

网络出版时间:2024-05-13

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20240509.1042.008

长江中下游小麦新品系赤霉病和白粉病抗性 评估与抗病基因检测

汪尊杰^{1,2}, 胡文静², 高德荣², 赵仁慧², 张笑晴³, 徐瑶⁴,
王玲², 陈甜甜², 李东升², 李韬¹, 吴宏亚²

(1. 扬州大学农学院, 江苏扬州 225009; 2. 江苏里下河地区农业科学研究所/农业农村部长江中下游小麦生物学与遗传育种重点实验室, 江苏扬州 225007; 3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; 4. 江苏省种子管理站, 江苏南京 210036)

摘要: 了解长江中下游麦区小麦的抗病育种现状, 并鉴定筛选优异抗病品系, 对近6年长江中下游麦区参加国家区域试验和江苏省区域试验的414个品系进行抗病鉴定, 同时利用抗赤霉病基因*Fhb1*和抗白粉病基因*Pm21/PmV*的分子标记进行基因型分析。结果表明, 在供试品系中, 赤霉病抗性为抗(R)和中抗(MR)的品系分别占比10.1%和62.3%, 其中扬15-9、扬17021、宁20419连续两年鉴定结果均为R。经系谱分析, 抗病品系的亲本多为宁麦9号和扬麦158及其衍生品种。在供试品系中, 白粉病抗性为免疫(IM)、高抗(HR)和MR的品系分别占比23.4%、1.9%和8.5%, 其中扬15-9、瑞华麦505、盐麦0916、宁红1761、盐H1902、东麦1901连续三年鉴定结果均为IM。有15个品系的赤霉病和白粉病抗性同时为R或IM, 可在小麦育种中作为后备亲本使用。经抗病基因分子标记鉴定, 携有抗赤霉病基因*Fhb1*的品系有63个, 其中88.0%品系的赤霉病抗性达到MR以上; 赤霉病抗性为R的品系中仅35.7%被检测出携有*Fhb1*基因, 赤霉病抗性为MR的品系中仅14.9%被检测出携有*Fhb1*基因; 143个品系携有*Pm21/PmV*基因, 占供试材料的34.5%, 其中有73个品系抗性鉴定结果为IM至HR。97个品系免疫白粉病, 其中70.10%携有*Pm21/PmV*基因, 其他品系的抗白粉病基因有待挖掘; 10个品系同时携有*Fhb1*和*Pm21/PmV*基因, 对两种病害的抗性均在MR以上, 可直接作为抗源利用。长江中下游小麦抗病育种中, *Pm21/PmV*基因可继续使用, 将*Fhb1*基因与扬麦品种的赤霉病抗性基因相结合可进一步提高品系对赤霉病的抗性。

关键词: 小麦; 赤霉病; 白粉病; 抗病基因; 品系

中图分类号: S512.1; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)02-0175-13

Evaluation of Resistance to Fusarium Head Blight and Powdery Mildew and Analysis of Disease Resistance Genes of the Advanced Wheat Lines in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River

WANG Zunjie^{1,2}, HU Wenjing², GAO Derong², ZHAO Renhui², ZHANG Xiaoqing³,
XU Yao⁴, WANG Ling², CHEN Tiantian², LI Dongsheng², LI Tao¹, WU Hongya²

(1. Agricultural College of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2. Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Improvement on Low and Middle Yangtze River Valley Wheat Region (Ministry of Agriculture), Yangzhou Academy of Agricultural Sciences, Yangzhou, Jiangsu 225007, China; 3. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China; 4. Seed Management of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: To understand the current situation of disease resistance breeding in wheat in the middle and lower reaches of Yangtze River, and to identify and screen excellent disease resistant strains, in this study, the resistance of 414 advanced wheat lines from the national regional trial in the middle and

收稿日期: 2024-01-23

修回日期: 2024-02-29

基金项目: 江苏省现代农业重点研发项目(BE2021335); 江苏省“333”重点行业领域资助项目

第一作者 E-mail: yzwzj2024@163.com (汪尊杰)

通讯作者 E-mail: yzwhy123@126.com (吴宏亚); taoli@yzu.edu.cn (李韬)

lower reaches of the Yangtze River and the regional trial in Jiangsu Province in the past six years was identified, and the molecular markers of *Fhb1* and *Pm21/PmV* genes were used for genotyping. The results of resistance showed that: 42 advanced wheat lines were resistant to Fusarium head blight (FHB) (R), 262 advanced lines were moderate resistant (MR), accounting for 10.1% and 62.3%, respectively, among which Yang 15-9, Yang 17021, and Ning 20419 were resistant to FHB for two consecutive years. Most FHB resistance cultivars/lines were derived from Ningmai 9, Yangmai 158, and their derivative varieties through analysis of pedigree. A total of 97 advanced lines were immune (IM) to powdery mildew; 8 advanced lines were high resistant (HR) and 35 strains were moderate resistant (MR), accounting for 23.4%, 1.9%, and 8.5%, respectively. Among them, Yang 15-9, Ruihumai 505, Yanmai 0916, Ninghong 1761, Yan H1902 and Dongmai 1901 were immune (IM) to powdery mildew for three consecutive years. A total of 15 advanced lines with simultaneous resistance (R) or immunity (IM) to FHB and powdery mildew can be used as resistant parents in wheat breeding. The results of detection of resistance gene combining with resistance phenotypy showed that: 63 advanced lines carried *Fhb1* gene, accounting for 15.1% of the tested materials, and 88.0% of the advanced lines had resistance above MR. *Fhb1* gene was detected in only 35.7% of advanced lines with resistance to FHB (R). Only 14.9% of the advanced lines with moderate resistance to FHB were detected to carry *Fhb1* gene. 143 advanced lines carried *Pm21/PmV* genes, accounting for 34.5% of the tested materials, of which 73 advanced lines were identified as immune (IM) to high resistance (HR) to powdery mildew. 70.1% of the 97 advanced lines that were immune to powdery mildew carried *Pm21/PmV* genes, and 29.9% of the other advanced lines were resistant to powdery mildew with the unknown genes to be discovered. 10 advanced lines carried both *Fhb1* and *Pm21/PmV* genes, and the resistance to both diseases was above MR, which can be directly used as resistance sources. This study suggested that *Pm21/PmV* genes can be continuously used in wheat disease resistance breeding in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Combining *Fhb1* gene with FHB resistance gene of Yangmai variety can improve the FHB resistance.

Keywords: *Triticum aestivum* L.; Fusarium head blight; Powdery mildew; Resistance gene; Advanced lines

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是中国主要的粮食作物之一, 其高产稳产对中国粮食安全具有重要意义。长江中下游麦区是中国第二大小麦种植区, 该区域气候湿润, 年降水量高, 赤霉病、白粉病等病害频发, 制约小麦生产。

小麦赤霉病是由禾谷镰刀菌等多种镰刀菌引起的真菌病害, 主要的侵染时期是小麦开花期, 在籽粒灌浆成熟过程中不断繁殖, 造成籽粒干瘪等, 严重影响小麦产量和品质^[1-3]。小麦赤霉病抗性是由多基因控制的数量性状, 通过遗传学研究, 已鉴定出大量抗赤霉病数量性状遗传位点 (QTL), 但是被公认并且定名的是 *Fhb1*~*Fhb7*^[4-11], 其中效应值最稳定的基因是 *Fhb1*, 已经被克隆, 也是近几年来抗赤霉病分子育种利用频率最高的基因^[12-14]。目前, 长江中下游麦区小麦育种中 *Fhb1*

基因大部分来源于宁麦 9 号。小麦白粉病是由布氏白粉菌 (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*) 引起的真菌性病害, 主要影响叶片、茎秆等光合作用, 发病严重时小麦叶片枯萎, 停止籽粒灌浆, 造成大幅度减产。目前国际上已正式命名了 80 多个主效抗白粉病基因 (*Pm1*~*Pm68*、*PmG3M* 等), 而来源于英国和前苏联的簇毛麦 6V 染色体的 *Pm21/PmV* 基因是中国小麦抗白粉病育种的重要抗源, 目前在长江中下游麦区得到广泛应用。研究表明, *Pm21* 与 *PmV* 是来源不同的等位基因^[15-18]。

近年来, 由于长江中下游小麦播期推迟和秸秆还田等影响, 小麦群体偏大, 田间病原菌量增多, 赤霉病和白粉病发生严重^[19], 培育和种植多抗品种是解决这一问题的最好办法之一。随着分

