

刁文达,李超玲,李昭燕,等. 48 份小麦品种(系)抗条锈病和条锈病基因的分子标记检测及其抗性评价[J]. 江苏农业科学,2024,52(18):154-159.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.18.020

48 份小麦品种(系)抗条锈病和条锈病基因的分子标记检测及其抗性评价

刁文达¹, 李超玲¹, 李昭燕¹, 权衡¹, 亢玲², 闫晓翠¹

(1. 华北作物种质资源研究与利用教育部重点实验室/河北农业大学农学院,河北保定 071000; 2. 宁夏农林科学院作物研究所,宁夏银川 750002)

摘要:为明确宁夏小麦品种(系)对小麦条锈病和赤霉病的抗病水平,采用与已知抗病基因紧密连锁的特异性标记法对 48 份小麦材料进行分子标记检测,并对供试小麦品种(系)进行系谱分析。通过对抗条锈病和抗赤霉病典型代表基因 *Yr5*、*Yr9*、*Yr10*、*Yr15*、*Yr18*、*Yr26*、*Yr30* 和 *Fhb1* 进行检测,并对其在宁夏小麦中的分布频率进行分析。结果表明,在 48 份参试品种(系)中,分别含有 *Yr5*、*Yr9*、*Yr10*、*Yr15*、*Yr18*、*Yr26*、*Yr30* 抗性基因的小麦材料有 41、15、5、16、20、45、26 份,占供试材料的 85%、31%、1%、33%、41%、93%、54%;在所测的小麦品系中有 42 份供试材料携带 *Fhb1* 基因,占供试材料的 87%。本研究,通过选用中国宁夏 48 份典型小麦品种(系)进行抗条锈病和赤霉病的分子标记检测,为作物育种和遗传研究提供有效遗传信息。

关键词:小麦;条锈病;分子标记;基因检测;种质资源;抗性评价

中图分类号:S435.121.4⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)18-0154-06

小麦(*Triticum aestivum* L.)是我国重要的粮食作物,对我国粮食的供给作出了重大贡献^[1]。而小

麦条锈病是世界上影响范围较大的小麦病害之一,也是宁夏小麦产区主要病害之一,每年都会对宁夏小麦的产量造成严重损失,因此对宁夏小麦产区的遗传多样性进行分析,并为小麦抗病育种提供一些参考价值。小麦条锈病是一种由小麦条锈菌(*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*)引起的气传性真菌类病害,它的变异类型较多,分布范围较广,可降低感病品种的籽粒数量和品质,进而使产量减少 40%^[2-4]。小麦条锈病病原体可在种植季节的大部

收稿日期:2023-10-31

基金项目:华北作物改良与调控国家重点实验室、河北农业大学引进人才项目(编号:NCCIR2021RC-6)。

作者简介:刁文达(1999—),男,河北邢台人,硕士研究生,从事玉米、小麦抗病性研究。E-mail:d16632233175@163.com。

通信作者:亢玲,从事小麦抗病性研究,E-mail:kangling1005@163.com;闫晓翠,讲师,主要从事玉米、小麦抗病遗传育种,E-mail:yxc1234jy@163.com。

[37] Arora A, Sairam R K, Srivastava G C. Oxidative stress and antioxidative system in plants[J]. *Current Science*,2002,81(10):1227-1239.

[38] Bela K, Riyazuddin R, Csiszár J. Plant glutathione peroxidases: non-heme peroxidases with large functional flexibility as a core component of ROS-processing mechanisms and signalling[J]. *Antioxidants*,2022,11(8):1624.

[39] Mahmoud A, Abdelgawad H, Hamed B A, et al. Differences in cadmium accumulation, detoxification and antioxidant defenses between contrasting maize cultivars implicate a role of superoxide dismutase in Cd tolerance[J]. *Antioxidants*,2021,10(11):1812.

[40] 罗婷,张显,魏永新. 西瓜不同品种苗期人工接种炭疽病菌后的生理生化变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(2):130-134.

[41] Tang J, Wang S Q, Hu K D, et al. Antioxidative capacity is highly associated with the storage property of tuberous roots in different sweetpotato cultivars[J]. *Scientific Reports*,2019,9(1):11141.

