

16份玉米自交系全生育期抗旱性鉴定与评价

李懿璞^{1,2}, 苏治军^{1,2}, 高聚林^{1,2}, 于晓芳^{1,2}, 王富贵^{2,3},
刘剑^{2,3}, 孙继颖^{1,2}, 王志刚^{1,2}, 胡树平^{2,3}, 包海柱^{1,2}

(1.内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.内蒙古自治区作物栽培与遗传改良重点实验室,
内蒙古 呼和浩特 010018; 3.内蒙古农业大学职业技术学院, 内蒙古 包头 014109)

摘要:以16份玉米自交系为试验材料,通过比较其在全生育期水分胁迫和正常灌溉条件下农艺性状、产量性状和光合特性的差异,以抗旱系数为基本评价指标,采用逐步回归法建立最优回归方程,同时结合相关性分析、隶属度及聚类分析方法,对玉米自交系进行抗旱性鉴定及抗旱指标筛选。结果表明:水分条件对散粉吐丝间隔期、株高、穗长等11个性状具有显著/极显著影响,单穗粒重、散粉吐丝间隔期和穗长可作为玉米自交系抗旱性鉴定的次级性状筛选指标。利用次级性状抗旱系数的平均隶属度和旱情发生时期抗旱系数的平均隶属度两种方法对自交系抗旱性进行综合评价,结果完全一致的有11份;通过聚类分析,将16份玉米自交系分成4类,其中强抗旱型5份、抗旱型6份、中抗旱型4份、弱抗旱型1份。参试材料中,抗旱性最强的自交系为Si-287,最弱的自交系为X178。

关键词:玉米;自交系;抗旱性;散粉吐丝间隔期

中图分类号:S513 **文献标志码:**A

Drought tolerance evaluation of 16 maize inbred lines throughout the whole growth period

LI Yipu^{1,2}, SU Zhijun^{1,2}, GAO Julin^{1,2}, YU Xiaofang^{1,2}, WANG Fugui^{2,3},
LIU Jian^{2,3}, SUN Jiying^{1,2}, WANG Zhigang^{1,2}, HU Shuping^{2,3}, BAO Haizhu^{1,2}

(1.Agronomy Academy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2.Key Laboratory of Crop Cultivation and Genetic Improvement of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

3.Vocational and Technical College of Inner Mongolia Agricultural University, Baotou, Inner Mongolia 014109, China)

Abstract: To explore the characteristics of maize response to drought stress during its whole growth period, the agronomic, yield and photosynthetic characteristics of 16 maize inbred lines were compared between drought stress and normal irrigation in this study. The optimal regression equation was established using the drought resistance coefficient as the primary evaluation index through a stepwise regression method. Additionally, the drought resistance of maize inbred lines was determined by combining correlation analysis, membership function, and cluster analysis to select indicator traits for drought resistance. The results showed that 11 traits such as anthesis silking interval, plant height and ear length had significant difference between water treatments. Kernel-weight per ear, anthesis silking interval and ear length were selected as secondary traits for drought resistance identification of maize inbred lines. The drought resistance of inbred lines was evaluated by two methods. One was by average membership degree of drought resistance coefficient of secondary traits; the other was by average membership degree of drought resist-

收稿日期:2022-05-23

修回日期:2022-06-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0300302-04);内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目(NDYB2018-12);内蒙古农业大学科技成果转化专项资金动植物品种培育(选育)专项资助项目(YZGC2017005);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY19048);华北黄土高原地区作物栽培科学观测实验站(25204120)

作者简介:李懿璞(1987-),男,内蒙古呼和浩特人,讲师,主要从事玉米耐逆遗传育种研究。E-mail:liyipu1987@163.com

苏治军(1969-),男,内蒙古巴彦淖尔人,讲师,主要从事玉米种质资源鉴定和耐旱生理研究。E-mail:barysu@126.com

通信作者:高聚林(1964-),男,内蒙古鄂尔多斯人,教授,主要从事玉米生理生态研究。E-mail:nmgaojulin@163.com

于晓芳(1971-),女,内蒙古赤峰人,教授,主要从事玉米生理生态研究。E-mail:yuxiaofang75@163.com

ance coefficient of drought occurrence period. The 11 inbred lines of them had the same results. According to the two methods, 16 maize inbred lines were divided into 4 groups by cluster analysis. Among them, 5 were high resistance type, 6 were resistance type, 4 were of medium resistance type and 1 was of susceptible type. Si-287 was with the highest resistance inbred line and X178 was the most susceptible type.

Keywords: maize; inbred lines; drought resistance; anthesis silking interval

玉米(*Zea Mays* L.)是我国目前种植面积最大的粮食作物,在保障国家粮食安全方面发挥着重要作用。我国2/3的玉米主要种植在东北、华北、西北和西南等地区的丘陵或平原旱地上,由于自然降雨不足,每年因干旱造成玉米减产20%~30%,在旱情严重年份甚至可减产30%~35%^[1-2]。干旱被认为是影响我国玉米总产量的首要非生物胁迫因子^[3-4]。据中国气象局国家气候中心2021年预测,受大气环流异常的影响,未来10年我国发生区域性干旱的频率可能增加,并且干旱面积有扩大趋势。在全球水资源日益短缺的情况下,挖掘抗旱种质资源,选育高产抗旱品种已成为玉米育种的重要目标^[5-10]。

