

小偃麦衍生系萌发期和成株期抗旱性综合评价

常利芳, 乔彦玮, 陈芳, 乔麟轶, 郭慧娟, 李欣, 张树伟, 畅志坚, 张晓军

(山西农业大学农学院, 太原 030031)

摘要: 干旱是影响小麦高产稳产的最突出因素之一。筛选优异抗旱种质资源、培育抗旱品种, 对小麦育种及产业发展具有重要意义。本研究分别在种子萌发期和成株期对 180 份小偃麦高代稳定衍生系进行了抗旱性鉴定, 通过测定根长、生物量以及产量相关性状, 结合主成分分析、隶属函数分析和相关分析对其不同生育时期的抗旱性进行综合评价。结果表明, 不同生育时期的干旱胁迫均导致抗旱相关指标的显著降低, 种子萌发期以叶鲜重、根鲜重、苗高和最大根长降低最多, 成株期以株高、单株产量降低最多。不同生育时期各测定指标的抗旱系数分布均有明显差异。种子萌发期和成株期的综合抗旱评价 D 值之间相关性不显著, 成株期抗旱综合评价 D 值与单株产量、萌发期最大根长和叶干重抗旱系数呈显著相关。基于主成分分析和隶属函数分析的抗旱性综合评价 D 值划分小偃麦衍生系的抗旱等级, 其中萌发期有 24 份、成株期有 28 份衍生系均为极强抗旱型。综合评价筛选出 11 份在萌发期和成株期均表现较强抗旱性的小偃麦衍生系, 可以作为小麦抗旱育种及遗传研究的优异种质资源。

关键词: 小偃麦衍生系; 抗旱性; 隶属函数法; 主成分分析; 综合评价

Comprehensive Evaluation on Drought Resistance of Wheat-*Thinopyrum intermedium* Introgression Lines at Germination and Adult Stages

CHANG Lifang, QIAO Yanwei, CHEN Fang, QIAO Linyi, GUO Huijuan, LI Xin,

ZHANG Shuwei, CHANG Zhijian, ZHANG Xiaojun

(College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031)

Abstract: Drought is one of the most prominent factors that negatively affect the yield quantity and stability of wheat production. It is of great significance to select elite drought-resistant germplasm resources and cultivate drought-resistant varieties. In this study, the drought resistance of 180 wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression lines was comprehensively evaluated at seed germination stage and adult plant stage. By measuring morphological indicators such as root length, biomass and yield-related traits, combined with principal component analysis, membership function analysis and correlation analysis, drought resistance at two growth stages was evaluated. The results showed that drought stress at two growth stages could result in significant decrease considering the drought-resistant related indicators. Shoot fresh weight, root fresh weight, shoot height and maximum root length decreased significantly at germination stage, and plant height and yield per plant decreased significantly at adult stage. The distributions of drought resistance coefficients of each indicator at

收稿日期: 2023-03-18 修回日期: 2023-04-11 网络出版日期: 2023-05-06

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230318001>

第一作者研究方向为小麦种质资源鉴定评价及分子育种, E-mail: changlifang@sxau.edu.cn

通信作者: 畅志坚, 研究方向为小麦遗传改良与种质创新, Email: wrczj@126.com

张晓军, 研究方向为小麦遗传改良与种质创新, E-mail: zxjemail@163.com

基金项目: 山西省来晋工作奖励资金科研项目(SXBYKY2021001); 山西省农业科学院农业科技创新研究课题(YBSJJ2009); 农业农村部政府购买服务项目(19221921); 山西省农业科学院作物科学研究所博士基金(ZB1902)

Foundation projects: Scientific Research Project of Shanxi Province Work Award Fund (SXBYKY2021001); Agricultural Science and Technology Innovation Research Project of Shanxi Academy of Agricultural Sciences (YBSJJ2009); Government Purchase Service Project of Ministry of Agriculture and Rural Affairs (19221921); Doctoral Fund of Crop Science Research Institute of Shanxi Academy of Agricultural Sciences (ZB1902)

different growth stages were significantly different. No significant correlation between the D value of comprehensive drought resistance evaluation at seed germination stage and adult stage was detected, but the D value at adult stage was significantly correlated with the drought resistance coefficients of yield per plant, the maximum root length and shoot dry weight at germination stage. The drought resistance of 180 derived lines was classified using the D value of comprehensive evaluation of drought resistance based on principal component analysis and membership function analysis. As a result, 24 lines at germination stage and 28 lines at adult stage were identified showing extremely drought resistant. Especially, 11 elite lines showing strong drought resistance at both germination and adult stages were obtained, which can be used as excellent germplasm resources for wheat drought-resistant breeding and genetic research.

Key words: Wheat-*Thinopyrum intermedium* introgression line; drought resistance; membership function method; principal component analysis; comprehensive evaluation

气候模型预测显示,未来全球气温上升和极端天气事件将持续存在,甚至会进一步恶化。长期少雨及持续热浪导致水资源紧缺愈发严重,干旱已成为导致全球作物减产的最突出因素之一^[1-2]。我国近47%的国土面积属于干旱半干旱地区,水资源短缺严重制约农业生产的可持续发展。小麦(*Triticum aestivum* L.)是世界上三大粮食作物之一,其高产稳产直接影响着国家粮食安全和国计民生^[3-4]。发掘和利用不同生育时期优异抗旱种质、培育抗旱品种、提高品种的水分利用效率对于保障国家粮食安全、生态安全和农业可持续发展具有重要意义^[5-6]。

小麦不同生育时期的干旱胁迫引起不同的响应过程,包括农艺性状、生理、细胞和生化等多方面变化,因而抗旱性的鉴定评价也较为复杂^[7-8]。目前,小麦抗旱性鉴定方法主要有种子萌发期鉴定、苗期鉴定和田间成株期鉴定,分别适用于不同生育时期的抗旱性评价。萌发期是小麦生长发育的起始,也是衡量小麦材料抗旱性强弱的重要时期^[9-11],直接影响着田间出苗与幼苗长势,进而影响大田基本苗数与群体整齐度,最终影响小麦产量^[12-13]。萌发期多采用聚乙二醇-6000(PEG-6000)模拟干旱胁迫条件,测定发芽率、根长、植株生物量以及生理指标等评价其抗旱性^[9, 10, 14]。Lin等^[10]利用PEG模拟干旱条件,测定了645个中国小麦地方品种的与根系、幼苗生长相关的16个苗期性状,根据隶属函数法获得的综合评价 D 值筛选出极端抗旱和极端敏感种质用于小麦抗旱育种和遗传研究。成株期是最能直观反映材料抗旱性强弱的时期,在田间逆境条件下考察材料的产量相关性,对其抗旱性进行综合评价,可以为生产提供直接的参考依据,但受环境影响较大,需要多年多环境鉴定。李龙等^[15]利

用田间直接鉴定法鉴定了323份小麦种质的成株期抗旱性,发现小麦成株期单株产量抗旱系数与综合抗旱性度量 D 值之间具有很好的一致性,基于 D 值筛选出30份成株期强抗旱种质。王优信等^[16]在大田条件下设置冬后浇2水、浇1水和不浇水3种处理方式对13个品种进行了抗旱性筛选,以抗旱指数、加权抗旱指数和抗旱综合度量 D 值等综合评价筛选出中麦1062、河农825等优异抗旱性品种。不同小麦产区的干旱发生时期和程度不同,相比前人特定生育时期的抗旱性鉴定评价及种质筛选,开展不同生育时期的抗旱性鉴定能够更加全面的认识材料的抗旱性,更好的服务于小麦抗旱育种及遗传研究。

作物抗旱性各项指标或性状之间相关性显著,单一指标或单一方法很难准确全面的评价其抗旱性,需要鉴定多个指标并结合聚类分析、主成分分析、模糊隶属函数法和灰色关联度分析等方法进行综合评价,弥补单个指标评价片面的不足。多指标综合评价方法现已经广泛应用于小麦^[15-17]、水稻(*Oryza sativa* L.)^[18]、玉米(*Zea mays* L.)^[19]、棉花(*Gossypium* spp.)^[20]、大豆(*Glycine max* (L.) Merr.)^[21-22]、谷子(*Setaria italica* (L.) Beauv.)^[23]和大麦(*Hordeum vulgare* L.)^[24]等多种作物不同生育时期的抗旱性评价。李其勇等^[18]利用PEG模拟干旱对6份川香29B近等基因导入系进行芽期抗旱鉴定,测定了发芽率、根长和根干重等相关指标,通过相关分析和隶属函数法进行综合评价。徐银萍等^[24]在田间正常灌水和干旱胁迫条件下,测定了30份大麦种质多个产量指标,采用抗旱性度量值(D)、综合抗旱系数(CDC, comprehensive drought resistance coefficient)、加权抗旱系数(WDC, weight drought resistance coefficient)、主成分分析、

