

甘肃陇南越夏区小麦抗条锈病育种研究进展

曹世勤^{1, 2, 3}, 贾秋珍^{2, 3, 4}, 鲁清林¹, 张耀辉⁵, 张 勃^{2, 3, 4}, 孙振宇^{2, 3, 4}, 白 斌¹,
黄 瑾^{2, 3, 4}, 王万军⁵

(1. 甘肃省农业科学院小麦研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 农业农村部天水作物有害生物野外科学观测实验站, 甘肃 甘谷 741200; 3. 农业农村部国家植物保护甘谷观测实验站, 甘肃 甘谷 741200; 4. 甘肃省农业科学院植物保护研究所, 甘肃 兰州 730070; 5. 天水市农业科学研究所, 甘肃 天水 741200)

摘要: 甘肃陇南是中国小麦条锈菌最大、最重要的越夏区, 条锈病是发生于该区域小麦生产上最主要的病害, 持续不断的培育和种植抗病品种是防治该病最绿色、经济的措施。为了持续控制该区域的条锈病、保障粮食安全, 总结了自 1995 年以来甘肃陇南小麦抗条锈病育种成效, 分析了存在的问题, 提出了强化优异抗条锈病种质资源材料的评价、挖掘、创新与利用; 强化生物育种技术的应用; 强化抗病品种(基因)布局等建议。

关键词: 小麦条锈病; 抗病育种; 陇南越夏区; 进展

中图分类号: S435.121.42

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2022)02-0104-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2022.02.002

Advances on Wheat Stripe Rust-resistant Breeding in Over-summering Region of Southern Gansu Province

CAO Shiqin^{1, 2, 3}, JIA Qiuzhen^{2, 3, 4}, LU Qinglin¹, ZHANG Yaohui⁵, ZHANG Bo^{2, 3, 4}, SUN Zhenyu^{2, 3, 4}, BAI Bin¹,
HUANG Jin^{2, 3, 4}, WANG Wanjun⁵

(1. Wheat Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Scientific Observing and Experimental Station of Crop Pests in Tianshui, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Gangu Gansu 741200, China; 3. National Agricultural Experimental Station for Plant Protection at Gangu, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Gangu Gansu 741200, China; 4. Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 5. Tianshui Agricultural Sciences Institute, Gangu Gansu 741200, China)

Abstract: Southern Gansu is the biggest and the most important over-summering region for *Puccinia striiformis* f.sp. *tritici* (*Pst*) in China, wheat stripe rust is one of the most important foliar diseases on wheat in this region. Breeding and planting resistant wheat varieties is one of the most green, economical methods to control wheat stripe rust in the field. To contribute to the sustained control of wheat stripe rust and to ensure food safety, wheat stripe rust-resistant breeding achievements in southern Gansu were summarized since 1995, current issues were analyzed, suggestions such as strengthening the evaluation, excavation, innovation and utilization of premium germplasm resources with resistance to stripe rust, strengthening the application of biological breeding technology, and strengthening the distribution of disease resistant varieties (genes) were put forward.

Key words: Wheat stripe rust; Disease-resistant breeding; Over-summering region of Southern Gansu Province; Advance

甘肃陇南条锈菌越夏区是条锈西北越夏区重要的组成部分^[1], 是中国小麦条锈病常发变异区和条锈菌新小种的策源地^[1-5]。在甘肃省内, 陇南越夏区主要包括天水市、陇南市、平凉市静宁县

和庄浪县、甘南州舟曲县及定西市、临夏州^[6]。20 世纪 80 年代以来, 由于以洛夫林 10 和洛夫林 13 为代表的洛夫林系、以绵阳 11 为代表的繁 6 绵阳系、92R178 为代表的南农 92R 系及贵农 21 和

收稿日期: 2022-08-16

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1401004-02、2021YFD1401001-08); 国家自然科学基金(31860484); 甘肃省农业科学院生物育种专项(2022GAAS006); 金城科普专家曹世勤研究员工作室。

作者简介: 曹世勤(1971—), 男, 甘肃临洮人, 研究员, 博士, 主要从事小麦主要病虫害综合防控技术研究。Email: caoshiqin6702@163.com。

通信作者: 贾秋珍(1963—), 女, 陕西大荔人, 研究员, 主要从事小麦条锈病研究。Email: jiaqiuzhen@163.com。

贵农 22 为代表的贵农系等骨干亲本材料先后在甘肃陇南越夏区的过度利用,使得这些亲本材料及其衍生系品种的田间抗条锈病性先后丧失而失去利用价值,导致小麦条锈病在甘肃陇南越夏区及全国范围内的大范围发生流行,造成严重的产量和经济损失,其中 1950、1964、1990、2002、2017 年的 5 次大流行,产量损失超过 137 亿 kg^[7-12]。在该区域培育和种植抗病品种,不仅是持续控制小麦条锈病最经济有效且有利于环境保护的措施,更是功在当地、利在全国。我们在总结自 1995 年以来甘肃陇南越夏区小麦抗条锈病育种成效的基础上,提出了存在的问题和下一步建议,旨在为科学指导该区域小麦抗条锈病育种及条锈病的持续控制打下良好的理论和实践基础。

