

# 远缘杂交后代转育的小麦抗源材料抗病 及抗旱性研究

许 鑫<sup>1,2</sup>, 袁凤平<sup>1,2</sup>, 穆京妹<sup>1,2</sup>, 薛文波<sup>1,2</sup>, 王琪琳<sup>1,3</sup>, 吴建辉<sup>1,3</sup>,  
黄丽丽<sup>1,3</sup>, 康振生<sup>1,3</sup>, 韩德俊<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学植物保护学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 郑麦 9023 和豫麦 66 分别与野生二粒小麦和野燕麦远缘杂交后代进行杂交和回交, 经过 7 代筛选、鉴定, 获得了 20 个抗病性和农艺性状稳定的高代系。在陕西杨凌设置条锈菌流行小种(CYR32 和 CYR33)病圃, 在甘肃天水设置自然发病圃对筛选的小麦高代系进行异地抗病性鉴定, 同时对其进行分小种 CYR32、CYR33、CYR31 和 CH42 苗期鉴定; 分别选用 *Yr5*、*Yr9*、*Yr10*、*Yr15*、*Yr17*、*Yr18* 和 *Yr26* 等 7 个已知抗条锈病基因的分子标记进行基因检测; 对高代系进行萌发干旱胁迫试验, 从而对其抗旱性进行评价; 并调查其农艺性状并进行评价。抗病、抗旱和农艺性状调查结果显示: 参试的 20 个高代系中, 符合抗病耐旱且农艺性状较好, 可用于作为抗源亲本的高代系有 8 个分别是郑野-2、郑野-3、郑野-6、豫野-1、豫野-2、豫野-4、豫野-5、豫野-6。研究表明, 在抗病、耐旱综合性状优良育种目标指导下, 将郑麦 9023 和豫麦 66 作为基因累加的库容, 利用系谱选择法, 结合育种分子标记检测辅助选择, 可不断对品种郑麦 9023 和豫麦 66 进行改良与创新; 并且可依次对其抗病性、抗旱性、成熟期等农艺性状基因及来源不同的优良基因进行累加转育。

**关键词:** 小麦; 远缘杂交; 抗源转育; 抗条锈性; 抗旱性; 农艺性状

中图分类号: S332.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)05-0033-07

## Disease resistance and drought tolerance of wheat resistant sources derived from wide hybridization

XU Xin<sup>1,2</sup>, YUAN Feng-ping<sup>1,2</sup>, MU Jing-mei<sup>1,2</sup>, XUE Wen-bo<sup>1,2</sup>, WANG Qi-lin<sup>1,3</sup>, WU Jian-hui<sup>1,3</sup>,  
HUANG Li-li<sup>1,3</sup>, KANG Zhen-sheng<sup>1,3</sup>, HAN De-jun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
3. College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Twenty wheat advanced lines with stable disease resistance and agronomic traits were obtained by crossing and backcrossing between Zhengmai 9023 and Yumai 66 and the stable distant hybridization from wide hybridization of wild emmer and wild oats, respectively, after screening and identification seven times. wheat advanced lines were evaluated for the presence resistance in a field with two types of disease nursery respectively: one is artificial nursery inoculated with two prevalent races (CYR32 and CYR33) in Yangling, Shaanxi Province; the other is a natural infection of Pst in Tianshui, Gansu Province. Meanwhile, the seedlings of the cultivars were inoculated with the four races CYR32, CYR33, CYR31 and CH42 in the greenhouse, respectively. The resistance genes were postulated using molecular markers for *Yr5*, *Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr18* and *Yr26* in combination with resistance spectra. Germination drought stress experiment of wheat advanced lines was used to evaluate its drought resistance. The agronomic traits were investi-

收稿日期: 2013-10-05

基金项目: 国家基础研究“973”计划(2013CB127700); 国家小麦产业技术体系(CARS-3-1-11); 自然科学基金(31371924); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B07049)

作者简介: 许 鑫, E-mail: 1018840355@qq.com。

通信作者: 康振生, E-mail: kangzs@nwsuaf.edu.cn; 韩德俊, E-mail: handj@nwsuaf.edu.cn。

gated and evaluated. The results of disease resistance, drought resistance and agronomic characteristics showed that: Zhengye-2, Zhengye-3, Zhengye-6, Yuye-1, Yuye-2, Yuye-4, Yuye-5, Yuye-6 were the 8 of 20 wheat advanced lines in the experiment with good disease resistance, drought resistance and comprehensive characters, and could be used as parent resistance material. The results suggest that under the guidance of good disease resistance, drought tolerance and synthetical properties breeding goal, Zhengmai 9023 and Yumai 66 were used as gene accumulation capacity, combining pedigree selection method with molecular markers to assist selection breeding, in order to improve and innovate variety Zhengmai 9023 and Yumai 66.

**Keywords:** wheat; wide hybridization; incorporation of resistance into cultivar; resistance to stripe rust; drought tolerance; agronomic traits

