



240 份小麦苗期抗旱性鉴定及抗旱指标与重要农艺性状的相关性分析

孙楠楠¹,周全¹,职蕾¹,乔朋放¹,牟丽明²,倪胜利³,
Dauren Serikbay^{1,4},李兴茂³,胡银岗¹,陈亮¹

(1. 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,陕西杨凌 712100;2. 定西市农业科学研究院,甘肃定西 743000;3. 甘肃省农业科学院 旱地农业研究所,兰州 730070;4. 赛富林农业技术大学,哈萨克斯坦努尔苏丹)

摘要 为了解 240 份小麦材料苗期的抗旱性并筛选有效苗期抗旱指标,在干旱胁迫和对照环境下测定胚芽鞘长(CL)、第一叶长(FL)、地上部鲜质量(SFW)等 8 个苗期指标。采用隶属函数法、聚类分析法、主成分分析等方法对各材料的抗旱性进行综合评价。结果表明,在干旱胁迫下各材料胚芽鞘长、根冠比高于对照组,其他指标低于对照组。对各性状抗旱系数的隶属函数值进行主成分分析,将 8 个性状归纳为 3 个成分,累计贡献率达 80.5%。聚类分析将 240 份材料分为高抗旱、抗旱、中等、干旱敏感、干旱高敏感 5 个群体,其中高抗旱品种 13 份。苗期指标抗旱系数与重要农艺性状的相关性分析表明,苗期的胚芽鞘长与株高、旗叶长、穗长呈极显著正相关,苗期活力高的品种具有较高的千粒质量,通过隶属函数法计算综合抗旱系数 D 值进行苗期抗旱性评价更准确。通过小麦苗期抗旱性鉴定,可提前对小麦进行抗旱性评价,为实际生产提供参考并加速小麦抗旱育种进程。

关键词 小麦苗期;抗旱性;鉴定;农艺性状;相关性

中图分类号 S512.1

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2022)02-0147-10

小麦是三大粮食作物之一,全球约 35%~40% 的人口以其为主食。21 世纪中期,世界人口将达 85 亿~100 亿,小麦产量亟需提高,以满足世界粮食需求^[1],中国小麦产量对国际粮食安全有重要意义^[2]。小麦是干旱半干旱地区的主要粮食作物,近年来,随着全球气候变暖,干旱程度日益加剧,严重影响小麦产量。据《中国水旱灾害公报》数据显示,1950—2016 年间,中国农业年均受灾面积超过 2 065.9 万 hm^2 ,其中旱灾造成的减产达 163.0 亿 kg ,占各种自然灾害减损的 60% 以上。小麦在营养生长阶段对干旱十分敏感,且小麦苗期活力会影响后期生长并最终影响小麦产量^[3-4]。因此,加强小麦抗旱能力鉴定、筛选培育抗旱节水种质是保障干旱胁迫下小麦稳产的主要途径^[5],对小麦苗期的抗旱性进行鉴定,有助于抗旱品种鉴定,加速育种进程。

胚芽鞘是单子叶植物特有的鞘状物,在幼苗

生长初期有助于保护深播情况下小麦幼苗成功出土面。研究表明,干旱胁迫环境下小麦胚芽鞘长在不同抗旱群体间存在差异,苗期小麦胚芽鞘长可作为鉴定苗期抗旱能力的指标之一^[6-7]。根系对水分极为敏感,可直接从土壤吸收,并为地上部组织提供水分,通常抗旱性强的小麦品种在土壤中扎根更深、根系更发达^[8]。研究发现小麦苗期抗旱性与根干质量呈正相关,苗期根系性状改良有助于提高苗期活力与抗旱性^[9-10],即小麦通过调整生物形态来适应干旱胁迫。Pour-Aboughadareh 等^[11]研究发现小麦苗期生物量与抗旱性显著正相关,苗期活力高则小麦抗旱性强。小麦开花期及灌浆期的丙二醛含量、脯氨酸含量、叶片相对含水量等生理生化指标均可作为苗期抗旱性鉴定的指标^[12-13]。也有研究提出小麦成熟期的株高、旗叶长宽、穗长、千粒质量等指标也可作为小麦抗旱性鉴定的有效指标^[14]。侯俊峰等^[15]

收稿日期:2021-11-10 **修回日期:**2021-11-24

基金项目:陕西省重点研发计划(2020NY-045);小麦玉米作物学国家重点实验室开放课题。

第一作者:孙楠楠,女,硕士研究生,从事小麦抗旱育种研究。E-mail:1187730576@qq.com

通信作者:陈亮,男,副教授,硕士生导师,主要从事小麦抗逆分子育种。E-mail:chenliang9117@nwsuaf.edu.cn

提出小麦非结构性碳水化合物积累与小麦抗旱及产量相关,将苗期抗旱能力与其他生育期抗旱指标联合分析,可提高抗旱种质鉴定效率。目前,对小麦苗期抗旱能力的鉴定工作已开展较多,但将苗期多个性状进行综合评价,尤其是将苗期活力相关指标,如胚芽鞘、第一叶长、地上部和地下部干鲜质量等进行综合鉴定的研究较少,不利于高效、准确地鉴定小麦苗期抗旱性。

为综合评价小麦苗期抗旱能力,筛选苗期有效抗旱指标,本研究选择 240 份小麦品种(系)进行干旱胁迫,测定苗期活力相关指标,通过计算抗旱指数、综合抗旱系数,并利用隶属函数法、聚类分析、主成分分析等方法对小麦苗期抗旱性进行综合分析,筛选抗旱能力强的种质,并评价各抗旱指标的贡献,寻找最优抗旱评价指标。并将苗期性状与成熟期相关农艺性状进行相关性分析,以期在全生育期抗旱性品种的筛选和鉴定提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验材料为遗传背景丰富的 240 份小麦品种(系),分别来自河南、陕西、山东、山西、甘肃等 14 个省份的材料 235 份,国外引进种质 5 份(表 1)。

表 1 240 份小麦材料来源及数量

Table 1 Origin and number of 240 wheat materials

省份 Province	数量 Number	省份 Province	数量 Number
河南 Henan	96	甘肃 Gansu	5
陕西 Shaanxi	49	宁夏 Ningxia	4
山东 Shandong	24	青海 Qinghai	3
山西 Shanxi	14	福建 Fujian	1
河北 Hebei	12	贵州 Guizhou	1
北京 Beijing	10	四川 Sichuan	1
安徽 Anhui	8	国外 Foreign	5
江苏 Jiangsu	7		

