

四川省育成小麦品种和高代品系对条锈病的抗病性评价

郎晓威^{1,2,3}, 王凤涛^{2,5}, 姬红丽⁴, 蔺瑞明^{2,5}, 冯 晶^{2,5},
曹世勤^{1,3*}, 姚小波^{6*}

(1. 甘肃农业大学植物保护学院, 兰州 730070; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193; 3. 甘肃省农业科学院小麦研究所, 兰州 730070; 4. 四川农业科学院植物保护研究所, 农业农村部西南作物有害生物综合治理重点实验室, 成都 610066; 5. 国家植物保护甘谷观测实验站, 天水 741000; 6. 西藏自治区农牧科学院农业研究所, 拉萨 850032)

摘要 四川省不仅是条锈菌冬繁区,也是我国东部麦区重要的春季初侵染菌源地和毒性变异地。准确评价四川小麦新育成品种和高代品系对条锈病的抗性水平,能为合理培育和使用抗病品种提供重要依据。利用当前条锈菌优势小种和4个地点的成株期鉴定圃对来自四川省的115份小麦育成品种和299份高代品系进行苗期和成株期抗病性鉴定。结果表明,新育成品种苗期对优势小种的高抗CYR32、CYR33和CYR34的比例发生不同程度的变化,对CYR32的高抗比例为40.9%、对CYR34的高抗比例为17.4%,而供试高代品系高抗比例从52.3%降至46.2%;中抗类型育成品种从20.0%增加到40.9%,高代品系从19.6%增加至33.2%。表明条锈菌优势小种更替后一些材料仍保留了部分抗性,后期选育的高代品系兼顾对新小种的抗病性。育成品种在四川成都和甘肃清水成株期鉴定,高抗品种所占比例较低,分别为13.9%和3.5%,但高代品系高抗类型比例较高,分别为42.2%和8.5%,表明甘肃和四川条锈菌的致病类型和发病环境条件存在较大差异,近年来四川小麦成株抗条锈病育种取得显著进展。

关键词 小麦条锈病; 抗病性评价; 全生育期抗性; 成株抗性; 基因聚合

中图分类号: S 435.121 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2022039

Disease resistance evaluation of wheat commercial cultivars and advanced breeding lines developed in Sichuan to stripe rust

LANG Xiaowei^{1,2,3}, WANG Fengtao^{2,5}, JI Hongli⁴, LIN Ruiming^{2,5}, FENG Jing^{2,5},
CAO Shiqin^{1,3*}, YAO Xiaobo^{6*}

(1. College of Plant Protection, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. Institute of Wheat Research, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; 4. Key Laboratory of Integrated Management of Pest on Crops in Southwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chendu 610066, China; 5. National Agricultural Experimental Station for Plant Protection in Gangu, Tianshui 741000, China; 6. Agricultural Research Institute, Tibet Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850032, China)

Abstract There is an overwintering region in Sichuan province for the pathogen *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (Pst), which also serves as an important spring Pst inoculum source of the East wheat area and virulence variation center. Through accurate evaluation of disease resistance of commercial wheat cultivars and advanced breeding lines developed in Sichuan, valuable data will be presented for rational development and deployment of resistant wheat cultivars to stripe rust. Resistance of 115 commercial cultivars and 299 high breeding lines inoculated with

收稿日期: 2021-01-20

修订日期: 2021-03-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1401000); 国家自然科学基金(31871949, 31871923); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-ZDRW202002)

* 通信作者 E-mail: 曹世勤 caoshiqin6702@163.com; 姚小波 yaobo1031@163.com

three predominant Pst races at seedling stage and adult stage was evaluated in four field nurseries. The results showed that there were different proportions of highly resistant types among commercial cultivars at seedling stage to the predominant races CYR32, CYR33, and CYR34. The high resistance proportion to CYR32 was 40.9% and 17.4% to CYR34, while among advanced breeding lines, highly resistant type proportions reduced from 52.3% to 46.2%. The percentages of the moderately resistant type of commercial cultivars increased from 20.0% to 40.9%, while 19.6% up to 33.2% for the advanced breeding lines. The results indicated that some of the materials remained partial resistance after the predominant races shifted, and later the resistance to the emergence of the new races was integrated into advanced breeding lines. The highly resistant cultivars at the adult-plant stage accounted for a relative low percentage in the field nurseries at Chengdu, Sichuan (13.9%) and Qingshui, Gansu (3.5%), but 42.2% and 8.5% of advanced breeding lines at the two locations, showing the great differences in the pathotypes and environmental conditions for pathogen infection between Gansu and Sichuan. In recent years, significant progresses have been made in wheat adult-plant stripe rust resistance breeding in Sichuan.

Key words wheat stripe (yellow) rust; disease resistance evaluation; all-stage resistance; adult-plant resistance; gene pyramiding

由条形柄锈菌小麦专化型 *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (Pst)引起的条锈病是我国小麦生产上的主要气传病害,一般流行年份造成减产约5%~10%^[1-3],各小麦种植区内每年均有不同程度条锈病流行危害。根据条锈菌遗传多样性和有性杂交情况,推测 Pst 可能起源于喜马拉雅山脉周边高海拔冷凉区域^[4],毗邻该区域的中国境内分布着世界最大且相对独立的条锈病流行区^[5],几次大规模条锈病暴发给我国造成了严重经济损失^[6-7]。四川省是条锈病常发流行区域,1999年—2002年连续4年条锈病发生面积均超过47万hm²,每年小麦减产约30万t,特别是2002年条锈病发病面积超过100万hm²,造成四川小麦减产超过40万t^[8]。此外,四川省西北部高海拔地区和成都平原是重要的条锈病菌源地和毒性变异区^[1, 9-11],该区域也是条锈菌最重要的冬繁区,为东部长江中下游和西北冬麦区提供春季流行菌源^[6]。持续、有效防控条锈病对保障四川省及其周边小麦稳产高产具有重要意义^[1]。

