



大豆种质田间耐旱性评价及优异种质筛选

赵兴震,徐江源,于莉莉,谷勇哲,刘章雄,邱丽娟

(中国农业科学院作物科学研究所/国家农作物基因资源与遗传改良重大科学工程/农业部种质资源利用重点实验室,北京 100081)

摘要:为明确微核心种质成熟期耐旱类型、筛选耐旱种质资源,给大豆成熟期耐旱基因发掘及新品种培育提供优异材料和鉴定方法,本研究采用耐旱系数法、加权耐旱系数法和极值差异法 3 种方法对 247 份大豆微核心种质于 2017 - 2018、2018 - 2019 年度海南旱季进行耐旱性鉴定和分析。结果表明:干旱胁迫处理下单株粒重、单株荚数和株高均较正常灌水处理显著下降,同一性状不同种质间差异极显著;耐旱系数和加权耐旱系数间呈极显著正相关,且两者变异系数均较大。采用耐旱系数法对 2017 - 2018、2018 - 2019 年度及两年度联合数据进行分析,筛选高耐种质数分别为 11、30 和 37 份,采用加权系数法筛选出高耐种质数分别为 12、20 和 23 份,2 种方法共同鉴定出泰兴牛毛黄乙(ZDD04620)和小圆黄豆(ZDD08564)高耐种质 2 份。利用极值差异法筛选出高产且耐旱种质 7 份,包括黑河 1 号(ZDD00041)、大白皮(ZDD02866)、大粒黄(ZDD06363)、样田小黄豆(ZDD08190)、赤城绿黄豆(ZDD08238)、十月黄(ZDD12400)和什邡螺丝豆(ZDD12836)。

关键词:大豆;干旱胁迫;耐旱系数;加权耐旱系数

Field Drought Tolerance Evaluation and Excellent Germplasm Identification of Soybean Germplasm

ZHAO Xing-zhen, XU Jiang-yuan, YU Li-li, GU Yong-zhe, LIU Zhang-xiong, QIU Li-juan

(Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Key Facility for Gene Resources and Genetic Improvement/Key Laboratory of Crop Germplasm Utilization, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to identify the drought-tolerant types of mini core germplasms at adult stage, screen drought-tolerant germplasm resources, and provide elite materials for drought tolerance gene discovery and soybean cultivars improvement. This study evaluated and analysed 247 soybean mini-core accessions for drought tolerance in the dry season of Hainan in 2017 - 2018 and 2018 - 2019 with three methods of drought tolerance coefficient, weighted drought tolerance coefficient and maximin-minimax. The results showed that the seed weight per plant, pods per plant and plant height under drought stress treatment decreased significantly compared with normal irrigation treatment, and the ANOVA showed that genotype were all significant for each trait. Phenotypic correlation analysis showed drought tolerance coefficient was positive correlation to weighted drought tolerance coefficient. 11, 30 and 37 accessions with high tolerance were selected in 2017 - 2018, 2018 - 2019 and two years jointly by using drought tolerance coefficient method, 12, 20 and 23 accessions with high tolerance were selected by weighted drought tolerance coefficient method. Two accessions with high tolerance, including Taixingniumaohuangyi (ZDD04620) and Xiaoyuanhuangdou (ZDD08564) were identified by the two methods. Seven accessions with high-yield and drought-tolerant were screened by maximin-minimax method, including Heihe 1 (ZDD00041), Dabaipi (ZDD02866), Dalihuang (ZDD06363), Yangtianxiaohuangdou (ZDD08190), Chichenglyuhuangdou (ZDD08238), Shiyuehuang (ZDD12400) and Shifangluosidou (ZDD12836).

Keywords: Soybean; Drought stress; Drought tolerance coefficient; Weighted drought tolerance coefficient

干旱是影响植物地理分布、限制农作物产量,并威胁粮食安全的主要环境因子之一^[1]。在我国,干旱半干旱地区约占耕地面积的 51%^[2],主要集中在粮食总产量占全国 65% 左右的北方、黄淮等地

区^[3]。同时,我国大部分地区降水差异较大,季节分配不均,进而造成干旱分布与发生季节有一定的规律性。即使是在非干旱的农业种植区,季节性的干旱问题也经常制约农业生产^[4]。传统灌溉技术

收稿日期:2020-03-19

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0100304);中国农业科学院农业科技创新项目;中韩国际合作项目(PJ0121092018)。

第一作者简介:赵兴震(1994-),男,硕士,主要从事作物学研究。E-mail:1165640996@qq.com。

通讯作者:刘章雄(1973-),男,博士,副研究员,主要从事大豆种质资源创新研究。E-mail:liuzhangxiong@caas.cn;