灰色关联度分析、隶属函数分析、聚类分析和逐步回归分析等方法,筛选出5个成株期抗旱性较强的品种,并确定了穗长、单株粒数和单株粒重等抗旱评价指标。

山西省地处我国干旱半干旱地区,降水量严重不足,且年内分布极不均匀,筛选优良抗旱种质资源,选育抗旱和水分高效利用品种一直是山西小麦育种工作的重中之重。赵佳佳等^[25]在土培条件下,研究了239份山西省小麦品种(系)的苗期根系性状对水分胁迫的响应,发现山西小麦抗旱能力随年代呈先降后升的趋势。小麦的近缘植物具有抗病、抗旱、抗寒等优良性状,是小麦遗传改良的宝贵基因资源库^[26],发掘和利用这些种质资源,挖掘其所含的优异抗旱基因,对于促进小麦抗旱育种及遗传研究具有重要意义^[27-28]。Chang等^[29]利用染色体异源重组技术将中间偃麦草(*Elytrigia intermedium* Barkworth & D.R.Dewey)和长穗偃麦草(*Elytrigia elongata*(Podp.)Barkworth & D.R.Dewey)片段转移到普通小麦,创制了多个八倍体小偃麦新类型,并通过与普通小麦杂交、回交获得一大批染色体数目为42的高代稳定衍生系,已鉴定出含有抗白粉病^[30]、条锈病^[31]、叶锈病^[32]、赤霉病^[33]、耐盐^[34]及产量性状优异^[35]等性状的材料,但尚未开展抗旱性鉴定相关研究。本研究通过对180份小偃麦衍生系种子萌发期的发芽相关性状、形态及生物量指标测定,以及田间成株期的产量相关性状考察,结合相关分析、主成分分析和隶属函数分析等方法综合评价其抗旱性,以期筛选出优异抗旱资源,为小麦抗旱种质的精准鉴定、抗旱性育种及抗旱遗传研究等提供材料和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为186个小麦品种(系)(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230318001>,附表1),包括来源于中间偃麦草和长穗偃麦草的180个高代稳定衍生系,萌发期抗旱对照品种晋麦47、运旱618和长6878,其中长6878和晋麦47均为国家旱地小麦区试对照品种,成株期抗旱对照品种辽春10号、台长29和中国春。以上材料均由山西省作物遗传与分子改良重点实验室保存。

1.2 种子萌发期抗旱性鉴定

参考景蕊莲等^[36]的方法,以19.2% PEG-6000水溶液(W/V)模拟干旱胁迫。2021年收获后,每个材

料选大小均匀饱满的籽粒120粒,用蒸馏水冲洗3次,5%的NaClO消毒15min,再用蒸馏水冲洗3次,种胚向上摆放于双层滤纸作为基质的培养皿中(直径9cm),每个培养皿20粒种子。每个材料设置去离子水和PEG-6000胁迫2个处理,每个处理设3个重复,处理和对照分别加入8mL的PEG-6000溶液和去离子水。置于恒温22℃、相对湿度60%的人工气候培养箱中培养,光照/黑暗时间为12h/12h,光照强度150 μmol/m²·s。每隔两天分别加入适量相等的溶液。

从放至培养皿第2天(24 h)起每天调查记录发芽数,直到第8天(168 h)。胚根长大于或等于种子长,或胚芽长大于或等于1/2种子长时视为发芽。根据下列公式统计发芽势、发芽率和计算发芽指数。培养的第8天,每个处理随机选10株幼苗,测量最大根长、根数、胚芽鞘长及苗高。将幼苗从根茎连接处分开,分别称量叶鲜重和根鲜重,再置于烘箱105℃杀青20 min,70℃烘干至恒重后,称量叶干重和根干重,计算鲜根冠比和干根冠比。叶鲜重、叶干重、根鲜重和根干重均为每个材料10株的总重。

发芽势 = 第3天发芽种子数/20×100%;

发芽率 = 第7天发芽种子数/20×100%;

发芽指数 = $\sum (Gt/Dt)$,其中,Gt为第t天发芽种子数,Dt为相应的发芽日数。

1.3 成株期抗旱性鉴定

成株期抗旱性鉴定试验于2021年和2022年春季在山西农业大学东阳试验基地进行,设置旱地和水地2个处理。旱地为自然雨养条件,仅播种前浇底墒水,水地于播种前、孕穗期及灌浆期正常灌溉。每个材料种植2行,行长2 m,行距40 cm,按40粒/行播种。常规田间管理。2021年材料生长季降水为64.2 mm,主要分布在成熟期,2022年生长季降水36.9 mm,但分布比较均匀,各生长时期均有降水。

收获后每行取中间10株,参照《小麦种质资源描述规范和数据标准》^[37]分别测定单株产量、单株穗数、穗粒数、千粒重和株高等5个产量相关性状。

1.4 数据处理及分析

参照李海明等^[20]的方法计算各材料单项指标的抗旱系数。公式如下:

$$\text{抗旱系数} DC = X_i / CK_i, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中, X_i 、 CK_i 分别表示第*i*个指标在PEG胁迫和对照处理的性状测定值。

对测定指标的抗旱系数进行主成分分析,根据

贡献率计算各指标因子权重 W_i :

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中, W_i 表示第 i 个主成分在所有主成分中的重要程度, P_i 表示各材料第 i 个综合指标贡献率, n 为主成分的数目。

采用模糊隶属函数法计算各材料测定指标抗旱系数的隶属函数值 $U(X_i)$, 公式如下:

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

式中, $U(X_i)$ 为第 i 个指标的隶属函数值, X_i 为第 i 个综合指标, $X_{i\max}$ 和 $X_{i\min}$ 分别表示第 i 个综合指标的最大值和最小值。

根据隶属函数值 $[U(X_i)]$ 和因子权重 (W_i) 计算材料综合抗旱评价 D 值, D 值越大, 表示抗旱能力越强。

$$D = \sum_{i=1}^n U(X_i) \times W_i, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

利用 Excel 2010 整理试验数据, SPSS 21.0 软件进行 t 测验、相关性分析和主成分分析。利用 Origin 2021 软件绘制盒子图。参考路贵和等^[38] 的均值-标准差分级法对供试材料的抗旱性评价 D 进行等级划分。

表 1 PEG 胁迫处理对供试材料种子萌发期各性状的影响

Table 1 Effect of PEG simulated drought stress on each trait of tested lines at germination stage

处理 Treatment	参数 Parameter	发芽势 (%) GP	发芽率 (%) GR	发芽指 数 GI	最大根 长 (cm) MRL	根数 RN	苗高 (cm) SH	胚芽鞘 长(cm) CL	叶鲜重 (g) SFW	根鲜重 (g) RFW	叶干重 (g) SDW	根干重 (g) RDW	鲜根冠 比 FRSR	干根冠 比 DRSR
对照 Control	平均值	96.68	98.09	9.22	14.59	4.71	11.25	3.35	0.94	0.84	0.10	0.08	0.90	0.81
	最大值	100.00	100.00	11.06	18.03	5.88	14.79	4.77	1.28	1.31	0.14	0.11	1.62	1.16
	最小值	76.70	85.00	6.31	9.73	3.38	8.00	2.24	0.68	0.47	0.06	0.05	0.53	0.54
	标准差	0.0403	0.0260	0.7279	1.5419	0.4727	1.1579	0.5890	0.1237	0.1490	0.0147	0.0132	0.1497	0.128
	变异系数 (%)	4.17	2.65	7.89	10.57	10.03	10.29	17.59	13.13	17.66	14.76	16.36	16.62	15.68
PEG 处理 PEG stress	平均值	73.71	96.31	6.41	7.97	4.76	5.99	3.49	0.39	0.35	0.06	0.06	0.91	0.94
	最大值	100	100	9.58	13.22	5.86	9.11	4.97	0.65	0.56	0.1	0.09	1.86	1.91
	最小值	2.50	81.70	3.78	2.68	3.15	0.00	2.12	0.17	0.19	0.01	0.03	0.56	0.58
	标准差	0.2229	0.0391	0.9505	1.8008	0.5502	1.184	0.6519	0.0830	0.0713	0.0143	0.0133	0.1984	0.3685
	变异系数 (%)	30.24	4.06	14.83	22.58	11.56	19.77	18.67	21.17	20.37	22.98	23.53	21.74	39.08
较对照变化 Comparison with the control	平均值降 幅(%)	-23.76	-1.81	-30.50	-45.34	0.98	-46.76	4.30	-58.37	-58.52	-37.22	-29.73	1.34	15.49
	变异系数 差值(%)	26.07	1.41	6.94	12.01	1.53	9.48	1.08	8.04	2.71	8.22	7.17	5.12	23.40
	t 测验的 P 值	0**	0**	0**	0**	0.0984	0**	0**	0**	0**	0**	0**	0.0422*	0**

*, ** 分别表示配对 t 测验达显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 差异, 下同

GP: Germination potential; GR: Germination rate; GI: Germination index; MRL: Maximum root length; RN: Root number; SH: Shoot height; CL: Coleoptile length; SFW: Shoot fresh weight; SDW: Shoot dry weight; RFW: Root fresh weight; RDW: Root dry weight; FRSR: Fresh root/shoot ratio; DRSR: Dry root/shoot ratio; *, ** represent significant differences at 0.05 and 0.01 level, respectively; The same as below

2 结果与分析

2.1 供试材料种子萌发期抗旱性鉴定

2.1.1 萌发期 PEG 胁迫对不同材料各项指标的影响

在 PEG 胁迫处理下, 除根数、胚芽鞘长、鲜根冠比和干根冠比略有增加外, 供试材料萌发期其他 9 个指标均发生了不同程度的下降, 特别是叶鲜重、根鲜重、苗高和最大根长, 分别较对照下降 58.37%、58.52%、46.76% 和 45.34% (表 1), 表明 PEG 胁迫明显抑制了种子萌发和生长, 且对不同性状的影响不同。叶鲜重、根鲜重、苗高和最大根长对 PEG 胁迫比较敏感, 更容易受到干旱影响。对照和胁迫处理各性状间的配对 t 测验表明 (表 1), 除根数差异不显著、鲜根冠比呈显著差异 ($P < 0.05$) 外, 其余 11 个性状处理间均有极显著差异 ($P < 0.01$), 再次证明 PEG 胁迫处理显著抑制了小麦萌发和生长, 且萌发期各个性状对干旱胁迫的响应不同。同时, PEG 胁迫处理下各个指标的变异系数均大于对照 (表 1), 以发芽势和干根冠比的变异系数差值较大, 其次是最大根长, 可见萌发期干旱胁迫增大了不同材料的表型差异。

