

# 小麦高代系的抗旱性状筛选与抗旱性评价

宋璐杏,张闪闪,李 玟,乔朋放,毕 起,陈 亮,胡银岗

(西北农林科技大学农学院/旱区逆境生物学国家重点实验室/中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

**摘要:**于2020—2021年度和2021—2022年度两个生长季,在杨凌抗旱棚(DS)、杨凌农作一站(YAS)和乾县试验站(QX)3个环境下分别测定了43份和20份小麦高代系的8个农艺性状及8个产量性状,通过计算抗旱指数评价各性状对小麦抗旱指标的贡献率,同时利用隶属函数法、聚类分析等方法进行综合分析,筛选抗旱性强的小麦高代系。结果表明,在干旱胁迫环境(DS)下,小麦的农艺性状和产量性状均受到不同程度的抑制。基于各性状对小麦抗旱指数的贡献度,筛选出生物量、产量、小穗数和千粒重等作为评价小麦抗旱性的重要指标。通过抗旱性综合评价 $D$ 和聚类分析将供试小麦品种(系)分为高抗旱、抗旱、中等抗旱、干旱敏感和干旱高敏感5个等级,两年度鉴定出21-1、21-34、21-39、21-18、21-2和22-17共6份高抗旱小麦品系。

**关键词:**小麦;抗旱指数;农艺性状;产量性状;聚类分析

**中图分类号:**S512.1<sup>+</sup>1;S32 **文献标志码:**A

## Screening of drought resistance traits and drought resistance evaluation in wheat advanced lines

SONG Luxing, ZHANG Shanshan, LI Xuan, QIAO Pengfang, BI Qi, CHEN Liang, HU Yingang

(College of Agronomy, Northwest A&F University, State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, China Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** During the growing seasons of 2020–2021 and 2021–2022, 43 and 20 wheat advanced lines were respectively evaluated for 8 agronomic traits and 8 yield traits in three different environments: Drought shelter (DS), Yangling Agricultural Station 1 (YAS) and Qianxian (QX). The contribution of each trait to wheat drought resistance was assessed by calculating the drought resistance index. Comprehensive analyses were performed using methods such as the membership function and cluster analysis to select wheat advanced lines with high drought resistance. The results indicated that under drought stress (DS), both agronomic and yield traits of wheat were suppressed to varying degrees. Based on the contribution of each trait to wheat drought resistance, several important indicators for evaluating wheat drought resistance, such as biomass, yield, spikelet number, and thousand-grain weight were selected. Through comprehensive drought resistance index ( $D$ ) and cluster analysis, the tested wheat varieties (lines) were categorized into five levels: highly drought-resistant, drought-resistant, moderately drought-resistant, drought-sensitive, and highly drought-sensitive. In the two years of assessment, a total of 6 highly drought-resistant wheat lines including 21-1, 21-34, 21-39, 21-18, 21-2, and 22-17 were identified.

**Keywords:** wheat; drought resistance index; agronomic traits; yield traits; cluster analysis

小麦(*Triticum aestivum* L.)是世界上分布面积最广的粮食作物之一,其产量直接关系到全球粮食安全。全球变暖导致极端气候频发,干旱缺水现象

愈加严重<sup>[1]</sup>。据统计,全球有超过一半的小麦产区深受干旱影响<sup>[2]</sup>,近年来因干旱造成的小麦减产高达13.7%<sup>[3]</sup>。我国人均耕地少、水资源短缺,随着全

收稿日期:2023-05-06

修回日期:2023-09-25

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2021KWZ-23);杨凌种业创新重点研发计划项目(YLZY-XM-03)

作者简介:宋璐杏(1996-),男,山东威海人,硕士研究生,研究方向为小麦抗旱性鉴定。E-mail:luxing.song@nwafu.edu.cn

通信作者:胡银岗(1967-),男,陕西韩城人,教授,主要从事小麦抗旱节水及产量潜力的生物学基础、种质创新及遗传育种研究。E-mail:huyingang@nwafu.edu.cn

球气候变化的加剧,小麦生产面临重大挑战,干旱缺水已经成为我国小麦减产的主要原因<sup>[4]</sup>。因此,深入探索干旱环境下小麦的生长适应机制,筛选优良性状,培育抗旱能力强的小麦种质迫在眉睫。

目前小麦抗旱性鉴定的方法主要有田间鉴定法<sup>[5]</sup>和人工模拟鉴定法<sup>[6]</sup>。抗旱棚鉴定法是一种常用的人工模拟鉴定法,其可以精确控制水分供应,弥补田间鉴定法中因自然降水不可控而影响试验结果的缺陷,已成为小麦抗旱性鉴定的重要方法<sup>[7]</sup>。在干旱环境下保持较高产量是小麦抗旱育种的主要目标。产量是农艺性状和产量性状共同作用的结果,株高(PH)、生物量(BIO)、穗粒数(SN)和穗长(SL)等对小麦产量有重要影响。干旱条件下,小麦形态会最先发生不同程度的变化,如株高下降、叶片卷缩变黄、穗长变短等<sup>[8-10]</sup>;随后,新陈代谢受到抑制,结实率下降,从而影响最终产量<sup>[11]</sup>。一般认为有效分蘖多、茎秆较细且有弹性、叶片窄小、叶片有蜡质层等旱生结构的小麦品种具有较强的抗旱性<sup>[12]</sup>;也有研究认为植株的旱生结构无法通过降低蒸腾作用提升作物的抗旱性<sup>[13]</sup>,深绿色、叶片较大的品种反而具有更强的代谢能力,抵御干旱的能力更强<sup>[14]</sup>。孙彩霞等<sup>[15]</sup>通过研究穗部性状,发现小麦的芒性与抗旱性呈正相关关系,颖花结实率可以作为判定小麦抗旱性的重要指标。李德全等<sup>[16]</sup>在干旱胁迫条件下发现籽粒饱满度可以作为判断小麦抗旱性的重要依据。不少研究通过分析发现小麦抗旱能力可以通过部分性状反映出来,然而单一指标因其局限性无法反映小麦整体的抗旱能力,抗旱性综合评价值  $D$  可集合多个性状特征对小麦的抗旱性进行科学全面的评价<sup>[17]</sup>,目前已成为评价小麦抗旱性的重要方法<sup>[18]</sup>。

