植物遗传资源学报 2015,16(3):520-527
Journal of Plant Genetic Resources　DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.2015.03.013

胡麻种质萌发期抗旱性综合评价

张彦军,苟作旺,王兴荣,陈伟英,祁旭升
(甘肃省农业科学院作物研究所,兰州 730070)

摘要:为研究不同类型胡麻种质萌发期抗旱性表现,以筛选抗旱品种,为抗旱育种提供科技支撑。本研究采用不同浓度的 PEG-6000 高渗溶液模拟干旱胁迫的方法,对定亚 17、陇亚 8 号和 2011621080 进行渗透胁迫试验,筛选适宜浓度的 PEG-6000 溶液。对 161 份不同类型的胡麻种质在萌发期进行渗透胁迫试验,考查与抗旱性相关的 5 个性状,并运用单项抗旱系数、综合抗旱系数、隶属函数和灰色关联度相结合的方法对种质资源的抗旱性进行综合评价。结果表明,不同浓度 PEG-6000 胁迫对胡麻种质的萌发均有影响,当 PEG-6000 的浓度在 18% 时,各种指标的抑制作用均显著加强,因此本研究选用 18% 的 PEG-6000 浓度模拟干旱胁迫试验;PEG-6000 胁迫降低了 161 份胡麻种质资源的相对发芽率,抑制了幼芽的生长,种质间表现出较大差异。根据抗旱性量度值将供试种质划为 5 级,其中 1 级抗旱型 2 份、2 级 15 份、3 级 28 份、4 级 82 份、5 级 34 份;供试种质的抗旱性强弱与地理来源息息相关。试验结果说明选择多个性状,综合评价胡麻萌发期抗旱性是可行且准确的。

关键词:胡麻;萌发期;干旱胁迫;抗旱性

Comprehensive Valuation of Drought Resistance of Flax Germplasm in Germination

ZHANG Yan-jun, GOU Zuo-wang, WANG Xing-rong, CHEN Wei-ying, QI Xu-sheng
(*Institute of Crop, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070*)

Abstract: To study drought resistance of different types of flax germplasm in germination, screening varieties with resistance to drought will give support in breeding. This paper studied stress test under different concentrations of PEG-6000 for Dingya 17, Longya 8 and 2011621080, to select the best concentration of PEG-6000 solution. For 161 varieties from northwest arid area were tested during germination, and meanwhile 5 characters which relevant to drought resistance were studied. Comprehensive evaluation was carried out for different germplasm resources through drought resistance coefficient, comprehensive drought resistance coefficient, membership function and grey relational analysis. The results showed that there was an influence on the germination of flax germplasm with the increased of PEG-6000 concentration, with 18% PEG-6000 stress condition for the flax germplasm of seed during germination among them, the relative germination rate, root length, root fresh weight, bud length, bud fresh weight of 161 flax germplasm decreased under PEG-6000 stress. According to drought resistance comprehensive evaluation value, flax germplasm used in this study were divided into 5 drought resistance grades, 2 belonged to grade 1, 15 belonged to grade 2, 28 belonged to grade 3, 82 belonged to grade 4, 34 belonged to grade 5. The capacity of drought resistance of the tested cultivars was relevant to geographical origins. Using several relevant characters, it is an effective and accurate way to comprehensively evaluate the drought tolerance of flax in germination.

Key words: flax; germination; drought stress; drought resistance

收稿日期:2014-08-06　**修回日期**:2014-11-18　**网络出版日期**:2015-04-22
URL:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20150422.0830.009.html
基金项目:科技部科技基础性工作专项(2011FY110200);甘肃省青年科技基金计划(1308RJYA021);甘肃省农业科学院科技创新专项(2012GAAS06-3)
第一作者研究方向为农作物种质资源和遗传育种研究。E-mail:zhangyanjun1221@163.com
通信作者:祁旭升,研究方向为农作物种质资源和遗传育种研究。E-mail:qixusheng6608@sina.com

胡麻(*Linum usitatissimum* L.)是世界上重要的油料作物之一,是我国干旱冷凉地区主要油料作物和经济作物。近年来,胡麻的营养价值和保健功能引起了医疗、食品、农业等许多领域学者的广泛关注,其应用前景十分广阔。目前,我国胡麻主要集中在西北和华北黄土高原地带,该区大部分年降水量在 400 ~ 500 mm 之间,北部只有 200 ~ 300 mm,属重旱生态区[1-3],胡麻对气候变化的响应更敏感、适应能力更脆弱、影响程度更大[4-6],因此研究胡麻的抗旱性是大田生产和品种选育必须考虑的重要科学问题之一。