种植抗病品种是防控条锈病最经济、有效和环保的措施^[3, 12]。但是,条锈菌群体具有丰富的遗传变异特性,群体数量庞大;同时生产上对主要抗条锈病基因过度单一使用,品种间抗病遗传背景高度相似,加大了对病原菌致病性变异的定向选择压力。新生理小种和致病类型相继出现和优势小种轮替,克服了主栽品种中已广泛应用的抗病基因,品种大面积应用3~5年后就成为感病品种,再次引发病害大流行^[13-15]。例如,全生育期抗病基因Yr26在主栽品种中广泛应用几年后,导致CYR34上升为毒性最强的优势流行小种,造成含有Yr10和Yr26的川麦系、

小偃系、兰天系等众多品种丧失抗病性^[9, 11, 16]。因此,只有不断发掘和合理利用抗病新基因资源才能为抗病育种和有效防控条锈病提供技术保障。

随着小麦条锈菌新致病类型的出现,许多抗病主栽品种的抗性逐渐降低甚至完全被克服^[17]。四川省非常重视抗病品种培育,近年来培育出一批新的小麦品种。为了弄清新育成品种和高代品系的抗病性现状,本研究将对四川省育成品种和高代品系进行苗期和成株期抗条锈性鉴定,以明确这些材料的抗性水平及抗性类型,为发掘抗病新基因和拓宽小麦抗条锈病遗传资源提供材料,为实现小麦抗病基因合理布局提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试314份材料来自四川省小麦育种单位,其中已审定登记的育成品种115份,高代品系199份,‘铭贤169’作为感病对照品种。小麦条锈菌优势生理小种CYR32、CYR33和CYR34作为苗期抗病性鉴定小种,CYR32、CYR33和CYR34及Hybrid 46类群、水源11类群和G22类群的主要致病类型混合菌株进行成株期抗性鉴定或田间气传自然菌株接种。

1.2 试验方法

1.2.1 苗期鉴定

待麦苗第2片叶完全展开后,利用电子氟化液(Novec™ 7100)分别将CYR32、CYR33和CYR34新鲜夏孢子等量混匀配制制成4mg/mL孢子悬浮液喷雾接种,每盆材料15株大约接种1mg夏孢子,接种后置于10℃接种间黑暗保湿24h,再转到人工气候室

(昼 15~18 ℃/夜 11~14 ℃;光照时间 12~14 h/d, 光强 5 000~6 000 lx)继续潜育培养^[18]。

1.2.2 成株期鉴定

2018 年—2020 年在甘肃省天水市清水县、湖北省荆州市、河北省廊坊市和 2020 年在四川省成都市郫都区设置抗性鉴定圃,进行供试材料的成株期抗条锈性表型鉴定。鉴定圃行长 3 m,行距 0.4 m,采用穴播方式,每行播种 5 个品种/品系。每个品种/品系播种 15~20 粒种子,均匀分散在约 10 cm 范围内。每间隔 20 行鉴定材料播种 1 行感病对照品种‘铭贤 169’。鉴定圃周边播种感病品种‘铭贤 169’作为接种诱发行。在小麦分蘖初期,对清水县、廊坊市和郫都区鉴定圃的诱发行‘铭贤 169’喷雾接种混合菌株的孢子悬浮液,位于荆州市的鉴定圃利用气传菌源自然接种。

1.2.3 侵染型调查

在苗期和成株期,均采用 0 至 4 级侵染型分级标准^[19],0 级:叶上不产生任何可见的症状,0;级:叶上产生小型枯死斑,不产生夏孢子堆;1 级:叶上产生枯死条点或条斑,夏孢子堆很小,数目很少;2 级:夏孢子堆小到中等大小,较少,周围叶组织枯死或显著褪绿;3 级:夏孢子堆较大、较多,其周围叶组织有褪绿现象;4 级:夏孢子堆大而多,周围不褪绿。其中 0 为免疫,0;为近免疫,1 级为高抗(HR),2 级为中抗(MR),3 级为中感(MS),4 级为高感(HS)。苗期接种后约 15 d,当感病对照品种充分发病后进行第 1 次侵染型调查,间隔 4 d 进行第 2 次调查。在成株期,待感病对照品种发病平均严重度达 80%以上开始侵染型调查,间隔 7 d 进行第 2 次调查。综合 2 次调查结果确定待鉴定品种的苗期和成株期抗条锈病表型。苗期抗锈病鉴定试验独立重复 2 次。

1.3 数据统计方法

利用软件 WPS Office 2019 统计分析小麦抗条锈病品系在苗期和成株期不同抗性类型的比例。

2 结果与分析

2.1 苗期抗性鉴定结果

分别利用 3 个优势小种对 115 份育成品种进行苗期抗性鉴定,其中‘西科麦 1 号’‘川农 19’‘川麦 80’等 47 个品种高抗 CYR32,占 40.9%;‘昌麦 28’‘绵阳 32’‘蜀麦 1613’等 23 个品种中抗 CYR32,占 20.0%;‘川育 6 号’‘川麦 44’‘绵麦 37’等 36 个品种高抗 CYR33,占 31.3%;‘川农 21’‘西科麦 1 号’

‘川麦 38’等 34 个品种中抗 CYR33,占 29.6%;‘昌麦 28’‘川麦 53’‘中科麦 138’等 20 个品种高抗 CYR34,占 17.4%;‘内麦 8 号’‘绵阳 32’‘川麦 38’等 47 个品种中抗 CYR34,占 40.9%。另外,‘资麦 1 号’‘中科麦 138’‘川育 6 号’等 27 个育成品种高抗 CYR32 和 CYR33;‘资麦 1 号’‘川麦 53’‘西科麦 1 号’等 11 个品种高抗 CYR32 和 CYR34;‘绵麦 37’‘良麦 2 号’‘川麦 64’等 10 个品种高抗 CYR33 和 CYR34。在所鉴定的材料中,苗期高抗 3 个小种的育成品种仅有‘资麦 1 号’‘川麦 53’‘中科麦 138’等 9 个品种,对 3 个小种中抗以上的包括‘川麦 38’‘绵阳 32’‘西科麦 1 号’等 33 个品种(图 1,表 1)。