为评价本课题组高代系小麦的抗旱性,筛选有效的抗旱性状,本研究于 2020—2022 年度两个小麦生长季,在杨凌抗旱棚、杨凌农作一站和乾县试验站 3 个环境下,分别测定了 43 份和 20 份小麦高代系的农艺性状和产量性状;通过计算抗旱指数,利用隶属函数法、聚类分析等方法进行综合分析,筛选抗旱性强的小麦高代系,并综合评价各性状对小麦抗旱指标的贡献,以期小麦高代系的合理利用及抗旱品种的选育提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

2020—2021 年度供试材料为本课题组从西农 223/矮牧、西农 389/Certa/Rht15/西农 389、晋麦

47EMS/丰矮 4、小偃 6/A6S-2/丰矮 4、西农 223/Rht13 等杂交后代中培育的 43 份小麦高代品系,记为 21-1~21-43,以旱地区试对照‘晋麦 47’(山西省农科院棉花所选育)和‘中麦 175’(中国农业科学院作物科学研究所选育)为对照品种,共 45 份小麦品种(系)。2021—2022 年度供试材料为来自上述杂交组合的 20 份小麦旱地高代系,记为 22-1~22-20,以旱地区试对照‘晋麦 47’和‘中麦 36’(中国农业科学院作物科学研究所选育)为对照品种,总计 22 份小麦品种(系)。

### 1.2 试验设计

试验于 2020—2021 年度和 2021—2022 年度在西北农林科技大学旱区节水农业研究院抗旱棚(Drought shelter, DS)、杨凌农作一站(Yangling Agricultural Station 1, YAS)和乾县试验站(Qianxian, QX)进行。乾县分别于 2020 年 9 月 20 日和 2021 年 9 月 26 日播种,农作一站分别于 2020 年 10 月 9 日和 2021 年 10 月 14 日播种,抗旱棚分别于 2020 年 10 月 17 日和 2021 年 10 月 26 日播种。每个品种种植一个小区,田间小区每个 6 行,行长 6 m,行距 20 cm;抗旱棚每个 2 行,行长 1.8 m,行距 25 cm,均为 2 次重复。田间管理相同,分别于 2021 年 6 月 5 日和 2022 年 6 月 10 日进行收获。杨凌农作一站和乾县试验站均为自然环境,小麦生长依赖播种前的土壤水分及生育期的自然降水;抗旱棚试验在小麦开花期后,遇雨关闭抗旱棚,不再接收自然降水,形成生育后期干旱胁迫环境。

### 1.3 测定指标及方法

2020—2021 年度和 2021—2022 年度,在各小区中选择生长良好的 5 个小麦单株,于灌浆期测定旗叶长(FLL)、旗叶宽(FLW),估算旗叶面积(FLA, 叶长×叶宽×0.83)、株高(PH)和穗下茎长(SLS),取 5 株的平均值。2021—2022 年度生长季,增加测量倒二叶长(SLL)、倒二叶宽(SLW)和倒二叶面积(SLA)。小麦成熟收获后,每品种取 5 个单株,测算小穗数(SN)、穗粒数(GN)、成穗数(MSN)、穗长(SL),取 5 株的平均值。样品晒干后测定其生物量(BIO)、籽粒产量(GY)、收获系数(HI)和千粒重(TWG),重复 3 次,取平均值。

### 1.4 数据统计与分析

以抗旱棚环境作为干旱胁迫处理,乾县和杨凌农作一站两个环境作为自然对照,分别计算抗旱系数  $DC$ 、各性状的综合抗旱系数  $CDC$ 、抗旱指数  $DI$ 、抗旱系数的隶属函数值  $U(X_j)$ 、贡献度  $W_j$ ,计算抗旱性综合评价值  $D$ 。

(1) 抗旱系数 ( $DC$ ) 和综合抗旱系数 ( $CDC$ )

$$DC = \frac{pus}{pws} \quad (1)$$

$$CDC = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{pus}{pws} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中,  $pus$  为抗旱棚环境下某一性状值;  $pws$  为乾县和杨凌农作一站自然环境下某一性状值;  $n$  为所测性状的数量。

(2) 各性状抗旱系数的隶属函数值  $U(X_j)$ 

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中,  $X_j$  为第  $j$  个性状的抗旱系数;  $X_{\min}$  和  $X_{\max}$  分别为第  $j$  个抗旱系数的最小值和最大值。

(3) 抗旱指数  $DI$ 

$DI = CDC \times$  该品种(系)胁迫处理产量/所有参试品种(系)胁迫处理产量的平均值 (4)

