

61 个小麦后备品种对白粉病的抗性分析及抗病基因推导

史文琦 龚双军 曾凡松 向礼波 杨立军 喻大昭*

(湖北省农业科学院植保土肥研究所, 农业部华中作物有害生物综合治理重点实验室,
农作物重大病虫害防控湖北省重点实验室, 武汉 430064)

摘要: 为明确中国 61 个小麦后备品种对白粉病的抗性水平及其抗病基因, 将 2016 年从黄淮海冬麦区、长江中下游冬麦区及东北春麦区的 9 个市采集分离的 269 株单孢子堆白粉病菌, 分别接种于 61 个小麦后备品种进行抗性测定; 用 NTSYSpc 2.10e 软件对供试品种表型数据进行聚类分析; 用 35 株鉴别菌株对 29 个含已知抗白粉病基因小麦材料和 61 个小麦后备品种进行鉴别, 比较其抗谱并推导 61 个小麦后备品种所含抗白粉病基因。结果显示, 61 个小麦后备品种间的抗谱存在明显差异, 国豪麦 5 号和 7 号、BL5008、绵麦系列、黔麦系列、楚麦 16 号、内麦 101 和 366 等 18 个品种抗谱较宽, 抗性频率均大于 97.0%; 泰科麦 5303、邯 11-5272 和临 Y8222 等 10 个品种的抗性频率在 42.0%~56.1% 之间; 郑麦 0943 等 33 个品种的抗性频率小于 37.9%。聚类分析可将 61 个小麦后备品种分成 5 大类, 第 I 类有 11 个品种, 其中 8 个品种的抗性频率在 42.0%~56.1% 之间; 第 II 类和第 III 类共 30 个品种, 抗性频率均小于 32.7%; 第 IV 类有 2 个品种, 抗性频率分别为 53.5% 和 53.2%, 第 V 类有 18 个品种, 抗性频率均大于 97.0%; 聚类显示来自于同一地区且抗性频率相近的品种具有相似或相近的抗性遗传背景。本研究推导出 21 个小麦后备品种含抗病 *Pm* 基因, 其中, 邯 11-5272 含有 *Pm30*, 安科 1503 含有 *Pm2*、*Pm5a*、*Pm6*、*Pm19* 和 *Pm30*, 临 Y8222 含有 *Pm5a*、*Pm6*、*Pm19* 和 *Pm30*, 云 154-15 含有 *Pm5a*、*Pm6*、*Pm7*、*Pm19* 和 *Pm2+ta*, 泰科麦 5303 等 6 个品种含有 *Pm2* 和 *Pm30*, 华麦 7 号等 5 个品种含有 *Pm5a*、*Pm6* 和 *Pm19*, 扬麦 24 号等 6 个品种含有 *Pm5a*、*Pm6*、*Pm19* 和 *Pm2+ta*。研究表明, 54.1% 的小麦后备品种对白粉病菌群的抗性频率小于 37.9%, 存在适宜条件下小麦白粉病暴发流行的风险, 因此这些小麦后备品种推广种植时需加强病害预警和监测。

关键词: 小麦白粉病; 抗性频率; 抗病基因; 基因推导

Evaluation of resistance to powdery mildew in 61 Chinese wheat cultivars and postulation of their resistance genes

Shi Wenqi Gong Shuangjun Zeng Fansong Xiang Libo Yang Lijun Yu Dazhao*

(Hubei Key Laboratory of Crop Diseases, Insect Pests and Corp Weeds Control; Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Central China, Ministry of Agriculture; Institute for Plant Protection and Soil Sciences, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, Hubei Province, China)

Abstract: To analyze the resistance of 61 wheat cultivars and postulate their resistance genes to powdery mildew, 269 wheat single colony of powdery mildew isolates were collected from nine cities which grew wheat in China in 2016, the resistance frequencies of 61 wheat cultivars were estimated by the mean of inoculation detached leaves segments of each cultivar with 269 isolates, respectively. Cluster analysis was carried out with UPGMA (unweighted pair group method with arithmetic mean) model

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300700), 国家自然科学基金(31701749), 国家现代农业(小麦)产业技术体系(CARS-03-05B)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: Dazhaoyu@china.com

收稿日期: 2018-10-31

of the software NTSYSpc 2.1e based on the phenotypic resistance data. And resistance genes of the 61 cultivars were postulated by comparing resistance spectra of the cultivars to 35 differential isolates with those of materials possessing known resistance genes to these isolates. The results showed that the resistance spectrum of each cultivar differed significantly from that of others, the resistance frequency of 18 wheat cultivars such as Guohaomai No. 5 and No. 7, BL5008, series of Mianmai and series of Qianmai, Chumai No. 16, Neimai 101 and 366 were higher than 97.0%, while the resistance frequency of ten wheat cultivars such as Taikemai 5303, Han 11-5272, Lin Y8222 and so on, were between 42.0% and 56.1%. Among the 61 cultivars, 33 cultivars such as Zhengmai 0943 had resistance frequency lower than 37.9%. Cluster analysis indicated 61 cultivars could be classified into five groups. Group one included 11 cultivars and out of them, resistance frequency of eight cultivars to all isolates was between 42.0% and 56.1%. Groups two and three including 30 cultivars with resistance frequency lower than 32.7%. Group four including two cultivars with resistance frequency 53.5% and 53.2%, while the fifth group composed of 18 cultivars with resistance frequency higher than 97.0%. The cultivars come from the same cities and with the similar frequency of resistance had been clustered to the same group. It showed that they might have a similar genetic background of resistance. Results of *Pm* gene postulation showed that Han 11-5272 contained *Pm30*, Anke 1503 possessed *Pm2*, *Pm5a*, *Pm6*, *Pm19* and *Pm30*, Lin Y8222 contained *Pm5a*, *Pm6*, *Pm19* and *Pm30*, Yun 154-15 contained *Pm5a*, *Pm6*, *Pm7*, *Pm19* and *Pm2+ta*, Taikemai 5303 and other five cultivars possessed *Pm2* and *Pm30*, Huamai No. 7 and other four cultivars possessed *Pm5a*, *Pm6* and *Pm19*, Yangmai No. 24 and other five cultivars contained *Pm5a*, *Pm6*, *Pm19* and *Pm2+ta*. It indicated that 33 cultivars among the 61 cultivars, counting for 54.1%, had frequencies of resistance lower than 37.9%, suggesting the epidemic risk of wheat powdery mildew. Those cultivars should be monitored strictly when they are planted in epidemic regions.

Key words: wheat powdery mildew; resistance frequency; resistance gene; gene postulation

小麦白粉病是一种世界性小麦病害,由专性寄生真菌禾布氏白粉菌小麦专化型 *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* 引起。近年来该病害在我国的流行范围和发病面积逐渐增大,据全国农业技术推广服务中心统计,全国常年平均发生面积在 533 万 hm^2 以上,年平均造成小麦产量损失达 32 万 t 以上(<https://www.natesc.org.cn>),已成为严重制约小麦安全生产的重要病害。防治小麦白粉病最经济有效和安全的措施是培育并推广种植抗病品种。由于小麦白粉病菌传播速度快且易变异,大面积长期种植单一抗病品种容易对病原菌群体产生选择压力,使其毒性结构变化,逐渐形成适应该品种的优势毒性小种,导致该品种抗性丧失(李振岐,1980)。针对中国各麦区间白粉病菌群体既独立循环,又存在一定交流的特点(刘万才和邵振润,1998;李迅等,2002;李亚红等,2012),明确当前中国生产上小麦主栽品种及后备品种对不同生态麦区白粉病菌群体的抗性现状,评估其丧失抗性的风险,可以为品种合理布局、白粉病流行预警和防控提供参考依据。