从13个指标的抗旱系数分布可以看出(图1),根数、胚芽鞘长、鲜根冠比和干根冠比的抗旱系数分布比较一致,平均抗旱系数均大于1.0;叶鲜重和根鲜重的抗旱系数分布比较一致,平均值在0.5以下;最大根长与苗高的抗旱系数分布比较一致,多集中在0.4~0.6范围;发芽指数、叶干重和根干重抗

旱系数分别相对一致,均值在0.6~0.7范围;发芽率抗旱系数分布比较集中,而发芽势、干根冠比的抗旱系数在不同材料间分布最广,变幅分别为0.03~1.08、0.51~2.00(图1)。不同材料不同指标的抗旱系数分布差别明显,说明不同指标对PEG胁迫的响应存在差异,单一指标评价其抗旱性会有失偏颇。

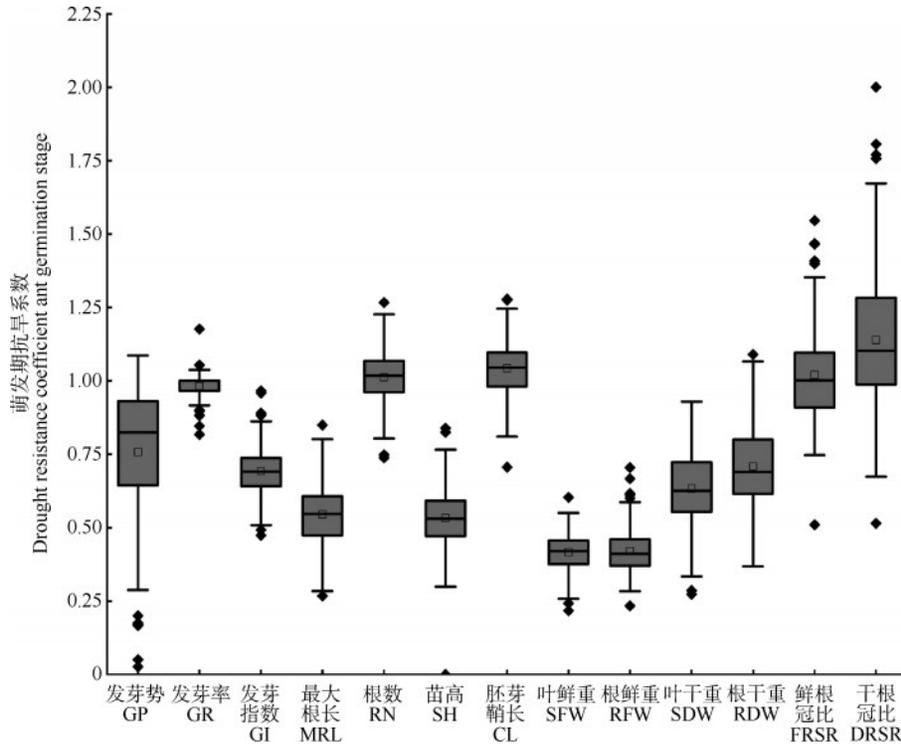


图1 种子萌发期不同指标的抗旱系数分布

Fig. 1 Drought resistance coefficients distribution of 13 indicators of tested lines

2.1.2 萌发期抗旱性综合评价 D 值及抗旱等级
对供试材料13个测定指标的抗旱系数进行主成分分析,按照累计贡献率>85%的原则,选取6个主成分作为有效成分进行分析,依据特征向量绝对值大小选定主要载荷。由表2可知,第1主成分的特征值为2.62,贡献率为37.43%,以叶鲜重、叶干重抗旱系数的载荷值较大;第2主成分的贡献率为17.25%,以鲜根冠比抗旱系数的载荷最大;第3主成

分贡献率为11.01%,以发芽率、发芽指数抗旱系数的载荷最大;第4主成分贡献率为7.68%,以根数、最大根长抗旱系数的载荷最大;第5主成分贡献率为6.65%,以干根冠比抗旱系数的载荷最大;第6主成分贡献率为5.65%,以胚芽鞘长抗旱系数载荷最大。上述6个主成分可以解释85.67%的性状变化趋势,涵盖了13个测定指标的大部分信息,可以用于代表原来的测定指标。

表2 供试材料13个测定指标抗旱系数的主成分分析

Table 2 Principal component analysis of drought resistance coefficient of 13 indicators in tested lines

抗旱系数 DC	主成分 Principal component					
	1	2	3	4	5	6
发芽势 GP	0.3203	-0.1386	0.4003	-0.0243	-0.0112	-0.0502
发芽率 GR	0.1547	-0.1449	0.5325	0.213	-0.1846	0.4994
发芽指数 GI	0.3155	-0.0981	0.4574	-0.0512	-0.0861	-0.1433
最大根长 MRL	0.2703	0.2147	0.0538	-0.5465	-0.1408	-0.0181
根数 RN	0.2135	0.031	-0.0326	0.7637	0.053	-0.3455

表2 (续)

抗旱系数 DC	主成分 Principal component					
	1	2	3	4	5	6
苗高 SH	0.3498	0.0101	-0.098	-0.1725	0.0623	-0.2216
胚芽鞘长 CL	0.2241	-0.1819	-0.3346	0.0866	0.2167	0.6947
叶鲜重 SFW	0.3983	-0.0703	-0.2251	0.0005	0.1605	0.0355
根鲜重 RFW	0.2783	0.4204	-0.1822	0.1142	-0.3018	0.1722
叶干重 SDW	0.3764	-0.0623	-0.2452	-0.0046	-0.1841	-0.1206
根干重 RDW	0.2835	0.4126	0.0295	0.0153	0.3554	-0.0175
鲜根冠比 FRSR	-0.1207	0.5264	0.0107	0.1371	-0.5183	0.1395
干根冠比 DRSR	-0.0999	0.4868	0.2767	0.0142	0.5824	0.1046
特征值 Eigenvalues	2.62	0.81	0.43	0.13	0.13	0.21
贡献率(%) Contribution rate	37.43	17.25	11.01	7.68	6.65	5.65
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	37.43	54.67	65.68	73.36	80.02	85.67
因子权重 Factor weight	0.4369	0.2014	0.1285	0.0896	0.0776	0.066

DC: Drought resistance coefficient; The same as below

根据上述主成分结果,将13个指标值分别代入6个主成分,获得每个材料的6个主成分得分。利用模糊隶属函数将6个主成分得分归一化处理,结合6个主成分的权重(表2),计算得到180份小偃麦衍生系的综合评价D值(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230318001>,附表1)。结果表明,供试材料D值范围为0.2823~0.7391,平均为0.5357。其中,CH1364的D值最高(0.7391),依次为CH0329(0.7343)、CH9767(0.7238)和CH6002(0.7116),而CH16108(0.2823)、CH16538(0.3077)和CH1742(0.3212)为最后3名。3个抗旱对照品种以长6878的D值最高(0.7115),其次是运旱618(0.6077),晋麦

47最低(0.5637),180份小偃麦衍生系中有71份的D值高于对照晋麦47,可用作优异抗旱种质资源。

根据均值-标准差分级法及抗旱性综合评价D值,将180份小偃麦衍生系划分为5级(表3)。第1级包括24份材料,D值平均为0.6752,属于极强抗旱型,占比13.33%,抗旱品种长6878在此类别;第2级包括29份材料,D值平均为0.6091,属于强抗旱型,占比16.11%,运旱618归此类别;第3级包括68个材料,D值平均为0.5422,属于中等抗旱型,晋麦47属于此类别;第4级包括29份材料,D值平均为0.4733,属于弱抗旱型;第5级包括30份材料,D值平均为0.3909,属于极弱抗旱型。

表3 小偃麦衍生系种子萌发期抗旱类型分级

Table 3 Drought resistance evaluation results of tested lines at germination stage

抗旱等级 Drought resistance grade	D值 D value	材料数 Number of lines	平均D值 Mean of D value	抗旱类型 Drought type
1级 Grade 1	>0.6273	24	0.6752	极强
2级 Grade 2	0.5932~0.6273	29	0.6091	强
3级 Grade 3	0.4914~0.5932	68	0.5422	中等
4级 Grade 4	0.443~0.4914	29	0.4733	弱
5级 Grade 5	<0.4439	30	0.3909	极弱

2.2 成株期抗旱性鉴定评价

2.2.1 田间不同水分处理对供试材料产量相关性状的影响

2021年和2022年连续2个生长季分别在旱地和水地2种处理条件下考察了小偃麦衍生系5个产量相关性状的表型。由于180份衍生系中有

11份材料在田间试验中未抽穗,产量性状数据缺失,故成株期共鉴定169份衍生系的抗旱性。水地和旱地配对t测验分析表明(表4),在不同水分条件下,小偃麦衍生系的株高、单株穗数、千粒重和单株产量4个性状均表现极显著($P<0.01$)差异,穗粒数

在2022年表现显著差异($P<0.05$),而在2021年差异不显著,说明本试验干旱胁迫效果较好,产量相关性状对干旱胁迫较为敏感。田间干旱胁迫使供试材料产量相关性状均发生不同程度的降低,2022年以单株产量降幅最大(23.20%),其次是株高(13.84%),穗粒数最小(3.34%),2021年以千粒重降幅最大(14.11%),其次是单株粒重(13.33%)和株高