(4) 各性状抗旱能力的贡献度  $W_j$ 

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad (5)$$

式中,  $W_j$  为第  $j$  个性状在所有综合指标中的贡献度;  $P_j$  为每个品种第  $j$  个性状的抗旱系数与抗旱指数的相关系数。

(5) 各品种(系)抗旱性综合评价价值  $D$ 

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) W_j] \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中,  $D$  为各小麦品种(系)抗旱性综合评价价值;  $W_j$  为第  $j$  个性状在所有综合指标中的贡献度;  $U(X_j)$  为第  $j$  个指标的隶属函数值, 如果  $W_j$  为负值, 则以  $(1 - U(X_j))$  代替式中  $U(X_j)$  [17]。

使用 Excel 2020 对表型数据进行整理, 用 SPSS 26 对表型数据及各抗旱指标进行描述统计及相关性分析, 采用 Origin 2018 进行聚类分析。

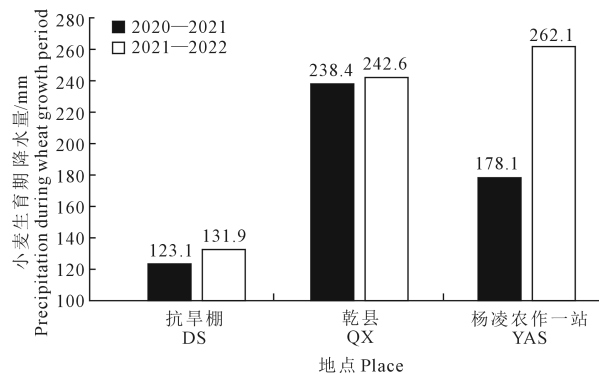
## 2 结果与分析

## 2.1 不同环境下小麦生育期降水量

如图 1 所示, 2020—2021 年度, 抗旱棚小麦生育期累计降水量为 123.1 mm, 乾县和杨凌农作一站小麦生育期累计降水量分别为 238.4 mm 和 178.1 mm。2021—2022 年度, 抗旱棚小麦生育期累计降水量为 131.9 mm, 乾县和杨凌农作一站分别为 242.6 mm 和 262.1 mm。抗旱棚处理接收的降水量较乾县和杨凌农作一站环境的少 55~130 mm 不等, 为干旱胁迫处理。

## 2.2 不同环境下小麦农艺性状和产量性状差异

在两个生长季 3 个环境下, 小麦高代系之间的农艺性状存在着较大的差异(表 1)。2020—2021



注: 柱上数字表示小麦生育期累计降水量。

Note: The numbers on the column represent the cumulative precipitation during the growth stages of wheat.

图 1 2020—2022 年抗旱棚、乾县和杨凌农作一站小麦生育期累计降水量

Fig.1 Accumulated precipitation during wheat growth period in Drought shelter, Qianxian and Yangling Agricultural Station 1 from 2020 to 2022

年度, 抗旱棚、乾县、杨凌农作一站农艺性状的变异系数范围分别为 7.45%~18.67%、4.97%~17.71%、5.10%~18.99%; 2021—2022 年度相应的变异系数范围分别为 4.26%~23.24%、4.95%~23.77%、4.20%~18.78%。2020—2021 年度, 干旱胁迫环境下穗下茎长显著低于自然大田环境; 2021—2022 年度, 干旱胁迫环境下株高和穗下茎长显著低于自然大田。

由表 2 可知, 小麦高代系之间的产量性状也存在较大的差异。2020—2021 年度, 抗旱棚、乾县、杨凌农作一站产量性状的变异系数范围分别为 7.04%~23.17%、5.77%~20.23%、5.20%~21.09%; 2021—2022 年度相应的变异系数范围分别为 4.19%~13.09%、4.99%~12.86%、6.58%~9.21%。干旱胁迫环境下籽粒产量和生物量均显著低于自然大田环境。各性状的变异系数范围处于合理区间, 表明供试小麦材料间农艺性状和产量性状存在一定差异, 研究群体的结构性较好; 且干旱对各性状产生了一定负面影响。

## 2.3 各性状对小麦抗旱性的贡献度

以抗旱棚为干旱胁迫环境, 计算 2020—2022 两年度乾县和杨凌农作一站两个环境下各性状的抗旱系数及其与抗旱指数的相关系数, 求得各性状对小麦高代系综合抗旱性的贡献度(表 3)。由表 3 可知, 两个生长季对小麦抗旱性贡献率较高的产量性状依次为籽粒产量(15.46%)、生物量(12.61%)、小穗数(9.96%)和千粒重(9.54%), 农艺性状分别为倒二叶长(9.15%)和倒二叶面积(8.18%)。产量性状对小麦抗旱性综合评价的累计贡献率为 68.47%, 而农艺性状累计贡献率仅为 31.53%。

表 1 2020—2022 年度不同环境(杨凌农作一站、乾县、抗旱棚)下小麦农艺性状  
Table 1 Agronomic traits in the three environments of Yangling Agricultural Station 1, Qianxian and Drought shelter in 2020–2022 growing season