1 小麦抗条锈病育种成效

1.1 小麦种质资源筛选及评价卓有成效

病菌毒性变异是引致品种抗病性丧失的主要原因^[1,5]。自 20 世纪 50 年代至今,由于以条锈菌 CYR1、CYR10、CYR18、CYR25、CYR28、CYR29、CYR32、CYR33、CYR34 等为代表的主要小种的不断消长和流行,使得国内已进行了 8 次大规模的品种更替^[5]。中国农业科学院植物保护研究所、西北农林科技大学、中国农业大学及甘肃省农业科学院等国内及省内长期从事小麦抗条锈病育种、防控的研究单位和科技人员,长期以陇南越夏区的甘谷试验站、清水试验站、中梁试验站、汪川良种场为基地,开展小麦抗条锈种质资源鉴定、监测、筛选与评价。据统计,自 1995 年以来,学者先后对近 20 000 余份国内外小麦种质资源材料采用接种鉴定与自然诱发相结合的方法,进行了成株期抗条锈病性评价,明确了供试材料的抗条锈病性特点,筛选出了以南农 92R、贵农 21、贵农 22、贵农 775、94 异 15、红挑头、贵协 3、XK18、白大头、阉掉尾、矮抗 58、周 8425B、三属麦 3 号及德国 2 号、99TUR246、Longbow、CMS494-2、Flinor、Pascal、EUREKA、Holdfast、Flanders、FENMAN 为代表的诸多抗条锈性表现优异的国内外种质资源材料^[13-21]。其中甘肃省农业科学院小麦研究所杜久元等^[21]、周祥椿等^[22]对从意大利、土耳其、美国等地以及 CIM-MYT 引进的国内外材料,在陇南越夏区的清水试

验站进行了连续多年的成株期抗条锈病性评价,明确了 *T. Spelta album*(Yr5)、PI178383(Yr10)、Mega(Yr12)、Maris Huntsman(Yr13)、Dippes Triumph(Yr15)、Selkirk(Yr27)等已知基因载体品种和其他国内外供试材料抗条锈病性特点,建立了国内最齐全的小麦抗条锈病基因库,为实现陇南越夏区抗病基因布局和条锈病的持续控制奠定了良好基础。

1.2 育成诸多抗病性优异品种

以甘肃省农业科学院小麦研究所和甘肃省农业科学院植物保护研究所、天水市农业科学研究所、陇南市农业科学研究所为代表的甘肃陇南越夏区相关育种单位,针对自身所处生态环境条件实际和抗条锈病这个主要育种目标,用筛选出的优异材料为骨干亲本,先后育成了对条锈菌主要流行小种如 CYR25、CYR29、CYR31 及 CYR32、CYR33、CYR34 抗条锈性表现优异、且具有不同基因背景,在生产上发挥重要作用的品种材料,如兰天 1 号、兰天 10 号、兰天 17 号、天选 15 号、天选 40 号、天选 43 号、中梁 17 号、中梁 22 号、中梁 27 号、武都 16 号、武都 18 号及斯汤佩里、咸农 4 号、清农 1 号、清山 843 等。特别是近年来育成的抗病品种兰天 19 号、兰天 26 号、兰天 36 号、兰天 538、兰航选 122、天选 65 号、天选 70 号、中梁 34 号、中梁 38 号、中植 7 号、中植 16 号等在陇南越夏区广泛种植,使甘肃省小麦条锈病自 2002 年以后多为中度及中度偏轻发生年,为中国小麦条锈病的持续控制、保障粮食安全发挥了重要作用。

2020 年,甘肃省农业科学院植物保护研究所锈病研究团队在甘谷试验站和汪川良种场,对收集到的 58 个当前在陇南越夏区种植的小麦生产品种,采用人工接种诱发与自然诱发相结合的方法进行了成株期抗条锈病性评价。结果发现,在甘谷试验站,有 31、1、26 个品种分别表现抗病、中感、慢锈,分别占 53.45%、1.72%、44.83%;在汪川良种场,有 26、1、31 个品种分别表现抗病、中感、慢锈,分别占 44.83%、1.72%、53.45%;有 26、1、31 个品种在两地分别表现抗病、中感、慢锈,分别占 44.83%、1.72%、53.45%(表 1)。

