文章编号:1000-7601(2022)06-0034-11 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.06.04

基于主成分分析和隶属函数的谷子全生育期耐旱性鉴定

肖继兵[1],刘　志[1],辛宗绪[1],李俊志[1],陈国秋[1],朱晓东[1],孙占祥[2]

(1. 辽宁省旱地农林研究所,辽宁 朝阳 122000;2.辽宁省农业科学院,辽宁 沈阳 110161)

摘　要:优异耐旱种质资源鉴定及耐旱指标筛选研究对于挖掘耐旱基因和提高耐旱育种效率具有重要作用。2019—2020 年以 30 份谷子种质为试材,采用随机不完全区组设计(alpha-格子设计),设干旱胁迫(DS)和正常供水(CK)2 个处理,考察了谷子农艺性状的耐旱系数,通过综合评价指标耐旱性度量值 *D* 对供试谷子材料的耐旱性进行鉴定。联合方差分析表明:土壤水分环境和基因型显著影响谷子农艺性状,而且基因型与土壤水分环境的互作显著影响谷子生长性状,但对产量性状的影响不显著(千粒重除外)。*t* 测验结果表明干旱胁迫效果显著(千粒重除外)。主成分分析将 11 个单项耐旱评价指标转化为 3 个相互独立的综合指标,方差累计贡献率为 81.27%。第一主成分相当于 5.866 个原始指标的作用,可以解释 53.327%的方差,其中株高、倒二叶叶面积、茎叶干重、穗长、穗重、穗粒重指标载荷系数绝对值较大;第二主成分主要反映的是穗颈长和穗粒数指标;第三主成分中起主要作用的是主茎节数、千粒重和产量指标。依据 *D* 值非加权组平均法聚类分析,将供试谷子材料耐旱性分为 5 类。判别分析表明株高和穗重可作为谷子全生育期耐旱性鉴定首选指标。基于主成分分析和隶属函数确定耐旱性评价指标 *D* 值,通过 *D* 值可对谷子全生育期耐旱性进行有效可靠的鉴定。

关键词:谷子;干旱胁迫;主成分分析;判别分析;耐旱性鉴定

中图分类号:S515　　**文献标志码**:A

Identification of drought tolerance in foxtail millet during its entire growth period based on principal component analysis and membership function

XIAO Jibing[1], LIU Zhi[1], XIN Zongxu[1], LI Junzhi[1],
CHEN Guoqiu[1], ZHU Xiaodong[1], SUN Zhanxiang[2]

(1.*Liaoning Institute of Agriculture and Forestry in Arid Areas*, *Chaoyang*, *Liaoning* 122000, *China*;
2. *Liaoning Academy of Agricultural Science*, *Shenyang*, *Liaoning* 110161, *China*)

Abstract: This study aimed to screen drought tolerance materials and indices in foxtail millet germplasm resources to explore drought tolerance genes and improve the efficiency of drought tolerance breeding. A field experiment was conducted using a randomized incomplete block design (alpha-lattice design) and repeated thrice in 2019-2020. Each experiment was consisted of 30 foxtail millet genotypes treated under drought stress (DS) and normal water supply (CK). The agronomic traits and drought tolerance coefficient of the genotypes were assessed during the entire growth period. The drought tolerance of foxtail millet was identified by the comprehensive evaluation index *D*. Combined analysis of variance showed that soil water environment and genotype significantly affected the indices. Besides, the interaction between genotype and soil water environment significantly affected the growth traits of foxtail millet, but not yield traits (except 1000-grain weight). The results of *t*-test showed that the effect of drought stress was significant (except 1000-grain weight). Principal component analysis transformed eleven single drought tolerance evaluation indices into three independent comprehensive indices, and the cumulative contribution rate of variance reached 81.27%. The first principal component was equivalent to 5.866 original indices, which explained

收稿日期:2021-12-18　　**修回日期**:2022-02-21

基金项目:国家现代农业产业技术体系(CARS-06-13.5-B16,CARS-06-14.5-B16);辽宁省农业科学院学科建设专项(2019DD206731)

作者简介:肖继兵(1976-),男,辽宁朝阳人,研究员,主要从事旱作农业研究。E-mail: xiaojb2004@126.com

通信作者:孙占祥(1967-),男,辽宁抚顺人,研究员,主要从事旱作农业研究。E-mail: sunzx67@163.com

53.327% variance, in which the absolute values of load coefficients of plant height, top second leaf area, dry weight of stem and leaf, spike length, spike weight and grain weight per spike were larger. The second principal component mainly reflected the top node length and kernels per spike. Stem node number, 1000-grain weight and yield played major role in the third principal component. According to the cluster analysis of the *D*-value unweighted pair-group method with arithmetic means, the drought tolerance of foxtail millet was divided into five categories. Discriminant analysis showed that plant height and spike weight per plant should be used as indices for drought tolerance identification in foxtail millet. Based on principal component analysis and membership function, the comprehensive evaluation index *D* of drought tolerance of several agronomic traits should be used to identify drought tolerance during the entire growth period in foxtail millet.

Keywords: foxtail millet; drought stress; principal component analysis; discriminant analysis; drought tolerance identification

干旱是限制全球生产的最重要的非生物因素之一[1],其危害相当于其他自然灾害的总和[2-3],严重影响植物正常生长发育,制约作物产量[4]。我国旱地面积占全国总土地面积的 52.5%,每年因干旱损失的粮食达 1 亿 t 以上[5-6]。为了应对干旱威胁,对作物的耐旱性进行遗传改良是当务之急,而鉴定和评价作物种质资源的耐旱性是耐旱育种的前提条件[7]。我国谷子种植面积约 100 万 hm^2,占世界总面积的 80%,在旱作农业生产和满足食物多元化消费中占有重要地位[8-9]。谷子是禾本科作物耐旱研究的新型模式作物[10-13],虽然耐旱性较强,但干旱仍然是影响其产量和品质的主要因素之一[14]。因此,谷子耐旱育种过程中,有必要对供试种质资源进行耐旱性鉴定。