子标记的快速发展,通过分子标记辅助选择可快速将2个或以上的抗病基因(QTL)聚合到一起,缩短传统育种进程,提高育种效率^[20-21]。选择聚合抗病基因的优异品种(系)为抗源可为小麦抗病遗传改良奠定基础。目前,*Fhb1*和*Pm21/PmV*是被认可的分别控制赤霉病和白粉病的主效基因,其分子标记也被广泛应用于抗病育种^[13-17]。本研究对近几年长江中下游新育成的414个小麦品系开展抗赤霉病基因*Fhb1*、抗白粉病基因*Pm21/PmV*检测和抗病性综合评价,全面地了解本生态区的小麦抗病育种现状及存在问题,同时鉴定筛选优异抗病品系,以为小麦抗病品种选育提供材料和理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试小麦来自2018年至2023年长江中下游国家区域试验和江苏省淮南区域试验参试品系。2017—2018年度(2018年)鉴定品系81个;2018—2019年度(2019年)鉴定品系103个;2019—2020年度(2020年)鉴定品系132个;2020—2021年度(2021年)鉴定品系137个;2021—2022年度(2022年)鉴定品系114个;2022—2023年度(2023年)鉴定品系114个。共有414个不同品系,其中国家区试品系144个,江苏淮南区试品系270个。

1.2 抗病鉴定结果来源

长江中下游国家区域试验赤霉病和白粉病的抗性结果由全国农业技术推广服务中心委托鉴定;江苏省区域试验赤霉病和白粉病的抗性结果由江苏省种子管理站委托鉴定。

1.3 赤霉病、白粉病抗病性鉴定

长江中下游和江苏省小麦区域试验赤霉病抗性鉴定采用人工接种鉴定和自然发病相结合的方法,单年度抗赤霉病最终评价结果依据自然发病点的最高病情指数数据与人工接种结果综合评价,续试品系最终评价取年度之间最严重的抗性级别。两级试验人工接种鉴定点均为江苏省农科院植物保护研究所。长江中下游区域试验自然发病鉴定单位为中国农科院植物保护研究所,鉴定试点设置在南平、扬州和南阳。江苏省区域试验自然发病鉴定点设置在江苏丘陵地区镇江农业科学研究所。赤霉病接种鉴定圃中苏麦3号为抗病

对照,扬麦158为中抗对照,淮麦20为中感对照,矮抗58为感病对照。小麦赤霉病鉴定方法参考《小麦区域试验品种抗赤霉病鉴定技术规程》(NY/T 2954-2016),人工接种鉴定抗性评价标准:抗(R),平均严重度 \leq 苏麦3号的严重度均值;中抗(MR),苏麦3号的严重度均值 $<$ 平均严重度 \leq 扬麦158的严重度均值;中感(MS),扬麦158的严重度均值 $<$ 平均严重度 \leq 淮麦20的严重度均值;感(S),平均严重度 $>$ 淮麦20的严重度均值。

长江中下游区域试验小麦白粉病抗性鉴定采用接种鉴定和自然发病结合的方法。单年度最终评价结果依据自然发病点与人工接种结果综合评价,续试品系最终评价取年度之间最严重的抗性级别。接种鉴定单位为中国农科院植物保护研究所,鉴定点设置在廊坊和昌平。自然发病鉴定单位为江苏里下河地区农业科学研究所。白粉病鉴定方法和调查记载标准参见《全国小麦品种试验抗病虫鉴定标准(试行)》。病害严重度按0~9级法记载,记载2次,最终评价取2次的最高值。抗性评价标准:免疫(IM),严重度为0;高抗(HR),严重度为1~2;中抗(MR),严重度为3~4;中感(MS),严重度为5~6;高感(HS),严重度为7~9。

本研究供试材料的抗病最终评价结果来源于国家区域试验和江苏省区域试验年度之间最严重的抗性级别。

1.4 抗病基因分子标记检测

每个品系取种子15粒,常温状态下在穴盘中发芽,取幼苗叶片放入液氮中速冻,采用CTAB法提取基因组DNA。PCR反应体系为10.0 μ L,包括100 ng模板DNA、各0.2 μ L上下游引物(10 μ mol \cdot L⁻¹)、4.3 μ L 2 \times Taq Master Mix (Taq DNA Polymerase、dNTP以及优化的缓冲体系)、4.3 μ L ddH₂O。PCR扩增程序:94 $^{\circ}$ C预变性5 min;94 $^{\circ}$ C变性30 s,61 $^{\circ}$ C或58 $^{\circ}$ C退火30 s,72 $^{\circ}$ C延1 min,35个循环;72 $^{\circ}$ C延伸10 min。采用8%聚丙烯酰胺凝胶分离,通过银染显色检测PCR产物。*Fhb1*基因检测采用诊断性分子标记His3B-4^[22],以扬麦18为阳性对照,检测结果与阳性对照品种一致,说明该品种(系)可能携带*Fhb1*基因。采用基于*Pm21/PmV*启动子序列开发的共显性功能标记MBH1检测抗白粉病基因*Pm21/PmV*^[23]。具体所用引物序列参见表1。

表 1 本研究采用的分子标记及其序列

Table 1 Molecular markers and primer sequences used in this study

分子标记 Molecular marker	基因 Gene	染色体 Chromosome	引物序列 Primer sequence (5'-3')	退火温度 T _m /°C
His3B-4	<i>Fhb1</i>	3BS	F: ATGCGTGCCTGTACTTG R: CGTCACAGAGTCCAGTGAAA	61
MBH1	<i>Pm21/PmV</i>	6V	F: GCCATTATAGTCAAGAGTGCACTAGCTGT R: AGCTCCTCTCGTTCTCCAATGCT	58

2 结果与分析

2.1 试验品系抗病性鉴定评价

2.1.1 赤霉病抗性评价

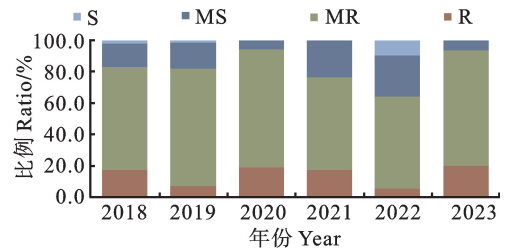
在 2018 年至 2023 年的 6 个年度中,从 414 个小麦品系中筛选到的抗病(R)品系数分别为 14、7、25、23、6 和 21 个,分别占当年鉴定品系数量的比例为 17.3%、6.8%、18.9%、17.2%、5.3% 和 19.6%;中抗(MR)品系数分别为 53、77、79、79、67 和 99 个,分别占当年鉴定品系数量的比例为 65.4%、74.8%、75%、59.0%、58.8%和 73.8%;中感(MS)品系数分别为 12、17、8、32、30 和 7 个,分别占当年鉴定品系数量的比例为 14.8%、16.5%、6.1%、23.9%、26.3%和 6.5%;感(S)病品系只有 2018、2019 和 2022 年三个年份出现,分别只有 2.5%、1.9%和 9.7%(图 1)。

综合 6 年试验结果,对参试品系进行抗赤霉病性最终评价,表现为 R、MR、MS 和 S 的品系数分别为 42、262、96 和 14 个,分别占 10.1%、63.3%、23.2%和 3.4%(图 2)。其中,国家区域试验品系赤霉病抗性以 MS 和 MR 为主,江苏省淮南区域试验赤霉病抗性以 MR 为主。抗性为 R 的 42 个品系均来自江苏省淮南区域试验,分析系谱发现,其亲本大部分来源宁麦 9 号衍生品种(宁麦 13、宁麦 14 等)、扬麦 158 衍生品种(扬麦 16、镇麦 9 号、扬 97G59 等)和扬麦 5 号衍生品种(扬麦 9 号、扬麦 22 等)(表 2)。其中,扬 15-9 连续 3 年(2018、2019 和 2020 年)鉴定为 R,亲本为宁麦 9 号衍生品种和扬麦 5 号衍生品种;扬 17021 连续两年(2020 和 2021 年)鉴定为 R,亲本为宁麦 9 号衍生品种和扬麦 158 衍生品种;宁 20419 连续两年(2022 和 2023 年)鉴定为 R,亲本仅含有扬麦 158 衍生品种。

2.1.2 白粉病抗性评价

2018 年至 2023 年筛选到免疫(IM)品系数分别为 10、29、27、33、38 和 49 个,分别占当年鉴定品

系数的 20.0%、29.3%、20.8%、24.1%、33.6%和 43.0%;高抗(HR)品系数分别为 0、2、2、15、5 和 3 个,分别占当年鉴定品系系数的 0、2.0%、1.5%、10.9%、4.4%和 2.6%;中抗(MR)品系数分别为 2、7、4、6、8 和 19 个,分别占当年鉴定品系系数的 4.0%、7.1%、3.1%、4.4%、7.1%和 16.7%;中感(MS)品系数分别为 2、18、22、23、19 和 22 个,分别占当年鉴定品系系数的 4.0%、18.2%、16.9%、16.8%、16.8%和 19.3%;高感(HS)品系数分别为 36、43、75、60、43 和 21 个,分别占当年鉴定品系系数的比例为 72.0%、43.4%、57.7%、43.8%、38.1%和 18.3%(图 3)。这表明,每年鉴定品系中对白粉病的抗性呈两极分化状态,以 HS 和 IM 为主,MR 至 MS 品系较少。年度之间趋势可以看出免疫品系数逐年增加,高感品系逐年减少。



R: 抗; MR: 中抗; MS: 中感; S: 感。下同。

R: Resistant; MR: Moderately resistant; MS: Moderately susceptible; S: Susceptible. The same in belows.