1.3 育种技术多样化

纵观生物育种技术发展,全球已经历了原始

表 1 2020 年 58 个生产品种在陇南越夏区的抗条锈病性表现

序号	品种名称	来源	组合	甘谷试验站		汪川良种场	
				病情 ^①	抗病性评价 ^②	病情	抗病性评价
1	兰天 19 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	Mega/兰天 10 号	3/10/70	SR	3/10/100	SR
2	兰天 23 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	SXAF4-7/87-121	1-2/10/10	MR	3/10/30	SR
3	兰天 26 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	Flanders/兰天 10 号	2/10/40	MR	2/10/60	MR
4	兰天 28 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	西峰 20/保丰 20	3/10/100	SR	3/10/70	SR
5	兰天 31 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	Long Bow/兰天 10 号	0	IM	0	IM
6	兰天 32 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	兰天 16 号/陇原 031	2/10/20	MR	3/10/40	SR
7	兰天 33 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	兰天 23 号/周 92031	0	IM	0	IM
8	兰天 34 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	兰天 23/周 9203	0	IM	0	IM
9	兰天 35 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	兰天 25 号/周麦 11 号	0	IM	0	IM
10	兰天 36 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	周麦 17/兰天 23 号	0	IM	0	IM
11	兰天 39 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	兰天 33 号/济麦 22 号	3/20/100	SR	3/10/80	SR
12	兰天 40 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	兰天 30 号/济麦 22 号	3/20/100	SR	3/10/40	SR
13	兰天 42 号	甘肃省农业科学院小麦研究所	兰天 33 号/矮抗 58	0	IM	3/10/10	SR
14	兰航选 121	甘肃省农业科学院小麦研究所	兰天 10 号航天诱变	3/10/30	SR	3/10/20	SR
15	兰航选 151	甘肃省农业科学院小麦研究所	89-27 航天诱变	0	IM	0	IM
16	兰天 131	甘肃省农业科学院小麦研究所	Dippes Triumph/兰天 10 号//兰天 21 号	2/10/10	MR	2/10/20	MR
17	兰天 132	甘肃省农业科学院小麦研究所	00-30-3-2/兰天 15 号	2/10/10	MR	0	IM
18	兰天 538	甘肃省农业科学院小麦研究所	T.Spelta Ablum/兰天 10 号//兰天 10 号//兰天 20 号	0	IM	0	IM
19	兰天 575	甘肃省农业科学院小麦研究所	兰天 19 号/陇原 931	0	IM	0	IM
20	兰天 653	甘肃省农业科学院小麦研究所	96-18-1-3-2-1/兰天 26 号	0	IM	0	IM
21	天选 54 号	天水市农业科学研究所	温麦 8 号/9157-3-2-2-1	2/10/10	MR	2/10/10	MR
22	天选 55 号	天水市农业科学研究所	9589-8-1-2-1/95-111	3/10/100	SR	3/20/100	SR
23	天选 62 号	天水市农业科学研究所	RAH122/天 882//绵 89-41/89-181	3/10/30	SR	3/10/40	SR
24	天选 63 号	天水市农业科学研究所	周麦 11/9595-3-1	3/10/20	SR	3/10/50	SR
25	天选 65 号	天水市农业科学研究所	温麦 8 号/96c1-1	0	IM	0	IM
26	天选 66 号	天水市农业科学研究所	S98514-1-2/贵 35 选 19	0	IM	0	IM
27	天选 68 号	天水市农业科学研究所	贵 35 选 19-1/9089①-1-2-2-C1	2/10/20	MR	3/10/30	SR
28	天选 70 号	天水市农业科学研究所	天 96C1-1/小黑 8X	0	IM	2/10/50	MR
29	中梁 32 号	天水市农业科学研究所	中 4, 90293, 中梁 12, 保加利亚 10, 咸农 4 号	3/10/40	SR	3/20/80	SR
30	中梁 33 号	天水市农业科学研究所	Holdfast/中梁 22 号	3/10/50	SR	2/10/80	MR
31	中梁 34 号	天水市农业科学研究所	兰天 19 号/07709	0	IM	0	IM
32	中梁 35 号	天水市农业科学研究所	249-250/08T021//兰天 27	0	IM	0	IM
33	中梁 38 号	天水市农业科学研究所	周麦 22 号/兰天 26	0	IM	0	IM
34	中梁 41 号	天水市农业科学研究所	TW00-2864/04134//兰天 19 号	0	IM	0	IM
35	中梁 42 号	天水市农业科学研究所	白芒麦//04H668/天选 50 号//兰天 19 号	0	IM	0	IM
36	武都 21 号	陇南市农业科学研究所	97-4-6-2-1-3/引 11-12	3/10/100	SR	3/20/100	SR
37	武都 22 号	陇南市农业科学研究所	90-855/8760-13-6	3/20/100	SR	3/20/100	SR
38	武都 23 号	陇南市农业科学研究所	引 11/98t-23-101	3/10/100	SR	3/20/100	SR
39	中植 6 号	中国农业科学院植物保护研究所	中植 1 号/豫麦 58	3/10/100	SR	3/20/100	SR
40	中植 7 号	中国农业科学院植物保护研究所	温麦 8 号//遗选/中植 1 号	0	IM	3/10/20	SR
41	中植 16 号	中国农业科学院植物保护研究所	温麦 8 号/攀 91045//Cp20-29-2	0	IM	0	IM
42	中植 19 号	中国农业科学院植物保护研究所	温麦 8 号//攀 91045/Pagoda	0	IM	0	IM
43	陇鉴 9825	中国农业科学院植物保护研究所	8924-6/兰天 13 号//Pascal	2/10/20	MR	3/10/20	SR
44	陇鉴 9828	甘肃省农业科学院植物保护研究所	8654-1/兰天 15 号	0	IM	0	IM
45	兰大 211	兰州大学	06-18-1-3-2-1/00-30-3-2	3/10/30	SR	3/10/40	SR
46	兰大 182	兰州大学、甘肃省农科院小麦所	89-27 航天诱变	3/10/20	SR	3/10/10	SR
47	成丰 2 号	成县种子站	斯汤佩里/9517	3/10/40	SR	2/10/50	MR
48	临农 3D17	临洮农业学校	2D27/S015	3/10/100	SR	3/20/100	SR
49	甘农冬 1 号	甘肃农业大学	台湾 1 号/豫麦 14 号//贵农 775	3/20/100	SR	3/10/100	SR
50	陇选 1 号	陇西县种子站	中梁 31 号变异单株系选	3/40/100	MS	3/40/100	MS