邱丽娟(1963-),女,博士,研究员,主要从事作物种质资源鉴定与评价研究。E-mail:quliujuan@caas.cn。

已不能满足作物的生长需求,新的节水耕作技术也无法从根本上解决问题^[5-6]。中国人口众多,在水资源日益贫乏和旱灾日趋严重的双重压力下,干旱将成为我国农业最大的挑战。大豆(*Glycine max* L.)是起源于我国的重要油料作物和经济作物^[7-8]。随着人们生活水平的提高及养殖业、饲料业发展,大豆需求量迅速增加。2019 年我国进口量高达 8 768 万 t,是国内生产量(1 810 万 t)的 4.84 倍。大豆需水量较多,根系不发达,是豆类作物中对水分最敏感的植物^[9],干旱可以使大豆单产降低 40%^[10],严重时可能达到 80%^[11-13]。因此筛选大豆耐旱种质,培育耐旱品种是解决这一问题最经济有效的途径^[7-8]。

国内外学者对大豆耐旱性鉴定进行了大量研究^[7-8, 14-17],包括干旱条件下产量、冠层萎蔫度、水分利用效率、主根深度、侧根密度、渗透调节和抗氧化能力等性状^[18-19]。成熟期耐旱性最终体现在光合产物积累、分配及产量的形成过程。大豆根系特征和群体形态结构特征的变化是反映作物受旱时的直观表现,而产量构成因素则是研究者最为关心的问题。因此,干旱条件下大豆的单株荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重及与之相关的性状如单粒荚、二粒荚、皱缩粒等都可用于评价种质的耐旱性。路贵和等^[20]利用干旱条件下大豆植株干重、主茎节数、分枝数、株高等评价种质耐旱性,共筛选出耐旱种质 3 份。王兴荣等^[21]主要以与产量相关的性状如株高、单株荚数、单株粒重、单株生物量和百粒重等为指标比较不同品种的耐旱能力。Du 等^[19]采用耐旱系数评价耐旱性,认为耐旱评价受环境影响较大,需进行多年重复鉴定。在生产实践中,干旱条件下大豆产量为耐旱性的最终评价指标,许多研究者主要考虑大豆耐旱性进行优异种质的筛选,而本研究采用的极值差异法兼顾高产及耐旱性,筛选的高产耐旱种质在生产及育种中具实际利用价值^[22]。国家种质库现保存的 3 万余份种质中,只有约 1/3 的种质进行了耐旱鉴定。因此,对大豆种质进行耐旱性鉴定,筛选大豆耐旱种质,仍是当前研究的主要任务之一。本课题组前期考察了单株粒重、单株粒数、单株荚数、单株生物量、株高、花期、低荚高度、分枝数、百粒重 9 个产量相关指标,通过分析、主成份分析等方法,最后筛选出与产量显著相关的单株粒重、单株荚数、株高 3 个指标进行种质抗旱性的研究。

本研究以 247 份大豆微核心种质为研究材料,采用产量直接评价法,在干旱胁迫和正常灌水 2 种处理条件下,考察单株粒重、单株荚数和株高 3 个指标,采用耐旱系数(Drought Resistance Coefficient, DC)和加权耐旱系数(Weighted Drought Resistance Coefficient, WDC),评价大豆成熟期种质耐旱性,并通过比较干旱胁迫和正常灌水条件下的单株粒重,采用极值差异法(Maximin-minimax Approach, MA)筛选耐旱高产种质,进一步验证所筛选出的评价方法和指标,为大豆耐旱性研究及品种选育提供基础材料。

1 材料与方法

1.1 材料

研究材料为 247 份大豆微核心种质,具有丰富的遗传多样性^[23],其中北方大豆 102 份,黄淮海大豆 50 份,南方大豆 83 份。

1.2 试验设计

试验于 2017 – 2018 年度(简称 2018 年)、2018 – 2019 年度(简称 2019 年)在海南省三亚市崖州中国农业科学院作物科学研究所南繁试验基地进行,试验地土壤为沙壤土。于每年 11 月中旬播种,第二年 3 月初收获,这段时间正处于旱季。播种前结合整地施入磷酸二铵 225 kg·hm⁻²和尿素 75 kg·hm⁻²。设置干旱胁迫和正常灌水 2 个处理,供试品种采用随机区组排列,单行区、行长 1.50 m、行距 0.35 m、株距 0.06 m,3 次重复。干旱胁迫处理播前灌 1 次水,以保证苗全苗齐,出苗至成熟不灌水,使其充分受旱;对照处理按当地大田生产管理,使全生育期处于水分适宜状态。

