文章编号:1000-7601(2020)01-0280-10 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.36

甜高粱成熟期抗旱性指标筛选与评价方法

袁 闯[1],许 兴[1,2],毛桂莲[4],朱 林[2,3]

(1.宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,宁夏 银川 750021;
3.宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地,宁夏 银川 750021;
4.宁夏大学生命科学学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:设置正常灌水处理(T1)、重度干旱处理(T2)2 种处理,测定株高、穗重、单株粒重、千粒重和产量(单位面积产量)等性状,运用相关性分析、主成分分析、抗旱系数(*DRC*)、综合抗旱系数(*CDRC*)、加权抗旱系数(*WDC*)、隶属函数值(*D*)和聚类分析等方法,对成熟期不同甜高粱品系的抗旱性进行鉴定及指标筛选。结果表明:干旱胁迫对各性状均有显著影响($P<0.05$);抗旱系数频次分析表明,各性状抗旱性敏感程度由大到小顺序为穗粒数>分枝数>株高>茎粗>千粒重>穗茎粗>穗重>穗长>单株粒重>产量;相关性分析表明:株高与穗重呈显著负相关($P<0.05$),产量与穗粒数、穗重、单株粒重、千粒重呈极显著正相关($P<0.01$),穗粒数与穗重、单株粒重呈极显著正相关($P<0.01$),单株粒重与千粒重呈极显著正相关($P<0.01$);通过主成分分析,将 10 个性状转化成 5 项新的互相独立综合指标,可代替 88.087%原始所有性状抗旱信息;灰色关联度分析表明,各性状 *DRC* 与 *D* 的密切程度大小顺序为单株粒重>千粒重>穗粒数>产量>穗茎粗>分枝数>穗重>穗长>株高>茎粗。对 *D* 值进行聚类分析,将 22 个不同品系甜高粱分为 5 个抗旱级别,其中Ⅰ级 3 份、Ⅱ级 7 份、Ⅲ级 6 份、Ⅳ级 4 份、Ⅴ级 2 份。对聚类分析结果的抗旱系数进行抗旱性等级统计分析表明,除株高、茎粗和穗长以外,千粒重、单株粒重、穗重、穗粒数、*D* 值、分枝数、穗茎粗、*CDRC* 值和 *WDC* 值随着抗旱级别的升高而增加。逐步线性回归方程表明,千粒重、单株粒重、穗粒数、穗茎粗与 *D* 值密切相关。综上所述,干旱胁迫对甜高粱成熟期各性状均会产生显著影响,千粒重、单株粒重、穗粒数和穗茎粗可作为甜高粱成熟期直观、准确和简单的抗旱鉴定评价指标,筛选出成熟期抗旱性强的甜高粱品系为 F417、F438、F6137。

关键字:甜高粱;成熟期;抗旱性;鉴定指标

中图分类号:S514 **文献标志码**:A

Screening and evaluation methods of drought resistance index of sweet sorghum at maturity

YUAN Chuang[1], Xu Xing[1,2], MAO Guilian[4], ZHU Lin[2,3]

(1. *College of Agronomy*, *Ningxia University*, *Yinchuan*, *Ningxia* 750021, *China*;
2. *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest*, *Ministry of Education China of Ministry of Education*, *Ningxia University*, *Yinchuan*, *Ningxia* 750021, *China*;
3. *State Key Laboratory Breeding Base of Land Degradation and Ecological Restoration of Northwest China*, *Ningxia University*, *Yinchuan*, *Ningxia* 750021, *China*;
4. *College of Life Sciences*, *Ningxia University*, *Ningxia*, *Yinchuan* 750021, *China*)

Abstract: In order to screen out the drought-tolerant sweet sorghum cultivars (lines) and identification indicators, an experiment was conducted using 22 sweet sorghum cultivars (lines), normal irrigation (T1), severe drought (T2), plant height, spike weight, spike weight per plant, 1000-grain weight, and yield (yield per unit area) were measured. By using correlation analysis, principal component analysis, drought resistance coefficient(*DRC*),

收稿日期:2019-01-14 **修回日期**:2019-04-29

项目基金:宁夏回族自治区牧草育种专项(2014NYYZ040101);国家自然科学基金(31860135); 宁夏高等学校一流学科建设(生态学)资助项目(NXYLXK2017B06);宁夏回族自治区教育厅 2018 年高等学校科学研究项目(NGY2018024)

作者简介:袁闯(1992-),男,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向为高粱生态生理。E-mail: yuanchuangscience@126.com

通信作者:许兴(1959-),男,宁夏银川人,教授,博士生导师,主要从事作物栽培和作物生态生理研究。E-mail: xuxingscience@126.com
朱林(1970-),男,宁夏银川人,副研究员,博士,主要从事作物水分生理及栽培研究。E-mail:zhulinscience@126.com

comprehensive drought resistance coefficient (*CDRC* value), weighted drought resistance coefficient (*WDC* value), membership function value (*D* value), cluster analysis, and other analytical methods, we did identification and index screening of drought resistance of different sweet sorghum varieties at maturity. The results showed that drought effected indicators remarkably ($P>0.05$). The frequency analysis of drought resistance coefficient showed that the drought resistance of each index was in the order of the grain number per spike>number of branches>plant height>culm diameter>1000-grain weight>spike culm diameter>spike weight>spike length>spike weight>yield. Correlation analysis showed that plant height was significantly negatively correlated with ear weight ($P<0.05$); yield was extremely significantly positively correlated with ear grain number, ear weight, kernel weight per plant, and thousand kernel weight ($P<0.01$); Ear weight and grain weight per plant were extremely significantly positively correlated ($P<0.01$); ear weight was extremely significantly positively correlated with grain number per ear ($P<0.01$); grain weight per plant was extremely significantly positively correlated with thousand-grain weight ($P<0.01$). By using principal component analysis, those indicators were transformed into 5 new independent comprehensive indicators, which could replace 88.087% information of all the original indicators. The grey correlation analysis showed that the correlation level of indicators' *DRC* and *D* values ranked as spike weight per plant>1000-grain weight>grain number per spike>yield>spike culm diameter>branch of number>spike weight>spike length>plant height>culm diameter. According to *D* value clustering analysis, tested sorghum materials were divided into 5 drought resistance grades, 3 belonged to grade I, 7 belonged to grade II, 6 belonged to grade III, 4 belonged to grade IV, and 2 belonged to grade V. The result of cluster analysis showed that except for the plant height, culm diameter, spike length, the 1000-grain weight, spike weight per plant, spike weight, grain number per spike, *D* value, number of branches, spike culm diameter, *CDRC* value, and *WDC* value went up following the index of drought tolerance. Stepwise linear regression indicated that the 1000-grain weight, spike weight per plant, grain number per spike, spike culm diameter and *D* value were strongly linked. Drought stress had significant effects on various indicators of sweet sorghum maturity. The 1000-grain weight, spike weight per plant, grain number per spike, and spike culm diameter were regarded as visual, precise, and simple evaluation indexes of drought-tolerance. F417, F438 and F6137 were the most resistant sweet sorghum cultivar (lines).