续表 1

序号	品种名称	来源	组合	甘谷试验站		汪川良种场	
				病情 ^①	抗病性评价 ^②	病情	抗病性评价
51	陇中 3 号	定西市农业科学研究院	D5815-5/60077-6-0	3/10/100	SR	3/20/100	SR
52	陇中 4 号	定西市农业科学研究院	200616+偃麦草 DNA	2/10/40	MR	3/10/20	SR
53	陇中 5 号	定西市农业科学研究院	200616+偃麦草 DNA	3/10/40	SR	3/10/10	SR
54	陇中 6 号	定西市农业科学研究院	9767-1-1-3+米高梁 DNA	3/10/20	SR	3/10/10	SR
55	静宁 12 号	静宁县种子站	2001-8/山农 BD166	3/10/20	SR	3/10/40	SR
56	静宁 13 号	静宁县种子站	静宁 10 号/V8448	3/10/100	SR	3/20/100	SR
57	庄浪 12 号	庄浪县农技中心	早大穗/92 品 18	3/10/90	SR	3/20/100	SR
58	庄浪 13 号	庄浪县农技中心	兰天 15 号/豫麦 53	3/10/40	SR	3/10/100	SR

①病情: 反应型/严重度(%)/普遍率(%). ②抗病性评价: IM 为免疫, HR 为高抗, MR 为中抗, MS 为中感, SR 为慢锈。

驯化选育(1.0版)、常规育种(2.0版)、分子育种(3.0版)三个主要阶段^[23]。分析陇南越夏区育成品种, 育种技术有 1.0 版的单株变异育成品种陇选 1 号, 有 2.0 版的常规杂交育成品种兰天 36 号等, 有 2.0 升级版的航天诱变技术育成品种兰航选 121 等, 有利用外源 DNA 花粉管导入技术育成品种陇中 4 号等, 更有分子聚合育成品种兰天 132 等。育种技术丰富多样, 代表了当前国内外小麦育种技术发展的方向。

2 存在的问题

2.1 具有苗期抗病特点的品种少

陇南越夏区在中国小麦条锈病流行体系中的作用之所以重要, 就是由于自身可越冬越夏, 完成周年循环; 同时在秋苗期向冬季繁殖区传播大量菌源, 春季向青海、宁夏等春季流行区传播菌源, 为条锈病流行的“心脏”地带^[1-2]。在该区域种植抗病品种, 特别是苗期抗病品种, 对保障降低冬季繁殖区菌源量, 进而降低翌年春季流行区发生程度具有重要的作用。研究发现, 尽管陇南品种具有成株抗性特点, 但具有苗期抗性的仍相对较少。甘肃省农业科学院植物保护研究所锈病研究团队于 2022 年春季对 212 份甘肃省小麦品种材料进行了苗期接种鉴定, 结果对 CYR34、CYR32 及混合菌均表现抗病的有中梁 34 号等 15 份材料, 仅占 7.08%, 表明具有苗期抗性材料数量少, 这也与前期研究基本一致^[18, 24-25]。从目前已定名的 83 个已知抗条锈基因的抗条锈病性特点看, 虽然有 Yr1 等 56 个具有苗期抗性特点, 但对当前主要流行的小种 CYR34 和 CYR32 表现抗病的仅有 Yr5、Yr15 等极少数已定名基因和 YrBJ399 等未定名基因^[26], 绝大多数基因表现感病, 具有