干旱是制约农作物生长发育的主要因素之一,对农作物造成的损失在所有非生物胁迫中占首位[7-8]。因此,进行水分胁迫对植物生长发育影响的研究就显得十分迫切。目前我国胡麻在生产上还存在很多问题,其主要原因是品种抗逆性较低,在整个生长发育过程中对干旱胁迫都比较敏感,尤其以种子萌发期和苗期最为敏感。干旱条件下,植物种子的迅速萌发、出苗对植株的正常生长非常重要。因此,种子萌发期耐旱性已经被作为抗旱选择指标之一[9-11]。近年来,随着作物抗旱研究的发展,抗旱指数、隶属函数值、级别值及权重系数等作物抗旱能力鉴定方法已在小麦[12]、大豆[13-14]等作物上普遍采用,进行多指标综合评价是比较可靠的,可以避免单一指标的片面性和不稳定性,而在胡麻上的应用报道较少[3,15]。PEG-6000 胁迫是研究作物种子萌发期抗旱性的一种简便、有效的方法[16-19]。

本研究采用 PEG-6000 水溶液模拟干旱胁迫的方法,测定了 161 份国内外胡麻种质在水分胁迫下的 5 个性状值,评价其综合抗旱性,为胡麻抗旱种质资源的发掘、鉴定和品种选育及栽培提供参考,同时为制定《亚麻抗旱性鉴定技术规范》提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

抗旱试验材料由 28 份国内地方品种、18 份国内育成品种、66 份国外引进品种和 49 份从我国西北干旱地区收集的抗逆农作物种质资源组成(表 1),共计 161 份种质资源。以定亚 17、陇亚 8 号和 2011621080 作为筛选 PEG-6000 溶液浓度的材料。定亚 17 由定西地区油料试验站 1989 年通过杂交选育而成,多年旱地胡麻区试中都比对照增产,抗旱性较强;陇亚 8 号由甘肃省农科院经作所 1997 年通过杂交选育而成,水旱两地均可种植,抗旱性上表现中抗;2011621080 是甘肃地方资源,萌发期抗旱性较弱。以上所有供试种质均由“国家农作物种质资源平台-甘肃省农作物种质资源保存库”和“西北干旱地区抗逆农作物种质资源调查”项目组提供。

表 1　供试材料名称、来源、类型及抗旱性排序

Table 1　Name, origin, type, and order of drought resistance of tested accessions

种质名称 Cultivars	来源 Origin	类型 Type	*D* 值 *D* value	排序 Ranking	等级 Grade	种质名称 Cultivars	来源 Origin	类型 Type	*D* 值 *D* value	排序 Ranking	等级 Grade
礼县罗坝胡麻	中国甘肃	地方品种	0.798	1	1	精河胡麻	中国新疆	地方品种	0.291	82	4
西礼红胡麻	中国甘肃	地方品种	0.767	2	1	天水市胡麻	中国甘肃	地方品种	0.289	83	4
天水市老胡麻	中国甘肃	地方品种	0.593	3	2	甘亚 4 号	中国甘肃	育成品种	0.287	84	4
甘亚 3 号	中国甘肃	育成品种	0.589	4	2	匈牙利 3 号	匈牙利	引进品种	0.281	85	4
2012631028	中国青海	收集品种	0.589	5	2	定亚 1 号	中国甘肃	育成品种	0.280	86	4
西礼红-1	中国甘肃	地方品种	0.576	6	2	20121500297	中国内蒙古	收集品种	0.277	87	4
礼县胡麻	中国甘肃	地方品种	0.557	7	2	2012631218	中国青海	收集品种	0.276	88	4
2012621187	中国甘肃	收集品种	0.555	8	2	德国-2 Germany-2	德国	引进品种	0.275	89	4
H677 F5-2-1-1-1-1	阿根廷	引进品种	0.539	9	2	天水渭南胡麻	中国甘肃	地方品种	0.269	90	4
NO. 1051 PI 289090	匈牙利	引进品种	0.535	10	2	66-39-7-1	中国甘肃	育成品种	0.268	91	4
清水老胡麻	中国甘肃	地方品种	0.521	11	2	LILA	法国	引进品种	0.267	92	4
2012631091	中国青海	收集品种	0.517	12	2	法国胡麻	法国	引进品种	0.266	93	4
GERCELLOP. I. 173243	荷兰	引进品种	0.513	13	2	德国-3 Germany-3	德国	引进品种	0.264	94	4
雁农 1 号	中国山西	育成品种	0.509	14	2	89-29	西德	引进品种	0.262	95	4
西和老胡麻	中国甘肃	地方品种	0.496	15	2	ARGENTINE SEL. G5	美国	引进品种	0.262	96	4
西礼宽川胡麻	中国甘肃	地方品种	0.495	16	2	P. I. 250091	伊朗	引进品种	0.261	97	4
RAJA	加拿大	引进品种	0.485	17	2	清亚 1 号	中国甘肃	育成品种	0.260	98	4
2012631222	中国青海	收集品种	0.472	18	3	匈牙利 2 号 Hungary 2	匈牙利	引进品种	0.258	99	4
2012651071	中国新疆	收集品种	0.470	19	3	定亚 17 号	中国甘肃	育成品种	0.255	100	4
匈牙利 B	匈牙利	引进品种	0.461	20	3	20121500395	中国内蒙古	收集品种	0.255	101	4