[42] 李素平,袁玲,迟少艺,等. 一种自溶性产酶溶杆菌新菌株 LE16 对温室番茄灰霉病的抑制作用[J]. *微生物学报*,2022,62(10):3871-3885.

[43] 李德全,钱亚明,周鸣鸣,等. 海洋细菌 NH-8 防治草莓灰霉病机理及其抗菌物质分析[J]. *植物保护学报*,2016,43(2):215-221.

[44] 张韞璐,王琦,王金缘,等. 干旱预处理对盐胁迫下水稻幼苗抗氧化酶活性及 AsA-GSH 循环的影响[J]. *江苏农业科学*,2018,46(7):58-60.

[45] 赵子媛,佟冠杰,王延松,等. 外源 NO 对低温胁迫下仁用杏花器官 AsA-GSH 循环的影响[J]. *河北农业大学学报*,2023,46(3):19-27.

[46] 张爱慧,刘广勤,朱士农,等. NaCl 胁迫对嫁接西瓜抗氧化酶及叶绿素荧光参数的影响[J]. *江苏农业学报*,2010,26(2):377-382.

[47] 孙守江,唐艺涵,马馥,等. 紫花苜蓿种子吸胀期根线粒体 AsA-GSH 循环对低温胁迫的响应[J]. *草业学报*,2023,32(3):152-162.

分生长阶段都感染小麦植株,主要是降低小麦的光合效率,进而导致植物有机物的合成减少。此外,赤霉病随气候的变化也对小麦的产量造成了严重影响。至目前为止,小麦赤霉病常发区已扩展到我国黄淮海南部麦区,且西北麦区也已日益加重,该病害已成为我国小麦产区常发性的重大小麦病害。已有研究人员发现,来源于望水白的 *Fhb1* 是目前抗性最高且应用广泛的抗赤霉病基因。利用已知分子标记对抗赤霉病基因 *Fhb1* 进行快速检测,从而筛选出获得小麦抗赤霉病的种质资源,为小麦抗赤霉病育种选择提供依据,但当前抗病资源匮乏、抗性遗传基础狭窄是我国小麦在抗病育种中面临的主要问题^[5-6]。要解决以上问题,必须发掘新的抗病种质,挖掘新的抗病基因,才能丰富其遗传多样性^[7]。然而,喷施农药对小麦条锈病和赤霉病进行防治,尽管能够达到一定的控制效果,但它的成本昂贵,而且还会对生态环境造成影响,而使用抗锈品种是减少各种作物病害损害的最经济和有效的方法^[8-9]。

自 20 世纪 50 年代条锈病广泛流行以来,我国对该病的流行和管理进行了广泛的研究。小麦的病害防治对于小麦的产量来说至关重要,迄今,在国际上以 Yr 系统正式命名的主效抗条锈病基因共有 84 个位点,即 *Yr1* ~ *Yr84*^[10-11];其中大多数在小麦的所有生长阶段对叶锈病都有效,在苗期很容易被识别,这被称为全生育期抗性(all stage resistance, 简称 ASR),这种类型的抗性通常由 1 个在幼苗期开始表达的单一基因控制(幼苗抗性)。然而,一些 *Lr* 基因通常在成株期阶段表达,这种类型的抗性被称为成株植物抗性(adult plant resistance, 简称 APR),进一步分为小种专化特异性和非小种专化特异性 2 种类型^[12-13]。由于小麦的抗病基因对品种小种的专化性很强,在生产上使用的抗病基因很容易随着毒力的频繁变化而失去抗性^[14-16]。由于小麦可以在不同的地理和气候条件下种植,锈病病原体在不同的环境条件下也展现了增强的适应能力。如果气候条件适合锈病,并在大面积内种植单一抗性小麦品种,这些品种便可以产生抗性。

本研究利用分子标记检测和系谱分析方法对 48 份供试材料进行抗病基因筛选,其目的是通过分子标记诊断和家系分析来鉴定小麦品种(系)和改良种质的抗性。了解这些小麦品种(系)的抗性,挖掘新的抗性种质资源,对我国小麦抗锈性育种的筛