图 1 不同年份小麦品系赤霉病抗性的变化

Fig. 1 Change of Fusarium head blight resistance in the 414 wheat lines in different years

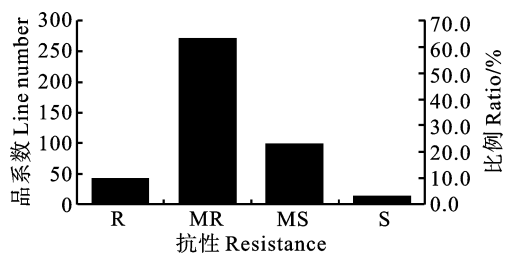


图 2 6 年中 414 个小麦品系赤霉病抗性的综合结果
Fig. 2 Comprehensive resistance of the 414 wheat lines to Fusarium head blight in the 6 consecutive years

表 2 对赤霉病表现抗(R)的 42 个小麦品系系谱
Table 2 Pedigree of the 42 wheat lines with R resistance to Fusarium head blight

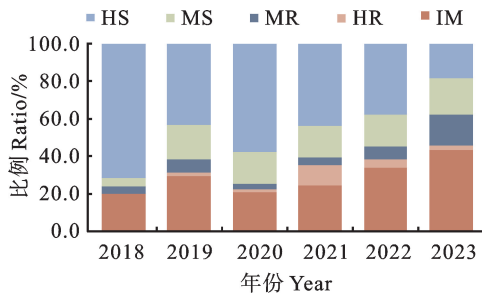
序号 No.	品系 Line	系谱 Pedigree
1	扬 17021 Yang 17021	宁麦 14/镇麦 9 号(宁麦 14; 宁麦 9 号系选)
2	宁 18168 Ning 18168	扬麦 16/宁麦 13(宁麦 13; 宁麦 9 号系选)
3	宁 18343 Ning 18343	宁麦 13/扬麦 16(宁麦 13; 宁麦 9 号系选)
4	宁 18416 Ning 18416	宁麦 13/镇麦 168(宁麦 13; 宁麦 9 号系选; 镇麦 168; 苏麦 6 号/扬 97G59)
5	宁红 1833 Ninghong 1833	扬 06G5/川农 17(扬 06G5; 扬麦 9 号 * 3/97033-2)
6	扬 19413 Yang 19413	NAU1258/镇 9(镇麦 9 号; 苏麦 6 号/扬 97G59)
7	扬 19145 Yang 19145	实秆麦/宁麦 13 ³ (宁麦 13; 宁麦 9 号系选)
8	扬大 528 Yangda 528	宁麦 13/宁 08-30(宁麦 13; 宁麦 9 号系选)
9	中旗 38 Zhongqi 38	宁麦 13/22(宁麦 13; 宁麦 9 号系选)
10	江丰麦 004 Jiangfengmai 004	扬辐麦 5 号/扬麦 15(扬辐麦 5 号; 扬麦 11 ² /扬辐麦 9311; 扬麦 11; 扬 158/3Y. C/鉴二//扬 85-85)
11	扬辐麦 0078 Yangfumai 0078	(镇麦 9 号/扬辐麦 9144) F ₁ 辐选(镇麦 9 号; 苏麦 6 号/扬 97G59)
12	扬 20-224 Yang 20-224	扬 14-21/扬 14-182
13	宁 20419 Ning 20419	农丰 88/镇麦 9 号(镇麦 9 号; 苏麦 6 号/扬 97G59)
14	宁 18343 Ning 18343	宁麦 13/扬麦 16(宁麦 13; 宁麦 9 号系选)
15	宁 18416 Ning 18416	宁麦 13/镇麦 168(宁麦 13; 宁麦 9 号系选; 镇麦 9 号; 苏麦 6 号/扬 97G59)
16	宁红 1833 Ninghong 1833	扬 06G5/川农 17(扬 06G5; 扬麦 9 号 * 3/97033-2)
17	宁红 1894 Ninghong 1894	扬 9 选系/镇麦 9 号(镇麦 9 号; 苏麦 6 号/扬 97G59)
18	扬 15-9 Yang 15-9	扬麦 9 号/扬麦 18
19	宁 17329 Ning 17329	宁麦 14/扬麦 20(宁麦 14; 宁麦 9 号系选)
20	江麦 8261 Jiangmai 8261	扬辐麦 9144/扬麦 22(扬麦 22; 扬麦 9 号 * 3/97033-2)
21	金 18153 Jin 18153	扬辐麦 0082/宁麦 14(宁麦 14; 宁麦 9 号系选)
22	润扬麦 1933 Runyangmai 1933	镇麦 168/扬辐麦 5 号(镇麦 168; 苏麦 6 号/扬 97G59)
23	宁大 120 Ningda 120	苏麦 3 号/宁麦 13 ² (宁麦 13; 宁麦 9 号系选)
24	扬辐麦 8059 Yangfumai 8059	扬麦 22//宁麦 16/扬辐麦 7091M(扬麦 22; 扬麦 9 号 * 3/97033-2)
25	扬辐麦 8022 Yangfumai 8022	镇麦 9 号/扬麦 22M(镇麦 9 号; 苏麦 6 号/扬 97G59)
26	YC201901 YC201901	扬麦 12/宿 9908//扬麦 17
27	宁麦资 18278 Ningmaizi 18278	宁麦资 14213/镇麦 168(镇麦 168; 苏麦 6 号/扬 97G59)
28	金麦 209 Jinmai 209	亿麦 9 号/H209
29	金丰 15-6 Jingfeng 15-6	小簇麦/扬麦 158 //意大利(引 5)
30	宁麦资 2158 Ningmaizi 2158	不祥
31	扬农 714 Yangnong 714	不祥
32	练麦 202 Lianmai 202	不祥
33	练麦 201 Lianmai 201	不祥
34	宁 21379 Ning 21379	不祥
35	兴运麦 2018 Xingyunmai 2018	不祥
36	兴运麦 2026 Xingyunmai 2026	不祥
37	宁 21385 Ning 21385	不祥
38	扬江麦 988 Yangjiangmai 988	不祥
39	宁 D212 Ning D 212	不祥
40	宁丰 1008 Ningfeng 1008	不祥
41	农麦 156 Nongmai 156	扬辐麦 4 号/扬麦 16(扬辐麦 4 号; 宁麦 8 号/宁麦 9 号)
42	宁麦资 166 Ningmaizi 166	IDO580-22/宁麦 13//镇麦 6 号/3/偃高 1 号/烟农 159//优繁 5 号/NDW(宁麦 13; 宁麦 9 号系选)

综合 6 年试验结果,对参试品系进行抗白粉病性最终评价,表现为 IM、HR、MR、MS 和 HS 的品系数分别为 97、8、35、44 和 219 个,分别占 23.4%、1.9%、8.5%、10.6% 和 52.9%;11 个品系无检测结果(图 4)。国家区域试验品系白粉病抗性以 MS~HS 为主,江苏省淮南区域试验白粉病抗性以 IM 和 HS 为主。97 个免疫白粉病品系均来自江苏省淮南区域试验,通过系谱分析,其抗性主要来源于镇麦 9 号、扬麦 18、扬麦 22 等亲本(表 3);同时筛选到 6 个品系(扬 15-9、瑞华麦 505、盐麦 0916、宁红 1761、盐 H1902、东麦 1901)连续三年鉴定结果均为 IM,可作为抗源使用。

2.2 抗病基因分子标记检测结果

2.2.1 抗赤霉病基因 *Fhb1* 分子标记检测结果

利用 *Fhb1* 诊断标记 His3B-4 进行检测显示,63 个品系携有 *Fhb1* 基因,占供试品系的 15.1% (表 4 和图 5)。这些品系中,16 个来自国家区域试验,47 个来自江苏省淮南区域试验;对赤霉病



HS:高感;HR:高抗;IM:免疫。下同。
HS: High susceptible; HR: High resistant; IM: Immunity.

The same in belows.