表 1(续)

种质名称 Cultivars	来源 Origin	类型 Type	D 值 D value	排序 Ranking	等级 Grade	种质名称 Cultivars	来源 Origin	类型 Type	D 值 D value	排序 Ranking	等级 Grade
两当胡麻	中国甘肃	地方品种	0.460	21	3	匈牙利 1 号	匈牙利	引进品种	0.254	102	4
C.I. 975 × 1073	北美	引进品种	0.460	22	3	ROSSIAN INTRO.	俄罗斯	引进品种	0.252	103	4
20121500364	中国内蒙古	收集品种	0.456	23	3	天亚 1 号	中国甘肃	育成品种	0.250	104	4
2012631226	中国青海	收集品种	0.447	24	3	2012651065	中国新疆	收集品种	0.248	105	4
P.I. 193820	埃塞俄比亚	引进品种	0.445	25	3	甘亚 2 号 Ganya 2	中国甘肃	育成品种	0.248	106	4
定亚 4 号	中国甘肃	育成品种	0.441	26	3	2012141144	中国山西	收集品种	0.246	107	4
2012631220	中国青海	收集品种	0.436	27	3	波兰-2 Poland-2	波兰	引进品种	0.245	108	4
斯达哈诺夫 Stahanov	苏联	引进品种	0.433	28	3	89-21	西德	引进品种	0.245	109	4
2012631225	中国青海	收集品种	0.423	29	3	P.I. 780	印度	引进品种	0.242	110	4
张北白胡麻	中国新疆	地方品种	0.422	30	3	陇亚 3 号	中国甘肃	育成品种	0.237	111	4
定亚 10 号	中国甘肃	育成品种	0.420	31	3	L.G. 0189B	摩洛哥	引进品种	0.236	112	4
裴鲁闹 Pei Lu nao	不详	引进品种	0.412	32	3	陇亚 8 号	中国甘肃	育成品种	0.236	113	4
抬挪 Tai na	不详	引进品种	0.410	33	3	HOSSZUHATI 7022	匈牙利	引进品种	0.235	114	4
MARSIC	意大利	引进品种	0.409	34	3	2012621062	中国甘肃	收集品种	0.234	115	4
2011142021	中国山西	收集品种	0.408	35	3	2012631223	中国青海	收集品种	0.232	116	4
苏联两用	苏联	引进品种	0.406	36	3	匈牙利 6 号 Hungary 6	匈牙利	引进品种	0.232	117	4
天水线胡麻	中国甘肃	地方品种	0.403	37	3	BISON × RIO	美国	引进品种	0.232	118	4
2012621118	中国甘肃	收集品种	0.403	38	3	2013641336	中国宁夏	收集品种	0.231	119	4
定亚 14 号	中国甘肃	育成品种	0.389	39	3	2012631227	中国青海	收集品种	0.227	120	4
五河林 Wu he lin	不详	引进品种	0.389	40	3	日本胡麻 Japan flax	日本	引进品种	0.226	121	4
2011621058	中国甘肃	收集品种	0.387	41	3	波兰-1 Poland-1	波兰	引进品种	0.226	122	4
RUSSIAN INTRO.	俄罗斯	引进品种	0.387	42	3	89-27	西德	引进品种	0.221	123	4
2012141179	中国山西	收集品种	0.385	43	3	NO. 129	摩洛哥	引进品种	0.219	124	4
阿克苏白	中国新疆	地方品种	0.383	44	3	匈牙利 8 号	匈牙利	引进品种	0.216	125	4
线胡麻 Xian flax	中国甘肃	地方品种	0.382	45	3	2012141119	中国山西	收集品种	0.214	126	4
2012631221	中国青海	收集品种	0.368	46	4	2012141172	中国山西	收集品种	0.212	127	4
WIERA 12M3.I.32017	荷兰	引进品种	0.362	47	4	西礼白胡麻	中国甘肃	地方品种	0.201	128	5
定亚 12 号	中国甘肃	育成品种	0.359	48	4	2011621210	中国甘肃	收集品种	0.199	129	5
尚义小桃高	中国河北	地方品种	0.356	49	4	莎车早熟种白	中国新疆	地方品种	0.198	130	5
苏联勃利	苏联	引进品种	0.351	50	4	P.I. 250864	伊朗	引进品种	0.188	131	5
齐胡麻 Qi flax	中国甘肃	地方品种	0.350	51	4	WALSH	美国	引进品种	0.186	132	5
2012631217	中国青海	收集品种	0.350	52	4	2012651058	中国新疆	收集品种	0.183	133	5
德国-4 Germany-4	德国	引进品种	0.344	53	4	20121500296	中国内蒙古	收集品种	0.181	134	5
BISON × ABY. YELLOW	美国	引进品种	0.339	54	4	匈牙利 A	匈牙利	引进品种	0.181	135	5
2012631036	中国青海	收集品种	0.336	55	4	NORALTA	加拿大	引进品种	0.180	136	5
KRISLIMASPANADSLIN	瑞士	引进品种	0.336	56	4	匈牙利 5 号	匈牙利	引进品种	0.179	137	5
REDOOD × 4III-57-82	美国	引进品种	0.334	57	4	2011621004	中国甘肃	收集品种	0.179	138	5
塞盖地 Sai gai di	不详	引进品种	0.331	58	4	2012621312	中国甘肃	收集品种	0.179	139	5
陇亚 4 号 Longya 4	中国甘肃	育成品种	0.328	59	4	2013641313	中国宁夏	收集品种	0.174	140	5
20121500394	中国内蒙古	收集品种	0.326	60	4	2012631224	中国青海	收集品种	0.162	141	5
H677 F5-2-1-1-1-1	阿根廷	引进品种	0.325	61	4	宕昌高角胡麻	中国甘肃	地方品种	0.159	142	5
波兰 Poland	波兰	引进品种	0.325	62	4	2011631030	中国青海	收集品种	0.155	143	5
阿克苏红 Akesu red flax	中国新疆	地方品种	0.324	63	4	2012621050	中国甘肃	收集品种	0.152	144	5
2011621171	中国甘肃	收集品种	0.322	64	4	SUMPERSKY ZDAR	波兰	引进品种	0.151	145	5
NO. 547	摩洛哥	引进品种	0.321	65	4	2012641162	中国宁夏	收集品种	0.146	146	5
2011621194	中国甘肃	收集品种	0.318	66	4	2012621341	中国甘肃	收集品种	0.145	147	5
疏勒白	中国新疆	地方品种	0.317	67	4	CRYDRUS	匈牙利	引进品种	0.144	148	5
BARNAULSKIJ	俄罗斯	引进品种	0.316	68	4	RIO	匈牙利	引进品种	0.144	149	5
FR SRINIGAR KASHMIR	印度	引进品种	0.313	69	4	武都胡麻	中国甘肃	地方品种	0.140	150	5
纺织工人 Cotton spinner	苏联	引进品种	0.313	70	4	2012641216	中国宁夏	收集品种	0.138	151	5
定亚 15 号 Dingya 15	中国甘肃	育成品种	0.312	71	4	2012641130	中国宁夏	收集品种	0.137	152	5
秦安好地	中国甘肃	地方品种	0.306	72	4	RWD × BIRIO MN61-10	美国	引进品种	0.134	153	5
MAUVE	埃及	引进品种	0.306	73	4	OTTAWA	美国	引进品种	0.130	154	5
2011142064	中国山西	收集品种	0.304	74	4	2011621080	中国甘肃	收集品种	0.122	155	5
EMERAUDE	法国	引进品种	0.303	75	4	舟曲除瓦胡麻	中国甘肃	地方品种	0.114	156	5