1.2 苗期试验

试验在陕西杨凌西北农林科技大学旱区国家重点实验室温室开展。苗期试验环境平均温度为日/夜:20℃/15℃,光周期为光/暗:16 h/8 h(胚芽鞘指标测定进行暗处理)。试验采用随机区组设计,设置对照(相对含水量 60%)、干旱(相对含水量 30%)2 个处理,每个处理设置 3 个重复。选饱满一致的种子,每个品种 70 粒,75% 酒精消毒 10 min,蒸馏水冲洗,在育苗盘中垫滤纸做发芽床,萌发 48 h。将发芽良好的种子移栽至培养盒

(37 cm×47 cm×13 cm),覆基质 3 cm。每个重复 8 株幼苗,待处理组出现萎蔫时将幼苗挖出,冲洗干净,每重复选择长势一致的 5 株幼苗进行胚芽鞘长、第一叶长、地上及地下部鲜质量等指标的测量并记录,105℃杀青 0.5 h,80℃继续烘干至恒量,测地上和地下部干质量。

1.3 田间试验

2020 年 9 月至 2021 年 6 月,240 份小麦品种在陕西杨凌西北农林科技大学旱区节水农业研究院进行种植,每个品种种植 3 行,行长 2 m,行间距 25 cm,株间距 3.3 cm。从小区中间位置选择 5 株长势一致的单株分别于灌浆后期测定旗叶长、旗叶宽,成熟期测定株高、穗长等田间农艺性状,种子收获晒干后测定千粒质量、粒长、粒宽等指标。

1.4 数据处理与分析

计算各指标的抗旱系数、隶属函数值、综合抗旱系数 D 值。

(1)各测试指标的抗旱系数

抗旱系数=干旱胁迫测量值/对照测量值

(2)不同小麦品种(系)各指标抗旱系数隶属函数值

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

式中, $U(X_j)$ 为第 j 个指标的隶属函数值, X_j 表示第 j 个抗旱系数值, $X_{\min}$ 表示第 j 个指标抗旱系数的最小值, $X_{\max}$ 表示第 j 个指标抗旱系数的最大值。

(3)各综合指标的权重

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j$$

W_j 表示第 j 个指标在所有指标中的权重; P_j 为第 j 个指标的贡献率。

(4)计算综合抗旱系数 D 值

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j)W_j], j = 1, 2, 3, \dots, n$$

D 值表示每个品种(系)的综合抗旱系数。利用 Excel 2019、SPSS 26、DPS 7.05 软件进行数据的整理与分析,并利用 RStudio 软件进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 苗期指标的描述性统计

对照组各指标的变异系数为 12.93%~28.00%,胁迫组为 13.69%~21.50%,两组的地下部鲜质量变异系数均最大。胁迫组胚芽鞘长和

根冠比的最大、最小值及平均值都分别高于对照组,第一叶长、地上部干质量、鲜质量、整株干质量的最大、最小值及平均值均低于对照组。地下部干质量、鲜质量的最大值及平均值在干旱胁迫下均有降低(表 2)。表明除胚芽鞘长和根冠比,其他指标在胁迫处理下均降低。

表 2 240 份小麦种质资源 8 个苗期指标描述统计
Table 2 Description and statistics of 8 seedling indexes of 240 wheat germplasm resources

处理 Treatment	指标 Index	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 SD	变异系数/% CV
对照 Control	CL/cm	4.70	10.55	7.48	1.09	14.58
	FL/cm	8.03	17.83	12.39	1.60	12.93
	SFW/g	100.38	270.25	201.90	29.30	14.51
	SDW/g	10.00	23.75	17.43	2.40	13.76
	RFW/g	16.20	210.90	115.89	32.45	28.00
	RDW/g	2.50	12.33	7.82	1.64	20.92
	PDW/g	14.40	33.80	25.25	3.39	13.41
	RS	0.16	0.76	0.45	0.09	20.40
胁迫 Stress	CL/cm	5.20	12.17	8.23	1.28	15.54
	FL/cm	6.75	14.93	10.63	1.46	13.69
	SFW/g	89.20	214.20	150.27	21.37	14.22
	SDW/g	8.00	20.40	15.08	2.19	14.55
	RFW/g	32.47	121.00	76.22	16.38	21.50
	RDW/g	3.60	12.40	7.75	1.55	19.96
	PDW/g	11.80	31.40	22.83	3.22	14.12
	RS	0.27	0.83	0.52	0.10	18.87

注:CL. 胚芽鞘长; FL. 第一叶长; SFW. 地上部鲜质量; SDW. 地上部干质量; RFW. 地下部鲜质量; RDW. 地下部干质量; PDW. 植株干质量; RS. 干质量根冠比。下同。
Note:CL. Coleoptile length; FL. First leaf; SFW. Shoot fresh mass; SDW. Shoot dry mass; RFW. Root fresh mass; RDW. Root dry mass; PDW. Plant dry mass; RS. Root to shoot. The same below.

2.2 苗期各性状的相关性分析
两种处理下 8 个指标的相关性分析表明(表 3),胚芽鞘长、第一叶长与地下部干质量未呈现相关性,其他各指标间呈显著或极显著的正相关或负相关,且各项指标相关性变幅不同,说明单一指标不能全面、有效地评价各品种(系)的抗旱性,因此还需引入综合指标来评价小麦的抗旱性。

表 3 8 个苗期指标的相关性分析
Table 3 Correlation analysis of 8 seedling indexes

处理 Treatment	指标 Index	CL	FL	SFW	SDW	RFW	RDW	PDW
对照 Control	FL	0.65**						
	SFW	0.21**	0.29**					
	SDW	0.29**	0.38**	0.77**				
	RFW	-0.18**	-0.06	0.27**	0.28**			
	RDW	-0.06	0.06	0.32**	0.40**	0.75**		
	PDW	0.18**	0.30**	0.70**	0.90**	0.55**	0.76**	
	RS	-0.26**	-0.21**	-0.22**	-0.30**	0.57**	0.75**	0.14*
胁迫 Stress	FL	0.66**						
	SFW	0.22**	0.32**					
	SDW	0.40**	0.43**	0.86**				
	RFW	0.21**	0.19**	0.53**	0.43**			
	RDW	0.01	0.05	0.52**	0.47**	0.67**		
	PDW	0.28**	0.32**	0.84**	0.91**	0.61**	0.80**	
	RS	-0.31**	-0.30**	-0.15*	-0.32**	0.37**	0.67**	0.11

注:* 和 ** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 。下同。
Note : * and ** indicate $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same below.