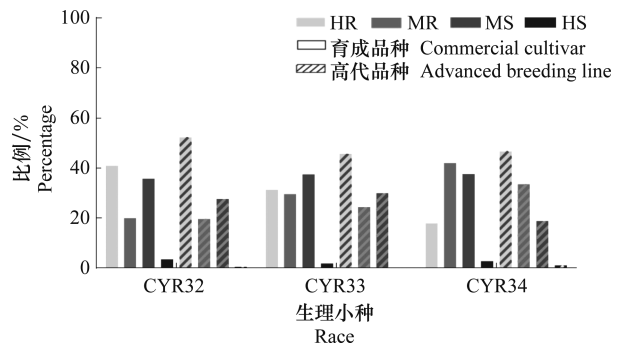


图 1 115 份育成品种和 199 份高代品系苗期对 CYR32、CYR33 和 CYR34 抗性水平分布

Fig. 1 Distribution of resistance levels of 115 commercial cultivars and 199 advanced breeding lines to stripe rust races of CYR32, CYR33 and CYR34 at the seedling stage

表 1 苗期高抗和中抗 3 个小种 CYR32、CYR33 和 CYR34 的育成品种¹⁾

Table 1 Commercial cultivars with high and moderate resistance to three races of CYR32, CYR33, and CYR34 at the seedling stage

	品种名称 Cultivar name	抗病性 Disease resistance		
		CYR32	CYR33	CYR34
昌麦 28	Changmai 28	MR	MR	HR
川麦 38	Chuanmai 38	HR	MR	MR
川麦 44	Chuanmai 44	MR	HR	MR
川麦 53	Chuanmai 53	HR	HR	HR
川麦 58	Chuanmai 58	HR	HR	HR
川麦 64	Chuanmai 64	HR	HR	HR
川麦 65	Chuanmai 65	HR	HR	MR
川麦 66	Chuanmai 66	HR	HR	MR
川麦 68	Chuanmai 68	HR	HR	MR
川麦 80	Chuanmai 80	HR	HR	MR
川农 19	Chuannong 19	HR	MR	MR
川农 21	Chuannong 21	MR	MR	MR
川农 27	Chuannong 27	MR	MR	MR
川双麦 1 号	Chuanshuangmai 1	HR	HR	MR
川育 6 号	Chuanyu 6	HR	HR	MR
科成麦 4 号	Kechengmai 4	HR	HR	HR

续表 1 Table 1(Continued)

品种名称 Cultivar name	抗病性 Disease resistance		
	CYR32	CYR33	CYR34
科成麦 5 号 Kechengmai 5	MR	MR	MR
科成麦 6 号 Kechengmai 6	HR	HR	MR
良麦 2 号 Liangmai 2	HR	HR	HR
绵麦 112 Mianmai 112	HR	HR	MR
绵麦 285 Mianmai 285	HR	HR	MR
绵麦 367 Mianmai 367	HR	MR	MR
绵麦 37 Mianmai 37	HR	HR	HR
绵麦 38 Mianmai 38	HR	MR	MR
绵麦 39 Mianmai 39	MR	MR	HR
绵麦 48 Mianmai 48	MR	MR	MR
绵麦 51 Mianmai 51	HR	HR	MR
绵阳 32 Mianyang 32	MR	MR	MR
绵阳 33 Mianyang 33	MR	MR	MR
内麦 8 号 Neimai 8	HR	HR	MR
蓉麦 2 号 Rongmai 2	MR	HR	MR
蓉麦 4 号 Rongmai 4	MR	MR	MR
蜀麦 1613 Shumai 1613	MR	HR	HR
蜀麦 482 Shumai 482	HR	HR	MR
特研麦南 88 Teyanmainan 88	HR	MR	MR
西昌 19 Xichang 19	HR	MR	HR
西科麦 1 号 Xikemai 1	HR	MR	HR
西科麦 3 号 Xikemai 3	MR	HR	MR
西科麦 5 号 Xikemai 5	HR	HR	MR
宜麦 8 号 Yimai 8	HR	HR	HR
中科麦 138 Zhongkemai 138	HR	HR	HR
资麦 1 号 Zimai 1	HR	HR	HR

1) HR: 高抗; MR: 中抗。下同。
HR: High resistance; MR: Moderate resistance. The same applies below.

另外,鉴定了 199 份高代品系苗期分别对 3 个优势小种的抗病性,其中‘15S1513-5’‘15S1633-9’‘15S1833-2’等 104 个品种高抗 CYR32,占 52.3%; ‘CD011J33’‘CD0151237-2’‘CD0151568-9’等 39 个品种中抗 CYR32,占 19.6%; ‘15S1513-5’ ‘15S2297-1’‘RC9’等 90 个品种高抗 CYR33,占 45.2%; ‘CD0151543-9’‘CD0151829-8’‘RC34’等 48 个品种中抗 CYR33,占 24.1%; ‘G15-18’‘G15-20’‘PZ15-10’等 92 个品种高抗 CYR34,占 46.2%; ‘Y15-211’‘CD011J33’‘CD0151300-2’等 66 个品种中抗 CYR34,占 33.2%(图 1)。其中,部分高代品系同时抗 2 个小种,如 114 个品系对 CYR32 和 CYR33 两个小种均达到中抗以上,119 个品系对 CYR32 和 CYR34 均达到中抗以上,112 个品系对 CYR33 和 CYR34 小种均达到中抗以上。另外, ‘G15-14’‘G15-20’‘蜀麦 1609’等 33 个品系苗期高抗 3 个小种,‘RC7’‘RC8’‘科成麦 7 号’等 62 个品系苗期中抗 3 个小种。