国内外许多学者在鉴定玉米自交系抗旱性方面进行了大量研究,发现干旱胁迫对玉米自交系产量影响较大,而产量是玉米耐旱育种最为关注的性状,但仅通过田间产量评价玉米自交系的抗旱性并不科学;可运用简单相关、主成分分析、逐步回归、聚类分析和灰色关联分析方法,筛选出玉米苗期存活率、雌雄穗开花隔离时间、抽雄吐丝期叶片保水力、百粒重等作为玉米自交系抗旱性评价的主要指标^[11-16],并利用这些指标筛选出一些抗旱种质材料。随着分子生物学的快速发展,抗旱QTL的定位与候选基因克隆也为玉米抗旱自交系的筛选带来了便利。近年来,一些与玉米抗旱性相关的基因相继被报道,如转录因子*ZmDREB2.7*^[17]、蛋白磷酸酶*ZmPP2C-A10*^[18]、转录因子*ZmNAC111*^[19],与玉米苗期抗旱性显著相关、编码玉米液泡型氢离子焦磷酸酶的*ZmVPP1*基因也被成功克隆^[20]。过去对玉米耐旱性研究的方法主要集中于大田鉴定和苗期胁迫,大田鉴定受到自然降水影响,试验条件难以控制;在实际农业生产中,花期干旱胁迫对玉米产量影响极大,仅通过苗期胁迫进行耐旱性鉴定所得的结果不够全面和准确。目前关于花期干旱胁迫对玉米植株形态及生理特性、灌浆、籽粒建成等相关指标影响的研究报道较少,系统的玉米全生育期抗旱性鉴定体系尚未形成。

本研究利用16份玉米自交系进行旱棚池栽试验,通过对自交系全生育期生长指标的监测和分析,明确抗旱自交系的筛选指标和科学的评价方

法,为选育玉米抗旱品种提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为内蒙古玉米产区主推的7个品种的亲本和1个自育品种的亲本,共16份玉米自交系,分别为PH6WC、PH4CV、KWS49、KWS73、KW7M14、KW4M029、Mo17、E28、郑58(ZH58)、昌7-2(Chang 7-2)、DH382、DH351、Si-144、Si-287、G303、X178。

1.2 试验设计与处理

试验于2019—2020年春播期在内蒙古农业大学科技园(包头市土默特右旗沟门镇北只图村,40°33'N,110°31'E)的旱棚中进行。棚内为正方形水泥池,边长2.2 m,深1.5 m。采用裂区试验设计,主区为水分控制处理,设置正常灌溉和干旱胁迫2个处理,正常灌溉处理为出苗后15~20 d浇水,以后每隔7 d灌溉1次,保持土壤含水量为田间最大持水量的75%左右;干旱胁迫处理为保持出苗后、开花前一周、灌浆后一周土壤达到中度干旱胁迫水平,即土壤含水量为田间最大持水量的45%左右,其他措施同正常灌溉处理。副区为16份自交系,单行区,行距60 cm,株距22 cm,种植密度75 000株·hm⁻²。试验设3次重复,总计96行,每池播种4行,共24个栽培池。

1.3 测定指标与方法

农艺与产量性状:参照《NY/T 2232-2012 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南—玉米》标准中的方法,田间测定出苗率、抽雄期、吐丝期、散粉期、散粉吐丝间隔期(ASI)、成熟期、株高、穗位高;收获后测定穗长、穗粗、百粒重、穗行数、行粒数、单穗粒重、秃尖长。采取定株测量法,即每个自交系测10株(不包括边行植株)并取平均值。收获期收获各小区中间2行全部果穗进行称重,用谷物水分测量仪测定玉米籽粒含水量,按照标准含水量14%计算产量。

光合叶绿素指标:玉米散粉后10 d于晴天9:00—11:00采用Li-6400XT光合测定系统测定穗位叶的净光合速率;散粉后10 d采用Handy PEA植物效率分析仪测定穗位叶的荧光参数值 F_v/F_m 和

P_i ;散粉后 10 d 于晴天 9:00—11:00 和 15:00—17:00 用 SPAD 仪测定穗位叶的叶绿素含量 (SPAD 值),以上指标每个重复选择中间 10 株(不包括边株)进行测定。

土壤含水量:采用 TDR 法测定,测定土层为 0~20、20~30、30~40、40~50 cm。

1.4 统计方法

1.4.1 抗旱系数(DC) 抗旱系数=干旱胁迫某性状测定值/正常灌溉该性状测定值^[21]。

1.4.2 抗旱隶属度法(SV) 综合评价品种抗旱性选用抗旱隶属度法进行^[22],公式如下:

$$\begin{cases} 0 & X = X_{jmin} \\ X_{ij} = (X - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) & X_{jmin} < X < X_{jmax} \\ 1 & X = X_{jmax} \end{cases}$$

(1)

式中, X_{ij} 为*i*品种*j*性状的抗旱隶属度值, X 为*i*品种*j*性状值, X_{jmin} 为各品种*j*性状最小值, X_{jmax} 为各品种*j*性状最大值。当指标性状值与抗旱性呈负相关时, $X_{ij} = 1 - X_{ij}$ 。