苗期抗条锈病的基因仍然十分匮乏, 这是制约陇南越夏区抗病育种的“卡脖子”技术。

2.2 骨干亲本过度利用现象突出

分析自 20 世纪 50 年代以来甘肃省及全国主要流行小种 CYR1、CYR10、CYR17、CYR18、CYR25、CYR29、CYR31、CYR32、CYR33、CYR34 演替及骨干亲本和主要生产品种抗条锈病性丧失原因, 无不是骨干亲本的大范围利用造成主要流行小种哺育面积大所致^[1, 3, 6, 8, 27-38]。自 2010 年以来, 以周 8425B、周麦 22 等为代表周麦系材料已成为继南农 92R 后的又一批热门抗原。目前在陇南越夏区推广应用的兰天系、中梁系、天选系育成品种中, 已有中梁 38 号、天选 60 号、兰天 36 号、兰天 43 号等多个品种含有周麦系血缘(表 1)。国内相关育种单位也相继培育出并已在生产上得到广泛应用的有周麦 28、存麦 8 号、新麦 36、天民 304 等上百个品种^[39-42]。这些含有抗条锈基因 YrZH22、YrZH84 的品种在条锈菌越夏区、冬季繁殖区及春季流行区的广泛应用, 必将会给条锈菌新菌系的产生、哺育、繁殖和蔓延带来极大便利, 特别是在甘肃陇南这个条锈菌常发易变区, 更是如此。条锈菌新毒性菌系/小种的持续产生及抗原材料和生产品种抗病性丧失的不断更替, 其中的教训值得深思和借鉴。

2.3 育种技术仍相对单一

对 58 个育成品种的育种技术进行初步分析(图 1)发现, 有 49 个品种通过常规杂交系统选育而成, 占 84.48%; 利用外源 DNA 花粉管导入、航天诱变和基因聚合技术育成品种有陇中 3 号、兰航选 151、兰天 132 等 8 个, 仅占 13.79%; 基因聚合育成品种仅有兰天 131 和兰天 132, 占 3.45%。尽管从抗

锈性的角度讲，陇南越夏区育成品种的抗条锈性要远远高于国内其他区域，但与国内及国际育种技术潮流尚有较大差距，是当前陇南越夏区育种单位面临的实际，亟须改进和提高。

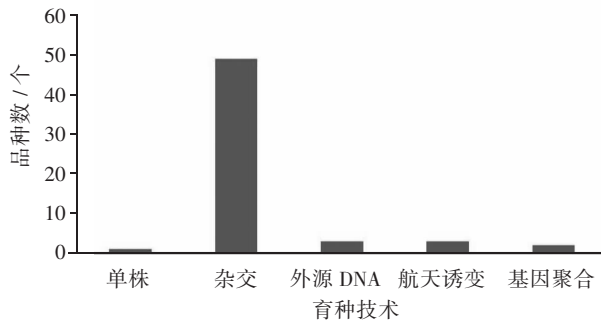


图 1 部分品种育种技术分析

3 建议

3.1 强化优异抗条锈病种质资源材料的评价、挖掘、创新与利用

谢水仙等^[43]认为，甘肃陇南越夏区小麦条锈菌群体多样性丰富，是条锈菌毒性基因库，其主要原因是条锈菌可周年循环、有性生殖的转主寄主小檗广泛分布^[1,4,5]。开展多年、多点自然诱发鉴定与人工接种鉴定结果相结合，才有望准确评价品种的抗病性特点并获得理想的结果^[11,12,21-22]。与此同时，条锈菌新菌系不断出现，需要持续进行优异材料的挖掘、鉴定和评价，探明其抗条锈病性特点，才能更好地指导陇南越夏区抗病育种和生产实践。在该区域进行小麦条锈病研究，是一项长期而艰巨的工作，需要一代代人不断接续努力。

从近年来小麦抗条锈病种质资源的评价与利用看，农家品种具备了对当地自然生态条件较强的适应性和与之相对应的生产潜力，其中可能潜藏某些特殊的、育成品种所缺乏的、具有重要经济价值的优良基因^[44-45]，含有丰富的抗病基因资源^[46-47]，是未来挖掘和利用的重点。小麦近缘属中也含有诸多优异基因。目前的 83 个已定名和诸多未定名抗条锈基因中，分别有 23 个和 21 个来自小麦近缘属植物。其中来自斯卑尔脱小麦 (*T. spelta album*) 的有 Yr5，硬粒小麦 (*T. durum*) 的有 Yr7、Yr24、Yr53、Yr56、Yr64 和 Yr65，簇毛麦 (*Ha. villosa*) 的有 Yr26 和 YrV1、YrHV、YrWV、YrV3，黑麦 (*Secale cereal*) 的有 Yr9、Yr83 和 YrM8003，野生二粒小麦 (*T. Dicoccoides*) 的有 Yr15、