年度 Year	环境 Environment	指标 Index	株高 PH/cm	旗叶长 FLL/cm	旗叶宽 FLW/cm	旗叶面积 FLA/cm <sup>2</sup>	倒二叶长 SLL/cm <sup>2</sup>	倒二叶宽 SLW/cm <sup>2</sup>	倒二叶面积 SLA/cm <sup>2</sup>	穗下茎长 SLS/cm	
2020—2021	DS	平均值 Average	93.50b	16.75a	1.63b	22.55a				25.26b	
		范围 Range	78.30~109.01	11.29~21.88	1.38~1.91	14.99~31.09					17.00~30.80
		变异系数 CV/%	7.45	14.88	7.20	18.67					10.15
2020—2021	QX	平均值 Average	96.99a	17.29a	1.70a	24.15a				27.13a	
		范围 Range	85.25~106.25	12.56~21.27	1.40~1.91	16.87~32.41					21.20~31.80
		变异系数 CV/%	4.97	13.64	6.63	17.71					8.36
2020—2021	YAS	平均值 Average	95.24ab	16.79a	1.67ab	23.10a				27.69a	
		范围 Range	88.67~113.00	12.83~20.03	1.21~2.00	16.22~32.44					17.00~35.60
		变异系数 CV/%	5.10	12.87	8.49	18.99					14.94
2021—2022	DS	平均值 Average	76.91c	16.73b	1.60b	21.59b	23.12a	1.38b	25.53a	23.58b	
		范围 Range	69.00~84.00	11.70~23.38	1.38~1.79	14.15~33.5	18.27~28.16	1.26~1.55	20.27~33.45	22.20~26.20	
		变异系数 CV/%	6.19	17.73	5.99	23.24	10.39	5.23	12.22	4.26	
2021—2022	QX	平均值 Average	83.27b	17.73b	1.67ab	23.95ab	21.10b	1.43ab	24.26a	27.59a	
		范围 Range	77.50~89.50	14.22~22.30	1.46~2.08	16.73~37.17	16.53~24.02	1.22~1.58	17.39~30.1	24.20~30.20	
		变异系数 CV/%	4.95	14.12	9.96	23.77	8.86	6.77	14.39	5.61	
2021—2022	YAS	平均值 Average	86.20a	19.51a	1.75a	27.56a	21.56b	1.46a	25.18a	28.12a	
		范围 Range	79.00~93.50	16.01~23.62	1.53~2.08	19.85~38.01	17.77~23.60	1.23~1.62	18.48~28.91	25.60~30.40	
		变异系数 CV/%	5.04	10.61	8.66	18.78	7.66	6.92	12.89	4.20	

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。DS: 抗旱棚; QX: 乾县; YAS: 杨凌农作一站。下同。

Note: In the same column, different lowercase letters indicate a significant difference at the 0.05 level. DS: Drought shelter; QX: Qianxian; YAS: Yangling Agricultural Station 1. The same below.

表 2 2020—2022 年度不同环境(杨凌农作一站、乾县、抗旱棚)下小麦产量性状  
 Table 2 Yield traits of three environments of Yangling Agricultural Station 1, Qianxian and Drought shelter in 2020–2022 growing season

年度 Year	环境 Environment	指标 Index	穗长 SL/cm	小穗数 SN	穗粒数 GN	成穗数 MSN	千粒重 TGW/g	生物量 BIO/(kg·hm <sup>-2</sup> )	籽粒产量 GY/(kg·hm <sup>-2</sup> )	收获系数 HI
2020—2021	DS	平均值 Average	8.63c	16.97b	47.58a	62.13a	46.38ab	12637.71c	5154.10b	0.41b
		范围 Range	6.22~12.45	14.91~19.74	37.62~60.52	37.20~81.60	31.88~59.71	6921.80~15884.52	3907.90~6593.31	0.29~0.61
		变异系数 CV/%	14.63	7.04	11.23	23.17	10.83	15.17	13.12	14.82
	QX	平均值 Average	9.27b	17.82a	49.57a	64.41a	46.90a	13930.63b	6259.14a	0.45a
		范围 Range	7.66~10.98	16.13~20.06	41.13~59.75	43.40~84.00	33.07~58.61	10948.94~16146.13	4298.27~8178.39	0.29~0.67
		变异系数 CV/%	9.21	5.77	9.53	17.97	10.73	8.59	17.52	20.23
YAS	平均值 Average	9.91a	17.89a	49.11a	65.86a	44.52b	15256.36a	6461.36a	0.42ab	
	范围 Range	7.51~11.98	16.25~19.67	41.67~60.00	43.60~82.40	32.26~62.39	10621.61~18140.12	4151.83~9083.76	0.27~0.60	
	变异系数 CV/%	9.84	5.20	9.31	17.19	13.69	8.90	21.09	17.44	
2021—2022	DS	平均值 Average	9.39a	20.70b	46.56c	53.28b	46.47a	11736.80b	5523.00b	0.47b
		范围 Range	7.76~11.13	19.50~23.00	36.18~50.54	41.20~69.20	42.38~49.84	10089.20~14104.20	4440.87~6773.31	0.40~0.50
		变异系数 CV/%	10.84	4.19	7.29	13.09	4.45	9.24	11.08	5.92
	QX	平均值 Average	9.85a	22.01a	52.45a	59.62a	46.37ab	15355.20a	7357.65a	0.48b
		范围 Range	8.35~11.15	19.30~24.00	45.69~58.08	45.00~72.20	41.60~50.52	10716.69~19153.62	5375.70~8743.35	0.38~0.55
		变异系数 CV/%	8.61	5.91	7.23	11.30	4.99	12.86	11.97	8.21
YAS	平均值 Average	9.63a	21.17ab	49.14b	62.95a	44.60b	14942.06a	7548.13a	0.51a	
	范围 Range	8.35~11.64	17.70~24.50	39.19~57.34	53.60~73.60	36.60~53.54	12615.08~16223.63	6428.73~9239.42	0.43~0.59	
	变异系数 CV/%	8.49	7.47	8.61	9.21	8.09	6.58	9.08	6.91	