(10.66%),穗粒数最小(2.27%),表明单株产量和株高对干旱更为敏感。从变异系数来看,两个生长季的单株产量变异系数在水地和旱地均为最大,可见该性状在不同水分条件下均表现广泛的变异,其次是单株穗数,2022年以千粒重变异最小,2021年穗粒数变异最小。

表4 田间不同水分处理供试材料的产量相关性状比较

Table 4 Yield related traits of tested lines under different treatment in field

年份 Year	产量性状 Yield traits	水地 Well watered			旱地 Drought stress			降幅(%) Decreased
		平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%)CV	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%)CV	
2022	株高(cm)	75.88**	9.86	12.99	65.38	8.47	12.96	13.84
	单株穗数	8.72**	1.41	16.17	7.74	1.29	16.67	11.24
	穗粒数	57.83*	7.28	12.59	55.90	7.53	13.47	3.34
	千粒重(g)	35.17**	4.04	11.49	32.88	3.90	11.86	6.51
	单株产量(g)	11.64**	2.73	23.45	8.94	2.16	24.16	23.20
2021	株高(cm)	77.01**	10.09	13.10	68.80	12.70	18.46	10.66
	单株穗数	6.51**	1.34	20.57	5.97	1.24	20.71	8.29
	穗粒数	47.57	6.19	13.16	46.49	7.86	16.21	2.27
	千粒重(g)	35.98**	5.35	14.87	30.92	5.70	18.45	14.11
	单株产量(g)	7.95**	2.06	25.88	6.89	1.86	26.95	13.33

PH: Plant height; SPP: Spikes per plant; GNS: Grain number per spike; TKW: Thousand kernel weight; YP: Yield of plant; The same as below

依据旱地与水地条件下产量相关性状的比值得到抗旱系数,从各性状抗旱系数分布可以看出(图2),穗粒数抗旱系数分布范围为0.62~1.35,平均抗旱系数为0.9723;株高和千粒重的抗旱系数分布比较集中,变幅分别为0.65~0.98和0.73~1.15;单株穗数和单株产量的抗旱系数在不同材料间分布最广,变幅分别为0.42~1.63和0.08~1.58。相比萌发期各指标抗旱系数分布,成株期抗旱系数差异稍小。

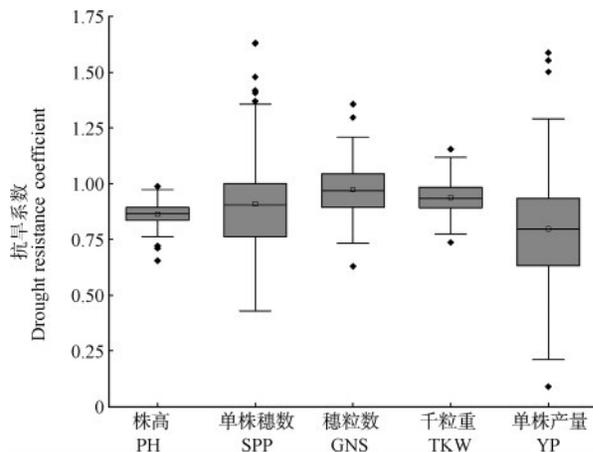


图2 成株期产量相关性状的抗旱系数分布

Fig. 2 Drought resistance coefficients distribution of 5 yield-related traits of tested lines

2.2.2 成株期抗旱性综合评价 D 值及抗旱等级按照累计贡献率>80%的原则,选取3个主成分作为有效成分进行分析(表5)。第1主成分的特征值为1.87,贡献率为37.52%,以单株产量抗旱系数的载荷最大;第2主成分的特征值为1.17,贡献率为21.51%,以株高抗旱系数的载荷最大;第3主成分贡献率为21.12%,以穗粒数抗旱系数的载荷最大。上述3个主成分可以解释80.15%的性状变化趋势,涵盖了5个产量相关性状的大部分信息,可以代表原来的5个产量相关性状。

将5个产量相关性状抗旱系数分别代入3个主成分,利用隶属函数法得到供试小偃麦衍生系成株期抗旱性的综合评价值D值(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230318001>,附表1)。结果表明,供试材料D值范围为0.2518~0.6818,平均为0.5228。其中,CH16342的D值最高(0.6818),依次为CH16407(0.6723)、CH16396(0.6704)和CH16349(0.6631),而CH7034(0.2519)、CH0987(0.3544)和CH16387(0.3794)为最后3名。3个春小麦对照品种以辽春10号的D值最高(0.5508),其次是台长29(0.5361),中国春最低(0.5012),

鉴定的169份小偃麦衍生系中有98份的*D*值高于对照中国春,可从中筛选成株期优异抗旱种质资源。

根据均值-标准差分级法及抗旱性综合评价*D*值,将169份小偃麦衍生系划分为5级(表6)。第1级包括28份材料,*D*值平均为0.6217,属于极强抗旱型,占比16.56%;第2级包括24份材料,*D*值平均为0.5712,属于强抗旱型,占比14.20%;第3级包括73个材料,*D*值平均为0.5150,属于中等抗旱型,对照品种辽春10号、台长29和中国春均属于此类别;第4级包括24份材料,*D*值平均为0.4686,属于弱抗旱型;第5级包括20份材料,*D*值平均为0.4200,属于极弱抗旱型。

表6 小偃麦衍生系成株期抗旱类型分级

Table 6 Drought-tolerance evaluation results at adult stage of tested lines

抗旱等级 Drought resistance grade	<i>D</i> 值 <i>D</i> value	材料数 Number of lines	平均 <i>D</i> 值 Mean of <i>D</i> value	抗旱类型 Drought type
1级 Grade1	>0.5884	28	0.6217	极强
2级 Grade2	0.5884~0.5540	24	0.5712	强
3级 Grade3	0.4800~0.5540	73	0.5150	中等
4级 Grade4	0.4573~0.4800	24	0.4686	弱
5级 Grade5	<0.4573	20	0.4200	极弱

2.3 萌发期和成株期抗旱性相关性分析

基于上述不同生育时期的抗旱综合评价*D*值,对萌发期和成株期的抗旱性进行相关性分析。结果表明,萌发期和成株期的抗旱性相关不显著,相关系数为0.139(图3A)。此外,成株期*D*值与单株产量抗旱系数呈极显著正相关($P<0.01$)(图3B);成株期*D*值与萌发期叶干重(图3C)、最大根长(图3D)的抗旱系数呈显著正相关($P<0.05$),但相关系数较低,与其他11个测定指标相关不显著。

小偃麦衍生系抗旱性在萌发期和成株期表现较大差异。抗旱等级划分结果表明(图4),有56个材料分级完全吻合,113份材料分级不同,另有11份材料在成株期因未结实数据缺失。综合评价筛选出11份在萌发期和成株期均抗旱的衍生系,其

表5 供试材料5个产量相关性状抗旱系数的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of drought resistance coefficient of 5 indicators in tested lines

性状抗旱系数 DC of traits	主成分 Principal component		
	1	2	3
株高PH	0.3065	0.6116	0.3199
单株穗数SPP	0.5304	-0.6041	-0.0551
穗粒数GNS	0.1317	-0.0159	0.8414
千粒重TKW	0.3565	0.5064	-0.4305
单株产量YP	0.6930	-0.0656	-0.0378
特征值Eigenvalues	1.87	1.17	1.05
贡献率(%)Contribution rate	37.52	21.51	21.12
累计贡献率(%)Cumulative contribution rate	37.52	59.03	80.15
因子权重 Factor weight	0.4681	0.2683	0.2635

中4份衍生系在两个生育时期均表现为极强抗旱性,分别为:CH1364、CH16415、CH1357和CH006;7份衍生系在两个生育时期均表现为强抗旱性,分别为CH16433、CH16432、CH16422、CH16434、CH0977、CH6310和CH1729。另外,CH6002、CH0983、CH15145和CH16379在萌发期表现为极强抗旱型,CH1719、CH16409、CH16436、CH7034、CH16435在萌发期表现为强抗旱型,但这9份材料在成株期均为弱和极弱抗旱型。与之相反,CH16423、CH16395、CH1529、CH16374、CH16342、CH4151、CH1711在成株期表现极强抗旱性,CH16380、CH1735、CH16402、CH16364、CH16369在成株期表现强抗旱性,但在萌发期均为弱和极弱抗旱型。