Yr35 和 Yr36，顶芒山羊草 (*Ae. neglecta*) 的有 Yr8，偏凸山羊草 (*Ae. Ventricosa*) 的有 Yr17，粗山羊草 (*Ae. Tauschii*) Yr28，果山羊草 (*Ae. Kotschy*) 的有 Yr37，沙融山羊草 (*Ae. Sharonensis*) 的有 Yr38，卵穗山羊草 (*Ae. geniculata*) 的有 Yr40，三芒山羊草 (*Ae. Neglecta*) 的有 Yr42，伞穗山羊草 (*Ae. Umbellulata*) 的有 Yr70，中间偃麦草 (*Th. intermedium*) 的有 Yr50、YrZhong22、YrCH5383、YrL693 和 YrCH5026，长穗偃麦草 (*Th. ponticum*) 的有 Yr69，柔软滨麦草 (*Elymus mllis*) 的有 YrElm4、YrLm2、YrM97、YrM852 和 YrElm，华山新麦草 (*Ps.huashanica*) 的有 YrHua、YrHy、YrH122、YrH9014、YrH9020a、YrHual、YrHua9020、YrHu^[48]。需要注意的是，小麦近缘属材料农艺性状相对较差，配合力低，直接利用较为困难，唯有育种家与植物病理学者密切合作，结合生物育种技术，通过回交手段或通过染色体工程技术，克服生殖隔离、聚合野生优异资源，创制二线抗原，持续解决种质资源匮乏的“卡脖子”技术和育种之需。

3.2 强化生物育种技术的应用

近年来，随着分子生物学、计算生物学和基因组学等学科的发展催生了新型生物技术(如新一代测序、基因组编辑、单倍体制种等)，进一步推动了育种技术向分子设计育种或智能化育种(4.0 版)的发展^[22]。生物育种是集各种前沿技术大成，随着组学、系统生物学、合成生物学和计算生物学等前沿科学交叉融合应用而生的现代生物育种技术。其中全基因组选择、基因编辑和合成生物技术最具代表性。全基因组选择技术能够在个体全基因组水平上对其育种值进行评估，大幅度提高育种效率；基因编辑技术为快速精准改良重要性状提供了强大的技术工具；合成生物技术采用工程学的模块化概念和系统设计理论，改造和优化现有自然生物体系，或者从头合成具有预定功能的全新人工生物体系^[49]。

分子设计育种是育种技术 4.0 版，是基于合成生物学和系统生物学理论，设计分子途径获得优良目标性状作物的前沿育种技术^[22]。以甘肃省农业科学院小麦研究所为代表的省内小麦育种单位，在明确其对当前条锈菌主要流行小种 CYR34、CYR32 及新菌系 ZS 系抗病性的前提下，利用 SNP 技术结

合 GWAS 分析和 KASP 平台, 进行优异材料抗条锈病基因的快速挖掘、基因聚合和分子标记辅助育种。甘肃省农业科学院小麦研究所白斌研究员团队也正是基于此思路, 以自育慢条锈材料 92-47 为试材, 先后聚合了抗条锈病基因 Yr30、Yr15、Yr17、YrZH84, 育成新品种兰天 132(Yr9+Yr17+Yr30+YrZH84)、兰天 133(Yr9+Yr30+YrZH84)等, 创制出一批含有 Yr30 及未知抗病基因的新种质。下一步, 将与 1 年 4 代快速繁育体系相结合, 将闭环实现小麦分子设计快速育种途径, 努力使甘肃省小麦分子育种尽快由理论变为实践。

3.3 强化抗病品种(基因)布局

鉴于陇南越夏区是中国小麦条锈病流行体系中“源头”的实际, 持续不断开展抗锈育种, 当好保障全国粮食安全的“卫士”, 是陇南小麦条锈病持续控制的前提和基础。要树牢全国一盘棋思想, 加强各单位间的密切协作, 按照“指令性、指导性、区域性、多样性、开放性、长远性”的原则^[48, 50], 逐步构建小麦条锈病不同流行区互不重叠的遗传屏障。基于此, 陇南越夏区在抗原(基因)利用方面, 山区(海拔 1 500 m 以上)和川区(海拔 1 500 m 以下)坚决杜绝使用相同的抗原(基因), 建立山上山下两道防线; 在冬小麦种植区的陇南市、天水市和冬春麦混作区的定西市、临夏州, 使用不同的抗原(基因)。在育成品种推广应用方面, 坚决杜绝越夏区、冬季繁殖区间品种混用, 川区、山区育成品种严禁混种。长此以往, 逐步降低陇南越夏区条锈病菌群体毒性选择的步伐, 延长抗病品种使用年限, 实现甘肃小麦条锈病的持续控制、保障黄淮海麦区小麦安全生产的目标, 助力小麦产业绿色高质量发展。