2.3 抗旱性状的主成分分析

对供试材料各指标抗旱系数隶属函数值利用 SPSS 26.0 进行主成分分析,结果显示前 3 个主成分贡献率分别为 41.45%、25.31%、13.74%,累计贡献率为 80.50%(表 4)。由各因子的载荷矩阵得知(表 5),第一个主成分中包括 SFW、SDW、PDW 3 个指标,特征向量最大的是 SDW(地上部干质量);第二个主成分中包括 RFW、

RDW、RS 3 个指标,特征向量最大的是 RS(干质量根冠比);第三个主成分中包括 FLL、CL 2 个指标,特征向量最大的是 CL(胚芽鞘长)。

2.4 供试材料综合抗旱性评价及筛选

供试材料各指标的抗旱系数为 0~2,不同材料不同性状对干旱的敏感性存在差异,利用公式计算各品种的综合抗旱系数 D 值,各品种的综合抗旱系数 D 值为 0.16~0.73(表 6)。

表 4 3 个主成分的特征值以及贡献率

Table 4 Eigen value of three principal components analysis

因子 Factor	I	II	III
特征值 Eigenvalue	3.32	2.03	1.10
贡献率/% Contribution	41.45	25.31	13.74
累计贡献率/% Cumulative contribution	41.45	66.76	80.50

表 5 3 个主成分各因子的载荷矩阵

Table 5 Loading matrix of each component in principal components

因子 Factor	CL	FL	SFW	SDW	RFW	RDW	PDW	RS
I	-0.20	0.00	0.38	0.39	-0.04	0.05	0.30	-0.21
II	0.07	-0.02	-0.12	-0.70	0.29	0.38	0.13	0.45
III	0.69	0.50	-0.10	-0.05	0.12	-0.05	-0.07	-0.02

表 6 各品种综合抗旱系数 D 值

Table 6 Comprehensive drought resistance coefficient D value of each variety

品种 Variety	D 值 D value	品种 Type	D 值 D value	品种 Type	D 值 D value
长 6878 Chang 6878	0.42	小偃 928 Xiaoyan 928	0.30	新科麦 169 Xinkemai 169	0.42
宁冬 10 Ningdong 10	0.32	金麦 6 Jinmai 6	0.30	华育 116 Huayu 116	0.37
宁冬 11 Ningdong 11	0.47	山农 3050 Shannong 3050	0.39	许科 168 Xuke 168	0.34
宁冬 6 Ningdong 6	0.35	科农 2009 Kenong 2009	0.24	豫教 5 Yujiao 5	0.34
青海冬麦 Qinghai Dongmai	0.44	西农 389 Xinong 389	0.38	轮选 21 Lunxuan 21	0.37
DZ29	0.42	陕麦 138 Shanmai 138	0.40	河南 2 Henan 2	0.50
长 6359 Chang 6359	0.46	焦麦 266 Jiaomai 266	0.37	锦绣 21 Jinxiu 21	0.35
291-2	0.30	淮核 12013 Huaihe 12013	0.39	洛麦 26 Luomai 26	0.43
运旱 618 Yunhan 618	0.39	驻麦 328 Zhumai 328	0.19	开麦 21 Kaimai 21	0.54
洛旱 13 Luohan 13	0.35	瑞泉 168 Ruiquan 168	0.30	西农 585 Xinong 585	0.38
西农 961 Xinong 961	0.43	郑育 16 Zhengyu 16	0.23	浚晓 9706 Junxiao 9706	0.44
九丰 22 Jiufeng 22	0.41	中育 9378 Zhongyu 9378	0.32	周麦 16 Zhoumai 16	0.35
SD29589	0.28	中麦 170 Zhongmai 170	0.38	周麦 22 Zhoumai 22	0.37
西农 219 Xinong 219	0.52	YD79	0.32	兰考 198 Lankao 198	0.25
长旱 13 Changhan 13	0.35	XR4429	0.33	河南 1 Henan 1	0.41
运麦 3101 Yunmai 3101	0.35	齐麦 2 Qimai 2	0.33	高麦 6 Gaomai 6	0.32
SH5195	0.46	西农 3517 Xinong 3517	0.37	先麦 10 Xianmai 10	0.31
洛旱 7 Luohan 7	0.41	加麦 4 Jiamai 4	0.26	洛麦 31 Luomai 31	0.46
291-8	0.64	齐麦 5 Qimai 5	0.25	百农 160 Bainong 160	0.36
烟农 936 Yannong 936	0.42	临旱 6394 Linhan6394	0.33	泰山 23 Taishan 23	0.41
西农 981 Xinong 981	0.69	皖科 06725 Wanke 06725	0.27	河南 3 Henan 3	0.52
华成 863 Huacheng 863	0.44	裕田麦 119 Yutianmai 119	0.22	优丰 1 Youfeng 1	0.45
漯麦 956 Luomai 956	0.51	M9858	0.36	俊达 109 Junda 109	0.34
子麦 603 Zimai 603	0.37	豫麦 4023 Yumai 4023	0.22	新麦 13 Xinmai 13	0.36
瑞华 055 Ruihua 055	0.22	中新 78 Zhongxin 78	0.47	周麦 19 Zhoumai 19	0.46
西农 794 Xinong 794	0.51	濮兴 5 Puxing 5	0.16	淮麦 21 Huaimai 21	0.44

(续表 6 Continued table 6)