将各自交系每个生理指标抗旱隶属度值进行累加并求平均值,获得抗旱隶属度综合值。综合值越大,抗旱性越强。根据抗旱指标隶属度综合值,品种抗旱性强弱分为 4 级,即 1 级 0.80~1.00,为强抗旱型(HR);2 级 0.60~0.79,为抗旱型(R);3 级 0.30~0.59,为中抗旱型(MR);4 级 0.0~0.29,为弱抗旱型(S)。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理、抗旱系数和隶属度的计算;采用 SPSS 22.0 和 SAS 9.0 软件进行方差分析、相关性分析和逐步回归分析。所有结果均为两个生长季数据平均值。

2 结果与分析

2.1 不同玉米自交系各性状描述性统计及方差分析

对 16 份玉米自交系抗旱性状进行方差分析,结果表明(表 1),自交系对 ASI、穗长、穗粗、秃尖长、穗行数、行粒数、百粒重、单穗粒重、 P_i 值共 9 个性状的影响达显著或极显著水平。水分条件对 ASI、株高、穗位高、穗长、穗粗、秃尖长、行粒数、单穗粒重、 P_i 、净光合速率和 SPAD 等共 11 个性状有显著或极显著影响,表明这些指标对水分胁迫较为敏感,干旱胁迫对其影响较大,可从中进一步筛选出自交系抗旱评价的主要指标。水分条件与自交系互作效

应对各性状均无显著影响。干旱胁迫下株高、穗位高和单穗粒重标准差较大,说明这些性状在不同自交系间对干旱胁迫的敏感程度存在较大差异。

2.2 玉米自交系主要性状抗旱系数的相关性分析

采用性状相对值(抗旱系数)进行抗旱性评价,选取方差分析(表 1)中水分条件的影响达显著水平的 11 个性状进行相关分析。由表 2 可知,穗长、单穗粒重、行粒数、株高与产量抗旱系数显著或极显著正相关;秃尖长、ASI 与产量抗旱系数显著负相关。各主要性状与产量的相关性表现为 ASI>单穗粒重>穗长>行粒数>株高>秃尖长。穗粗与单穗粒重、穗粗与行粒数、穗位高与株高等性状间也存在极显著相关关系,表明不同的信息存在交叉,其对玉米自交系的抗旱性也有一定的贡献,为更加明确各性状对玉米自交系抗旱性的贡献和性状间的内在联系,需要做进一步统计分析。

2.3 抗旱性相关指标的逐步回归分析

采用逐步回归法筛选重要的抗旱性指标,建立抗旱性评价数学模型,筛选出对因变量影响最大的自变量,可对玉米自交系抗旱性进行预测。产量是评价玉米抗旱性最重要的性状,故以产量抗旱系数为因变量、与产量抗旱系数相关性达到显著水平的穗长、秃尖长、单穗粒重、行粒数、ASI 和株高等 6 个性状作为自变量进行逐步回归分析,由表 3(见 92 页)可确定最优回归方程为:

$$Y = 0.408 + 0.442X_1 + 1.177X_2 + 0.520X_3 \quad (R^2 = 0.623, F = 12.097, P = 0.004)$$

(2)

其中, X_1 、 X_2 、 X_3 分别为单穗粒重、ASI 和穗长。因此,单穗粒重、ASI 和穗长可作为玉米自交系抗旱性鉴定的次级性状筛选指标。

2.4 不同玉米自交系抗旱性综合评价

采用两种方法进行抗旱性综合评价,即通过逐步回归筛选主要性状指标抗旱系数和计算旱情发生时期关键指标抗旱系数,以增强自交系抗旱性评价结果的可靠性。根据由逐步回归法确定的 3 个次级性状筛选指标(单穗粒重、ASI、穗长),基于 3 个性状抗旱系数计算各自交系的隶属度值,根据小区产量计算各自交系产量抗旱系数的隶属度值,通过平均隶属度评价自交系的抗旱性,按照模糊隶属函数法原理,隶属度越大,抗旱性越强。通过分析次级性状单穗粒重、ASI、穗长和产量抗旱系数的平均隶属度(表 4,见 92 页),筛选出强抗旱型自交系 5 份,分别为 Si-287、E28、Chang 7-2、PH6WC 和 Si-144,抗旱型玉米自交系 3 份,中抗旱型自交系 7 份,弱抗旱型 1 份(X178)。