小麦是世界三大粮食作物之一,它为人类提供了近 20%的口粮<sup>[1]</sup>。小麦的生产关系到国计民生,生物胁迫和非生物胁迫常常造成小麦产量损伤<sup>[1-2]</sup>。由条形柄锈菌(*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, *Pst*)引起的小麦条锈病是危害小麦生产的最主要的病害之一,流行年份可减产 20%~30%,严重田块甚至绝产<sup>[3-5]</sup>,给我国小麦生产带来重大损失。选育和应用抗病品种是控制小麦条锈病最安全经济有效且环境友好的措施。由于小麦条锈菌具有高度的与其寄主协调进化能力,抗锈品种在生产上大面积单一种植,常导致相应的新致病小种出现,使品种丧失抗性<sup>[3,6]</sup>。筛选、创制丰富的抗源材料是持续控制小麦条锈病的前提。利用远缘杂交,将野生物种优良的抗性基因资源导入普通小麦并转育新的抗源亲本,是有效开展小麦抗病育种的基础<sup>[7]</sup>。中国西北干旱、半干旱地区是受小麦条锈病危害最为严重的地区,也是控制条锈病大区流行最重要的地区,该区域小麦生产受条锈病和干旱双重危害。因此转育抗旱性优良的新型抗源对当地小麦育种具有重要意义。贵州大学张庆勤教授将野生二粒小麦与野燕麦进行远缘杂交,获得一系列后代材料,将其称之为“野二二燕”。由于野二二燕具有抗病、耐旱、适应性强等优点<sup>[8]</sup>,本试验前期利用野二二燕分别与普通小麦品种郑麦 9023 和豫麦 66 杂交和回交,经过 7 代筛选,获得了多个抗病性和农艺性状稳定的高代系。为方便阐述,根据亲本组合:郑麦 9023 与野二二燕杂交的高代系称之为“郑野”;豫麦 66 与野二二燕杂交的高代系称之为“豫野”。对高代系分别进行异地成株期抗病性鉴定和苗期分小种鉴定,同时对其进行已知抗条锈病基因的分子标记进行基因检测;并对高代系进行种子萌发抗旱性评价和农艺性状评价,以期转育获得抗旱性和农艺性状优良的抗源材料,为西北干旱、半干旱地区小麦育种提供优良亲本材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

植物材料为:野燕麦与二粒小麦远缘稳定杂交代后代材料“野二二燕”、小麦品种郑麦 9023 和豫麦 66 及其杂交后代筛选的 20 个高代系材料,以铭贤 169 为感病对照品种,以晋麦 47 和西农 418 为抗旱对照品种。条锈菌菌种分别为:当前流行小种条中 32 (CYR32)、条中 33 (CYR33) 和条中 31 (CYR31),以及近年产生的新致病类型川 42 (CH42),由西北农林科技大学植物病理研究所分离和保藏。

### 1.2 抗病表型鉴定

1.2.1 苗期鉴定 小麦苗期分小种抗条锈鉴定参照文献<sup>[9]</sup>方法,在西北农林科技大学植物病理研究所温室中进行。将供试材料分别接种 CH42、CYR31、CYR32 和 CYR33,以感病品种铭贤 169 为对照。接种后 15 d 左右,待感病对照充分发病时开始鉴定,此后每 3 d 重复鉴定 1 次,鉴定 3 次,按照 1~9 九级标准<sup>[10]</sup>记载反应型。

1.2.2 成株期鉴定 小麦成株期抗条锈鉴定在西北农林科技大学小麦病圃进行。每份供试材料种植两行(行长 100 cm,行距 25 cm),每隔 20 个品种种植两行小偃 22 做为感病指示品种,以感病品种铭贤 169 为诱发行。3 月中旬在田间接种 CYR32 和 CYR33 混合小种。分别在条锈病初发期、盛发期和终发期记载供试小麦材料顶三叶的抗病反应型和严重程度。参照文献<sup>[10]</sup>的方法,按 1~9 九级标准记载反应型(infection type, IT),以 0、1%、5%、10%、20%、40%、60%、80% 和 100% 九级标准记载严重度(severity, S)。

1.2.3 天水自然发病的田间鉴定 在甘肃省天水市平南镇万家村(北纬 34°27', 东经 105°56', 海拔 1 697 m)设置小麦条锈病自然发病圃,种植方式同上。于秋末冬初对秋苗进行苗期抗病性调查,翌年 5 月下旬至 6 月中旬,进行成株期抗条锈性鉴定,鉴

定标准同上。

1.3 抗病基因分子检测

用改良的 CTAB 法<sup>[11]</sup>提取幼叶 DNA,选用 Yr5、Yr9、Yr10、Yr15、Yr17、Yr18 和 Yr26 等 7 个基因已开发的标记进行分子检测(引物序列参见文献[12])。

1.4 小麦抗源抗旱性鉴定

1.4.1 种子萌发干旱胁迫试验 挑选饱满整齐的小麦籽粒,用 0.2% HgCl<sub>2</sub> 消毒后,于 25℃ 恒温光照培养箱中培养 24 h 至露白,挑选露白均匀一致的种子 50 粒均匀摆放在发芽床上(发芽床为灭菌的直径 9 cm,铺有 3 层滤纸的培养皿),分别加入 20 ml 蒸馏水或 5%、10%、15% 的 PEG - 6000 水溶液,重复 3 次。记录种子发芽数。发芽期间,以称重法补充蒸馏水,保持各处理浓度的相对稳定。在发芽 4 d 左右量取胚芽鞘的长度。8 d 后结束发芽,称取胚根鲜重,计算种子发芽势、发芽指数( $G_i$ )、活力指数( $V_i$ )及胚根数。

1.4.2 干旱胁迫试验数据处理方法 发芽指数,活力指数计算公式为:发芽指数( $G_i$ ) =  $\sum G_i / D_i$ ,活力指数( $V_i$ ) =  $S \times \sum G_i / D_i$ (其中  $G_i$  为在  $t$  日的发芽数,  $D_i$  为相应的发芽日数,  $S$  为胚根平均鲜重)。每个性状抗旱系数(drought-tolerant coefficient, DC)计算采用 Blum 等<sup>[13-14]</sup>的方法,计算公式如下:

$$DC_{ij} = \frac{X_{ijws}}{X_{ijwu}}$$

式中,  $DC_{ij}$  是第  $i$  个材料第  $j$  个性状的干旱系数,  $X_{ijws}$  和  $X_{ijwu}$  分别是干旱和正常水分条件下第  $i$  个材料第  $j$  个性状的值。

