

陆地棉种质资源花铃期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选

李海明^{1,2}, 刘绍东², 张思平², 李阳², 陈静², 马慧娟²,
沈倩², 赵新华², 李存东¹, 庞朝友²

(¹棉花生物学国家重点实验室河北基地/河北农业大学农学院, 保定 071001; ²中国农业科学院棉花研究所, 河南安阳 455000)

摘要: 大田试验设置正常灌水和干旱胁迫处理, 于花铃期开始干旱处理, 以株高、果枝数等 12 个农艺性状的平均数为基础, 采用综合抗旱系数、模糊隶属函数、主成分分析、关联分析和聚类分析等统计分析方法相结合进行品种抗旱性鉴定和抗旱指标的筛选, 为棉花抗旱品种鉴定和棉花生产提供理论依据。12 个农艺性状对水分胁迫的敏感程度各异, 基于 D 值、CDC 值和 WDC 值的棉花种质抗旱性分析; 通过 D 值的聚类分析结果, 将 153 份种质资源分为 5 级, I 级(强抗旱型)5 份、II 级(抗旱型)35 份、III 级(中抗旱型)56 份、IV 级(较敏感型)56 份和 V 级(敏感型)1 份。供试棉花种质的籽棉产量与 D 值、CDC 值和 WDC 值均呈极显著正相关。筛选出花铃期抗旱性强的棉花种质有以色列 1101, 抗旱性弱的品种盐早 2 号。株高、籽棉产量、单铃重、有效铃数和果枝始节高度可作为棉花种质资源花铃期抗旱性评价的指标。

关键词: 陆地棉; 花铃期; 抗旱性; 品种筛选; 农艺性状

Identification and Indices Screening of Drought Tolerance at Flowering and Boll Setting Stage in Upland Cotton Germplasm Resources

LI Hai-ming^{1,2}, LIU Shao-dong², ZHANG Si-ping², LI Yang², CHEN Jing², MA Hui-juan²,
SHEN Qian², ZHAO Xin-hua², LI Cun-dong¹, PANG Chao-you²

(¹Hebei Base of State Key Laboratory of Cotton Biology/ College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding 071001;

²Institute of Cotton Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Henan Anyang 455000)

Abstract: By identifying the ability of drought resistance and screening indices at flowering and boll setting stage of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.), this study aimed to provide the materials and a theoretical basis for drought-resistant breeding and cultivation. 153 varieties (lines) were planted under normal irrigation and drought stress conditions, while the drought treatment was conducted by using reduced water at flowering and boll setting stage. Several agronomical traits, including means of plant height, lint percentage, single boll weight, the first node of fruit branch, initial internodes of fruiting branch, effective boll number, fruit branch number, cotton seed yield, fiber length (mm), specific breaking length, uniformity and micronaire, were measured. The statistical analysis was conducted by combination with the comprehensive drought coefficient, membership function, principal component analysis, association analysis and clustering analysis. The agronomic traits of upland cotton varieties (lines) represented large variation upon drought stress treatment. The ranks of drought resistance of tested upland cotton varieties (lines) based on D value. According to clustering results of D value, these upland cotton varieties (lines) could be divided into five types. Type 1 (Strongly resistant)

收稿日期: 2018-10-08 修回日期: 2018-10-29 网络出版日期: 2018-12-12

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20181211.1145.002.html>

第一作者研究方向为棉花抗旱种质资源研究, E-mail: lihaiming519@163.com

通信作者: 李存东, 研究方向为棉花早衰机制及防控研究, E-mail: nxyld@hebau.edu.cn

庞朝友, 研究方向为棉花抗逆机制研究, E-mail: chypang@163.com

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503117)

Foundation project: Special Fund for AgroScientific Research in the Public Interest(201503117)

included 5 cotton varieties, type 2 (Resistant) had 35 cotton varieties, type 3 (Moderately resistant) had 56 cotton varieties, type 4 (Moderately sensitive) had 56 cotton varieties and type 5 (Sensitive) had 1 cotton variety. The yield of tested upland cotton varieties (lines) had significant and positive correlation with D (drought resistance comprehensive evaluation) value, CDC (comprehensive drought resistance coefficient) value and WDC (weight drought resistance coefficient) value. Finally, we identified two varieties Israel 1101 and yanzao 2, which were identified as drought resistant and sensitive upland cotton varieties at flowering and boll setting stage, respectively. Plant height, yield, single boll weight, effective boll number and height of the first branch could be used as the identification indices for drought resistance in upland cotton germplasm resources at flowering and boll setting stage.

Key words: upland cotton; flowering and boll setting stage; drought resistance; varieties screening; agronomic traits

随着人口的日益增加,耕地面积急剧减少,水资源的日益短缺以及全球气候变暖等环境问题突出,干旱已经成为世界农业生产最严重的问题之一,而我国是世界上干旱半干旱地区面积较大的国家,旱地面积占全国总土地面积的 52.5%,如何应对和解决干旱问题是目前可持续农业发展的重要任务之一^[1-2]。干旱是主要的逆境因素之一,不但影响着自然界植被的地理分布,还制约着农作物的产量构成,最终导致减产,甚至威胁粮食安全^[3-4]。近年来,随着我国棉区大幅度调整,棉农向城镇及第二、第三产业转移,棉花主产区逐步“西进,东移,北上”^[5],特别是西北内陆棉区,然而这些地区地处我国干旱半干旱地带,极易遭受水资源短缺的影响,最终导致棉花减产和品质下降^[6]。培育抗旱性强的棉花品种对于应对棉区水资源短缺尤为重要,但是由于棉花育种时间较长,耗资较大,不易获得。其次,虽然目前已有转基因抗旱棉花,但是目前还处于基础研究,没有大面积推广应用^[7]。因此,通过对棉花种质资源的抗旱鉴定,挖掘棉花品种的抗旱潜力是快速找到抗旱性优势品种的有效方法和途径^[8]。

作物的抗旱性是一个复杂的生物学特征,是由多个基因控制的复杂的数量性状,同时还受到生长发育和环境因素的影响^[9]。目前已有学者从形态等农艺性状^[10-11]和光合作用以及渗透调节物质等生理生化指标^[12-14]对作物单方面和两者结合的方法进行了抗旱鉴定研究^[15-16]。近年来,随着统计方法的不断改进,作物抗旱性鉴定从最初的抗旱系数、综合抗旱系数至目前的模糊隶属函数、广义遗传力、抗旱性度量值、主成分分析、聚类分析和灰色关联度分析^[14, 17-18]等方法,多种方法结合鉴定和评价使得

抗旱性结果更加有效、准确和科学。

本研究根据目前棉花生产发展趋势,收集西北内陆,黄河流域,长江流域和国外种质资源共计 153 份,通过设置正常灌水和水分胁迫处理,于我国棉花主产区新疆开展抗旱性鉴定试验。采用抗旱系数、综合抗旱系数、主成分分析和聚类分析等多种统计方法鉴定陆地棉 (*Gossypium hirsutum* L.) 种质资源花铃期的抗旱性并筛选抗旱指标,旨在为棉花品种改良及农业生产提供材料和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料包括具有代表性的 153 份陆地棉种质资源,材料均由中国农业科学院棉花研究所早熟课题收集并提供,全部材料至少经过自交纯化 3 代以上,153 份陆地棉详细信息见表 1。

1.2 试验设计

试验材料在 2017 年 4 月中旬于中国农业科学院棉花研究所阿拉尔综合试验站 (40° 36' N, 81° 19' E) 播种。设置正常灌水处理和水分胁迫处理,每个处理 3 次重复,小区长 3 m × 宽 2.5 m,一膜三行等行距模式种植,株距 7.2~7.3 cm,对照组与水分胁迫组之间用 4 m 的保护行隔开。采用膜下滴灌的方式灌溉。

所有材料开花期在 6 月 15 日至 6 月 25 日之间,6 月 25 日开始第 1 次灌水,灌水和施肥同时进行,对照组正常灌水 6 h,水分胁迫组灌水 3 h,平均每隔 10 d 灌水 1 次,8 月 13 日开始对水分胁迫组和对照组正常灌水,8 月 20 日对水分胁迫组和对照组进行最后一次正常灌水。9 月 5 日开始测定农艺性状,9 月 20 日开始收获籽棉。