选具有重要价值。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

48 份供试宁夏小麦材料(表 1)(感条锈病的对照品种 Avocet S、感赤霉病对照品种 Tatara 以及含有已知抗赤霉病基因的品种 *Yr27*),由宁夏农林科学院农作物研究所提供。已知条锈病抗性基因阳性对照材料包括 *Yr5*(*T. spelta* Album)、Avocet S*6/*Yr9*、Avocet S*6/*Yr10*/6、Avocet S*6/*Yr15*/6、Avocet S*6/*Yr18*、Avocet S*6/*Yr26*、*Yr30*(Opata85)、Avocet S;郑州 5389 作为阴性对照材料;赤霉病以 Tatara 品种为阳性对照、郑州 5389 为阴性对照。条锈病和赤霉病分子标记检测于 2022—2023 年间在河北农业大学华北作物种质资源研究与利用省部共建教育部重点实验室完成。

1.2 小麦基因组 DNA 的提取与分子检测

将供试小麦材料种植于育苗盘内,以营养土和蛭石 3:1 的比例进行种植,播种 20~25 粒/盆饱满的种子,覆土,在底部浇水,使其吸收并直至土壤湿润移出,放到 22~25 °C 室内培养 6~8 d,待用。待幼苗长到 3 叶期时用 CTAB 法提取基因组 DNA^[17],然后进行 *Yr* 基因检测,用于检测分子标记引物,该引物由北京擎科生物科技股份有限公司合成(表 2)。

1.3 PCR 扩增

选取国际上主效抗条锈病基因 *Yr5*^[18]、*Yr9*^[19]、*Yr10*^[20]、*Yr15*^[21]、*Yr18*^[22]、*Yr26*^[23]、*Yr30*^[24] 以及抗赤霉病基因 *Fhb1*^[25] 共 8 个紧密连锁分子标记,对所供试的 48 份小麦材料进行鉴定。PCR 扩增反应体系:2×Taq Master Mix 10 μL;10 μmol/L 上游特异引物 0.5 μL,终浓度为 0.1~0.3 μmol/L;10 μmol/L 下游特异引物 0.5 μL,终浓度为 0.1~0.3 μmol/L;模板 DNA 2 μL;补水至 20 μL。PCR 扩增反应程序:预变性 95 °C 3 min;变性 95 °C 15 s,退火 55~62 °C 15 s,延伸 72 °C 15 s,35 次循环;延伸 72 °C 5 min。

2 结果与分析

2.1 已知抗条锈病基因分子标记检测结果

48 份供试材料是来自于宁夏小麦主产区,所有供试材料可能携带的基因均列在表 3。以感病材料 Avocet S 为阳性对照,对其供试材料的抗条锈病基因 *Yr5*、*Yr9*、*Yr10*、*Yr15*、*Yr18*、*Yr26*、*Yr30* 已知标记检