各材料抗旱隶属函数值(the modified membership function value of drought tolerance, MFVD)的计算采用以各性状抗旱系数为基础的改进方法<sup>[15-16]</sup>,计算公式如下:

$$U_{ij} = \frac{DC_{ij} - DC_{jmin}}{DC_{jmax} - DC_{jmin}} \quad U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_{ij}$$

其中,  $U_{ij}$  是第  $i$  个材料第  $j$  个性状的抗旱隶属函数值,  $DC_{ij}$  是第  $i$  个材料第  $j$  个性状的抗旱系数,  $DC_{jmax}$  和  $DC_{jmin}$  分别是各参试材料中第  $j$  个性状抗旱系数的最大值和最小值,  $U_i$  是第  $i$  个材料各性状的平均抗旱隶属函数值。依据所有品种抗旱隶属函数值的平均数  $U$  和其标准差  $SD$  将抗旱性分为 5 级, I 级为强抗旱型:  $U_i \geq U + 1.64SD$ ; II 级为较抗旱型:  $U + 1SD \leq U_i < U + 1.64SD$ ; III 级为中等抗旱型:  $U - 1SD \leq U_i < U + 1SD$ ; IV 级为较敏感型:  $U - 1.64SD \leq U_i < U - 1SD$ ; V 级为强敏感型:  $U_i < U - 1.64SD$ 。

采用 EXCEL 2007 对供试材料的 5 个性状进行数据分析。计算每个性状的抗旱系数并对其在两个处理下的变化进行分析,计算每个材料的抗旱隶属函数值对各个材料的抗旱性进行评估。

1.5 小麦抗源农艺性状调查

在供试材料生育期内,观察其抽穗期、扬花期、成熟期以及熟相,并测定株高、穗长、分蘖、小穗数、穗粒数、单株产量以及千粒重等性状。统计分析采用 EXCEL 2007。

2 结果与分析

2.1 抗病性评价

2.1.1 苗期抗病性评价 苗期鉴定分别以 CH42、CYR31、CYR32 和 CYR33 对参试小麦材料进行苗期分小种鉴定。结果(表 1)表明,以郑麦 9023 与野二二燕为亲本的高代系中郑野 - 1、郑野 - 2、郑野 - 3、郑野 - 4 对 CYR31 和 CYR32 表现抗病;以郑麦 9023 与野二二燕为亲本的高代系中的郑野 - 5、郑野 - 6、郑野 - 7、郑野 - 8 对四个小种均表现感病;而以豫麦 66 与野二二燕为亲本的 12 个高代系只抗 CYR31。

2.1.2 成株期抗病性评价 成株期综合鉴定结果表明,20 个小麦高代系材料在水自然诱发圃和杨凌人工混合小种圃中均表现为成株期抗条锈病,其中除郑野 - 1、郑野 - 2、郑野 - 3、郑野 - 4 四个高代系是中抗外,其余 16 个高代系均表现为高抗条锈病。

2.2 分子检测

选用 7 个已知基因的分子标记,分别对亲本小麦品种以及其高代系进行分子检测,结果(表 1)显示,野二二燕中含有 Yr9 和 Yr17,豫麦 66 含有 Yr9 和 Yr17,郑麦 9023 不含已知基因;高代系中郑野 - 1、郑野 - 2、郑野 - 3、郑野 - 4 不含已知基因,其他高代系只含有 Yr17 标记。在亲本和高代系中,均未检测到 Yr5、Yr10、Yr15、Yr18 和 Yr26 的基因标记,表明这些小麦品种及高代系中均未携带这些 Yr 基因。

2.3 种子萌发的抗旱性评价

小麦种子萌发抗旱性试验结果(表 2)表明,参试的 25 份材料抗旱隶属函数值在 0.17 ~ 0.91 之间,平均值为 0.55,标准差 0.17;依据均值和标准差,抗旱对照品种晋麦 47 和西农 418 表现为较抗旱;亲本野二二燕、郑麦 9023、豫麦 66 表现为中等抗旱,依据上述标准可知,抗旱性具有超亲表现的高代系有郑野 - 2、豫野 - 4、豫野 - 7,其中,郑野 - 2 在此试验中的表现高于抗旱品种晋麦 47;与亲本抗旱

性相同的高代系有:郑野-3、郑野-6、郑野-7、郑野-8、豫野-1、豫野-2、豫野-5、豫野-6、豫野-8、豫野-9、豫野-10、豫野-11、豫野-12;抗旱性低于亲本的有郑野-1、郑野-4、郑野-5、豫野-3。

2.4 农艺性状评价

参试的 20 个高代系的抽穗期、扬花期、成熟期、熟相、株高、穗长、有效分蘖、小穗数、穗粒数、单株籽粒产量、千粒重等 11 个主要农艺性状与亲本进行比较。农艺性状数据结果(表 3)表明,20 个高代系在熟相、抽穗期、扬花期、成熟期、穗长、小穗数、穗粒数等 7 个性状的表现基本相同。单株籽粒产量在高代

系之间偏差较大不作为筛选标准。具有差异表现的其他 3 个农艺性状可作为筛选高代系的鉴定标准,株高:豫野-9、豫野-10、豫野-11、豫野-12 株高高于亲本豫麦 66;有效分蘖数:有超亲表现的高代系有郑野-1、郑野-2、郑野-3、郑野-4、郑野-6、豫野-3、豫野-9、豫野-12;千粒重:豫野-9、豫野-10、豫野-11、豫野-12 千粒重超过其亲本野二二燕以及豫麦 66,这四个高代系平均千粒重为 47.3 g。综上所述,农艺性状符合育种目标的有郑野-1、郑野-2、郑野-3、郑野-4、郑野-6、豫野-1、豫野-2、豫野-3、豫野-4、豫野-5、豫野-6。