利用主效 *Pm* 基因控制小麦白粉病一直是国内

外研究的热点,截至2018年,已经报道的 *Pm* 基因有 89 个,分布在 57 个不同的位点上(Ullah et al., 2018)。其中,仅 *Pm3* 等位基因(Yahiaoui et al., 2004; Bhullar et al., 2009)、*Pm38*(Krattinger et al., 2009)和 *Pm21* 基因(He et al., 2018)被克隆。明确小麦品种中含有的抗病基因对小麦抗病育种及品种合理布局具有重要指导意义。虽然国内已有不少关于中国小麦品种(史亚千等,2009;杨立军等,2013;王振花等,2017)、农家品种(许红星等,2011;薛飞等,2009)或材料(曹世勤等,2010;曹学仁等,2010;高海峰等,2017)对白粉病的抗性分析及抗病基因推导研究,但对小麦后备品种的白粉病抗性鉴定尚未见报道。对当前生产上小麦后备品种的白粉病抗性进行鉴定,可指导这些后备品种的合理布局,预防因种植感病品种造成白粉病常发区域的病害流行。

基于 Flor(1955)的基因对基因学说,Loegering et al.(1971)提出了抗病基因推导法,即用毒性不同的病原菌菌株接种一套已知抗病基因的鉴别寄主和试验材料,对反应型进行比较,分析试验材料中含有的抗病基因;之后 Loegering(1978)又对该方法进行

了改进,能在短期内分析大量的材料,推测其含有的已知抗病基因,并推测其含有其它未知抗病基因的可能性。该基因推导法在小麦白粉病(曹学仁等,2010;高海峰等,2017;王振花等,2017)、小麦条锈病(曹世勤等,2011)和小麦叶锈病(袁军海等,2007)等的抗性基因研究中应用广泛。本研究选取61个小麦后备品种,用从黄淮海冬麦区、长江中下游冬麦区及东北春麦区的9个市采集分离的269株单孢子堆白粉病菌进行接种鉴定,明确61个小麦后备品种对白粉病的抗性水平,同时对这些品种的抗白粉病基因进行推导,明确抗白粉病基因组成,以期为合理利用这些小麦后备品种进行生产布局提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试小麦品种:61个小麦后备品种的系谱和育种单位/提供单位如表1所示;29个携带已知抗白粉病基因的小麦材料由中国农业科学院植物保护研究所白粉病组提供(表2),其中感病品种Chancellor将作为对照进行试验。铭贤169、阿夫和郑麦98为用

于扩繁小麦白粉菌株的感病品种,均由本实验室保存并提供。

供试小麦白粉病菌:用于品种抗病性测定的小麦白粉病菌单孢子堆菌株共269株,分别于2017年度春夏季节时采自黄淮海冬麦区、长江中下游冬麦区及东北春麦区的徐州(38株)、洛阳(42株)、宿州(65株)、扬州(60株)、泰州(9株)、襄阳(8株)、随州(22株)、十堰(7株)、哈尔滨(18株)这9个市。用于基因推导的35株不同毒性的小麦白粉病菌菌株采自我国不同的小麦生态区,为单孢堆分离物,由湖北省农业科学院植保土肥研究所小麦病害团队保存并提供(表2)。所有菌株用Chancellor、铭贤169、阿夫和郑麦98混合叶片保存并扩繁,采用12 d菌龄孢子粉进行接种。

药剂及仪器:99.9%苯并咪唑(benzimidazole),国药集团化学试剂有限公司;其余所用试剂均为国产分析纯。自制接种塔为敞口直径15 cm、容量2 L的塑料碗,底部用打孔器打出直径1 cm的圆孔。

培养基:水琼脂(water agar, WA)培养基:琼脂5 g、蒸馏水1 000 mL。

表1 61个小麦后备品种及其抗白粉病基因推导结果

Table 1 Sixty-one wheat cultivars and their postulated *Pm* genes

育种单位或提供单位 Unit of breeding or providing	品种 Cultivar	系谱 Pedigree	<i>Pm</i> 基因推导 <i>Pm</i> gene postulation
邯郸市农业科学院 Handan Academy of Agricultural Sciences	邯11-5272	邯02-6018/济麦22	<i>Pm30</i> +
	Han 11-5272	Han 02-6018/Jimai 22	
	邯11-5276	邯02-6018/济麦22	未知
	Han 11-5276	Han 02-6018/Jimai 22	Unknown
泰安市农业科学研究院 Tai'an Academy of Agricultural Sciences	泰科麦5303	济麦36/邯6172//淮0458	<i>Pm2</i> + <i>Pm30</i>
	Taikemai 5303	Jimai 36/Han 6172//Huai 0458	
	郑麦0943	郑97199/济麦19	未知
	Zhengmai 0943	Zheng 97199/Jimai 19	Unknown
河南省农业科学院小麦研究所 Wheat Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences	临Y8222	临优20165/济麦22	<i>Pm5a</i> + <i>Pm6</i> +
	Lin Y8222	Linyou 20165/Jimai 22	<i>Pm19</i> + <i>Pm30</i>
	临Y8253	临优145/DH6187//济麦22	未知
	Lin Y8253	Linyou 145/DH6187//Jimai 22	Unknown
甘肃省农业科学院小麦研究所 Wheat Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences	兰天0422	兰天23/周麦18	未知
	Lantian 0422	Lantian 23/Zhoumai 18	Unknown
中国农业科学院作物科学研究所 Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences	中麦4072	984121/烟5286	<i>Pm2</i> + <i>Pm30</i>
	Zhongmai 4072	984121/Yan 5286	
	中麦5051	烟农19/烟农21	未知
	Zhongmai 5051	Yannong 19/Yannong 21	Unknown
	轮选198	济麦22/6369//济麦22	<i>Pm2</i> + <i>Pm30</i>
	Lunxuan 198	Jimai 22/6369//Jimai 22	
	鲁研9088	954072/中优14	未知
	Luyan 9088	954072/Zhongyou 14	Unknown