表 1(续)

种质名称 Cultivars	来源 Origin	类型 Type	D 值 D value	排序 Ranking	等级 Grade	种质名称 Cultivars	来源 Origin	类型 Type	D 值 D value	排序 Ranking	等级 Grade
尚义大桃	中国河北	地方品种	0.302	76	4	2012621207	中国甘肃	收集品种	0.106	157	5
FLACHSKOPF	德国	引进品种	0.301	77	4	2012641188	中国宁夏	收集品种	0.099	158	5
Apr-34	中国甘肃	育成品种	0.298	78	4	DIADEM	美国	引进品种	0.094	159	5
乌鲁木齐	中国新疆	地方品种	0.296	79	4	2011641046	中国宁夏	收集品种	0.080	160	5
荷兰 Holland	荷兰	引进品种	0.295	80	4	2011641073	中国宁夏	收集品种	0.063	161	5
德国-5 Germany-5	德国	引进品种	0.292	81	4						

D 值:抗旱性量度值

D value:Drought resistance comprehensive evaluation values

1.2　试验方法

1.2.1　材料的处理　本试验采用 0(CK)、14%、16%、18%、20%、22%、24% 等 7 种不同浓度的 PEG-6000 溶液对定亚 17、陇亚 8 号和 2011621080 种子进行胁迫处理,筛选适于进行种子萌发期抗旱性鉴定的胁迫溶液浓度。

根据所筛选到的最适宜 PEG-6000 溶液浓度,精心挑选大小一致、饱满有光泽的种子,用 0.1% 的升汞溶液浸润 10 min,蒸馏水冲洗干净,滤纸吸取种子表面水分,然后让其自然风干。分别取 161 份材料种子 300 粒,每个处理 50 粒,放于直径为 9 cm 培养皿中,用滤纸作发芽床,分别加入 12 mL 浓度为 0(CK)和 18% 的 PEG-6000 溶液,3 次重复,置于 25 ℃培养柜下暗培养。

1.2.2　测量指标与方法[20-22]　于发芽 7 d 后测量发芽率、根长、根鲜重、芽长和芽鲜重 5 个性状,发芽试验以胚根长度达到种子长,胚芽长度达到种子一半时为准,根长、芽长均采用直尺法;根鲜重、芽鲜重使用 Sartorius BSA-224S 电子分析天平测量,均为单株重量。