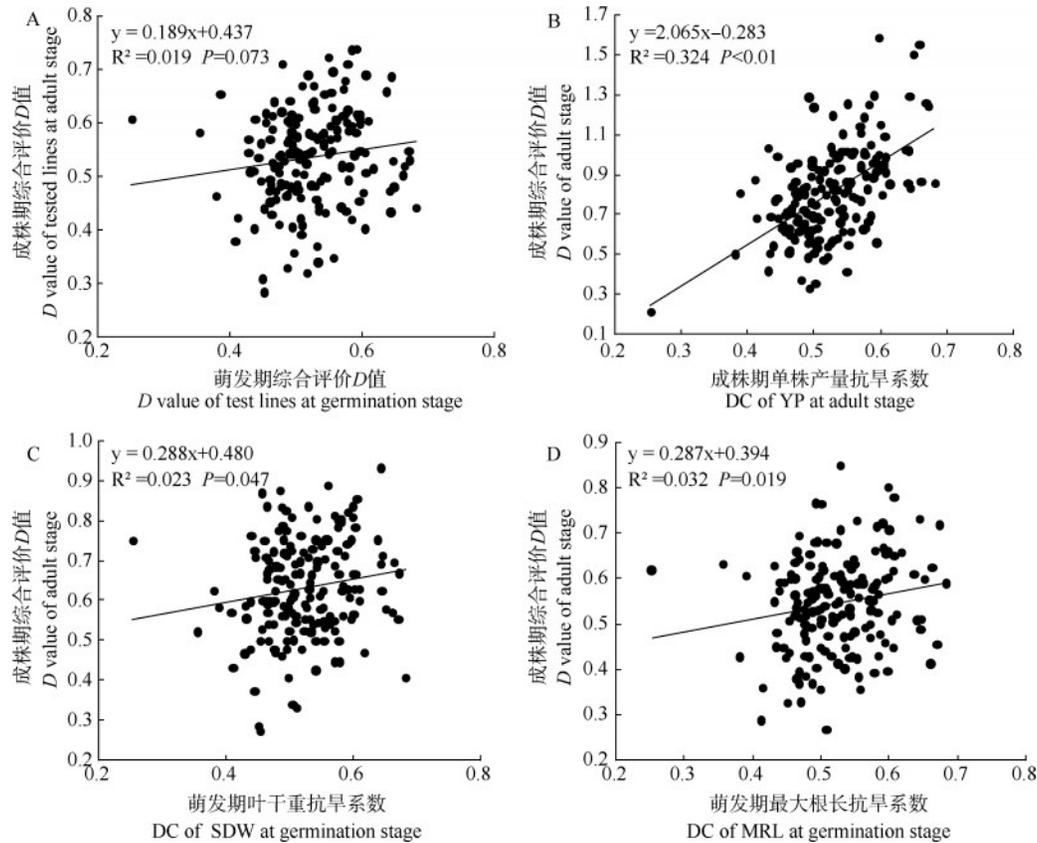
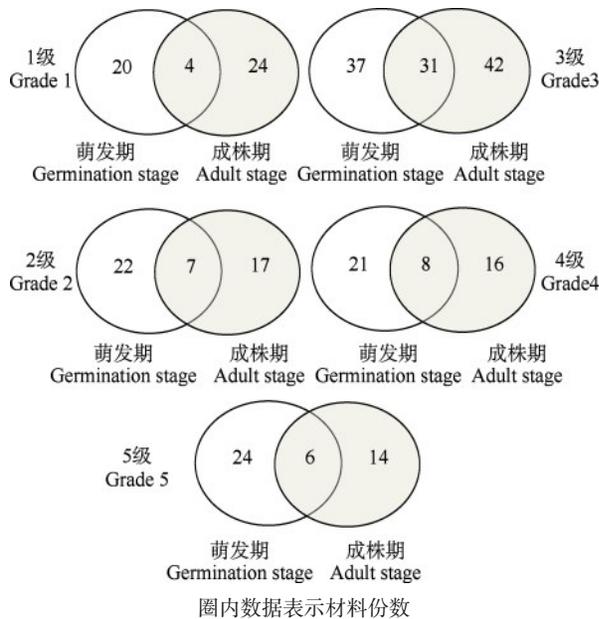


图3 成株期综合评价D值与各检测指标的相关性

Fig. 3 Correlation between drought resistance comprehensive evaluation value *D* at adult stage and different indicators of tested lines



The data in the circle indicate the numbers of materials

图4 小偃麦衍生系种子萌发期和成株期抗旱等级比较
Fig. 4 Comparative analysis of drought resistance grade at germination and adult stage of lines

3 讨论

3.1 小偃麦衍生系抗旱评价方法选择

作物抗旱性是复杂的数量性状,既受多基因的遗传控制,又受到外界环境条件变化的影响^[3-4]。不同研究者认为单一评价指标无法准确衡量品种的抗旱性,因而采用多个参考指标结合多种分析方法从不同角度进行综合评价,避免单个指标单一方法造成的偏颇^[20, 24, 39-41]。本研究选取3个发芽指标(发芽势、发芽率和发芽指数)、4个萌发期形态指标(最大根长、根数、苗高和胚芽鞘长)和6个生物量指标(叶鲜重、根鲜重、叶干重、根干重、鲜根冠比和干根冠比)共13个基本指标,综合评价小偃麦衍生系种子萌发期的抗旱性及其育种应用价值。成株期抗旱性最重要的是产量性状,本研究考察了株高、穗粒数、单株穗数、千粒重和单株产量共5个产量性状,综合评价了其成株期的抗旱性。在分析方法上,徐银萍等^[24]研究表明,基于抗旱性综合评价值*D*值的抗旱评价与田间实际抗旱性更为接近,且与综合抗旱系数和加权抗旱系数均极显著正相关。本研究依据主成分分析和隶属函数分析获得的抗旱

综合评价 D 值进行抗旱性排序,再结合均值-标准差分级,进一步明确小偃麦衍生系的抗旱等级。结果显示,180份小偃麦衍生系 D 值由主成分权重结合隶属函数值得来,充分考虑了各单项指标的重要性,评价结果更为准确可靠,与前人报道结果一致^[15, 23-24]。同时,采用均值-标准差分级法将供试衍生系萌发期和成株期的抗旱性划分为极强、强、中等、弱和极弱抗旱型5个等级,为其育种应用提供了理论依据。总之,本研究通过多个指标和多种方法的综合评价,系统分析了180份小偃麦衍生系不同生育时期的抗旱性,为其在抗旱育种及遗传研究中的应用奠定了基础。

3.2 小偃麦衍生系萌发期和成株期抗旱相关性

小麦生长季较长,容易受不同季节的干旱环境影响,筛选全生育期抗旱种质,对保证抗旱育种亲本供应极为重要。小麦不同生育时期呈现不同的抗旱机理,萌发期是小麦生长起始时期,其抗旱性关系着田间基本苗数以及后期形态建成,成株期抗旱性强弱关系着产量的高低,而产量是材料抗旱性的最终评定指标。本研究对小偃麦衍生系萌发期和成株期的抗旱性进行了鉴定评价,两个生育时期之间的抗旱性综合评价 D 值相关不显著,这与李龙等^[15]、王兴荣等^[22]结果一致。本研究中,CH6002、CH0983、CH15145和CH16379在萌发期表现为极强抗旱型,但在成株期均为弱和极弱抗旱型,而CH16423、CH16395、CH1529、CH16374、CH16342、CH4151、CH1711在成株期表现极强抗旱性,但在萌发期均为弱和极弱抗旱型。仅有56份材料两个生育时期抗旱性分级一致,其中11份在萌发期和成株期均表现极强或强抗旱性。此外,研究发现,成株期抗旱性综合评价 D 值与萌发期最大根长抗旱系数呈显著正相关,这与赵佳佳等^[25]研究结果一致,萌发期最大根长可作为筛选抗旱材料的重要指标。成株期单株产量抗旱系数与综合评价 D 值呈极显著正相关,与李龙等^[15]结果一致,在大规模鉴定评价种质资源抗旱性时,可将单株产量作为筛选指标,减少考种工作量。总之,作物不同生育时期的抗旱性相互独立,可能存在不同的抗旱机制,需要进一步深入的解析,为选育全生育期抗旱性品种提供理论指导。

3.3 小偃麦衍生系具有丰富的抗旱资源

优良抗旱种质资源的筛选评价是小麦抗旱性育种及遗传研究的基础。小麦野生近缘植物是小麦育种及遗传改良的宝贵野生资源库,通过远缘杂

交创制了许多优异小麦种质资源^[26-27]。本研究采用的180份小偃麦衍生系来源于中间偃麦草和长穗偃麦草与普通小麦杂交、回交选育的高代稳定品系,前期已鉴定出多个抗病^[29-33]、耐盐^[34]及产量性状^[35]优异种质,是小麦育种及遗传研究中不可或缺的重要资源。本研究基于抗旱性综合评价 D 值的分级,24份衍生系在种子萌发期表现出极强抗旱性,29份表现强抗旱性,这些材料占比29.44%;28份在成株期表现为极强抗旱性,24份表现为强抗旱性,总占比30.76%。其中4份衍生系在两个生育时期均表现为高度抗旱性,分别为:CH1364、CH16415、CH1357和CH006;7份衍生系在两个生育时期均表现为强抗旱性,分别为CH16433、CH16432、CH16422、CH16434、CH0977、CH6310和CH1729。可见小偃麦衍生系中具有丰富的抗旱资源,有待于进一步深入发掘。今后将进一步研究这些材料的综合抗旱表现、以及生理生化指标变化,结合不同生育时期的抗旱性精准鉴定,对抗旱种质应用价值做出全面估测,筛选具有全生育期抗旱性的优良种质资源,并深入开展抗旱机制及抗旱基因定位等研究。这些优异抗旱种质进一步丰富了我国抗旱种质资源,为挖掘新的抗旱基因奠定了基础,对小麦抗旱育种和抗旱性遗传研究具有重要意义。

4 结论

通过对180份小偃麦衍生系种子萌发期和成株期抗旱性综合评价,发现不同生育时期的干旱胁迫均极显著或显著降低各项测定指标值,但不同生育时期抗旱性综合评价 D 值相关不显著。基于综合抗旱性评价 D 值和均值-标准差分级筛选出11份在萌发期和成株期均表现为强抗旱性的衍生系,可作为小麦抗旱育种及遗传研究的优异种质资源。

参考文献

- [1] Dietz K J, Zörb C, Geilfus C M. Drought and crop yield. *Plant Biology*, 2021, 23(6): 881-893
- [2] Toulotte J M, Pantazopoulou C K, Sanclemente M A, Jvoesenek L A C, Sasidharan R. Water stress resilient cereal crops: Lessons from wild relatives. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2022, 64(2): 412-430
- [3] Juliana P, Poland J, Huerta-Espino J, Shrestha S, Crossa J, Crespo-Herrera L, Henrique Toledo F, Govindan V, Mondal S, Kumar U, Bhavani S, Singh P K, Randhawa M S, He X Y, Guzman C, Dreisigacker S, Rouse M N, Jin Y, Pérez-Rodríguez P, Montesinos-López O A, Singh D, Rahman M M, Marza F, Singh R P. Improving grain yield, stress