续表 1 Continued

育种单位或提供单位 Unit of breeding or providing	品种 Cultivar	系谱 Pedigree	Pm 基因推导 Pm gene postulation
宿州市农业科学院 Suzhou Academy of Agricultural Sciences	皖宿 1313 Wansu 1313	济麦 22/淮麦 30 Jimai 22/Huaimai 30	<i>Pm5a+Pm6+Pm19</i>
江苏省大华种业集团有限公司 Jiangsu Dahua Seed Group Co. Ltd	华麦 226 Huamai 226	淮麦 22/鲁麦 21 Huaimai 22/Lumai 21	未知 Unknown
	华麦 7 号 Huamai No. 7	扬麦 158/小偃 8788 Yangmai 158/Xiaoyan 8788	<i>Pm5a+Pm6+Pm19</i>
江苏里下河地区农业科学研究所 Institute of Agricultural Sciences in Lixiahe Region of Jiangsu	扬麦 24 号 Yangmai No. 24	{[扬麦 17/(扬麦 11/豫麦 18) F3]BC ₁ }F7 {[Yangmai 17/(Yangmai 11/ Yumai 18)F3]BC ₁ }F7	<i>Pm5a+Pm6+ Pm19+Pm(2+ta)</i>
安徽省农业科学院作物研究所 Institute of Crop, Anhui Academy of Agricultural Sciences	安科 1503 Anke 1503	陕 354/周 93S//济麦 22 Shaan 354/Zhou 93S//Jimai 22	<i>Pm2+Pm5a+Pm6+ Pm19+Pm30</i>
	安科 1506 Anke 1506	冀 935-352/鲁麦 1 号//周麦 18 Ji 935-352/Lumai No. 1//Zhoumai 18	未知 Unknown
襄阳市农业科学院 Xiangyang Academy of Agricultural Sciences	襄麦 D31 Xiangmai D31	襄麦 25 分离株系选 Xiangmai 25 isolated by pedigree breeding	<i>Pm5a+Pm6+ Pm19+Pm(2+ta)</i>
六安市农业科学院 Liu'an Academy of Agricultural Sciences	皖西麦 0439 Wanximai 0439	扬麦 9 号/扬大 9817 Yangmai No. 9/Yangda 9817	<i>Pm5a+Pm6+Pm19</i>
绵阳市农业科学院小麦研究所 Wheat Research Institute, Mianyang Academy of Agricultural Sciences	国豪麦 5 号 Guohaomai No. 5	6289-4/06-367 (4089/99-1572)F1//06-374	可能含 <i>Pm21</i> May contain <i>Pm21</i>
	国豪麦 6 号 Guohaomai No. 6	MY07-228/MY09-122	未知 Unknown
	国豪麦 7 号 Guohaomai No. 7	4422-3-1/1275-1	可能含 <i>Pm21</i> May contain <i>Pm21</i>
	BL5002 BL5008	贵农 001/小偃 93166 Guinong 001/Xiaoyan 93166	未知 Unknown 可能含 <i>Pm21</i> May contain <i>Pm21</i>
	绵麦 903 Mianmai 903	GHM3/R141	可能含 <i>Pm21</i> May contain <i>Pm21</i>
	绵麦 1416 Mianmai 1416	81063/泰山 045076//绵麦 367 81063/Taishan 045076//Mianmai 367	可能含 <i>Pm21</i> May contain <i>Pm21</i>
	绵麦 1419 Mianmai 1419	川 06 品 6//绵麦 37/HY-SR-7 Chuan06Pin6//Mianmai 37/HY-SR-7	可能含 <i>Pm21</i> May contain <i>Pm21</i>
	绵麦 603 Mianmai 603	011-1492-1493/BL379	可能含 <i>Pm21</i> May contain <i>Pm21</i>
	绵麦 302 Mianmai 302	XK086-2/绵 1848//陇矮 2 号/BM12-71 XK086-2/Mian 1848//Long'ai No. 2/ BM12-71	可能含 <i>Pm21</i> May contain <i>Pm21</i>
	绵麦 303 Mianmai 303	新麦 9534//遗选 4212/绵 1971-9834 Xinmai 9534//Yixuan 4212/ Mian 1971-9834	可能含 <i>Pm21</i> May contain <i>Pm21</i>
	绵 15Z24 Mian 15Z24	(绵 08Z8/5563)/(绵 05Z13/绵 08Z8)// 绵 06-367 (Mian 08Z8/5563)/(Mian 05Z13/ Mian 08Z8)//Mian 06-367	可能含 <i>Pm21</i> May contain <i>Pm21</i>
重庆市农业科学院特色作物研究所 Institute of Characteristic Crop Research, Chongqing Academy of Agricultural Sciences	渝麦 24 Yumai 24	国优 1 号/渝麦 10 号 Guoyou No. 1/Yumai No. 10	<i>Pm2+Pm30</i>
	渝麦 25 Yumai 25	Lo/02321//R938	未知 Unknown

续表 1 Continued

育种单位或提供单位 Unit of breeding or providing	品种 Cultivar	系谱 Pedigree	<i>Pm</i> 基因推导 <i>Pm</i> gene postulation
四川省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences	川麦 606	矮败小麦轮回选择	未知
	Chuanmai 606	Dwarf male-sterile wheat group through recurrent selection	Unknown
	川麦 608	川麦 42/98-266//川麦 44	未知
	Chuanmai 608	Chuanmai 42/98-266//Chuanmai 44	Unknown
贵州省农业科学院旱粮研究所 Institute of Upland Crop, Guizhou Academy of Agricultural Sciences	川麦 42	SynCD768/SW3243//川 6415	未知 Unknown
	Chuanmai 42	SynCD768/SW3243//Chuan 6415	川麦 42
	黔麦 19	9665F8/夏繁 28	可能含 <i>Pm21</i>
	Qianmai 19	9665F8/Xiafan 28	May contain <i>Pm21</i>
	黔麦 20	贵农 775/夏繁 28	可能含 <i>Pm21</i>
	Qianmai 20	Guinong 775/Xiafan 28	May contain <i>Pm21</i>
	黔育 22	节燕 970012/2038	可能含 <i>Pm21</i>
	Qianyu 22	Jieyan 970012/2038	May contain <i>Pm21</i>
	黔麦 21	贵农 001//绵阳 26/夏繁 13	可能含 <i>Pm21</i>
	Qianmai 21	Guinong 001//Mianyang 26/Xiafan 13	May contain <i>Pm21</i>
	黔麦 22	节燕 970012//绵阳 26/夏繁 13	可能含 <i>Pm21</i>
	Qianmai 22	Jieyan 970012//Mianyang 26/Xiafan 13	May contain <i>Pm21</i>
	云 154-2	未查到	未知
	Yun 154-2	Not found	Unknown
云南省农业科学院粮食作物研究所 The Institute of Food Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences	云 154-15	未查到	<i>Pm5a+Pm6+Pm7+</i>
	Yun 154-15	Not found	<i>Pm19+Pm(2+ta)</i>
	云 154-64	未查到	<i>Pm5a+Pm6+</i>
	Yun 154-64	Not found	<i>Pm19+Pm(2+ta)</i>
	文 11 产 55	未查到	未知
	Wen11Chan55	Not found	Unknown
四川农业大学小麦研究所 Triticeae Research Institute, Sichuan Agricultural University	蜀麦 1620	Y08-2116/绵麦 41	未知
	Shumai 1620	Y08-2116/Mianmai 41	Unknown
	蜀麦 1622	Syn-SAU-69/996-999//Y28//川麦 44	<i>Pm5a+Pm6+Pm19</i>
	Shumai 1622	Syn-SAU-69/996-999//Y28// Chuanmai 44	
	蜀麦 1645	川育 24/20828	<i>Pm5a+Pm6+Pm19</i>
	Shumai 1645	Chuanyu 24/20828	
四川农业大学生态农业研究所 Institute of Ecological Agriculture, Sichuan Agricultural University	川农 32	(川农 27/80978)F6	<i>Pm5a+Pm6+</i>
	Chuannong 32	(Chuannong 27/80978)F6	<i>Pm19+Pm(2+ta)</i>
楚雄州农业科学研究推广所 Chuxiong Agricultural Sciences Research and Extension Institute	楚麦 16 号	[(内麦 8 号/间 3)F1//重组 104]F10	可能含 <i>Pm21</i>
	Chumai No. 16	[(Neimai No. 8/Jian 3)F1// Chongzu 104]F10	May contain <i>Pm21</i>
	云麦 56	高代材料 932-625/高代材料	未知
	Yunmai 56	822-16-7-3 High generation material 932-625/ High generation material 822-16-7-3	Unknown
内江市农业科学院 Neijiang Academy of Agricultural Sciences	内麦 101	(99-1572/m0501)F13	可能含 <i>Pm21</i>
	Neimai 101		May contain <i>Pm21</i>
	内麦 141	(F08-4117/09P41)F11	未知
	Neimai 141		Unknown
	内麦 366	(Balanda188//绵阳 26/92R133)F8	可能含 <i>Pm21</i>
	Neimai 366	(Balanda188//Mianyang 26/92R133)F8	May contain <i>Pm21</i>
驻马店市金农种子有限公司 Zhumadian Jinnong Seed Co. Ltd	武农 986	陕 253/(97)107	未知
	Wunong 986	Shaan 253/(97)107	Unknown
安徽农业大学、安徽隆平高科种业有限公司 Anhui Agricultural University & Anhui Longping High-Tech Seed Co. Ltd	安农 0711	烟农 19//百农 64/豫麦 18	未知
	Annong 0711	Yannong 19//Bainong 64/Yumai 18	Unknown