表 1 不同水分处理下玉米各性状的描述性统计及方差分析

Table 1 Descriptive statistics and variance analysis about the various traits under different levels																
处理	参数	散粉吐丝 间隔期/d	株高/cm	穗位高/cm	穗长/cm	穗粗/cm	秃尖长/cm	穗行数	行粒数	百粒重/g	单穗粒重/g	F_v/F_m	P_i	净光合速率 Net photosynthetic rate	SPAD	产量 Yield (kg · plot ⁻¹)
Treatment	Parameter	Anthesis silking interval	Plant height	Ear height	Ear length	Ear diameter	Bald tip length	Kernel row number	Kernels per row	100-kernel weight	Kernel weight per ear					
正常灌水 Normal irrigation	最大值 Max.	7.00	245.65	116.05	14.24	5.33	2.16	14.40	14.00	35.92	85.14	0.79	2.95	18.99	49.17	842.99
	最小值 Min.	0.00	184.33	75.33	9.27	3.55	0.00	8.80	8.80	23.91	43.68	0.69	1.56	12.90	34.67	561.50
	平均值 Mean	3.85	211.22	87.93	12.96	3.79	0.65	11.65	12.92	29.37	69.18	0.73	1.97	15.37	44.84	641.69
	标准差 SD	0.98	25.30	20.25	1.61	0.63	0.25	2.02	2.59	5.35	23.71	0.02	0.46	1.57	3.64	84.17
	变异系数 CV/%	25.58	11.98	23.03	12.46	16.51	38.70	17.38	20.02	18.22	34.27	2.14	23.28	10.23	8.12	13.12
干旱胁迫 Drought stress	最大值 Max.	9.00	205.95	113.33	12.42	4.80	2.80	12.20	13.80	34.65	77.07	0.77	2.36	15.76	44.05	561.34
	最小值 Min.	2.00	167.33	72.30	7.14	2.87	0.42	7.80	7.68	18.74	37.84	0.65	1.35	8.01	33.73	274.15
	平均值 Mean	4.27	188.45	80.18	8.92	3.53	0.80	11.51	11.10	29.11	62.37	0.72	1.58	12.19	39.86	351.34
	标准差 SD	0.97	31.62	14.85	1.93	0.44	0.27	2.14	3.11	6.59	19.47	0.02	0.35	1.49	2.83	92.04
	变异系数 CV/%	22.69	16.78	18.52	21.69	12.34	33.86	18.57	28.01	22.64	31.21	2.27	22.44	12.21	7.09	26.20
显著性检验(F 值) Significance test (F value)																
水分条件	Water condition	15.13 **	13.37 **	4.97 *	25.92 **	13.84 **	3.77 *	0.17	32.98 **	0.93	44.21 **	1.83	11.29 **	58.37 **	12.97 **	43.69 **
自交系	Inbred line	3.35 *	0.32	2.10	2.91 *	11.08 **	3.43 **	6.74 **	2.58 *	15.65 **	7.16 **	1.61	4.08 **	1.89	0.75	5.35 **
水分条件×自交系																
Water condition×inbred line		1.33	0.37	1.01	0.84	1.06	0.91	0.77	1.17	0.92	2.33	0.81	0.84	0.53	0.41	2.44

注: *、*、* 分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平下差异显著。下同。
Note: *, *, * indicated significant difference at $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively. The same below.

表 2 11 个性状与产量抗旱系数的相关性

Table 2 Correlation of 11 traits and yield drought resistance coefficient										
性状 Trait	产量 Yield	穗长 Ear length	穗粗 Ear diameter	秃尖长 Bald tip length	单穗粒重 Kernel weight per ear	行粒数 Kernel number per row	散粉吐丝 间隔期 Anthesis silking interval	穗位高 Ear height	株高 Plant height	净光合速率 Net photosynthetic rate
产量 Yield	1.000									
穗长 Ear length	0.383 **	1.000								
穗粗 Ear diameter	0.045	0.211	1.000							
秃尖长 Bald tip length	-0.269 *	0.187	-0.140	1.000						
单穗粒重 Kernel weight per ear	0.587 **	0.093	0.459 **	-0.260	1.000					
行粒数 Kernel number per row	0.295 *	0.532 **	0.361 **	-0.200	0.352 **	1.000				
散粉吐丝间隔期 Anthesis silking interval	-0.780 **	-0.198	-0.074	0.017	-0.123	-0.356	1.000			
穗位高 Ear height	-0.031	0.107	0.300 **	-0.010	0.227 *	0.218 *	-0.035	1.000		
株高 Plant height	0.271 *	0.301 **	0.312 **	-0.072	0.380 **	0.372 **	-0.105	0.729 **	1.000	
P_i	0.196	0.415	-0.142	0.045	-0.142	0.011	0.284	0.045	0.045	1.000
SPAD	0.145	0.377 *	0.121	-0.185	0.139	0.182	-0.253	0.121	0.316 *	0.541 **
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.123	0.147	0.005	-0.099	0.073	0.149	0.550 **	0.005	0.105	0.134

考虑玉米主产区旱情发生规律,为了检验逐步回归筛选的次级性状指标进行抗旱性综合评价的可靠性,分别对自交系苗期、开花期、收获期关键性状指标出苗率、ASI 和产量的抗旱系数进行计算,综合评价自交系在不同生理时期的抗旱性,依据 3 个指标抗旱系数的平均隶属度进行分级评价(表 5),共选出强抗旱型自交系 4 份,分别为 Si-287、PH6WC、Chang 7-2 和 Si-144,抗旱型玉米自交系 4 份,中抗旱型自交系 7 份,弱抗旱型 1 份(X178)。与主要性状指标的抗旱性综合评价结果进行比较发现,完全一致的有 11 份,强抗旱型的 4 份与弱抗

表 3 回归系数的标准化检验

Table 3 Standardized test of regression coefficients					
模型 Model	非标准化系数 Nonstandardized coefficient		标准化系数 Standardized coefficient	T	P 值 P value
	B	标准误差 Std error	Beta		
常量 Constant	0.408	0.091		4.507	0.000
单穗粒重 Kernel weight per ear	0.442	0.134	0.579	3.294	0.006
散粉吐丝间隔期 Anthesis silking interval	1.177	0.502	0.412	2.347	0.035
穗长 Ear length	0.520	0.150	0.681	3.478	0.004