1.2.3　数据分析　采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 20.0 统计分析软件对所得数据进行处理,显著水平为 0.01 和 0.05。不同胡麻种质资源的抗旱性采用模糊隶属函数法与综合抗旱系数相结合的方法进行综合评价,根据抗旱性量度值(D 值)间的距离和相似性,进行聚类分析,划分抗旱等级,D 值范围为(0,1),其值越大抗旱性越强。具体的计算公式如下[3,23-26]:

发芽率(%)GR = 7 d 内正常发芽种子数/供试种子数 ×100

$$\text{单项抗旱系数}\ DC = \frac{X_i}{CK_i}$$

$$\text{综合抗旱系数}\ CDC = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} DC$$

$$\text{隶属函数值}\ x_{ij} = \begin{cases} 0 & X_{j\min} \\ (X - X_{j\min})/(X_{j\max} - X_{j\min}) & X_{\min} < X < X_{\max} \\ 1 & X_{j\max} \end{cases}$$

$$\text{隶属函数均值}\ \overline{x_i} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}$$

$$\text{指标权数}\ \omega_{\mathrm{i}} = \left(|r_i| \div \sum_{i=1}^{n} |r_i|\right)$$

$$\text{抗旱性量度值}\ D = \sum_{i=1}^{n}\left[x_{ij} \times \left(|r_i| \div \sum_{i=1}^{n}|r_i|\right)\right]$$

$$\text{关联系数}\ L_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho\Delta_{\max}}$$

$$\text{关联度}\ \gamma_{0i} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} L_{0i}(k)$$

式中,X_i、CK_i 表示干旱、对照处理条件下性状测定值;X 表示水分胁迫条件下性状值与对照值之比。当指标性状值与抗旱性呈负相关时,$x_{ij} = 1 - (X - X_{j\min})/(X_{j\max} - X_{j\min})$,其中 x_{ij} 为 i 品种 j 性状的隶属函数值,$X_{j\min}$ 为各品种 j 性状最小值,$X_{j\max}$ 为各品种 j 性状的最大值;r_i 为入选性状隶属函数值与隶属函数均值的相关系数,$|ri| \div \sum_{i=1}^{n}|ri|$ 为指数权数,表示第 i 个性状在所有指标中的重要程度;$\Delta_{0i}(k)$ 表示 k 时刻两比较序列的绝对差,即 $\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$,$\Delta_{\max}$ 和 $\Delta_{\min}$ 分别表示所有比较序列各个时刻绝对差中的最大值和最小值,分辨系数 $\rho = 0.5$。

2　结果与分析

2.1　PEG-6000 模拟干旱胁迫浓度的确定

根据前期预实验分析结果,本试验选取萌发期抗旱性表现强、中、弱的 3 份材料定亚 17、陇亚 8 号和 2011621080,筛选适宜进行种子萌发期抗旱性鉴定的 PEG-6000 溶液浓度。从统计分析结果看出(表 2),不同浓度 PEG-6000 处理对 3 份材料发芽率、根长、根鲜重、芽长和芽鲜重的影响差异有统计学意义。PEG-6000 浓度为 18% 时,3 份材料的芽长、芽鲜重均与对照和 20% 浓度差异显著;当浓度

大于18%时不同胡麻种质幼苗已很难继续生长。抗旱性弱的品种对PEG-6000处理比较敏感,浓度为14%时发芽率差异显著;PEG-6000浓度低于18%时,抗旱性表现强和中等品种的发芽率之间差异不显著,大于18%时抗旱性表现强和弱的品种发芽率降低50%左右;浓度为22%时抗旱性中等的陇亚8号发芽率亦降低50%左右。因此,综合不同浓度对测定性状的影响,本研究选取18%作为胡麻种质萌发期抗旱鉴定的标准PEG-6000溶液浓度。

2.2　试验材料及处理的代表性分析

本试验采用PEG-6000溶液对161份胡麻种质进行干旱胁迫处理,从各测量指标的统计分析可知(表3),干旱胁迫对胡麻萌发期测量性状均有显著影响,除对照发芽率的变异系数(3.706%)外,其他性状变异系数都在20%以上,干旱胁迫使发芽率降低44.31%,根长减少19.52%,根鲜重下降52.11%,芽长降低67.16%,芽鲜重下降49.39%,经*t*测验,品种间各性状成对数据均达到差异极显著水平。说明本试验所选取的胡麻种质类型丰富,处理效果明显,具有较好代表性。