多年来,国内外学者针对作物不同品种的耐旱性提出了多种鉴定方法[15-22],并从形态[23-25]和生理生化[26-28]等方面的鉴定指标进行了研究。目前,对谷子耐旱性鉴定的研究主要是在谷子的萌芽期、苗期和全生育期,通过模拟不同程度水分胁迫,依据形态指标、生理生化指标和产量指标等,通过多元统计分析的方法对种质资源耐旱性进行综合评价和指标筛选[29-33],苗期耐旱性鉴定是目前谷子种质资源耐旱性鉴定采用的主要方法[31-33]。张文英等[34]和刘婧等[35]研究认为根冠比、单穗粒重、灌浆期光合速率、蒸腾速率、株高、穗长可作为谷子全生育期耐旱性鉴定的指标,并用株高和穗长的耐旱系数和产量耐旱指数对谷子品种耐旱性进行了评价,认为谷子全生育期耐旱性鉴定结果相对更为可靠[35]。近年来相关耐旱基因和蛋白的研究能更确切地分析鉴定谷子的耐旱性[36-38]。谷子耐旱性评价和指标筛选过程中,为了避免单一指标的片面性和不稳定性,研究者们采用了主成分分析、隶属函数分析、聚类分析和逐步回归分析等相结合的方法进行多指标综合评价,而指标性状的耐旱系数和耐旱指数在评价体系中应用较为广泛[34-35,39-41]。然而任何评价方法都是对作物耐旱性实际结果的估计,不能代表其真正的耐旱能力。迄今为止,国内外对耐旱性鉴定指标和评价方法均没有准确可靠的统一规定,对作物耐旱性评价方法的研究仍未取得突破性进展。目前普遍认为,多指标多方法相结合的耐旱性综合评价相对更加真实可靠[42],可以较好地揭示指标性状与耐旱性的关系。本文通过考量谷子相关农艺性状和产量指标的耐旱系数,建立谷子全生育期耐旱性评价的可靠方法和鉴定指标,以期为谷子耐旱种质资源鉴定及耐旱新品种选育提供理论和技术支持。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2019—2020 年在辽宁省旱地农林研究所示范基地进行(118°50′~121°20′E,40°35′~42°20′N),属北温带大陆性季风气候,四季分明,昼夜温差大,年平均气温 7.15℃,年平均日照时数 2 800 h,10℃以上积温平均为 3 220℃,无霜期 150 d 左右,年平均降水量 438.9 mm,季节分布不均,70%~74%的降水集中在 6—8 月份,以雨养农业为主,一年一熟。供试土壤为砂壤质褐土,含有机质 11.05 $g \cdot kg^{-1}$、全氮 0.77 $g \cdot kg^{-1}$、碱解氮 54.0 $mg \cdot kg^{-1}$、有效磷 12.15 $mg \cdot kg^{-1}$、速效钾 128.0 $mg \cdot kg^{-1}$、pH 为 7.6,田间持水量为 19.5%。2019 年和 2020 年谷子生育期降水量分别为 341 mm 和 382 mm。

1.2　试验设计

试验设干旱胁迫(DS)和对照(CK)2 种处理,每种处理 30 份谷子材料。采用随机不完全区组设计(alpha-格子设计),各处理设 3 次重复,小区面积

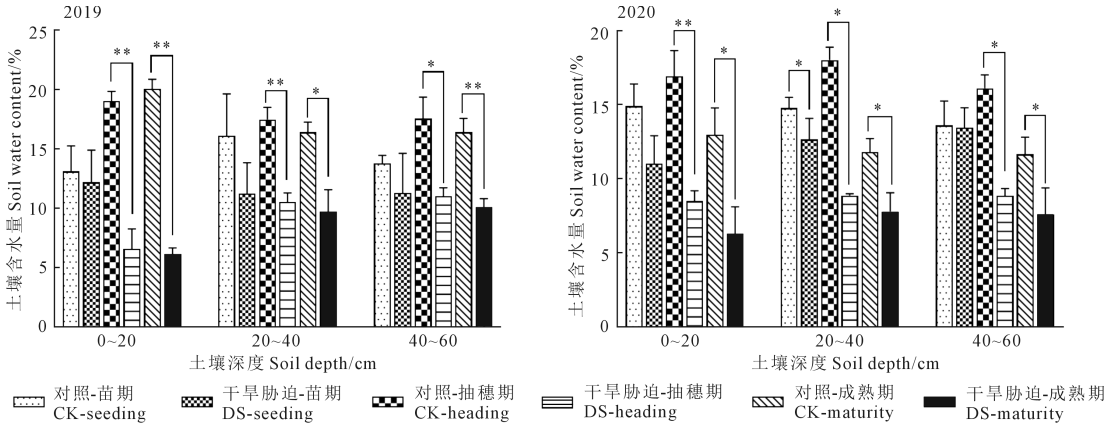
1.5 m^2(1.5 m×1 m),每个品种播种 3 行,行长 1.5 m,行距 25 cm,株距 6.8 cm。播种前每区施高氮长效缓释复合肥(含 N 26%、$P_2O_5$12%、K_2O 12%)600 kg·hm^{-2}作为基肥,整个生育期不再追肥。干旱处理在移动式耐旱棚的干旱池内进行,播种前和定苗(5~6 叶期)后分别灌水至田间持水量的 70%,之后不再灌水,进行干旱胁迫处理;对照处理(非水分胁迫)在移动式耐旱棚外邻近地块进行,生长期间以自然降水为主,若遇严重干旱,适当灌水,保证谷子正常生长。供试谷子材料见表 1。

试验期间不同处理土壤质量含水量(烘干法测定)见图 1。2019 年和 2020 年谷子抽穗期和成熟期,CK 和 DS 处理各层次土壤水分 t 测验差异均达显著水平。2019 年,DS 处理抽穗期和成熟期 0~20 cm 土层土壤相对含水量分别为 33.79%和 31.69%,0~60 cm 土层土壤相对含水量分别为 48.21%和 44.51%;2020 年,DS 处理抽穗期和成熟期 0~20 cm 土层土壤相对含水量分别为 37.23%和 29.02%,0~60 cm 土层土壤相对含水量分别为 41.64%和 37.13%。一般认为当土壤相对含水量<40%时,作物受旱严重,土壤相对含水量为 40%~60%时,作物呈现旱象[43]。2 个处理土壤水分差异主要在抽穗期至成熟期,DS 处理 0~20 cm 土层土壤含水量达重旱程度,说明谷子干旱胁迫处理有效。

表 1 供试谷子材料

Table 1 The tested foxtail millet materials

编号 Code	名称 Genotype	来源 Origin	编号 Code	名称 Genotype	来源 Origin
G1	9368	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Agriculture and Forestry in Arid Areas	G16	赤谷 25 Chigu 25	赤峰市农牧科学研究院 Chifeng Academy of Agricultural and Animal Husbandry Research Sciences
G2	朝谷 1001 Chaogu 1001	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G17	峰优 5 号 Fengyou 5	赤峰市农牧科学研究院 Chifeng Academy of Agricultural and Animal Husbandry Research Sciences
G3	朝谷 12 号 Chaogu 12	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G18	公谷 84 Gonggu 84	吉林省农业科学院 Jilin Academy of Agricultural Science
G4	朝谷 13 号 Chaogu 13	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G19	济白米 1 号 Jibaimi 1	山东省农业科学院 Shandong Academy of Agricultural Sciences
G5	朝谷 14 号 Chaogu 14	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G20	冀谷 43 号 Jigu 43	河北省农林科学院 Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences
G6	朝谷 1459 Chaogu 1459	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G21	金谷 Jingu	通辽市农业科学院 Tongliao Academy of Agricultural Sciences
G7	朝谷 15 号 Chaogu 15	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G22	晋 111 Jin 111	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences
G8	朝谷 181 Chaogu 181	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G23	九谷 11 号 Jiugu 11	吉林市农业科学院 Jilin Academy of Agricultural Sciences
G9	朝谷 19 号 Chaogu 19	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G24	九谷 31 Jiugu 31	河北省农林科学院 Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences
G10	朝谷 20 号 Chaogu 20	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G25	嫩选 18 Nenxuan 18	黑龙江省农业科学院 Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences
G11	朝谷 58 号 Chaogu 58	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G26	太选 26 号 Taixuan 26	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences
G12	朝谷 59 号 Chaogu 59	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G27	燕谷 16 号 Yangu 16	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research
G13	朝谷 60 号 Chaogu 60	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G28	燕谷 18 号 Yangu 18	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research
G14	朝谷 62 号 Chaogu 62	辽宁省旱地农林研究所 Liaoning Institute of Dry Land Agriculture and Forestry Research	G29	长农 35 Changnong 35	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences
G15	赤谷 205-24 Chigu 205-24	赤峰市农牧科学研究院 Chifeng Academy of Agricultural and Animal Husbandry Research Sciences	G30	长生 15 Changsheng 15	山西省农业科学院 Shanxi Academy of Agricultural Sciences