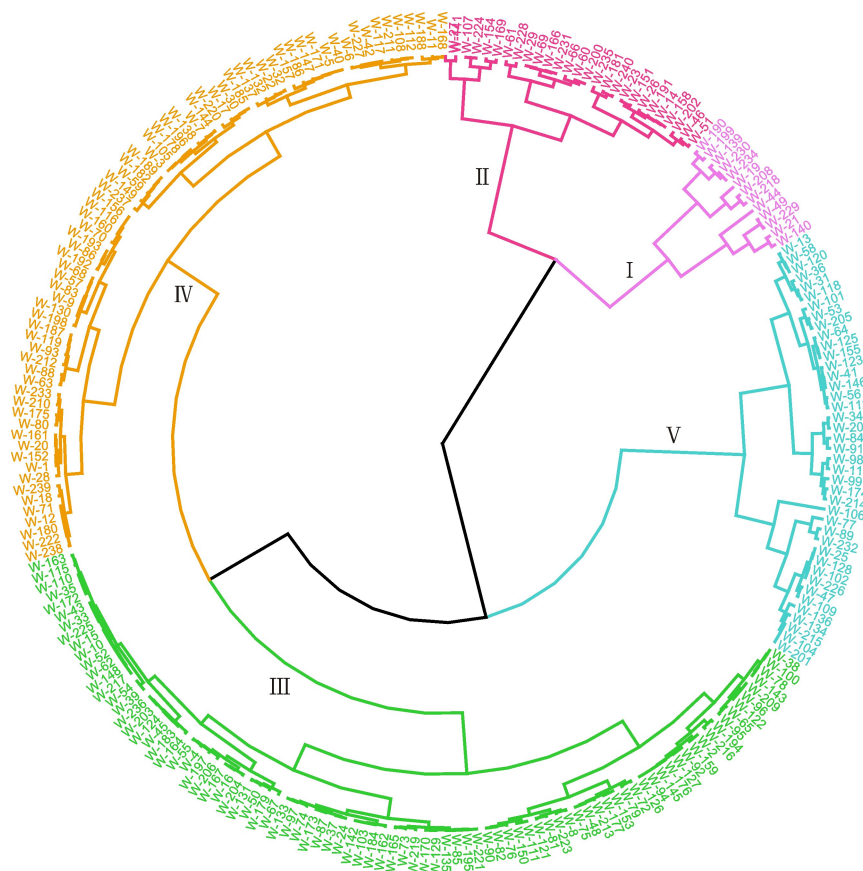
品种 Variety	D 值 D value	品种 Type	D 值 D value	品种 Type	D 值 D value
淮麦 25 Huaimai 25	0.56	临麦 998 Linmai 998	0.55	临早 51329 Linhan 51329	0.38
陕农 627 Shannong 627	0.42	偃展 4110 Yanzhan 4110	0.43	泰安 5 Tai'an 5	0.43
绵阳 11 Mianyang 11	0.50	中新 16 Zhongxin 16	0.23	晋麦 33 Jinmai 33	0.45
许 718 Xu 718	0.46	阜麦 0561 Fumai 0561	0.35	长武 134 Changwu 134	0.59
衡 10-5039 Heng 10-5039	0.28	西农 889 Xinong 889	0.29	远丰 139 Yuanfeng 139	0.52
DH51302	0.45	许科 718 Xuke 718	0.43	中育 8 Zhongyu 8	0.40
Seri M82	0.35	新麦 2111 Xinmai 2111	0.27	衡 95 观 26 Heng 95 Guan 26	0.40
衡 6632 Heng 6632	0.24	莘麦 13-2 Shenmai 13-2	0.26	陕 7859 Shaan 7859	0.31
中信麦 99 Zhongxinmai 99	0.35	SH4300	0.34	陕麦 168 Shaanmai 168	0.38
小偃 54 Xiaoyan 54	0.28	睢 1216 Ju 1216	0.40	西农 811 Xinong 811	0.46
洛早 6 Luohan 6	0.37	Lassit	0.42	周麦 17 Zhoumai 17	0.36
泰科麦 33 Taikemai 33	0.33	怀川 916 Huaichuan 916	0.28	西农 979 Xinong 979	0.40
皖麦 52 Wanmai 52	0.34	石麦 15 Shimai 15	0.38	西农 2000-7 Xinong 2000-7	0.59
先麦 12 Xianmai 12	0.44	豫粮 1688 Yuliang 1688	0.29	豫农 982 Yunong 982	0.49
周麦 98165 Zhoumai 98165	0.26	山农 24 Shannong 24	0.30	旱优 98 Hanyou 98	0.22
豫农 416 Yunong 416	0.42	周麦 26 Zhoumai 26	0.33	轮选 061 Lunxuan 061	0.50
郑麦 366 Zhengmai 366	0.35	泉麦 890 Quanmai 890	0.27	漯麦 9908 Luomai 9908	0.34
Clearwhite	0.73	徐麦 0054 Xumai 0054	0.34	运丰 175 Yunfeng 175	0.35
众麦 7 Zongmai 7	0.34	洛麦 23 Luomai 23	0.26	鲁麦 1 Lumai 1	0.27
中育 1152 Zhongyu 1152	0.51	中育 1211 Zhongyu 1211	0.32	长武 58-61 Changwu 58-61	0.35
良星 99 Liangxing 99	0.23	YD56	0.32	荔高 6 Ligao 6	0.24
花培 8 Huapei 8	0.31	宝科 8 Baoke 8	0.22	陕麦 150 Shaanmai 150	0.62
普冰 151 Pubing 151	0.67	西农 538 Xinong 538	0.38	普冰 201 Pubing 201	0.33
长早 58 Changhan 58	0.36	36708	0.39	长武 521-7 Changwu 521-7	0.42
偃高 21 Yangao 21	0.51	周麦 32 Zhoumai 32	0.36	长武 135 Changwu 135	0.43
光泰 68 Guangtai 68	0.35	阳光 851 Yangguang 851	0.45	长武 863 Changwu 863	0.38
良星 66 Liangxing 66	0.27	郑麦 113 Zhengmai 113	0.37	济南 18 Jinan 18	0.31
温麦 6 Wenmai 6	0.34	秋乐 2122 Qiule 2122	0.21	Drysdale	0.25
谷神 1 Gushen 1	0.35	中金 13 Zhongjin 13	0.38	洛早 3 Luohan 3	0.22
安农 1206 Annong 1206	0.27	郑麦 369 Zhengmai 369	0.22	京冬 1 Jingdong 1	0.32
陕早 187 Shanhan 187	0.39	漯麦 18 Luomai 18	0.44	临早 536 Linhan 536	0.35
漯麦 8 Luomai 8	0.29	邯 115276 Han 115276	0.46	石家庄 54 Shijiazhuang 54	0.62
瑞华 1101 Ruihui 1101	0.45	周麦 24 Zhoumai 24	0.60	静 2001 Jing 2001	0.37
农圣 1 Nongsheng 1	0.49	鑫农 518 Xinnong 518	0.70	铜麦 3 Tongmai 3	0.46
明丰 5088 Mingfeng 5088	0.48	轮选 66 Lunxuan 66	0.57	济宁 18 Jining 18	0.38
龙科 1221 Longke 1221	0.35	存麦 12 Cunmai 12	0.36	临汾 10 Linfen 10	0.41
百农 207 Bainong 207	0.39	郑麦 618 Zhengmai 618	0.33	丰抗 5 Fengkang 5	0.30
石 10-4393 Shi 10-4393	0.26	丰德存 1 Fengdecun 1	0.46	兰天 10 Lantian 10	0.55
洛麦 21 Luomai 21	0.33	西农 223 Xinong 223	0.32	山优 2 Shanyou 2	0.35
商麦 167 Shangmai 167	0.49	YD62	0.26	秦农 712 Qinnong 712	0.22
烟农 21 Yannong 21	0.36	德宏福 2 Dehongfu 2	0.44	京旺 9 Jingwang 9	0.42
新麦 32 Xinmai 32	0.39	瑞泉麦 24 Ruiquanmai 24	0.35	科冬 81 Kedong 81	0.48
育德 1 Yude 1	0.50	周麦 18 Zhoumai 18	0.45	普冰 143 Pubing 143	0.67
徐麦 1108 Xumai 1108	0.40	周麦 23 Zhoumai 23	0.29	丰产 3 Fengchan 3	0.60
LS3639	0.41	石麦 19 Shimai 19	0.51	农大 198 Nongda 198	0.50
淄麦 28 Zimai 28	0.31	陕麦 159 Shaanmai 159	0.42	中早 110 Zhonghan 110	0.19
洛早 2 Luohan 2	0.37	洛麦 22 Luomai 22	0.31	旱选 1 Hanxuan 1	0.41
新麦 26 Xinmai 26	0.37	洛麦 24 Luomai 24	0.54	旱选 10 Hanxuan 10	0.60
平安 8 Pingan 8	0.31	平麦 02-16 Pingmai 02-16	0.26	和尚头 132 Heshangtou 132	0.53
郑麦 131 Zhengmai 131	0.30	涡麦 66 Womai 66	0.40	和尚头 135 Heshangtou 135	0.34
LS4223	0.21	河农 827 Henong 827	0.44	高平 7 Gaoping 7	0.45
濮麦 6311 Pumai 6311	0.33	周麦 27 Zhoumai 27	0.52	陇紫麦 1 Longzimai 1	0.41
西农 958 Xinong 958	0.31	俊达 129 Junda 129	0.32	偃展突变 Yanzhan mutation	0.41
西农 7733 Xinong 7733	0.41	泰山 5 Taishan 5	0.40	邯 6172 Han6172	0.52