表 1 153 份棉花种质资源的名称

Table 1 Name of 153 upland cotton cultivars and lines

编号 Number	种质 Germplasm	编号 Number	种质 Germplasm	编号 Number	种质 Germplasm	编号 Number	种质 Germplasm
UC001	C2012-3	UC040	TM-1	UC079	新陆早 13 号	UC118	辽锦棉 6 号
UC002	P21-6-7	UC041	奥试棉 4406	UC080	新陆早 15 号	UC119	金垦 148-39
UC003	百棉 17 号	UC042	百棉 985	UC081	新陆早 20 号	UC120	庄稼汉 102
UC004	朝阳棉 1 号	UC043	沧 198	UC082	新陆早 22 号	UC121	银山 4 号
UC005	岱字棉 20	UC044	岱字棉 15 号	UC083	新陆早 24 号	UC122	鄂荆 1 号
UC006	邯 2490	UC045	泛棉 3 号	UC084	豫棉 5 号	UC123	泗棉 3-397
UC007	邯 9609	UC046	赣早 109	UC085	豫棉 21	UC124	斯字棉 4B
UC008	黑山棉 1 号	UC047	国欣棉 11 号	UC086	浙棉 11 号	UC125	冀棉 12 号
UC009	锦棉 3 号	UC048	冀 4025	UC087	T 扩	UC126	鄂棉 17 号
UC010	晋棉 23	UC049	晋棉 26	UC088	博 425	UC127	苏棉 4 号
UC011	晋棉 5 号	UC050	科林 098	UC089	新陆中 60 号	UC128	徐州 142
UC012	辽棉 17 号	UC051	鲁 7619	UC090	新陆早 26 号	UC129	苏棉 12 号
UC013	辽棉 7 号	UC052	鲁棉研 28	UC091	新陆早 27 号	UC130	钢棉 2 号
UC014	辽棉 9 号	UC053	鲁棉研 36	UC092	新陆早 33 号	UC131	珂字 201
UC015	农垦 5 号	UC054	鲁棉研 38	UC093	新陆早 38 号	UC132	岱红岱 568
UC016	陕 70	UC055	仁和 39 号	UC094	新陆早 40 号	UC133	渤棉 1 号
UC017	石早 2 号	UC056	日辉棉 6 号	UC095	新陆早 46 号	UC134	科棉 4 号
UC018	夏早 2 号	UC057	陕农 SF01	UC096	新陆早 47 号	UC135	赣棉 12 号
UC019	新陆早 11	UC058	斯字棉 2B	UC097	新陆早 49 号	UC136	湘棉 13
UC020	新陆早 36	UC059	新植棉 5 号	UC098	新陆早 50 号	UC137	鸡脚德字棉
UC021	新陆早 42	UC060	邮 009	UC099	新陆中 13 号	UC138	安农 121
UC022	新陆早 45	UC061	中 109	UC100	新陆中 15 号	UC139	岱字棉 531
UC023	新陆早 8 号	UC062	中 662	UC101	新陆中 16 号	UC140	敦棉 1 棉
UC024	豫 1335	UC063	中 69	UC102	新陆中 28 号	UC141	敦棉 2 号
UC025	豫棉 12	UC064	中 915	UC103	新陆中 30 号	UC142	赣棉 47
UC026	豫早 910	UC065	中棉所 35	UC104	新陆中 35 号	UC143	冀 668
UC027	运早 N177	UC066	中棉所 41	UC105	新陆中 41 号	UC144	冀棉 25
UC028	中 416	UC067	中棉所 45	UC106	新陆中 45 号	UC145	锦棉 5 号
UC029	中 716	UC068	中棉所 49	UC107	江阴 1 号	UC146	克克 1543
UC030	中 751213	UC069	中植棉 GD89	UC108	惠和 36	UC147	宁棉 22
UC031	中棉所 30	UC070	限 III9704	UC109	国欣棉 9 号	UC148	农大棉 8 号
UC032	邯 256	UC071	美国 -1	UC110	军棉 1 号	UC149	苏棉 22
UC033	中棉所 37	UC072	吉尔吉斯坦	UC111	惠运 717	UC150	湘棉 10 号
UC034	中棉所 42	UC073	巴州 5409	UC112	运早 219	UC151	徐州 219
UC035	中棉所 50	UC074	华中 910102	UC113	锦棉 2 号	UC152	银山 8 号
UC036	中棉所 58	UC075	以色列品种	UC114	朝阳棉 2 号	UC153	新陆早 53 号
UC037	中棉所 64	UC076	垦 6614	UC115	敦煌 77-116		
UC038	CG3020-1	UC077	巴棉 3 号	UC116	甘棉 4 号		
UC039	G2005	UC078	川 338	UC117	盐早 2 号		

1.3 测定内容与方法

1.3.1 农艺性状测定 9月5日开始,每个处理每个品种选取均匀连续的5株,调查其株高、果枝始节高度、果枝始节、有效铃数和果枝数;棉花正常吐絮后,每个处理每个品种选取中部的20个棉铃,用于室内测定单铃重、衣分以及籽棉产量。

调查方法参照《棉花种质资源描述规范和数据标准》^[19]。

1.3.2 纤维品质测定 所有样品分别测定断裂比强度、纤维长度、整齐度和马克隆值。

将收取的20个棉铃,使用小型皮辊轧花机将皮棉和棉籽分离,从皮棉中随机抽取约15g用于测定纤维品质,所有样品送至农业部棉花品质监督检验测试中心测定。

1.4 数据统计与方法

根据前人^[15, 20-24]的统计方法,以供试棉花品种农艺性状测定值为基础数据,对各农艺性状测定值求平均数并进行差异显著性分析。

按公式(1)、(2)和(3)分别计算各单项指标抗旱系数(DC, drought resistance coefficient)、综合抗旱系数(CDC, comprehensive drought resistance coefficient)和抗旱指数(DI, drought resistance index),公式中, X_i 、 CK_i 和 X_{m_i} 分别表示干旱、对照处理的某一性状测定值和干旱处理所有品种某一性状测定值的平均值。

$$DC = \frac{X_i}{CK_i}, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$CDC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$DI = \frac{X_i}{CK_i} \times \frac{X_i}{X_{m_i}}, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

按公式(4)计算各单项指标抗旱隶属函数值(drought resistance membership function value),公式中, X_i 、 X_{imin} 和 X_{imax} 分别表示第*i*个综合指标和第*i*个综合指标的最小值、最大值。

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{imin}) \div (X_{imax} - X_{imin}) \\ i=1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

按公式(5)计算因子权重系数(ω_i), P_i 为第*i*个综合指标贡献率,表示其在所有指标中的重要程度。

$$\omega_i = P_i \div \sum_{i=1}^n P_i, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

在隶属函数值 $\mu(X_i)$ 和因子权重系数(ω_i)的

基础上,按公式(6)计算抗旱性综合度量值(D, drought resistance comprehensive evaluation values)。

$$D = \sum_{i=2}^n \left[\mu(X_i) \times \left(P_i \div \sum_{i=1}^n P_i \right) \right] \\ i=1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

按公式(7)计算关联度(γ_i), $Li(k)$ 表示关联系数。

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Li(k) \quad (7)$$

按公式(8)和(9)计算权重系数[$\omega_{i(\gamma)}$]和加权抗旱系数(WDC, weight drought resistance coefficient), γ_i 为关联度。

$$\omega_{i(\gamma)} = \gamma_i \div \sum_{i=2}^n \gamma_i, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

$$WDC = \sum_{i=2}^n [DC \times \omega_{i(\gamma)}] \\ i=1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

利用Microsoft Excel 2007软件进行常规数据统计,SPSS 22.0软件进行主成分分析及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对棉花品种(系)主要农艺性状的影响

对供试的153个棉花品种(系)农艺性状指标,如株高、籽棉产量等的测定,利用其均值进行配对样本t检验差异显著性分析(表2),结果表明,在棉花花铃期开始水分胁迫后,除了果枝始节,其余11个农艺性状均受到显著影响,处理前后表现差异极显著水平($P < 0.01$)。各农艺性状变异系数介于0.02~0.29之间,其中籽棉产量变异系数最大,正常灌水条件为0.29,水分胁迫条件为0.27,其次是有效铃数和株高,正常灌水条件为0.25和0.24,水分胁迫条件为0.24和0.22,然而衣分的变异系数只有0.07和0.08。各性状均值变异系数(0.02~0.29)跨度较大,说明本试验所选的153个品种(系)的各农艺性状对水分胁迫比较敏感,所选农艺性状具有较好的代表性。

2.2 单项指标分析

根据公式(1)和(3)计算棉花各农艺性状的DC值和DI值,首先获得各农艺性状的DC值和DI值均值和变异系数(表2、表3、表4),DC均值介于0.71~0.99之间,变异系数介于0.01~0.24之间,其中籽棉产量和有效铃数的变异系数最大为0.24,株高

表 2 干旱胁迫和正常灌水条件下各主要农艺性状测定值及均值差异分析

Table 2 Statistical analysis of main agronomic traits under drought stress and normal irrigation treatments