注:* 和 * * 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。

Note: * and * * indicates the significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

图 1　不同处理土壤水分

Fig.1　Soil water of different treatments

1.3　测定项目与方法

农艺性状调查包括株高(*PH*)、倒二叶叶面积(*LA*)、主茎节数(*SNN*)、穗颈长(*TNL*)、茎叶干重(*SLDW*)、穗长(*SL*)、单株穗重(*SWP*)、穗粒数(*KPS*)、千粒重(*TGW*)、单株粒重(*GWP*)和小区产量(*Y*),成熟后每小区中间行取样 10 株,参照谷子种质资源描述规范和数据标准进行,取 2 a 平均值作为供试性状测定值。

1.4　数据处理

耐旱系数采用式(1)计算[29]:

$$DC = \frac{x_i}{CK_i} \times 100\% \quad (i = 1,2,\cdots,n) \qquad (1)$$

式中,DC 为指标性状的耐旱系数;x_i、CK_i 分别表示干旱、对照处理的性状测定值,n 为指标性状数量;i 为指标性状。

通过主成分分析计算各基因型谷子耐旱综合指标值。

$$F(X_j) = a_{1j}X_{1j} + a_{2j}X_{2j} + \cdots + a_{1j}X_{ij}$$
$$(i = 1,2,\cdots,n;\ j = 1,2,\cdots,n) \qquad (2)$$

式中,$F(X_j)$ 为第 j 个综合指标值,a_{ij} 表示各单一指标的特征值所对应的特征向量,X_{ij} 为各单一指标标准化处理值。

采用式(3)~(4)计算隶属函数值和耐旱性度量值[22,44]:

$$u(x_j) = \frac{x_j - x_{j\max}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (j = 1,2,\cdots,n) \qquad (3)$$

$$D = \sum_{j=1}^{n}\left[u(x_j) \times \left(P_j \div \sum_{j=a}^{n} P_j\right)\right] \quad (j = 1,2,\cdots,n) \qquad (4)$$

式中,$u(x_j)$ 为各品种第 j 个综合指标的隶属函数值,x_j 表示第 j 个综合指标,$x_{j\min}$ 和 $x_{j\max}$ 表示第 j 个综合指标的最小值和最大值;P_j 为第 j 个综合指标贡献率,表示第 j 个综合指标在所有指标中的重要程度;D 为耐旱性度量值。

采用 SPSS 26.0 进行配对样本 t 测验、主成分分析和相关分析,采用 DPS 18.10 进行联合方差分析和灰色关联度分析。

2　结果与分析

2.1　不同处理对谷子农艺性状和产量的影响

联合方差分析表明(表 2),土壤水分环境和基因型对农艺性状均有显著影响,而且土壤水分环境与基因型互作对谷子生长性状有显著影响,说明生长性状更易受环境变化的影响。干旱胁迫下,各指标性状值较 CK 均发生不同程度下降。t 测验结果表明(表 3),处理间各性状成对数据差异均达到极显著水平(*TGW* 除外),其中 *SWP* 差异最大,其次为 *TNL*。干旱胁迫处理和 CK 处理各性状变异系数分别为 8.53%~43.32%(均值 24.42%)和 6.95%~48.36%(均值 21.15%),干旱胁迫处理各性状变异系数均大于对照(*Y* 除外)。*SNN* 和 *TGW* 的变异系数小于 10%,说明二者在谷子材料间的离散程度较小。

2.2　各指标性状耐旱系数

从表 4(见 39 页)可以看出,供试谷子材料在干旱胁迫处理后,各性状平均耐旱系数均小于 1。各指标性状耐旱系数平均值从大到小依次为 *TGW*、*SNN*、*SL*、*LA*、*PH*、*TNL*、*SLDW*、*SWP*、*KPS*、*GWP*、*Y*。同一材料不同性状及不同材料同一性状耐旱系数均有较大差异,说明各指标性状对干旱胁迫反应的敏感性不同。由此可见,用任何单一指标的耐旱系数来评价品种的耐旱性都存在片面性和不稳定性,必须用多个指标进行综合评价才较为可靠。

表 2 干旱胁迫和供水条件下不同基因型谷子农艺性状的联合方差分析

Table 2 Combined analysis of variance for agronomic traits of different foxtail millet genotypes under drought stress and well-watered

变异 Source of variation	*PH*/cm	*LA*/cm^2	*SNN*	*TNL*/cm	*SLDW*/g	*SL*/cm	*SWP*/g	*KPS*	*TGW*/g	*GWP*/g	*Y*/g
环境 Environment	984.65**	265.09**	77.9**	729.07**	66.56**	261.27**	381.89**	300.15**	4.75*	326.88**	123.45**
重复 Repeat	11.57**	20.16**	4.57*	13.51**	6.48**	11.14**	3.50*	1.61	0.52	1.95	0.69
区组 Block	0.30	0.76	0.48	0.44	0.67	0.92	1.01	1.01	0.24	1.06	0.98
基因型 Genotype	32.97**	46.28**	51.55**	15.63**	2.97**	19.58**	1.77*	2.69**	15.94**	1.68*	5.16**
环境×基因型 Environment ×genotype	3.66**	4.06**	4.63**	2.51**	2.51**	2.45**	1.22	1.50	2.13**	1.40	1.21
误差 Error	58.92	45.30	0.11	3.47	96.59	2.75	5.72	510400.1	0.02	4.07	982529.7

注：*，** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著，下同。

Note: *, ** means significant at 0.05 and 0.01 level of probability, respectively, same as below.

表 3 供试谷子材料形态和产量指标描述性分析

Table 3 Descriptive analysis of morphology and yield indicators of foxtail millet

处理 Treatment	指标 Indicator	*PH*/cm	*LA*/cm^2	*SNN*	*TNL*/cm	*SLDW*/g	*SL*/cm	*SWP*/g	*KPS*	*TGW*/g	*GWP*/g	*Y*/g
CK	平均值 Average	150.45	85.45	14.62	28.74	39.64	22.27	15.88	3989.02	2.88	11.41	3304.54
	标准差 *SD*	19.65	20.11	1.02	3.08	14.65	3.78	3.17	990.06	0.23	2.67	1598.01
	变异系数 *CV*/%	13.06	23.54	6.95	10.71	36.96	16.98	19.98	24.82	7.94	23.40	48.36
DS	平均值 Average	114.54	69.11	14.17	21.25	27.69	18.28	8.91	2143.92	2.84	5.98	1303.40
	标准差 *SD*	22.27	21.57	1.21	4.15	10.93	3.33	1.95	650.99	0.26	1.64	564.67
	变异系数 *CV*/%	19.45	31.21	8.53	19.52	39.49	18.21	21.86	30.36	9.27	27.38	43.32
DS-CK	平均值 Average	-35.9	-17.2	-0.4	-7.5	-12.0	-4.0	-7.0	-1845.1	-0.04	-5.4	-2001.1
	标准差 *SD*	15.67	12.85	0.74	3.44	17.46	2.90	3.59	1071.84	0.21	2.98	1686.95
	标准误 *SE*	1.65	1.35	0.08	0.36	1.84	0.31	0.38	112.98	0.02	0.31	180.86
	t 值 *t* value	-16.408**	-9.724**	-4.102**	-17.040**	-5.153**	-10.327**	-17.673**	-14.153**	-1.485	-15.280**	-8.884**