图 3 414 个小麦品系在连续六年的白粉病抗性情况
Fig. 3 Resistance of the 414 wheat lines to wheat powdery mildew for 6 consecutive years

表现为 R、MR、MS 和 S 的品系数分别为 15、39、8 和 1;抗性为 R 的 42 个品系中,携有 *Fhb1* 基因的 15 个品系主要是扬麦和宁麦品系;262 个赤霉病抗性为 MR 的品系中,有 223 个未被检出 *Fhb1* 基因,占供试品系的 53.9%。经系谱分析,63 个携有 *Fhb1* 基因的品系中有 37 个品系的亲本明确含有宁麦 9 号及其衍生品种;223 个不携带 *Fhb1* 基因的中抗品系的亲本主要是扬麦 158 衍生品系。

2.2.2 抗白粉病基因 *Pm21* 分子标记检测结果

利用分子标记 MBH1 检测结果表明,143 个品系检测出 *Pm21/PmV* 基因,占比 34.5% (表 5 和图 6)。其中,国家区域试验品系 46 个,江苏省淮南区域试验品系 97 个。分子标记检测到 140 个品系携有 *Pm21* 基因,其中有 66 个品系的白粉病抗性为 IM,7 个为 HR,20 个为 MR,13 个为 MS,37 个为 HS;携有 *PmV* 基因的品系有 3 个,但只有 2 个品系的抗性达到 IM;来自江苏省淮南区域试验的 97 个免疫白粉病品系中,68 个携有 *Pm21/PmV* 基因;另有 15 个品系的白粉病抗性较好,但未检测出携有 *Pm21* 基因(表 6)。6 个连续三年鉴定结果为 IM 的品系均携有 *Pm21/PmV* 基因。

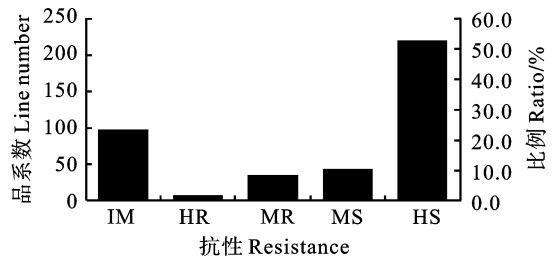
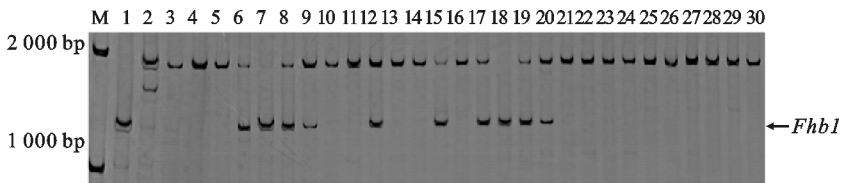


图 4 414 个小麦品系白粉病抗性情况
Fig. 4 Resistance of the 414 wheat lines to wheat powdery mildew



M:DL2000;1:扬麦 18;2:扬麦 22;3:扬麦 23;4~30:部分参试品系。图 6 同。

M: DL2000; 1: Yangmai 18; 2: Yangmai 22; 3: Yangmai 23; 4-30: Part of the tested lines. The same in Fig. 6.

图 5 His3B-4 对部分品系的 *Fhb1* 基因扩增结果

Fig. 5 Amplification patterns of His3B-4 linked with *Fhb1* in different lines

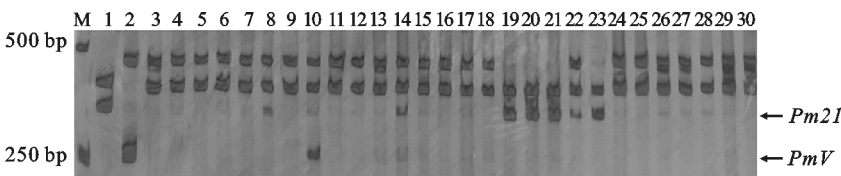


图 6 MBH1 对部分品系的 *Pm21/PmV* 基因扩增结果

Fig. 6 PCR amplifications of the tested partial lines using markers MBH1 linked with *Pm21/PmV*

表 3 对白粉病表现免疫(IM)的 97 个小麦品系系谱
Table 3 Pedigree of 97 wheat lines with IM resistance to wheat powdery mildew

序号 No.	品系 Line	系谱 Pedigree
1	汉麦 008 Hanmai 008	扬麦 15/华 2566
2	扬 13G1 Yang 13G1	宁麦 14/扬麦 18(宁麦 14;宁麦 9 号系选)
3	宁麦资 999 Ningmaizi 999	宁麦资 218/扬麦 17//镇麦 12(镇麦 12;苏麦 6 号/扬 97G59)
4	扬 16-76 Yang 16-76	AB100/AB108
5	宁 1695 Ning 1695	扬 15G7/华麦 1092
6	扬辐麦 7216 Yangfumai 7216	扬麦 22///扬麦 19//扬麦 11/1-9311M
7	盐麦 0916 Yanmai 0916	镇麦 9 号/镇麦 168(镇麦 168;苏麦 6 号/扬 97G59)
8	宁红 1761 Ninghong 1761	镇麦 9 号/扬 08-4(镇麦 9 号;苏麦 6 号/扬 97G59)
9	盐 H1902 Yan H1902	宁麦 21/扬辐麦 9144
10	东麦 1901 Dongmai 1901	扬辐麦 7091/镇麦 10 号(镇麦 10 号;苏麦 6 号/扬 97G59)
11	宁 18168 Ning 18168	扬麦 16/宁麦 13 (宁麦 13;宁麦 9 号系选)
12	苏垦麦 1416 Sukenmai 1416	扬麦 20/宁丰 458(宁丰 458;宁麦 9 号/扬麦 11)
13	宁 18343 Ning 18343	宁麦 13/扬麦 16(宁麦 13;宁麦 9 号系选)
14	宁 18416 Ning 18416	宁麦 13/镇麦 168(宁麦 13;宁麦 9 号系选;镇麦 168;苏麦 6 号/扬 97G59)
15	宁红 1833 Ninghong 1833	扬 06G5/川农 17(扬 06G5;扬麦 9 号 * 3/97033-2)
16	扬 19323 Yang 19323	扬 9/扬麦 18(扬麦 18;4×宁麦 9 号/3/6×扬麦 158//88-128/南农 P045)
17	扬 19413 Yang 19413	NAU1258/镇 9(镇麦 9 号;苏麦 6 号/扬 97G59)
18	镇 18081 Zhen 18081	镇 08178/新麦 9 号
19	瑞华麦 505 Ruihuamai 505	瑞华麦 569/扬麦 18(扬麦 18;4×宁麦 9 号/3/6×扬麦 158//88-128/南农 P045)
20	扬富麦 13 Yangfumai 13	宁麦 26/农麦 88//农麦 88(农麦 88;镇麦 168/扬麦 10 号)
21	宁麦 211 Ningmai 211	镇麦 12/扬辐麦 7091(镇麦 12;苏麦 6 号/扬 97G59)
22	华麦 21022 Huamai 21022	扬 08-6/宁丰 458(宁丰 458;宁麦 9 号/扬麦 11)
23	润扬麦 118 Runyangmai 118	宁麦资 119/镇麦 10//扬麦 25(镇麦 10 号;苏麦 6 号/扬 97G59)
24	盐麦 2109 Yanmai 2109	镇麦 12/宁麦 17(镇麦 12;苏麦 6 号/扬 97G59)
25	华麦 19677 Huamai 19677	庆丰 568/镇 10216(镇 10216;苏麦 6 号/扬 97G59)
26	扬 20-310 Yang 20-310	淮 182/92R137 BC1F10
27	扬 20208 Yang 20208	镇麦 168/3/扬麦 15//宁麦 14/扬麦 17(宁麦 14;宁麦 9 号系选;镇麦 168;苏麦 6 号/扬 97G59)
28	金扬麦 2018 Jinyangmai 2018	扬麦 15 辐照后代
29	润扬麦 128 Runyangmai 128	扬麦 158/镇麦 9 号//宁麦 13(宁麦 13;宁麦 9 号系选)
30	扬辐麦 0078 Yangfumai 0078	(镇麦 9 号/扬辐麦 9144)F1 辐选(镇麦 9 号;苏麦 6 号/扬 97G59)
31	扬 20-164 Yang 20-164	宁 14/3/镇 9//扬 158/扬 15
32	扬 20-189 Yang 20-189	13 纹 7986/13 纹 6483//14 纹 2665
33	扬 20-224 Yang 20-224	扬 14-21/扬 14-182
34	宁红 1955 Ninghong 1955	扬麦 17/镇 05185(镇 05185;苏麦 6 号/扬 97G59)
35	宁 19397 Ning 19397	宁麦 9 号/镇麦 168//华 0722(镇麦 168;苏麦 6 号/扬 97G59)
36	练麦 13 Lianmai 13	03G12/镇麦 6 号(03G12;4×宁麦 9 号/3/61 扬麦 158//88-128/南农 P045)
37	宁麦 213 Ningmai 213	华麦 6 号/郑麦 9023//镇麦 9 号(镇麦 9 号;苏麦 6 号/扬 97G59)
38	明麦 14279 Mingmai 14279	明麦 133/邯邯 6172(明麦 133;郑麦 9023/扬麦 11)
39	农麦 2206 Nongmai 2206	宁麦 13/华麦 5 号(宁麦 13;宁麦 9 号系选)
40	焦点麦 157 Jiaodianmai 157	镇麦 12/扬麦 23//镇麦 12(镇麦 12;苏麦 6 号/扬 97G59)
41	宁 20419 Ning 20419	农丰 88/镇麦 9 号(镇麦 9 号;苏麦 6 号/扬 97G59)
42	焦点麦 510 Jiaodianmai 510	扬辐麦 4 号/镇麦 12 号(扬辐麦 4 号;宁麦 8 号/宁麦 9 号;镇麦 12;苏麦 6 号/扬 97G59)
43	润扬麦 2043 Runyangmai 2043	宁麦 20/镇麦 8 号
44	苏垦麦 1416 Sukenmai 1416	扬麦 20/宁丰 458(宁丰 458;宁麦 9 号/扬麦 11)
45	宁 18343 Ning 18343	宁麦 13/扬麦 16(宁麦 13;宁麦 9 号系选)
46	宁 18416 Ning 18416	宁麦 13/镇麦 168(宁麦 13;宁麦 9 号系选;镇麦 9 号;苏麦 6 号/扬 97G59)
47	宁红 1833 Ninghong 1833	扬 06G5/川农 17(扬 06G5;扬麦 9 号 * 3/97033-2)
48	盐 H2002 Yan H2002	扬 12-25/农麦 88