项目 Item	株高 (cm) PH		衣分 (%) LP		单铃重 (g) SBW		果枝始节 FN		果枝始节高度 (cm)HFB		有效铃数 EBN	
	W	D	W	D	W	D	W	D	W	D	W	D
	均值 Mean	62.01	43.09	0.42	0.39	5.71	5.08	5.15	4.82	17.93	16.24	6.79
标准差 SD	14.77	9.66	0.03	0.03	0.58	0.50	0.50	0.52	3.30	3.31	1.68	1.36
变异系数 CV	0.24	0.22	0.07	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10	0.18	0.20	0.25	0.24
<i>t</i>	20.140**		11.995**		17.649**		1.044		9.287**		8.388**	
<i>P</i>	0.0001		0.0001		0.0001		0.2843		0.0001		0.0001	
相关系数 <i>r</i>	0.622		0.753		0.669		0.747		0.771		0.485	
DC 均值 DC average	0.71		0.95		0.80		0.94		0.91		0.87	
DC 变异系数 DC CV	0.20		0.05		0.10		0.08		0.13		0.24	
DI 均值 DI average	0.72		0.96		0.81		1.00		0.92		0.89	
DI 变异系数 DI CV	0.34		0.11		0.09		0.00		0.29		0.43	

项目 Item	果枝数 FBN		籽棉产量 (g) CSY		纤维长度 (mm) FL		断裂比强度 (cN/tex) SBL		整齐度 (%) UNI		马克隆值 MIC	
	W	D	W	D	W	D	W	D	W	D	W	D
	均值 Means	9.84	8.65	639.85	457.94	29.56	28.87	29.36	28.25	84.51	83.8	5.05
标准差 SD	1.38	0.93	183.13	122.54	1.67	1.80	2.60	2.44	1.28	1.31	0.45	0.47
变异系数 CV	0.14	0.11	0.29	0.27	0.06	0.06	0.09	0.09	0.02	0.02	0.09	0.10
<i>t</i>	12.985**		17.335**		7.626**		8.091**		7.234**		11.084**	
<i>P</i>	0.0001		0.0001		0.0001		0.0001		0.0001		0.0001	
相关系数 <i>r</i>	0.295		0.709		0.795		0.773		0.572		0.666	
DC 均值 DC average	0.86		0.74		0.98		0.96		0.99		0.93	
DC 变异系数 DC CV	0.17		0.24		0.04		0.06		0.01		0.08	
DI 均值 DI average	0.87		0.75		0.98		0.97		0.99		0.94	
DI 变异系数 DI CV	0.23		0.40		0.09		0.12		0.03		0.16	

W: 正常灌水处理, D: 干旱胁迫处理。 ** 表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著

W: Well-water treatment, D: Drought treatment. ** significantly different at $P < 0.01$, PH: Plant height, LP: Lint percentage, SBW: Single boll weight, FN: The first node of fruit branch, HFB: Height of the first branch, EBN: Effective boll number, FBN: Fruit branch number, CSY: Cotton seed yield, FL: Fiber length, SBL: Specific breaking length, UNI: Uniformity, MIC: Micronaire

为 0.20 次之。DI 均值介于 0.72~1.00 之间, 变异系数介于 0~0.43 之间, 其中有效铃数变异系数最大为 0.43, 籽棉产量为 0.40 次之。变异系数的变化大小在一定程度上反映不同农艺指标对水分胁迫的敏感程度, 可见棉花的籽棉产量、株高和有效铃数对水分胁迫较敏感。其次将各性状的 DC 值和 DI 值以组距为 0.3 分成 5 个组区间, 制成连续次数分布表。通过对 DC 值和 DI 值分析, 同一性状在不同区间的分布有差异, DC 值分布较集中, 主要体现单个相应性状的差异, DI 值分布较广, 结合单个性状

和水分胁迫群体性状差异。同一区间不同农艺性状间 DC 值和 DI 值的次数分布差异较大, 果枝数、籽棉产量和果枝始节高度的 DI 值次数分布明显多于 DC 值。DC 值在区间 $0.3 < DC \leq 0.9$ 的株高和单铃重的分布频率分别是 87.58% 和 94.77%, 在区间 $0.9 < DC \leq 1.2$ 的纤维长度和衣分的分布频率分别为 96.73% 和 90.85%; DI 值在区间 $0.3 < DI \leq 0.9$ 的株高和单铃重的分布频率分别是 75.82% 和 79.08%, 在区间 $0.9 < DI \leq 1.2$ 的纤维长度和衣分的分布频率分别是 85.62% 和 76.47%。

表3 棉花品种(系)各主要农艺性状指标抗旱系数(DC)及区间的分布

Table 3 Drought resistance coefficient of main agronomic traits and different distributions of upland cotton cultivars and lines

性状 Trait	0.3<DC ≤ 0.6		0.6<DC ≤ 0.9		0.9<DC ≤ 1.2		1.2<DC ≤ 1.5		1.5<DC ≤ 1.8	
	次数	频次(%)	次数	频次(%)	次数	频次(%)	次数	频次(%)	次数	频次(%)
	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency
株高 PH	31	20.26	103	67.32	19	12.42	0	0	0	0
整齐度 UNI	0	0	0	0	153	100.00	0	0	0	0
马克隆值 MIC	0	0	47	30.72	105	68.63	1	0.65	0	0
纤维长度 FL	0	0	5	3.27	148	96.73	0	0	0	0
衣分 LP	0	0	14	9.15	139	90.85	0	0	0	0
单铃重 SBW	2	1.31	143	93.46	8	5.23	0	0	0	0
果枝数 FBN	0	0	39	25.49	114	74.51	0	0	0	0
籽棉产量 CSY	0	0	72	47.06	80	52.29	1	0.65	0	0
有效铃数 EBN	15	9.80	79	51.63	47	30.72	11	7.19	1	0.65
果枝始节 FN	0	0	39	25.49	114	74.51	0	0	0	0
断裂比强度 SBL	0	0	19	12.42	134	87.58	0	0	0	0
果枝始节高度 HFB	0	0	72	47.06	80	52.29	1	0.65	0	0

表4 棉花品种(系)各主要农艺性状指标抗旱指数(DI)及区间的分布

Table 4 Drought resistance index of main agronomic traits and different distributions of upland cotton cultivars and lines

性状 Trait	0.3<DI ≤ 0.6		0.6<DI ≤ 0.9		0.9<DI ≤ 1.2		1.2<DI ≤ 1.5		1.5<DI ≤ 1.8	
	次数	频次(%)	次数	频次(%)	次数	频次(%)	次数	频次(%)	次数	频次(%)
	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency
株高 PH	50	32.68	66	43.14	28	18.30	5	3.27	1	0.65
整齐度 UNI	0	0	1	0.65	152	99.35	0	0	0	0
马克隆值 MIC	0	0	67	43.79	79	51.63	7	4.58	0	0
纤维长度 FL	0	0	21	13.73	131	85.62	1	0.65	0	0
衣分 LP	0	0	34	22.22	117	76.47	1	0.65	0	0
单铃重 SBW	9	5.88	112	73.20	32	20.92	0	0	0	0
果枝数 FBN	12	7.84	71	46.41	64	41.83	5	3.27	1	0.65
籽棉产量 CSY	48	31.37	62	40.52	27	17.65	11	7.19	1	0.65
有效铃数 EBN	30	19.61	67	43.79	29	18.95	19	12.42	3	1.96
果枝始节 FN	0	0	21	13.73	126	82.35	6	3.92	0	0
断裂比强度 SBL	0	0	52	33.99	96	62.75	5	3.27	0	0
果枝始节高度 HFB	19	12.42	51	33.33	58	37.91	23	15.03	1	0.65

结合表2、表3和表4,说明株高、有效铃数、果枝始节高度和籽棉产量对水分胁迫反应敏感,纤维

长度和断裂比强度对水分胁迫反应迟钝,由此可见,棉花的抗旱性和其他作物一样,不同农艺性状

对水分胁迫的敏感程度存在差异,不同农艺性状的抗旱系数和抗旱指数并不完全一样。因此,使用任何一个单项农艺性状指标的抗旱系数和抗旱指数不能对棉花的抗旱性进行很好评价,必须使用多个农艺指标进行综合评价才较为可靠、准确和科学。

2.3 主成分分析

使用统计分析软件对各农艺性状的 DC 值进行主成分分析,获得因子载荷和贡献率(表 5),进一步评价抗旱的重要农艺指标。根据特征值 > 1 和主成分载荷矩阵,最终得到 4 个主成分 PC1、PC2、PC3 和 PC4,将具有相同本质的农艺性状归为一类。