根据苗期抗性鉴定结果,发现育成品种高抗 CYR32、CYR33 和 CYR34 的比例分别为 40.9%、

31.3%、17.4%,对 3 个小种的高抗比例逐渐下降; 但中抗品种所占比例从 CYR32 的 20.0%增加到 CYR34 的 40.9%;高代品系中高抗上述 3 个优势小种的比例从 CYR32 的 52.3%降低至 CYR34 的 46.2%,中抗品系比例从 19.6%增加至 33.2%(图 1)。比较育成品种与高代品系分别对 3 个优势小种表现高抗的比例变化,高抗 CYR32、CYR33 和 CYR34 的育成品种所占比例减少幅度较大,但高代品系表现高抗类型的比例变化幅度相对较小。

2.2 成株期抗性评价

在甘肃清水县鉴定圃,‘川农 19’‘川农 21’‘乐麦 3 号’‘川麦 62’共 4 个育成品种表现为高抗,占 3.5%,而‘川农 17’‘绵阳 35’‘川农 18’等 71 个品种表现为中抗,占 61.7%;在四川郫都区鉴定圃,‘川农 21’‘乐麦 3 号’‘科成麦 6 号’等 16 个育成品种表现为高抗,占 13.9%,而‘绵阳 12’‘绵农 7’‘绵阳 35’等 75 个品种表现中抗,占 65.2%;在湖北荆州市鉴定圃,‘川农 19’‘川育 19’‘乐麦 3 号’等 40 个育成品种表现为高抗,占 34.8%,‘绵阳 12’‘川育 9 号’‘绵农 7’等 67 个品种表现为中抗,占 58.3%;在河北廊坊市鉴定圃,‘川育 16’‘西科麦 1 号’‘川农 26’等 50 个育成品种表现为高抗,占 43.5%,‘西辐 12’‘绵麦 37’‘内麦 9 号’等 47 个品种表现为中抗,占 40.9%(图 2,表 2)。成株期在 4 个鉴定圃中均表现高抗的育成品种仅有‘川农 21’‘乐麦 3 号’,表现中抗以上品种包括‘绵阳 31’‘川麦 38’‘西辐 12’和‘中科麦 138’等 54 份育成品种。

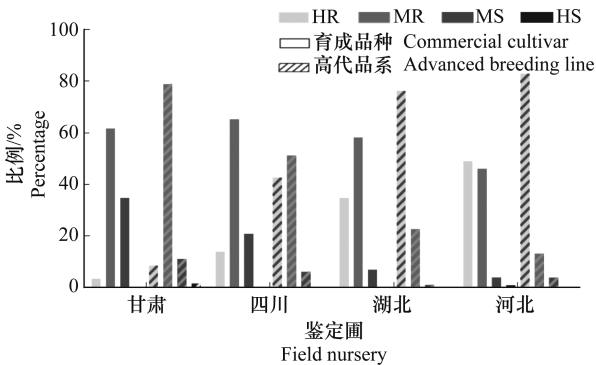


图 2 在甘肃、四川、湖北和河北鉴定圃 115 份育成品种和 199 份高代品系成株期抗条锈病类型分布
Fig. 2 Distribution of resistance levels of 115 commercial cultivars and 199 advanced breeding lines to stripe rust at the adult-plant stage in the field nurseries in Gansu, Sichuan, Hubei and Hebei

表 2 在甘肃、四川、湖北和河北鉴定圃成株期表现高抗和中抗的育成品种

Table 2 Commercial cultivars with high and moderate resistance in the field nurseries in Gansu, Sichuan, Hubei and Hebei at the adult-plant stage