Keywords: sweet sorghum; mature period; drought resistance; drought resistance index

干旱是影响粮食产量的重要环境因素之一,是限制我国农业发展的主要因素[1]。当前,我国大约有 48%的耕地处于干旱半干旱带,其中 51.9%无灌溉条件[2]。随着全球气候变暖,对于西部水资源短缺的地区,干旱出现的频次越来越多。干旱导致作物减产,严重时可使其减产超过 50%[3-4]。甜高粱(*Sorghum bicolor* (L.) Moench)是世界五大谷物之一,具有耐旱、耐盐、耐碱、耐涝、耐贫瘠等抗逆的优良特性[5]。甜高粱是一种粮饲兼用的作物,具有巨大的经济和生态价值[6]。

作物的抗旱性是一个复杂的生理生化反应,不能由单个指标反映其抗旱型[7]。目前,评价作物抗旱性的方法有加权抗旱系数、灰色关联度分析及隶属函数等[8-10]。吴奇等[11]将 54 份高粱按照抗旱性强弱分为 4 类,筛选出一个抗旱性极强的品种,萌发的抗旱指数、发芽率和根长等性状可作为高粱品种萌发期抗旱性鉴定的主要指标。王艺陶等[12]筛选出 305 等 4 份抗旱性很强的材料,认为相对芽长、相对根长和相对萌发抗旱系数可以作为高粱抗旱性重要指标。陈冰嬬等[13]将 41 份高粱按照抗旱性强弱分为 5 类,L116 等两份材料为高度抗旱种质,Ms18 等 18 份为较抗旱性种质,Ms19B 等 9 份抗旱性种质,L5172 等 8 份为较敏感型种质,2055B 等 4 份为高度敏感性种质,且将萌发抗旱指数、根长、剩余干物质作为高粱抗旱性鉴定指标。

干旱是影响甜高粱产量和品质重要的原因之一。因此,筛选和培育抗旱的甜高粱品种非常重要。但目前,关于甜高粱成熟期抗旱性鉴定和指标筛选方面研究还鲜见报道。因此,本试验设置两个水分处理,采用多种分析方法,对 22 个甜高粱品系成熟期株高、茎粗、穗长、穗茎粗、分枝数、穗粒数、穗重、单株粒重、千粒重和产量等指标抗旱性进行综合评价和鉴定,以期为甜高粱抗旱品种的选育及准确评价抗旱性提供科学理论依据[14]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取 22 个甜高粱品系为试验材料,材料来源于中科院遗传发育研究所。这些试验材料为新育成未审定的品系,需要抗旱性鉴定,具体如表 1。

1.2 试验地概况

试验于 2018 年 4 月,在宁夏同心县王团旱作节水高效农业科技园进行。该试验田位于宁夏中部干旱带(东经 106°52′53″,北纬 37°38′41″),属于典型的温带大陆性气候,年降水量 259 mm 左右,而蒸发量却高达 2 326 mm 以上,干旱缺水是该地明显的自然特征,无霜期为 118~226 d,年平均气温 9.1℃,≥12℃的积温大约为 2 900℃,热量充足,昼夜温差大。试验地土壤为砂壤土,蓄水能力差。试验地 0~40 cm 土层土壤理化性质如表 2 所示。

表 1 供试材料

Table 1 Test materials

编号 Code	品系 Lines	亲本 Parents	编号 Code	品系 Lines	亲本 Parents
1	F417	ZK0181×ZK018A	12	F6141	ZK0181×ZK048A
2	F438	ZK0180×ZK017A	13	F6372	ZK0181×ZK050A
3	F968	ZK0410×ZK009A	14	F6319	ZK0181×ZK053A
4	TX41	ZK0410 诱变育种 Mutation breeding	15	F6149	ZK0181×ZK060A
5	SN005	ZK0180 诱变育种 Mutation breeding	16	F6018	ZK0181×ZK067A
6	F6229	ZK0181×ZK018A	17	F6017	ZK0181×ZK068A
7	F6271	ZK0181×ZK029A	18	F6027	ZK0181×ZK073A
8	F6383	ZK0181×ZK030A	19	F6306	ZK0181×ZK079A
9	F6099	ZK0181×ZK031A	20	F6137	ZK0181×ZK081A
10	F6106	ZK0181×ZK042A	21	A60	ZK0181×ZK084A
11	F6036	ZK0181×ZK044A	22	YT003	ZK0181×ZK087A

表 2 不同水分处理的土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties under different water treatments

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen /(g·kg^{-1})	全磷 Total phosphorus /(g·kg^{-1})	全钾 Total potassium /(g·kg^{-1})	碱解氮 Alkli-hydrolyzale nitrogen /(mg·kg^{-1})	速效磷 Available phosphorus /(mg·kg^{-1})	速效钾 Available potassium /(mg·kg^{-1})	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	pH
T1	0.566	0.493	17.986	31.537	103.417	113.598	6.361	8.957
T2	0.493	0.453	16.432	28.783	125.768	108.373	8.718	8.878

1.3 试验设计

试验采取单因素随机区组设计,设置两种水分处理:正常灌水处理(T1)和重度干旱处理(T2)。每个小区面积为 22 m^2(5 m×4.4 m),种植 8 行,宽窄行种植(宽行 70 cm,窄行 40 cm),平均行距为 55 cm,株距为 20 cm,小区间隔留 1 m 空行,采用 4~5 粒穴播,播种深度约为 3 cm;每个品系设置 3 个重复小区,用 0.6 m 宽的塑料薄膜进行水分阻断处理。播种前进行备种、整种,施复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=20∶15∶15)270 kg·hm^{-2},整地耙平,播种时精选籽粒饱满、大小基本一致的种子。干旱胁迫处理只在播种后灌一次水(灌水量为 50 mm),以保证正常出苗,之后不再灌水。对照灌水处理按当地田间生产管理,分别在播种后、拔节期、孕穗期和灌浆期进行灌水,灌水量分别为 50、100、81 mm 和 80 mm。整个生育期内降水量为 224.2 mm,定期进行人工除草,拔节期追施复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=20∶15∶15)300 kg·hm^{-2},利用药剂防治病虫害等管理。