表 4 16 份玉米自交系主要性状抗旱性评价结果

Table 4 Drought resistance identified by subordinate function value method for 16 maize inbred lines						
自交系 Inbred line	单穗粒重 Kernel-weight per ear	ASI	穗长 Ear length	产量 Yield	平均隶属度 Mean membership	评级 Type
Si-287	0.878	1.000	0.907	0.920	0.928	HR
E28	0.878	0.896	0.932	0.660	0.902	HR
Chang7-2	0.899	0.970	0.652	0.740	0.840	HR
PH6WC	0.757	1.000	0.710	0.900	0.823	HR
Si-144	0.767	1.000	0.638	0.680	0.801	HR
PH4CV	0.995	0.463	0.761	0.580	0.740	R
KWS73	0.854	0.448	0.785	0.400	0.696	R
Mo17	0.776	0.836	0.349	0.680	0.654	R
KW4M029	0.742	0.403	0.584	1.000	0.576	MR
KWS49	0.453	0.000	0.978	0.640	0.477	MR
KW7M14	0.240	0.418	0.642	0.000	0.433	MR
ZH58	0.586	0.448	0.178	0.740	0.404	MR
DH382	0.532	0.239	0.359	0.200	0.377	MR
G303	0.223	0.761	0.000	0.320	0.328	MR
DH351	0.421	0.254	0.247	0.680	0.307	MR
X178	0.000	0.104	0.369	0.060	0.158	S

注:ASI—散粉吐丝间隔期;HR—强抗旱型;R—抗旱型;MR—中抗旱型;S—弱抗旱型。下同。

Note:ASI-Anthesis silking interval, HR-High resistance, R-Resistance, MR-Medium resistance, S-Susceptible.The same below.

旱型的 1 份评级结果完全一致,抗旱型和中抗旱型有 5 份评级结果存在一定差异。

基于两种评价方法的平均隶属度,利用平方欧氏距离法对 16 份参试自交系进行聚类分析,当欧氏距离等于 4 时,可以将参试自交系分成 4 类(图 1):第 1 类包括 KWS49、KW7M14、DH382、G303、DH351 和 ZH58 共 6 份抗旱型自交系;第 2 类包括 1 份弱抗旱型自交系(X178);第 3 类包括 Si-287、PH6WC、Chang 7-2、Si-144 和 E28 共 5 份强抗旱型自交系;第 4 类包括 PH4CV、KWS73、Mo17 和 KW4M029 共 4 份中抗旱型自交系。

表 5 16 份玉米自交系不同生育时期重要性状抗旱性评价结果

Table 5 Drought resistance identified by subordinate function value of vital traits of different growth stages for 16 maize inbred lines					
自交系 Inbred line	出苗率 Sprouting rate	ASI	产量 Yield	平均隶属度 Mean membership	评级 Type
Si-287	1.000	1.000	0.920	0.97	HR
PH6WC	1.000	1.000	0.900	0.97	HR
Chang7-2	0.902	0.970	0.740	0.87	HR
Si-144	0.770	1.000	0.680	0.82	HR
KW4M029	0.967	0.403	1.000	0.79	R
E28	0.787	0.896	0.660	0.78	R
ZH58	1.000	0.448	0.740	0.73	R
Mo17	0.557	0.836	0.680	0.69	R
G303	0.623	0.761	0.320	0.57	MR
PH4CV	0.607	0.463	0.580	0.55	MR
DH351	0.607	0.254	0.680	0.51	MR
KWS73	0.590	0.448	0.400	0.48	MR
KWS49	0.541	0.000	0.640	0.39	MR
KW7M14	0.639	0.418	0.000	0.35	MR
DH382	0.475	0.239	0.200	0.30	MR
X178	0.000	0.104	0.060	0.05	S