成熟后每小区取样 10 株,考察单株粒重、单株荚数和株高 3 个性状,3 次重复均值作为各处理考察性状指标的代表值。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 耐旱性评价 参照祁旭升等^[24]方法,采用耐旱系数(DC)、加权耐旱系数(WDC)评价种质的耐旱性,参照路贵和等^[20]的逐级分类法对耐旱性进行分级。

$$TR = X_d/X_w$$
$$DC = Y_d/Y_w$$
$$ADC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TR$$
$$WDC = \sum_{i=1}^n TR \times (|r_i|/\sum_{i=1}^n |r_i|)$$

式中: X_d 、 X_w 为干旱胁迫、正常灌水下的测定

值; Y_d 、 Y_w 为干旱胁迫、正常灌水下的单株粒重; r_i 为性状相对值与平均耐旱系数的相关系数; $|r_i|/\sum_{i=1}^n|r_i|$ 为指数权数,表示第 i 个指标在所有指标中的重要程度。

1.3.2 优异种质筛选 参照 Bhatia 等^[22] 的极值差异法(MA)筛选优异耐旱种质,以高产种质相对单株粒重损失低于 35%,耐旱种质耐旱系数超过 75% 为标准,将参试种质分为高耐且高产(Ⅰ,HR)、耐旱且高产(Ⅱ,HT)、高耐且低产(Ⅲ,LR)和敏感且低产(Ⅳ,LS)4 个类型。

$$RY_i = 100 \times Y_d/Y_r$$

$$RP_i = 100 \times P_i/P_s$$

式中: RY_i 为相对产量; Y_r 为干旱胁迫下所有参试材料单株粒重的最大值; RP_i 为相对产量损失百分比; P_i 为干旱下单株粒重损失百分比; P_s 为干旱胁迫下所有参试材料单株粒重损失百分比的最大值。

表 1 供试材料各处理性状基本统计分析

Table 1 Relevant data of tested accessions in different treatments

处理 Treatment	变量 Variable	2018			2019		
		单株粒重 SWP/g	单株荚数 PP	株高 PH/cm	单株粒重 SWP/g	单株荚数 PP	株高 PH/cm
干旱 Drought	最小值 Min.	0.17	1.33	11.50	1.11	4.40	11.33
	最大值 Max.	8.66	62.20	61.10	15.68	238.13	87.80
	均值 Average	4.13	16.86	24.22	4.52	17.02	32.14
	标准差 SD	1.78	7.39	6.73	2.48	16.40	10.14
	变异系数 CV/%	43.04	43.86	27.79	34.21	59.69	30.36
灌水 Normal irrigation	最小值 Min.	0.15	1.20	12.41	0.84	3.17	16.03
	最大值 Max.	11.80	43.90	63.45	34.97	71.30	105.37
	均值 Average	4.52	17.02	26.98	8.70	27.57	33.39
	标准差 SD	2.40	8.37	7.78	3.75	10.74	10.96
	变异系数 CV/%	53.14	49.18	28.84	43.11	38.95	34.10
下降幅度 Decreased range/%		8.63	10.23	0.94	16.67	3.89	0.36

SWP:单株粒重;PP:单株荚数;PH:株高。下同。

SWP: Seed weight per plant;PP: Pods number per plant;PH: Plant height. The same below.

2.1.2 大豆农艺性状间的差异显著性分析 由表 2 可知,3 个耐旱性状种质间差异极显著,变异系数均较大(27.79~59.69),表明种质间存在较丰富的遗传变异,不同重复间、环境间及种质×环境互作间均差异极显著。因此,本研究采用两年 BLUP 值代替平均值,进行后续分析。

2.2 不同处理种质性状的基本统计及相关性分析

2.2.1 耐旱性指标的基本统计分析 由表 3 可知,2018 和 2019 年及两年度联合(BLUP)耐旱系数的

两年度联合的单株粒粒重、单株荚数和株高表型值采用最优线性无偏估计(BLUP)进行估测,以消除重复和环境因素对表型数据的影响。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 对数据进行常规统计分析,利用 SAS 9.4 进行相关性分析及联合方差分析^[25]。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对大豆农艺性状的影响

2.1.1 大豆农艺性状的基本统计分析 对 247 份大豆微核心种质 3 个耐旱相关性状进行基本描述统计分析,干旱胁迫下的单株粒重、单株荚数和株高均比正常灌水条件下降低。2018 年单株粒重干旱胁迫比正常灌水减少 8.63%,单株荚数减少 0.94%,株高减少 10.23%;2019 年单株粒重干旱胁迫比正常灌水减少 16.67%,单株荚数减少 0.36%,株高减少 3.89%(表 1)。