- resilience and quality of bread wheat using large-scale genomics. *Nature Genetics*, 2019, 51:1530-1539
- [4] Bapela T, Shimelis H, Tsilo T J, Mathew I. Genetic improvement of wheat for drought tolerance: Progress, challenges and opportunities. *Plants*, 2022, 11:1331
- [5] Wang J Y, Li C N, Li L, Reynolds M, Mao X G, Jing R L. Exploitation of drought tolerance-related genes for crop improvement. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(19):10265
- [6] Li L, Mao X G, Wang J Y, Chang X P, Reynolds M, Jing R L. Genetic dissection of drought and heat-responsive agronomic traits in wheat. *Plant Cell Environment*, 2019, 42(9): 2540-2553
- [7] 陈新宜, 宋宇航, 张孟寒, 李小艳, 李华, 汪月霞, 齐学礼. 干旱对不同品种小麦幼苗的生理生化胁迫以及外源 5-氨基乙酰丙酸的缓解作用. *作物学报*, 2022, 48(2): 478-487
Chen X Y, Song Y H, Zhang M H, Li X Y, Li H, Wang Y X, Qi X L. Effects of water deficit on physiology and biochemistry of seedlings of different wheat varieties and the alleviation effect of exogenous application of 5-aminolevulinic acid. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(2): 478-487
- [8] Kashif A, Ghulam S, Mukhtar A, Kausar N S. Phenotyping for drought resistance in bread wheat using physiological and biochemical traits. *Science of the Total Environment*, 2020, 729:139082
- [9] 任毅, 颜安, 张芳, 夏先春, 谢磊, 耿洪伟. 国内外 301 份小麦品种(系)种子萌发期抗旱性鉴定及评价. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3):1-14
Ren Y, Yan A, Zhang F, Xia X C, Xie L, Geng H W. Identification and evaluation of drought tolerance of 301 wheat varieties (lines) at germination stage. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3):1-14
- [10] Lin Y, Yi X, Tang S, Chen W, Wu F K, Yang X L, Jiang X J, Shi H R, Ma J, Chen G D, Chen G Y, Zheng Y L, Wei Y M, Liu Y X. Dissection of phenotypic and genetic variation of drought-related traits in diverse Chinese Wheat landraces. *The Plant Genome*, 2019, 12:1-14
- [11] Mahpara S, Zainab A, Ullah R, Kausar S, Bilal M, Latif M I, Arif M, Akhtar I, Al-Hashimi A, Elshikh M S, Zivcak M, Zuan A T. The impact of PEG-induced drought stress on seed germination and seedling growth of different bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *PLoS ONE*, 2022, 17(2): e0262937
- [12] 周国雁, 隆文杰, 雷涌涛, 蔡青, 伍少云. PEG 处理下小麦种子萌发期的性状变化与品种抗旱性级别划分. *西北农业学报*, 2015, 28(6): 2348-2354
Zhou G Y, Long W J, Lei Y T, Cai Q, Wu S Y. Changes of traits at seed germination stage and classification of drought resistance of wheat varieties under polyethylene glycol (PEG) treat conditions. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(6): 2348-2354
- [13] 孙绿, 李玉刚, 王圣健, 刘亚东, 王志英, 刘丹, 李娜娜, 赵长星, 盖红梅. 模拟干旱条件下冬小麦品种萌发期抗旱性评价. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(6):110-115
Sun L, Li Y G, Wang S J, Liu Y D, Wang Z Y, Liu D, Li N N, Zhao C X, Gai H M. Evaluation of drought resistance of winter wheat under drought stress simulation at germination stage. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(6): 110-115
- [14] 李国瑞, 马宏亮, 胡雯媚, 汤永禄, 荣晓椒, 樊高琼. 西南麦区小麦品种萌发期抗旱性的综合鉴定及评价. *麦类作物学报*, 2015, 35(4): 479-487
Li G R, Ma H L, Hu W M, Tang Y L, Rong X J, Fan G Q. Identification and evaluation of wheat cultivars for drought resistance during germination in southwest area. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(4):479-487
- [15] 李龙, 毛新国, 王景一, 吕小平, 柳玉平, 景蕊莲. 小麦种质资源抗旱性鉴定评价. *作物学报*, 2018, 44(7):988-999
Li L, Mao X G, Wang J Y, Chang X P, Liu Y P, Jing R L. Drought tolerance evaluation of wheat germplasm resources. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(7): 988-999
- [16] 王优信, 延荣, 蔺明月, 符宇, 孟畅, 安浩军, 李晓静, 段会军, 王睿辉. 冀中北小麦品种抗旱性筛选研究. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(1): 74-82
Wang Y X, Yan R, Lin M Y, Fu Y, Meng C, An H J, Li X J, Duan H J, Wang R H. Screening for drought-resistant wheat varieties in northern central area of Hebei province. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(1): 74-82
- [17] 陈卫国, 张政, 史雨刚, 曹亚萍, 王曙光, 李宏, 孙黛珍. 211 份小麦种质资源抗旱性的评价. *作物杂志*, 2020(4):53-63
Chen W G, Zhang Z, Shi Y G, Cao Y P, Wang S G, Li H, Sun D Z. Drought tolerance evaluation of 211 wheat germplasm resources. *Crops*, 2020(4):53-63
- [18] 李其勇, 朱从桦, 李星月, 向云佳, 杨晓蓉, 符慧娟, 张鸿. 水稻近等基因导入系芽期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. *核农学报*, 2021, 35(1):192-201
Li Q Y, Zhu C H, Li X Y, Xiang Y J, Yang X R, Fu H J, Zhang H. Drought resistance identification and index screening of rice near-isogenic introgression lines at germination stage. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(1): 192-201
- [19] 张春宵, 李淑芳, 刘旭洋, 刘杰, 刘文平, 刘学岩, 李春辉, 王天宇, 李晓辉. 土培条件下玉米萌发期耐旱鉴定技术体系研究. *中国农业科学*, 2020, 53(19):3867-3877
Zhang C X, Li S F, Liu X Y, Liu J, Liu W P, Liu X Y, Li C H, Wang T Y, Li X H. Establishment of evaluation system for drought tolerance at maize germination stage under soil stress. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(19):3867-3877
- [20] 李海明, 刘绍东, 张思平, 李阳, 陈静, 马慧娟, 沈倩, 赵新华, 李存东, 庞朝友. 陆地棉种质资源花铃期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(3):583-597
Li H M, Liu S D, Zhang S P, Li Y, Chen J, Ma H J, Shen Q, Zhao X H, Li C D, Pang C Y. Identification and indices screening of drought tolerance at flowering and boll setting