参考文献:

- [1] 李振岐, 曾士迈. 中国小麦锈病[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [2] 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.
- [3] WAN A M, ZHAO Z H, CHEN X M, et al. Wheat stripe rust epidemic and virulence of *Puccinia striiformis* f.sp. *tritici* in China in 2002[J]. *Plant Disease*, 2004, 88: 896-904.
- [4] 刘尧, 陈晓云, 马云, 等. 甘肃陇南感病小穗在小麦条锈病发生中起提供(初始)菌源作用的直接证据[J]. 植物病理学报, 2021, 51(3): 366-380.
- [5] 韩德俊, 康振生. 中国小麦品种抗条锈病现状及存在问题与对策[J]. 植物保护, 2018, 44(5): 1-12.
- [6] 曹世勤, 金社林, 段霞瑜, 等. 甘肃中部麦区小麦条锈病菌越冬调查及品种抗性变异监测结果初报[J]. 植物保护, 2011, 37(3): 133-138.
- [7] 黄冲, 姜玉英, 李佩玲, 等. 2017 年我国小麦条锈病流行特点及重发原因分析[J]. 植物保护, 2017, 43(2): 162-166.
- [8] 康振生, 李振岐, 商鸿生, 等. 绵阳系统小麦条锈菌新菌系的发现[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1994, 22(3): 7-11.
- [9] 汪可宁, 洪锡午, 吴立人, 等. 1951—1983 年我国小麦品种抗条锈性变异分析[J]. 植物保护学报, 1986, 13(2): 117-124.
- [10] 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.
- [11] 曹世勤, 贾秋珍, 孙振宇, 等. 贵农系列小麦种质资源在甘肃陇南的抗条锈病研究[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(4): 1048-1053.
- [12] 曹世勤, 贾秋珍, 孙振宇, 等. 南农 92R 系列小麦种质在甘肃陇南的条锈病和白粉病抗性表现及其利用价值[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(8): 1008-1014.
- [13] 韩德俊, 王琪琳, 张立, 等. “西北-华北-长江中下游”条锈病流行区系当前小麦品种(系)抗条锈病性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2289-2896.
- [14] 焦韩轩, 孙晓媛, 黄硕, 等. 土耳其小麦种质条锈病抗性评价和抗病基因分析[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(7): 799-805.
- [15] 翟雪婷, 赵池铭, 汪军成, 等. 251 份欧洲冬小麦成株期抗条锈病鉴定及抗条锈病基因检测[J]. 山西农业科学, 2021, 49(12): 1444-1452.
- [16] 黄苗苗, 孙振宇, 曹世勤, 等. 223 份小麦农家品种田间抗条锈病性评价及抗病基因分子检测[J]. 植物保护学报, 2018, 45(1): 90-100.
- [17] 王万军, 曹世勤, 王小明, 等. 86 份贵协系小麦种质资源对条锈病的抗病性评价[J]. 植物保护, 2016, 41(2): 198-203.
- [18] 曹世勤, 王小明, 贾秋珍, 等. 2003—2013 年小麦品种(系)抗条锈性鉴定及评价[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(2): 253-260.
- [19] 张二喜, 李金昌, 吕莉莉. 小麦地方品种资源对条锈病的抗性鉴定及评价[J]. 甘肃农业科技, 2006(7): 9-12.
- [20] 韩德俊, 张培禹, 王琪琳, 等. 1980 份小麦地方品种和国外种质抗条锈性鉴定与评价[J]. 中国农业科学, 2012, 45(24): 5013-5023.
- [21] 杜久元, 鲁清林, 周刚. 引进国外小麦种质资源