1.4 测定指标及方法

于甜高粱成熟期(9 月 28 日)进行指标测量,每个小区挑选 4 株长势基本一致的植株,参考《高粱种质资源描述规范和数据标准》[15]测量株高(PH)、茎粗(CD)、穗长(SL)、穗重(SW)、穗茎粗(SCD)、分枝数(NB)、穗粒数(GNS)、单株粒重(SWP)、千粒重(TGW)等指标,并计算单位面积产量(Y)。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 整理数据,用 SPSS 17.0 进行相关性分析、主成分分析、聚类分析、差异显著性分析及逐步回归分析。主要的公式如下:

(1)各个指标抗旱系数(*DRC*)

$$DRC = \text{重度干旱处理测量值}/\text{正常灌水处理测量值} \quad (1)$$

(2)综合抗旱系数(*CDRC*)

$$CDRC = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} DRC \quad (2)$$

(3)隶属函数值

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min})/(X_{\max} - X_{\min}) \quad (3)$$

式中,X_j 表示第 j 个因子的得分值,$X_{\min}$ 为第 j 个因子得分值最小值,$X_{\max}$ 表示第 j 个因子得分最大值。

(4)权重

$$W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^{n} P_j} \quad (4)$$

式中,W_j 表示第 j 个因子在所有公因子中的重要程度,P_j 为各品种第 j 个因子贡献率。

(5) 综合评价

$$D = \sum_{j=1}^{n} [U(X_j) \times W_j] \quad (j = 1,2,\cdots,k) \quad (5)$$

式中,D 值为不同甜高粱成熟期品系抗旱能力综合评价值,k 为甜高粱品系个数。

(6)以各指标 *DRC* 作为比较序列,D 值为参考序列进行灰色关联度分析,得到两者之间关联度(Y_D),并用公式(6)计算各项指标权重系数,公式(7)计算加权抗旱系数(*WDC*)

$$\omega_i(Y) = \frac{Y_i}{\sum_{j=1}^{n} Y_i} \quad (6)$$

$$WDC = \sum_{j=1}^{n} [\omega_i(Y) \times DRC] \quad (7)$$

此外,将各项指标 *DRC* 值作为比较序列,*WDC* 值作为参考序列进行灰色关联度分析,得各指标 *DRC* 值与 *WDC* 值间的关联度(Y_{WDC})。

2　结果与分析

2.1　干旱胁迫下甜高粱品系成熟期农艺性状分析

由表 3 可知,与正常灌水处理相比,干旱胁迫处理条件下的各项指标有所下降,且达到极显著水平($P<0.01$)。不同处理下,各项指标之间的变异系数在 0.079~0.358 的范围内,表明本试验所测的指标对干旱胁迫反应敏感,处理效果明显,且具有代表性。此外,不同处理条件下同一指标间的相关系数介于 0.029~0.828 之间,表明各项指标对干旱胁迫的反应敏感性存在较大差异。

2.2　甜高粱品系农艺性状抗旱系数分析

利用公式(1)计算各个指标抗旱系数(表 4),与正常灌水处理相比,干旱处理下的各项指标均有所下降,且变异系数在 0.080~0.182 范围之间,同一指标不同供试材料抗旱系数变化明显。由表 5 可知,*DRC*≥0.7 株高、茎粗、穗长、穗茎粗、分枝数、穗粒数、穗重、单株粒重、千粒重和产量的分布频率分别为 95.45%、95.45%、50%、81.82%、95.45%、95.45%、54.55%、40.91%、86.36%、40.91%,各项指标抗旱性敏感程度由大到小顺序为穗粒数>分枝数>株高>茎粗>千粒重>穗茎粗>穗重>穗长>单株粒重>产量。

2.3　干旱胁迫下甜高粱品系各项指标间的相关性分析

由表 6 可知,株高与穗重呈显著负相关($P<0.05$);产量与穗粒数、穗重、单株粒重、千粒重呈极显著正相关($P<0.01$);穗粒数与穗重、单株粒重呈极显著正相关($P<0.01$);单株粒重与千粒重达到极显著正相关($P<0.01$)。

2.4　干旱胁迫下甜高粱品系各项指标的主成分分析

由表 7 可知,CI_1~CI_5因子的特征值贡献分别为 36.159 、16.219 、13.924、12.261 、9.524,累计贡献率为 88.087%,故其他因子的贡献率可以忽略。因此,将 10 项指标转化出 5 项新的互相独立综合指标,并可以代替原始所有指标的绝大部分抗旱信息。CI_1 在单株粒重和产量上表现出较高载荷量;CI_2 在千粒重和穗茎粗上表现出较高载荷量;CI_3 在分枝数上表现出较高载荷量;CI_4 在穗粒数和茎粗上均表现出较高载荷量;CI_5 在穗长上表现出较高载荷量。综上分析可得,千粒重、单株粒重、分枝数、穗粒数和穗长可作为甜高粱成熟期抗旱性的鉴定指标。

2.5　干旱胁迫下不同甜高粱品系抗旱性的综合评价

由表 8 可知,*D* 值在 0.189~0.738 之间,变异系数为 0.299,平均值为 0.484;利用 *D* 值对 22 个不同品系甜高粱抗旱性进行大小排序,可知 F417、F6137 和 F438 的 *D* 值最大,表明其抗旱性最强;F6229 和 TX41 的 *D* 值最小,表明其抗旱性最弱。*WDC* 值在 0.676~0.853 之间,变异系数为 0.057,平均值为 0.776;以 *WDC* 值大小对甜高粱抗旱性进行排序,结果表明,高度抗旱型为 F6137、F6099 和 F417,高度敏感型为 TX41 和 F6229。*CDRC* 值在 0.676~0.849 之间,变异系数为 0.059,平均数为 0.771;以 *CDRC* 值大小对甜高粱抗旱性进行排序,结果表明,高度抗旱型为 F6137、F6099 和 F417,高度敏感型为 TX41 和 F6229。综上,利用 *D* 值、*WDC* 值和 *CDRC* 值对甜高粱抗旱性评价结果基本一致。

2.6　干旱胁迫下甜高粱品系各项指标的灰色关联度分析

由表 9 可看出,*DRC* 值的关联度大到小的顺序为:穗粒数>千粒重>分枝数>株高>单株粒重>产量

表3 正常灌水(T1)和干旱胁迫(T2)条件下供试甜高粱品系农艺性状差异性分析

Table 3 Difference analysis of agronomic traits of sweet sorghum under normal irrigation (T1) and drought stress (T2)