- stage in upland cotton germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(3):583-597
- [21] 张海平, 张俊峰, 陈妍, 张海生, 闫凯, 穆志新. 大豆种质资源萌发期耐旱性评价. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(1): 130-138
Zhang H P, Zhang J F, Chen Y, Zhang H S, Yan K, Mu Z X. Identification and evaluation of soybean germplasm resources for drought tolerance during germination stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(1):130-138
- [22] 王兴荣, 刘章雄, 张彦军, 李玥, 李永生, 苟作旺, 祁旭升, 邱丽娟. 大豆种质资源不同生育时期抗旱性鉴定评价. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(6):1582-1594
Wang X R, Liu Z X, Zhang Y J, Li Y, Li Y S, Gou Z W, Qi X S, Qiu L J. Evaluation on drought resistance of soybean germplasm resources at multiple growth periods. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(6):1582-1594
- [23] 樊瑀, 董淑琦, 原向阳, 杨雪萍, 姚翔, 郭平毅, 杨雪芳. 谷子种质资源萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选. *中国农业大学学报*, 2022, 27(6):42-54
Fan Y, Dong S Q, Yuan X Y, Yang X P, Yao X, Guo P Y, Yang X F. Comprehensive evaluation of drought resistance of foxtail millet germplasm resources during germination period and drought resistance index screening. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(6):42-54
- [24] 徐银萍, 潘永东, 刘强德, 姚元虎, 贾延春, 任诚, 火克仓, 陈文庆, 赵锋, 包奇军, 张华瑜. 大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. *作物学报*, 2020, 46(3): 448-461
Xu Y P, Pan Y D, Liu Q D, Yao Y H, Jia Y C, Ren C, Huo K C, Chen W Q, Zhao F, Bao Q J, Zhang H Y. Drought resistance identification and drought resistance indexes screening of barley resources at mature period. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(3): 448-461
- [25] 赵佳佳, 乔玲, 武棒棒, 葛川, 乔麟轶, 张树伟, 闫素仙, 郑兴卫, 郑军. 山西小麦苗期根系性状及抗旱特性分析. *作物学报*, 2021, 47(4): 714-727
Zhao J J, Qiao L, Wu B B, Ge C, Qiao L Y, Zhang S W, Yan S X, Zheng X W, Zheng J. Seedling root characteristics and drought resistance of wheat in Shanxi province. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(4): 714-727
- [26] 刘成, 韩冉, 汪晓璐, 宫文萍, 程敦公, 曹新友, 刘爱峰, 李豪圣, 刘建军. 小麦远缘杂交现状、抗病转移及利用研究进展. *中国农业科学*, 2020, 53(7):1287-1308
Liu C, Han R, Wang X L, Gong W L, Cheng D G, Cao X Y, Liu A F, Li H S, Liu J J. Research progress of wheat wild hybridization, disease resistance genes transfer and utilization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(7):1287-1308
- [27] Nevo E, Chen G. Drought and salt tolerances in wild relatives for wheat and barley improvement. *Plant Cell Environment*, 2010, 33(4):670-685
- [28] 蒋勃, 张淑欣, 王惠, 史玥, 李紫琪, 朱蕾, 宋维富, 杨雪峰, 宋庆杰, 李新玲, 张延明. 中间偃麦草种质改良及基因组学育种研究进展. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(6):1385-1394
Jiang B, Zhang S X, Wang H, Shi Y, Li Z Q, Zhu L, Song W F, Yang X F, Song Q J, Li X L, Zhang Y M. Genetic improvement and genomics-assisted breeding of the germplasm resource *Thinopyrum intermedium*. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21(6):1385-1394
- [29] Chang Z J, Zhang X J, Yang Z J, Zhan H X, Li X, Liu C, Zhang C Z. Characterization of a partial wheat-*Thinopyrum intermedium* amphiploid and its reaction to fungal diseases of wheat. *Heredity*, 2010, 147(6): 304-312
- [30] 陈芳, 乔麟轶, 李锐, 刘成, 李欣, 郭慧娟, 张树伟, 常利芳, 李东方, 闫晓涛, 任永康, 张晓军, 畅志坚. 小麦新种质 CH1357 抗白粉病遗传分析及染色体定位. *作物学报*, 2019, 45(10):1503-1510
Chen F, Qiao L Y, Li R, Liu C, Li X, Guo H J, Zhang S W, Chang L F, Li D F, Yan X T, Ren Y K, Zhang X J, Chang Z J. Genetic analysis and chromosomal localization of powdery mildew resistance gene in wheat germplasm CH1357. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(10):1503-1510
- [31] 郭慧娟, 张丛卓, 张晓军, 杨足君, 李欣, 詹海仙, 乔麟轶, 畅志坚. 小偃麦渗入系抗条锈性评价及细胞学鉴定. *核农学报*, 2014, 28(3):371-377
Guo H J, Zhang C Z, Zhang X J, Yang Z J, Li X, Zhan H X, Qiao L Y, Chang Z J. Evaluation of resistances to stripe rust and cytological characterization in wheat-*Thinopyrum intermedium* introgressions. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(3):371-377
- [32] Sheng D C, Liu M J, Zhang X J, Qiao L Y, Chang L F, Guo H J, Zhang S W, Chen F, Yuan Z J, Liu C, Li X, Zhang P, Chang Z J. Characterization of leaf rust resistance in a set of wheat-*Thinopyrum* amphiploid-derived hexaploid breeding lines. *Crop Protection*, 2022, 156:105956
- [33] 张晓军, 肖进, 王海燕, 乔麟轶, 李欣, 郭慧娟, 常利芳, 张树伟, 闫晓涛, 畅志坚, 武宗信. 小偃麦衍生品系的赤霉病抗性评价. *作物学报*, 2020, 46(1):62-73
Zhang X J, Xiao J, Wang H Y, Qiao L Y, Li X, Guo H J, Chang L F, Zhang S W, Yan X T, Chang Z J, Wu Z X. Evaluation of resistance to fusarium head blight in *Thinopyrum*-derived wheat lines. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(1): 62-73
- [34] 张潇文, 李世姣, 张晓军, 李欣, 杨足君, 张树伟, 陈芳, 常利芳, 郭慧娟, 畅志坚, 乔麟轶. 小麦品系 CH7034 中耐盐 QTL 定位. *作物学报*, 2022, 48(10): 2654-2662
Zhang X W, Li S J, Zhang X J, Li X, Yang Z J, Zhang S W, Chen F, Chang L F, Guo H J, Chang Z J, Qiao L Y. QTL mapping for salt tolerance in wheat line CH7034. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(10): 2654-2662
- [35] 常利芳, 李欣, 郭慧娟, 乔麟轶, 张树伟, 陈芳, 畅志坚, 张晓军. 小偃麦衍生系表现遗传多样性分析及综合评价. *草业学报*, 2022, 31(11): 61-74
Chang L F, Li X, Guo H J, Qiao L Y, Zhang S W, Chen F, Chang Z J, Zhang X J. Genetic diversity analysis of octoploid

- Triticum*-derived wheat breeding lines based on agronomic traits. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(11): 61-74
- [36] 景蕊莲, 胡荣海, 张灿军, 朱志华, 吕小平, 王娟玲. GB/T 211-27-2007 小麦抗旱性鉴定评价技术规范. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-5
- Jing R L, Hu R H, Zhang C J, Zhu Z H, Chang X P, Wang J L. GB/T 211-27-2007 technical specification of identification and evaluation for drought resistance in wheat. Beijing: China Standards Press, 2008: 1-5
- [37] 李立会, 李秀全, 杨欣明. 小麦种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006
- Li L H, Li X Q, Yang X M. Descriptors and data standard for wheat (*Triticum aestivum* L.). Beijing: China Agriculture Press, 2006
- [38] 路贵和, 戴景瑞, 张书奎, 李文明, 陈绍江, 鄂立柱, 张义荣. 不同干旱胁迫条件下我国玉米骨干自交系的抗旱性比较研究. *作物学报*, 2005, 31(10): 1281-1288
- Lu G H, Dai J R, Zhang S K, Li W M, Chen S J, E L Z, Zhang Y R. Drought resistance of elite maize inbred lines in different water stress conditions. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(10): 1281-1288
- [39] Mardeh S S, Ahmadi A, Poustini K, Mohammadi V. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Research*, 2016, 43: 222-229
- [40] 李静静, 任永哲, 白露, 吕伟增, 王志强, 辛泽毓, 林同保. PEG-6000 模拟干旱胁迫下不同基因型小麦品种萌发期抗旱性的综合鉴定. *河南农业大学学报*, 2020, 54 (3): 368-377
- Li J J, Ren Y Z, Bai L, Lv W Z, Wang Z Q, Xin Z Y, Lin T B. Comprehensive identification and evaluation of drought tolerance of different genotypic wheat varieties at germination stage by PEG-6000 simulated drought stree. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, 54 (3): 368-377
- [41] Maulana F, Huang W Q, Anderson J D, Ma X F. Genome-wide association mapping of seedling drought tolerance in winter wheat. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 573786

附表1 180个小偃麦衍生系的萌发期和成株期抗旱性综合评价值D及抗旱等级

Supplemental table1 D Value and the grade of drought resistance evaluation of 180 wheat-*Thinopyrum* intermedium introgression lines at germination and adult stage

序号 No	品系 Line	萌发期 Germination stage		成株期 Adult stage	
		抗旱性 D 值	抗旱等级	抗旱性 D 值	抗旱等级
		D value of drought resistance	Grade of drought resistance	D value of drought resistance	Grade of drought resistance
1	CH1364	0.7391	1 级	0.5908	1 级
2	CH0329	0.7343	1 级	0.5845	2 级
3	CH9767	0.7238	1 级	0.5491	3 级
4	CH6002	0.7116	1 级	0.4781	4 级
5	CH223	0.7107	1 级	0.5796	2 级
6	CH16400	0.6938	1 级	0.5572	2 级
7	CH122	0.6877	1 级	0.5204	3 级
8	CH16415	0.687	1 级	0.6076	1 级
9	CH1357	0.6839	1 级	0.6428	1 级
10	CH16405	0.679	1 级	0.574	2 级
11	CH16417	0.6709	1 级	0.5269	3 级
12	CH1343	0.6707	1 级	0.5082	3 级
13	CH16427	0.6649	1 级	-	-
14	CH16426	0.6634	1 级	0.5709	2 级
15	CH1539	0.6569	1 级	0.5547	2 级
16	CH006	0.6561	1 级	0.6368	1 级
17	CH0984	0.6547	1 级	0.5446	3 级
18	CH0983	0.6541	1 级	0.388	5 级
19	CH15145	0.643	1 级	0.4657	4 级
20	CH1521	0.6422	1 级	0.4924	3 级
21	CH16379	0.6397	1 级	0.4667	4 级
22	CH16399	0.6376	1 级	0.5269	3 级
23	CH-1	0.6348	1 级	0.5239	3 级
24	CH16420	0.63	1 级	0.5535	3 级
25	CH1302	0.6269	2 级	0.5301	3 级
26	CH16433	0.622	2 级	0.5796	2 级
27	CH1532	0.6207	2 级	-	-
28	CH16438	0.6189	2 级	0.4803	3 级
29	CH16398	0.6173	2 级	0.5957	1 级
30	CH16381	0.6168	2 级	0.5911	1 级
31	CH16432	0.6167	2 级	0.5745	2 级
32	CH1719	0.6158	2 级	0.4543	5 级
33	CH1732	0.6158	2 级	-	-
34	CH16409	0.6148	2 级	0.4645	4 级
35	CH16422	0.6136	2 级	0.5694	2 级
36	CH16437	0.6132	2 级	0.4952	3 级
37	CH0330	0.6117	2 级	0.5052	3 级