2.3 谷子种质资源耐旱性综合评价

前文已经分析，所选农艺性状指标对干旱胁迫反应的敏感性存在显著差异，说明各指标对谷子耐旱性评价的重要程度不同，需要用多指标进行综合分析。主成分分析方法能够通过线性变换从多元随机变量中提取相互独立的少数几个重要变量，重新组合成一组新的、互相无关的综合指标，并客观确定每个综合指标的权重。利用 SPSS 软件对 30 份谷子材料的 11 个鉴定指标的耐旱系数进行主成分分析。如果谷子耐旱评价指标之间没有相关性，则不能运用主成分分析法筛选出反映谷子耐旱能力的主要因子，因此本研究对所测定的各项农艺性状进行相关分析。由图 2 可见（见 40 页），各农艺性状指标间存在一定的相关性，有些指标相关系数达显著或极显著水平，其中株高、穗长、倒二叶叶面积和茎叶干重之间的耐旱系数极显著正相关，穗重、穗粒数、穗粒重和产量之间的耐旱系数极显著正相关，适合使用主成分分析。

表 4　供试谷子材料各性状耐旱系数

Table 4　Drought tolerance coefficient of each trait of foxtail millet genotypes

编号 Code	*PH*	*LA*	*SNN*	*TNL*	*SLDW*	*SL*	*SWP*	*KPS*	*TGW*	*GWP*	*Y*	平均值 Average
G1	0.886	0.835	1.005	0.782	0.837	0.867	0.701	0.838	0.936	0.789	0.704	0.835
G2	0.770	0.811	0.975	0.731	0.809	0.868	0.512	0.427	1.107	0.475	0.447	0.721
G3	0.760	0.820	0.961	0.736	0.918	0.765	0.574	0.482	1.024	0.500	0.427	0.724
G4	0.804	0.954	1.002	0.770	0.713	0.923	0.655	0.636	1.012	0.636	0.550	0.787
G5	0.739	0.735	0.957	0.752	0.435	0.837	0.673	0.739	0.961	0.680	0.920	0.766
G6	0.567	0.581	0.886	0.538	0.335	0.647	0.405	0.399	0.937	0.379	0.250	0.538
G7	0.751	0.756	1.061	0.692	0.491	0.823	0.603	0.621	0.884	0.560	0.576	0.711
G8	0.696	0.661	0.936	0.643	0.506	0.734	0.489	0.442	1.014	0.450	0.385	0.632
G9	0.820	0.875	1.021	0.716	1.193	0.641	0.527	0.536	1.000	0.533	0.483	0.759
G10	0.749	0.723	0.962	0.758	0.893	0.779	0.568	0.678	0.976	0.680	0.553	0.756
G11	0.577	0.608	0.930	0.583	0.334	0.706	0.425	0.395	0.972	0.393	0.290	0.565
G12	0.716	0.709	0.965	0.686	0.282	0.765	0.525	0.424	0.939	0.339	0.239	0.599
G13	0.805	0.934	0.983	0.845	0.970	0.891	0.439	0.313	0.995	0.311	0.228	0.701
G14	0.806	0.950	0.970	0.777	0.932	0.921	0.648	0.613	0.970	0.598	0.734	0.811
G15	0.868	0.940	0.940	0.877	0.534	0.871	0.660	0.569	1.100	0.626	0.609	0.781
G16	0.809	0.804	0.969	0.847	0.970	0.864	0.492	0.376	1.029	0.391	0.319	0.716
G17	0.843	0.928	0.975	0.820	0.967	0.989	0.591	0.548	0.981	0.535	0.534	0.792
G18	0.623	0.699	0.915	0.582	0.463	0.682	0.449	0.453	1.024	0.456	0.378	0.611
G19	0.751	0.751	0.955	0.661	0.672	0.833	0.466	0.526	0.974	0.479	0.460	0.684
G20	0.627	0.753	0.927	0.684	0.410	0.804	0.488	0.434	0.985	0.437	0.393	0.631
G21	0.684	0.848	0.975	0.685	0.591	0.839	0.575	0.535	1.053	0.563	0.651	0.727
G22	0.778	0.784	0.992	0.738	0.681	0.869	0.561	0.612	0.958	0.586	0.535	0.736
G23	0.737	0.939	0.960	0.766	0.674	0.714	0.650	0.590	0.949	0.568	0.520	0.733
G24	0.786	0.681	0.898	0.839	0.511	0.784	0.533	0.395	1.044	0.417	0.345	0.658
G25	0.739	0.816	0.913	0.718	1.181	0.923	0.673	0.691	1.015	0.693	0.871	0.839
G26	0.852	0.852	1.030	0.704	1.177	0.903	0.752	0.721	0.995	0.722	0.940	0.877
G27	0.675	0.817	0.995	0.686	0.485	0.809	0.510	0.513	0.922	0.478	0.394	0.662
G28	0.817	0.650	0.963	0.872	0.482	0.795	0.431	0.415	1.031	0.421	0.366	0.658
G29	0.815	0.806	1.001	0.900	0.955	0.925	0.659	0.573	0.944	0.549	0.492	0.783
G30	0.900	0.960	1.051	0.729	1.093	0.889	0.783	0.840	0.843	0.735	0.728	0.868
平均值 Average data	0.758	0.799	0.969	0.737	0.716	0.822	0.567	0.544	0.986	0.533	0.511	0.722
标准差 *SD*	0.085	0.107	0.042	0.089	0.276	0.088	0.101	0.136	0.056	0.124	0.194	0.086
变异系数 *CV*/%	11.209	13.438	4.303	12.044	38.490	10.656	17.799	25.025	5.720	23.350	37.895	11.975

特征值在某种程度可看成是表示主成分影响力大小的指标,一般可用特征值>1 及方差累计贡献率>80%作为主成分个数的提取原则。由表 5 可以看出,主成分分析将原来的 11 个评价指标转化为 3 个相互独立的综合指标,方差累计贡献率为 81.269%。第一主成分相当于 5.866 个原始指标的作用,可以解释 53.327% 的方差,其中 *PH*、*LA*、*SLDW*、*SL*、*SWP*、*GWP* 指标载荷系数绝对值较大,说明这些指标可以较好地反映谷子的耐旱性,其中以 *SWP* 指标载荷绝对值最大;第二主成分主要反映的是 *TNL* 和 *KPS* 指标,相当于 1.961 个原始指标的作用,其中以 *TNL* 载荷绝对值最大;第三主成分中起主要作用的是 *SNN*、*TGW*、*Y* 指标,相当于 1.113 个原始指标的作用,其中以 *TGW* 载荷绝对值最大。3 个主成分的因子权重分别为 0.656、0.219、0.124。

利用各指标的耐旱系数(表 4)和各主成分的特征向量(表 5),通过公式(2)可以分别求出每个谷子材料的 3 个综合指标值。在干旱胁迫下,同一综合指标数值越大,说明谷子耐旱性越强,反之越差。但谷子的耐旱性由这 3 个综合指标值共同决定,而且这 3 个综合指标在谷子耐旱性评价中的重要性不同。因此,利用公式(3)和(4)在综合指标基础上利用隶属函数计算各材料综合耐旱指标 *D* 值(表 6,见 41 页),其值越大,耐旱性越强。用 *D* 值作为标准来