2.4 小麦高代系的抗旱性综合评价

将 2020—2022 年度乾县和杨凌农作一站两地 *D* 值的平均值从大到小依次排列,同时进行聚类分析(表 4),结果表明,小麦材料可根据 *D* 值大小分为高抗旱型(HR)、抗旱型(R)、中等抗旱型(MR)、干旱敏感型(S)和干旱高敏感型(HS)共 5 个等级。2020—2021 年度筛选出 5 份高抗旱小麦材料,分别为 21-1、21-34、21-39、21-18、21-2,对照品种‘晋

麦 47’和‘中麦 175’在等级中分列第 7 和第 9(表 4),两品种均被聚类至抗旱型品种(R)。2021—2022 年度,22-17 被评定为高抗旱小麦材料,对照品种‘中麦 36’和‘晋麦 47’分列第 2 和第 6(表 5),分别被聚类于高抗旱型(HR)和抗旱型(R)品种。对照品种为公认的抗旱性较优的品种,本研究结果与实际生产相符,说明使用该方法对小麦抗旱性进行评价具有合理性和可行性。

表 3 产量性状和农艺性状的抗旱系数对小麦抗旱指数贡献率

Table 3 Contribution rate of drought resistance coefficient of yield traits and agronomic traits to the drought resistance index of wheat

性状 Trait	2020—2021 年度贡献率/% Contribution rate from 2020 to 2021		2020—2022 年度贡献率/% Contribution rate from 2021 to 2022		归一化/% Normalize	累计贡献率/% Cumulative contribution rate	排名 Rank
	QX	YAS	QX	YAS			
产量 Yield	GY	16.33	19.78	16.52	17.04	15.46	1
	BIO	13.89	12.87	16.06	14.00	12.61	2
	SN	12.70	13.12	11.70	7.38	9.96	3
	TWG	14.56	8.76	6.22	13.44	9.54	4
	HI	11.57	8.32	3.20	7.99	6.90	5
	GN	4.09	5.56	11.27	9.28	6.70	6
	SL	8.73	9.17	0.26	2.17	4.51	7
	MSN	4.37	4.55	-2.66	6.33	2.79	8
农艺 Agronomic	SLL			9.37	11.24	9.15	1
	SLA			7.96	10.48	8.18	2
	SLW			4.81	4.83	4.28	3
	FLA	3.33	5.40	6.04	0.35	3.35	4
	FLL	3.48	5.84	3.51	0.76	3.02	5
	FLW	1.19	3.01	6.66	-1.67	2.04	6
	SLS	4.30	8.29	-0.79	-3.84	1.77	7
	PH	1.47	-2.67	-0.13	0.20	-0.25	8

表 4 2020—2021 年度乾县和杨凌农作一站两环境各品种(系)抗旱性综合评价值 *D*

Table 4 Drought resistance index, *D* value of wheat advanced lines in Qianxian and Yangling Agricultural Station 1 in 2020—2021 growing season

编号 No.	乾县 QX	杨凌农作一站 YAS	排名 Rank	等级 Grade	编号 No.	乾县 QX	杨凌农作一站 YAS	排名 Rank	等级 Grade
21-1	0.62	0.68	1	HR	21-29	0.40	0.38	24	MR
21-34	0.67	0.55	2	HR	21-23	0.42	0.35	25	MR
21-39	0.67	0.55	3	HR	21-6	0.43	0.34	26	MR
21-18	0.56	0.64	4	HR	21-15	0.43	0.31	27	MR
21-2	0.61	0.58	5	HR	21-40	0.40	0.31	28	S
21-20	0.58	0.55	6	R	21-24	0.37	0.34	29	S
晋麦 47 Jinmai 47	0.63	0.50	7	R	21-10	0.39	0.32	30	S
21-17	0.63	0.49	8	R	21-9	0.37	0.34	31	S
中麦 175 Zhongmai 175	0.52	0.55	9	R	21-4	0.37	0.33	32	S
21-8	0.55	0.52	10	R	21-3	0.35	0.35	33	S
21-37	0.48	0.58	11	R	21-42	0.34	0.35	34	S
21-14	0.54	0.49	12	R	21-30	0.36	0.34	35	S
21-25	0.50	0.49	13	R	21-31	0.38	0.31	36	S
21-35	0.51	0.47	14	R	21-27	0.35	0.33	37	S
21-43	0.48	0.46	15	R	21-16	0.36	0.32	38	S
21-32	0.48	0.46	16	R	21-28	0.32	0.32	39	S
21-38	0.48	0.40	17	MR	21-7	0.33	0.30	40	S
21-36	0.43	0.42	18	MR	21-21	0.34	0.27	41	S
21-26	0.43	0.41	19	MR	21-44	0.26	0.26	42	HS
21-13	0.42	0.42	20	MR	21-33	0.26	0.24	43	HS
21-5	0.43	0.40	21	MR	21-11	0.25	0.23	44	HS
21-19	0.46	0.37	22	MR	21-22	0.25	0.21	45	HS
21-41	0.40	0.39	23	MR					

表 5 2021—2022 年度乾县和杨凌农作一站各品种(系)抗旱性综合评价值  $D$   
Table 5 Drought resistance index,  $D$  value of wheat advanced lines in Qianxian and  
Yangling Agricultural Station 1 in 2021–2022 growing season