平均值分别为 1.15、0.88 和 0.87,变异范围分别为 0.21~10.33、0.22~2.01 和 0.33~1.35;加权耐旱系数的平均值分别为 1.21、1.01 和 1.01,变异范围分别为 0.53~9.97、0.54~3.63 和 0.67~2.31;两年联合的水、旱单株粒重的均值分别为 7.03 和 6.02,变异范围分别为 2.07~18.24 和 1.53~11.98。两个处理耐旱系数、加权耐旱系数和单株粒重变异系数范围为 16.00%~88.88%。

表 2 两年联合方差分析表
Table 2 Joint analysis of variance in 2018 and 2019

性状 Trait	源 Source	自由度 Degree of freedom	平方和 Sum of square	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
单株粒重 SWP	重复 Repeat	2	6496. 59	3248. 29	538. 30	<0. 0001
	处理 Treatment	1	634. 93	634. 93	105. 22	<0. 0001
	年份 Year	1	3894. 30	3894. 30	645. 35	<0. 0001
	种质 Germplasmt	246	13612. 40	55. 33	9. 17	<0. 0001
	种质 × 处理 × 年份	245	1216. 08	4. 96	0. 82	0. 9733
	Germplasmt × Treatment × Year					
单株荚数 PP	重复 Repeat	2	41127. 07	20563. 54	103. 19	<0. 0001
	处理 Treatment	1	2. 36	2. 36	0. 01	0. 9133
	年份 Year	1	37456. 41	37456. 41	187. 96	<0. 0001
	种质 Germplasmt	246	208360. 65	846. 99	4. 25	<0. 0001
	种质 × 处理 × 年份	245	33397. 40	136. 32	0. 68	0. 9999
	Germplasmt × Treatment × Year					
株高 PH	重复 Repeat	2	21845. 07	10922. 53	180. 60	<0. 0001
	处理 Treatment	1	50. 71	50. 71	0. 84	0. 3600
	年份 Year	1	18031. 70	18031. 70	298. 15	<0. 0001
	种质 Germplasm	246	166923. 77	678. 55	11. 22	<0. 0001
	种质 × 处理 × 年份	245	12296. 81	50. 19	0. 83	0. 9674
	Germplasm × Treatment × Year					

表 3 耐旱评价参数基本统计分析
Table 3 Statistical analysis of drought tolerance parameters

年份 Year	变量 Variable	变异范围 Range of variation	均值 Mean	标准差 <i>SD</i>	变异系数 <i>CV</i> /%
2018	耐旱系数 DC	0. 21 ~ 10. 33	1. 15	1. 02	88. 88
	加权耐旱系数 WDC	0. 53 ~ 9. 97	1. 21	1. 01	83. 65
2019	耐旱系数 DC	0. 22 ~ 2. 01	0. 88	0. 22	24. 80
	加权耐旱系数 WDC	0. 54 ~ 3. 63	1. 01	0. 27	26. 45
两年联合 Two years jointly	耐旱系数 DC	0. 33 ~ 1. 35	0. 87	0. 14	16. 00
	加权耐旱系数 WDC	0. 67 ~ 2. 31	1. 01	0. 20	19. 80
	正常灌水单株粒重 SWP under normal irrigation	2. 07 ~ 18. 24	7. 03	2. 24	31. 84
	干旱胁迫单株粒重 SWP under drought stress	1. 53 ~ 11. 98	6. 02	1. 76	29. 22

2. 2. 2 耐旱性指标与单株粒重的相关性分析 由表 4 可知,2018 和 2019 年及两年度联合中,干旱胁迫处理与正常灌水处理下单株粒重均存在极显著正相关,相关系数分别为 0. 76,0. 73 和 0. 82 ($P < 0. 001$),说明要筛选干旱胁迫处理单株粒重高的品

种,需从正常灌水处理下具有较高产量潜力品种中筛选。耐旱系数与加权耐旱系数均存在极显著正相关,相关系数分别为 0. 97,0. 60 和 0. 45 ($P < 0. 001$),这可能是因为加权耐旱系数是以不同性状耐旱系数为基础进行赋值加权而得到。