表 1 亲本品种及高代系成株期和苗期抗病性表现及其可能携带的抗条锈病基因

| Table 1 Performances of resistance to stripe rust on seedling and adult plant stage and postulated resistance genes in parent varieties and high generation |                           |                            |                              |       |      |       |                            |     |         |     |                               |                             |     |      |      |                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|-------|------|-------|----------------------------|-----|---------|-----|-------------------------------|-----------------------------|-----|------|------|---------------------------------|
| 编号<br>Number                                                                                                                                                | 杂交组合<br>Cross combination | 品种(系)<br>Varieties (lines) | 苗期抗病性<br>Seedling resistance |       |      |       | 成株期抗病性<br>Adult resistance |     |         |     | 抗性评价<br>Resistance Evaluation | 分子检测<br>Molecular detection |     |      |      | 推测 Yr 基因<br>Postulated Yr genes |
|                                                                                                                                                             |                           |                            |                              |       |      |       | 2014 YL                    |     | 2014 TS |     |                               | Yr9                         |     | Yr17 |      |                                 |
|                                                                                                                                                             |                           |                            | CYR32                        | CYR33 | CH42 | CYR31 | IT                         | DS  | IT      | DS  |                               | AF                          | H20 | VEN  | URIC |                                 |
| 1                                                                                                                                                           | 亲本品种                      | 野二二燕                       | 3                            | 4     | 2    | 3     | 4                          | 5   | 4       | 5   | ASR – MR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr9 + Yr17 + ?                  |
| 2                                                                                                                                                           |                           | 郑麦 9023                    | 9                            | 8     | 9    | 8     | 7                          | 60  | 8       | 70  | S                             | –                           | –   | –    | –    | ?                               |
| 3                                                                                                                                                           |                           | 豫麦 66                      | 8                            | 0     | 0    | 2     | 4                          | 20  | 5       | 30  | APR – MR                      | +                           | +   | +    | +    | Yr9 + Yr17 + ?                  |
| 4                                                                                                                                                           | 郑 9023/<br>野二、二燕          | 郑野 – 1                     | 2                            | 5     | 7    | 1     | 4                          | 10  | 4       | 30  | ASR – MR                      | –                           | –   | –    | –    | ?                               |
| 5                                                                                                                                                           |                           | 郑野 – 2                     | 2                            | 6     | 8    | 2     | 3                          | 20  | 3       | 15  | ASR – MR                      | –                           | –   | –    | –    | ?                               |
| 6                                                                                                                                                           |                           | 郑野 – 3                     | 2                            | 8     | 7    | 1     | 3                          | 20  | 4       | 30  | ASR – MR                      | –                           | –   | –    | –    | ?                               |
| 7                                                                                                                                                           |                           | 郑野 – 4                     | 2                            | 7     | 6    | 2     | 4                          | 10  | 4       | 20  | ASR – MR                      | –                           | –   | –    | –    | ?                               |
| 8                                                                                                                                                           |                           | 郑野 – 5                     | 8                            | 8     | 7    | 8     | 2                          | 10  | 2       | 15  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 9                                                                                                                                                           |                           | 郑野 – 6                     | 8                            | 8     | 7    | 8     | 2                          | 5   | 2       | 20  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 10                                                                                                                                                          |                           | 郑野 – 7                     | 8                            | 8     | 6    | 8     | 2                          | 10  | 2       | 20  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 11                                                                                                                                                          |                           | 郑野 – 8                     | 8                            | 8     | 7    | 8     | 2                          | 20  | 2       | 20  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 12                                                                                                                                                          | 豫麦 66/<br>野二、二燕           | 豫野 – 1                     | 8                            | 8     | 8    | 2     | 2                          | 20  | 2       | 30  | APR – HR                      | –                           | –   | –    | +    | Yr17 + ?                        |
| 13                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 2                     | 8                            | 8     | 7    | 2     | 2                          | 20  | 2       | 15  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 14                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 3                     | 8                            | 7     | 4    | 2     | 2                          | 20  | 2       | 20  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 15                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 4                     | 8                            | 8     | 5    | 2     | 2                          | 10  | 2       | 10  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 16                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 5                     | 8                            | 7     | 7    | 4     | 2                          | 10  | 2       | 10  | APR – HR                      | –                           | –   | –    | +    | Yr17 + ?                        |
| 17                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 6                     | 7                            | 6     | 5    | 3     | 2                          | 20  | 2       | 20  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 18                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 7                     | 8                            | 8     | 4    | 2     | 2                          | 20  | 2       | 15  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 19                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 8                     | 8                            | 7     | 4    | 2     | 2                          | 10  | 2       | 10  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 20                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 9                     | 8                            | 7     | 7    | 2     | 1                          | 5   | 2       | 5   | APR – HR                      | –                           | –   | –    | –    | Yr17 + ?                        |
| 21                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 10                    | 8                            | 7     | 7    | 4     | 2                          | 5   | 2       | 10  | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 22                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 11                    | 8                            | 7     | 7    | 2     | 2                          | 5   | 2       | 10  | APR – HR                      | –                           | –   | –    | +    | Yr17 + ?                        |
| 23                                                                                                                                                          |                           | 豫野 – 12                    | 7                            | 7     | 7    | 2     | 1                          | 5   | 2       | 5   | APR – HR                      | –                           | –   | +    | +    | Yr17 + ?                        |
| 24                                                                                                                                                          |                           | 铭贤 169                     | 9                            | 9     | 9    | 9     | 9                          | 100 | 9       | 100 | S                             |                             |     |      |      |                                 |

注:1.YL:杨凌成株期结果;2.TS:天水成株期结果;3.DS:严重度;4.IT:抗病反应型;5.ASR:全生育期抗性;6.MR:中抗;7.S:感病;8.APR:成株期抗性;9.HR:高抗;10.“+”:表示存在;11.“-”表示不存在;12.“?”表示含有未知基因。

Note:1.YL: Adult result in Yangling; 2.TS: Adult result in Tianshui; 3.DS: severity; 4.IT: infection type; 5.ASR: all-stage resistance; 6.MR: medium resistance; 7.S: susceptible; 8.APR: adult plant resistance; 9.HR: highly resistance; 10.“+”: means present; 11.“-”: means absent; 12.“?”: unknown Yr genes.