编号 No.	乾县 QX	杨凌农作一站 YAS	排名 Rank	等级 Grade	编号 No.	乾县 QX	杨凌农作一站 YAS	排名 Rank	等级 Grade
22-17	0.71	0.63	1	HR	22-4	0.43	0.39	12	MR
中麦 36 Zhongmai 36	0.63	0.57	2	HR	22-14	0.42	0.38	13	S
22-16	0.68	0.51	3	R	22-20	0.35	0.42	14	S
22-7	0.62	0.55	4	R	22-6	0.25	0.49	15	S
22-8	0.55	0.59	5	R	22-9	0.33	0.42	16	S
晋麦 47 Jinmai 47	0.59	0.53	6	R	22-19	0.39	0.32	17	S
22-12	0.44	0.67	7	R	22-12	0.39	0.26	18	HS
22-5	0.54	0.54	8	R	22-21	0.28	0.34	19	HS
22-1	0.41	0.58	9	MR	22-2	0.22	0.38	20	HS
22-15	0.46	0.49	10	MR	22-18	0.32	0.27	21	HS
22-9	0.42	0.47	11	MR	22-13	0.20	0.27	22	HS

表 6 2020—2022 年度各生长季乾县和杨凌农作一站两地  $D$  和抗旱指数 ( $DI$ ) 的相关性  
Table 6 Correlation between  $D$  and drought resistance index ( $DI$ ) in Qianxian and  
Yangling Agricultural Station 1 in the two growing seasons of 2020–2022

年度 Year	指标 Index	均值±标准差 Mean±SD	范围 Range	变异系数 CV/%	相关系数 Correlation coefficient			
					$D$ -QX	$D$ -YAS	$DI$ -QX	$DI$ -YAS
2020—2021	$D$ -QX	0.52 ± 0.11	0.29~0.70	22.14	1.000	0.540 **	0.450 *	0.694 **
	$D$ -YAS	0.47 ± 0.10	0.26~0.68	21.67		1.000	0.520 *	0.610 **
	$DI$ -QX	0.93 ± 0.10	0.75~1.09	10.67			1.000	0.932 **
	$DI$ -YAS	1.00 ± 0.11	0.81~1.20	10.90				1.000
2021—2022	$D$ -QX	0.44 ± 0.15	0.20~0.71	33.55	1.000	0.678 **	0.714 **	0.541 **
	$D$ -YAS	0.46 ± 0.12	0.26~0.67	26.36		1.000	0.826 **	0.827 **
	$DI$ -QX	0.91 ± 0.12	0.71~1.13	12.88			1.000	0.965 **
	$DI$ -YAS	0.89 ± 0.11	0.67~1.11	12.73				1.000

2020—2021 年度,乾县和杨凌农作一站  $D$  值的变异系数分别为 22.14% 和 21.67%,抗旱指数  $DI$  的变异系数分别为 10.67% 和 10.90%;2021—2022 年度,乾县和杨凌农作一站  $D$  值变异系数分别为 33.55% 和 26.36%, $DI$  的变异系数分别为 12.88% 和 12.73%(表 6), $D$  值的变异系数高于  $DI$ 。通过分析  $D$  值和  $DI$  的相关性发现,两年度两地的  $D$  值均显著相关,相关系数分别为 0.540 和 0.678; $DI$  间亦显著相关,两年度相关系数分别为 0.932 和 0.965。结果表明乾县和杨凌农作一站两地对小麦高代系的抗旱性评价结果较为一致。

## 3 讨论

### 3.1 小麦抗旱性指标的筛选

小麦品种的抗旱性反映在一系列农艺性状上,最终通过产量性状表达出来。在 2020—2022 年度两个小麦生长季的 3 个环境下,株高、旗叶宽、倒二叶宽、穗下茎长、穗粒数、生物量和籽粒产量的变异系数较大,说明其对干旱胁迫的响应较强烈。本研究发现,抗旱棚与两个自然环境之间农艺性状及产量性状有较大差异,这与 Koocheki 等<sup>[19]</sup> 研究得出的干旱环境对包括籽粒产量在内的大部分性状均有

显著影响的结论相吻合。

产量性状是小麦最重要的性状之一,产量抗旱系数常用以反映小麦抗旱能力。然而,产量抗旱系数难以反映品种的丰产水平,在小麦抗旱性鉴定方面存在一定的局限性。抗旱指数可以兼顾抗旱性和丰产性,是一个较为全面的表征指标<sup>[20]</sup>。本研究通过两个生长季 3 个环境下的小麦抗旱性研究发现,生物量、籽粒产量、小穗数和千粒重的抗旱系数对抗旱指数的贡献率较高,贡献率分别为 15.46%、12.61%、9.96% 和 9.54%。崔桂宾等<sup>[21]</sup> 研究认为,干旱胁迫下小麦的单株产量、有效穗数、穗粒数等产量相关性状与抗旱评价指标之间均存在极显著正相关关系。王优信等<sup>[22]</sup> 通过产量的抗旱指数与高稳系数相结合的方法对 38 个小麦品种的抗旱性进行鉴定,发现以产量为基础的抗旱指数可用来评价小麦品种的抗旱性。这与本研究中产量的抗旱性对小麦整体抗旱性有较大贡献率的结果一致。此外,本试验中小穗数和千粒重的抗旱系数与抗旱指数呈显著正相关关系的结论与闫金龙等<sup>[23]</sup> 的研究结果一致。说明在干旱胁迫下千粒重可以作为衡量小麦抗旱性的重要指标。