(续表3 Continued table 3)

序号 No.	品系 Line	系谱 Pedigree
49	扬 19099 Yang 19099	镇 02168 ³ //扬 15 ⁴ /扬 03G16(镇麦 02168;苏麦 6号/扬 97G59)
50	镇 18077 Zhen 18077	镇麦 12号/淮麦 28(镇麦 12;苏麦 6号/扬 97G59)
51	扬 15-9 Yang 15-9	扬麦 9号/扬麦 18
52	盐麦 996 Yanmai 996	扬麦 18/镇麦 9号(镇麦 9号;苏麦 6号/扬 97G59)
53	姜丰 18109 Jiangfeng 18109	扬麦 17/扬麦 22//镇麦 9号(镇麦 9号;苏麦 6号/扬 97G59)
54	金丰 17099 Jingfeng 17099	(扬麦 15/扬 92R137)//(扬麦 15/宁麦 9号)
55	江麦 8261 Jiangmai 8261	扬辐麦 9144/扬麦 22(扬麦 22;扬麦 9号 * 3/97033-2)
56	盐 H1901 Yan H1901	镇麦 10号//071T-149/镇麦 168(镇麦 10号;镇麦 168;苏麦 6号/扬 97G59)
57	润扬麦 1933 Runyangmai 1933	镇麦 168/扬辐麦 5号(镇麦 168;苏麦 6号/扬 97G59)
58	扬 17529 Yang 17529	扬麦 17//扬 97G59/苏麦 6号(扬 97G59;扬麦 158 ⁴ /Compton)
59	宁红 1723 Ninghong 1723	宁麦 14/镇麦 9号(宁麦 14;宁麦 9号系选;镇麦 9号;苏麦 6号/扬 97G59)
60	宁 17104 Ning 17104	扬麦 17/镇 02168//扬麦 11(镇麦 02168;苏麦 6号/扬 97G59)
61	宁麦 1512 Ningmai 1512	不祥
62	苏麦 628 Sumai 628	不祥
63	扬 17G83 Yang 17G83	扬麦 18 连续二次辐照诱变
64	宁红 1637 Ninghong 1637	镇麦 9号/扬麦 158(镇麦 9号;苏麦 6号/扬 97G59)
65	苏麦 168 Sumai 168	丰庆 518/罗麦 8号
66	苏农麦 1号 Sunongmai 1	YD301/扬麦 11(扬麦 11;扬 158/3Y.C/鉴二//扬 85-85)
67	瑞华 513 Ruihua 513	不祥
68	扬 16-3 Yang 16-3	扬麦 16/(苏麦 6号/97G59)
69	东麦 231 Dongmai 231	不祥
70	华麦 206014 Huamai 206014	不祥
71	华麦 206160 Huamai 206160	不祥
72	盐 16110 Yan 16110	不祥
73	宁丰麦 8号 Ningfengmai 8	不祥
74	瑞华麦 591 Ruihuamai 591	不祥
75	宁麦资 2158 Ningmaizi 2158	不祥
76	宁麦资 2172 Ningmaizi 2172	不祥
77	江丰麦 04 Jiangfengmai 04	不祥
78	南农 1015 Nannong 1015	不祥
79	扬辐麦 1106 Yangfumai 1106	不祥
80	穗源麦 1号 Suiyuanmai 1	不祥
81	优麦 1号 Youmai 1	不祥
82	扬富麦 22105 Yangfumai 22105	不祥
83	扬富麦 2216 Yangfumai 2216	不祥
84	扬 21100 Yang 21100	扬麦 25 ⁴ /3/扬麦 18 ³ //扬麦 13 ² /CI12633
85	扬 21028 Yang 21028	镇麦 9号//扬麦 17/扬麦 22(镇麦 9号;苏麦 6号/扬 97G59)
86	扬 21023 Yang 21023	扬 159850/扬 14052
87	扬辐麦 1308 Yangfumai 1308	不祥
88	镇 21067 Zhen 21067	不祥
89	镇 21111 Zhen 21111	不祥
90	宁红 2098 Ninghong 2098	不祥
91	扬 21135 Yang 21135	不祥
92	宁红 2025 Ninghong 2025	不祥
93	宁 21385 Ning 21385	不祥
94	扬江麦 1826 Yangjiangmai 1826	不祥
95	长江麦 903 Changjiangmai 903	不祥
96	扬辐麦 5145 Yangfumai 5145	(扬辐麦 4号/镇麦 9号)F ₁ 辐照(扬辐麦 4号;宁麦 8号/宁麦 9号;镇麦 9号;苏麦 6号/扬 97G59)
97	宁麦资 166 Ningmaizi 166	IDO580-22/宁麦 13//镇麦 6号/3/偃高 1号/烟农 159//优繁 5号/NDW(宁麦 13;宁麦 9号系选)

表 4 携有*Fhb1* 基因的 63 个品系对赤霉病的抗性表现
Table 4 Resistance of the 63 wheat lines with *Fhb1* to Fusarium head blight

品系 Line	抗性 Resistance	品系 Line	抗性 Resistance
扬 17021 Yang 17021	R	华麦 1191 Huamai 1191	MR
宁 18343 Ning 18343	R	苏麦 308 Sumai 308	MR
扬 19145 Yang 9145	R	宁 17065 Ning 17065	MR
扬大 528 Yang 528	R	华运麦 17381 Huayunmai 17381	MR
中旗 38 Zhongqi 38	R	苏麦 588 Sumai 588	MR
扬 20-224 Yang 20-224	R	丰登 1518 Fengdeng 1518	MR
扬 15-9 Yang 15-9	R	扬大 502 Yangda 502	MR
宁 17329 Ning 17329	R	宁 1805 Ning 1805	MR
江麦 8261 Jiang 8261	R	盐 601-1 Yan 601-1	MR
宁大 120 Ning 120	R	盐麦 2101 Yanmai 2101	MR
YC201901 YC 201901	R	中垦麦 189 Zhongkenmai 189	MR
扬农 714 Yangnong 714	R	宁麦资 19460 Ningmai 19460	MR
练麦 202 Lianmai 202	R	苏麦 258 Sumai 258	MR
扬江麦 988 Yangjiangmai 988	R	苏麦 0228 Sumai 0228	MR
宁丰 1008 Ningfeng 1008	R	苏麦 1918 Sumai 1918	MR
鄂 T45048 E T45048	MR	苏麦 179 Sumai 179	MR
东麦 1501 Dongmai 1501	MR	扬强麦 725 Yangqiangmai 725	MR
佳源麦 1 号 Jiayuanmai 1	MR	扬 21100 Yang 21100	MR
宁 17108 Ning 17108	MR	练麦 201 Lianmai 201	MR
宁 13001 Ning 13001	MR	宁麦 1512 Ningmai 1512	MR
宁麦 215 Ningmai 215	MR	苏麦 628 Sumai 628	MR
苏麦 1588 Sumai 1588	MR	扬江麦 18 Yangjiangmai 18	MR
滁麦 1801 Chumai 1801	MR	苏麦 1818 Sumai 1818	MS
宁 16394 Ning 16394	MR	豫农 903S Yunong 903S	MS
东麦 2001 Dongmai 2001	MR	宁 1896 Ning 1896	MS
扬 20208 Yang 20208	MR	苏麦 5288 Sumai 5288	MS
华麦 1906 Huamai 1906	MR	长江麦 816 Changjiangmai 816	MS
金 1915 Jin 1915	MR	苏麦 526 Sumai 526	MS
润扬麦 2023 Runyangmai 2023	MR	宁 16176 Ning 16176	MS
盐 H2002 Yan H2002	MR	禾运麦 17111 Heyunmai 17111	MS
扬 19099 Yang 19099	MR	宁麦资 18306 Ningmaizi 18306	S
扬江麦 1828 Yangjiangmai 1828	MR		