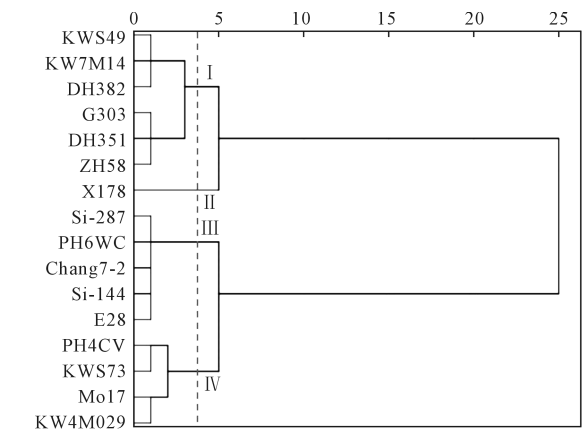


图 1 16 份玉米自交系聚类分析

Fig.1 Cluster analysis of 16 maize inbred lines

3 讨论

3.1 自交系抗旱指标、鉴定综合评价

抗旱性是复杂的数量性状,了解玉米自交系的抗旱性是提高玉米抗旱性和选育抗旱品种的重要基础。要想全面确定自交系的抗旱性,应利用多指标综合评价。于永涛等^[23]认为衡量不同玉米品种的抗旱性强弱时,产量是最重要的指标。浦军等^[24]研究表明,ASI、保绿性的抗旱系数与产量抗旱系数呈极显著正相关,是田间鉴定玉米抗旱性的有效指标。Cairns等^[25]认为,干旱胁迫条件下,开花前生物量与玉米自交系的产量密切相关^[26]。师亚琴等^[26]研究认为,干旱胁迫下,植株茎秆强度、花后干物质积累量、穗位叶SPAD值降低,且其抗旱系数与产量抗旱系数呈显著正相关,这3个性状可作为玉米自交系抗旱性鉴定的次级指标。张赛楠等^[27]研究认为,玉米自交系的ASI、百粒重和穗位高可作为玉米抗旱性鉴定的次级性状筛选指标。本研究首先通过方差分析筛选出受水分条件影响显著的指标,并对各指标及产量抗旱系数进行相关分析,从中选择与产量相关性显著的指标进行逐步回归分析,建立较优回归方程,最终筛选出单穗粒重、ASI和穗长作为玉米自交系抗旱性鉴定的次级性状指标,与前人的研究结果基本一致。ASI在多个研究中被认为是鉴定玉米自交系抗旱性的有效指标,在筛选中需要高度关注。

抗旱系数反映了不同自交系对水分胁迫的敏感程度,可较为客观地评价不同自交系的抗旱性。隶属度可消除单个指标评价带来的片面性,将各自交系的抗旱指标扩展到 $[0, 1]$ 闭区间上,使得各自交系抗旱性的差异具有可比性。通过2a的旱棚试验,采用抗旱系数结合隶属度综合评价法评价的16份自交系的抗旱性结果可靠。两种方法评级均为强抗旱型的Si-287和Si-144为‘吉单27’的亲本,而‘吉单27’的抗旱性和丰产性表现都非常优异^[28];前人研究表明,骨干自交系‘昌7-2’具有较强的抗旱性^[29],本研究与其评价结果一致。这3个自交系可作为优质抗旱种质资源创制的供体材料。

3.2 抗旱鉴定时期与方法

根据玉米的生长发育特征,可将其抗旱鉴定分为萌发期抗旱鉴定、苗期抗旱鉴定、开花期抗旱鉴定、灌浆期抗旱鉴定和进行整体综合评价的全生育期抗旱鉴定。苗期抗旱鉴定方法简单易行,可进行大批量材料的鉴定,但其不涉及产量性状,所以只适合抗旱指标的初步筛选和抗旱性状的QTL定位

与基因克隆。全生育期抗旱鉴定主要采用旱棚、人工气候室鉴定和田间直接鉴定等方法,旱棚、人工气候室鉴定法下田间持水量可控,结果较可靠,但样本数量有限;田间直接鉴定法工作量大,且结果易受环境影响,但其简单易行,多用于玉米杂交种抗旱性的鉴定。本研究采用旱棚全生育期鉴定法,评价结果全面可靠,但受制于干旱池的面积,只选用了16个具有代表性的自交系进行抗旱性鉴定。后期利用分子标记辅助选育的杂交组合还需要通过田间直接鉴定法进行多年多点的抗旱性鉴定。

多指标抗旱性测定结果虽准确,但工作量大而繁杂,某些指标测定成本高。本研究同时对旱情发生时期的抗旱系数进行了综合评价,与筛选出次级性状进行抗旱性评价的强抗旱型和弱抗旱型结果基本一致,只有1份自交系结果存在差异,所以根据旱情发生时期抗旱系数进行评价的方法简单实用,适宜小型育种企业推广使用。

我国西北春玉米的不同主产区降水量差异大且同一地区降水量年际之间波动幅度大,玉米全生育期均有可能受到干旱胁迫。张文英等^[30]和朴明鑫等^[31]认为在玉米抗旱育种实际应用过程中可依据当地的气候条件和育种目标对抗旱指标进行取舍。本研究在后期试验中将结合当地旱情的发生情况对自交系及杂交种进行综合评价,其中对杂交种产量评估时将增加产量抗旱指数作为评价参数。分子标记辅助育种结合常规育种会大大加快育种进程,目前玉米已有多个抗旱基因被克隆,后期研究将结合与抗旱基因(*ZmNAC11*, *ZmVPP1*)共分离的分子标记对自交系的抗旱性进行评价,结合基因芯片对遗传背景进行选择,进一步提高抗旱性评价的可靠性和抗旱育种新材料创制的效率。另外,将对筛选出的强抗旱型和弱抗旱型自交系进行抗旱机理研究,以期揭示玉米抗旱的分子机制。

4 结论

运用方差分析结合逐步回归分析的方法,对玉米全生育期11个性状的抗旱系数与产量抗旱系数的相关性进行分析,表明单穗粒重、散粉吐丝间隔期、穗长3个性状与抗旱性密切相关,可作为玉米自交系抗旱性鉴定的次级性状指标。基于这3个性状抗旱系数的平均隶属度和旱情发生时期抗旱系数的平均隶属度两种方法对16份材料进行聚类分析,发现5份强抗旱型玉米自交系(Si-287、PH6WC、昌7-2、Si-144、E28)、6份抗旱型玉米自交系(KWS49、KW7M14、DH382、G303、DH351、郑58)、4

份中抗旱型自交系 (PH4CV、KWS73、Mo17、KW4M029) 和 1 份弱抗旱型自交系 (X178)。

共同第一作者贡献说明:李懿璞和苏治军共同完成了本试验的实施和论文写作等过程,其中苏治军主要完成试验材料收集、试验设计与田间管理,李懿璞主要完成试验数据采集与分析、论文写作。

参 考 文 献:

[1] 苏治军, 郝转芳, 谢传晓, 等. 玉米 dbf1 基因与耐旱相关性状的关联分析[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(4): 474-478, 482.
SU Z J, HAO Z F, XIE C X, et al. Association analysis between dbf1 gene and drought-tolerant traits in maize[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(4): 474-478, 482.