表 1 48 份供试小麦品种(系)名称及来源

序号	品种(系)	系谱
1	宁春 32 号	母本建三江 - 6918 与父本自育矮秆大穗高代品系 1658 通过有性杂交选育而成
2	宁春 33 号	以石鉴 11/京 741/乐繁 1 杂交,经多年北育南繁系谱法定向选育而成
3	宁春 34 号	母本红芒麦与父本引进品种定西 32 号杂交而成
4	宁春 35 号	母本宁春 16 号与父本永 A71 杂交而成
5	宁春 36 号	母本宁春 20 号的姊妹系 82 - 68 - 3 与父本定西 35 号杂交而成
6	宁春 37 号	由宁夏农林科学院于 1998 年从南非引进,经过 3 年系统选育而成
7	宁春 38 号	宁夏永宁县小麦育繁繁殖所以 Tal 聚合材料永 T2945/永 1265 (Veer 后代)杂交而成
8	宁春 39 号	母本永 833 (T2739/农院 G89) 与父本宁春 4 号杂交,系谱法定向选择于 F6 代定系育成
9	宁春 40 号	以中宁 58912/701//永 1712/G89 - 46 杂交
10	宁春 41 号	宁春 4 号 × 永早 2 号
11	宁春 42 号	母本贺兰 4 号与父本 90N3095 杂交而成
12	宁春 43 号	以 Y253/1818 常规杂交选育而成
13	宁春 44 号	宁夏大学以繁 4/89 - 3//繁 290 - 1//T649 杂交选育而成
14	宁春 46 号	以 3728/3/77A297/UP301//76 - 336/W3 常规杂交选育而成
15	宁春 47 号	以建三江 - 6918/1658 杂交系统选育而成
16	宁春 48 号	以宁春 10 号/定西 32 号//会 762 - 4 选育而成
17	宁春 49 号	固原市农业科学研究所采用系谱法定多年北育南繁育成
18	宁春 50 号	以宁春 4 号/Chami (法国硬粒小麦)//宁春 4 号///宁春 4 号回交 3 代育成
19	宁春 51 号	以永 3002/宁春 4 号杂交
20	宁春 52 号	以永 430 (永 403/永良 15//永 1147)/230 系谱法定向选育而成
21	碧玉	原产于澳大利亚,1923 年前引入中国
22	阿勃	原产于意大利,1956 年由阿尔巴尼亚引入中国
23	斗地 1 号	用母本阿勃与父本碧玉杂交育成
24	宏图	阿勃与碧玉杂交所组合而成的丰产小麦
25	索诺拉 64	来自墨西哥国际玉米小麦改良中心
26	宁春 304	墨巴 65 × 宏图杂交所育成的春麦优良新品种
27	陇春 7 号	由甘肃省农业科学院用甘麦 8 号与临农 2 号杂交所育成
28	84 加	用母本 80 (974) 与父本 80 夏 (107) 进行有性杂交系统选育而成
29	永 368	
30	永良 15 号	宁春 4 号/永良 10 号///宁春 4 号//中 760 5/PH88
31	宁 J210	PH17/斯汤佩里//84B179“r”
32	北京种	

表 1 (续)

序号	品种(系)	系谱
33	春节 1 号	
34	春节 2 号	
35	春节 3 号	
36	春节 4 号	
37	春节 5 号 - 红	
38	春节 6 号	
39	春山 1 号	
40	春山 2 号	
41	春山 3 号	
42	春山 4 号	
43	r80 - 1	
44	WCA - 19	
45	Bastian	
46	白欧柔	由内蒙古巴彦淖尔盟农业科学研究所从欧柔中系统选育而成
47	Cajeme - 70	
48	品引 4 号	

表 2 抗小麦条锈病基因的分子标记及引物序列

基因	引物名称	引物序列(5'→3')	片段大小 (bp)	退火温度 (°C)	参考文献
Yr5	SI9M93 - 100 - F	TAATTGGGACCCAGAGACG	100	62	[18]
	SI9M93 - 100 - R	TTCTTGCAGCTCCAAAACCT			
Yr9	AF1 - F	GGAGACATCATGAAACATTTG	1 500	55	[19]
	AF4 - R	CTGTGTGTGGCAGAAAAG			
Yr10	Yr10 - F	TCAAAGACATCAAGAGCCGC	543	62	[20]
	Yr10 - R	TGGCCTCATGAACCTCTGGAT			
Yr15	Xgwm273 - F	ATTGGACGGACAGATGCTTT	190	57	[21]
	Xgwm273 - R	AGCACTGAGGAAGGGGATC			
Yr18	csLs34 - F	GTTGGTTAAGACTGCTGATGG	150	57	[22]
	csLs34 - R	TGCTTCTATTGCTGAATAGT			
Yr26	Wel73 - F	GGGACAAGGGGAGTGAAGC	540	60	[23]
	Wel73 - R	GAGACTTCCAAGCAGAACAC			
Yr30	gwm533 - F	AAGCGCAATCAAACGGAATA	150	61	[24]
	gwm533 - R	GTTGCTTTAGGGGAAAAGCC			
Fhb1	Xbarc147 - F	GCGCCATTATTTCATGTTCCTCTA	122	55	[25]
	Xbarc147 - R	CCGCTTCACATGCAATCCGTTGAT			

测。结果(表 3)显示:以 Avocet S 为阳性对照,在宁春 32 号、宁春 33 号和宁春 35 号等 41 份材料中,均可以扩增出 100 bp 的目的条带,表明这些材料中可能含有 Yr5 这个基因;Avocet S*6/Yr9 为阳性对照,发现在 15 份小麦材料可以扩增出 1 500 bp 的抗条锈病基因 Yr9 目的条带(图 1),说明这些供试材料