表 2 抗旱品种及高代系种子萌发抗旱指标

Table 2 The seed germination drought resistance index of drought resistant varieties and high generation

| 编号<br>Number | 杂交组合<br>Cross<br>combination | 品种(系)<br>Varieties<br>(Lines) | 种子萌发抗旱指标 Seed germination drought resistance index |      |       |       |      |      |      |      |      |       |     |
|--------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-----|
|              |                              |                               | GF                                                 |      | GI    |       | VI   |      | CPR  | ER   | DI   | MFVD  | DRL |
|              |                              |                               | CK                                                 | D    | CK    | D     | CK   | D    |      |      |      | $U_i$ |     |
| 1            | 抗旱品种                         | 晋麦 47                         | 0.92                                               | 0.68 | 43.97 | 31.14 | 3.96 | 2.48 | 0.88 | 1.25 | 0.52 | 0.80  | Ⅱ   |
| 2            |                              | 西农 418                        | 0.96                                               | 0.68 | 44.46 | 30.87 | 4.08 | 2.34 | 0.80 | 1.21 | 0.51 | 0.78  | Ⅱ   |
| 3            | 亲本品种                         | 野二二燕                          | 0.84                                               | 0.56 | 41.03 | 17.37 | 2.67 | 1.21 | 0.60 | 1.15 | 0.41 | 0.53  | Ⅲ   |
| 4            |                              | 郑麦 9023                       | 0.72                                               | 0.44 | 28.35 | 18.53 | 0.80 | 0.56 | 0.65 | 1.10 | 0.49 | 0.62  | Ⅲ   |
| 5            | 郑 9023/<br>野二、二燕             | 豫麦 66                         | 0.84                                               | 0.68 | 50.49 | 31.14 | 3.99 | 1.79 | 0.56 | 1.06 | 0.46 | 0.55  | Ⅲ   |
| 6            |                              | 郑野-1                          | 0.88                                               | 0.28 | 45.96 | 11.88 | 2.88 | 0.46 | 0.77 | 1.09 | 0.26 | 0.31  | Ⅳ   |
| 7            |                              | 郑野-2                          | 0.56                                               | 0.48 | 31.97 | 21.66 | 1.16 | 0.92 | 0.80 | 1.37 | 0.51 | 0.91  | Ⅰ   |
| 8            |                              | 郑野-3                          | 0.80                                               | 0.64 | 46.52 | 29.57 | 3.56 | 2.23 | 0.65 | 1.07 | 0.50 | 0.63  | Ⅲ   |
| 9            |                              | 郑野-4                          | 0.96                                               | 0.28 | 53.15 | 12.80 | 3.81 | 0.83 | 0.33 | 1.06 | 0.28 | 0.17  | Ⅴ   |
| 10           |                              | 郑野-5                          | 0.92                                               | 0.24 | 49.43 | 14.56 | 3.74 | 1.02 | 0.57 | 1.10 | 0.25 | 0.28  | Ⅳ   |
| 11           |                              | 郑野-6                          | 0.80                                               | 0.32 | 44.52 | 17.24 | 3.67 | 0.86 | 0.65 | 1.10 | 0.36 | 0.39  | Ⅲ   |
| 12           |                              | 郑野-7                          | 0.84                                               | 0.36 | 45.83 | 20.96 | 3.93 | 1.16 | 0.59 | 1.06 | 0.38 | 0.39  | Ⅲ   |
| 13           |                              | 郑野-8                          | 0.80                                               | 0.32 | 43.69 | 15.08 | 3.30 | 0.95 | 0.67 | 1.14 | 0.41 | 0.41  | Ⅲ   |
| 14           |                              | 豫野-1                          | 1.00                                               | 0.44 | 52.50 | 22.90 | 4.09 | 1.73 | 0.60 | 1.20 | 0.35 | 0.47  | Ⅲ   |
| 15           |                              | 豫野-2                          | 0.88                                               | 0.44 | 46.38 | 26.40 | 4.48 | 2.18 | 0.73 | 1.14 | 0.39 | 0.55  | Ⅲ   |
| 16           |                              | 豫野-3                          | 0.64                                               | 0.16 | 30.37 | 8.62  | 1.40 | 0.39 | 0.68 | 1.10 | 0.27 | 0.31  | Ⅳ   |
| 17           | 豫麦 66/<br>野二、二燕              | 豫野-4                          | 0.76                                               | 0.64 | 42.36 | 34.47 | 3.39 | 1.99 | 0.71 | 1.25 | 0.45 | 0.80  | Ⅱ   |
| 18           |                              | 豫野-5                          | 0.92                                               | 0.64 | 44.84 | 34.32 | 3.35 | 1.76 | 0.74 | 1.18 | 0.42 | 0.70  | Ⅲ   |
| 19           |                              | 豫野-6                          | 0.92                                               | 0.52 | 48.49 | 26.33 | 3.25 | 1.30 | 0.64 | 1.13 | 0.39 | 0.50  | Ⅲ   |
| 20           |                              | 豫野-7                          | 0.84                                               | 0.60 | 40.69 | 35.84 | 2.87 | 2.08 | 0.88 | 1.07 | 0.47 | 0.77  | Ⅱ   |
| 21           |                              | 豫野-8                          | 0.84                                               | 0.60 | 42.33 | 31.71 | 3.79 | 1.79 | 0.81 | 1.15 | 0.43 | 0.69  | Ⅲ   |
| 22           |                              | 豫野-9                          | 0.80                                               | 0.72 | 52.61 | 41.34 | 4.61 | 2.23 | 0.78 | 1.03 | 0.41 | 0.67  | Ⅲ   |
| 23           |                              | 豫野-10                         | 0.92                                               | 0.44 | 41.83 | 23.40 | 3.15 | 0.55 | 0.69 | 1.05 | 0.38 | 0.40  | Ⅲ   |
| 24           |                              | 豫野-11                         | 0.92                                               | 0.64 | 42.11 | 30.99 | 2.82 | 1.28 | 0.69 | 1.20 | 0.38 | 0.66  | Ⅲ   |
| 25           |                              | 豫野-12                         | 0.84                                               | 0.52 | 41.16 | 25.58 | 3.54 | 1.16 | 0.65 | 1.27 | 0.46 | 0.60  | Ⅲ   |