表 5 143 个品系的分子标记检测结果及白粉病抗性
Table 5 Genotype and resistance of the 143 wheat lines to powdery mildew

品系 Line	基因 Gene	抗性 Resistance	品系 Line	基因 Gene	抗性 Resistance
扬 12-145 Yang 12-145	+	HR	宁麦资 20770 Ningmaizi 20770	+	MR
扬 2020 Yang 2020	+++	HR	华麦 19677 Huamai 19677	+	IM
扬 19069 Yang 19069	+	HR	扬 20-310 Yang 20-310	+	IM
天民 133 Tianming 133	+	HR	盐麦 2101 Yanmai 2101	+	HS
华麦 1403 Huamai 1403	+	HR	润扬麦 128 Runyangmai 128	+	IM
扬辐麦 7291 Yangfumai 7291	+	HR	扬辐麦 0078 Yangfumai 0078	+	IM
华麦 19678 Huamai 19678	+	HS	扬 20-164 Yang 20-164	+	IM
国红 11 Guohong 11	+	HS	扬 20-189 Yang 20-189	+	IM
宁麦 1504 Ningmai 1504	+	HS	扬 20-224 Yang 20-224	+	IM
宁麦 16387 Ningmai 16387	+	HS	宁红 1955 Ninghong 1955	+	IM
扬 18465 Yang 18465	+	HS	宁 19397 Ning 19397	+	IM
扬辐麦 8167 Yangfumai 8167	+++	HS	练麦 13 Lianmai 13	+	IM
扬辐麦 7177 Yangfumai 7177	+	HS	宁麦 213 Ningmai 213	+	IM
宁红 1628 Ninghong 1628	+	HS	明麦 14279 Mingmai 14279	+	IM
扬 17127 Yang 17127	+	HS	农麦 2206 Nongmai 2206	+	IM
南农 29 Nannong 29	+	HS	焦点麦 157 Jiadianmai 157	+	IM

(续表 5 Continued table 5)

品系 Line	基因 Gene	抗性 Resistance	品系 Line	基因 Gene	抗性 Resistance
长江麦 903 Changjiangmai 903	+++	HS	苏麦 0228 Sumai 0028	+	HS
南农 17Y139 Nannong 17Y139	+++	HS	宁 20419 Ning 20419	+	IM
信麦 161 Xinmai 161	+++	HS	南农 19Y168 Nannong 19Y168	+	HS
镇 14034 Zhen 14034	+	HS	焦点麦 510 Jiaodianmai 510	+	IM
宁红 1458 Ninghong 1458	+++	HS	润扬麦 2043 Runyangmai 2043	+	IM
扬 13G1 Yang 13G1	+++	IM	苏垦麦 1416 Sukenmai 1416	+	IM
宁麦资 999 Ningmaizi 999	+	IM	宁 18416 Ning 18416	+	IM
扬 20256 Yang 20256	+	MR	盐 H2002 Yan H2002	+	IM
淮红麦 2 号 Huaihong 2	+	MR	扬 19099 Yang 19099	+	IM
宁麦 217 Ningmai 217	+	MR	镇 18077 ZHen 18077	+	IM
扬 20230 Yang 20230	+	MR	扬 15-9 Yang 15-9	+	IM
南垦 1075 Nanken 1075	+	MR	金丰 1701 Jinfeng 1701	+	HS
平安麦 781 Pinganmai 781	+	MR	盐麦 996 Yanmai 996	+	IM
宁 1896 Ning 1896	+	MR	姜丰 18109 Jiangfeng 18109	+	IM
扬 19312 Yang 19312	+	MR	金丰 17099 Jinfeng 17099	+	IM
扬 16-7 Yang 16-7	+	MR	镇 17057 Zhen 17057	+	HS
扬麦 36 Yangmai 36	+	MR	盐 H1901 Yan H1901	+	IM
扬 20216 Yang 20216	+	MR	润扬麦 1933 Runyangmai 1933	+	IM
扬 20145 Yang 20145	+	MS	扬 17529 Yang 17529	+	IM
南农 20 Nannong 20	+	MS	宁红 1723 Ninghong 1723	+	IM
扬 14-88 Yang 14-88	+	MS	扬江麦 0709 Yangjiangmai 0709	+	HS
扬 14-214 Yang 14-214	+	MS	扬辐麦 8022 Yangfumai 8022	+	MR
扬 19390 Yang 19390	+	MS	宁 17104 Ning 17104	+	IM
扬 13G24 Yang 13G24	+	MS	农麦 968 Nongmai 968	+	HS
润扬麦 2012 Runyangmai 2012	+	MS	练麦 3 号 Lianmai 3	+	HS
扬 17 凡 895 Yang 17 fan 895	+	HR	焦点麦 149 Jiaodianmai 149	+	MR
宁 16176 Ning 16176	+++	MS	苏农麦 1 号 Sunongmai 1	+	IM
扬 15-129 Yang 15-129	+	MS	扬 15G7 Yang 15G7	+	HS
襄麦 21 Xiangmai 21	+++	MS	东麦 231 Dongmai 231	+	IM
鄂 810148 E 810148	+++	MS	华麦 206160 Huamai 206160	+	IM
扬 15-128 Yang 15-128	+	MS	盐 16110 Yan 16110	+	IM
宁 1695 Ning 1695	+	IM	宁丰麦 8 号 Ningfengmai 8	+	IM
扬辐麦 7216 Yangfumai 7216	+	IM	宁丰麦 9 号 Ningfengmai 9	+	HS
扬 16 初 2 Yang 16 chu 2	+	MR	瑞华麦 591 Ruihuamai 591	+	IM
盐麦 0916 Yanmai 1916	+	IM	扬江麦 1846 Yangjiangmai 1846	+++	HS
宁红 1640 Ninghong 1640	+	HS	宁 18176 Ning 18176	+++	HS
宁红 1761 Ninghong 1761	+	IM	扬 20208 Yang 20208	+++	IM
盐 H1902 Yan H1902	+	IM	金扬麦 2018 Jinyangmai 2018	+++	IM
东麦 1901 Dongmai 1901	+	IM	苏垦麦 0512 Sukenmai 0512	+++	HS
扬 17021 Yang 17021	+	MR	扬大 502 Yangda 502	+++	MR
华麦 1918 Huamai 1918	+	HS	江麦 8261 Jiangmai 8261	+++	IM
苏垦麦 1416 Sukenmai 1416	+	IM	镇 17053 Zhen 17053	+++	HS
宁 18416 Ning 18416	+	IM	宁麦资 15318 Ningmaizi 15318	+++	HS
扬 19413 Yang 19413	+	IM	瑞华麦 599 Ruihuamai 599	+++	HS
镇 18081 Zhen 18081	+	IM	润扬麦 4155 Runyangmai 4155	+++	HS
宁红 1830 Ninghong 1830	++	HS	盐 H1701 Yan H1701	+++	MS
宁红 1833 Ninghong 1833	++	IM	扬辐麦 5145 Yangfumai 5145	+	IM
瑞华麦 505 Ruihua 505	+	IM	宁麦资 166 Ningmaizi 166	+	IM
盐麦 209 Yanmai 209	+	MR	扬 21100 Yang 21100	+	IM
宁 18331 Ning 18331	+	HS	扬 21028 Yang 21028	+	IM
扬辐麦 0148 Yangfumai 0148	+	MR	扬 21023 Yang 21023	+	IM
扬辐麦 0098 Yangfumai 0098	+	HS	扬辐麦 1308 Yangfumai 1308	+	IM
宁麦 211 Ningmai 211	+	IM	镇 21067 Zhen 21067	+	IM
华麦 21022 Huamai 21022	+	IM	镇 21111 Zhen 21111	+	IM
镇 18153 Zhen 18153	+	MR	宁红 2098 Ninghong 2098	++	IM
润扬麦 118 Ruiyangmai 118	+	IM			

+:Pm21; ++:PmV; +++: Pm21/PmV.