表 3 48 份供试小麦品(系)可能携带的基因

序号	品种(系)	可能携带的基因
1	宁春 32 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i>
2	宁春 33 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr10</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i>
3	宁春 34 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr10</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
4	宁春 35 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr10</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
5	宁春 36 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr10</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr26</i>
6	宁春 37 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
7	宁春 38 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr15</i>
8	宁春 39 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr10</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
9	宁春 40 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
10	宁春 41 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr26</i>
11	宁春 42 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
12	宁春 43 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr26</i>
13	宁春 44 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
14	宁春 46 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
15	宁春 47 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
16	宁春 48 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
17	宁春 49 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
18	宁春 50 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
19	宁春 51 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
20	宁春 52 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
21	碧玉	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
22	阿勃	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
23	斗地 1 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
24	宏图	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
25	索诺拉 64	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
26	宁春 304	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
27	陇春 7 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
28	84 加	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
29	永 368	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
30	永良 15 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
31	宁 J210	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr18</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
32	北京种	<i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
33	春节 1 号	<i>Yr9</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
34	春节 2 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
35	春节 3 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
36	春节 4 号	<i>Yr9</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
37	春节 5 号-红	<i>Yr9</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>
38	春节 6 号	<i>Yr9</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
39	春山 1 号	<i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
40	春山 2 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
41	春山 3 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
42	春山 4 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr15</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
43	r80-1	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
44	WCA-19	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
45	Bastian	<i>Yr26</i> 、 <i>Fhb1</i>

表 3(续)

序号	品种(系)	可能携带的基因
46	白欧柔	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
47	Cajeme-70	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>
48	品引 4 号	<i>Yr5</i> 、 <i>Yr9</i> 、 <i>Yr26</i> 、 <i>Yr30</i> 、 <i>Fhb1</i>

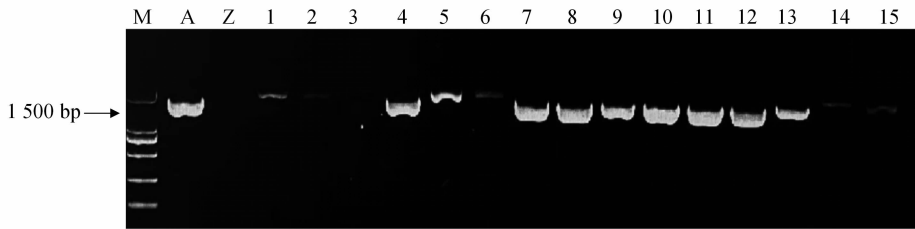
中均携带有 *Yr9*; 宁春 33 号、34 号、35 号、36 号和宁春 39 号 5 份材料中鉴定出含有 *Yr10*, 且目的条带为 543 bp 的条带; 以 Avocet S * 6/*Yr15* 为阳性对照, 在宁春 32 号、陇春 7 号和春山 4 号等 16 份供试材料中, 可以扩增出与 *Yr15* 紧密连锁的目的条带 190 bp, 表明在这些材料中均携带有 *Yr15* 抗病基因; 用 Avocet S * 6/*Yr18* 为阳性对照, 在宁春 32 号、33 号和宁春 44 号等 20 份小麦材料中, 均可以扩增出 150 bp 的 *Yr18* 目的条带(图 2), 这表明这 21 份供试小麦材料中含有 *Yr18* 抗病基因; 同理, 以 Avocet S * 6/*Yr26* 为阳性对照, 在春山 1 号、索诺拉 64 和陇春 7 号等 45 份材料, 均携带有抗条锈病基因 *Yr26*(图 3); 索诺拉 64、陇春 7 号和宁春 44 号等 26 份材料, 均含有抗条锈病基因 *Yr30*(图 4)。此外, 分别对这 8 个已知广谱抗条锈病基因在所有供试小麦材料中进行占比分析, 结果表明: 其携带有抗条锈病基因 *Yr5*、*Yr9*、*Yr10*、*Yr15*、*Yr18*、*Yr26*、*Yr30*, 分别占供试材料的 85%、31%、1%、33%、41%、93%、54%。