续表1 Continued

育种单位或提供单位 Unit of breeding or providing	品种 Cultivar	系谱 Pedigree	<i>Pm</i> 基因推导 <i>Pm</i> gene postulation
河南农业大学农学院/国家小麦工程技术研究中心 College of Agronomy, Henan Agricultural University/National Wheat Engineering Technology Research Center	春丰 0017 Chunfeng 0017	兰考 906/豫麦 18 Lankao 906/Yumai 18	<i>Pm5a+Pm6+</i> <i>Pm19+Pm(2+ta)</i>
河南省亳都种业有限公司 Henan Bodu Seed Co. Ltd	偃亳 197 Yanhao 197	豫麦 10号/豫麦 18 Yumai No. 10/Yumai 18	<i>Pm5a+Pm6+</i> <i>Pm19+Pm(2+ta)</i>
菏泽市农业科学院 Heze Academy of Agricultural Sciences	菏麦 0746-2 Hemai 0746-2	9428-50/莱州 137//鲁麦 21 9428-50/Laizhou 137//Lumai 21	<i>Pm2+Pm30</i>
潍坊市农业科学院 Weifang Academy of Agricultural Sciences	潍 2750 Wei 2750	Tal*II-2/矮败//潍 64225 Tal*II-2/ Dwarf male-sterile wheat// Wei 64225	<i>Pm2+Pm30</i>
烟台市农业科学院 Yantai Academy of Agricultural Sciences	烟农 1212 Yannong 1212	鲁麦 14/鲁麦 21//冀麦 30/运 85-2421 Lumai 14/Lumai 21//Jimai 30/ Yun 85-2421	未知 Unknown

?: 未知抗性因子。?: Unknown resistance factor(s).

1.2 方法

1.2.1 小麦后备品种苗期抗白粉病表型测定

试验于2017年7—12月在湖北省农业科学院植保土肥研究所进行。分别将61个小麦后备品种和29个含已知抗白粉病基因(*Pm*基因)小麦鉴别材料播种在边长为12 cm的塑料方盒中,每个品种或鉴别材料播种1盒,每盒播种50粒,在18~20℃、16 h光照/8 h黑暗温室中培养至1叶1心时备用。采用离体叶段法鉴定小麦对白粉病菌的抗感表型(杨立军等,2009),将每个品种第1叶中间部分剪成3 cm长的叶段,依次正面朝上摆于含50 μg/mL苯并咪唑的10 cm×10 cm WA平板上,置于自制接种塔内分别接种新鲜白粉病菌分生孢子,接种量为200~400个/cm²,接种后静置5 min以利于孢子沉降。将269株小麦白粉病菌单孢子堆菌株分别接种至61个小麦后备品种上进行抗性鉴定;用35株鉴别菌株对29个含已知抗白粉病基因小麦材料和61个后备品种进行接种,比较其抗谱。为避免接种菌株相互交叉感染,在接种下一菌株前对自制接种塔等工具用75%酒精喷杀消毒。每个品种选取不同植株苗的3个叶段作为3次重复,接种10~12 d后调查发病情况并以0~4级反应型进行记录(盛宝钦,1988)。0型:免疫,植株无病斑;0+型:近免疫,出现坏死反应,叶片有枯死斑;1型:高抗,病斑小,直径一般小于1 mm,菌丝层稀薄可见绿色叶面,偶见较大病斑,但仍透绿,产孢量极少;2型:中抗,叶片病斑直径小于1 mm,但菌丝层较厚,不透绿,能产生一定量孢子;3型:中感,叶片病斑多,直径一般大于1 mm,菌丝层厚,产孢量大,病斑不连片;4型:高感,叶片病斑直径一般大于1 mm,菌丝层厚,产孢量多,病斑连片。将反应型0~2级(0、0+、1和2级)视为

非亲和,为抗病反应;3~4级视为亲和,为感病反应。

1.2.2 小麦后备品种对白粉病菌的抗性频率测定

将1.2.1中269株单孢子堆菌株接种于61个小麦后备品种后所得表型数据进行转换,亲和记为1,非亲和记为0。计算各后备品种对269株菌株的抗性频率,抗性频率=非亲和菌株数/总菌株数×100%。将这269株菌株按其采集地区划分菌群单位,用SPSS 19.0软件对每个品种进行菌群间抗性频率差异的 χ^2 检验和Fish's精确检验。将每个品种对269株菌株的抗感表型数据(0、1)采用软件NTSYSpc 2.10e的非加权组平均法(unweighted pair group method with arithmetic mean, UPGMA)模块进行聚类分析。

1.2.3 小麦后备品种抗白粉病基因型的推导

根据Flor(1955)的基因对基因假说、Loegering et al.(1971)及Loegering(1978)提出的抗病基因推导方法,将35株供试鉴别菌株分别接种于29个已知抗性基因小麦材料和61个小麦后备品种,根据表型数据推导后备品种是否含有这些已知抗性基因中的某些基因。首先,当待鉴定品种与一个对某抗病基因没有毒性的菌株发生亲和反应时,说明该品种不含有该抗性基因;其次,当待鉴定品种与一个对某抗病基因没有毒性的菌株发生不亲和反应,而这个抗病基因又没有通过第一步排除掉,那么说明这个待鉴定品种含有这个抗病基因;最后,如果通过推导某个待鉴定品种含有某个抗性基因,而整套鉴别菌株和含有这个单基因材料的反应与整套菌株与这个待鉴定品种的反应不完全一致时,说明这个待鉴定品种除了含有该抗病基因外,还含有其它抗性因子;如参试材料与某个含已知抗病基因品种的抗谱相同或非常类似,则推断这个材料含有该品种所含抗病基因。

2 结果与分析

2.1 小麦后备品种对269株白粉病菌的抗性分析

61个小麦后备品种对269株白粉病菌表现出49种抗谱表型,表明抗谱表型丰富多样(结果未列出)。检测到国豪麦6号和BL5002对所有供试菌株均感病,而其余59个品种中可能都含有白粉病抗性因子。

从品种的总体抗性频率来看,国豪麦5号和7号、BL5008、绵麦系列、黔麦系列、楚麦16号、内麦101和366等18个品种的抗谱较宽,抗性频率均大于97.0%,占供试品种总数的29.5%;泰科麦5303、邯11-5272和临Y8222等10个品种的抗性频率在42.0%~56.1%之间;其余33个品种的抗性频率小于37.9%,尤以国豪麦6号和BL5002的抗性频率最低,均为0(表3)。

从品种的地理来源来看,四川省绵阳市农业科学院育成的12个品种中,除国豪麦6号和BL5002两个品种外,其它10个品种对供试菌株的抗性频率均大于97.4%;四川省内江市农业科学院育成的内麦101和内麦366的抗性频率均大于98.5%。其次是来源于贵州省的黔麦系列品种和云南省的楚麦16号,黔麦系列品种中,除黔麦19、黔麦20对襄阳市菌株的抗性频率较低(12.5%和62.5%)外,其余品种的抗性频率均在94.4%以上;楚麦16号除对襄阳市菌株的抗性频率较低(62.5%)外,对其余菌株的抗性频率均在88.9%以上。

将61个小麦后备品种对来自9个市的白粉病菌群体的抗性频率两两互作进行Fisher's精确检验,发现61个小麦后备品种中有31个品种至少存在对1个菌群的抗性频率与其它菌群差异极显著;仅有16个小麦后备品种对来自不同市菌群的抗性频率无显著差异;另有14个小麦后备品种因对9个市的菌群表现为全抗或全感,抗性频率均无显著差异(表3)。其中,国豪麦5号、国豪麦7号、BL5008、绵麦903、绵麦1416、绵麦1419、绵麦603、绵麦303、绵15Z24、黔育22及内麦366这11个小麦后备品种对所有9个市的菌群抗性频率均为100.0%,是优异的抗性品种。