表 5 主成分分析因子载荷矩阵和贡献率

Table 5 Component matrix and contribution rate of principal component analysis

性状 Trait	因子载荷 Factor loading			
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
株高 PH	0.433	-0.208	-0.237	0.019
整齐度 UNI	0.118	0.401	-0.172	0.489
马克隆值 MIC	0.005	0.033	0.528	0.507
纤维长度 FL	0.292	0.506	-0.086	0.047
衣分 LP	0.211	-0.114	0.446	0.259
单铃重 SBW	0.371	0.019	0.140	-0.092
果枝数 FBN	0.255	-0.308	-0.385	0.204
籽棉产量 CSY	0.353	-0.218	0.027	0.304
有效铃数 EBN	0.344	-0.239	-0.169	-0.081
果枝始节 FN	0.284	0.118	0.359	-0.430
断裂比强度 SBL	0.125	0.542	-0.243	0.005
果枝始节高度 HFB	0.357	0.137	0.210	-0.315
特征值 CV	2.770	1.983	1.644	1.051
贡献率(%) CR	23.086	16.522	13.702	8.760
累计贡献率(%) CCR	23.086	39.609	53.310	62.071
因子权重 FW	0.372	0.266	0.221	0.141

CV: Characteristic value, CR: Contribution rate, CCR: Cumulative contribution rate, FW: Factor weight

根据主成分载荷及其绝对值的大小分析,在 PC1 中,株高载荷最大,单铃重、果枝始节高度和籽棉产量次之。在 PC2 中,断裂比强度载荷最大,纤维长度和整齐度载荷次之。在 PC3 中,马克隆值载荷最大,衣分次之。在 PC4 中,马克隆值载荷最大,整齐度载荷次之。PC1 主要概括株高、单铃重、果枝

始节高度和籽棉产量指标,PC2 主要概括断裂比强度和纤维长度指标,PC3 主要概括了马克隆值和衣分指标,PC4 主要概括了马克隆值和整齐度。马克隆值是棉花纤维密度和成熟度的综合指标,在 PC3 和 PC4 中载荷均较大。

2.4 抗旱性综合评价

依据各农艺性状的 DC 值进行因子分析获得特征向量、贡献率,根据公式(5)计算因子权重系数,利用隶属函数法,根据公式(4)计算各因子隶属函数值 $\mu(X_i)$ 。在得到各农艺性状权重的基础上,根据公式(6)将权重与相应各农艺性状的隶属函数值相乘获得 D 值。通过 D 值来评价供试种质资源的抗旱性,D 值越大抗旱性越强。

供试种质资源 D 值介于 0.206~0.683 之间,均值为 0.443,变异系数为 0.206。根据 D 值对供试棉花进行排序(表 6),可将 153 份棉花分为强抗旱($D \geq 0.59$)、抗旱($0.51 \leq D < 0.59$)、中抗旱($0.41 \leq D < 0.51$)、较敏感($0.31 \leq D < 0.41$)和敏感($D < 0.31$)5 级^[11,25]。各级供试材料份数依次为 7、29、59、47 和 11 份,分别占总份数的 4.58%、18.95%、38.56%、30.72% 和 7.19%。其中强抗旱包括:陕 70、以色列 1101、甘棉 4 号、银山 4 号、岱红岱 568、冀 668 和渤棉 1 号。

根据公式(2)和公式(9)计算 CDC 值和 WDC 值,其分别介于 0.792~1.014 之间和 0.777~1.017 之间,均值为 0.888 和 0.880,变异系数为 0.054 和 0.059。根据 CDC 值和 WDC 值对 153 份棉花种质进行排序,两者结果基本相同,根据抗旱分级标准^[26],其中强抗旱有新陆早 11、中 751213、C2012-3、以色列 1101。结合 D 值的抗旱性评价结果,三者评价结果略有差异,某些品种(系)评价结果不一样,但抗旱性强的品种(系)均为以色列 1101,抗旱性弱的品种均为盐早 2 号。

2.5 灰色关联度分析

以农艺性状 DC 值为比较数列,D 值为参考数列进行灰色关联度分析(表 7)。根据灰色系统理论知识,关联度是反应构成灰色系统的各性状组成的比较数列和参考数列之间的密切程度,关联度越大,说明比较数列和参考数列之间的变化趋势越接近,相互关系越紧密^[27]。结果表明,在花铃期对棉花进行水分胁迫处理,其中株高、籽棉产量、单铃重、有效铃数和果枝数等指标对水分胁迫较敏感,衣分、断裂比强度、纤维长度和整齐度对水分胁迫迟钝。

表 6 棉花品种(系)抗旱性评价的 WDC 值、CDC 值和 D 值

Table 6 WDC value, CDC value and D value of drought resistance evaluation of upland cotton cultivars and lines

编号 Number	隶属函数值 Subordinate function value				WDC 值 WDC value	排序 Rank	CDC 值 CDC value	排序 Rank	D 值 D value	排序 Rank
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4						
UC001	0.250	0.618	0.650	0.457	1.013	2	1.006	3	0.465	63
UC002	0.514	0.351	0.671	0.299	0.912	40	0.915	44	0.475	55
UC003	0.389	0.605	0.397	0.372	0.943	17	0.944	22	0.446	75
UC004	0.139	0.275	0.436	0.527	0.832	123	0.842	126	0.295	148
UC005	0.066	0.628	0.484	0.402	0.845	111	0.858	109	0.355	127
UC006	0.282	0.648	0.500	0.534	0.868	84	0.877	85	0.463	65
UC007	0.051	0.430	0.561	0.641	0.902	49	0.912	49	0.348	130
UC008	0.061	0.595	0.403	0.243	0.827	128	0.840	128	0.304	145
UC009	0.262	0.483	0.703	0.343	0.873	79	0.883	78	0.430	85
UC010	0.430	0.580	0.355	0.614	0.922	35	0.927	35	0.479	51
UC011	0.444	0.724	0.624	0.147	0.908	46	0.913	47	0.516	34
UC012	0.271	0.428	0.541	0.529	0.925	34	0.932	32	0.409	96
UC013	0.322	0.556	0.418	0.187	0.935	25	0.939	28	0.386	106
UC014	0.350	0.502	0.224	0.611	0.928	31	0.929	34	0.399	100
UC015	0.336	0.292	0.145	0.052	0.803	144	0.811	146	0.242	152
UC016	0.664	0.698	0.695	0.450	0.942	18	0.946	19	0.650	3
UC017	0.359	0.362	0.626	0.392	0.925	33	0.933	31	0.423	90
UC018	0.413	0.543	0.188	0.331	0.873	78	0.878	84	0.386	107
UC019	0.512	0.412	0.582	0.317	1.017	1	1.014	1	0.474	56
UC020	0.470	0.409	0.275	0.348	0.827	130	0.836	133	0.394	104
UC021	0.571	0.510	0.495	0.427	0.910	43	0.918	39	0.518	32
UC022	0.420	0.626	0.600	0.360	0.880	70	0.891	71	0.506	38
UC023	0.655	0.546	0.596	0.435	0.975	9	0.974	9	0.582	13
UC024	0.409	0.709	0.558	0.378	0.934	28	0.939	26	0.517	33
UC025	0.024	0.509	0.622	0.320	0.817	139	0.828	142	0.327	139
UC026	0.450	0.384	0.595	0.410	0.949	15	0.952	14	0.459	67
UC027	0.293	0.471	0.497	0.365	0.921	36	0.927	36	0.396	102
UC028	0.134	0.604	0.516	0.816	0.965	11	0.972	10	0.440	80
UC029	0.512	0.667	0.280	0.409	0.977	8	0.978	8	0.487	46
UC030	0.341	0.566	0.501	0.552	1.000	3	1.007	2	0.466	62
UC031	0.044	0.499	0.491	0.069	0.894	56	0.900	58	0.268	150
UC032	0.064	0.496	0.469	0.612	0.827	129	0.843	124	0.346	132
UC033	0.150	0.606	0.416	0.211	0.868	83	0.880	82	0.339	135
UC034	0.196	0.372	0.523	0.644	0.855	98	0.865	98	0.379	115
UC035	0.079	0.559	0.527	0.413	0.857	94	0.867	94	0.353	128
UC036	0.122	0.592	0.313	0.268	0.889	64	0.893	66	0.310	143
UC037	0.148	0.578	0.521	0.401	0.934	26	0.939	27	0.381	110
UC038	0.281	0.665	0.542	0.173	0.854	99	0.861	105	0.425	87

表 6(续)