注:1. GF:发芽势;2. GI:发芽指数;3. VI:活力指数;4. CPR:胚芽鞘比值;5. BR:初生根比值;6. DI:耐旱指数;7. MFVD:抗旱隶属函数值;8. DRL:抗旱等级;9. CK:正常水分处理;10. D:干旱胁迫处理;11. Ⅰ级:强抗旱型;12. Ⅱ级:较抗旱型;13. Ⅲ级:中等抗旱型;14. Ⅳ级:干旱较敏感型;15. Ⅴ级:干旱强敏感型。

Note: 1. GF: germinative force; 2. GI: germination index; 3. VI: vigor index; 4. CPR: coleoptile ratio; 5. ER: early root ratio; 6. DI: drought index; 7. MFVD: modified membership function value of drought tolerance; 8. DRL: drought resistance level; 9. CK: normal water treatment; 10. D: drought stress treatment; 11. Level Ⅰ: strong drought resistance; 12. Level Ⅱ: drought resistance; 13. Level Ⅲ: medium drought-resistant type; 14. Level Ⅳ: drought sensitive type; 15. Level Ⅴ: Strong drought sensitive.

3 讨 论

在中国西北干旱、半干旱地区,条锈菌的不断变异造成曾经具有良好抗性的品种抗性不断“丧失”<sup>[17]</sup>,同时,该地区还受到水资源匮乏的限制,双重危害给小麦生产带来巨大威胁,因此转育抗旱性优良的新型抗源材料对改良当地小麦抗旱性和抗病性具有重要实践意义。为防御该地区条锈病流行和干旱危害,要求抗源转育中要选择遗传背景丰富、地理远缘材料来拓宽遗传基础。根据基因累加重组、性状互补的原理,来组配抗病、耐旱、高产等优良性

状的组合的抗源亲本材料,同时也符合国际小麦育种四大特点<sup>[18]</sup>中的,降低生产成本、提高抗逆性和优良农艺性状组合特点。

远缘杂交是大幅提高现有作物品种的抗逆性的有效途径。野生二粒小麦(*Triticum dicoccoides*)作为现代栽培小麦的二级基因源<sup>[19]</sup>,既抗条锈病,又具有耐旱特性,在种质资源研究和现代小麦品种的遗传改良中有广泛应用。野燕麦对锈病有一定的抗性,同时具有抗旱、早熟等优良性状,是现代栽培小麦遗传改良的重要种质资源<sup>[20-21]</sup>。野二二燕是野生二粒小麦与野燕麦远缘杂交后代具有抗病、耐旱、

表 3 亲本品种及高代系农艺性状测量数据

Table 3 The agronomic traits measured data of parent varieties and high generation