品系 Lines	株高/cm Plant height		茎粗/mm Stem diameter		穗长/cm Spike lenght		穗茎粗/mm Spike stem diameter		分枝数 Branches number		穗粒数 Grain number per spike		穗重/g Spike weight		单株粒重/g Spike weight per plant		千粒重/g 1000-grain weight		产量/(kg·m^{-2}) Yield	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
F417	338.99	261.67	23.70	18.20	31.30	24.78	6.73	6.23	64.50	60.32	3631.61	3300.95	68.25	53.24	62.50	48.59	17.21	14.72	0.50	0.39
F438	353.67	230.67	20.25	18.86	34.60	19.76	9.48	8.21	61.47	56.46	3159.46	2911.20	70.21	63.47	65.78	50.16	20.82	17.23	0.53	0.40
F968	300.33	255.67	20.31	18.58	22.13	14.20	5.83	2.22	48.57	45.32	3438.48	3134.22	68.15	54.38	69.87	35.26	20.32	11.25	0.56	0.28
TX41	286.33	270.33	21.26	16.55	25.16	12.30	3.22	1.92	59.58	47.71	4459.36	4087.89	67.58	45.29	72.42	41.86	16.24	10.24	0.58	0.33
SN005	292.00	234.67	23.16	21.08	24.90	15.65	4.24	6.31	80.46	59.04	3998.76	3440.56	69.27	57.49	64.54	44.28	16.14	12.87	0.52	0.35
F6229	312.33	245.67	17.76	16.64	34.62	23.20	5.85	2.63	63.89	52.19	4099.14	2743.97	71.56	41.46	66.57	35.26	16.24	12.85	0.53	0.28
F6271	351.00	289.33	18.54	13.78	37.31	29.80	7.51	6.64	60.90	58.36	3612.47	3144.35	72.54	55.34	69.54	42.26	19.25	13.44	0.56	0.34
F6383	327.33	275.67	18.75	15.55	40.63	27.20	5.51	4.21	69.25	54.38	3085.10	3140.20	68.53	62.58	68.52	57.34	22.21	18.26	0.55	0.46
F6099	359.67	355.67	24.58	20.65	34.68	33.50	6.47	4.74	68.32	59.21	4211.26	3900.91	77.49	59.34	72.56	55.51	17.23	14.23	0.58	0.44
F6106	358.33	334.33	24.30	22.85	35.91	28.40	7.39	6.73	70.26	68.56	4784.74	4048.74	91.25	54.28	84.02	49.84	17.56	12.31	0.67	0.40
F6036	329.67	277.33	23.04	19.74	26.23	23.20	5.13	4.02	58.35	51.23	3717.52	3175.57	79.49	55.89	75.54	47.57	20.32	14.98	0.60	0.38
F6141	290.67	240.33	23.75	16.86	31.59	26.27	6.08	5.13	60.25	51.24	2962.85	2592.30	70.14	55.81	66.19	49.15	22.34	18.96	0.53	0.39
F6372	280.33	221.67	18.14	13.58	31.30	23.89	5.94	2.78	45.39	40.28	2567.43	2566.89	64.58	51.27	60.54	45.28	23.58	17.64	0.48	0.36
F6319	319.33	296.33	21.07	18.95	37.30	24.62	5.80	5.11	72.81	58.64	2891.53	2159.79	68.57	45.18	64.51	40.28	22.31	18.65	0.52	0.32
F6149	328.00	322.67	24.90	18.40	40.23	22.41	7.35	6.21	62.29	56.24	3335.98	2743.86	76.49	44.25	71.49	50.24	21.43	18.31	0.57	0.40
F6018	363.00	324.67	21.02	17.77	16.64	26.28	5.89	5.13	51.38	46.31	3079.59	2562.27	73.48	38.56	68.49	49.58	22.24	19.35	0.55	0.40
F6017	343.00	329.33	22.44	17.13	22.45	12.86	3.79	2.78	47.18	40.28	3440.79	2782.64	81.28	51.29	75.25	45.19	21.87	16.24	0.60	0.36
F6027	282.33	238.00	20.01	18.00	33.64	20.21	7.09	5.14	55.08	47.39	3763.14	2856.85	81.54	52.38	76.58	42.31	20.35	14.81	0.61	0.34
F6306	301.67	243.33	19.93	18.34	26.23	20.31	5.43	4.28	68.24	56.98	3345.22	2755.81	73.52	45.71	67.54	40.29	20.19	14.62	0.54	0.32
F6137	317.67	257.33	24.45	20.84	25.34	21.38	7.69	5.71	69.54	58.68	4160.18	3635.38	67.34	59.48	64.15	53.84	15.42	14.81	0.51	0.43
A60	235.71	208.33	21.22	14.82	26.38	21.78	5.65	3.38	61.84	43.26	4067.32	3412.85	68.41	51.27	66.46	46.21	16.34	13.54	0.53	0.37
YT002	248.94	211.67	23.36	17.26	24.36	22.36	3.95	2.81	65.27	56.48	3982.70	2958.67	67.28	43.57	62.17	36.51	15.61	12.34	0.50	0.29
平均数 Average	314.56	269.30	21.63	17.93	30.13	22.47	6.00	4.65	62.04	53.12	3627.03	3093.45	72.59	51.89	68.87	45.76	19.33	15.08	0.55	0.37
变异系数 *CV*	0.110	0.154	0.102	0.127	0.210	0.233	0.237	0.358	0.137	0.133	0.150	0.160	0.086	0.129	0.079	0.131	0.135	0.172	0.079	0.131
标准误 *SE*	9.566		0.626		1.502		0.364		1.944		126.008		2.632		2.783		0.724		14.840	
t	3.844		5.372		4.268		2.828		3.691		3.326		10.368		13.046		5.300		13.047	
P	0.0004**		0.0001**		0.0001**		0.0071**		0.0006**		0.0018**		0.0001**		0.0001**		0.0001**		0.0001**	
相关系数 *R*	0.776		0.664		0.525		0.743		0.811		0.828		0.029		0.148		0.776		0.148	

注：**表示极显著水平 $P<0.01$；*t* 表示两样本之间的差异性。下同

Note: ** indicates a very significant level $P < 0.01$; *t* indicates the difference between the two samples. The same below.