2.2.3 兼抗型品系及分子检测结果

鉴定结果显示有 15 个品系两种病害抗性达到 R 或 IM,占比 3.6%(表 7)。此外,分子检测结果显示有 10 个品系同时携有 *Fhb1* 和 *Pm21* 基因,且两种病害的抗性达 MR 及以上(表 8)。

表 6 不含 *Pm21* 但白粉病抗性较好的 15 个品系

Table 6 Fifteen lines without *Pm21* but with good resistance to powdery mildew

品系 Line	白粉病抗性 Powdery mildew resistance
汉麦 008 Hanmai 008	IM
华麦 1609 Huamai 1609	MR
扬江麦 1820 Yangjiangmai 1820	HR
宁 18168 Ning 18168	IM
宁 18343 Ning 18343	IM
扬 19323 Yang 19323	IM
盐麦 2109 Yanmai 2109	IM
盐麦 2106 Yanmai 2106	MR
江丰麦 003 Jiangfengmai 003	MR
丰登 1518 Fengdeng 1518	MR
宁麦 1512 Ningmai 1512	IM
苏麦 628 Sumai 628	IM
宁麦资 2158 Ningmaizi 2158	IM
扬富麦 2215 Yangfumai 2215	IM
扬富麦 2216 Yangfumai 2216	IM

表 7 兼抗赤霉病、白粉病的 15 个小麦品系的基因检测结果

Table 7 Genotypes of wheat lines with the R resistance to *Fursarium* head blight and the IM resistance to powdery mildew

品系 Line	His3B-4	MBH1
宁 18168 Ning 18168	-	-
宁 18343 Ning 18343	+	-
宁 18416 Ning 18416	-	+
宁 20419 Ning 20419	-	+
宁 21385 Ning 21385	-	-
宁红 1833 Ninghong 1833	-	++
宁麦资 166 Ningmaizi 166	-	+
宁麦资 2158 Ningmaizi 2158	-	-
润扬麦 1933 Runyangmai 1933	-	+
扬 19413 Yang 19413	-	+
姜丰 18109 Jiangfeng 18109	-	+
扬辐麦 0078 Yangfumai 0078	-	+
扬 15-9 Yang 15-9	+	+
扬 20-224 Yang 20-224	+	+
江麦 8261 Jiangmai 8261	+	+

+: *Pm21*; -: 未检测到所测基因/QTL; ++: *PmV*。

+: *Pm21*; -: Without the tested gene/QTL; ++: *PmV*。

表 8 10 个兼含 *Fhb1* 和 *Pm21* 基因品系

Table 8 Resistance of the 10 wheat lines with both *Fhb1* and *Pm21* genes

品系 Line	赤霉病抗性 <i>Fusarium</i> head blight resistance	白粉病抗性 Powdery mildew resistance
扬 19099 Yang 19099	MR	IM
扬 17021 Yang 17021	R	MR
扬 20208 Yang 20208	MR	IM
盐 H2002 Yan H2002	MR	IM
盐麦 2101 Yanmai 2101	MR	IM
扬大 502 Yangda 502	MR	MR
苏麦 0228 Sumai0228	MR	IM
扬 15-9 Yang 15-9	R	IM
扬 20-224 Yang 20-224	R	IM
江麦 8261 Jiangmai 8261	R	IM

+: 检测到所测基因/QTL。

+: Measured gene/QTL was detected.

3 讨论

3.1 抗赤霉病品系筛选和抗性溯源

本研究供试品系中 R 级品系每年都占有一定的比例,共有 42 个,均来自江苏省淮南区域试验品系;MR 品系比例高,2019、2020 和 2023 年占比均超过 70%。供试材料中 304 个品系赤霉病抗性表现为 MR 至 R,其中有 79 个品系的亲本明确含有宁麦 9 号或其衍生品种。宁麦 9 号携有 *Fhb1* [22],但杂交组合为宁麦 9 号衍生品种/扬麦衍生品种的 50 个品系中经过检测只有 15 个品系携有 *Fhb1* 基因。29 个品系杂交组合为宁麦 9 号衍生品种/宁麦 9 号衍生品种和宁麦 9 号衍生品种/其他中,经过检测只有 7 个携有 *Fhb1* 基因,说明在长江中下游麦区抗赤霉育种中,虽然育种单位比较重视对 *Fhb1* 基因的利用,但最终筛选到的品系携有 *Fhb1* 基因占比较低,一方面原因是分子标记辅助筛选还未广泛应用于育种中,另一方面可能是因为 *Fhb1* 基因对农艺性状有某种不利影响,在育种选择的过程中丢失了对该基因的选择。而以扬麦 158 及衍生品种为亲本育成的抗病品系数量较多,说明扬麦 158 及衍生品种虽然没有携带 *Fhb1*,也具有较好的赤霉病抗性,应携带其他抗病基因。胡文静等[24]研究表明扬麦 16 中携有抗赤霉病位点 *QFhb. yaas-2DL*、*QFhb. yaas-3BL*; Hu 等[25]在扬麦 4 号、扬麦 5 号中挖掘到抗赤霉病主效位点 *QFhb. Y4. 2D/QFhb. Y4. 2D*; Jiang 等[26]在扬麦 158 中定位到抗赤霉病位点 *QFhb-*

5A。此外,供试材料中有 9 个品系携有 *Fhb1* 基因,但其赤霉病抗性为 MS 至 S,说明携有 *Fhb1* 的小麦品种(系)不一定具备中抗以上赤霉病抗性,也可能与 *Fhb1* 的抑制子作用有关^[27]。

3.2 抗白粉病基因分析

本研究结果显示,在供试的 414 份品系中,有 105 个品系的白粉病抗性达到 IM 至 HR,占比 25.4%,超过 50%的品系为感病品种,需加强抗病育种工作。经过分子标记检测,这 105 个品系中有 73 个携 *Pm21/PmV* 基因,占比 69.5%,表明长中下游小麦品系白粉病抗源较为单一;另外 32 个品系例如汉麦 008、华麦 1609 等,不携有 *Pm21/PmV*,可能携有其他的抗白粉病基因,可以继续深入研究其抗白粉病遗传基础,使其作为新一代抗源使用。分子检测结果显示,总共 143 个品系携有 *Pm21/PmV* 基因,其中 80 个品系 *Pm21/PmV* 基因的来源明确为扬 97G59 的衍生品种,11 个品系 *Pm21/PmV* 基因来源于扬麦 18 (南农 P045 衍生品种),5 个品系 *Pm21/PmV* 基因来源于扬 92R137,4 个品系 *Pm21/PmV* 基因来源于 Pm97033-2,其余无法判断来源。这表明育种过程中 *Pm21/PmV* 基因供体来源单一,使得育成品种遗传基础狭窄,同质化严重。

长江中下游麦区 *Pm21/PmV* 基因的使用也存在一些问题。首先,白粉病抗源单一会导致抗性被新致病小种克服的风险;其次, *Pm21/PmV* 基因会带来穗数、株高等某些农艺性状上不利影响,培育矮秆、多穗品系难度较大;一些携有 *Pm21/PmV* 基因的品系白粉病表现为高感,推测可能是提交的品系种子的纯合度存在问题。此外,在 2019—2022 年供试品系中,有 128 个品系含有 *Pm21/PmV*,但从 2023 年开始,数量迅速减少到 15 个,推测在新的白粉病抗源还没有全面使用的情况下,这种下降趋势必然会影响长江中下游小麦白粉病整体抗性。

3.3 小麦抗病性分子聚合育种

在小麦育种过程中,分子标记辅助应用越来越普遍。南京农业大学马正强教授团队利用 *Fhb1* 等抗赤霉病基因聚合选育出抗赤霉病新品系百农 4299^[28],徐淮地区农业科学研究所利用 *Fhb1* 选育出赤霉病抗性显著提高的新品种徐麦 DH9 和徐麦 17252^[29]。本研究发现,长江中下游麦区单一利用 *Fhb1* 不足以显著提高所有品种的赤霉病抗性,将 *Fhb1* 与扬麦品种的赤霉病抗性基

因相结合,可能是实现赤霉病抗性突破的途径之一,这与高德荣等^[30]提出在单一利用 *Fhb1* 或某一个主效基因难以取得赤霉病抗性突破的困境下,将来自不同品种的抗病基因/QTL 聚合,结合分子标记辅助选择和表型精准鉴定筛选,可以实现抗病性突破的观点相一致。*Pm21/PmV* 基因是本麦区抗白粉病育种利用最频繁的抗病基因,携有此基因的品系大部分对白粉病有较好的抗性,所以在挖掘鉴定新抗源的同时,建议继续在小麦育种中使用。此外,供试品系中有 15 个品系两种病害抗性达到 R 或 IM,其中 3 个同时携有 *Fhb1* 和 *Pm21* 基因,均可直接应用在抗病分子标记聚合育种中。