编号 Number	隶属函数值 Subordinate function value				WDC 值	排序 Rank	CDC 值	排序 Rank	D 值	排序 Rank
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	WDC value		CDC value		D value	
UC039	0.326	0.617	0.696	0.127	0.909	44	0.917	42	0.457	68
UC040	0.135	0.557	0.634	0.247	0.832	125	0.846	122	0.373	119
UC041	0.250	0.429	0.849	0.193	0.849	107	0.861	106	0.422	93
UC042	0.266	0.542	0.735	0.542	0.847	108	0.856	111	0.482	50
UC043	0.012	0.604	0.521	0.377	0.791	150	0.806	149	0.333	137
UC044	0.111	0.398	0.391	0.504	0.820	136	0.834	135	0.304	144
UC045	0.458	0.603	0.807	0.361	0.940	22	0.947	17	0.560	17
UC046	0.085	0.799	0.815	0.180	0.852	103	0.867	95	0.450	72
UC047	0.203	0.544	0.626	0.470	0.824	133	0.837	131	0.425	88
UC048	0.264	0.598	0.756	0.490	0.878	73	0.891	69	0.493	42
UC049	0.209	0.527	0.642	0.544	0.874	77	0.886	74	0.437	82
UC050	0.169	0.518	0.711	0.497	0.817	140	0.829	139	0.428	86
UC051	0.116	0.559	0.511	0.557	0.795	148	0.808	148	0.383	109
UC052	0.298	0.700	0.576	0.135	0.826	132	0.837	132	0.443	79
UC053	0.165	0.747	0.715	0.692	0.862	92	0.875	88	0.516	35
UC054	0.157	0.588	0.790	0.408	0.863	89	0.875	89	0.447	74
UC055	0.200	0.504	0.683	0.611	0.843	113	0.855	113	0.446	76
UC056	0.135	0.594	0.678	0.459	0.828	126	0.841	127	0.423	91
UC057	0.325	0.661	0.633	0.399	0.864	88	0.876	87	0.493	43
UC058	0.253	0.281	0.837	0.163	0.893	60	0.898	61	0.377	116
UC059	0.081	0.502	0.867	0.439	0.834	121	0.848	119	0.417	94
UC060	0.192	0.490	0.839	0.453	0.853	102	0.864	100	0.451	71
UC061	0.205	0.621	0.741	0.420	0.853	100	0.863	102	0.464	64
UC062	0.091	0.711	0.414	0.296	0.891	63	0.893	68	0.356	125
UC063	0.559	0.635	0.654	0.469	0.902	51	0.907	52	0.588	8
UC064	0.102	0.543	0.537	0.386	0.816	141	0.828	141	0.356	126
UC065	0.316	0.490	0.641	0.548	0.862	91	0.871	92	0.467	61
UC066	0.253	0.533	0.540	0.581	0.869	82	0.880	81	0.437	81
UC067	0.163	0.531	0.698	0.200	0.872	80	0.883	79	0.385	108
UC068	0.277	0.527	0.840	0.468	0.912	42	0.916	43	0.495	41
UC069	0.412	0.446	0.860	0.522	0.941	20	0.943	23	0.535	24
UC070	0.314	0.794	0.423	0.409	0.929	30	0.942	25	0.479	52
UC071	0.137	0.678	0.654	0.493	0.796	146	0.813	145	0.446	77
UC072	0.523	0.611	0.708	0.085	0.979	7	0.987	6	0.526	29
UC073	0.024	0.633	0.674	0.215	0.787	152	0.804	151	0.357	124
UC074	0.000	0.493	0.735	0.205	0.799	145	0.816	144	0.323	141
UC075	0.080	1.000	0.910	1.000	0.989	5	0.995	4	0.638	5
UC076	0.080	0.687	0.385	0.233	0.777	153	0.792	153	0.330	138
UC077	0.354	0.626	0.375	0.525	0.884	68	0.893	67	0.455	70

表 6(续)

编号 Number	隶属函数值 Subordinate function value				WDC 值 WDC value	排序 Rank	CDC 值 CDC value	排序 Rank	D 值 D value	排序 Rank
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4						
UC078	0.245	0.412	0.472	0.496	0.879	71	0.889	72	0.375	118
UC079	0.426	0.788	0.512	0.276	0.937	23	0.945	21	0.520	30
UC080	0.194	0.276	0.627	0.427	0.823	135	0.835	134	0.344	133
UC081	0.400	0.418	0.652	0.515	0.891	62	0.900	59	0.477	53
UC082	0.280	0.679	0.799	0.107	0.906	47	0.914	46	0.477	54
UC083	0.498	0.786	0.700	0.259	0.934	27	0.938	29	0.585	10
UC084	0.431	0.737	0.181	0.000	0.941	19	0.945	20	0.396	101
UC085	0.263	0.514	0.588	0.161	0.844	112	0.855	112	0.387	105
UC086	0.133	0.474	0.703	0.314	0.888	65	0.895	63	0.375	117
UC087	0.411	0.683	0.751	0.316	0.868	85	0.878	83	0.545	20
UC088	0.303	0.485	0.768	0.417	0.862	90	0.872	91	0.470	59
UC089	0.201	0.845	0.348	0.015	0.790	151	0.799	152	0.379	114
UC090	0.271	0.709	0.496	0.360	0.850	105	0.862	104	0.450	73
UC091	0.278	0.654	0.462	0.396	0.936	24	0.943	24	0.435	83
UC092	0.484	0.592	0.506	0.305	0.856	96	0.865	96	0.492	44
UC093	0.566	0.505	0.548	0.288	0.861	93	0.867	93	0.507	37
UC094	0.353	0.733	0.564	0.554	0.891	61	0.899	60	0.529	25
UC095	0.267	0.358	0.458	0.450	0.833	122	0.846	121	0.359	123
UC096	0.364	0.817	0.657	0.215	0.870	81	0.882	80	0.528	26
UC097	0.490	0.660	0.456	0.319	0.902	50	0.912	48	0.504	40
UC098	0.614	0.477	0.562	0.335	0.945	16	0.952	15	0.527	28
UC099	0.282	0.638	0.697	0.238	0.878	72	0.889	73	0.462	66
UC100	0.159	0.496	0.573	0.178	0.816	142	0.826	143	0.343	134
UC101	0.339	0.455	0.804	0.317	0.875	75	0.884	77	0.470	60
UC102	0.585	0.585	0.548	0.529	0.902	48	0.907	53	0.569	15
UC103	0.458	0.640	0.703	0.339	0.885	67	0.895	64	0.544	22
UC104	0.438	0.456	0.978	0.308	0.909	45	0.914	45	0.544	21
UC105	0.217	0.543	0.487	0.190	0.794	149	0.810	147	0.359	122
UC106	0.536	0.579	0.636	0.305	0.916	38	0.920	38	0.537	23
UC107	0.151	0.584	0.597	0.259	0.814	143	0.829	140	0.380	111
UC108	0.323	0.656	0.661	0.329	0.853	101	0.863	103	0.487	47
UC109	0.312	0.660	0.649	0.365	0.826	131	0.837	130	0.487	48
UC110	0.596	0.320	1.000	0.302	0.989	4	0.989	5	0.571	14
UC111	0.658	0.626	0.610	0.267	0.893	59	0.898	62	0.584	12
UC112	0.378	0.355	0.397	0.288	0.841	115	0.848	118	0.363	120
UC113	0.389	0.555	0.000	0.39	0.836	119	0.843	125	0.347	131
UC114	0.016	0.426	0.217	0.620	0.832	124	0.845	123	0.255	151
UC115	0.207	0.320	0.321	0.273	0.823	134	0.834	136	0.271	149
UC116	0.871	0.523	0.399	0.299	0.986	6	0.980	7	0.593	7

表 6(续)