表 4　甜高粱品系成熟期各农艺性状的抗旱系数

Table 4　Drought resistance coefficient of agronomic traits in tested sweet sorghum materials

品系 Lines	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	穗长 Spike length	穗茎粗 Spike stem diameter	分枝数 Branches number	穗粒数 Grain number per spike	穗重 Spike weight	单株粒重 Spike weight per plant	千粒重 1000-grain weight	产量 Yield
F417	0.77	0.77	0.79	0.93	0.94	0.91	0.78	0.78	0.86	0.78
F438	0.65	0.93	0.57	0.87	0.92	0.92	0.90	0.76	0.83	0.76
F968	0.85	0.92	0.64	0.72	0.93	0.91	0.80	0.50	0.55	0.50
TX41	0.94	0.78	0.49	0.60	0.80	0.92	0.67	0.58	0.63	0.58
SN005	0.80	0.91	0.63	0.82	0.73	0.86	0.83	0.69	0.80	0.69
F6229	0.79	0.94	0.67	0.45	0.82	0.67	0.58	0.53	0.79	0.53
F6271	0.82	0.74	0.80	0.88	0.96	0.87	0.76	0.61	0.70	0.61
F6383	0.84	0.83	0.67	0.76	0.79	0.90	0.91	0.84	0.82	0.84
F6099	0.99	0.84	0.97	0.73	0.87	0.93	0.77	0.77	0.83	0.77
F6106	0.93	0.94	0.79	0.91	0.98	0.85	0.59	0.59	0.70	0.59
F6036	0.84	0.86	0.88	0.78	0.88	0.86	0.70	0.63	0.74	0.63
F6141	0.83	0.71	0.83	0.84	0.85	0.88	0.80	0.74	0.85	0.74
F6372	0.79	0.75	0.76	0.47	0.89	0.93	0.79	0.75	0.75	0.75
F6319	0.93	0.90	0.66	0.88	0.81	0.75	0.66	0.62	0.84	0.62
F6149	0.98	0.74	0.56	0.84	0.90	0.82	0.58	0.70	0.85	0.70
F6018	0.89	0.85	0.61	0.87	0.90	0.83	0.52	0.72	0.87	0.72
F6017	0.96	0.76	0.57	0.73	0.85	0.81	0.63	0.60	0.74	0.60
F6027	0.84	0.90	0.60	0.72	0.86	0.76	0.64	0.55	0.73	0.55
F6306	0.81	0.92	0.77	0.79	0.83	0.82	0.62	0.60	0.72	0.60
F6137	0.81	0.85	0.84	0.74	0.84	0.87	0.88	0.84	0.96	0.84
A60	0.88	0.70	0.83	0.60	0.70	0.84	0.75	0.70	0.83	0.70
YT002	0.85	0.74	0.92	0.71	0.87	0.74	0.65	0.59	0.79	0.59
平均数 Average	0.855	0.830	0.721	0.758	0.859	0.848	0.719	0.667	0.781	0.667
变异系数 *CV*	0.093	0.098	0.182	0.174	0.080	0.080	0.156	0.147	0.114	0.147

表 5　参试甜高粱品系各农艺性状抗旱系数分布

Table 5　Distributions of drought resistance coefficients of agronomic traits in tested sweet sorghum materials

性状 Trait	$0.4 \leqslant DRC < 0.5$		$0.5 \leqslant DRC < 0.6$		$0.6 \leqslant DRC < 0.7$		$0.7 \leqslant DRC < 0.8$		$0.8 \leqslant DRC < 0.9$		$0.9 \leqslant DRC < 1$	
	次数 Times	频数/% Frequency	次数 Times	频数/% Frequency	次数 Times	频数/% Frequency	次数 Times	频数/% Frequency	次数 Times	频数/% Frequency	次数 Times	频数/% Frequency
株高 Plant height	0	0	0	0	1	4.55	3	13.64	12	54.55	6	27.27
茎粗 Stem diameter	0	0	0	0	1	4.55	8	36.36	7	31.82	6	27.27
穗长 Spike length	1	4.55	3	13.64	7	31.82	5	22.73	4	18.18	2	9.09
穗茎粗 Spike stem diameter	2	9.09	2	9.09	0	0	9	40.91	7	31.82	2	9.09
分枝数 Branches number	0	0	0	0	1	4.55	2	9.09	12	54.55	7	31.82
穗粒数 Grain number per spike	0	0	0	0	1	4.55	3	13.64	11	50.00	7	31.82
穗重 Spike weight	0	0	4	18.18	6	27.27	8	36.36	2	9.09	2	9.09
单株粒重 Spke weight per plant	0	0	7	31.82	6	27.27	7	31.82	2	9.09	0	0.00
千粒重 1000-grain weight	0	0	1	4.55	2	9.09	9	40.91	9	40.91	1	4.55
产量 Yield	0	0	7	31.82	6	27.27	7	31.82	2	9.09	0	0

表 6 供试甜高粱品系成熟期各性状抗旱系数的相关性分析

Table 6 Correlations of drought resistance coefficients of all indices in tested sweet sorghum materials

性状 Trait	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	穗长 Spike length	穗茎粗 Spike stem diameter	分枝数 Branches number	穗粒数 Grain number per spike	穗重 Spike weight	单株粒重 Spike weight per plant	千粒重 1000-grain weight	产量 Yield
株高 Plant height	1.00									
茎粗 Stem diameter	-0.24	1.00								
穗长 Spike length	-0.02	-0.23	1.00							
穗茎粗 Spike stem diameter	0.01	0.11	0.02	1.00						
分枝数 Branches number	-0.08	0.09	0.10	0.41	1.00					
穗粒数 Grain number per spike	-0.12	-0.20	0.08	0.18	0.21	1.00				
穗重 Spike weight	-0.51*	-0.07	0.19	0.04	-0.14	0.64**	1.00			
单株粒重 Spike weight per plant	-0.20	-0.29	0.24	0.21	-0.11	0.53**	0.59**	1.00		
千粒重 1000-grain weight	-0.12	-0.19	0.25	0.21	-0.22	-0.11	0.18	0.75**	1.00	
产量 Yield	-0.20	-0.29	0.24	0.21	-0.11	0.53**	0.59**	1.00**	0.75**	1.00

注：* 代表显著水平 $P<0.05$；** 代表极显著水平 $P<0.01$。

Note: * represents significant level at $P<0.05$; ** represents significant level at $P<0.01$.