2.2 小麦后备品种对269株菌株反应型的聚类分析

UPGMA聚类分析结果显示,以相似系数0.7为阈值可将61个小麦后备品种划分为I、II、III、IV和V

组(表4)。抗性频率在同一范围内的品种有聚到同一组的趋势。第I组包含11个品种,且对各市菌群的抗性频率差异显著,其中有8个品种的抗性频率在42.0%~56.1%之间;第II组包含29个品种,抗性频率均小于27.5%;第III组只包含蜀麦1622,抗性频率为32.7%;第IV组包含华麦7号和皖西麦0439,抗性频率分别为53.5%和53.2%,且对各市菌群的抗性频率差异显著;第V组包含18个品种,抗性频率全部大于97.0%,是抗性最好的一组。

2.3 小麦后备品种抗白粉病基因的推导

对61个小麦后备品种的抗白粉病基因推导结果显示,有21个小麦后备品种可推导出其含有的抗白粉病基因。邯11-5272含有*Pm30*,安科1503含有*Pm2*、*Pm5a*、*Pm6*、*Pm19*和*Pm30*,临Y8222含有*Pm5a*、*Pm6*、*Pm19*和*Pm30*,云154-15含有*Pm5a*、*Pm6*、*Pm7*、*Pm19*和*Pm2+ta*,泰科麦5303等6个品种含有*Pm2*和*Pm30*,华麦7号等5个品种含有*Pm5a*、*Pm6*和*Pm19*,扬麦24号等6个品种含有*Pm5a*、*Pm6*、*Pm19*和*Pm2+ta*。

经比较,邯11-5272与*Pm30*的抗谱基本一致,仅在2株白粉病菌菌株上存在差异,推测其含有*Pm30*。泰科麦5303、中麦4072、轮选198、渝麦24、荷麦0746-2、潍2750这6个品种,推测其除了含有*Pm2*、*Pm30*外,可能还含有其它抗病基因。皖宿13132、华麦7号、皖西麦0439、蜀麦1622、蜀麦1645这5个品种,推测其除了含有*Pm5a*、*Pm6*和*Pm19*外,可能还含有其它抗病基因。临Y8222和安科1503推测其除了含有*Pm5a*、*Pm6*、*Pm19*和*Pm30*外,可能还含有其它抗病基因。襄麦D31、扬麦24、云154-64、川农32、春丰0017、偃亳197这6个品种,推测其除了含有*Pm5a*、*Pm6*、*Pm19*和*Pm2+ta*外,可能还含有其它抗病基因。云154-15推测其除了含有*Pm5a*、*Pm6*、*Pm7*、*Pm19*和*Pm2+ta*外,可能还含有其它抗病基因。

本研究中,所有鉴别菌株对18个平均抗性频率大于97.0%的小麦后备品种均不致病,推测这些品种可能含有抗病基因*Pm21*,但需要后续试验确认。涡麦505、华麦226、洛麦33、郑麦1354、郑麦5138、川麦608、云154-65、文11产55、武农986这9个品种,与供试已知基因的抗谱均不同,可能含有除供试基因之外的其它抗病基因。

Table 3 Resistance frequency of 61 wheat cultivars to tested isolates of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* from nine cities in China[illegible]

续表3 Continued

品种 Cultivar	抗性频率 Resistance frequency (%)									总体 Total (n=269)	P
	黄淮海冬麦区 Huang-Huai-Hai plain of winter wheat			长江中下游冬麦区 Middle and lower plain along Yangtze river of winter wheat					东北春麦区 North-east plain of spring wheat		
	徐州 Xuzhou (n=38)	洛阳 Luoyang (n=42)	宿州 Suzhou (n=65)	扬州 Yangzhou (n=60)	泰州 Taizhou (n=9)	襄阳 Xiangyang (n=8)	随州 Suizhou (n=22)	十堰 Shiyan (n=7)	哈尔滨 Harbin (n=18)		
绵麦 1416 Mianmai 1416	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	...
绵麦 1419 Mianmai 1419	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	...
绵麦 603 Mianmai 603	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	...
绵麦 302 Mianmai 302	97.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.6	0.379
绵麦 303 Mianmai 303	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	...
绵 15Z24 Mian 15Z24	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	...
川麦 606 Chuanmai 606	2.6	0.0	10.8	0.0	0.0	0.0	9.1	0.0	27.8	5.6	0.001
川麦 608 Chuanmai 608	10.5	14.3	29.2	0.0	0.0	25.0	9.1	0.0	0.0	12.3	<0.001
渝麦 24 Yumai 24	50.0	26.2	27.7	11.7	44.4	12.5	59.1	42.9	77.8	33.5	<0.001
渝麦 25 Yumai 25	0.0	0.0	6.2	0.0	0.0	50.0	4.5	0.0	5.6	3.7	<0.001
黔麦 19 Qianmai 19	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	12.5	100.0	100.0	94.4	97.0	<0.001
黔麦 20 Qianmai 20	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	62.5	100.0	100.0	100.0	98.9	<0.001
黔育 22 Qianyu 22	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	...
黔麦 21 Qianmai 21	100.0	100.0	100.0	98.3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.6	0.753
黔麦 22 Qianmai 22	100.0	100.0	98.5	100.0	100.0	100.0	95.5	100.0	100.0	99.3	0.468
云 154-2 Yun 154-2	0.0	2.4	10.8	10.0	0.0	12.5	9.1	0.0	11.1	7.1	0.259
云 154-15 Yun 154-15	5.3	9.5	18.5	0.0	0.0	37.5	13.6	42.9	55.6	13.8	<0.001
云 154-64 Yun 154-64	2.6	28.6	49.2	3.3	22.2	62.5	13.6	71.4	66.7	27.5	<0.001
文 11 产 55 Wen11Chan55	2.6	19.0	40.0	5.0	0.0	0.0	13.6	0.0	5.6	15.6	<0.001
蜀麦 1620 Shumai 1620	0.0	4.8	18.5	1.7	0.0	25.0	18.2	14.3	0.0	8.2	0.001
蜀麦 1622 Shumai 1622	26.3	21.4	41.5	36.7	22.2	37.5	45.5	28.6	16.7	32.7	0.250
蜀麦 1645 Shumai 1645	0.0	0.0	4.6	1.7	0.0	12.5	9.1	42.9	5.6	4.1	0.002
楚麦 16 号 Chumai No.16	100.0	97.6	100.0	100.0	100.0	62.5	90.9	100.0	88.9	97.0	<0.001
川农 32 Chuannong 32	0.0	19.0	35.4	1.7	33.3	62.5	13.6	71.4	61.1	21.9	<0.001

续表 3 Continued

品种 Cultivar	抗性频率 Resistance frequency (%)									总体 Total (n=269)	P
	黄淮海冬麦区 Huang-Huai-Hai plain of winter wheat			长江中下游冬麦区 Middle and lower plain along Yangtze river of winter wheat					东北春麦区 North-east plain of spring wheat		
	徐州 Xuzhou (n=38)	洛阳 Luoyang (n=42)	宿州 Suzhou (n=65)	扬州 Yangzhou (n=60)	泰州 Taizhou (n=9)	襄阳 Xiangyang (n=8)	随州 Suizhou (n=22)	十堰 Shiyan (n=7)	哈尔滨 Harbin (n=18)		
云麦 56 Yunmai 56	0.0	0.0	1.5	1.7	0.0	0.0	18.2	0.0	0.0	2.2	0.022
内麦 101 Neimai 101	100.0	100.0	98.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.6	1.000
内麦 141 Neimai 141	7.9	14.3	7.7	5.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	6.7	0.722
内麦 366 Neimai 366	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	...
川麦 42 Chuanmai 42	0.0	0.0	4.6	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	1.5	0.400
武农 986 Wunong 986	5.3	23.8	32.3	3.3	0.0	25.0	18.2	0.0	5.6	15.6	<0.001
春丰 0017 Chunfeng 0017	0.0	14.3	32.3	1.7	22.2	62.5	13.6	71.4	61.1	20.1	<0.001
偃亳 197 Yanhao 197	0.0	14.3	30.8	6.7	33.3	62.5	13.6	71.4	61.1	21.2	<0.001
荷麦 0746-2 Hemai 0746-2	71.1	52.4	43.1	21.7	100.0	50.0	77.3	71.4	72.2	51.3	<0.001
潍 2750 Wei 1750	65.8	31.0	29.2	11.7	55.6	37.5	59.1	57.1	72.2	37.9	<0.001
烟农 1212 Yannong 1212	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...
安农 0711 Annong 0711	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.4	0.243

n: 各市菌群所含菌株数; *P*: 经 Fisher 精确检验所得 *P* 值, $P < 0.05$ 表示至少对 1 个菌群的抗性频率存在显著差异; ...: 相同的抗性频率, 程序无法计算。 *n*: Number of isolates of different city groups; *P*: the values calculated by Fisher's exactly test, $P < 0.05$ indicates at least one population has significant difference on resistance frequencies; ...: identical populations where test could not be performed.