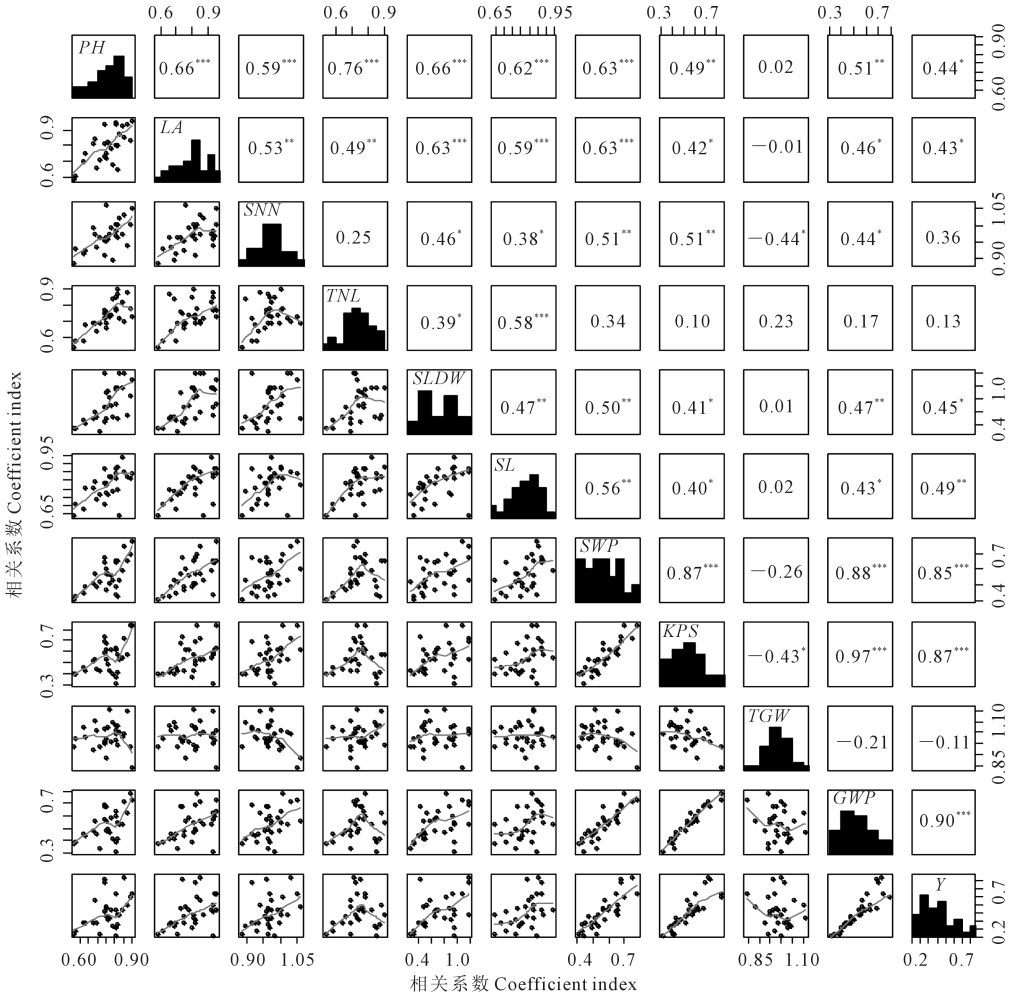


图2 谷子农艺性状耐旱系数相关分析

Fig.2 Correlation analysis on drought tolerance coefficient of agronomic traits in foxtail millet

表5 供试谷子材料各指标主成分的特征向量及贡献率

Table 5 Characteristic vectors of each index and contribution rate of principal components of foxtail millet

性状 Character	因子载荷 Factor loading		
	PC-1	PC-2	PC-3
PH	0.334*	0.307	-0.132
LA	0.310*	0.230	-0.119
SNN	0.275	-0.047	-0.576*
TNL	0.206	0.514*	-0.032
SLDW	0.288*	0.196	-0.057
SL	0.290*	0.256	0.047
SWP	0.378*	-0.152	0.124
KPS	0.347	-0.357*	0.101
TGW	-0.087	0.445	0.624*
GWP	0.352*	-0.274	0.270
Y	0.334	-0.244	0.377*
特征值 Eigenvalue	5.866	1.961	1.113
方差贡献率/% Variance contribution rate	53.327	17.825	10.117
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	53.327	71.152	81.269
因子权重 Factor weight	0.656	0.219	0.124

注：* 表示某指标在各主成分中的最大绝对值。

Note: * means the maximum absolute value of each index in all principal component.

判别各参试材料耐旱能力的强弱，并对其进行排序。可以看出，G26的*D*值最高，耐旱能力最强，其次为G15和G30，G6的*D*值最低，耐旱能力最弱。

基于供试谷子材料*D*值，采用欧氏距离和非加权组平均法（UPGMA）对30份谷子材料耐旱性进行聚类分析（图3）。结果表明，参试30份谷子材料耐旱性可划分为5类，G1、G4、G14、G15、G17、G25、G26、G29、G30为Ⅰ类，属极强耐旱类型；G2、G3、G5、G9、G10、G13、G16、G21、G22、G23为Ⅱ类，属强耐旱类型；G7、G19、G24、G28为Ⅲ类，属中度耐旱类型；G8、G12、G18、G20、G27为Ⅳ类，属干旱敏感型；G6和G11为Ⅴ类，属干旱高度敏感型。

2.4 谷子种质资源耐旱指标筛选

由表7可以看出，各指标*DC*值与*D*值Pearson相关分析和灰色关联度分析均表明，*PH*与*D*值关系最紧密，其次为*SWP*，*TGW*与*D*值相关联程度最小，同时各指标*DC*值与*D*值相关系数均达极显著水平（$P<0.01$），*TGW*除外。

表 6　供试谷子材料耐旱性综合评价

Table 6　Comprehensive evaluation on drought tolerance of foxtail millet

编号 Code	$\mu(x)$			D 值 D value	排序 Rank
	μ_1	μ_2	μ_3		
G1	0.872	0.171	0.460	0.667	4
G2	0.453	0.737	0.647	0.538	10
G3	0.474	0.524	0.494	0.487	18
G4	0.726	0.493	0.482	0.644	8
G5	0.663	0.024	0.789	0.538	11
G6	0.000	0.000	0.469	0.058	30
G7	0.592	0.048	0.000	0.399	22
G8	0.251	0.306	0.561	0.301	26
G9	0.555	0.445	0.218	0.488	17
G10	0.577	0.232	0.577	0.501	14
G11	0.082	0.124	0.441	0.136	29
G12	0.252	0.334	0.156	0.258	27
G13	0.435	1.000	0.059	0.512	13
G14	0.747	0.459	0.524	0.655	7
G15	0.674	0.764	0.888	0.719	2
G16	0.450	0.889	0.325	0.530	12
G17	0.703	0.703	0.383	0.663	6
G18	0.170	0.194	0.660	0.236	28
G19	0.405	0.348	0.415	0.393	23
G20	0.267	0.333	0.522	0.312	25
G21	0.506	0.358	0.713	0.499	15
G22	0.582	0.321	0.365	0.497	16
G23	0.566	0.290	0.403	0.485	19
G24	0.313	0.707	0.680	0.444	20
G25	0.730	0.289	1.000	0.666	5
G26	0.912	0.233	0.600	0.723	1
G27	0.408	0.235	0.150	0.338	24
G28	0.341	0.734	0.423	0.437	21
G29	0.704	0.596	0.245	0.623	9
G30	1.000	0.063	0.043	0.675	3