注:第一列为 W-1~W-80,第二列为 W-81~W-160,第三列为 W-161~W-240。下同。

Note: The first columns are W-1 to W-80, second columns are W-81 to W-160, third column are W-161 to W-240. The same below.

利用 Rstudio 软件根据综合抗旱系数 D 值进行聚类分析, 聚类结果如图 1 所示, 分为高抗旱、抗旱、中等抗旱、干旱敏感、干旱高敏感 5 个类群。高抗旱品种(系): D 值在 0.59~0.73 共 13 份; 抗旱品种(系): D 值在 0.48~0.57 共 27 份; 中等抗旱品种(系): D 值在 0.38~0.47 共 71

份; 干旱敏感品种(系): D 值在 0.29~0.38 共 88 份; 干旱高敏感品种(系): D 值在 0.16~0.29 共 41 份。其中高抗旱材料 13 份分别为‘西农 2000-7’‘长武 134’‘丰产 3 号’‘早选 10 号’‘周麦 24’‘陕麦 150’‘石家庄 54’‘291 转 8’‘普冰 151’‘普冰 143’‘西农 981’‘鑫农 518’‘Clear white’。



I. 高抗旱群体; II. 抗旱群体; III. 中等抗旱群体; IV. 干旱敏感群体; V. 干旱高敏感群体

I. Highly resistant group; II. Resistant group; III. Medium resistance; IV. Sensitive group; V. Highly sensitive group

图 1 240 份小麦品种(系)抗旱性聚类图

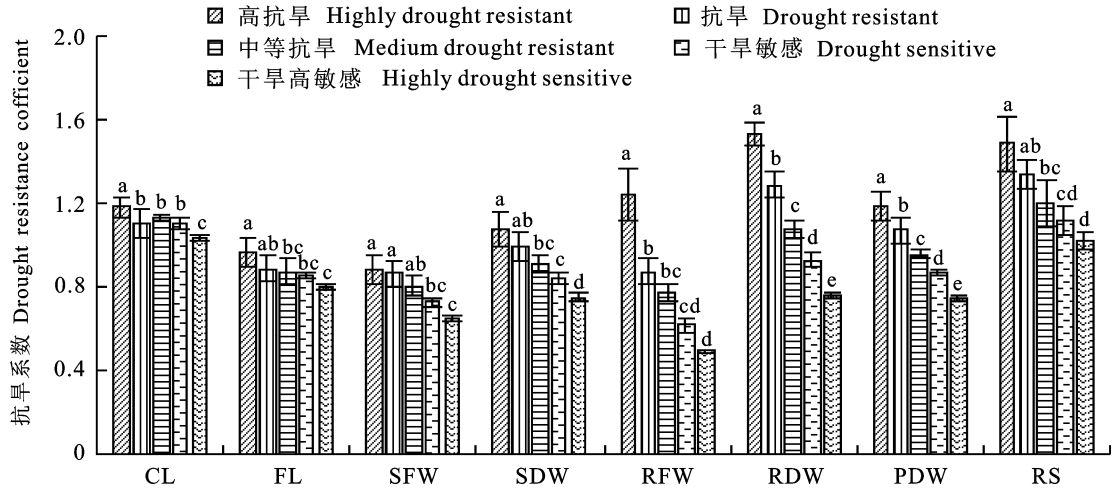
Fig. 1 Cluster map of drought resistance of 240 wheat varieties(lines)