### 3.2 小麦抗旱性综合评价

抗旱性综合评价值  $D$  作为小麦抗旱性评价的重要指标,其优点是能够综合多个性状的信息,对小麦的抗旱性进行全面准确的评价<sup>[24-26]</sup>。为检验  $D$  值的准确性,张军等<sup>[18]</sup>对不同品种小麦抗旱指数与  $D$  值进行相关性分析,发现二者存在一定的相关性;这与本文中乾县和杨凌农作一站两地  $D$  值与抗旱指数具有显著相关性的研究结果相似。此外,本研究中对照品种‘晋麦 47’在乾县和杨凌农作一站 2020—2021 年度生长季的  $D$  值分别为 0.63 和 0.50, 2021—2022 年度生长季  $D$  值分别为 0.59 和 0.53,  $D$  值的年际波动较小,表明用其评价小麦抗旱性结果比较稳定。

王优信等<sup>[27]</sup>通过计算抗旱性综合评价值  $D$  和抗旱指数  $DI$  的方法对 13 个小麦品种进行了抗旱性鉴定,结果表明‘中麦 175’排名第 3,属于抗旱型品种(R)。本研究中对照品种‘中麦 175’在 45 份小麦品种(系)中排名第 9,聚类分析也表明其属于抗旱型品种(R),与前人结论一致。本研究还表明,对照品种‘晋麦 47’在两年的抗旱性鉴定中分别排在第 7 和第 6,属于抗旱型品种(R)。张军等<sup>[18]</sup>通过在灌浆期测定 7 个冬小麦品种(系)的 19 个生物学性状,并基于  $D$  值进行抗旱性鉴定表明‘晋麦 47’属于强抗旱型小麦,与本研究的抗旱性鉴定结果基本一致。在单一环境进行作物抗旱性鉴定可能存在一定误差。赵岩等<sup>[28]</sup>为提高抗旱性鉴定的准确性,在乌鲁木齐、泰安和淄博 3 个不同的自然环境下对 119 份小麦材料的抗旱性进行评价,认为基于不同干旱程度、土壤类型和不同气候条件下的小麦抗旱能力评价结果更加全面可靠。本研究于两个生长季在 3 个不同的环境下对供试小麦高代系的抗旱性进行综合评价,结果表明自然环境和干旱胁迫环境下评价结果较为一致,说明采用的方法抗旱性评价结果准确,可信度较高。

## 4 结 论

1)两个生长季三种环境下,小麦高代系之间的农艺性状和产量性状均存在一定差异,抗旱棚、乾县和杨凌农作一站农艺性状的变异系数范围分别为 4.26%~23.24%、4.95%~23.77% 和 4.20%~18.99%,产量性状的变异范围分别为 4.19%~23.17%、4.99%~20.23% 和 5.20%~21.09%。各性状的变异系数范围处于合理区间,表明供试小麦材料间农艺性状和产量性状存在一定差异,研究群体的结构性较好。

2)两个生长季三种环境下,产量性状对小麦抗旱性综合评价的累计贡献率为 68.47%,而农艺性状累计贡献率为 31.53%;生物量、籽粒产量、小穗数、千粒重可作为衡量小麦抗旱性的重要指标。在保障小穗数的基础上提高千粒重可作为今后培育抗旱高产小麦品种的主攻方向。

3)通过抗旱性综合评价值  $D$  和聚类分析的方法进行小麦抗旱性鉴定,2020—2021 年度 43 个供试材料中共筛选出 5 个抗旱性较好的小麦高代系,分别为 21-1、21-34、21-39、21-18 和 21-2;2021—2022 年度 20 个供试材料中筛选出 1 个抗旱性较好的高代系:22-17。

### 参 考 文 献:

- [1] HUI-MEAN F O, YUSOP Z, YUSOF F. Drought analysis and water resource availability using standardised precipitation evapotranspiration index[J]. Atmospheric Research, 2018, 201: 102-115.
- [2] CAMAILLE M, FABRE N, CLÉMENT C, et al. Advances in wheat physiology in response to drought and the role of plant growth promoting rhizobacteria to trigger drought tolerance[J]. Microorganisms, 2021, 9 (4): 687.
- [3] LESK C, ROWHANI P, RAMANKUTTY N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. Nature, 2016, 529 (7584): 84-87.
- [4] GUPTA A, RICO-MEDINA A, CAÑO-DELGADO A I. The physiology of plant responses to drought[J]. Science, 2020, 368(6488): 266-269.
- [5] 李瑞雪, 孙任洁, 汪泰初, 等. 植物抗旱性鉴定评价方法及抗旱机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2017, 33(7): 40-48.
- [6] LI R X, SUN R J, WANG T C, et al. Research progress on identification and evaluation methods, and mechanism of drought resistance in plants[J]. Biotechnology Bulletin, 2017, 33(7): 40-48.
- [7] MORGAN J M. Osmotic components and properties associated with genotypic differences in osmoregulation in wheat[J]. Functional Plant Biology, 1992, 19(1): 67-76.
- [8] 胡标林, 李名迪, 万勇, 等. 我国水稻抗旱性鉴定方法与指标研究进展[J]. 江西农业学报, 2005, 17(2): 56-60.
- [9] HU B L, LI M D, WAN Y, et al. Advances in identification methods and indexes of rice resistance to drought in China [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2005, 17(2): 56-60.
- [10] 郭文善, 封超年, 严六零, 等. 小麦开花后源库关系分析[J]. 作物学报, 1995, 21(3): 334-340.
- [11] GUO W S, FENG C N, YAN L L, et al. Analysis on source-sink relationship after anthesis in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 1995, 21 (3): 334-340.
- [12] PATMI Y S, PITOYO A, SOLICHATUN, et al. Effect of drought stress on morphological, anatomical, and physiological characteristics of Cempo Ireng cultivar mutant rice (*Oryza sativa* L.) strain 51 irradiated by gamma-ray[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1436 (1): 012015.
- [13] FAROOQ M, WAHID A, KOBAYASHI N, et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management[J]. Agronomy for Sus-