| 编号<br>Number | 杂交组合<br>Cross<br>combination | 品种(系)<br>Varieties<br>(lines) | 农艺性状 Agronomic traits |      |     |    |       |      |    |    |      |       |      |
|--------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|------|-----|----|-------|------|----|----|------|-------|------|
|              |                              |                               | HS                    | FS   | MS  | RP | PH    | SL   | ET | SN | GNPS | GYPP  | TKW  |
| 1            | 亲本品种                         | 野二二燕                          | 5.20                  | 5.6  | 6.7 | 好  | 93    | 9    | 8  | 19 | 48   | 12.36 | 34.4 |
| 2            |                              | 郑麦 9023                       | 4.20                  | 4.26 | 6.1 | 好  | 82    | 15   | 10 | 21 | 40   | 22.26 | 46.4 |
| 3            |                              | 豫麦 66                         | 4.29                  | 5.3  | 6.9 | 好  | 82    | 13   | 9  | 22 | 60   | 18.32 | 45.2 |
| 4            |                              | 郑野-1                          | 4.29                  | 5.1  | 6.4 | 好  | 80    | 10   | 13 | 22 | 52   | 17.26 | 45.0 |
| 5            |                              | 郑野-2                          | 4.29                  | 5.2  | 6.4 | 好  | 77    | 11   | 13 | 23 | 50   | 13.43 | 38.7 |
| 6            |                              | 郑野-3                          | 4.30                  | 5.2  | 6.5 | 好  | 73    | 9.5  | 12 | 21 | 46   | 21.91 | 40.0 |
| 7            |                              | 郑野-4                          | 4.29                  | 5.1  | 6.5 | 好  | 78    | 10   | 12 | 21 | 46   | 13.8  | 42.6 |
| 8            |                              | 郑野-5                          | 4.30                  | 5.4  | 6.6 | 好  | 77    | 13   | 6  | 23 | 56   | 22.04 | 39.0 |
| 9            |                              | 郑野-6                          | 4.30                  | 5.4  | 6.6 | 好  | 75    | 13   | 12 | 23 | 56   | 11.04 | 39.6 |
| 10           |                              | 郑野-7                          | 4.30                  | 5.5  | 6.8 | 好  | 74    | 13   | 6  | 23 | 57   | 16.66 | 39.4 |
| 11           |                              | 郑野-8                          | 4.30                  | 5.3  | 6.6 | 好  | 72    | 12.5 | 7  | 23 | 51   | 17.94 | 40.1 |
| 12           | 郑 9023/<br>野二、二燕             | 豫野-1                          | 4.30                  | 5.4  | 6.6 | 好  | 73    | 11.5 | 10 | 24 | 60   | 17.41 | 38.3 |
| 13           |                              | 豫野-2                          | 4.29                  | 5.3  | 6.6 | 好  | 73    | 11.5 | 10 | 21 | 64   | 18.17 | 38.6 |
| 14           |                              | 豫野-3                          | 4.30                  | 5.4  | 6.6 | 好  | 72    | 10   | 14 | 18 | 55   | 22.12 | 40.0 |
| 15           |                              | 豫野-4                          | 4.30                  | 5.4  | 6.6 | 好  | 69    | 12.5 | 10 | 24 | 57   | 19.62 | 39.2 |
| 16           |                              | 豫野-5                          | 5.10                  | 5.5  | 6.8 | 好  | 73    | 13.5 | 9  | 21 | 55   | 16.44 | 36.3 |
| 17           |                              | 豫野-6                          | 5.20                  | 5.6  | 6.8 | 好  | 74.3  | 12.6 | 7  | 24 | 56   | 8.98  | 38.3 |
| 18           |                              | 豫野-7                          | 5.20                  | 5.6  | 6.8 | 好  | 70    | 12.8 | 5  | 19 | 34   | 11.45 | 38.0 |
| 19           |                              | 豫野-8                          | 5.10                  | 5.5  | 6.8 | 好  | 68    | 11.5 | 4  | 25 | 67   | 5.78  | 38.2 |
| 20           |                              | 豫野-9                          | 4.29                  | 5.1  | 6.4 | 好  | 107   | 10.6 | 14 | 16 | 42   | 20.06 | 46.7 |
| 21           |                              | 豫野-10                         | 4.29                  | 5.2  | 6.5 | 好  | 96    | 9.5  | 5  | 16 | 37   | 5.66  | 46.0 |
| 22           |                              | 豫野-11                         | 4.29                  | 5.2  | 6.4 | 好  | 94.5  | 10.5 | 8  | 17 | 47   | 8.9   | 48.4 |
| 23           |                              | 豫野-12                         | 4.29                  | 5.1  | 6.4 | 好  | 100.5 | 8.8  | 14 | 18 | 41   | 20.06 | 48.2 |
| 24           | 对照品种                         | 小偃 22                         | 4.23                  | 4.28 | 6.2 | 好  | 78    | 8    | 11 | 20 | 56   | 11.16 | 34.4 |

注:1. HS:抽穗期;2. FS:扬花期;3. MS:成熟期;4. RP:熟相;5. PH:株高;6. SL:穗长;7. ET:有效分蘖;8. SN:小穗数;9. GNPS:穗粒数;10. GYPP:单株籽粒产量;11. TKW:千粒重。

Note: 1. HS: heading stage; 2. FS: flowering stage; 3. MS: mature stage; 4. RP: ripe phase; 5. PH: plant height; 6. SL: spikelet length; 7. ET: effective tiller; 8. SN: spikelet number; 9. GNPS: grain number of per spike; 10. GYPP: the grain yield per plant; 11. TKW: thousand kernel weight.

适应性强等优点,是具有良好的利用价值的中间育种材料。在本试验中,在抗病、耐旱综合性状优良育种目标指导下,品种郑麦 9023 和豫麦 66 选作母本,与前两者遗传距离较远的野二二燕选作父本,杂交后代采取系谱法与改良系谱法相结合的选择方法进行综合选择,并在保持基本正常生长的前提下,少灌水,用自然水分胁迫方法,增强选育材料的抗旱性和抗逆性,连续选择七代得到性状稳定的高代系。

抗病基因聚合是提高品种抗性持久性、扩大抗病谱和地区适应性的重要策略<sup>[22]</sup>。在本试验中,由成株期田间鉴定和苗期分小种鉴定结果可知,亲本野二二燕为全生育期抗性,郑麦 9023 高感条锈,豫麦 66 为成株期抗性。在 20 个高代系中,全生育期抗性有郑野-1、郑野-2、郑野-3、郑野-4,中抗条锈病,但反应型和严重度较抗病亲本野二二燕有所

下降,相较抗病亲本,抗病能力有所增强,郑野-5、郑野-6、郑野-7、郑野-8 属于成株期抗病性,高抗条锈病。亲本野二二燕为全生育期抗性,郑麦 9023 高感条锈,其后代是成株期抗性且高抗,这说明两亲本间的抗病基因聚合产生成株期抗病且高抗的累加效应。亲本野二二燕和豫麦 66 均为中抗条锈,豫野-1、豫野-2、豫野-3 等 12 个高代系均为成株期抗性且高抗,相较亲本抗性,高代系的抗病能力明显增强。结合分子检测结果可知,亲本含有除 Yr9 和 Yr17 基因外的未知的抗病新基因,同时,经过连续 7 代的杂交和回交,多个抗病基因得到有效累加,高代系的抗病性明显增强,由此得出高代系中多个抗病基因已经聚合并能稳定遗传的推断。

萌发出苗是小麦整个生长发育的第一个阶段,种子的发芽直接关系到以后的生长和产量的生成,

特别在西北干旱的条件下,种子的发芽率直接影响到基本苗数<sup>[23]</sup>。因此,种子萌发抗旱性在小麦的整个生育期抗旱性中,起到了至关重要的作用。在本试验中,采用种子萌发干旱胁迫的方法,合理有效的筛选的萌发期抗旱性较好的高代系。除郑野-1、郑野-4、郑野-5、豫野-3 在种子萌发干旱胁迫试验中表现为对干旱较敏感或强敏感外,其他 16 个高代系抗旱能力与亲本相同或高于亲本。