2.5 各指标抗旱系数的相关性及各群体间的差异性分析

将综合抗旱系数 D 值分别与 8 个苗期指标的抗旱系数进行相关性分析, 结果如表 7 所示, 胚芽鞘长、地上、地下部干鲜质量等 8 个苗期指标与综合抗旱系数 D 值都呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数最高的为整株的干质量, 地下部干质量, 相关系数分别为 0.85、0.84, 且地下部干质量、整株干质量在 5 个群体间差异显著 (图 2), 表明这两个指标对苗期抗旱性鉴定的贡献最大。

2.6 苗期性状与成熟期相关农艺性状的相关性分析

从表 8 可以看出, 苗期的胚芽鞘长与株高、旗叶长、穗长、籽粒周长呈极显著或显著正相关, 相关系数分别为 0.43、0.24、0.37 及 0.14。苗期的第一叶长与株高、穗长、籽粒周长均值、籽粒长均值呈显著或极显著正相关, 相关系数分别为 0.44、0.41、0.15 及 0.16; 苗期地上地下部干鲜质量及整株的干质量与籽粒的千粒质量、籽粒面积均值、周长均值、长均值、宽均值、直径均值均呈极显著相关; 地下部干鲜质量与籽粒的长、周长不相关, 但与其他籽粒性状均呈显著或极显著正相关。



误差线上不同字母表示同一处理不同材料间差异显著($P<0.05$)

Different letters above error bars indicate significant differences among varieties at $P<0.05$

图 2 抗旱群体间各指标差异性分析

Fig. 2 Analysis of difference of each index among drought-resistant populations

表 7 综合抗旱系数 D 值与苗期抗旱系数相关性分析

Table 7 Correlation analysis of comprehensive drought resistance coefficient D value and seedling drought resistance coefficient

指标 Index	CL	FL	SFW	SDW	RFW	RDW	PDW	RS
D	0.35**	0.42**	0.51**	0.65**	0.59**	0.84**	0.85**	0.46**

表 8 苗期指标与田间性状及籽粒性状相关性分析

Table 8 Analysis of correlation between seedling indexes and field characters and grain characters

指标 Index	CL	FL	SFW	SDW	RFW	RDW	PDW	RS
PH	0.43**	0.44**	0.08	0.13*	-0.35**	-0.14*	0.03	-0.21**
FLL	0.24**	0.12	-0.01	-0.05	-0.18**	-0.16*	-0.11	-0.12
FLW	-0.20**	-0.23**	0.11	0.02	0.27**	0.16*	0.09	0.13
SL	0.37**	0.41**	0.13	0.15	-0.03	0.12	0.17	0.03
TKW	0.11	0.00	0.22**	0.28**	0.33**	0.38**	0.37**	0.21**
GS	0.12	0.12	0.20**	0.21**	0.17**	0.20**	0.25**	0.07
GC	0.14*	0.15*	0.17**	0.19**	0.11	0.14*	0.20**	0.02
GL	0.12	0.16*	0.18**	0.20**	0.07	0.11	0.19**	-0.01
GW	0.08	0.07	0.17**	0.16*	0.21**	0.22**	0.22**	0.11
GD	0.10	0.12	0.19**	0.20**	0.15*	0.18**	0.22**	0.05

注:PH.株高;FLL.旗叶长;FLW.旗叶宽;SL.穗长;TKW.千粒质量;GS.籽粒面积;GC.籽粒周长;GL.籽粒长;GW.籽粒宽;GD.籽粒直径。

Note:PH. Plant height; FLL. Flag leaf length; FLW. Flag leaf width; SL. Spike length; TKW. Thousand kernel mass; GS. Grain size; GC. Grain circumference; GL. Grain length; GW. Grain width; GD. Grain diameter.

3 讨论

3.1 苗期抗旱性鉴定指标的贡献

不同基因型的小麦材料在干旱胁迫下生理生化等指标会存在差异,小麦生理生化指标可用来进行有效的抗旱性鉴定^[16],小麦苗期最大根长、地上地下部干鲜质量、根冠比、胚芽鞘长、苗高等指标均可作为苗期抗旱性鉴定的有效指标^[17-19]。

有研究指出干旱胁迫下小麦胚芽鞘长度缩短,也有研究发现 10% PEG 模拟干旱胁迫会促进胚芽鞘伸长^[20-21]。本试验发现 89.60% 供试材料的胚芽鞘长的抗旱系数大于 1,可能是轻度干旱环境诱导了小麦胚芽鞘的伸长。苗期各指标在干旱胁迫下的变化幅度不同,利用隶属函数值法对 8 个苗期指标进行综合评价,发现综合利用各指标对苗期抗旱性进行评价最准确可靠。以苗期的综合

抗旱系数 D 值为依据进行聚类分析,将 240 份小麦品种(系)分为高抗旱、抗旱、中等、敏感、高敏感材料,其中高抗旱品种 13 个,部分品种的抗旱结果与前人研究一致。朱美琛等^[22]发现‘旱选 10 号’是高抗旱小麦品种,雷代丽等^[23]鉴定‘长武 134’为抗旱性强的品种,王志成等^[24]在陕西旱地环境中筛选出‘普冰 151’的丰产性及综合抗旱性高于‘晋麦 47’,张正茂等^[25]发现‘普冰 143’的抗旱性优于‘晋麦 47’,任志龙等^[26]提出‘陕麦 150’不仅优质且耐旱性强,为抗旱性强的品种,这些结果也表明利用 D 值进行苗期抗旱性评价是准确的。通过综合抗旱系数 D 值与 8 个苗期抗旱指标的抗旱系数进行相关性分析,发现苗期地下部干质量与整株干质量对小麦苗期抗旱性贡献最大,利用苗期单个指标不能准确对小麦的抗旱性进行鉴定,建议利用苗期指标综合值进行抗旱材料筛选。

3.2 苗期性状与成熟期相关性状的相关性

小麦苗期的生物量与植物的抗旱性有密切关系^[11],本试验发现地上地下部干鲜质量、植株整株干质量与籽粒千粒质量、周长均值、面积均值等呈显著或极显著正相关,说明苗期活力对小麦产量有积极效应。也有研究指出小麦苗期整株干质量与穗粒数、穗长、千粒质量呈显著正相关,总干质量与穗数和株高呈显著正相关,故苗期的抗旱性等性状与成熟期相关农艺性状有密切关系^[27-28],利用苗期性状对成熟期性状进行预测是可行的;在籼稻中也证实了根冠比和单株根干质量的提高会使产量显著增加^[29]。本研究也发现小麦苗期根冠比与千粒质量呈正相关,整株干质量与籽粒的千粒质量、籽粒长宽等籽粒性状呈极显著正相关。此外本研究还发现胚芽鞘长、第一叶长与田间成熟期株高、旗叶长呈显著正相关,而与旗叶宽呈显著负相关,抗旱品种的旗叶特性值得后续深入研究。通过苗期抗旱性鉴定可以在幼苗期对小麦品种进行抗旱性筛选,利用苗期活力等相关指标对品种的抗旱能力进行量化,并对成熟期相关农艺性状和产量性状进行预测,有助于加速抗旱新品种的选育进程。