序号 No	品系 Line	萌发期 Germination stage		成株期 Adult stage	
		抗旱性 D 值	抗旱等级	抗旱性 D 值	抗旱等级
		D value of drought resistance	Grade of drought resistance	D value of drought resistance	Grade of drought resistance
38	CH16416	0.611	2 级	0.5974	1 级
39	CH16436	0.609	2 级	0.4405	5 级
40	CH16434	0.6076	2 级	0.5587	2 级
41	CH7034	0.6075	2 级	0.2519	5 级
42	CH16403	0.6056	2 级	0.4864	3 级
43	CH16419	0.6052	2 级	0.6083	1 级
44	CH16383	0.6034	2 级	0.4918	3 级
45	CH0977	0.603	2 级	0.5626	2 级
46	CH16435	0.6028	2 级	0.4546	5 级
47	CH6310	0.6023	2 级	0.5761	2 级
48	CH1362	0.6014	2 级	0.4896	3 级
49	CH1768	0.5989	2 级	0.4983	3 级
50	CH9763	0.5971	2 级	0.5959	1 级
51	CH4001	0.5966	2 级	-	-
52	CH1729	0.5953	2 级	0.5837	2 级
53	CH262	0.5948	2 级	0.5508	3 级
54	CH1640	0.5895	3 级	0.4644	4 级
55	CH16442	0.586	3 级	0.5783	2 级
56	CH16440	0.585	3 级	0.5605	2 级
57	CH0987	0.5828	3 级	0.3544	5 级
58	CH16353	0.5824	3 级	0.5407	3 级
59	CH16344	0.5822	3 级	0.5922	1 级
60	CH1558	0.5819	3 级	0.495	3 级
61	CH16378	0.5806	3 级	0.5421	3 级
62	CH16449	0.5786	3 级	0.5189	3 级
63	CH7102	0.576	3 级	0.5271	3 级
64	CH1343H	0.5741	3 级	0.5616	2 级
65	CH15132	0.5726	3 级	0.5012	3 级
66	CH16382	0.5715	3 级	0.5507	3 级
67	CH0985	0.5709	3 级	0.4896	3 级
68	CH16347	0.5706	3 级	0.4627	4 级
69	CH1355	0.57	3 级	0.4298	5 级
70	CH16118	0.5696	3 级	0.5311	3 级
71	CH1625	0.5653	3 级	0.4858	3 级
72	CH16352	0.5607	3 级	0.5408	3 级
73	CH16373	0.5602	3 级	0.446	5 级
74	CH16445	0.5602	3 级	0.5408	3 级
75	CH16375	0.5581	3 级	0.542	3 级
76	CH16371	0.5563	3 级	0.4941	3 级
77	CH16412	0.5494	3 级	0.6001	1 级

序号 No	品系 Line	萌发期 Germination stage		成株期 Adult stage	
		抗旱性 <i>D</i> 值	抗旱等级	抗旱性 <i>D</i> 值	抗旱等级
		<i>D</i> value of drought resistance	Grade of drought resistance	<i>D</i> value of drought resistance	Grade of drought resistance
78	CH16376	0.5488	3 级	0.4983	3 级
79	CH1726	0.5484	3 级	0.5231	3 级
80	CH16407	0.5483	3 级	0.6723	1 级
81	CH1349	0.548	3 级	0.5976	1 级
82	CH16390	0.5479	3 级	0.553	3 级
83	CH16404	0.5468	3 级	0.5223	3 级
84	CH16394	0.5465	3 级	0.6045	1 级
85	CH16100	0.5455	3 级	0.4305	5 级
86	CH16116	0.5436	3 级	0.5143	3 级
87	CH16406	0.543	3 级	0.4937	3 级
88	CH1679	0.5413	3 级	0.5034	3 级
89	CH16424	0.5409	3 级	0.5495	3 级
90	CH0981	0.5408	3 级	0.4892	3 级
91	CH1686	0.5388	3 级	0.4736	4 级
92	CH16385	0.5381	3 级	0.4762	4 级
93	CH16413	0.538	3 级	0.5898	1 级
94	CH1739	0.5366	3 级	0.4449	5 级
95	CH16348	0.5324	3 级	0.5077	3 级
96	CH16362	0.5308	3 级	0.4821	3 级
97	CH16425	0.5303	3 级	0.6459	1 级
98	CH16396	0.5282	3 级	0.6704	1 级
99	CH1766	0.5271	3 级	0.4635	4 级
100	CH1673	0.5254	3 级	-	-
101	CH16370	0.5233	3 级	0.4655	4 级
102	CH16110	0.5224	3 级	0.5178	3 级
103	CH16349	0.5212	3 级	0.6631	1 级
104	CH1758	0.5204	3 级	0.4755	4 级
105	CH9301	0.5193	3 级	0.5693	2 级
106	CH16411	0.5184	3 级	0.5693	2 级
107	CH0982	0.5183	3 级	0.4667	4 级
108	CH16372	0.5158	3 级	0.5824	2 级
109	CH16397	0.5135	3 级	0.6159	1 级
110	CH16484	0.5111	3 级	0.4374	5 级
111	CH16446	0.5088	3 级	0.4992	3 级
112	CH1681	0.5088	3 级	0.6074	1 级
113	CH16112	0.5085	3 级	0.4732	4 级
114	CH16106	0.5064	3 级	0.4327	5 级
115	CH16340	0.5048	3 级	0.5105	3 级
116	CH16418	0.5011	3 级	0.6606	1 级

序号 No	品系 Line	萌发期 Germination stage		成株期 Adult stage	
		抗旱性 <i>D</i> 值	抗旱等级	抗旱性 <i>D</i> 值	抗旱等级
		<i>D</i> value of drought resistance	Grade of drought resistance	<i>D</i> value of drought resistance	Grade of drought resistance
117	CH1770	0.5	3 级	0.5461	3 级
118	CH1755	0.4976	3 级	0.5418	3 级
119	CH16354	0.4953	3 级	0.4625	4 级
120	CH16114	0.4939	3 级	0.4458	5 级
121	CH16355	0.4935	3 级	0.5369	3 级
122	CH16380	0.4913	4 级	0.5783	2 级
123	CH16384	0.4895	4 级	0.4771	4 级
124	CH1361	0.4866	4 级	0.5006	3 级
125	CH16441	0.4865	4 级	0.4611	4 级
126	CH1631	0.4862	4 级	-	-
127	CH1762	0.4861	4 级	0.4843	3 级
128	CH16410	0.4837	4 级	0.4762	4 级
129	CH1635	0.4827	4 级	0.5296	3 级
130	CH1715	0.4821	4 级	0.5251	3 级
131	CH16346	0.4817	4 级	0.476	4 级
132	CH1698	0.4798	4 级	0.501	3 级
133	CH1346	0.479	4 级	0.4915	3 级
134	CH16423	0.479	4 级	0.6501	1 级
135	CH16102	0.478	4 级	0.5037	3 级
136	CH1675	0.4751	4 级	0.4696	4 级
137	CH16395	0.4736	4 级	0.6416	1 级
138	CH1677	0.4733	4 级	0.4586	4 级
139	CH16443	0.4727	4 级	0.4982	3 级
140	CH1529	0.4716	4 级	0.6015	1 级
141	CH1750	0.4647	4 级	0.4839	3 级
142	CH1638	0.4641	4 级	-	-
143	CH16387	0.4639	4 级	0.3794	5 级
144	CH16377	0.4635	4 级	0.4869	3 级
145	CH1556	0.461	4 级	0.5058	3 级
146	CH16444	0.4594	4 级	0.4689	4 级
147	CH1363	0.4583	4 级	0.5326	3 级
148	CH16374	0.4561	4 级	0.5976	1 级
149	CH16389	0.4508	4 级	0.4626	4 级
150	CH16359	0.446	4 级	0.5343	3 级
151	CH16342	0.4431	5 级	0.6818	1 级
152	CH1735	0.4416	5 级	0.5696	2 级
153	CH1352	0.4389	5 级	0.4519	5 级
154	CH1723	0.4375	5 级	0.5343	3 级
155	CH16402	0.4369	5 级	0.5776	2 级

序号 No	品系 Line	萌发期 Germination stage		成株期 Adult stage	
		抗旱性 D 值	抗旱等级	抗旱性 D 值	抗旱等级
		D value of drought resistance	Grade of drought resistance	D value of drought resistance	Grade of drought resistance
156	CH16357	0.4327	5 级	0.5436	3 级
157	CH4151	0.4326	5 级	0.6446	1 级
158	CH16386	0.43	5 级	0.4651	4 级
159	CH16104	0.4236	5 级	0.4122	5 级
160	CH16364	0.4212	5 级	0.5829	2 级
161	CH16392	0.4194	5 级	0.5061	3 级
162	CH1745	0.4118	5 级	0.4739	4 级
163	CH16360	0.4077	5 级	0.5087	3 级
164	CH1616	0.4042	5 级	-	-
165	CH1696	0.404	5 级	0.4932	3 级
166	CH16343	0.4011	5 级	0.4362	5 级
167	CH4001+	0.4009	5 级	-	-
168	CH1711	0.4006	5 级	0.6044	1 级
169	CH16414	0.3941	5 级	0.5104	3 级
170	CH16368	0.3813	5 级	0.4099	5 级
171	CH1623	0.372	5 级	0.5311	3 级
172	CH3286	0.3584	5 级	0.4971	3 级
173	CH16408	0.3548	5 级	-	-
174	CH16369	0.3502	5 级	0.5554	2 级
175	CH16366	0.3493	5 级	-	-
176	CH1646	0.3392	5 级	0.5353	3 级
177	CH1683	0.3312	5 级	0.4861	3 级
178	CH1742	0.3212	5 级	0.5156	3 级
179	CH16358	0.3077	5 级	0.4489	5 级
180	CH16108	0.2823	5 级	0.4521	5 级
181	长 6878	0.7115	1 级	-	-
182	运早 618	0.6077	2 级	-	-
183	晋麦 47	0.5637	3 级	-	-
184	辽春 10 号	-	-	0.5508	3 级
185	中国春	-	-	0.5012	3 级
186	台长 29	-	-	0.5361	3 级

表中-表示数据缺失

- represent no data.