3 讨论

随着时空的变化,小麦白粉病菌的毒性结构会发生改变(Parks et al., 2008),这一特性使得具有单基因垂直抗性的品种在大面积推广种植几年后抗性容易被新的毒性小种克服。本研究选取的 61 个小麦后备品种都是近几年选育出的新品种,有的已经获批在当地推广种植,是生产中的后备主栽品种。本试验选取黄淮海冬麦区、长江中下游冬麦区及东北春麦区部分小麦种植区,采集 269 株小麦白粉病菌对 61 个小麦后备小麦品种进行苗期抗性鉴定,发现有 33 个品种的抗性频率低于 37.9%,占供试小麦后备品种总数的 54.1%,说明这些品种如推广种植时必须加以监控,防范因抗性较差而导致白粉病

的流行。对白粉病有较好抗性的 18 个品种主要是绵麦系列、内麦系列、黔麦系列和楚麦 16 号,分别选育自四川省绵阳市、四川省内江市、贵州省贵阳市和云南省楚雄彝族自治州,这些地方都是白粉病常年发病较重的地区,这些抗性优良品种的推广种植将有利于减轻该地区白粉病的发生。

小麦白粉病防控体系的重要工作之一是结合病原菌群体的监测资料进行抗病品种的合理布局。本课题组于 2011 年对中国 12 个省(自治区)小麦白粉病菌群体的毒性结构进行了系统分析(Zeng et al., 2014),发现中国小麦白粉病菌群体间存在很大的变异,18 个 *Pm* 基因对 12 个省(自治区)菌群的抗性存在显著差异,如 *Pm2* 和 *Pm19* 对来自不同区域菌群的抗性频率存在显著差异。本研究检测到有 7 个品

种含有抗病基因 *Pm2*, 分别为泰科麦 5303、中麦 4072、轮选 198、安科 1503、渝麦 24 号、荷麦 0746-2 和淮 2750, 有 11 个品种含有抗病基因 *Pm19*, 如临 Y8222、襄麦 D31、皖宿 1313、扬麦 24 号和华麦 7 号等, 对来自 9 个市的小麦白粉病菌群体的抗性频率存在显著差异, 与白粉病菌群体的毒性监测结果相符。

表 4 61 个小麦后备品种抗谱的聚类分析和抗性频率分布
Table 4 Clustering analysis of 61 wheat cultivars and their distribution in each resistance frequency

类群 Group	品种 Cultivar	推导的 <i>Pm</i> 基因 Postulated <i>Pm</i> gene	品种数 No. of cultivars		
			$Rf \leq 37.9\%$	$42.0\% \leq Rf \leq 56.1\%$	$Rf \geq 97.0\%$
I	邯 11-5272、泰科麦 5303、临 Y8222、中麦 4072、轮选 198、皖宿 1313、华麦 226、安科 1503、渝麦 24、荷麦 0746-2、淮 2750 Han 11-5272, Taikemai 5303, Lin Y8222, Zhongmai 4072, Lunxuan 198, Wansu 1313, Huamai 226, Anke 1503, Yumai 24, Hemai 0746-2, Wei 2750	<i>Pm30</i> , <i>Pm2+Pm30</i> , <i>Pm5a+Pm6+Pm19</i> , <i>Pm5a+Pm6+Pm19+Pm30</i> , <i>Pm2+Pm5a+Pm6+Pm19+Pm30</i> , ?	3	8	0
II	邯 11-5276、郑麦 0943、临 Y8253、兰天 0422、中麦 5051、襄麦 D31、扬麦 24 号、安科 1506、鲁研 9088、国豪麦 6 号、BL5002、川麦 606、川麦 608、渝麦 25、云 154-2、云 154-15、云 154-64、文 11 产 55、蜀麦 1620、蜀麦 1645、川农 32、云麦 56、内麦 141、川麦 42、武农 986、春丰 0017、偃豪 197、烟农 1212、安农 0711 Han 11-5276, Zhengmai 0943, Lin Y8253, Lantian 0422, Zhongmai 5051, Xiangmai D31, Yangmai No.24, Anke 1506, Luyan 9088, Guohaomai No. 6, BL5002, Chuanmai 606, Chuanmai 608, Yumai 25, Yun 154-2, Yun 154-15, Yun 154-64, Wen11Chan55, Shumai 1620, Shumai 1645, Chuannong 32, Yunmai 56, Neimai 141, Chuanmai 42, Wunong 986, Chunfeng0017, Yanhao 197, Yannong 1212, Annong 0711	<i>Pm5a+Pm6+Pm19</i> , <i>Pm5a+Pm6+Pm19+Pm(2+ta)</i> , <i>Pm5a+Pm6+Pm7+Pm19+Pm(2+ta)</i> , ?	29	0	0
III	蜀麦 1622 Shumai 1622	<i>Pm5a+Pm6+Pm19+?</i>	1	0	0
IV	华麦 7 号、皖西麦 0439 Huamai No. 7, Wanximai 0439	<i>Pm5a+Pm6+Pm19+?</i>	0	2	0
V	国豪麦 5 号、国豪麦 7 号、BL5008、绵麦 903、绵麦 1416、绵麦 1419、?(<i>Pm21</i>) 绵麦 603、绵麦 302、绵麦 303、绵麦 15Z24、黔麦 19、黔麦 20、黔育 22、黔麦 21、黔麦 22、楚麦 16 号、内麦 101、内麦 366 Guohaomai No. 5, Guohaomai No. 7, BL5008, Mianmai 903, Mianmai 1416, Mianmai 1419, Mianmai 603, Mianmai 302, Mianmai 303, Mianmai 15Z24, Qianmai 19, Qianmai 20, Qianyu 22, Qianmai 21, Qianmai 22, Chumai No. 16, Neimai 101, Neimai 366		0	0	18

Rf: 抗性频率; ?: 未知抗性因子。 *Rf*: Resistance frequency; ?: unknown resistance factor(s).