2.3　胡麻种质单项指标的抗旱性分析

作物的抗旱性是环境和基因互作、多基因控制的数量遗传性状,通过不同时期各种性状指标发生一系列变化表现出来。本研究根据单项抗旱系数公式分别计算各性状的抗旱系数(表3),统计分析表明,不同品种间同一性状的抗旱系数差异较大,*DC*的变异系数均在25%以上,且同一品种各性状间的抗旱系数也存在较大差异。从表4可以看出,在同一组区间各性状的单项抗旱系数分布次数和频率相差较大,36.64%的发芽率抗旱系数$DC \geqslant 0.6$,57.15%的根长抗旱系数$DC \geqslant 0.6$,23.60%的根鲜重抗旱系数$DC \geqslant 0.6$,3.73%的芽长抗旱系数$DC \geqslant 0.6$,21.74%的芽鲜重抗旱系数$DC \geqslant 0.6$,表明胡麻种质各性状对干旱胁迫的敏感程度依次为芽长、芽鲜重、根鲜重、发芽率、根长,同一品种不同性状的抗旱系数并不完全一致,甚至有较大差异。所以,用单一性状的抗旱系数来评价胡麻的抗旱性都存在片面性和不稳定性,必须用多个性状进行综合评价才具有科学性。

2.4　供试材料的综合抗旱性评价

种子萌发是一个极复杂的生理生化过程,因此评价植物抗旱性时需要进行多性状的综合考虑,为了能够比较全面地反映胡麻种质萌发期抗旱性,本研究采用模糊隶属函数与综合抗旱系数相结合的方法对其抗旱性进行综合评价,根据抗旱性量度值对161材料进行抗旱性排序(表1),其值越大表示抗旱性越强。

从表5看出,各性状的隶属函数值与综合抗旱系数呈极显著正相关,根据对抗旱性量度值的聚类分析,将161份种质分为5类,其中1类2份,占1.24%;2类15份,占9.32%;3类28份,占17.39%;4类82份,占50.93%;5类34份,占21.12%。

2.5　不同类型种质的平均抗旱性比较

由于不同类型的胡麻种质来源、遗传背景不同,其在同一干旱胁迫条件下可能表现出不同的抗旱性。本研究将供试材料划分为国内地方品种、国内育成品种、国外引进品种3类,其中将收集材料划分到地方资源(表6)。从表1和表6看出,抗旱性在3级及以上的地方种质、育成品种和引进种质分别占同类型的33.77%、27.78%和21.21%;2份1级种质全部是国内地方资源,国内育成品种对干旱胁迫相对较敏感,;3级及以上国内地方种质中有58.06%来自甘肃、山西、内蒙古、宁夏的地方种质几乎全部在4级及以下。由于国内育成品种之间亲本遗传背景差异较小,所选供试材料份数较少,致使育成品种的平均*D*值大于地方种质。可见,不同来源的种质抗旱性差异较大,这可能与地理来源、选育条件和生境有关,建议在今后胡麻抗旱新品种选育中加大对中国甘肃地方资源的利用。

2.6　不同性状与抗旱性量度值的关联度分析

根据灰色系统理论,关联度反映的是构成该系统的各性状组成的比较数列和参考数列间的密切程度,关联度越大,说明该数列和参考数列间的变化趋势越接近,相互关系越密切。本研究以各性状单项抗旱系数为比较数列,抗旱性量度值为参考数列,进行灰色关联分析,结果显示(表7),各性状与抗旱性量度值的密切程度依次为芽长、发芽率、根长、根鲜重、芽鲜重。

3　讨论

3.1　PEG溶液浓度的选择问题

人工模拟干旱胁迫处理是植物抗旱性研究的重要方法之一。利用聚乙二醇(PEG)、甘露醇和蔗糖等高渗溶液模拟干旱胁迫处理是作物抗旱性室内鉴定的常用方法[27-29],其中所用高渗溶液中以PEG-6000较为理想,PEG-6000溶于水后既能产生强大的渗透压,使植物组织和细胞处于类似于干旱的水分胁迫之中,又因分子量大,不能穿越细胞壁进入细胞质,不会引起质壁分离伤害植物。自1979年首次以PEG-6000作为诱导剂和筛选剂筛选出抗旱的烟

表 2 不同 PEG 浓度对定亚 17、陇亚 8 号和 2011621080 测定性状的影响

Table 2 Effect of different PEG concentrations on the characters of Dingya 17, Longya 8 and 2011621080