品种名称 Cultivar name		抗病性 Disease resistance				品种名称 Cultivar name		抗病性 Disease resistance			
		甘肃	四川	湖北	河北			甘肃	四川	湖北	河北
		清水	郫都	荆州	廊坊			清水	郫都	荆州	廊坊
		Qingshui, Gansu	Pidu, Sichuan	Jingzhou, Hubei	Langfang, Hebei			Qingshui, Gansu	Pidu, Sichuan	Jingzhou, Hubei	Langfang, Hebei
昌麦 26	Changmai 26	MR	HR	HR	HR	科成麦 4 号	Kechengmai 4	MR	HR	HR	HR
昌麦 28	Changmai 28	MR	HR	HR	HR	科成麦 5 号	Kechengmai 5	MR	HR	HR	HR
川麦 32	Chuanmai 32	MR	MR	MR	HR	乐麦 3 号	Lemai 3	HR	HR	HR	HR
川麦 33	Chuanmai 33	MR	MR	MR	HR	良麦 2 号	Liangmai 2	MR	MR	MR	HR
川麦 38	Chuanmai 38	MR	MR	MR	MR	良麦 4 号	Liangmai 4	MR	MR	MR	MR
川麦 41	Chuanmai 41	MR	MR	HR	HR	绵麦 112	Mianmai 112	MR	HR	HR	HR
川麦 45	Chuanmai 45	MR	MR	MR	MR	绵麦 39	Mianmai 39	MR	MR	HR	HR
川麦 46	Chuanmai 46	MR	MR	HR	MR	绵麦 43	Mianmai 43	MR	MR	HR	HR
川麦 48	Chuanmai 48	MR	MR	HR	HR	绵麦 45	Mianmai 45	MR	MR	HR	HR
川麦 55	Chuanmai 55	MR	MR	HR	HR	绵麦 48	Mianmai 48	MR	MR	HR	MR
川麦 56	Chuanmai 56	MR	MR	HR	HR	绵麦 51	Mianmai 51	MR	HR	HR	MR
川麦 58	Chuanmai 58	MR	HR	HR	HR	绵农 7	Miannong7	MR	MR	MR	HR
川麦 61	Chuanmai 61	MR	MR	MR	HR	绵阳 12	Mianyang 12	MR	MR	MR	HR
川麦 62	Chuanmai 62	HR	HR	HR	MR	绵阳 31	Mianyang 31	MR	MR	MR	MR
川麦 64	Chuanmai 64	MR	MR	HR	MR	蜀麦 1613	Shumai 1613	MR	HR	HR	HR
川农 17	Chuannong 17	MR	HR	MR	HR	蜀麦 691	Shumai 691	MR	MR	HR	HR
川农 18	Chuannong 18	MR	MR	MR	HR	西昌 19	Xichang 19	MR	MR	MR	HR
川农 19	Chuannong 19	HR	MR	HR	HR	西辐 12	Xifu 12	MR	MR	MR	MR
川农 21	Chuannong 21	HR	HR	HR	HR	西科麦 2 号	Xikemai 2	MR	MR	MR	HR
川农 24	Chuannong 24	MR	MR	HR	MR	西科麦 4 号	Xikemai 4	MR	MR	HR	HR
川农 26	Chuannong 26	MR	MR	MR	HR	西科麦 5 号	Xikemai 5	MR	MR	MR	HR
川农 27	Chuannong 27	MR	MR	HR	HR	西科麦 6 号	Xikemai 6	MR	MR	MR	HR
川育 19	Chuanyu 19	MR	MR	HR	HR	先麦 99	Xianmai 99	MR	HR	MR	HR
川育 20	Chuanyu 20	MR	MR	MR	HR	宜麦 8 号	Yimai 8	MR	MR	HR	HR
川育 21	Chuanyu 21	MR	MR	MR	HR	渝麦 12	Yumai 12	MR	MR	MR	HR
川育 23	Chuanyu 23	MR	MR	MR	HR	玉脉 1 号	Yumai 1	MR	MR	HR	HR
国豪麦 15	Guohaomai 15	MR	MR	MR	HR	中科麦 138	Zhongkemai 138	MR	MR	MR	MR
科成麦 1 号	Kechengmai 1	MR	MR	HR	MR	资麦 1 号	Zimai 1	MR	MR	HR	MR

199 份高代品系在不同的鉴定圃中成株期抗性表型也存在差异。例如在甘肃清水县,‘G15-22’‘Y16-2756’‘LW15-B2976’等 17 个品系表现为高抗,占 8.5%,‘Y15-211’‘蜀麦 1615’‘CD011J33’等 157 个品系表现为中抗,占 78.9%;但在四川郫都区,‘15S2033-5’‘CD0151533-10’‘CD0151537-9’等 84 个品系表现为高抗,占 42.2%,‘15S1633-9’‘15S2297-1’‘蜀麦 1615’等 101 个品系表现为中抗,占 50.8%(图 2)。高代品系‘CD0151890-7’‘CD0151903-5’‘G15-20’‘G15-22’和‘PZ15-2’在 4 个鉴定圃中成株期均表现为高抗,而‘RC20’‘RC34’和‘RC63’等 148 份品系表现为中抗。

育成品种和高代品系在 4 个不同地点的鉴定圃成株期对条锈病反应型不同,例如在甘肃清水和四川成都的鉴定圃中,高抗类型育成品种分别占 3.5%和 13.9%,明显低于在湖北荆州(34.8%)和河北廊坊(43.5%)的比例,但在甘肃和四川两个鉴定圃的中抗

育成品种数量较为接近;高代品系在四川有 42.2%为高抗类型,低于在湖北(74.4%)及河北(75.9%)的比例,而明显高于在甘肃(8.5%)的比例(图 2)。

依据供试品种/品系在苗期和成株期抗性表型鉴定结果,获得具有全生育期抗性和成株抗性类型的材料。‘川麦 38’‘川农 19’‘川农 21’等 20 份育成品种和‘Y15-211’‘CD0151268-1’‘CD0151523-4’等 74 份高代品系在苗期对 3 个生理小种和成株期在 4 个鉴定地点均为抗病表型,属于全生育期抗性类型,其中‘CD0151903-5’‘G15-20’‘G15-22’‘PZ15-2’为全生育期高抗类型。在本研究中,还发现一些品种/品系在苗期为抗病表型但在成株期为感病,如‘川育 6 号’‘川麦 35’‘川育 16’‘绵阳 32’等 34 个育成品种苗期抗优势小种,但在甘肃省清水县成株期属于中感类型;在四川郫都,‘绵阳 26’‘川农 16’‘内麦 8 号’‘蓉麦 2 号’等 22 个苗期抗病的育成品种成株期属于中感类型。

2.3 不同年份育成品种的抗性比较

90 个育成品种分别在 2002 年—2009 年及 2013 年—2015 年间审定,依据成株期四川鉴定圃的鉴定结果,每年审定的高抗类型品种所占比例从 12.5% 增加到 28.6%,平均为 10.7%;中抗类型品种所占比例平均为 68.0%。在 90 份育成品种中,平均每年审定高抗和中抗 CYR32 小种的品种所占比例分别为 51.0% 和 18.8%,而高抗和中抗 CYR34 小种所占比例分别为 18.0% 和 38.8% (图 3),说明优势小种更替严重影响了抗病育种的选择方向。本研究中 2016 年通过审定的‘蜀麦 1613’‘科成麦 5 号’‘绵麦 112’在苗期对 3 个优势小种和成株期在 4 个鉴定圃均表现为中抗水平以上。