[2] 张凤启, 赵霞, 丁勇, 等. 玉米耐旱性研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(30): 38-42.
ZHANG F Q, ZHAO X, DING Y, et al. Research development of drought tolerance in maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(30): 38-42.

[3] 杨淑华, 巩志忠, 郭岩, 等. 中国植物应答环境变化研究的过去与未来[J]. 中国科学(生命科学), 2019, 49(11): 1457-1478.
YANG S H, GONG Z Z, GUO Y, et al. Studies on plant responses to environmental change in China: the past and the future[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2019, 49(11): 1457-1478.

[4] HU H H, XIONG L Z. Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops [J]. Annual Review of Plant Biology, 2014, 65: 715-741.

[5] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12.
LIU Y, WANG L, NI G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 6-12.

[6] 张顺谦, 邓彪, 杨云洁. 四川旱地作物水分盈亏变化及其与气候变化的关系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 105-111.
ZHANG S Q, DENG B, YANG Y J. Change of water budget for dryland crops and its response to climate change in Sichuan province [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 105-111.

[7] BRUCE W B, EDMENADES G O, BARKER T C. Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance [J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(366): 13-25.

[8] 梁晓玲, 王业建, 杨杰, 等. 玉米耐旱遗传育种研究及分子育种策略[J]. 玉米科学, 2018, 26(3): 1-5.
LIANG X L, WANG Y J, YANG J, et al. Genetics and breeding for drought tolerance in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(3): 1-5.

[9] DUVICK D N. The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.)[J]. Advances in Agronomy, 2005, 86: 83-145.

[10] TOLLENAAR M. Seeking the upper limit of corn production [J]. Batter Crops, 1986, 20: 6-8.

[11] 王泽立, 李新征, 郭庆法, 等. 玉米抗旱性遗传与育种[J]. 玉米科学, 1998,(3): 10-14.

WANG Z L, LI X Z, GUO Q F, et al. Inheritance of drought resistance in maize and breeding [J]. Journal of Maize Sciences, 1998, (3): 10-14.

[12] 徐蕊, 王启柏, 张春庆, 等. 玉米自交系抗旱性评价指标体系的建立[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 72-84.
XU R, WANG Q B, ZHANG C Q, et al. Drought-resistance evaluation system of maize inbred [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 72-84.

[13] GRZESIAK M T, MARCINSKA I, JANOWIAK F, et al. The relationship between seedling growth and grain yield under drought conditions in maize and triticale genotypes [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2012, 34(5): 1757-1764.

[14] 刘亚楠. 玉米回交导入系耐旱性评价及其指标的鉴定 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
LIU Y N. Drought tolerance evaluation and index identification of maize backcross introgression lines [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.

[15] 何文铸, 蒋馨, 刘永红, 等. 青贮玉米耐旱关键指标的筛选及其遗传研究[J]. 西南农业学报, 2007, 20(5): 921-925.
HE W Z, JIANG X, LIU Y H, et al. Screening and genetic research for drought tolerance key index in silage maize [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2007, 20(5): 921-925.

[16] 宋江峰, 李大婧, 刘春泉, 等. 甜糯玉米软罐头主要挥发性物质主成分分析和聚类分析 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2122-2131.
SONG J F, LI D J, LIU C Q, et al. Principal components analysis and cluster analysis of flavor compositions in waxy corn soft can [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(10): 2122-2131.

[17] LIU S X, WANG X L, WANG H W, et al. Genome-wide analysis of *ZmDREB* genes and their association with natural variation in drought tolerance at seedling stage of *Zea mays* L [J]. PLoS Genetics, 2013, 9(9): e1003790.

[18] XIANG Y L, SUN X P, GAO S, et al. Deletion of an endoplasmic reticulum stress response element in a *ZmPP2C-A* gene facilitates drought tolerance of maize seedlings [J]. Molecular Plant, 2017, 10(3): 456-469.

[19] MAO H D, WANG H W, LIU S X, et al. A transposable element in a NAC gene is associated with drought tolerance in maize seedlings [J]. Nature Communications, 2015, 6: 8326.

[20] WANG X L, WANG H W, LIU S X, et al. Genetic variation in *ZmVPP1* contributes to drought tolerance in maize seedlings [J]. Nature Genetics, 2016, 48(10): 1233-1241.

[21] 黎裕. 作物抗旱鉴定方法与指标 [J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(1): 91-99.
LI Y. The identification method and index for crop drought resistance [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1993, 11(1): 91-99.

[22] 王黄英, 郭还威, 罗坤, 等. 几个玉米品种抗旱性的直接鉴定 [J]. 玉米科学, 2000, 8(1): 40-41.
WANG H Y, GUO H W, LUO K, et al. Drought resistance identification of several maize hybrid varieties [J]. Journal of Maize Sciences, 2000, 8(1): 40-41.

[23] 于永涛, 刘成, 吕玲, 等. 玉米品种耐旱性评价及相关鉴定指标的研究 [J]. 作物杂志, 2008,(4): 55-58.