浓度(%) Concentration	发芽率(%) Germination rate			根长(cm) Root length			根鲜重(mg) Root fresh weight			芽长(cm) Bud length			芽鲜重(mg) Bud fresh weight		
	定亚 17 Dingya 17	陇亚 8 号 Longya 8	2011621080	定亚 17 Dingya 17	陇亚 8 号 Longya 8	2011621080	定亚 17 Dingya 17	陇亚 8 号 Longya 8	2011621080	定亚 17 Dingya 17	陇亚 8 号 Longya 8	2011621080	定亚 17 Dingya 17	陇亚 8 号 Longya 8	2011621080
0	93.33a	97.33a	92.67a	6.95b	5.92bc	7.12a	17.65a	13.22a	15.75a	9.87a	10.92a	10.02a	64.48a	62.02a	57.31a
14	86.00a	89.33a	69.33b	10.02a	8.90a	6.27ab	11.01b	7.97b	6.93b	6.25b	5.02b	3.95b	39.94b	31.34b	26.69bc
16	80.00ab	80.67a	62.00b	10.67a	8.57ab	5.27b	9.17c	7.03b	6.77b	4.66c	4.03b	4.12b	31.28c	27.41b	24.29bc
18	70.00bc	82.67a	49.33c	4.88c	6.75abc	3.96c	8.66cd	6.48bc	6.01bc	5.25bc	4.26b	3.95b	31.71c	28.54b	29.41b
20	55.33cd	62.67b	40.67c	5.14c	4.23cd	2.71cd	6.96de	4.49cd	4.28cd	2.81d	2.49c	1.48c	22.13d	20.33c	21.44cd
22	51.33d	34.67c	28.00d	4.12c	2.53d	2.52d	5.25ef	3.40d	3.34d	1.61d	1.21c	1.24c	19.26d	15.61c	16.48d
24	50.67d	40.00c	21.67d	3.23c	2.47d	1.77d	4.55f	3.47d	3.52d	1.82d	1.16c	0.86c	17.12d	17.10c	16.68d

同列中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$) The different small letters in same column is significant difference at 0.05 level

表 3 供试种质各处理的指标差异性分析

Table 3 Difference analysis of tested accessions in treatment

参数 Parameter	发芽率(%) Germination rate			根长(cm) Root length			根鲜重(mg) Root fresh weight			芽长(cm) Bud length			芽鲜重(mg) Bud fresh weight		
	CK	T	*DC*	CK	T	*DC*	CK	T	*DC*	CK	T	*DC*	CK	T	*DC*
平均值 Average	91.225	50.807	0.556	3.499	2.816	0.815	9.830	4.707	0.486	6.905	2.268	0.331	40.820	20.659	0.520
标准差 *SD*	0.034	0.151	0.160	1.499	2.186	0.492	0.002	0.002	0.205	1.398	0.998	0.121	8.750	0.004	0.130
变异系数(%) *CV*	3.706	29.754	28.730	42.837	77.636	60.301	29.926	47.177	42.178	20.250	43.983	36.469	21.428	23.249	25.083
CK-T		40.418			0.683			5.120			4.637			20.160	
差数标准误 *SE*		0.012			0.209			0.000			0.135			0.001	
t 值 t value		33.107**			3.269**			17.633**			34.257**			25.632**	
P		<0.001			0.001			<0.001			<0.001			<0.001	

CK：对照处理；T：干旱胁迫处理。** 表示 0.01 显著水平 CK：CK treatments，T：Drought-stress treatments，**：Significant differences at 0.01 probability level

表 4 供试种质各指标的单项抗旱系数在不同区间的分布

Table 4 Different distributions of drought resistance coefficient of tested germplasm traits indexes

性状 Character	$1.0 \leq DC$		$0.8 \leq DC < 1$		$0.6 \leq DC < 0.8$		$0.4 \leq DC < 0.6$		$0.2 \leq DC < 0.4$		$0 \leq DC < 0.2$	
	次数 Times	频次(%) Frequency	次数 Times	频次(%) Frequency	次数 Times	频次(%) Frequency	次数 Times	频次(%) Frequency	次数 Times	频次(%) Frequency	次数 Times	频次(%) Frequency
发芽率 Germination rate	0	0	11	6.83	48	29.81	77	47.83	25	15.53	0	0
根长 Root length	41	25.47	28	17.39	23	14.29	45	27.95	24	14.91	0	0
根鲜重 Root fresh weight	6	3.73	1	0.62	31	19.25	58	36.02	62	38.51	3	1.86
芽长 Bud length	0	0	0	0	6	3.73	41	25.47	96	59.63	18	11.18
芽鲜重 Bud fresh weight	1	0.62	2	1.24	32	19.88	102	63.35	24	14.91	0	0

表 5 供试种质综合抗旱性分级及其评价数据平均值

Table 5 Comprehensive drought resistance grade and average value of evaluation data of tested accessions

参数 Parameter		抗旱级别 Drought resistance grade 1	2	3	4	5	相关系数 r	指标权数 Weight
综合抗旱系数 Comprehensive drought resistance coefficient		1.20	0.84	0.69	0.50	0.35		
χ_{ij}	发芽率 Germination rate	0.90	0.77	0.60	0.42	0.27	0.62 **	0.18
	根长 Root length	0.94	0.51	0.34	0.18	0.08	0.92 **	0.26
	根鲜重 Root fresh weight	0.58	0.39	0.34	0.19	0.10	0.80 **	0.29
	芽长 Bud length	0.96	0.65	0.50	0.36	0.17	0.69 **	0.20
	芽鲜重 Bud fresh weight	0.45	0.32	0.33	0.26	0.13	0.47 **	0.13
D 值 *D* value		0.78	0.54	0.42	0.28	0.15		