2.2 抗赤霉病基因 *Fhb1* 的分子标记检测结果

对 48 份供试小麦品种(系)进一步利用抗赤霉病基因 *Fhb1* 的特异功能连锁 SSR 标记 *Xbarc147* 进行检测, 且以 Tatar (携带 *Fhb1*) 为阳性对照; 结果表明(图 5), 48 份供试小麦材料中可成功扩增出与 *Fhb1* 目的条带(122 bp)相一致的材料有 42 份(如宁春 34 号、35 号和宁春 44 号等), 且占比达到 87%。这表明在宁夏小麦材料中普遍携带有抗赤霉病基因, 且对赤霉病有一定的抗性, 为抗赤霉病遗传育种的研究提供良好的供试材料。

3 讨论

分子标记为基因检测提供了一种更有效和更经济的方法^[26]。本研究使用已知抗病基因紧密连锁标记来检测 8 个已知抗病基因在 48 份宁夏小麦种质资源上的分布情况。结果显示, 在同一供试材料中可能均携带有 2 个以上抗病基因存在, 其宁春 38 号中携带有抗条锈病基因 *Yr5* 和 *Yr15*, 该品种由永 T2945 与永 1265 (Veer 后代) 杂交, 经宁夏永宁县



M—DL2000; A—Avocet S; Z—郑州 5389; 1—宁春 32 号; 2—宁春 34 号; 3—陇春 7 号; 4—84 加; 5—永 368; 6—宁春 36 号; 7—宁 J210; 8—北京种; 9—春节 1 号; 10—春节 2 号; 11—春节 3 号; 12—春节 4 号; 13—春节 5 号-红; 14—宁春 42 号; 15—宁春 43 号。下图同