编号 Number	隶属函数值 Subordinate function value				WDC 值	排序 Rank	CDC 值	排序 Rank	D 值	排序 Rank
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	WDC value		CDC value		D value	
UC117	0.174	0.065	0.391	0.269	0.795	147	0.805	150	0.206	153
UC118	0.162	0.319	0.596	0.242	0.827	127	0.839	129	0.311	142
UC119	0.338	0.448	0.457	0.415	0.840	117	0.848	117	0.404	97
UC120	0.199	0.501	0.785	0.297	0.819	138	0.830	138	0.423	92
UC121	0.476	0.744	0.642	0.542	0.847	109	0.859	108	0.593	6
UC122	0.151	0.359	0.701	0.301	0.834	120	0.847	120	0.349	129
UC123	0.395	0.465	0.648	0.216	0.866	86	0.877	86	0.445	78
UC124	0.442	0.455	0.640	0.329	0.864	87	0.874	90	0.473	57
UC125	0.705	0.450	0.654	0.423	0.951	14	0.950	16	0.586	9
UC126	0.258	0.530	0.720	0.050	0.875	74	0.884	76	0.403	98
UC127	0.455	0.339	0.666	0.351	0.857	95	0.865	97	0.456	69
UC128	0.111	0.336	0.857	0.419	0.895	55	0.905	55	0.379	113
UC129	0.317	0.347	0.635	0.349	0.894	57	0.904	56	0.400	99
UC130	0.296	0.000	0.634	0.335	0.917	37	0.920	37	0.298	147
UC131	0.440	0.422	0.442	0.301	0.855	97	0.864	101	0.416	95
UC132	0.945	0.492	0.564	0.541	0.953	13	0.954	13	0.683	1
UC133	1.000	0.519	0.389	0.525	0.967	10	0.962	12	0.670	2
UC134	0.575	0.613	0.398	0.583	0.887	66	0.891	70	0.547	18
UC135	0.550	0.508	0.785	0.102	0.912	41	0.918	41	0.528	27
UC136	0.616	0.449	0.667	0.349	0.914	39	0.918	40	0.545	19
UC137	0.216	0.403	0.506	0.449	0.845	110	0.856	110	0.363	121
UC138	0.394	0.418	0.705	0.498	0.898	52	0.906	54	0.484	49
UC139	0.308	0.374	0.433	0.100	0.849	106	0.860	107	0.324	140
UC140	0.174	0.440	0.712	0.290	0.819	137	0.831	137	0.380	112
UC141	0.236	0.489	0.213	0.242	0.851	104	0.864	99	0.299	146
UC142	0.297	0.598	0.899	0.264	0.874	76	0.886	75	0.505	39
UC143	0.710	0.611	0.772	0.339	0.930	29	0.936	30	0.645	4
UC144	0.393	0.570	0.635	0.235	0.884	69	0.894	65	0.471	58
UC145	0.473	0.525	0.685	0.178	0.963	12	0.965	11	0.492	45
UC146	0.481	0.490	0.613	0.527	0.926	32	0.930	33	0.519	31
UC147	0.616	0.411	0.552	0.717	0.940	21	0.946	18	0.561	16
UC148	0.476	0.329	0.775	0.529	0.898	53	0.907	50	0.511	36
UC149	0.669	0.477	0.703	0.379	0.898	54	0.907	51	0.585	11
UC150	0.313	0.434	0.344	0.618	0.841	114	0.850	116	0.395	103
UC151	0.123	0.378	0.661	0.301	0.837	118	0.853	114	0.335	136
UC152	0.387	0.220	0.803	0.313	0.893	58	0.903	57	0.424	89
UC153	0.327	0.479	0.517	0.501	0.840	116	0.853	115	0.434	84
均值 Means	—	—	—	—	0.880	—	0.888	—	0.443	—
变异系数 CV	—	—	—	—	0.059	—	0.054	—	0.206	—

对各农艺性状 DC 值与 WDC 值进行灰色关联度分析(表 7),结果表明,其密切程度依次为株高、有效铃数、果枝数、籽棉产量、单铃重、果枝始节高度、纤维长度、果枝始节、衣分、整齐度、断裂比强度和马克隆值。其关联度和 D 值的关联度前 5 项指标一致,都是株高、籽棉产量、单铃重、有效铃数和果枝数。这与各农艺性状指标对水分胁迫的敏感程度基本一致,同时与 2.2 单项指标分析的结果基本吻合。

表 7 棉花品种(系)各主要农艺性状指标 D 值和 WDC 值的关联度及位次

Table 7 Correlation degree between DC value of main agronomic traits and WDC value of upland cotton cultivars and lines

性状 Trait	D 值关联度 D correlation degree	WDC 值关联度		
		排序 Rank	WDC correlation degree	排序 Rank
株高 PH	0.7461	1	0.7238	1
整齐度 UNI	0.5593	12	0.5933	10
马克隆值 MIC	0.5897	7	0.5723	12
纤维长度 FL	0.5663	11	0.6056	7
衣分 LP	0.5817	9	0.5951	9
单铃重 SBW	0.6729	3	0.6354	5
果枝数 FBN	0.6402	5	0.6886	3
籽棉产量 CSY	0.7380	2	0.6759	4
有效铃数 EBN	0.6442	4	0.6937	2
果枝始节 FN	0.5892	8	0.6021	8
断裂比强度 SBL	0.5745	10	0.5851	11
果枝始节高度	0.6082	6	0.6188	6
HFB				

2.6 聚类分析和抗旱性等级划分

依据 D 值进行系统聚类分析,将 153 份棉花品种(系)在 $\lambda=9.5$ 处分为 5 类(图 1)。其中类群 I 属于强抗旱型,包括陕 70、以色列 1101、岱红岱 568、渤棉 1 号和冀棉 668 共 5 份,占总数的 3.27%;类群 II 属于抗旱型,包括新陆早 38、新陆早 47 和甘棉 4 号等共 35 份,占总数的 22.88%;类群 III 属于中抗旱型,包括新陆中 16 号、中 416 和鲁棉研 38 号等共 56 份,占总数的 36.60%;类群 IV 属于较敏感型,包括辽棉 9 号、中棉所 42 和岱字棉 531 等共 56 份,占总数的 36.60%;类群 V 属于敏感型,包括盐早 2 号 1 份,占总数的 0.65%。由聚类分析结果可知,强抗旱型种质资源只占到 3.27%,而大多数种质资源属于中间类型,占到 96.08%。

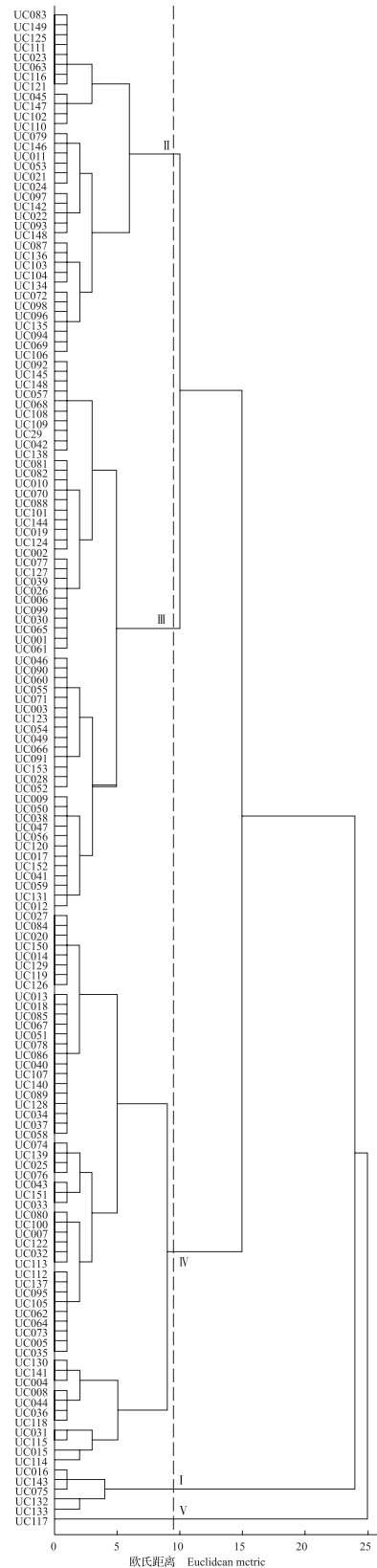


图 1 基于 D 值的棉花种质抗旱性系统聚类图

Fig.1 Fuzzy clustering dendrogram of drought resistance of upland cotton cultivars and lines based on D value

2.7 抗旱指标的筛选

根据计算的 D 值、WDC 值和 CDC 值,分别以

它们为因变量,对各农艺性状的 DC 值进行逐步回归分析(表 8),得到 3 个相应的回归方程,基于 D 值的回归方程判定系数为 0.429, *F* 检验达到极显著水平,说明模型拟合度较好,回归方程有意义,有很好的解释能力;基于 WDC 值和 CDC 值的回归方程判定系数接近 1, *F* 检验均达到极显著水平,说明模型拟合度好,回归方程很优,对变量的解释能力强,

通过这 3 个回归方程能很好评价陆地棉花铃期的抗旱性。

根据 D 值、WDC 值和 CDC 值的回归方程(表 8),株高、籽棉产量、单铃重、有效铃数和果枝始节高度能有效的鉴定棉花种质资源的抗旱性。同时通过对 D 值、WDC 值、CDC 值和籽棉产量之间相关性分析可得,其两两之间均为极显著正相关。