在农艺性状方面,郑野-1、郑野-2、郑野-3 等 8 个高代系抽穗扬花期以及成熟期晚于郑麦 9023,克服了郑麦 9023 早熟易断穗<sup>[24]</sup>的缺点,豫野-1、豫野-2、豫野-3 等 12 个高代系抽穗扬花期以及成熟期基本与豫麦 66 相同。高代系的抽穗扬花期、成熟期、熟相、穗长、小穗数、穗粒数等农艺性状都达到预期目标。同时,利用株高,有效分蘖,千粒重三个性状表现筛选到农艺性状符合育种目标的高代系有郑野-1、郑野-2、郑野-3、郑野-4、郑野-6、豫野-1、豫野-2、豫野-3、豫野-4、豫野-5、豫野-6。

4 结 论

在抗病、耐旱综合性状优良育种目标指导下,品种郑麦 9023 和豫麦 66 依次进行抗病性和抗旱性的改良,筛选得到 8 个可用于抗源亲本的性状稳定的高代系材料,此高代系具有抗病耐旱且综合农艺性状优良的特点,为实现抗条锈基因累加和抗性材料的多元化,培育适合西北干旱半干旱地区的抗条锈病及抗旱小麦品种奠定了材料基础。

参 考 文 献:

[1] Omer E E, Azharia A E, Ali A A S. Econvmic impacts of changes in wheat's import fariff on the sudanese economy[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2013,8(2):1016-1023.

[2] Tuberosa Roberto. Phenotyping for drought tolerance of crops in the ge-nomics era[J]. Frontiers in Physiology,2012,(3):347.

[3] 李振岐,曾士迈.中国小麦锈病[M].北京:中国农业出版社,2002:180-190.

[4] 何中虎,兰彩霞,陈新民,等.小麦条锈病和白粉病成株抗性研究进展与展望[J].中国农业科学,2011,44(11):2193-2215.

[5] Brown J K M, Hovmoller M S. Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease[J]. Science,2002, 297:537-541.

[6] Brown J K M, Tellier A. Plant-parasite coevolution: bridging the gap between genetics and ecology[J]. Annual Review of Phytopathology, 2011,49:345-367.

[7] Chen W Q, Wu L R, Liu T G, et al. Race dynamics, diversity, and virulence evolution in *Pucciniastriformis* f. sp. *tritici*, the causal agent of wheat stripe rust in China from 2003 to 2007[J]. Plant Disease, 2009,93:1093-1101.

[8] 周海鹏,郑会敏,张素勤,等.以色列野生二粒小麦和光稃野燕麦杂交亲本与后代核型分析[J].云南农业大学学报(自然科学),2012,(1):1-6.

[9] 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,(14):2889-2896.

[10] Hill-Ambroz K L, Brown-Guedira G L, Fellers J P. Modified rapid DNA extraction protocol for high throughput microsatellite analysis in wheat[J]. Crop Science,2002,42:2088-2091.

[11] Zeng Qingdong, Han Dejun, Wang Qilin, et al. Stripe rust resistance and genes in Chinese wheat cultivars and breeding lines[J]. Euphytica,2014,1962:271-284.

[12] Zhang Xiaojuan. Fine mapping of wheat stripe rust resistance gene Yr26 based on collinearity of wheat with *Brachypodium distachyon* and rice[J]. PLoS ONE,2013,8(3): 57885.

[13] Abraham Blum, Wayne R. Jordan. Breeding crop varieties for stress environments[J]. Critical Reviews in Plant Sciences,1985,2(3): 199-238.

[14] Szira F, Bálint A F, Börner A G, et al. Evaluation of drought-related traits and screening methods at different developmental stages in spring barley[J]. Journal of Agronomy and Crop Science,2008,194(5):334-342.

[15] 何雪银,文仁来,吴翠荣,等.模糊隶属函数法对玉米苗期抗旱性的分析[J].西南农业学报,2008,(1):52-56.

[16] 符明联,李根泽,杨清辉,等.隶属函数法鉴定油菜甘芥种间杂交后代的抗旱性[J].中国油料作物学报,2011,(4):368-373.

[17] 周 阳,何中虎,张改生,等.1BL/1RS 易位系在我国小麦育种中的应用[J].作物学报,2004,(6):531-535.

[18] Tester Mark, Langridge Peter. Breeding technologies to increase crop production in a changing world[J]. Science,2010,327:818-822.

[19] Eviatar Nevo, Avigdor Beiles, Yitzchak Guterman, et al. Genetic resources of wild cereals in Israel and vicinity. I. Phenotypic variation within and between populations of wild wheat, *Triticum dicocoides*[J]. Euphytica,1984,33(3):717-735.

[20] 张庆勤,陈庆富,肖建富.野生二粒小麦与野生燕麦远缘杂交研究[J].种子,1991,(2):2-4.

[21] 韩德俊,张小娟,魏国荣,等.一粒小麦与葡萄牙野燕麦远缘杂交后代抗条锈病鉴定及抗性株系的筛选[J].麦类作物学报,2008,(2):345-348.

[22] 曾祥艳,张增艳,杜丽璞,等.分子标记辅助选育兼抗白粉病、条锈病、黄矮病小麦新种质[J].中国农业科学,2005,(12): 2380-2386.

[23] 景蕊莲,吕小平.用渗透胁迫鉴定小麦种子萌发期抗旱性的方法分析[J].植物遗传资源学报,2003,(4):292-296.

[24] 胡 琳,许为钢,赵献林,等.优质早熟抗赤霉病小麦品种的创新[J].植物遗传资源科学,2001,(2):40-44.