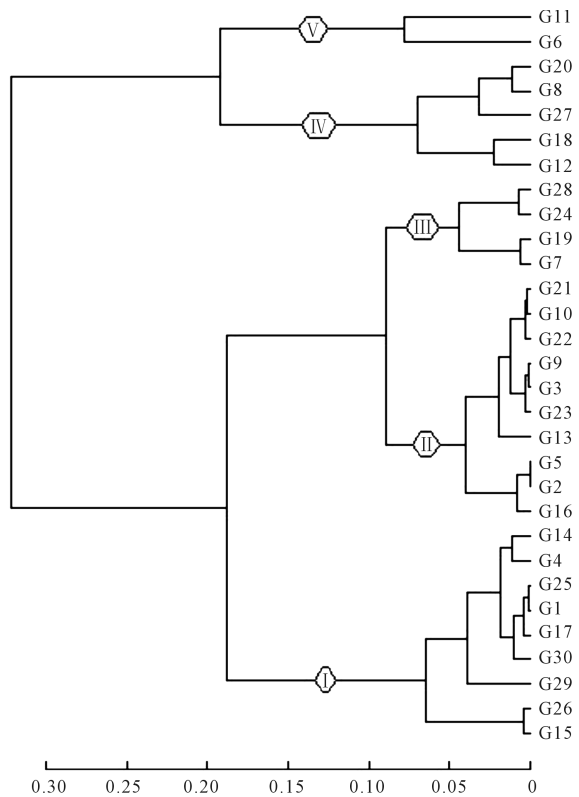


图 3　参试谷子材料 D 值的非加权组平均法聚类分析

Fig.3　UPGMA clustering analysis of D value of foxtail millet

表 7　供试谷子材料各指标 DC 值与 D 值相关分析和灰色关联度分析

Table 7　Analysis of correlation and grey relation between DC and D values of each index of foxtail millet

性状 Character	DC 值与 D 值相关系数 Correlation coefficient between DC and D value	排序 Rank	DC 值与 D 值灰色关联度 Grey relation between DC and D value	排序 Rank
PH	0.870**	1	0.832	1
LA	0.782**	3	0.788	6
SNN	0.486**	10	0.777	8
TNL	0.700**	8	0.792	5
SLDW	0.728**	5	0.795	4
SL	0.780**	4	0.806	3
SWP	0.796**	2	0.808	2
KPS	0.624**	9	0.743	10
TGW	0.133	11	0.670	11
GWP	0.707**	6	0.773	9
Y	0.702**	7	0.777	7

为了确定供试谷子材料耐旱性鉴定首选指标,依据耐旱性聚类分析结果(图 3)进行 Fisher 判别分析。结果表明,株高(PH)和单株穗重(SWP)对供试谷子材料耐旱性归类有显著影响($P<0.01$),判别函数如下:

$$Y_{I}=500.845PH+222.838SWP-286.540$$

$$Y_{\text{II}}=456.282PH+185.898SWP-227.942$$

$$Y_{\text{III}}=460.557PH+172.858SWP-224.291$$

$$Y_{\text{IV}}=398.277PH+163.884SWP-174.846$$

$$Y_{\text{V}}=341.061PH+138.566SWP-127.905$$

3　讨　论

3.1　谷子耐旱性鉴定方法

干旱胁迫是影响谷子生长发育的重要因素,对谷子进行耐旱性鉴定就是选用合适的评价方法和鉴定指标对不同基因型耐旱能力大小进行筛选、评价和归类的过程。植物生理学意义上的耐旱性是指植物对干旱胁迫的适应性和抵抗力,其耐旱能力的高低主要表现在产量方面。产量的高低是农业生产中作物耐旱性能最实用的表现[45],因而有学者提出了以产量指标为依据的耐旱性直接评价方法[18-19, 21, 46-47]。这种评价方法能够简便、快速地对耐旱性进行大致的评判,但可能不利于从整体上把握作物耐旱的类型和机理,难以全面准确反映各材料的耐旱性强弱,而且也有研究认为仅依靠产量指标难以真正鉴定出作物的耐旱性[48]。作物的耐旱性是受多基因控制的复杂的数量性状,很难用单个指标进行鉴定,使用多指标评价更能从不同阶段、不同侧面反映作物耐旱性的强弱和特点,相应的产生多种评价方法。多指标结合多方法的综合评价

结果更为合理可靠,可避免单一性状的片面性和不稳定性[19-20, 40, 49]。隶属函数法将作物的不同性状表现值,放在统一尺度下进行综合比较,使其具有可比性,可以反映多个构成成分的整体水平及综合特征,能够消除不同基因型谷子间固有的生物学和遗传学特性差异。

同一作物不同品种原有背景并不相同,因此,综合考虑作物在正常供水和干旱处理条件下的性状表现是鉴定作物耐旱性强弱的最有效方法。耐旱系数法是经典的耐旱性评价方法,为世界各国学者所认可,反映了干旱胁迫条件下作物农艺性状和产量的变幅,也就是对干旱胁迫的敏感程度,可有效消除不同谷子材料的遗传背景差异,是目前作物耐旱性鉴定用得最多的方法[50]。用耐旱系数法筛选的材料不一定具有较好的丰产性,但其可能蕴藏着耐旱基因,可为耐旱育种提供优异资源[47],是一种简捷的度量基因型与环境互作的指标[34]。本文通过各指标性状耐旱系数主成分分析,较好地揭示了谷子耐旱相关性状与其耐旱性的关系,并确定耐旱性评价的各综合指标及相应的因子权重。通过选用反映谷子不同方面耐旱性的3个相互独立的综合指标并结合隶属函数求得谷子各材料耐旱性度量值 D,以此作为谷子材料耐旱性强弱的判定标准,可以消除单纯依靠个别指标造成的结果片面性。林汉明等[51]认为,当多项指标综合评价获得的结果(如 D 值)符合连续变数的理论分布即正态分布时,可将结果划分为5级。本文 D 值为连续变数且符合正态分布,因此,依据 D 值通过聚类分析将供试谷子材料耐旱性分为5类,每类代表不同的耐旱级别。

3.2 谷子耐旱评价指标的筛选

联合方差分析表明,土壤水分环境对耐旱指标有显著影响,说明所选农艺性状指标可用于谷子耐旱性评价。基因型对各指标影响显著,表明所选谷子基因型丰富,适宜进行耐旱性鉴定。基因型与环境交互作用揭示了基因型在不同环境中相对表现的不稳定性,显示了基因型的尺度效应。本研究表明,基因型与土壤水环境的交互作用显著影响谷子的生长性状,但对产量性状的影响不显著(*TGW* 除外),即不同的土壤水分环境下,生长性状的稳定性低于产量性状,产量性状可能具有相对较强的耐旱性。