表 8 棉花品种(系)抗旱性模型预测和不同综合评价指标间的相关性

Table 8 Model predict of drought resistance and correlation of different comprehensive valuation indices of upland cotton cultivars

因变量 Dependent variable	多元逐步回归方程 Multiple stepwise regression equation	相关 系数 <i>r</i>	判定 系数 <i>R</i> ²	S 值 S value	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value	相关系数 <i>r</i>			
							D 值 D value	WDC 值 WDC value	CDC 值 CDC value	产量 Yield
D 值 D value	$Y=0.167V_1+0.229V_2+0.312V_3+0.075V_6+0.093V_7+0.463V_9+0.182V_{12}-0.913$	0.655	0.429	1.464	15.541**	0.000	1	0.600**	0.601**	0.319**
WDC 值 WDC value	$Y=0.095V_1+0.119V_3+0.097V_4+0.093V_5+0.078V_6+0.084V_7+0.104V_8+0.324$	0.986	0.972	2.290	712.587**	0.000		1	0.999**	0.645**
CDC 值 CDC value	$Y=0.079V_1+0.115V_3+0.103V_4+0.096V_5+0.075V_6+0.079V_7+0.090V_8+0.354$	0.981	0.962	2.188	530.234**	0.000			1	0.621**

*V*₁: 株高; *V*₂: 衣分; *V*₃: 单铃重; *V*₄: 果枝始节; *V*₅: 果枝始节高度; *V*₆: 有效铃数; *V*₇: 果枝数; *V*₈: 籽棉产量; *V*₉: 纤维长度; *V*₁₂: 马克隆值

*V*₁: Plant height, *V*₂: Lint percentage, *V*₃: Single boll weight, *V*₄: The first node of fruit branch, *V*₅: Height of the first branch, *V*₆: Effective boll number, *V*₇: Fruit branch number, *V*₈: Cotton seed yield, *V*₉: Fiber length, *V*₁₂: Micronaire

3 讨论

3.1 棉花种质资源抗旱性评价方法的选择

近年来随着学者们对抗旱问题的不断研究,针对不同作物提出了多指标多方法相结合的综合抗旱性评价和鉴定体系,目前普遍认为,综合抗旱性评价和鉴定体系较为可靠和客观^[28-29]。本研究认为考虑各性状指标权重和选择核心抗旱性指标是综合评价抗旱性的关键。本研究以各农艺指标 DC 值为基础,采用 D 值、WDC 值和 CDC 值等综合评价指标,结合主成分分析、灰色关联分析和逐步回归分析方法进行棉花种质资源抗旱性综合评价。本研究参考罗俊杰等^[15]对重要胡麻栽培品种抗旱性综合评价方法和李龙等^[18]小麦种质资源抗旱性鉴定评价,结果显示,以 D 值为主要的综合评价指标,既考虑到各农艺指标的重要性,同时也考虑到各指标间的相互关系,评价结果客观、科学和可靠。

3.2 棉花种质资源抗旱性指标的筛选

作物的抗旱性是由多基因控制的复杂的数量性状,同时受到环境因素的影响^[30],最终通过不同生育时期各农艺性状的变化表现出来,因此选择合理的农艺指标是抗旱性鉴定的关键。不同的学者从

不同的角度提出了抗旱性鉴定的相关指标,罗俊杰等^[15]和祁旭升等^[31]对胡麻抗旱性指标筛选研究认为,单株果实、株高、千粒重和单株产量等产量相关性是胡麻抗旱性的重要体现。汪灿等^[32]对薏苡抗旱性指标筛选研究认为,分蘖数、单株粒重和千粒重可作为薏苡抗旱性评价的直观指标。王兰芬等^[30]对绿豆抗旱性指标筛选研究认为,单株地上部分生物量,单株荚重,单重粒数和根冠比可以作为绿豆抗旱性综合指标。由于各农艺性状指标对水分胁迫的敏感程度不同,同时各农艺性状之间有一定的相关性,不能直接利用这些指标来鉴定结果。因此,本研究分别对 D 值和 WDC 值进行灰色关联分析,获得各农艺指标的密切程度与 D 值和 WDC 值密切程度基本吻合,依次为株高、籽棉产量、单铃重、有效铃数和果枝数。采用多元逐步回归分析,得到与 D 值和 WDC 值密切相关的农艺指标为株高、籽棉产量、单铃重、有效铃数和果枝始节高度,这一研究结果与陈玉梁等^[28]和刘光辉等^[33]的研究结论类似。通过使用多种分析方法最终筛选出抗旱指标,株高、籽棉产量、单铃重、有效铃数和果枝始节高度,因此这 5 项指标可作为棉花种质资源花铃期简单、可靠的抗旱性评价指标。

3.3 棉花种质资源抗旱性的鉴定

抗旱性鉴定的最终结果是对供试的种质资源进行抗旱等级划分,以此来判定其抗旱能力强弱^[31]。不同的学者由于研究材料品种、处理方法、农艺性状、分析方法和划分标准的差异,最终结果往往不同。目前,有些学者^[26]根据抗旱指数划分为5级,根据综合抗旱系数划分为3级,根据隶属函数值划分为3级,不易比较。本研究参考林汉明等^[25]研究方法,根据D值将153份棉花种质资源划分为5级,同时根据D值利用系统聚类分析方法将其划分为5级,依次为强抗旱型、抗旱型、中抗旱型、较敏感型和敏感型,两种抗旱等级划分结果类似。本研究鉴定强抗旱型棉花种质为以色列1101,敏感型棉花种质为盐早2号,其余棉花种质介于之间。

参考文献

- [1] 魏志刚,王玉成.植物干旱胁迫响应机制.北京:科学出版社,2015:1-3
Wei Z G, Wang Y C. Plant drought stress response mechanism. Beijing: Science Press, 2015: 1-3
- [2] Fang Y J, Xiong L Z. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2015, 72(4): 673-689
- [3] 邓忠,翟国亮,吕谋超,李迎,宗洁,蔡九茂,冯俊杰.我国农业应对干旱灾害的技术研究现状及展望.节水灌溉,2016(8):162-165
Deng Z, Zhai G L, Lv M C, Li Y, Zong J, Cai J M, Feng J J. Research status and prospect of the technique of reply drought disaster on China's agriculture. *Water Saving Irrigation*, 2016(8): 162-165
- [4] Zhu J K. Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, 2016, 167(2): 313-324
- [5] 付小琼,彭军.国家棉花区域试验工作十年回顾与展望.棉花学报,2017,29(S):113-117
Fu X Q, Peng J. Prospect and retrospection of national cotton regional test of China in last decade. *Cotton Science*, 2017, 29(S): 113-117
- [6] Feng L, Dai J L, Tian L W, Zhang H J, Li W J, Dong H Z. Review of the technology for high-yielding and efficient cotton cultivation in the northwest inland cotton-growing region of China. *Field Crops Research*, 2017, 208: 18-26
- [7] Bello B, Zhang X Y, Liu C L, Yang Z E, Yang Z R, Wang Q H, Zhao G, Li F G. Cloning of *Gossypium hirsutum* sucrose non-fermenting 1-related protein kinase 2 gene (GhSnRK2) and its overexpression in transgenic arabidopsis escalates drought and low temperature tolerance. *PLoS One*, 2014, 9(11): e112269
- [8] 庄振刚,叶春秀,李有忠.新疆陆地棉早熟品种花铃期抗旱性初步评价.中国棉花,2014,41(7):5-7
Zhuang Z G, Ye C X, Li Y Z. Primary evaluation on drought resistance in flowering stage of earliness cultivars in upland cotton in Xinjiang. *China Cotton*, 2014, 41(7): 5-7
- [9] 陈晓杰.中国冬小麦抗旱指标评价、种质筛选及重要性状与SSR标记的关联分析.杨凌:西北农林科技大学,2013
Chen X J. Evaluation of drought tolerance index, selection of drought tolerance varieties and association analysis of important traits with SSR markers in Chinese winter bread wheat. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2013
- [10] 罗巧玲,郑琪,许云峰,李立会,韩方普,许红星,李滨,马朋涛,安调过.390份小麦-黑麦种质材料主要农艺性状分析及优异材料的GISH与FISH鉴定.作物学报,2014,40(8):1331-1339
Luo Q L, Zheng Q, Xu Y F, Li L H, Han F P, Xu H X, Li B, Ma P T, An D G. Main agronomic traits of 390 wheat-rye derivatives and GISH/FISH identification of their outstanding materials. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(8): 1331-1339
- [11] 祁旭升,王兴荣,张彦军,乔海明,张建平,米君.胡麻成株期抗旱指标筛选与种质抗性鉴定.核农学报,2015,29(8):1596-1606
Qi X S, Wang X R, Zhang Y J, Qiao H M, Zhang J P, Mi J. Drought resistance indexes selection for oil flax at the adult stage and drought resistance identification of oil flax germplasm. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(8): 1596-1606
- [12] 王贺正,马均,李旭毅,李艳,张荣萍,汪仁全.水稻开花期一些生理生化特性与品种抗旱性的关系.中国农业科学,2007,40(2):399-404
Wang H Z, Ma J, Li X Y, Li Y, Zhang R P, Wang R Q. Relationship between some physiological and biochemical characteristics and drought tolerance at rice flowering stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(2): 399-404
- [13] 周桂莲,杨慧霞.小麦抗旱性鉴定的生理生化指标及其分析评价.干旱地区农业研究,1996,14(2):65-71
Zhou G L, Yang H X. An analysis and review of physiological and biochemical indexes about wheat drought resistance identification. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1996, 14(2): 65-71
- [14] 白志英,李存东,孙红春,赵金锋.小麦代换系抗旱生理指标的主成分分析及综合评价.中国农业科学,2008,41(12):4264-4272
Bai Z Y, Li C D, Sun H C, Zhao J F. Principal component analysis and comprehensive evaluation on physiological indices of drought resistance in wheat substitution. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12): 4264-4272
- [15] 罗俊杰,欧巧明,叶春雷,王方,王镛臻.主要胡麻品种抗旱相关指标分析及综合评价.核农学报,2014,28(11):2115-2125
Luo J J, Ou Q M, Ye C L, Wang F, Wang Y Z. Drought resistance comprehensive evaluation and analysis of valuation indexes of main flax cultivars. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(11): 2115-2125
- [16] 王兴荣,张彦军,李玥,刘天鹏,张金福,祁旭升.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.植物遗传资源学报,2018,19(1):49-56
Wang X R, Zhang Y J, Li Y, Liu T P, Zhang J F, Qi X S. Effects of drought stress on growth and screening methods and indexes for drought-resistance in soybean. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2018, 19(1): 49-56
- [17] 王士强,胡银岗,余奎军,周琳琳,孟凡磊.小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析.中国农业科学,2018,51(1):1-10