表 4 耐旱评价参数相关分析

Table 4 Correlation coefficients between drought tolerance parameters

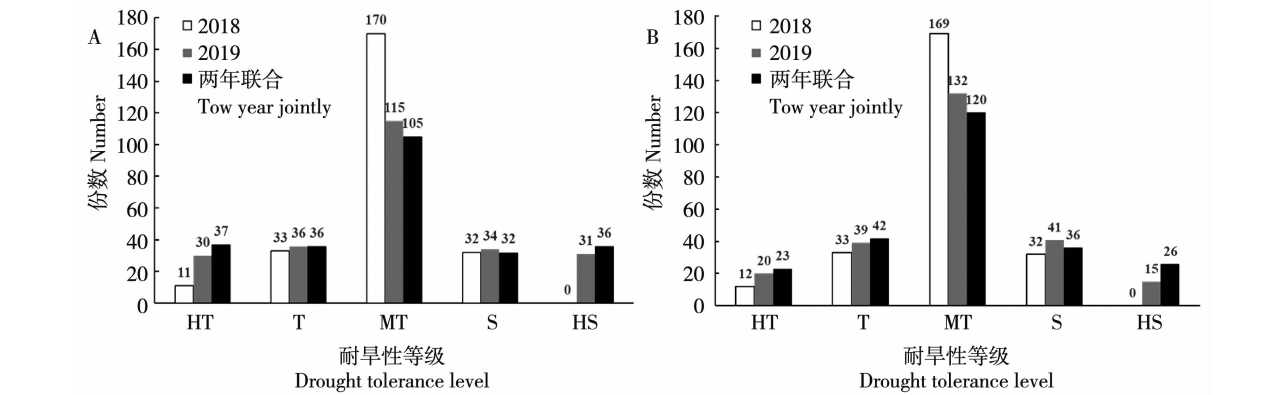
年份 Year		耐旱系数 DC	加权耐旱系数 WDC	正常灌水单株粒重 SWP under normal irrigation
2018	加权耐旱系数 WDC	0.97 ***		
	正常灌水单株粒重 SWP under normal irrigation	-0.43 ***	-0.43 ***	
	干旱胁迫单株粒重 SWP under drought stress	-0.11	-0.15	0.76 ***
2019	加权耐旱系数 WDC	0.60 ***		
	正常灌水单株粒重 SWP under normal irrigation	-0.50 ***	-0.24 ***	
	干旱胁迫单株粒重 SWP under drought stress	0.06	0.05	0.73 ***
两年联合 Two years jointly	加权耐旱系数 WDC	0.45 ***		
	正常灌水单株粒重 SWP under normal irrigation	-0.34 ***	-0.60 ***	
	干旱胁迫单株粒重 SWP under drought stress	0.22 **	-0.41 ***	0.82 ***

SWP:单株粒重; ** 表示在 0.01 水平上显著相关; *** 表示在 0.001 水平上显著相关。
SWP: Seed weight per plant; ** indicates significant relationship at 0.01 level; *** indicates significant relationship at 0.001 level.

2.3 耐旱性种质筛选

2.3.1 基于耐旱系数法和加权耐旱系数法的优异种质鉴定 利用耐旱系数、加权耐旱系数,采用逐级分类法将参试材料分为 5 个等级(图 1)。利用耐旱系数,2018 年、2019 年及两年度联合高耐种质数分别为 11 份、30 份和 37 份,其中共同高耐种质 3 份,分别为泰兴牛毛黄乙(ZDD04620)、小圆黄豆

(ZDD08564)和绿皮黄豆(ZDD19027);利用加权耐旱系数,2018 年、2019 年及两年度联合高耐种质数分别为 12 份、20 份和 23 份,其中共同高耐种质 2 份,分别为泰兴牛毛黄乙(ZDD04620)和小圆黄豆(ZDD08564)。耐旱系数法和加权耐旱系数评价均为高耐的种质有 2 份,分别为泰兴牛毛黄乙(ZDD04620)和小圆黄豆(ZDD08564)。



A:耐旱系数法;B:加权耐旱系数法;HT:高耐;T:耐;MT:中耐;S:较敏感;HS:敏感。

A: Drought tolerance coefficient; B:Weighted drought tolerance coefficient; HT: Highly tolerant; T: Tolerant; MT: Medium tolerant; S: Sensitive; HS: highly sensitive.