作物的耐旱性是环境胁迫与基因型互作的结果,最终通过各种性状在不同发育时期的一系列变化体现出来,不同指标性状对干旱胁迫的敏感性存在很大差异,因而指标性状的合理选择是耐旱性鉴定的关键。谷子耐旱性是在水分胁迫环境下,植物体内细胞在形态结构、生理生化上发生一系列适应性改变后,在植株形态和产量上的集中表现,是一个复杂的综合性状。一般来说,生长发育和产量指标是鉴定耐旱性的可靠指标。已有研究表明,谷子成株期以产量性状对干旱胁迫最为敏感,株高、单株穗重、单穗粒重和穗长等指标可作为谷子全生育期耐旱鉴定指标[34-35, 40, 52]。植株生长过程中对干旱所做出的反应表现为农艺性状的改变,本文以不同处理下测定的农艺性状和产量指标表现值为依据进行研究。结果表明,各耐旱评价指标平均耐旱系数均小于1,但有些材料个别指标的耐旱系数大于1(如G7的 *SNN*,G9的 *SLDW*,G15的 *TGW* 等),说明干旱胁迫促进了这些指标性状的增加,这可能是由于不同种质材料抵抗干旱胁迫的能力不同所致。通过主成分分析可以看出,*PH*、*SWP* 和 *GWP* 指标在第一主成分中载荷系数绝对值较大,与谷子耐旱性密切相关。通过判别分析确定 *PH* 和 *SWP* 可作为辽西地区谷子全生育期耐旱性鉴定首选指标,这与前人研究结果基本一致。干旱胁迫下的植株高度是该种群的主要特征,干旱胁迫最明显的影响之一就是植株高度降低[53-54]。这是由于干旱胁迫导致植株体内水分匮乏,必然影响到生理生化过程和器官建成,进而对生长发育造成伤害。植物生长迅速时(营养生长阶段)的水分胁迫首先限制了植物的株高[55],降低了净光合速率,使植物的同化产物减少[56],同时降低了结实率,进而减少穗粒数和单株穗重,不同程度影响谷子的形态建成和产量构成。株高是判断作物在干旱条件下能否正常生长的直观形态指标,可以作为耐旱性评价的可靠有力证据[55],产量性状(如穗重等)是作物是否耐旱的最终表现。本研究提出的11个指标均为农艺性状指标,下一步需将形态、生理生化指标和耐旱功能基因及干旱诱导蛋白等鉴定指标综合考虑进行谷子全生育期耐旱性评价,进一步筛选经济、可靠的鉴定指标。

4 结 论

土壤水分环境和基因型显著影响谷子农艺性状,基因型和土壤水分环境互作显著影响谷子生长性状,对产量性状影响不显著(千粒重除外)。基于多指标多方法的谷子全生育期耐旱性评价结果与生产实际表现相符。株高和穗重可作为谷子全生育期快速、准确的耐旱性鉴定指标。

参 考 文 献:

[1] ZHANG X B, LEI L, LAI J S, et al. Effects of drought stress and water recovery on physiological responses and gene expression in maize seedlings[J]. BMC Plant Biology, 2018, 18(1): 68.

[2] ALBACETE A A, MARTÍNEZ-ANDUJAR C, PÉREZ-ALFOCEA F. Hormonal and metabolic regulation of source-sink relations under salinity and drought: from plant survival to crop yield stability[J]. Biotechnology Advances, 2014, 32(1): 12-30.

[3] 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 247-260.
SHI Z, LIANG Z Z, YANG Y Y, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 247-260.

[4] CATTIVELLI L, RIZZA F, BADECK F W, et al. Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics [J]. Field Crops Research, 2008, 105(1/2): 1-14.

[5] 魏志刚, 王玉成. 植物干旱胁迫响应机制[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-2.
WEI Z G, WANG Y C. Response mechanism of plant drought stress[M]. Beijing: Science Press, 2015: 1-2.

[6] 郭世华, 顾翔峰, 杨文耀, 等. 谷子萌芽期耐旱性初步研究[J]. 北方农业学报, 2017,(1): 1.
GUO S H, GU X F, YANG W Y, et al. Preliminary investigation in the drought tolerance of foxtail millet during germinating stages[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2017,(1): 1.

[7] YADAV O P, SINGH D V, VADEZ V, et al. Improving pearl millet for drought tolerance - retrospect and prospects [J]. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 2017, 77(4): 464-474.

[8] 李红英, 程鸿燕, 郭昱, 等. 谷子抗旱机制研究进展[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(01): 6-10.
LI H Y, CHENG H Y, GUO Y, et al. Progress in the mechanisms of drought tolerance in foxtail millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 38(1): 6-10.

[9] 刁现民. 中国谷子产业与产业技术体系[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011: 1-3.
DIAO X M. Millet industry and industrial technology system in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2011: 1-3.

[10] SUN M, HUANG D J, ZHANG A L, et al. Transcriptome analysis of heat stress and drought stress in pearl millet based on Pacbio full-length transcriptome sequencing[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 323.

[11] 杨希文, 胡银岗. 谷子 DREB 转录因子基因的克隆及其在干旱胁迫下的表达模式分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 69-74.
YANG X W, HU Y G. Cloning of a DREB gene from foxtail millet (*Setaria italica* L.) and its expression during drought stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(5): 69-74.

[12] LATA C, GUPTA S, PRASAD M. Foxtail millet: a model crop for genetic and genomic studies in bioenergy grasses[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2013, 33(3): 328-343.

[13] BENNETZEN J L, SCHMUTZ J, WANG H, et al. Reference genome sequence of the model plant Setaria[J]. Nature Biotechnology, 2012, 30 (6): 555-561.

[14] 张雁明,刘晓东,马建萍,等. 谷子抗旱研究进展[J]. 山西农业科学, 2013, 41(3): 282-285.
ZHANG Y M, LIU X D, MA J P, et al. Research progress on drought resistance in foxtail millet (*Setaria italica* L.)[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2013, 41(3): 282-285.

[15] BOLAÑOS J, EDMEADES G O. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize[J]. Field Crops Research, 1996, 48(1): 65-80.

[16] BO W, FU B C, QIN G J, et al. Evaluation of drought resistance in Iris germanica L. based on subordination function and principal component analysis[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2017, 29(10): 770-778.

[17] ZOU J, HU W, LI Y X, et al. Screening of drought resistance indices and evaluation of drought resistance in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(2): 495-508.

[18] SONG Q H, LIU C Y, 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.

[19] YAN C J, SONG S H, WANG W B, et al. Screening diverse soybean genotypes for drought tolerance by membership function value based on multiple traits and drought-tolerant coefficient of yield[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 321.

[20] DENG Q Q, DOU Z M, CHEN J W, et al. Drought tolerance evaluation of intergeneric hybrids of BC3F1 lines of *Saccharum officinarum*×*Erianthus arundinaceus*[J]. Euphytica, 2019, 215(12): 207.

[21] ABERKANE H, AMRI A, BELKADI B, et al. Evaluation of durum wheat lines derived from interspecific crosses under drought and heat stress[J]. Crop Science, 2021, 61(1): 119-136.

[22] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 等. 酒用糯高粱资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1388-1402.
WANG C, ZHOU L B, ZHANG G B, et al. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of liquor-making waxy sorghum resources at adult plant stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(8): 1388-1402.

[23] 刘天鹏, 董孔军, 何继红, 等. 糜子育成品种芽期抗旱性鉴定与评价研究[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(4): 746-752.
LIU T P, DONG K J, HE J H, et al. Study on the drought resistance identification and evaluation of broomcorn millet selective bred varieties at germinating stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15 (4): 746-752.

[24] SEZENER V, BASAL H, PEYNIRCIOGLU C, et al. Screening of cotton cultivars for drought tolerance under field condition[J]. Turkish Journal of Field Crops, 2015, 20(2): 223-232.

[25] HAQUE M S, SAHA N R, ISLAM M T, et al. Screening for drought tolerance in wheat genotypes by morphological and SSR markers[J]. Journal of Crop Science and Biotechnology, 2021, 24(1): 27-39.