- 2007, 40 (11): 2452-2459
Wang S Q, Hu Y G, She K J, Zhou L L, Meng F L. Gray relational grade analysis of agronomical and physi-biochemical traits related to drought tolerance in wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40 (11): 2452-2459
- [18] 李龙, 毛新国, 王景一, 吕小平, 柳玉平, 景蕊莲. 小麦种质资源抗旱性鉴定评价. *作物学报*, 2018, 44 (7): 988-999
Li L, Mao X G, Wang J Y, Chang X P, Liu Y P, Jing R L. Drought tolerance evaluation of wheat germplasm resources. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44 (7): 988-999
- [19] 杜雄明, 周忠丽. 棉花种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2005
Du X M, Zhou Z L. Description specifications and data standards for cotton germplasm resources. Beijing: China Agriculture Press, 2005
- [20] 董孔军, 刘天鹏, 何继红, 任瑞玉, 张磊, 杨天育. 糜子育成品种苗期抗旱性评价与鉴定指标筛选. *植物遗传资源学报*, 2015, 16 (5): 968-975
Dong K J, Liu T P, He J H, Ren R Y, Zhang L, Yang T Y. Evaluation and identification indexes selection on the drought resistance of broomcorn millet elite cultivars at seeding stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16 (5): 968-975
- [21] 张彦军, 苟作旺, 王兴荣, 陈伟英, 祁旭升. 胡麻种质萌发期抗旱性综合评价. *植物遗传资源学报*, 2015, 16 (3): 520-527
Zhang Y J, Gou Z W, Wang X R, Chen W Y, Qi X S. Comprehensive valuation of drought resistance of flax germplasm in germination. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16 (3): 520-527
- [22] 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 王方, 王镛臻, 陈玉梁. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选. *作物学报*, 2014, 40 (7): 1259-1273
Luo J J, Ou Q M, Ye C L, Wang F, Wang Y Z, Chen Y L. Comprehensive valuation of drought resistance and screening of indices of important flax cultivars. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40 (7): 1259-1273
- [23] 李忠旺, 陈玉梁, 罗俊杰, 石有太, 冯克云, 陈子莹. 棉花抗旱品种筛选鉴定及抗旱性综合评价方法. *干旱地区农业研究*, 2017, 35 (1): 240-247
Li Z W, Chen Y L, Luo J J, Shi Y T, Feng K Y, Chen Z X. Screening and evaluation for drought resistance of cotton varieties. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35 (1): 240-247
- [24] 欧巧明, 叶春雷, 李进京, 陈军, 崔文娟, 王立光, 罗俊杰. 胡麻种质资源成株期抗旱性综合评价及其指标筛选. *干旱区研究*, 2017, 34 (5): 1083-1092
Ou Q M, Ye C L, Li J J, Chen J, Cui W J, Wang L G, Luo J J. Comprehensive valuation and screening of drought resistance of flax germplasm. *Arid Zone Research*, 2017, 34 (5): 1083-1092
- [25] 林汉明, 常汝镇, 邵桂花, 刘忠堂. 中国大豆耐逆研究. 北京: 中国农业出版社, 2009: 382-398
Lin H M, Chang R Z, Shao G H, Liu Z T. Research on tolerance to stresses in Chinese soybean. Beijing: China Agriculture Press, 2009: 382-398
- [26] 刘鹏鹏, 陈全家, 曲延英, 刘光辉, 张海燕, 王海标, 冯文林, 高文伟. 棉花种质资源抗旱性评价. *新疆农业科学*, 2014, 51 (11): 1961-1969
Liu P P, Chen Q J, Qu Y Y, Liu G H, Zhang H Y, Wang H B, Feng W L, Gao W W. The drought resistance evaluation of cotton germplasm resources. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51 (11): 1961-1969
- [27] 尹利, 逯晓萍, 傅晓峰, 李美娜, 郭建. 高丹草杂交种灰色关联分析与评判. *中国草地学报*, 2006, 28 (3): 21-25
Yin L, Lu X P, Fu X F, Li M N, Guo J. The grey relation analysis and evaluation of hybrid pacesetter. *Chinese Journal of Grassland*, 2006, 28 (3): 21-25
- [28] 陈玉梁, 石有太, 罗俊杰, 王蒂, 厚毅清, 李忠旺, 张秉贤. 甘肃彩色棉花抗旱性农艺性状指标的筛选鉴定. *作物学报*, 2012, 38 (9): 1680-1687
Chen Y L, Shi Y T, Luo J J, Wang D, Hou Y Q, Li Z W, Zhang B X. Screening of drought tolerant agronomic trait indices of colored cotton varieties (lines) in Gansu province. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38 (9): 1680-1687
- [29] 田又升, 谢宗铭, 吴向东, 王志军, 叶春秀, 张国丽. 水稻种质资源萌发期抗旱性综合鉴定. *干旱地区农业研究*, 2015, 33 (4): 173-180
Tian Y S, Xie Z M, Wu X D, Wang Z J, Ye C X, Zhang G L. Identification of drought tolerance of rice germplasm during germination period. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33 (4): 173-180
- [30] 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 程须珍, 王述民. 绿豆种质资源成株期抗旱性鉴定. *作物学报*, 2015, 41 (8): 1287-1294
Wang L F, Wu J, Jing R L, Cheng X Z, Wang S M. Identification of mung bean germplasm resources resistant to drought at adult stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41 (8): 1287-1294
- [31] 祁旭升, 王兴荣, 许军, 张建平, 米君. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价. *中国农业科学*, 2010, 43 (15): 3076-3087
Qi X S, Wang X R, Xu J, Zhang J P, Mi J. Drought-resistance evaluation of flax germplasm at adult plant stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (15): 3076-3087
- [32] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. *作物学报*, 2017, 43 (9): 1381-1394
Wang C, Zhou L B, Zang G B, Zhang L Y, Xu Y, Gao X, Jiang N, Shao M B. Identification and indices screening of drought resistance at adult plant stage in Job's tears germplasm resources. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43 (9): 1381-1394
- [33] 刘光辉, 陈全家, 吴鹏昊, 曲延英, 高文伟, 杨军善, 杜荣光. 棉花花铃期抗旱性综合评价及指标筛选. *植物遗传资源学报*, 2016, 17 (1): 53-62
Liu G H, Chen Q J, Wu P H, Qu Y Y, Gao W W, Yang J S, Du R G. Screening and comprehensive evaluation of drought resistance indices of cotton at blossing and boll-forming stages. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17 (1): 53-62