- 抗条锈性鉴定及其利用价值评价[J]. 植物保护, 2006, 32(1): 83-85.
- [22] 周祥椿, 杜久元, 鲁清林. 小麦条锈病抗原材料筛选和抗条锈基因库组建研究[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(1): 6-12.
- [23] 种康, 李家洋. 植物科学发展催生新一轮育种技术革命[J]. 中国科学, 2021, 51(10): 1353-1355.
- [24] 曹世勤, 张勃, 李明菊, 等. 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[J]. 作物学报, 2011, 37(8): 1360-1371.
- [25] CAO S Q, FENG J, HUANG J, et al. Identification of seedling resistance genes to stripe rust and analysis of adult plant resistance in 82 wheat cultivars from Gansu province in China[J]. *International Journal of Agricultural & Biology*, 2017, DOI: 10.17957/IJAB/15.0318.
- [26] 周喜旺, 刘鸿燕, 王娜, 等. 小麦种质资源 BJ399 抗条锈病基因的分子标记定位[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(8): 325-331.
- [27] 贾秋珍, 金社林, 曹世勤. 1998—1999 年甘肃省小麦条锈菌生理小种变异监测结果[J]. 甘肃农业科技, 2001(1): 37-39.
- [28] 贾秋珍, 金社林, 曹世勤, 等. 2000—2001 年甘肃省小麦条锈菌生理小种监测结果[J]. 甘肃农业科技, 2003(1): 48-51.
- [29] 贾秋珍, 金社林, 曹世勤, 等. 2002—2003 年甘肃省小麦条锈菌生理小种监测结果[J]. 植物保护, 2005, 31(2): 44-47.
- [30] 贾秋珍, 金社林, 曹世勤, 等. 2006—2007 年甘肃省小麦条锈菌生理小种监测结果[J]. 植物保护, 2009, 35(5): 105-108.
- [31] 贾秋珍, 金社林, 曹世勤, 等. 2008—2009 年甘肃省小麦条锈菌生理小种监测结果[J]. 植物保护, 2011, 37(4): 130-133.
- [32] 黄瑾, 贾秋珍, 金社林, 等. 2010—2012 年甘肃省小麦条锈菌生理小种监测结果[J]. 植物保护, 2014, 40(3): 101-105.
- [33] 贾秋珍, 曹世勤, 黄瑾, 等. 2013—2016 年甘肃省小麦条锈菌生理小种变异监测[J]. 植物保护, 2018, 44(6): 162-167.
- [34] 贾秋珍, 曹世勤, 王晓明, 等. 2017 年—2018 年甘肃省小麦条锈菌生理小种变异监测[J]. 植物保护, 2021, 47(2): 214-218.
- [35] CHEN W Q, WELLINGS C, CHEN X M, et al. Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*[J]. *Molecular Plant Pathology*, 2014, 15(5): 433-446.
- [36] 汪可宁, 洪锡午, 吴立人, 等. 1951—1983 年我国小麦品种抗条锈性变异分析[J]. 植物保护学报, 1986, 13(2): 117-124.
- [37] 康振生, 王晓杰, 赵杰, 等. 小麦条锈菌致病性及其变异研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3439-3453.
- [38] 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.
- [39] LI Z F, ZHENG T C, HE Z H, et al. Molecular tagging of stripe rust resistance gene YrZH84 in Chinese wheat line Zhou 8425B[J]. *Theor Appl Genet*, 2006, 112: 1098-1103.
- [40] 高艳, 唐建卫, 邹少奎, 等. 小麦周麦 22 及其衍生品种的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(1): 38-49.
- [41] WANG Y, XIE J Z, ZHANG H Z, et al. Mapping stripe rust resistance gene YrZH22 in Chinese wheat cultivar Zhoumai 22 by Bulk segregant RNA-Seq (BSR-Seq) and comparative genomics analyses[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2017, 130(10): 2191-2201.
- [42] 殷贵鸿, 王建武, 闻伟镠, 等. 小麦抗条锈病基因 YrZH84 的 RGAP 标记及其应用[J]. 作物学报, 2009, 35(7): 1274-1285.
- [43] 谢水仙, 万安民, 张庆勤, 等. 小麦新资源对条锈病和白粉病的抗性鉴定[J]. 植物保护, 1997, 23(6): 3-5.
- [44] 沈裕琥, 王海庆, 杨天育, 等. 甘、青两省春小麦遗传多样性演变[J]. 西北植物学报, 2002, 22(4): 731-740.
- [45] PAYNE P I, NIGHTINGLE M A, KRATTIGER A F, et al. The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread making quality of British-grown wheat varieties[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1987, 40(1): 51-65.
- [46] 王吐虹, 郭青云, 蔺瑞明, 等. 中国 40 个小麦农家品种和甘肃南部 40 个生产品种抗条锈病基因推导[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3834-3847.
- [47] 代君丽, 刘珂, 牛永春, 等. 中国小麦地方品种抗条锈病基因推导[J]. 河南农业科学, 2010(12): 83-87.
- [48] 冯晶, 王凤涛, 蔺瑞明, 等. 小麦条锈病抗病遗传及菌源基地基因布局研究进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 263-275.
- [49] 林敏. 农业生物育种技术的发展历程及产业化对策[J]. 生物技术进展, 2021, 11(4): 405-417.
- [50] 鲁爱军. 天水市小麦条锈病春季流行特点及主要影响因子[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(5): 23-26.