4 结 论

通过控制含水量法进行苗期干旱胁迫,利用综合抗旱系数及聚类分析,鉴定出 13 份高抗旱材料,并筛选出苗期植株干质量、地下部干质量为高

效的苗期抗旱性鉴定指标。小麦苗期活力对后期的生长发育有积极作用,因此在苗期进行小麦抗旱性鉴定可以对实际生产提供参考,有利于快速筛选抗旱种质,加速小麦抗旱育种进程。

参考文献 Reference:

- [1] LONG S, MARSHALL-COLON A, ZHU X G. Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential[J]. *Cell*, 2015, 161(1): 56-66.
- [2] 何中虎, 庄巧生, 程顺和, 等. 中国小麦产业发展与科技进步[J]. 农学学报, 2018, 8(1): 99-106.
HE ZH H, ZHUANG Q SH, CHENG SH G, et al. Wheat production and technology improvement in china[J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1): 99-106.
- [3] DARYANTO S, WANG L, JACINTHE P A. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: a review[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 18-33.
- [4] 赵佳佳, 乔玲, 武棒棒, 等. 山西省小麦苗期根系性状及抗旱特性分析[J]. 作物学报, 2021, 47(4): 714-727.
ZHAO J J, QIAO L, WU B B, et al. Seedling root characteristics and drought resistance of wheat in Shanxi province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(4): 714-727.
- [5] 任毅, 颜安, 张芳, 等. 国内外 301 份小麦品种(系)种子萌发期抗旱性鉴定及评价[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 1-14.
REN Y, YAN A, ZHANG F, et al. Identification and evaluation of drought tolerance of 301 wheat varieties (lines) at germination stage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3): 1-14.
- [6] AMITA M, SCHILLINGER W F, GILL K S, et al. Wheat seedling emergence from deep planting depths and its relationship with coleoptile length[J]. *Plos One*, 2013, 8(9): e73314.
- [7] 杨倩, 袁飞敏, 王海庆, 等. 西北旱地农家小麦品种抗旱生理机制探究[J]. 分子植物育种, 2018, 16(18): 6105-6111.
YANG Q, YUAN F M, WANG H Q, et al. Preliminary study on physiological mechanism of drought resistance of wheat varieties in northwest dryland[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(18): 6105-6111.
- [8] 李梦达, 李向东, 牛洪斌, 等. 小麦品种抗旱性与深根性和深层根系活性的关系[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(5): 666-672.
LI M D, LI X D, NIU H B, et al. Relationship between drought resistance, deep rooting characteristics and vigor of roots within deep - soil - layer of different wheat cultivars[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(5): 666-672.
- [9] SONG Q, LIU C, BACHIR D G, et al. Drought resistance of new synthetic hexaploid wheat accessions evaluated by multiple traits and antioxidant enzyme activity[J]. *Field Crops Research*, 2017, 210: 91-103.
- [10] LIU R X, WU F K, YI X, et al. Quantitative trait loci analysis for root traits in synthetic hexaploid wheat under drought stress conditions[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(8): 1947-1960.
- [11] POUR-ABOUGHADAREH A, ETMINAN A, ABDELRAHMAN M, et al. Assessment of biochemical and physiological parameters of durum wheat genotypes at the seed-