>穗重>茎粗>穗茎粗>穗长。*CDRC* 值关联度大小顺序：穗粒数>千粒重>分枝数>株高>单株粒重>产量>穗重>茎粗>穗茎粗>穗长。*D* 值关联度大小顺序：单株粒重>千粒重>穗粒数>产量>穗茎粗>分枝数>穗重>穗长>株高>茎粗。*DRC* 值与 *CDRC* 值、*WDC* 值、*D* 值密切程度基本一致。

2.7 干旱胁迫下甜高粱品系的聚类分析与抗旱性等级划分

通过隶属函数计算得到 *D* 值，对 *D* 值进行聚类分析（图 1）。可将 22 个不同品系甜高粱分为 5 类，第Ⅰ类为高度抗旱型，包括 F417、F438 和 F6137，占总数 13.64%；第Ⅱ类为抗旱型，包括 F6141、F6099、F6383、F6018、F6271、F6106 和 F6036，占总数 31.82%；第Ⅲ类为中等抗旱型，包括 YT003、F6149、F7372、SN005、F6319 和 F6306，占总数 27.27%；第Ⅳ类为敏感型，包括 F6027、F6017、A60 和 F968，占总数 18.18%；第Ⅴ类为高度敏感型，包括 F6229 和 TX41，占总数 9.09%。

对聚类分析结果进行抗旱性等级统计分析（表 10）。结果表明：千粒重、单株粒重、穗重、穗粒数、*D* 值、分枝数、穗茎粗、*CDRC* 值和 *WDC* 值分别随着抗旱级别的升高而增加。在不同抗旱级别上，*WDC* 值、*CDRC* 值和 *D* 值的差异较大，可作为甜高粱抗旱级别划分的参考指标。

2.8 甜高粱抗旱指标筛选

以 *DRC* 值为自变量，*WDC* 值、*CDRC* 值和 *D* 值为因变量进行逐步线性回归分析，得到 3 个线性回归方程。这 3 个线性回归方程的决定系数均大于 0.9986，$P=0.0001$（表 11），表明此方程为最优回归方程。运用这 3 个方程对甜高粱成熟期抗旱性评价效果最好。由各项指标 *DRC* 与 *D* 值建立的线性回归方程可知，在甜高粱成熟期抗旱性评价中，千粒重、单株粒重、穗粒数、穗茎粗与 *D* 值密切相关。另外，相关性分析表明，*WDC* 值、*CDRC* 值、*D* 值和产量相互之间均呈极显著正相关（$P<0.01$）。因此，千粒重、单株粒重、穗粒数和穗茎粗可用于甜高粱抗旱性鉴定，从而减少工作量，提高工作效率。

表 7 甜高粱品系各农艺性状的主成分特征向量及贡献率

Table 7 Eigenvectors and contribution rates of principal components in tested sweet sorghum materials

性状 Trait	因子载荷 Factor loading				
	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	CI_5
株高 Plant height	-0.169	-0.330	0.465	-0.321	-0.345
茎粗 Stem diameter	-0.168	0.343	-0.227	0.446	-0.013
穗长 Spike length	0.182	-0.100	0.223	-0.161	0.838
穗茎粗 Spike stem diameter	0.123	0.363	0.529	0.306	-0.199
分枝数 Branches number	-0.042	0.545	0.551	-0.056	0.209
穗粒数 Grain number per spike	0.316	0.380	-0.047	-0.483	-0.240
穗重 Spike weight	0.387	0.230	-0.396	-0.142	0.050
单株粒重 Spike weight per plant	0.518	-0.084	0.055	0.069	-0.131
千粒重 1000-grain weight	0.356	-0.372	0.186	0.462	0.027
产量 Yield	0.508	-0.084	0.055	0.069	-0.131
特征值 Characteristic root	3.616	1.622	1.392	1.226	0.952
贡献率 Contribution rate/%	36.159	16.219	13.924	12.261	9.524
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	36.159	52.378	66.302	78.563	88.087
因子权重 Factor weight	0.410	0.184	0.158	0.139	0.108

表 8　甜高粱品系抗旱性综合评价的 *D* 值、*CDRC* 值和 *WDC* 值

Table 8　*D* values, *CDRC* values, and *WDC* values of drought resistance evaluation in tested sweet sorghum materials

品系 Lines	隶属函数值 Subordinate function value					*D* 值 *D* value	排序 Rank	*WDC* 值 *WDC* value	排序 Rank	*CDRC* 值 *CDRC* value	排序 Rank
	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$U(X_5)$						
F417	0.864	0.718	0.645	0.623	0.576	0.738	1	0.833	3	0.829	3
F438	0.819	0.997	0.096	0.972	0.363	0.709	3	0.819	5	0.812	5
F968	0.101	1.000	0.157	0.180	0.475	0.327	19	0.745	18	0.733	18
TX41	0.193	0.456	0.165	0. 000	0.000	0.189	22	0.706	21	0.698	21
SN005	0.590	0.498	0.038	0.832	0.256	0.483	11	0.784	9	0.776	10
F6229	0. 000	0.227	0. 000	1. 000	0.802	0.268	21	0.684	22	0.676	22
F6271	0.441	0.781	0.622	0.270	0.711	0.538	8	0.783	10	0.776	11
F6383	0.918	0.464	0.168	0.561	0.222	0.591	6	0.823	4	0.820	4
F6099	0.760	0.406	0.665	0.258	0.634	0.596	5	0.847	2	0.844	2
F6106	0.205	0.82	0.831	0.616	0.578	0.515	9	0.792	7	0.788	7
F6036	0.424	0.607	0.467	0.495	0.786	0.513	10	0.785	8	0.780	9
F6141	0.786	0.432	0.536	0.420	0.598	0.610	4	0.812	6	0.807	6
F6372	0.698	0.490	0.104	0.090	0.642	0.475	12	0.766	14	0.762	14
F6319	0.302	0.346	0.559	0.977	0.329	0.447	15	0.772	12	0.766	13
F6149	0.441	0.316	0.863	0.562	0.071	0.461	13	0.772	13	0.769	12
F6018	0.470	0.448	0.782	0.898	0.212	0.547	7	0.781	11	0.780	8
F6017	0.224	0.337	0.536	0.369	0.189	0.311	20	0.733	19	0.727	19
F6027	0.107	0.524	0.287	0.792	0.462	0.346	18	0.724	20	0.716	20
F6306	0.266	0.577	0.335	0.753	0.636	0.442	16	0.754	16	0.749	16
F6137	1. 000	0.396	0.332	0.812	0.622	0.716	2	0.853	1	0.849	1
A60	0.621	0. 000	0.192	0.278	0.575	0.386	17	0.757	15	0.751	15
YT002	0.313	0.277	0.565	0.511	1. 000	0.448	14	0.750	17	0.744	17
平均数 Average	0.484		0.776		0.771						
变异系数 *CV*	0.299		0.057		0.059						