- tainable Development, 2009, 29(1): 185-212.
- [11] AHMADI A, BAKER D A. The effect of water stress on the activities of key regulatory enzymes of the sucrose to starch pathway in wheat [J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, 35(1): 81-91.
- [12] 冀天会. 小麦抗旱性鉴定评价指标比较研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- JI T H. A comparative study on index of wheat varieties drought resistance[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006.
- [13] 冀天会, 张灿军, 杨子光, 等. 水旱生态型冬小麦品种杂种优势分析[J]. *麦类作物学报*, 2003, 23(4): 19-22.
- JI T H, ZHANG C J, YANG Z G, et al. Heterosis of winter wheat crossed between irrigated-field varieties and dry-field varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(4): 19-22.
- [14] 张秋英, 李发东, 刘孟雨, 等. 不同水分条件下小麦旗叶绿素 a 荧光参数与子粒灌浆速率[J]. *华北农学报*, 2003, 18(1): 26-28.
- ZHANG Q Y, LI F D, LIU M Y, et al. Chlorophyll a fluorescence parameters of flag leaf of the wheat and seed grouting under different water treatments[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2003, 18(1): 26-28.
- [15] 孙彩霞, 沈秀瑛. 作物抗旱性鉴定指标及数量分析方法的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2002, 18(1): 49-51.
- SUN C X, SHEN X Y. Advances in studies on identification indexes and methods of quantitative analyses for crop drought resistance[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2002, 18(1): 49-51.
- [16] 李德全, 郭清福, 张以勤, 等. 冬小麦抗旱生理特性的研究[J]. *作物学报*, 1993, 19(2): 125-132.
- LI D Q, GUO Q F, ZHANG Y Q, et al. Studies on the physiological characteristics of drought resistance in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1993, 19(2): 125-132.
- [17] 孙艳艳. 小麦 RIL 群体萌发期抗旱相关性状 QTL 分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- SUN Y Y. QTL analysis for drought resistance related traits of wheat at germination stage in rilpopulation[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019.
- [18] 张军, 鲁敏, 孙树贵, 等. 7 个冬小麦品种灌浆期抗旱性鉴定指标的综合评价[J]. *植物科学学报*, 2014, 32(2): 148-157.
- ZHANG J, LU M, SUN S G, et al. Screening indexes for drought resistance of seven winter wheat cultivars at the grain-filling stage[J]. *Plant Science Journal*, 2014, 32(2): 148-157.
- [19] KOOCHEKI A R, YAZDANSEPAS A, MAHMADYOROV U, et al. Physiological-based selection criteria for terminal drought in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16: 1043-1053.
- [20] 兰巨生, 胡福顺, 张景瑞. 作物抗旱指数的概念和统计方法[J]. *华北农学报*, 1990, 5(2): 20-25.
- LAN J S, HU F S, ZHANG J R. The concept and statistical method of drought resistance index in crops [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1990, 5(2): 20-25.
- [21] 崔桂宾, 雷楠, 王勇锋, 等. 黄淮流域部分小麦种质材料抗旱和品质特性的评价及筛选[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(11): 1409-1418.
- CUI G B, LEI N, WANG Y F, et al. Evaluation and screening of drought resistance and grain quality of wheat germplasm in yellow-Huai river basin [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(11): 1409-1418.
- [22] 王优信, 蔺明月, 张雪花, 等. 河北省黑龙港流域小麦抗旱品种筛选[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(6): 22-29.
- WANG Y X, LIN M Y, ZHANG X H, et al. Screening for drought resistant wheat varieties in Heilonggang area of Hebei province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(6): 22-29.
- [23] 闫金龙, 张俊灵, 张东旭, 等. 旱作雨养条件下小麦农艺性状与产量及抗旱性的关系[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(10): 1766-1769, 1777.
- YAN J L, ZHANG J L, ZHANG D X, et al. Relationship between agronomic characters, yield and drought resistance of wheat under rain-fed dry farming conditions [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(10): 1766-1769, 1777.
- [24] 李云. 不同冬小麦品种抗旱性鉴定及抗旱指标研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- LI Y. Drought resistance identification and research in drought indexes of different winter wheat cultivars [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009.
- [25] 陈卫国, 张政, 史雨刚, 等. 211 份小麦种质资源抗旱性的评价[J]. *作物杂志*, 2020, (4): 53-63.
- CHEN W G, ZHANG Z, SHI Y G, et al. Drought-tolerance evaluation of 211 wheat germplasm resources [J]. *Crops*, 2020, (4): 53-63.
- [26] 蔺豆豆, 赵桂琴, 琚泽亮, 等. 15 份燕麦材料苗期抗旱性综合评价[J]. *草业学报*, 2021, 30(11): 108-121.
- LIN D D, ZHAO G Q, JU Z L, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 15 oat varieties at the seedling stage [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(11): 108-121.
- [27] 王优信, 延荣, 蔺明月, 等. 冀中北小麦品种抗旱性筛选研究[J]. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(1): 74-82.
- WANG Y X, YAN R, LIN M Y, et al. Screening for drought-resistant wheat varieties in northern central area of Hebei province [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(1): 74-82.
- [28] 赵岩, 马艳明, 蒋方山, 等. 黄淮麦区小麦品种(系)成株期抗旱性综合评价[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(12): 4100-4107.
- ZHAO Y, MA Y M, JIANG F S, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of wheat cultivars (lines) in Huang-Huai wheat region at adult stage [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(12): 4100-4107.