. *植物保护*, 47(1): 273–276]
- Tang W, Zhang KL, Xu DX, Pan Y, Ma Y, Zhang RB. 2016. Occurrence causes and control countermeasure of wheat powdery mildew in Lixiahe region, Jiangsu Province. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 22(17): 87–91 (in Chinese) [唐玮, 张开朗, 徐东祥, 潘勇, 马勇, 张如标. 2016. 江苏里下河麦区小麦白粉病的流行成因与防控对策. *安徽农学通报*, 22(17): 87–91]
- Wang CM, Zhang YP, Han DJ, Kang ZS, Li GP, Cao AZ, Chen PD. 2008. SSR and STS markers for wheat stripe rust resistance gene *Yr26*. *Euphytica*, 159(3): 359–366
- Wang JR, Dong R, Zhang MY, Gao P, Zhang PP, Li ZF, Liu DQ. 2022. Identification of leaf rust resistance genes in 40 CIMMYT wheat lines at seedling stage and adult plant. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 37(2): 201–210 (in Chinese) [王佳荣, 董瑞, 张梦宇, 高璞, 张培培, 李在峰, 刘大群. 2022. 40份CIMMYT小麦品种苗期及成株抗叶锈病基因鉴定. *华北农学报*, 37(2): 201–210]
- Wang LC. 2017. Evaluation of resistance and gene analysis of main cultivars of wheat to stripe rust in a significant overwintering region of stripe rust in China, southern Shaanxi. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [王力成. 2017. 中国小麦条锈菌重要冬繁区-陕南地区小麦品种(系)抗条锈性评价与抗病基因分析. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Wu YX, Wang YJ, Han S, Li QS, Kong LX. 2023. Application of oligosaccharins-plant activator protein 6% WP mixed with chemical fungicide to control wheat powdery mildew for the purpose of reducing the pesticide load. *Plant Protection*, 49(3): 292–297, 316 (in Chinese) [吴玉星, 王亚娇, 韩森, 栗秋生, 孔令晓. 2023. 6%寡糖·链蛋白可湿性粉剂与杀菌剂混用防治小麦白粉病的农药减施技术研究. *植物保护*, 49(3): 292–297, 316]
- Yan R, Geng MM, Li XJ, An HJ, Wen SM, Liu GR, Wang RH. 2020. Phenotyping and marker-assisted gene identification of powdery mildew resistance in wheat commercial varieties and germplasm resources from Hebei Province. *Journal of Plant Genetic Resources*, 21(3): 683–705 (in Chinese) [延荣, 耿妙苗, 李晓静, 安浩军, 温树敏, 刘桂茹, 王睿辉. 2020. 河北省小麦品种和种质资源抗白粉病鉴定与抗病基因分子标记检测. *植物遗传资源学报*, 21(3): 683–705]

(责任编辑:张俊芳)