参考文献:

- [1]PIECZUL K, HOROSZKIEWICZ-JANKA, PEREK A, *et al.* The risk of production of mycotoxins in cereal grains by the chemotypes of *Fusarium* spp. [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2015, 24(8): 2527.
- [2]李 韬, 郑 飞, 秦胜男, 等. 小麦-黑麦易位系 T1BL·1RS 在小麦品种中的分布及其与小麦赤霉病抗性的关联[J]. 作物学报, 2016, 42(3): 320.
LI T, ZHENG F, QIN S N, *et al.* Distribution of wheat-rye translocation line T1BL·1RS in wheat and its association with *Fusarium* head blight resistance [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(3): 320.
- [3]张爱民, 阳文龙, 李 欣, 等. 小麦抗赤霉病研究现状与展望 [J]. 遗传, 2018, 40(10): 858.
ZHANG A M, YANG W L, LI X, *et al.* Current status and perspective on research against *Fusarium* head blight in wheat [J]. *Hereditas*, 2018, 40(10): 858.
- [4]CUTHBERT P A, SOMERS D J, THOMAS J, *et al.* Fine mapping *Fhb1*, a major gene controlling *Fusarium* head blight resistance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2006, 112(8): 1465.
- [5]LIU S, ZHANG X, PUMPHREY M O, *et al.* Complex microcolinearity among wheat, rice, and barley revealed by fine mapping of the genomic region harboring a major QTL for resistance to *Fusarium* head blight in wheat [J]. *Functional & Integrative Genomics*, 2006, 6(2): 83.
- [6]CUTHBERT P A, SOMERS D J, BRULÉ-BABEL A. Mapping of *Fhb2* on chromosome 6BS: A gene controlling *Fusarium* head blight field resistance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2007, 114(3): 429.
- [7]QI L L, PUMPHREY M O, FRIEBE B, *et al.* Molecular cytogenetic characterization of alien introgressions with gene *Fhb3* for resistance to *Fusarium* head blight disease of wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2008, 117(7): 1155.
- [8]XUE S, LI G, JIA H, *et al.* Fine mapping *Fhb4*, a major QTL conditioning resistance to *Fusarium* infection in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Theoretical and Applied Genetics*,

- 2010,121(1):147.
- [9]XUE S,XU F,TANG M,*et al.* Precise mapping *Fhb5*, a major QTL conditioning resistance to Fusarium infection in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2011,123(6):1055.
- [10]CAINONG J C,BOCKUS W W,FENG Y,*et al.* Chromosome engineering, mapping, and transferring of resistance to Fusarium head blight disease from *Elymus tsukushiensis* into wheat [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2015,128(6):1019.
- [11]GUO J,ZHANG X L,HOU Y L,*et al.* High-density mapping of the major FHB resistance gene *Fhb7* derived from *Thinopyrum ponticum* and its pyramiding with *Fhb1* by marker-assisted selection [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2015,128(11):2301.
- [12]刘易科,佟汉文,朱展望,等. 小麦赤霉病抗性改良研究进展 [J]. 麦类作物学报, 2016,36(1):51.
LIU Y K,TONG H W,ZHU ZH W,*et al.* Review on improvement of Fusarium head blight resistance in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016,36(1):51.
- [13]徐婷婷,王永军,狄佳春,等. 小麦抗赤霉病鉴定及其抗病基因的检测 [J]. 麦类作物学报, 2019,39(11):1301.
XU T T,WANG Y J,DI J C,*et al.* Identification of scab-resistance wheat varieties and detection of disease resistance genes [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019,39(11):1301.
- [14]LAGUDAH E S,KRATTINGER S G. A new player contributing to durable *Fusarium* resistance [J]. *Nature Genetics*, 2019,51:1070.
- [15]CHEN P D,QI L L,ZHOU B,*et al.* Development and molecular cytogenetic analysis of wheat-*Haynaldia villosa* 6VS/6AL translocation lines specifying resistance to powdery mildew [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 1995,91(6):1125.
- [16]ZHAO R H,LIU B L,JIANG Z H,*et al.* Comparative analysis of genetic effects of wheat-*Dasyphyrum villosum* translocations T6V # 2S • 6AL and T6V # 4S • 6DL [J]. *Plant Breeding*, 2019,138(5):503.
- [17]HE H G,ZHU S Y,ZHAO R H,*et al.* *Pm21*, encoding a typical CC-NBS-LRR protein, confers broad-spectrum resistance to wheat powdery mildew disease [J]. *Molecular Plant*, 2018,11(6):879.
- [18]CAO A Z,XING L P,WANG X Y,*et al.* Serine/threonine kinase gene *Stpk-V*, a key member of powdery mildew resistance gene *Pm21*, confers powdery mildew resistance in wheat [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011,108(19):7727.
- [19]高德荣,张 晓,康建鹏,等. 长江中下游麦区小麦迟播的不利影响及育种对策 [J]. 麦类作物学报, 2014,34(2):279.
GAO D R,ZHANG X,KANG J P,*et al.* Negative effects of late sowing on wheat production in middle and lower reaches of Yangtze River valley and breeding strategies [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014,34(2):279.
- [20]赵仁慧,刘炳亮,寿路路,等. 分子标记辅助聚合抗小麦黄花叶病和白粉病育种 [J]. 麦类作物学报, 2017,37(12):1541.
ZHAO R H,LIU B L,SHOU L L,*et al.* Pyramiding disease resistance to wheat yellow mosaic virus and powdery mildew by molecular marker-assisted selection [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017,37(12):1541.
- [21]JIANG Y,SCHULTHESS A W,RODEMANN B,*et al.* Validating the prediction accuracies of marker-assisted and genomic selection of Fusarium head blight resistance in wheat using an independent sample [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2017,130(3):471.
- [22]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.
ZHU Z W,XU D A,CHENG S H,*et al.* Characterization of Fusarium head blight resistance gene *Fhb1* and its putative ancestor in Chinese wheat germplasm [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018,44(4):473.
- [23]BIE T D,ZHAO R H,ZHU S Y,*et al.* Development and characterization of marker MBH1 simultaneously tagging genes *Pm21* and *PmV* conferring resistance to powdery mildew in wheat [J]. *Molecular Breeding*, 2015,35(10):189.
- [24]胡文静,张 勇,陆成彬,等. 小麦品种扬麦 16 赤霉病抗扩展 QTL 定位及分析 [J]. 作物学报, 2020,46(2):157.
HU W J,ZHANG Y,LU C B,*et al.* Mapping and genetic analysis of QTLs for Fusarium head blight resistance to disease spread in Yangmai 16 [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020,46(2):15.
- [25]HU W J,GAO D R,ZHANG Y,*et al.* Mapping quantitative trait loci for type II Fusarium head blight resistance in two wheat recombinant inbred line populations derived from Yangmai 4 and Yangmai 5 [J]. *Plant Disease*, 2023,107(2):422.
- [26]JIANG P,ZHANG X,WU L,*et al.* A novel QTL on chromosome 5AL of Yangmai 158 increases resistance to Fusarium head blight in wheat [J]. *Plant Pathology*, 2020,69(2):249.
- [27]LI G Q,YUAN Y,ZHOU J Y,*et al.* FHB resistance conferred by *Fhb1* is under inhibitory regulation of two genetic loci in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2023,136(6):134.
- [28]张一铎,李国强,孔忠新,等. 基因聚合选育抗赤霉病小麦新品系百农 4299 [J]. 作物学报, 2022,48(9):2221.
ZHANG Y D,LI G Q,KONG Z X,*et al.* Breeding of FHB-resistant wheat line Bainong 4299 by gene pyramiding [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022,48(9):2221.
- [29]马红勃,刘东涛,冯国华,等. 黄淮麦区 *Fhb1* 基因的育种应用 [J]. 作物学报, 2022,48(3):747.
MA H B,LIU D T,FENG G H,*et al.* Application of *Fhb1* gene in wheat breeding programs for the Yellow-Huai Rivers valley winter wheat zone of China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022,48(3):747.
- [30]张 勇,胡文静,张春梅,等. 我国“十三五”育成小麦新品种(系)抗赤霉病进展分析与展望 [J]. 生物技术进展, 2021,11(5):590.
ZHANG Y,HU W J,ZHANG C M,*et al.* Analysis and prospect of Fusarium head blight resistance for new wheat varieties(lines) bred during “The 13th five-year plan” [J]. *Current Biotechnology*, 2021,11(5):590.