YU Y T, LIU C, LYU L, et al. Studies on evaluation index of drought tolerance in maize[J]. *Crops*, 2008, (4): 55-58.

[24] 浦军, 张仁和, 张兴华, 等. 不同基因型玉米品种抗旱性田间鉴定研究[J]. *西北农业学报*, 2012, 21(5): 84-91.

PU J, ZHANG R H, ZHANG X H, et al. Evaluation of drought resistance in different genotypic maize hybrids in the field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 21(5): 84-91.

[25] CAIRNS J E, SANCHEZ C, VARGAS M, et al. Dissecting maize productivity: ideotypes associated with grain yield under drought stress and well-watered conditions[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2012, 54(12): 1007-1020.

[26] 师亚琴, 李艺博, 李亚楠, 等. 陕 A 群、陕 B 群选育的玉米自交系抗旱性鉴定[J]. *玉米科学*, 2017, 25(4): 17-25.

SHI Y Q, LI Y B, LI Y N, et al. Drought resistance identification of maize inbred lines selected from Shaan A group and Shaan B group[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(4): 17-25.

[27] 张赛楠, 苏治军, 高聚林, 等. 玉米自交系抗旱性评价及指标筛选[J]. *北方农业学报*, 2019, 47(3): 18-25.

ZHANG S N, SU Z J, GAO J L, et al. Drought resistance evaluation and index screening of maize inbred lines[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, 47(3): 18-25.

[28] 梁恒赫, 王雪, 赵鑫, 等. 吉林省西部半干旱区主栽玉米品种抗旱性比较[J]. *分子植物育种*, 2018, 16(13): 4466-4472.

LIANG X H, WANG X, ZHAO X, et al. Drought resistance comparison of main maize varieties in west semiarid areas of Jilin province[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(13): 4466-4472.

[29] 张沁斌. 玉米耐旱突变体昌 7-2₁ 的创制及耐旱机制的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.

ZHANG Q B. The creation of maize drought-tolerant mutant Chang7-2₁, and study on its drought-tolerant mechanism[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020.

[30] 张文英, 栗雨勤, 杨国航, 等. 夏玉米苗期抗旱性鉴定指标的研究[J]. *玉米科学*, 2006, 14(5): 87-90.

ZHANG W Y, LI Y Q, YANG G H, et al. Study on the drought resistance estimation indices with summer corn inbred lines[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2006, 14(5): 87-90.

[31] 朴明鑫, 李成, 金峰学, 等. 玉米耐旱鉴定研究进展[J]. *玉米科学*, 2013, 21(4): 89-93.

PIAO M X, LI C, JIN F X, et al. Research development about identification of maize drought tolerance[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(4): 89-93.

(上接第 24 页)

参 考 文 献:

[1] 信乃谄, 王立祥. 中国北方旱区农业[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1998.

XIN N Q, WANG L X. Agriculture in arid regions of northern China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1998.

[2] 杨凌农业高新技术产业示范区管委会, 科技部中国农村技术开发中心, 西北农林科技大学. 2012 中国旱区农业技术发展报告[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

Yangling Agricultural High Technology Industry Demonstration Zone Management Committee, China Rural Technology Development Center, Ministry of Science and Technology, Northwest A&F University. 2012 China dryland area agricultural technology development report[M]. Beijing: Science Press, 2013.

[3] 上官周平, 王飞, 咎林森, 等. 生态农业在黄土高原生态保护和农业高质量协同发展中的作用及其发展途径[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(4): 335-339.

SHANGGUAN Z P, WANG F, ZAN L S, et al. Significances and developing ways of ecological agriculture in coordinated development of ecological conservation and high-quality agriculture on Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(4): 335-339.

[4] 山仑, 吴普特, 上官周平. 西北地区食物安全可持续发展战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2021.

SHAN L, WU P T, SHANGGUAN Z P. Study on the strategy of sustainable development of food security in Northwest China[M]. Beijing: Science Press, 2021.

[5] DENG L, SHANGGUAN Z P. High quality developmental approach for soil and water conservation and ecological protection on the Loess Plateau[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2021, 8(4): 501-511.

[6] 谭东明. 西北农林科技创新联盟“生态西北绿色农业”学术交流会举办[EB/OL]. (2021-07-29). <https://news.nwafu.edu.cn/xnxw/44e8f64a54aa4d93acc0afabe16a4770.htm>.

TAN D M. Holding an academic exchange for “Ecological Northwest and Green Agriculture” by Northwest Agriculture and Forestry Technology Innovation Alliance[EB/OL]. (2021-07-29). <https://news.nwafu.edu.cn/xnxw/44e8f64a54aa4d93acc0afabe16a4770.htm>.

[7] 刘筱筱. 陕西省杨凌示范区: 二十五年蝶变 构建农业新高地[EB/OL]. (2022-08-05). https://difang.gmw.cn/sn/2022-08/05/content_35935932.htm.

LIU X X. Yangling Demonstration zone in Shaanxi Province: building a new highland in agriculture by twenty-five years of transformation[EB/OL]. (2022-08-05). https://difang.gmw.cn/sn/2022-08/05/content_35935932.htm.

[8] 上官周平, 李建平, 李玉山. 耕地变化与粮食安全对策: 以陕西省为例[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

SHANGGUAN Z P, LI J P, LI Y S. The countermeasures of land change and grain security: a case of Shaanxi Province[M]. Beijing: Science Press, 2011.