据报道,*Pm12*、*Pm13*、*Pm16*、*Pm20*、*Pm21*、*Pm30* 这 6 个小麦白粉病抗性基因均表现出较高的抗病性, 而生理小种的不断变异, 使得 *Pm1*、*Pm2*、*Pm3* (*Pm3a*、*Pm3c*、*Pm3f*)、*Pm4* (*Pm4b*)、*Pm5*、*Pm6*、*Pm7*、*Pm8* 等抗性基因单独应用时已逐渐丧失抗性, 但在将它们聚合育种的条件下, 仍可表现出较强的抗病性(李春鑫和徐为刚, 2009)。目前仍有较好抗性的白粉病苗期抗性基因仅有 *Pm2*、*Pm4a*、*Pm4b*、*Pm21* 和 *Pm30*(Hua et al., 2009)。本研究中推断含有抗性基因 *Pm2* 和 *Pm30* 聚合的品种, 抗性频率大多在 42.0%~56.1% 之间。小麦品种绵麦 37 具有较好的白粉病抗性(黄瑾等, 2014), 已通过 FISH 技术确定其携带 *Pm21* 基因(王洋洋等, 2015)。本试验结果显示, 小麦后备品种绵麦 1419 系谱来源中的绵麦

37, 鉴于其抗谱与 *Pm21* 类似, 可以推断其含有 *Pm21* 基因; 楚麦 16 号是来源于内麦 8 号育成的品种, 可推断其含有 *Pm21*; 含有 *Pm21* 的绵麦 1419 和楚麦 16 号对 269 株白粉病菌单孢子堆菌株均表现为免疫, 而抗性最强、抗谱最广的 *Pm21* 应用历史近 20 年, 是我国目前抗性最强的白粉病抗性基因, 但据曹世勤等(2010)和赵紫慧等(2013)报道, 甘肃省和河北省多地已出现对 *Pm21* 有毒性的白粉病菌菌株, 故需加强针对 *Pm21* 可能出现新毒性小种的监测。

基因型推导可鉴别一些已知 *Pm* 基因, 但因鉴别菌株和已知基因系的限制, 有些已知基因和未知基因仍不能通过基因型推导的方法来鉴别。来自簇毛麦的 *Pm21* (Cao et al., 2011) 是我国自主育成的 *Pm* 基因, 是目前抗性最强、抗谱最广的基因, 而且无

明显不良性状,抗病性在不同遗传背景下均能遗传(陈孝等,1997)。本研究基因推导结果显示,国豪麦5号、国豪麦7号、BL5008、绵麦903、绵麦1416、绵麦1419、绵麦603、绵麦302、绵麦303、绵15Z24、黔麦19、黔麦20、黔麦22、黔麦0504、黔麦0507、楚麦16号、内麦101、内麦366这18个品种极有可能含有*Pm21*或其它未知抗病基因。对于本研究中未明确抗病基因的小麦后备品种及18个抗性极好的品种都需要进一步研究,除了增加鉴别菌株类型与更多抗性基因材料,还要利用单体分析、等位性测定、分子标记(刘兵等,2010)等方法,并辅助系谱溯源,对其所含抗病基因加以鉴别和验证。

参 考 文 献 (References)

- Bhullar NK, Street K, Mackay M, Yahiaoui N, Keller B. 2009. Unlocking wheat genetic resources for the molecular identification of previously undescribed functional alleles at the *Pm3* resistance locus. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(23): 9519–9524
- Cao AZ, Xing LP, Wang XY, Yang XM, Wang W, Sun YL, Qian C, Ni JL, Chen YP, Liu DJ, et al. 2011. Serine/threonine kinase gene *Stpk-V*, a key member of powdery mildew resistance gene *Pm21*, confers powdery mildew resistance in wheat. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(19): 7727–7732
- Cao SQ, Luo HS, Wu CP, Jin SL, Wang XM, Zhu ZD, Jia QZ, Huang J, Zhang B, Shang XW. 2010. Postulation of powder mildew resistance genes in 64 wheat varieties (lines) in Gansu Province, China. *Acta Agronomica Sinica*, 36(12): 2107–2115 (in Chinese) [曹世勤, 骆惠生, 武翠平, 金社林, 王晓鸣, 朱振东, 贾秋珍, 黄瑾, 张勃, 尚勋武. 2010. 甘肃省主要小麦生产品种及抗源材料抗白粉病基因推导分析. *作物学报*, 36(12): 2107–2115]
- Cao SQ, Zhang B, Li MJ, Xu SC, Luo HS, Jin SL, Jia QZ, Huang J, Jin MA, Shang XW. 2011. Postulation of stripe rust resistance genes and analysis of adult resistance in 50 wheat cultivars (lines) in Gansu Province. *Acta Agronomica Sinica*, 37(8): 1360–1371 (in Chinese) [曹世勤, 张勃, 李明菊, 徐世昌, 骆惠生, 金社林, 贾秋珍, 黄瑾, 金明安, 尚勋武. 2011. 甘肃省50个主要小麦品种(系)苗期抗条锈基因推导及成株期抗病性分析. *作物学报*, 37(8): 1360–1371]
- Cao XR, Zhou YL, Duan XY, Song YL, He WL, Ding KJ, Wang BT, Xia XC. 2010. Postulation of wheat powdery mildew resistance genes in 101 wheat cultivars (lines) from major wheat grown regions in China. *Journal of Triticeae Crops*, 30(5): 948–953 (in Chinese) [曹学仁, 周益林, 段霞瑜, 宋玉立, 何文兰, 丁克坚, 王保通, 夏先春. 2010. 我国主要麦区101个小麦品种(系)的抗白粉病基因推导. *麦类作物学报*, 30(5): 948–953]
- Chen X, Shi AN, Shang LM. 1997. The resistance reaction of *H. villosa* to powdery mildew isolates and its expression in wheat back-ground. *Acta Phytopathologica Sinica*, 27(1): 17–22 (in Chinese) [陈孝, 施爱农, 尚立民. 1997. 簇毛麦对不同白粉病菌菌系的抗性反应及其在小麦遗传背景下的表达. *植物病理学报*, 27(1): 17–22]
- Flor HH. 1955. Host-parasite interaction in flax rust: its genetics and other implications. *Phytopathology*, 45(12): 680–685
- Gao HF, Fan JR, Zhou YL, Wang SL, Bai WW, Li GK. 2017. Postulation and molecular marker detection of wheat powdery mildew resistance genes in wheat cultivars (lines). *Acta Phytopathologica Sinica*, 47(3): 370–379 (in Chinese) [高海峰, 范洁茹, 周益林, 王锁牢, 白微微, 李广阔. 2017. 小麦品种(系)抗白粉病基因推导及分子标记鉴定. *植物病理学报*, 47(3): 370–379]
- He HG, Zhu SY, Zhao RH, Jiang ZN, Ji YY, Ji J, Qiu D, Li HJ, Bie TD. 2018. *Pm21*, encoding a typical CC-NBS-LRR protein, confers broad-spectrum resistance to wheat powdery mildew disease. *Molecular Plant*, 11(6): 879–882
- Hua W, Liu ZJ, Zhu J, Xie CJ, Yang T, Zhou YL, Duan XY, Sun QX, Liu ZY. 2009. Identification and genetic mapping of *Pm42*, a new recessive wheat powdery mildew resistance gene derived from wild emmer (*Triticum turgidum* var. *dicoccoides*). *Theoretical and Applied Genetic*, 119(2): 223–230
- Huang J, Cao SQ, Jia QZ, Luo HS, Zhang B, Sun ZY, Jin SL. 2014. Resistant characters of wheat variety Mianmai 37 to stripe rust and powdery mildew. *Journal of Triticeae Crops*, 34(5): 698–702 (in Chinese) [黄瑾, 曹世勤, 贾秋珍, 骆惠生, 张勃, 孙振宇, 金社林. 2014. 小麦品种绵麦37对条锈病和白粉病的抗性. *麦类作物学报*, 34(5): 698–702]
- Krattinger SG, Lagudah ES, Spielmeier W, Singh RP, Huerta-Espino J, McFadden H, Bossolini E, Selter LL, Keller B. 2009. A putative ABC transporter confers durable resistance to multiple fungal pathogens in wheat. *Science*, 323(5919): 1360–1363
- Li CX, Xu WG. 2009. Researches and application on molecular markers of powdery mildew resistant genes in wheat. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 25(10): 53–58 (in Chinese) [李春鑫, 许为钢. 2009. 小麦白粉病抗病基因分子标记开发及应用研究进展. *中国农学通报*, 25(10): 53–58]
- Li X, Xiao YY, Liu WC, Tang JY. 2002. Geographic spatial distribution attributes of wheat powdery mildew. *Journal of Plant Protection*, 29(1): 41–46 (in Chinese) [李迅, 肖悦岩, 刘万才, 汤金仪. 2002. 小麦白粉病地理空间分布特征. *植物保护学报*, 29(1): 41–46]
- Li YH, Cao LH, Zhou YL, Song YL, He WL, Duan XY, Yang GQ. 2012. Virulence and genetic diversity analyses of wheat powdery mildew population in Henan Province during 2009–2010. *Journal of Plant Protection*, 39(1): 31–38 (in Chinese) [李亚红, 曹丽华, 周益林, 宋玉立, 何文兰, 段霞瑜, 杨共强. 2012. 2009–2010年河南省小麦白粉菌群体毒性及其遗传多样性分析. *植物保护学报*, 39(1): 31–38]
- Li ZQ. 1980. Analysis on the loss of wheat yellow rust resistant genes and its control strategy. *Scientia Agricultura Sinica*, 13(3): 72–77 (in Chinese) [李振岐. 1980. 我国小麦品种抗条锈性丧失原因及其解决途径. *中国农业科学*, 13(3): 72–77]