表 9　甜高粱品系各性状 *DRC* 值与 *D* 值、*WDC* 值、*CDRC* 值的关联度及权重

Table 9　Correlation degree between the *DRC* value of all indices and *D* value, *WDC* value, *CDRC* value and indices weightin tested sweet sorghum materials

性状 Trait	*D* 值 *D* value			*WDC* 值 *WDC* value			*CDRC* 值 *CDRC* value		
	关联度 Correlation	权重系数 Weight	排序 Rank	关联度 Correlation	权重系数 Weight	排序 Rank	关联度 Correlation	权重系数 Weight	排序 Rank
株高 Plant height	0.640	0.094	9	0.701	0.100	4	0.697	0.100	4
茎粗 Stem diameter	0.639	0.094	10	0.671	0.096	8	0.669	0.096	8
穗长 Spike length	0.663	0.097	8	0.598	0.085	10	0.599	0.086	10
穗茎粗 Spike stem diameter	0.689	0.101	5	0.656	0.094	9	0.659	0.094	9
分枝数 Branohes number	0.679	0.099	6	0.745	0.106	3	0.741	0.106	3
穗粒数 Grain number per plant	0.691	0.101	3	0.836	0.119	1	0.829	0.119	1
穗重 Spike weight	0.679	0.099	7	0.671	0.096	7	0.670	0.096	7
单株粒重 Spike weight per plant	0.729	0.107	1	0.681	0.097	5	0.682	0.098	5
千粒重 1000-grain weight	0.729	0.101	2	0.757	0.108	2	0.758	0.108	2
产量 Yield	0.69	0.107	4	0.681	0.097	6	0.682	0.098	6

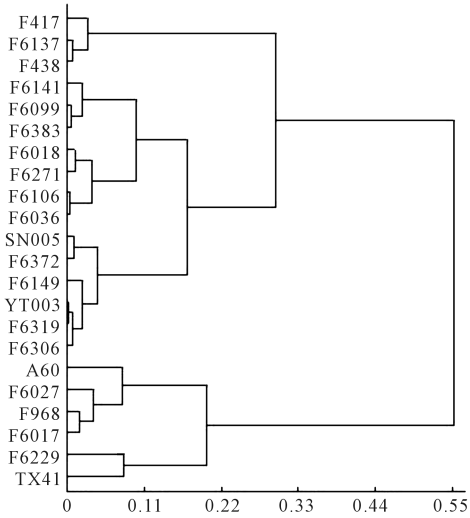

图 1　22 个甜高粱品系抗旱性聚类树状图

Fig.1　Cluster tree diagram of 22 cultivars(lines) of sweet sorghum

表 10　供试甜高粱材料抗旱评价指标分级

Table 10　Classification of drought resistance evaluation indices in tested sweet sorghum materials

性状 Trait	抗旱分级 Drought resistance levels				
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
株高 Plant height	0.745	0.879	0.861	0.861	0.079
茎粗 Stem diameter	0.851	0.823	0.826	0.826	0.079
穗长 Spike length	0.736	0.793	0.717	0.717	0.091
穗茎粗 Spike stem diameter	0.845	0.827	0.753	0.753	0.073
分枝数 Branohes number	0.899	0.888	0.838	0.838	0.008
穗粒数 Grain number per plant	0.902	0.874	0.821	0.821	0.121
穗重 Spike weight	0.856	0.723	0.688	0.688	0.045
单株粒重 Spike weight per plant	0.793	0.700	0.657	0.657	0.024
千粒重 1000-grain weight	0.881	0.796	0.792	0.792	0.080
产量 Yield	0.793	0.700	0.657	0.657	0.024
D 值 *D* value	0.721	0.559	0.460	0.342	0.228
WDC 值 *WDC* value	0.835	0.803	0.766	0.740	0.695
CDRC 值 *CDRC* value	0.830	0.799	0.761	0.732	0.687

表 11 甜高粱抗旱性模型预测

Table 11 Model prediction of drought resistance of sweet sorghum

因变量 Dependent variable	多元逐步回归方程 Multiple stepwise regression equation	决定系数 R^2	P 值 P value	相关系数 Correlation coefficient		
				CDRC 值 *CDRC* value	*WDC* 值 *WDC* value	产量 Yield
D 值 *D* value	$y=-1.1487+0.3472x_4+0.098x_6+0.6123x_8+0.3933x_9$	0.9999	0.0001	0.94**	0.94**	0.79**
WDC 值 *WDC* value	$y=0.0072+0.1018x_4+0.1047x_6+0.1191x_7+0.1587x_8$	0.9997	0.0001		1.00	0.82**
CDRC 值 *CDRC* value	$y=0.027+0.1103x_4+0.079x_6+0.1014x_7+0.1999x_8-0.0976x_9$	0.9986	0.0001			0.82**

注:x_4—穗茎粗;x_6—穗粒数;x_7—穗重;x_8—单株粒重;x_9—千粒重。

Note: x_4—spike culm diameter; x_6—grain number per spike; x_7—spike weight; x_8—spike weight per plant; x_9—grain weight of a thousand seeds.

3 讨论与结论

作物抗旱性评价不仅需要选择具有代表性、适用的指标,而且更需要适合的评价方法。目前,采用多项指标和多种评价方法相结合的方法评价作物品种的抗旱性[16-21]。干旱胁迫导致玉米株高、产量显著降低[22]。干旱条件下苦荞的株高、茎粗均有降低,且不同品种降幅存在差异[23]。汪灿等[24]等研究表明,干旱胁迫对酒用糯高粱资源成熟期各项指标均产生显著影响($P<0.05$),分蘖数、穗粒数和单株粒重可作为酒用糯高粱成熟期简单、直观的抗旱指标。本研究发现,供试材料在干旱胁迫条件下的株高、茎粗和籽粒产量均显著低于正常灌水处理($P<0.05$),且各品系间达到显著差异。这与袁闯等[25]关于干旱导致玉米成熟期株高、茎粗和籽粒产量降低结论一致。干旱影响作物的产量构成因素,导致作物的产量降低。祁旭升等[26]提出单株粒重、单株生物量、株高、分枝数和单株粒数可作为胡麻成株期抗旱筛选指标。本研究发现,千粒重、单株粒重、分枝数、穗粒数和穗长可作为甜高粱成熟期抗旱性鉴定的参考指标。干旱对不同作物造成的影响存在差异,对同一作物不同指标之间的影响也具有差异[27-28]。作物抗旱性是多基因数量性状控制及多个指标的综合表现,需要对其抗旱性进行综合评价[29]。干旱胁迫对各项指标影响程度不同,且各项指标之间存在一定的相关性。直接利用某项指标评价甜高粱成熟期抗旱性,不能准确和客观地反应其抗旱性,作物的抗旱性鉴定需要多指标结合[30-32]。相关性分析表明,*WDC* 值、*CDRC* 值、*D* 值和产量相互之间均呈极显著正相关($P<0.01$),这与罗俊杰等[33]研究结果相近。