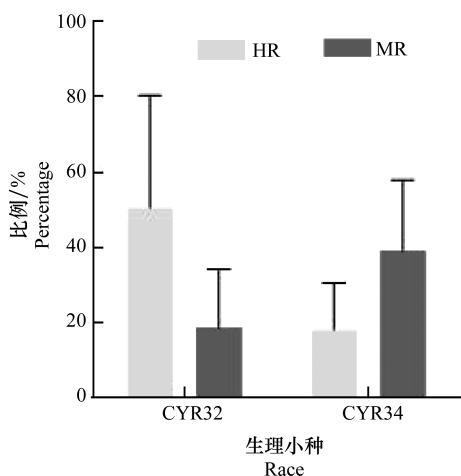


图 3 在 2002 年—2009 年及 2013 年—2015 年四川审定的 90 份小麦品种抗条锈病评价

Fig. 3 Stripe rust resistance evaluation of 90 commercial wheat cultivars in Sichuan during 2002–2009 and 2013–2015

3 结论与讨论

3.1 四川小麦育成品种抗条锈性变化趋势

在本研究中,四川 115 个育成品种中仅‘繁 6’和‘雅安早’是 20 世纪 70 至 80 年代广泛种植的品种,其余 113 个为审定品种。在 2002 年—2009 年及 2013 年—2015 年期间审定的 90 个品种中,成株期在四川鉴定圃高抗和中抗的品种在每年审定品种中所占比例变化不明显。主要是因为病原菌的毒性变异加快,特别是 2009 年出现并快速上升为优势流行小种的 CYR34^[16, 20–22],导致大量后期育成的含有抗病基因 Yr10、Yr26 品种丧失抗病性。在 90 份育成品种中,平均每年审定的高抗 CYR32 品种比例 (51.0%) 显著高于高抗新小种 CYR34 的比例

(18.0%),但对 CYR32 和 CYR34 小种中抗的品种比例从 18.8% 增加到了 38.8% (图 3)。说明在条锈菌流行小种更替过程中,虽然大部分品种丧失了抗病性,但是其中一些品种仍保留了部分抗性,而抗性由高抗转变为中抗。因此,应重视利用抗性较为稳定的基因和多基因聚合策略。

3.2 四川小麦育成品种和高代品系在不同生态区的成株期抗条锈性

小麦条锈病成株抗性类型 (adult plant resistance, APR) 一般具有非小种专化性,因而具有潜在的持久抗病性^[23–24]。APR 基因利用也是我国条锈病抗性育种的重要内容,本研究中,育成品种和高代品系在 4 个位于不同条锈病流行区的鉴定圃成株期抗条锈病鉴定结果不同,说明成株期抗性表型与鉴定圃所在地域环境条件密切相关。育成品种成株期在四川成都 (13.9%) 和甘肃清水 (3.5%) 高抗类型所占比例显著少于在湖北荆州 (34.8%) 和河北廊坊 (43.5%),但在甘肃和四川中抗品种数量较为接近;高代品系成株期在四川属于高抗类型所占比例 (42.2%) 低于在湖北 (74.4%) 和河北 (75.9%) 所占比例,但明显高于育成品种中的比例 (13.9%),在甘肃仅有 8.5% 高代品系属于高抗类型 (图 2)。因此,四川小麦成株期抗条锈病育种取得巨大进展,在四川鉴定圃相对于育成品种 13.9% 的高抗比例,高代品系的高抗比例增加到 42.2%;而中抗材料比例从 65.2% 减少到 50.8%。但在甘肃清水鉴定圃,四川的育成品种和高代品系高抗类型比例仍比较低,说明在甘肃和四川这两个最重要的菌源地,条锈菌的致病类型和侵染环境条件存在较大差异。

3.3 四川小麦材料抗条锈病基因型鉴定与利用

四川省内及其周边条锈菌菌源基地存在丰富的致病变异类型,导致新致病类型不断产生和主栽品种推广应用 3~5 年后丧失抗病性^[1, 8]。因此,培育和筛选抗性持久稳定的主栽品种对有效控制条锈病尤为迫切。在本研究苗期利用 3 个优势小种和成株期 4 个地点系统鉴定,可以从中发掘抗性稳定具有持久抗性潜力的基因型。如对小种 CYR32、CYR33 和 CYR34 均为高抗类型的全生育期抗病育成品种‘资麦 1 号’‘良麦 2 号’‘科成麦 4 号’‘绵麦 37’‘川麦 53’‘川麦 58’‘川麦 64’‘宜麦 8 号’和高代品系‘中科麦 138’,以及在 4 个鉴定圃均为高抗类型的成株抗性品种‘乐麦 3 号’。‘川农 21’苗期中抗 3 个流行小种,成株期在 4 个鉴定圃中均为高抗类型,含

有来自小麦—黑麦 1BL/1RS 易位系抗病基因 Yr41,其抗条锈性已保持了近 20 年。但其他来自小麦—黑麦 1BL/1RS 易位系的育成品种如‘川农 19’‘川农 26’‘川农 27’虽然携带 Yr41^[25],但抗性水平低于‘川农 21’,推测该品种携带有其他的抗病遗传位点。‘川麦 53’‘川麦 58’‘川麦 68’除含有 Yr26 外,还含有其他基因^[26-27]。另外,‘川麦 87’‘绵麦 161’‘绵麦 319’等 12 份抗条锈病材料可能携带 Yr5,‘川麦 83’‘川育 34’‘绵麦 903’等 12 份材料可能携带 Yr15^[28]。Yr5 是高抗我国当前流行小种如 CYR32、CYR33 和 CYR34 全生育期抗性基因^[17],但已在澳大利亚^[29]、土耳其^[30]、印度^[31]和中国^[32]发现了对 Yr5 高毒性菌株。2016 年后审定的全生育期抗病品种‘蜀麦 1613’可能携带 Yr9+Yr10^[33],而‘蜀麦 691’可能携带 Yr17+Yr29+Yr30+Yr67+Yr81^[34],通过多基因聚合策略有效地提高了抗性水平。