[26] DOSSA K, YEHOUESSI L W, LIKENG-LI-NGUE B C, et al. Comprehensive screening of some west and central African sesame genotypes for drought resistance probing by agromorphological, physiological, biochemical and seed quality traits[J]. Agronomy, 2017, 7(4): 83.

[27] SHAH T M, IMRAN M, ATTA B M, et al. Selection and screening of drought tolerant high yielding chickpea genotypes based on physio-biochemical indices and multi-environmental yield trials[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 171.

[28] GUZZO M C, COSTAMAGNA C, SALLOUM M S, et al. Morpho-physiological traits associated with drought responses in soybean[J]. Crop Science, 2021, 61(1): 672-688.

[29] BOUSLAMA M, SCHAPAUGH W T Jr. Stress tolerance in soybeans. I. evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance [J]. Crop Science, 1984, 24(5): 933-937.

[30] 代小冬, 杨育峰, 朱灿灿, 等. 谷子萌芽期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 华北农学报, 2015, 30(4): 139-144.
DAI X D, YANG Y F, ZHU C C, et al. Seed germination response to drought stress and drought resistance evaluation of foxtail millet[J].

Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2015, 30(4): 139-144.

[31] MISHRA A K, PURANIK S, BAHADUR R P, et al. The DNA-binding activity of an AP2 protein is involved in transcriptional regulation of a stress-responsive gene, *SiWD*40, in foxtail millet[J]. Genomics, 2012, 100(4): 252-263.

[32] LATA C, JHA S, DIXIT V, et al. Differential antioxidative responses to dehydration-induced oxidative stress in core set of foxtail millet cultivars [*Setaria italica* (L.)][J]. Protoplasma, 2011, 248(4): 817-828.

[33] 代小冬, 徐心志, 朱灿灿, 等. 谷子苗期对不同程度干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 作物杂志, 2016(1): 140-143.
DAI X D, XU X Z, ZHU C C, et al. Seeding stage response to different water availability and drought resistance evaluation of foxtail millet[J]. Crops, 2016(1): 140-143.

[34] 张文英, 智慧, 柳斌辉, 等. 谷子全生育期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(5): 560-565.
ZHANG W Y, ZHI H, LIU B H, et al. Ideses screening for drought resistance test of foxtail millet[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(5): 560-565.

[35] 刘婧, 张立全, 王根平, 等. 利用全生育期极度干旱法鉴定谷子抗旱资源[J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(4): 633-641.
LIU J, ZHANG L Q, WANG G P, et al. Identification of foxtail millet drought resistance resource by extreme drought in whole growth period [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(4): 633-641.

[36] PARVATHI M S, NATARAJA K N, REDDY Y A N, et al. Transcriptome analysis of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) reveals unique drought responsive genes[J]. Journal of Genetics, 2019, 98 (2): 46.

[37] GHATAK A, CHATURVEDI P, NAGLER M, et al. Comprehensive tissue-specific proteome analysis of drought stress responses in *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. (Pearl millet)[J]. Journal of Proteomics, 2016, 143: 122-135.

[38] QIE L F, JIA G Q, ZHANG W Y, et al. Mapping of quantitative trait locus (QTLs) that contribute to germination and early seedling drought tolerance in the interspecific cross *Setaria italica*×*Setaria viridis*[J]. PLOS One, 2014, 9(7): e101868.

[39] 张文英, 智慧, 柳斌辉, 等. 谷子孕穗期抗旱指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(5): 765-772.
ZHANG W Y, ZHI H, LIU B H, et al. Screening of indexes for drought tolerance test at booting stage in foxtail millet[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(5): 765-772.

[40] 孟庆立, 关周博, 冯佰利, 等. 谷子抗旱相关性状的主成分与模糊聚类分析[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2667-2675.
MENG Q L, GUAN Z B, FENG B L, et al. Principal component analysis and fuzzy clustering on drought-tolerance related traits of foxtail millet (*Setaria italica*)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2667-2675.

[41] LAPUIMAKUNI S, KHUMAIDA N, ARDIE S W. Short communication: evaluation of drought tolerance indices for genotype selection of foxtail millet (*Setaria italica*)[J]. International Journal of Tropical Drylands, 2018, 2(2): 37-40.

[42] 祁旭升, 王兴荣, 许军, 等. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3076-3087.
QI X S, WANG X R, XU J, et al. Drought-resistance evaluation of flax germplasm at adult plant stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43 (15): 3076-3087.

[43] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-991.
YUAN W P, ZHOU G S. Theoratical study and research prospect on drought indices[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(6): 982-991.

[44] 杨进文, 朱俊刚, 王曙光,等. 用 GGE 双标图及隶属函数综合分析山西小麦地方品种抗旱性[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1031-1038.
YANG J W, ZHU J G, WANG S G, et al. Drought-tolerance of local wheat varieties in Shanxi Province of China: a comprehensive evaluation by using GGE biplot and subordinate function[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(4): 1031-1038.

[45] STEYN J M, DU PLESSIS H F, HAMMES P S. A field screening technique for drought tolerance studies in potatoes[J]. Potato Research, 1998, 41(3): 295-303.

[46] 兰巨生. 农作物综合抗旱性评价方法的研究[J]. 西北农业学报, 1998, 7(3): 85-87.
LAN J S. Comparison of evaluating methods for agronomic drought tolerance in crops[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 1998, 7(3): 85-87.

[47] 祁旭升, 刘章雄, 关荣霞, 等. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 665-674.
QI X S, LIU Z X, GUAN R X, et al. Comparison of evaluation methods for drought-resistance at soybean adult stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(4): 665-674.

[48] LEVITT J. Chilling, freezing, and high temperature stresses[M]. 2nd ed. Pittsburgh: Academic Press, 1980: 201-235.

[49] LAPUIMAKUNI S, KHUMAIDA N, ARDIE S W. Short communication: evaluation of drought tolerance indices for genotype selection of foxtail millet (*Setaria italica*)[J]. International Journal of Tropical Drylands, 2018, 2(2): 37-40.

[50] 裴帅帅, 尹美强, 温银元, 等. 不同品种谷子种子萌发期对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性评价[J]. 核农学报, 2014, 28(10): 1897-1904.
PEI S S, YIN M Q, WEN Y Y, et al. Physiological response of foxtail millet to drought stress during seed germination and drought resistance evaluation[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(10): 1897-1904.

[51] 林汉明, 常汝镇, 邵桂花, 等. 中国大豆耐逆研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 289-305.
LIN H M, CHANG R Z, SHAO G H, et al. Research on tolerance to stresses in Chinese soybean[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009: 289-305.

[52] MOHAMMADI-NEJAD G, HOSSEIN V, ESLAM M H, et al. Field screening for drought tolerance in Setaria italica and *Panicum miliaceum* millet germplasm from Iran[J]. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 2017, 77(1): 83-91.

[53] BAUM M, GRANDO S, BACKES G, et al. QTLs for agronomic traits in the Mediterranean environment identified in recombinant inbred lines of the cross 'Arta' × H. *spontaneum* 41-1[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2003, 107(7): 1215-1225.

[54] PACE P F, CRALLE H T, EL-HALAWANY S H M, et al. Drought-induced changes in shoot and root growth of young cotton plants[J]. Journal of Cotton Science, 1999, 3(4): 183-187.

[55] ÇAKIR R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn[J]. Field Crops Research, 2004, 89(1): 1-16.

[56] REDDY A R, CHAITANYA K V, VIVEKANANDAN M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(11): 1189-1202.