干旱胁迫对甜高粱成熟期农艺性状产生显著影响,抗旱系数频次分析表明,抗旱性敏感程度由大到小顺序为穗粒数>分枝数>株高>茎粗>千粒重>穗茎粗>穗重>穗长>单株粒重>产量。灰色关联度分析表明,各指标 *DRC* 值与 *D* 值的密切程度大小顺序为单株粒重>千粒重>穗粒数>产量>穗茎粗>分枝数>穗重>穗长>株高>茎粗。对 *D* 值进行聚类分析,将 22 个不同品种(系)甜高粱分为 5 抗旱级别,其中Ⅰ级 3 份、Ⅱ级 7 份、Ⅲ级 6 份、Ⅳ级 4 份、Ⅴ级 2 份,其中筛选出成熟期抗旱性最强的甜高粱品种(系)为 F417、F438、F6137。逐步线性回归方程表明,千粒重、单株粒重、穗粒数、穗茎粗与 *D* 值密切相关。千粒重、单株粒重、穗粒数和穗茎粗可作为甜高粱成熟期抗旱性鉴定的评价指标。本试验筛选出成熟期抗旱性强的甜高粱材料 417、F438、F6137,可为甜高粱抗旱育种、抗旱机理及干旱调控缓解机制的研究提供基础材料。

参 考 文 献:

[1] Essien M A, Pistorius E. A review on physiological contrivances of drought tolerance in sorghum, genetic basis and breeding methods [J]. Global Journal of Plant Breeding and Genetics. 2016, 12(3):248-259.

[2] 张培,拟南芥主根生长相关突变体的筛选与基因克隆[D].郑州:河南大学,2013.

[3] Shan C, Han R. Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5):1174-1184.

[4] Wang W, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance [J]. Planta, 2003,218:1-14.

[5] 艾买尔江·吾斯曼,吐热依夏木·依米体,吴全忠.甜高粱在新疆生态条件下的适应性研究[J]. 新疆农垦科技 ,2011,34(1) :16-18.

[6] 张福耀,赵威军,平俊爱.高能作物—甜高粱[J].中国农业科技导报,2006,(1) :14-17.

[7] 梁晓玲,王楠,王业建,等.引进美国玉米自交系在我国的耐旱适应性分析[J].玉米科学,2018,(5):1-6,13.

[8] Hasan S A, Rabei S H, Nada R M, et al. Water use efficiency in the drought-stressed sorghum and maize in relation to expression of aquaporin genes [J]. Biologia Plantarum, 2017, 61(9):127-137.

[9] Guha A, Chhajed S S, Choudhary S, et al. Hydraulic anatomy affects genotypic variation in plant water use and shows differential organ specific plasticity to drought in Sorghum bicolor [J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 15(7):25-37.

[10] 谭静,刘帆,李自卫,等.玉米品种耐旱性鉴定及耐旱指标筛选[J].西南农业学报,2013,26(1):26-31.

[11] 吴奇,周宇飞,高悦,等.不同高粱品种萌发期抗旱性筛选与鉴定[J].作物学报,2016,42(8):1233-1246.

[12] 王艺陶,周宇飞,李丰先,等.基于主成分和 SOM 聚类分析的高粱品种萌发期抗旱性鉴定与分类[J].作物学报,2014,40(1):110-121.

[13] 陈冰嫦,徐宁,李淑杰,等.高粱亲本系萌发期抗旱性鉴定[J].中国农业大学学报,2018,23(8):17-29.

[14] 山仑,徐炳成.论高粱的抗旱性及在旱区农业中的地位[J].中国农业科学,2009,42(7): 2342-2348.

[15] 陆平.高粱种质资源描述规范和数据标准[M].北京:中国农业出版社,2006.

[16] 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.

[17] 董文科,路旭平,姜寒玉,等.多年生黑麦草 EMS 诱变与耐旱性评价[J].核农学报,2018,32(10):1889-1897.

[18] 李志博,章杰,魏亦农,等.覆膜高密度下棉花抗旱性产量和品质指标的特征分析[J].核农学报,2011,25(3):576-581.

[19] 申慧芳,李国柱.不同抗旱性绿豆突变体的抗旱生理特性[J].核农学报,2006,20(5):371-374.

[20] 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.

[21] 朱志明,许兴,毛桂莲.不同玉米自交系幼苗对水分胁迫的响应及其耐旱性评价[J].干旱地区农业研究,2018,36(02):176-185.

[22] 张会丽,许兴,朱林.利用隶属函数值法对玉米成熟期抗旱性的综合评价[J].玉米科学,2017,25(04):32-39.

[23] 路之娟,张永清,张楚,等.不同基因型苦荞苗期抗旱性综合评价及指标筛选[J].中国农业科学,2017,50(17):3311-3322.

[24] 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.

[25] 袁闯,朱林,许兴,王开元.玉米成熟期抗旱性综合评价[J]。河南农业科学,2019,48(10):47-53.

[26] 祁旭升,王兴荣,张彦军,等.胡麻成株期抗旱指标筛选与种质抗性鉴定[J].核农学报,2015,29(8):1596-1606.

[27] 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.

[28] Paleg LG, Aspinall D. The physiology and biochemistry of drought resistance in plants[J]. Physiological Plant Pathology, 1983,23(1): 178-179.

[29] 张木清,陈如凯.作物抗旱分子生理与遗传改良[M].北京:科学出版社,2005:22-23.

[30] 桂萍,李金峰,钱永德,等.农作物综合抗旱性指标的评价分析[J].中国农学通报,2005,(10):109-110,165.

[31] Kamoshitaa, Baburc, Boopathi N M, et al. Phenotypic and genotypic and analyze of drought-resistance traits for development of rice cultivars adapted to rainfed environments [J]. Field Crops Research, 2008, 109(3):1-23.

[32] Upadhyaya H D . Variability for drought resistance related traits in the mini core collection of peanut [J]. Crop Science, 2005, 45(4): 1432-1440.

[33] 罗俊杰,欧巧明,叶春雷,等.重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J].作物学报,2014,40(7):1259-1273.