图 1 基于耐旱系数法和加权耐旱系数法鉴定的不同等级耐旱种质分布

Fig. 1 Distribution of drought resistant accessions by DC and WDC

2.3.2 基于极值差异法的优异种质鉴定 采用极值差异法将参试材料分为4个等级(图2),2018年、2019年及2年度联合中耐旱且高产分别为171份、193份和213份;高耐且低产分别为0份、5份和

0份,敏感且低产分别为51份、44份和20份;高耐且高产种质分别为25份、5份和14份,其中共同鉴定为高耐且高产种质7份,包括黑河1号(ZDD00041)等(表5)。

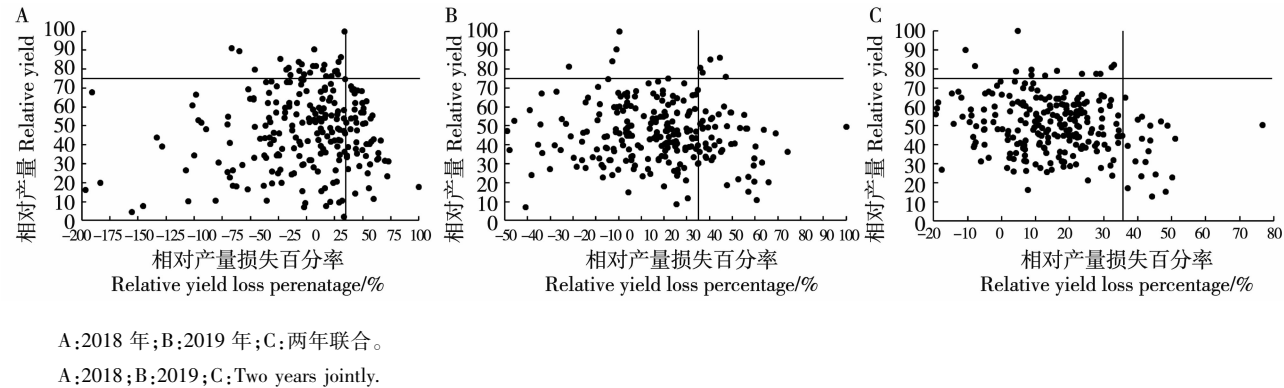


图2 极值差异法大豆品种耐旱性和产量潜力分类图

Fig. 2 Maximin-minimax method for classification of drought tolerance and yield potential of soybean varieties

表5 2018和2019年7份优异种质的耐旱性

Table 5 Drought tolerance of 7 elite germplasms in 2018 and 2019

统一编号 Uniform number	品种 Variety	来源地 Origin	2018		2019	
			耐旱系数	加权耐旱系数	耐旱系数	加权耐旱系数
			DC	WDC	DC	WDC
ZDD06363	大粒黄	福建晋江	中耐	中耐	中耐	中耐
ZDD00041	黑河1号	黑龙江黑河	中耐	中耐	中耐	中耐
ZDD08238	赤城绿黄豆	河北赤城	中耐	中耐	中耐	中耐
ZDD08190	样田小黄豆	河北赤城	中耐	中耐	中耐	中耐
ZDD12836	什邡螺丝豆	四川什邡	中耐	中耐	中耐	中耐
ZDD02866	大白皮	山东微山	中耐	中耐	中耐	中耐
ZDD12400	十月黄	四川西昌	中耐	中耐	中耐	中耐

2.3.3 耐旱性评价方法的比较 采用耐旱系数法和加权耐旱系数法分别对种质耐旱性鉴定的结果成极显著正相关(表4),表明2种方法较统一,但加权耐旱系数加入了株高、单株荚数等因素,可以更全面的表达出品种的耐旱性;而极值差异法中鉴定出的高耐且高产种质均处于耐旱系数、加权耐旱系数法鉴定的中耐水平(表5),表明这3种评价方法间存在相似之处;而本研究采用的极值差异法更全面地考虑了产量及产量损失之间的关系,可以更可靠地应用于生产中。

3 讨论

3.1 鉴定地点的选择

成熟期耐旱性鉴定易受环境影响^[21],目前作物耐旱性鉴定多在盆栽及温室中进行,一般很难进行大批量材料鉴定,且鉴定结果与大田生产具有差异^[21, 26]。不同于温室试验,自然生态条件下的鉴定更与农业生产实际相吻合。我国田间耐旱性鉴定

多在山西、甘肃等干旱或半干旱地区进行^[20-21, 24]。由于大豆是光温敏感作物,来自南方和黄淮海南部的大部分种质在甘肃、山西不能正常成熟。与山西和甘肃相比,海南省三亚属于典型的短日照地区,且旱季雨水较少,来自全国各地的种质都能正常成熟,适合所有大豆种质的耐旱性鉴定。

3.2 耐旱性评价方法

本研究采用干旱胁迫与正常灌水2种处理在海南旱季进行耐旱大豆种质的鉴定与筛选,相较正常灌水处理,干旱胁迫处理条件下单株粒重、单株荚数和株高均显著降低,同一性状种质间差异极显著。耐旱系数和加权耐旱系数均较大,说明种质耐旱性存在丰富的表型变异,利于耐旱性评价和优异种质筛选。大豆耐旱性由多种因素共同影响,仅用一、两个指标不能准确完整反映实际耐性的强弱,可利用多个指标进行综合评价^[17, 25, 27],且研究表明,大豆成熟期耐旱性与产量性状有显著相