图1 部分供试小麦品种(系)中 *Yr9* 的检测结果

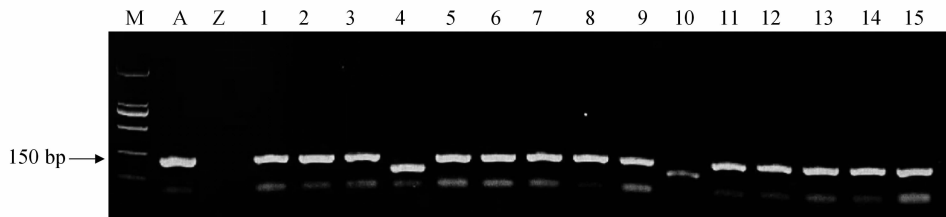


图2 部分供试小麦品种(系)中 *Yr18* 的检测结果

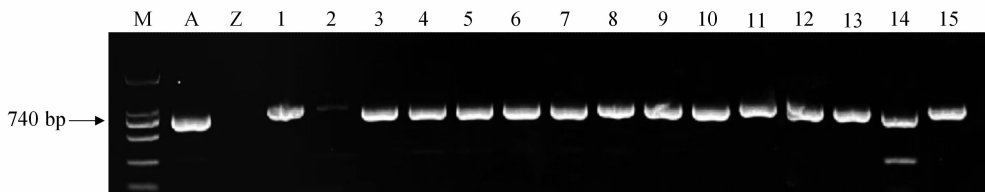


图3 部分供试小麦品种(系)中 *Yr26* 的检测结果

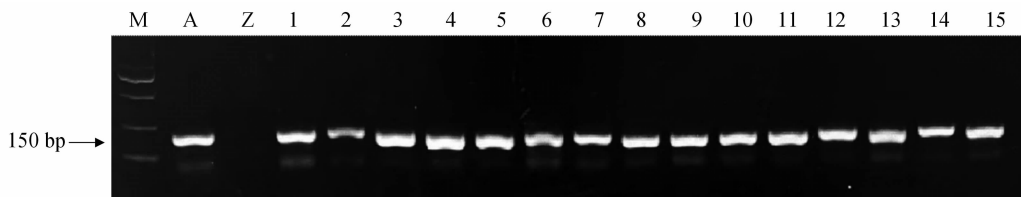


图4 部分供试小麦品种(系)中 *Yr30* 的检测结果

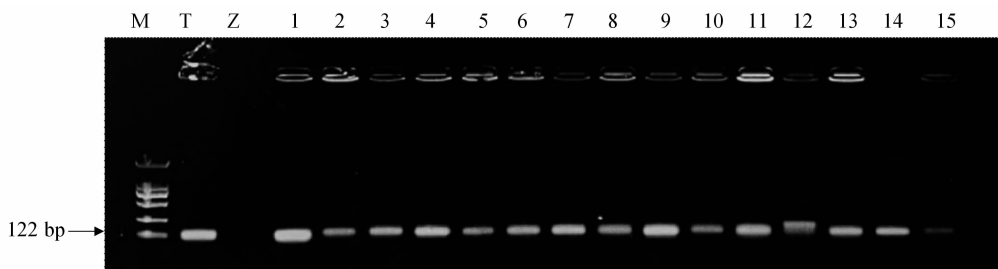


图5 部分供试小麦品种(系)中 *Fhb1* 的检测结果

小麦育繁所育成,其具有良好的抗条锈病。至今,在国内外 *Yr5* 和 *Yr15* 仍然是少有的几乎对所有条锈病菌表现出广谱抗性^[27-28],且普遍应用于西北(四川)和西南(宁夏)麦区的小麦育种中。Bastian 材料中携带有抗叶锈病基因 *Lr26* 和抗赤霉病基因

Fhb1,表明 Bastian 对叶锈病和赤霉病具有良好的抗性。宁春 40 号品种同时携带 *Yr5*、*Yr15*、*Yr26*、*Fhb1*,该品种是宁夏大学以中宁 58912 和永 1712 进行杂交,采用杂交系谱法选育优良单株,系统选育而成,高抗锈病。

目前我国在小麦 21 条染色体上已经定位超过 250 个抗性位点^[29-30],其中 *Fhb1* 是世界上公认的主效基因,这个基因已经被克隆,这为利用该基因进行分子标记辅助选择提供了便利。本研究通过对 48 个供试小麦材料的遗传分析,结果表明,这些标记物稳定,可用于基因检测。在所有携带有抗条锈病基因分 *Yr5*、*Yr9*、*Yr10*、*Yr15*、*Yr18*、*Yr26* 和 *Yr30* 中,*Yr26* 占比最大,说明 *Yr26* 作为抗锈病源仍广泛用于生产品种中。但我们应合理利用不同类型的抗性基因,发掘优良抗源,为小麦抗病育种及病害精准防控提供参考。

参考文献:

- [1] 郭天财. 试论中国的小麦生产与国家粮食安全[C]//农业科技
创新与生产现代化学术研讨会论文集. 苏州,2001:118-123.
- [2] 李振岐,商鸿生. 小麦锈病及其防治[M]. 上海:上海科学技术出
版社,1989.
- [3] 黄亮,刘太国,肖星芒,等. 中国 79 个小麦品种(系)抗条锈病
评价及基因分子检测[J]. 中国农业科学,2017,50(16):3122-
3134.
- [4] Wellings C R. Global status of stripe rust: a review of historical and
current threats[J]. Euphytica,2011,179(1):129-141.
- [5] Gilligan C A. Sustainable agriculture and plant diseases: an
epidemiological perspective[J]. Philosophical Transactions of the
Royal Society of London (Series B; Biological Sciences), 2008, 363
(1492):741-759.
- [6] Thrall P H, Laine A L, Ravensdale M, et al. Rapid genetic change
underpins antagonistic coevolution in a natural host-pathogen
metapopulation[J]. Ecology Letters,2012,15(5):425-435.
- [7] 周军,李魁印,张立,等. 242 份小麦品种(系)成株期抗条锈
病鉴定及分子标记检测[J]. 河南农业科学,2020,49(6):84-97.
- [8] 杨文香,刘大群. 小麦抗叶锈基因的定位及分子标记研究进展
[J]. 中国农业科学,2004,37(1):65-71.
- [9] 闫红飞,杨文香,陈云芳,等. 偃麦草属 E 染色体组特异 SCAR 标
记对 *Lr19* 的特异性及稳定性研究[J]. 植物病理学报,2009,39
(1):76-81.
- [10] McIntosh R A, Hart G E, Gale M D. Catalogue of gene symbols for
wheat;2021 supplement[J]. Annual Wheat Newsletter,2021,67:
104-113.
- [11] Klymiuk V, Chawla H S, Wiebe K, et al. Discovery of stripe rust
resistance with incomplete dominance in wild emmer wheat using
bulk segregant analysis sequencing[J]. Communications Biology,
2022,5(1):826.
- [12] Wan A M, Chen X M, He Z H. Wheat stripe rust in China[J].
Australian Journal of Agricultural Research,2007,58(6):605.
- [13] 张海泉. 小麦抗白粉病分子育种研究进展[J]. 中国生态农业
学报,2008,16(4):1060-1066.
- [14] 詹海仙,畅志坚,杨足君,等. 小麦抗白粉病基因来源及抗性评
价的研究进展[J]. 中国农学通报,2010,26(10):42-46.
- [15] 李欣,畅志坚,詹海仙,等. 小麦抗条锈病基因来源及染色体
定位的研究进展[J]. 中国农学通报,2015,31(5):92-95.
- [16] 曾庆东,沈川,袁凤平,等. 小麦抗条锈病已知基因对中国当前
流行小种的有效性分析[J]. 植物病理学报,2015,45(6):
641-650.
- [17] 徐如宏,任明见,思彬彬,等. 贵农 001 中抗白粉病基因的 RAPD
标记研究[J]. 山地农业生物学报,2005,24(4):283-286.
- [18] Smith P H, Hadfield J, Hart N J, et al. STS markers for the wheat
yellow rust resistance gene *Yr5* suggest a NBS-LRR-type
resistance gene cluster[J]. Genome,2007,50(3):259-265.
- [19] Francis H A, Leitch A R, Koeber R M D. 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[J]. Theoretical and Applied Genetics,1995,90
(5):636-642.
- [20] Singh R, Datta D, Priyamvada, et al. A diagnostic PCR based assay
for stripe rust resistance gene *Yr10* in wheat [J]. Acta
Phytopathologica et Entomologica Hungarica,2009,44(1):11-18.
- [21] Peng J H, Fahima T, Röder M S, et al. Microsatellite high-density
mapping of the stripe rust resistance gene *YrH52* region on
chromosome 1B and evaluation of its marker-assisted selection in
the F₂ generation in wild emmer wheat[J]. New Phytologist,2000,
146(1):141-154.
- [22] Lagudah E S, McFadden H, Singh R P, et al. Molecular genetic
characterization of the *Lr34/Yr18* slow rusting resistance gene region
in wheat [J]. Theoretical and Applied Genetics,2006,114(1):
21-30.
- [23] Zeng Q D, Han D J, Wang Q L, et al. Stripe rust resistance and
genes in Chinese wheat cultivars and breeding lines[J]. Euphytica,
2014,196(2):271-284.
- [24] 张悦. 中国小麦主产区 305 份品种抗条锈病评价及抗病基因
分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [25] Liu S X, Pumphrey M O, Gill B S, et al. Toward positional cloning
of *Fhb1*, a major QTL for *Fusarium* head blight resistance in wheat
[J]. Cereal Research Communications,2008,36(6):195-201.
- [26] 郭瑞,姚维成,陈琛,等. 镇麦品种相关品质性状基因的分子
标记检测分析[J]. 江苏农业学报,2023,39(1):1-14.
- [27] Buerstmayr H, Lemmens M, Hartl L, et al. Molecular mapping of
QTLs for *Fusarium* head blight resistance in spring wheat. I.
Resistance to fungal spread (Type II resistance) [J]. Theoretical
and Applied Genetics,2002,104(1):84-91.
- [28] Jia H Y, Zhou J Y, Xue S L, et al. A journey to understand wheat
Fusarium head blight resistance in the Chinese wheat landrace
Wangshuibai[J]. The Crop Journal,2018,6(1):48-59.
- [29] Marchal C, Zhang J P, Zhang P, et al. BED-domain-containing
immune receptors confer diverse resistance spectra to yellow rust
[J]. Nature Plants,2018,4(9):662-668.
- [30] Klymiuk V, Yaniv E, Huang L, et al. Cloning of the wheat *Yr15*
resistance gene sheds light on the plant tandem kinase-
pseudokinase family [J]. Nature Communications,2018,9(1):
3735.