- ling stage during polyethylene glycol-induced water stress [J]. *Plant Growth Regulation*, 2020, 92(1): 81-93.
- [12] 孙海丽, 王文佳, 刘梦兰, 等. 小麦抗旱鉴定指标的研究现状与进展[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2020, 48(4): 1-7.
- SUN H L, WANG W J, LIU M L, *et al.* The research status and progress on identification indicators of wheat drought resistance[J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(4): 1-7.
- [13] 张健龙, 易科, 张一岚, 等. 干旱胁迫对不同彩粒小麦苗期生长发育的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(6): 842-850.
- ZHANG J L, YI K, ZHANG Y L, *et al.* Effects of drought stress on development of different colored wheat at seedling stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(6): 842-850.
- [14] SALLAM A, ALQUDAH A M, DAWOOD M F A, *et al.* Drought stress tolerance in wheat and barley: advances in physiology, breeding and genetics research [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(13): 3137.
- [15] 侯俊峰, 黄鑫, 侯阁阁, 等. 非结构性碳水化合物积累与小麦植株抗旱性及产量的关系[J]. 西北农业学报, 2017, 26(11): 1590-1597.
- HOU J F, HUANG X, HOU G G, *et al.* Relationship between non-structural carbohydrate accumulation and drought resistance and grain yield of wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(11): 1590-1597.
- [16] 张平, 张慧, 刘俊娜, 等. 干旱及复水处理对抗旱性不同小麦品种/系苗期生理生化指标的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(12): 1795-1802.
- ZHANG P, ZHANG H, LIU J N, *et al.* Effects of drought and re-watering treatment on physiological and biochemical indexes of different drought resistant wheat varieties/lines at seedling stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(12): 1795-1802.
- [17] 胡雯娟, 王思宇, 樊高琼, 等. 西南麦区小麦品种苗期抗旱性鉴定及其指标筛选[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 182-189.
- HU W M, WANG S Y, FAN G Q, *et al.* Analysis on the drought resistant of drought resistance appraisal indexes of wheat cultivars in seedling stage in southwest area[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(2): 182-189.
- [18] REBETZKE G J, RICHARDS R A, FETTEL N A, *et al.* Genotypic increases in coleoptile length improves stand establishment, vigour and grain yield of deep-sown wheat[J]. *Field Crops Research*, 2007, 100(1): 10-23.
- [19] 宁东贤, 王小璐, 赵玉坤, 等. 旱地小麦不同播深条件下胚芽鞘长度与产量的关联性[J]. 山西农业科学, 2018, 46(2): 203-206.
- NING D X, WANG X L, ZHAO Y K, *et al.* Study on the correlation between the coleoptile length and yield under different sowing depth conditions in dryland wheat[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(2): 203-206.
- [20] 田恩云. 小麦不同品种苗期抗旱性差异比较[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2017.
- TIAN E Y. Comparison of drought resistance of different wheat cultivars at seedling stage[D]. Tai'an Shandong: Shandong Agriculture University, 2017: 46.
- [21] 杜欣欣, 张红, 吴允朋, 等. 小麦重组自交系群体苗期抗旱性综合评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 286-290, 297.
- DU X X, ZHANG H, WU Y P, *et al.* Comprehensive evaluation of drought tolerance at seedling stage for wheat recombinant inbred lines[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(4): 286-290, 297.
- [22] 朱美琛, 马兴立, 余幸, 等. 水分胁迫对小麦幼苗中活性氧与细胞死亡的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(4): 776-782.
- ZHU M CH, MA X L, YU X, *et al.* Effects of water stress on reactive oxygen species and cell death in wheat seedlings[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(4): 776-782.
- [23] 雷代丽, 雷瑛彤, 张琳, 等. 基因枪介导的转 *TaGAPDH8* 基因小麦的获得与鉴定[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(2): 133-139.
- LEI D L, LEI Y T, ZHANG L, *et al.* Transformation of wheat with *TaGAPDH8* gene by particle bombardment and identification of transgenic progeny[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(2): 133-139.
- [24] 王志成, 李春艳. 陕西旱地小麦新品种筛选试验初报[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(3): 1-3.
- WANG ZH CH, LI CH Y. Preliminary report on screening experiment of new wheat varieties in dryland in Shaanxi province[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 63(3): 1-3.
- [25] 张正茂, 胡新中, 李国龙, 等. 旱地小麦新品种‘小冰麦 143’品质特性研究[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(4): 36-39.
- ZHANG ZH M, HU X ZH, LI G L, *et al.* Quality characters of new bred dry-land wheat variety ‘Xiaobingmai 143’[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2003, 23(4): 36-39.
- [26] 任志龙, 吉万全, 赵会贤, 等. 面包专用粉小麦新品种陕麦 150 的选育与产业化开发[J]. 麦类作物学报, 2000, 20(1): 74-77.
- REN ZH L, JI W Q, ZHAO H X, *et al.* Development and industrial exploitation of a new bread wheat variety shaanmai 150[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2000, 20(1): 74-77.
- [27] 陈旭. 小麦不同氮效率品种苗期根系性状与籽粒产量和品种的关系研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.
- CHEN X. Study on relationship of seedling root traits with grain yield & quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars with different nitrogen use efficiency[D]. Zhengzhou: Henan Agriculture University, 2020.
- [28] 徐易如. 小麦苗期生物量、成熟期农艺性状对氮、磷、钾胁迫的响应及其遗传解析[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2020.
- XU Y R. Response of seedling biomass and agronomic traits in maturity stage of wheat to nitrogen, phosphorus and potassium deficiency and its genetic analysis[D]. Tai'an Shandong: Shandong Agriculture University, 2020.
- [29] 张传胜, 王余龙, 龙银成, 等. 影响籼稻品种产量水平的主要根系性状[J]. 作物学报, 2005, 31(2): 137-143.
- ZHANG CH SH, WANG Y L, LONG Y CH, *et al.* Main

root traits affecting yield level in conventional indica rice cultivars(*Oryzasativa* L.)[J]. *Acta Agronomica Sinica*,

2005,31(2):137-143.

Identification of Drought Resistance at Seedling Stage and Correlation Analysis between Drought Resistance Indexes and Important Agronomic Characters of 240 Wheat Materials

SUN Nannan¹, ZHOU Quan¹, ZHI Lei¹, QIAO Pengfang¹, MU Liming², NI Shengli³, Dauren Serikbay^{1,4}, LI Xingmao³, HU Yingang¹ and CHEN Liang¹

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University/State Key Laboratory of Adversity Biology in Arid Areas, Yangling

Shaanxi 712100, China; 2. Dingxi Academy of Agricultural Sciences, Dingxi Gansu 743000, China;

3. Dryland Agriculture Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;

4. S. Seifullin Kazakh Agro Technical University, Nursultan Kazakhstan)

Abstract In order to understand the drought resistance and screen out effective drought resistance indexes of 240 varieties of wheat at the seedling stage, 8 seedling indexes including coleoptile length (CL), first leaf length (FL), shoot fresh mass (SFW) were measured under water stress and normal water conditions. The drought resistance of wheat was assessed comprehensively by membership function method, cluster analysis, and principal component analysis. The results showed that the coleoptile length and the ratio of root to shoot of the drought stress group were higher than those of the control group while other indexes displayed lower ratios compared to control group. Based on the principal component analysis of the membership function value of the drought resistance coefficient of each character, the 8 characters were summarized into 3 components, and the cumulative contribution rate reached 80.50%. The 240 wheat varieties were divided into five groups after further cluster analysis: highly drought resistant, drought resistant, medium drought resistant, drought sensitive, and highly drought sensitive, among which 13 varieties were high drought resistant. The correlation analysis between drought resistance indices at seedling stage and important agronomic characters showed that coleoptile length was significantly positively correlated with plant height, flag leaf length and spike length, the varieties with high seedling vigor had higher thousand kernel mass. The comprehensive drought resistance coefficient D calculated by the membership function method was more accurate to evaluate the drought resistance at the seedling stage. By the identification of drought resistance of wheat at seedling stage, the drought resistance of wheat can be evaluated in advance to provide a reference for actual wheat production and speed up the process of wheat drought resistance breeding.

Key words Wheat seedling stage; Drought resistance; Identification; Agronomic traits; Correlation

Received 2021-11-10

Returned 2021-11-24

Foundation item Key R&D Program of Shaanxi Province (No. 2020NY-045); Opening Project of State Key Laboratory of Wheat and Maize Crops.

First author SUN Nannan, female, master student. Research area: wheat drought resistance breeding. E-mail: 1187730576@qq.com

Corresponding author CHEN Liang, male, associate professor, master supervisor. Research area: molecular breeding for stress resistance of wheat. E-mail: chenliang9117@nwsuaf.edu.cn

(责任编辑: 顾玉兰 Responsible editor: GU Yulan)