关^[20-24]。耐旱系数法以干旱胁迫处理产量与正常灌水处理产量比值评价种质的耐旱性,而加权耐旱系数法是根据不同性状耐旱系数在整体评价中重要程度进行赋值,综合评价种质的耐旱性。相关分析结果表明,耐旱系数和加权耐旱系数存在极显著正相关。本研究对2种评价方法进行比较发现,2018和2019年2年度联合中耐旱系数与加权耐旱系数的同级率分别为85.43%、59.51%和53.04%,结果表明耐旱系数与加权耐旱系数评价结果具有较好的一致性。许多研究采用耐旱系数筛选耐旱种质^[19,23],而耐旱系数法是以种质水旱条件下相对产量评估种质的耐旱性,高产品种和低产品种可能具有相同的耐旱系数。Du等^[5]建议将耐旱系数、干旱胁迫和正常灌水处理下产量相结合进行优异耐旱种质筛选。因此,在农业生产实践中,不仅要考虑品种的耐旱性,还需考虑产量,即要求品种在正常年份和干旱年份均具有较好的产量潜力^[27]。本研究通过极值差异法与耐旱系数法和加权耐旱系数法进行比较发现,采用极值差异法筛选出7份耐旱高产种质均处于两种耐旱系数法评价的中耐水平,表明在育种过程中产量为首要因素,这些优异耐旱种质可为耐旱基因发掘和耐旱育种提供材料。

3.3 耐旱优异种质鉴定及筛选

耐旱种质的筛选与利用是耐旱品种改良的关键,由于受鉴定设施和自然环境制约,研究者通常采用较小的样本量,且多为育成品种进行耐旱性评价,导致材料间耐旱多样性小,区分结果不理想。本研究采用微核心种质进行成熟期耐旱性鉴定,分析结果表明种质耐旱性状变异系数大,遗传变异丰富,方便耐旱种质筛选。前人多采用耐旱系数法、加权耐旱系数法等进行耐旱种质筛选^[20-21,28],忽略了品种自身产量表现,本研究将耐旱性和产量相结合,分年度、和不同年份联合,全面深入地种质进行评估,有利于稳定耐旱且高产种质筛选。大豆耐旱性和产量受环境影响较大,海南是高温短日照环境,所筛选的耐旱高产种质需今后在种质的原产地进行耐旱性验证。

4 结 论

本研究对247份大豆微核心种质在海南进行两个年度田间耐旱性鉴定,耐旱系数和加权耐旱系数间呈极显著相关,且两种方法耐旱性评价结果基本一致,共同筛选出2份高耐种质泰兴牛毛黄乙(ZDD04620)和小圆黄豆(ZDD08564);采用极值差

异法筛选出包括黑河1号(ZDD00041)等7份高耐且高产种质。

参考文献

[1] Takahashi F, Suzuki T, Osakabe Y, et al. A small peptide modulates stomatal control *via* abscisic acid in long-distance signalling[J]. *Nature*, 2018, 556(7700): 235-238.

[2] Purcell L C, Specht J E. Physiological traits for ameliorating drought stress[M]//Shibles R M, Harper J E, Wilson R F, et al. Soybeans: Improvement, production and uses, American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc, 2004: 569-620.

[3] 王彩洁,李伟,徐冉,等. 黄淮海地区主栽大豆品种抗旱性比较[J]. *山东农业科学*, 2018, 5(1): 67-70. (Wang C J, Li W, Xu R, et al. Comparative study on drought resistance of main soybean cultivars planted in Huang-Huai-Hai Valley Region[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2018, 5(1): 67-70.)

[4] 周红霞. 大豆种质芽苗期耐旱性评价及全基因组关联分析[D]. 晋中: 山西农业大学, 2015. (Zhou H X. Evaluation of soybean drought tolerance during seedling stage and association analysis [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2015.)

[5] Du W, Yu D, Fu S. Detection of quantitative trait loci for yield and drought tolerance traits in soybean using a recombinant inbred line population[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(9): 868-878.

[6] Ning H, Yuan J, Dong Q, et al. Identification of QTLs related to the vertical distribution and seed-set of pod number in soybean [*Glycine max* (L.) Merri] [J]. *PLoS One*, 2018, 13(4): e0195830.

[7] Hwang S, King C A, Ray J D, et al. Confirmation of delayed canopy wilting QTLs from multiple soybean mapping populations [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2015, 128(10): 2047-2065.