参考文献

- [1] CHEN Wanquan, WELLINGS C, CHEN Xianming, et al. Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* [J]. Molecular Plant Pathology, 2014, 15(5): 433–446.
- [2] WELLINGS C R. Global status of stripe rust: a review of historical and current threats [J]. Euphytica, 2011, 179(1): 129–141.
- [3] LINE R F. Stripe rust of wheat and barley in North America: a retrospective historical review [J]. Annual Review of Phytopathology, 2002, 40(40): 75–118.
- [4] ALI S, GLADIEUX P, LECONTE M, et al. Origin, migration routes and worldwide population genetic structure of the wheat yellow rust pathogen *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* [J/OL]. PLoS Pathogens, 2014, 10(1): e1003903. DOI: 10.1371/journal.ppat.1003903.
- [5] WAN Anmin, CHEN Xianming, HE Zhonghu. Wheat stripe rust in China [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2007, 58(6): 605–619.
- [6] 陈万权, 康振生, 马占鸿, 等. 中国小麦条锈病综合治理理论与实践[J]. 中国农业科学, 2013, 46(20): 4254–4262.
- [7] 马占鸿. 中国小麦条锈病研究与防控[J]. 植物保护, 2018, 45(1): 1–6.
- [8] 姚革, 蒋滨, 田承权, 等. 四川省小麦条锈病持续流行原因及防治对策[J]. 西南农业学报, 2004, 17(2): 253–256.
- [9] HAN Dejun, WANG Qilin, CHEN Xianming, et al. Emerging Yr26-virulent races of *Puccinia striiformis* f. *tritici* are threatening wheat production in the Sichuan basin, China [J]. Plant Disease, 2015, 99(6): 754–760.
- [10] ZHENG Shigang, LI Yunfang, LU Lu, et al. Evaluating the contribution of Yr genes to stripe rust resistance breeding through marker-assisted detection in wheat [J]. Euphytica, 2017, 213(2): 1–16.
- [11] MCINTOSH R, MU Jingmei, HAN Dejun, et al. Wheat stripe rust resistance gene Yr24/Yr26: A retrospective review [J]. The Crop Journal, 2018, 6: 321–329.
- [12] 吴立人, 牛永春. 我国小麦条锈病持续控制的策略[J]. 中国农业科学, 2000, 33(5): 46–54.
- [13] LINE R F, CHEN Xianming. Successes in breeding for and managing durable resistance to wheat rusts [J]. Plant Disease, 1995, 79(12): 1254–1255.
- [14] 万安民, 袁文焕. 1991~1996 年我国小麦条锈菌生理专化研究[J]. 植物病理学报, 1999, 29(1): 3–5.
- [15] CHEN Xianming. Epidemiology and control of stripe rust [*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*] on wheat [J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2005, 27(3): 314–337.
- [16] 刘博, 刘太国, 章振羽, 等. 中国小麦条锈菌条中 34 号的发现及其致病特性[J]. 植物病理学报, 2017, 47(5): 681–687.
- [17] 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): 83–92.
- [18] 庞云星, 崔宏梅, 蔺瑞明, 等. 89 份河北、山西小麦品种抗条锈性评价及抗条锈病基因检测[J]. 植物保护, 2021, 47(6): 49–57.
- [19] CHEN Wanquan, WU Liren, LIU Taiguo, et al. Race dynamics, diversity, and virulence evolution in *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, the causal agent of wheat stripe rust in China from 2003 to 2007 [J]. Plant Disease, 2009, 93(11): 1093–1101.
- [20] 沈丽, 罗林明, 陈万权, 等. 四川省小麦条锈病流行区划及菌源传播路径分析[J]. 植物保护, 2008, 35(3): 220–226.
- [21] 向运佳, 章振羽, 沈丽, 等. 2005–2010 年四川省小麦条锈病菌毒性变化动态[J]. 西南农业学报, 2013, 26(5): 1858–1863.
- [22] LIU Taiguo, PENG Yunliang, CHEN Wanquan, et al. First detection of virulence in *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in China to resistance genes Yr24 (=Yr26) present in wheat cultivar ‘Chuanmai 42’ [J]. Plant Disease, 2010, 94(9): 1163.
- [23] ELLIS J G, LAGUDAH E S, SPIELMEYER W, et al. The past, present and future of breeding rust resistant wheat [J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 641. DOI: 10.3389/fpls.2014.00641.
- [24] GEBREWAHID T W, ZHANG Peipei, ZHOU Yue, et al. QTL mapping of adult plant resistance to stripe rust and leaf rust in a Fuyu 3/Zhengzhou 5389 wheat population [J]. The Crop Journal, 2020, 8(4): 655–665.
- [25] LUO Peigao, REN Zhenglong, ZHANG Huaiyu, et al. Identification, chromosome location, and diagnostic markers for a new gene (YrCN19) for resistance to wheat stripe rust [J]. Phytopathology, 2005, 95(11): 1266–1270.
- [26] 郑建敏, 罗江陶, 万洪深, 等. 四川省小麦育成品种系谱分析及发展进程[J]. 遗传, 2019, 41(7): 599–610.
- [27] 郑建敏, 罗江陶, 万洪深, 等. 川麦 44 及其 9 个衍生品种比较分析[J]. 西南农业学报, 2018, 31(12): 2472–2477.