- Liu B, Li SH, Wang YQ, Hu DW. 2010. Molecule detection of powdery mildew resistance genes in the commercial wheat cultivars in China. *Journal of Plant Protection*, 37(2): 113–117 (in Chinese) [刘兵, 李绍慧, 王永强, 胡东维. 2010. 我国主要小麦推广品种抗白粉病基因的分子检测. *植物保护学报*, 37(2): 113–117]
- Liu WC, Shao ZR. 1998. Analysis on climatic factor for epidemiology of wheat powdery mildew in China. *Plant Protection Technology and Extension*, 18(1): 3–5 (in Chinese) [刘万才, 邵振润. 1998. 我国小麦白粉病大区流行的气候因素分析. *植保技术与推广*, 18(1): 3–5]
- Loegering WQ. 1978. Current concepts in interorganismal genetics. *Annual Review of Phytopathology*, 16: 309–320
- Loegering WQ, McIntosh RA, Burton CH. 1971. Computer analysis of disease data to derive hypothetical genotypes for reaction of host varieties to pathogens. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*, 13(4): 742–748
- Parks R, Carbone I, Murphy JP, Marshall D, Cowger C. 2008. Virulence structure of the eastern U.S. wheat powdery mildew population. *Plant Disease*, 92(7): 1074–1082
- Sheng BQ. 1988. Pheonotype reaction recordation of wheat seedling stage. *Plant Protection*, 14(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*, 14(1): 49]
- Shi YQ, Wang BT, Li Q, Wu XY, Wang F, Liu H, Tian YE, Liu QR. 2009. Analysis on the virulent genes of *Erysiphe graminis* f. sp. *tritici* and the resistance genes of wheat commercial cultivars in Shaanxi Province. *Journal of Triticeae Crops*, 29(4): 706–711 (in Chinese) [史亚千, 王保通, 李强, 吴兴元, 王芳, 刘恒, 田月娥, 刘倩茹. 2009. 陕西省小麦白粉菌毒性结构及主栽小麦品种抗性基因的初步分析. *麦类作物学报*, 29(4): 706–711]
- Ullah KN, Li N, Shen T, Wang PS, Tang WB, Ma SW, Zhang ZM, Jia HY, Kong ZX, Ma ZQ. 2018. Fine mapping of powdery mildew resistance gene *Pm4e* in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Planta*, 248(5): 1319–1328
- Wang YY, Qiu L, Li M, Tang SY, Fu SL, Tang ZX. 2015. Molecular detection and FISH analysis of powdery mildew resistance gene in wheat cultivars Mianmai 37 and Mianmai 367. *Journal of Triticeae Crops*, 35(11): 1502–1505 (in Chinese) [王洋洋, 邱玲, 李萌, 汤述尧, 符书兰, 唐宗祥. 2015. 小麦品种绵麦37和绵麦367抗白粉病的FISH分析及分子检测. *麦类作物学报*, 35(11): 1502–1505]
- Wang ZH, Liu W, Xu Z, Fan JR, Peng YL, Zhou YL. 2017. Postulation of wheat powdery mildew resistance genes in 50 wheat cultivars (lines). *Plant Protection*, 43(6): 152–158 (in Chinese) [王振花, 刘伟, 徐志, 范洁茹, 彭云良, 周益林. 2017. 50个小麦生产及后备品种(系)的抗白粉病基因推导. *植物保护*, 43(6): 152–158]
- Xu HX, Xu YF, Geng LG, An DG. 2011. Resistance of Chinese wheat landraces and relatives at seedling stage to powdery mildew. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 19(5): 1210–1214 (in Chinese) [许红星, 许云峰, 耿立格, 安调过. 2011. 我国小麦农家品种和近缘种对白粉病的苗期抗性. *中国生态农业学报*, 19(5): 1210–1214]
- Xue F, Duan XY, Zhou YL, Ji WQ. 2009. Postulation of powdery mildew resistant genes carried in some Chinese wheat landraces and the genetic diversity analysis. *Journal of Triticeae Crops*, 29(2): 228–235 (in Chinese) [薛飞, 段霞瑜, 周益林, 吉万全. 2009. 部分小麦农家品种抗白粉病基因推导与遗传多样性分析. *麦类作物学报*, 29(2): 228–235]
- Yahiaoui N, Srichumpa P, Dudler R, Keller B. 2004. Genome analysis at different ploidy levels allows cloning of the powdery mildew resistance gene *Pm3b* from hexaploid wheat. *The Plant Journal*, 37(4): 528–538
- Yang LJ, Xiang LB, Zeng FS, Wang H, Shi WQ, Yu DZ. 2009. Virulence structure analysis of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* in Hubei. *Plant Protection*, 35(5): 76–79 (in Chinese) [杨立军, 向礼波, 曾凡松, 汪华, 史文琦, 喻大昭. 2009. 湖北麦区小麦白粉病菌毒性结构分析. *植物保护*, 35(5): 76–79]
- Yang LJ, Zeng FS, Gong SJ, Shi WQ, Zhang XJ, Wang H, Xiang LB, Yu DZ. 2013. Evaluation of resistance to powdery mildew in 68 Chinese major wheat cultivars and postulation of their resistance genes. *Scientia Agricultura Sinica*, 46(16): 3354–3368 (in Chinese) [杨立军, 曾凡松, 龚双军, 史文琦, 张学江, 汪华, 向礼波, 喻大昭. 2013. 68个主栽小麦品种的白粉病抗性分析及基因推导. *中国农业科学*, 46(16): 3354–3368]
- Yuan JH, Liu TG, Chen WQ. 2007. Postulation of leaf rust resistance genes in 47 new wheat cultivars (lines) at seedling stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 40(9): 1925–1935 (in Chinese) [袁军海, 刘太国, 陈万权. 2007. 中国47个小麦新品种苗期抗叶锈基因推导. *中国农业科学*, 40(9): 1925–1935]
- Zeng FS, Yang LJ, Gong SJ, Shi WQ, Zhang XJ, Wang H, Xiang LB, Xue MF, Yu DZ. 2014. Virulence and diversity of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* population in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(11): 2424–2437
- Zhao ZH, Huang J, Lu M, Wang XM, Wu LF, Wu XF, Zhao X, Li HJ. 2013. Virulence and genetic diversity of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* collected from Shandong and Hebei provinces. *Acta Agonomica Sinica*, 39(8): 1377–1385 (in Chinese) [赵紫慧, 黄江, 陆鸣, 王晓鸣, 吴龙飞, 武小菲, 赵鑫, 李洪杰. 2013. 山东省和河北省小麦白粉菌毒性与遗传多样性分析. *作物学报*, 39(8): 1377–1385]

(责任编辑:李美娟)