[8] Ye H, Roorkiwal M, Valliyodan B, et al. Genetic diversity of root system architecture in response to drought stress in grain legumes [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2018, 69(13): 3267-3277.

[9] Condon A G, Richards R A, Rebetzke G J, et al. Breeding for high water-use efficiency [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(407): 2447-2460.

[10] Specht J E, Hume D J, Kumudini S V. Soybean yield potential—A genetic and physiological perspective[J]. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1560-1570.

[11] Oya T, Nepomuceno A L, Neumaier N, et al. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars[J]. *Plant Production Science*, 2004, 7(2): 129-137.

[12] Guimarães-Dias F, Neves-Borges A C, Viana A A B, et al. Expression analysis in response to drought stress in soybean: Shedding light on the regulation of metabolic pathway genes[J]. *Genetics and Molecular Biology*, 2012, 35(1): 222-232.

[13] 梁建秋, 张明荣, 吴海英. 大豆抗旱性研究进展[J]. 大豆科学, 2010, 29(2): 341-345. (Liang J Q, Zhang M R, Wu H Y. Advances in drought tolerance of soybean[J]. Soybean Science, 2010, 29(2): 341-345.)

[14] Peleg Z, Fahima T, Saranga Y. Drought resistance in wild emmer wheat: Physiology, ecology, and genetics [J]. Israel Journal of Plant ences, 2007, 55(3): 289-296.

[15] Terún H, Singh S P. Comparison of sources and lines selected for drought resistance in common bean[J]. Crop Science, 2002, 42(1): 64-70.

[16] Manavalan L P, Guttikonda S K, Phan Tran L S, et al. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean[J]. Plant and Cell Physiology, 2009, 50(7): 1260-1276.

[17] Liu Z X, Li H H, Gou Z, et al. Genome-wide association study of soybean seed germination under drought stress [J]. Molecular Genetics and Genomics, 2020, 1(1): 1-13.

[18] Desclaux D, Huynh T T, Roumet P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress[J]. Crop Science, 2000, 40(3): 716-722.

[19] Du W, Wang M, Fu S, et al. Mapping QTLs for seed yield and drought susceptibility index in soybean (*Glycine max* L.) across different environments[J]. Journal of Genetics and Genomics, 2009, 36(12): 721-731.

[20] 路贵和, 刘学义, 任小俊, 等. 黄淮海地区大豆抗旱种质资源的多样性研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(3): 251-255. (Lu G H, Liu X Y, Ren X J, et al. Diversity in soybean germplasm with drought resistance in Huang-Huai-Hai Valleys [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(3): 251-255.)

[21] 王兴荣, 张彦军, 李玥, 等. 干旱胁迫对大豆生长的影响及抗旱性评价方法与指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(1): 49-56. (Wang X R, Zhang Y J, Li Y, et al. Effects of drought stress on growth and screening methods and indexes for drought-resistance in soybean [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(1): 49-56.)

[22] Bhatia V S, Jumrani K. A maximin-minimax approach for classifying soybean genotypes for drought tolerance based on yield potential and loss[J]. Plant Breeding, 2016, 135(6): 691-700.

[23] 邱丽娟, 李英慧, 关荣霞, 等. 大豆核心种质和微核心种质的构建、验证与研究进展[J]. 作物学报, 2009, 35(4): 571-579. (Qiu L J, Li Y H, Guan R X, et al. Establishment, representative testing and research progress of soybean core collection and mini core collection[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(4), 571-579.)

[24] 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.)

[25] Liu Z X, Li H H, Fan X, et al. Phenotypic characterization and genetic dissection of growth period traits in soybean (*Glycine max*) using association mapping [J]. PloS One, 2016, 11(7): e0158602.

[26] Bhatia V S, Jumrani K, Pandey G P. Developing drought tolerance in soybean using physiological approaches[J]. Soybean Research, 2014, 12(1): 1-19.

[27] Odulaja A, Nokoe S. A maximin-minimax approach for classifying crop varieties into resistance groups based on yield potential and loss[J]. International Journal of Pest Management, 1993, 39(1): 64-66.

[28] Dhanapal A P, Ray J D, Singh S K, et al. Genome-wide association study (GWAS) of carbon isotope ratio (*delta13C*) in diverse soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] genotypes [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2015, 128(1): 73-91.

协办单位

中国作物学会大豆专业委员会
黑龙江省农业科学院大豆研究所
东北农业大学大豆研究所
吉林省农业科学院大豆研究所
南京农业大学大豆研究所
辽宁省农业科学院作物研究所
河北省农林科学院粮油作物研究所