- [5] 陈云芳, 刘莉, 高渊, 等. 2003—2013 年全国进境水果截获疫情分析[J]. 中国植保导刊, 2016, 36(5): 61—66.
- [6] DOHINO T, HALLMAN G J, GROUT T G, et al. Phytosanitary treatments against *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae): current situation and future prospects [J]. Journal of Economic Entomology, 2017, 110(1): 67—79.
- [7] PETERS D J, CONSTABEL C P. Molecular analysis of herbivore-induced condensed tannin synthesis: cloning and expression of dihydroflavonol reductase from trembling aspen (*Populus tremuloides*) [J]. The Plant Journal, 2002, 32: 701—712.
- [8] 任荔荔, 彭彩云, 刘波, 等. 气调处理技术在植物检疫中应用的研究进展[J]. 植物检疫, 2019, 33(5): 1—5.
- [9] RISTAINO J B, THOMAS W. Agriculture, methyl bromide, and the ozone hole: can we fill the gaps [J]. Plant Disease, 1997, 81 (9): 964—977.
- [10] UNEP. Report of the technology and economic assessment panel quarantine and preshipment task force-final report [R]. 2009.
- [11] BOND E J, MORSE P M. Joint action of methyl bromide and phosphine on *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. Journal of Stored Products Research, 1982, 18: 83—94.
- [12] LI Li, ZHANG Guangping, LI Baishu, et al. Postharvest treatment of mandarin fruit using a combination of methyl bromide and phosphine against *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) [J]. Pest Management Science, 2020, 76(5): 1938—1943.
- [13] 詹国平, 马晨, 刘海军, 等. 番石榴实蝇卵和幼虫的检疫辐照处理研究[J]. 植物检疫, 2019, 33(3): 33—38.
- [14] 周月, 李柏树, 王跃进, 等. 桔小实蝇热响应数学模型比较[J]. 植物检疫, 2011, 25 (3): 6—11.
- [15] 徐文雅. 磷化氢对黑腹果蝇靶酶的影响及其分子机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [16] 高明, 李丽, 李柏树, 等. 低温磷化氢熏蒸对进口山竹粉蚨杀灭效果及果实品质的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 57—62.
- [17] 高明, 李丽, 邹海洋, 等. 磷化氢低温熏蒸对出口油桃品质的影响[J]. 植物检疫, 2018, 32 (1): 70—74.
- [18] 李丽, 刘涛, 张凡华, 等. 溴甲烷熏蒸对山楂叶螨和桃蛀果蛾的毒力研究[J]. 植物检疫, 2012, 26(1): 6—9.
- [19] 李柏树, 李丽, 高明, 等. 溴甲烷熏蒸对几种柑橘果实储藏品质的影响[J]. 植物检疫, 2018, 32(5): 46—49.
- [20] 赵天泽, 高明, 张广平, 等. 磷化氢熏蒸对南洋臀纹粉蚨的杀灭效果和对进口菠萝品质的影响研究[J]. 植物检疫, 2019, 33 (2): 48—52.
- [21] ROBERTSON J, PREISLER H, RUSSELL R. POLO: a user's guide to Probit or logit analysis [M]. Petaluma, CA, USA: PoloPlus, 2007.
- [22] ARMSTRONG J W. Fruit fly disinfestation strategies beyond methyl bromide [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 1992, 20 (2): 181—193.
- [23] 曹阳, 宋翼, 孙冠英, 等. 磷化氢毒理学研究综述[J]. 郑州工程学院学报, 2002 (2): 84—89.
- [24] 张凡华, 刘涛, 李丽, 等. 溴甲烷熏蒸对不同苹果品种贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2011, 36 (10): 30—34.
- [25] SERAPIAN T, PRAKASH A. Comparative evaluation of the effect of methyl bromide fumigation and phytosanitary irradiation on the quality of fresh strawberries [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 201: 109—117.
- [26] THANG K, AU K, RAKOVSKI C, et al. Effect of phytosanitary irradiation and methyl bromide fumigation on the physical, sensory, and microbiological quality of blueberries and sweet cherries [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016: 4382—4389.
- [27] ABDI N, MIZRAHI Y. Effects of methyl bromide and storage time on postharvest behavior of three different cultivars of pitaya fruit [J]. Israel Journal of Plant Sciences, 2012, 60 (3): 319—324.
- [28] 张凡华, 刘涛, 李丽, 等. 溴甲烷熏蒸对不同苹果品种贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2011, 36(10): 30—34.
- [29] 刘涛, 张凡华, 李丽, 等. 脐橙携带桔小实蝇低温磷化氢检疫熏蒸技术研究[J]. 植物检疫, 2012, 26(6): 1—4.
- [30] 高雪, 张广平, 李丽, 等. 溴甲烷熏蒸对火龙果储藏品质的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 60—66.

(责任编辑: 田 喆)

(上接 265 页)

- [28] 张华, 任勇, 何员江, 等. 153 份四川小麦主推品种和后备品系抗病基因的分子检测[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(1): 26—35.
- [29] WELLINGS C R. *Puccinia striiformis* in Australia: a review of the incursion, evolution, and adaptation of stripe rust in the period 1979—2006 [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2007, 58(6): 567—575.
- [30] TKEIN K, CAT A, AKAN K, et al. A new virulent race of wheat stripe rust pathogen (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) on the resistance gene Yr5 in Turkey [J]. Plant Disease, 2021, 105(10): 3292.
- [31] NAGARAJAN S, NAYAR S K, BAHADUR P. Race 13 (67S8) of *Puccinia striiformis* virulent on *Triticum spelta* var. *album* in India [J]. Plant Disease, 1986, 70: 173.
- [32] ZHANG Gensheng, ZHAO Yuanyuan, KANG Zhensheng, et al. First report of a *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* race virulent to wheat stripe rust resistance gene Yr5 in China [J]. Plant Disease, 2020, 104(1): 284.
- [33] WANG Yong, XIE Jingzhong, ZHANG Huaizhi, et al. Mapping stripe rust resistance gene YrZH22 in Chinese wheat cultivar Zhoumai 22 by bulked segregant RNA-Seq (BSR-Seq) and comparative genomics analyses [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2017, 130: 2191—2201.
- [34] 习玲, 王昱琦, 朱微, 等. 78 份四川小麦育成品种(系)条锈病抗性鉴定与抗条锈病基因分子检测[J]. 作物学报, 2021, 47 (7): 1309—1323.

(责任编辑: 田 喆)