表 6 不同类型胡麻种质的平均抗旱性分析

Table 6 The analysis of average drought resistance of different types of flax germplasm

种质类型 TTP	供试份数 TN	各抗旱等级份数分布 NDDDR 1 级 Grade1	2 级 Grade2	3 级 Grade3	4 级 Grade4	5 级 Grade5	综合抗旱系数平均值 ACDC	平均 *D* 值 Average *D*
地方 Local	77	2	9	15	28	23	0.557	0.316
育成 Breeding	18	0	2	3	13	0	0.583	0.331
引进 Introduction	66	0	4	10	41	11	0.515	0.295

TTP：种质类型；TN：供试份数；NDDDR：各抗旱等级份数分布；ACDC：综合抗旱系数平均值

TTP: Type of tested germplasm, TN: Tested number, NDDDR: Numbers distribution of different drought resistance, ACDC: Average of comprehensive drought resistance coefficient

草细胞系以后，PEG-6000 被普遍应用于水稻[30]、小麦[31]、玉米[32]、亚麻[17-18]、谷子[33]、绿豆[34]、菜豆[35]等作物耐旱性研究。PEG-6000 浓度的使用问题仍在探索中，不同作物所采用的的浓度不尽相同，即使同一种作物不同学者间也有差异。

表 7 各性状与抗旱性量度值的关联度及位次

Table 7 Relation and order of tested characters and drought resistance value

性状 Character	关联度 Correlation degree	位次 Ranking
发芽率 Germination rate	0.7916	2
根长 Root length	0.7861	3
根鲜重 Root weight	0.7856	4
芽长 Seedling height	0.8174	1
芽鲜重 Seedling weight	0.7624	5

本试验选取定亚 17、陇亚 8 号和 2011621080 作为筛选适宜 PEG-6000 溶液浓度材料，设置了 7 个浓度梯度。结果表明，不同浓度 PEG-6000 处理对胡麻种质发芽率、根长、根鲜重、芽长和芽鲜重的影响存在显著差异，低浓度 PEG-6000 溶液对胡麻根系的生长具有一定的促进作用，这可能与根系发达有利于吸收周围水分有关。本试验中 PEG-6000 浓度低于 18% 时，抗旱性表现强和中等品种的发芽率之间无显著差异；浓度为 18% 时抗旱性弱的种质根长比对照降低了 50% 左右，3 份材料的芽长、芽鲜重均与对照和 20% 浓度差异显著；浓度大于 18% 时幼芽已很难继续生长，因此，本研究选取 18% 作为胡麻萌发期抗旱性鉴定的标准 PEG-6000 溶液浓度。

3.2 抗旱性评价指标的选择问题

植物的抗旱性是由多基因控制的一个较为复杂的综合性状，通过任何单一性状来对其抗旱性进行评价，很难获得准确有效的结果，应从形态、生理生化指标中筛选出有显著影响的几个主要抗旱指标，进行综合分析判断才更有效[36-37]。

本研究选取胡麻萌发期的 5 个性状进行抗旱性综合评价，通过单项指标抗旱系数分析，表明胡麻种质对干旱胁迫的敏感程度依次为芽长、芽鲜重、根鲜重、发芽率、根长；通过关联度分析，各性状与抗旱性量度值的密切程度依次为芽长、发芽率、根长、根鲜重、芽鲜重。由此看出，在这 5 个性状中，由于 PEG-6000 溶液对根长具有一定的促进作用，导致 57.15% 的根长抗旱系数大于等于 0.6，因此，根长不适宜作为胡麻种质萌发期抗旱性评价指标，芽长和发芽率与其抗旱性关联较密切，适合作为胡麻种质萌发期抗旱性评价首选指标。在胡麻种质萌发期抗旱性的后期研究中，我们将农艺性状和生理生化指标结合起来综合分析胡麻种质萌发期抗旱性。

3.3 抗旱性评价方法的选择问题

抗旱性的综合评价不仅需要选择适宜的评价指标，而且要有合适的评价方法，多指标多方法相结合的综合评价被广泛应用[3,38-42]。对于抗旱性评价的方法，

大多数采用等权重的综合评价方法,忽视了各项指标的不同重要程度。本研究利用隶属函数法与抗旱性量度值,结合单项指标抗旱系数、综合抗旱系数和灰色关联度分析,对胡麻种质资源的抗旱性综合评价值做出评判,消除因各指标单位不同带来的差异,同时结合指标变异系数来确定每一个指标在抗旱性评价体系中的权重,对与抗旱性相关性大的指标分配较高的比重,这种方法既考虑了各指标间的相互关系,又考虑到各指标的重要性,具有可比性,使评价结果更为准确。

4　结论

本研究利用不同浓度 PEG-6000 对胡麻种质萌发期进行干旱胁迫处理,表明 PEG-6000 溶液浓度为 18% 时,抗旱性较弱种质各项测量指标下降了 50% 左右,因此,18% 可作为胡麻种质萌发期干旱胁迫的最佳 PEG-6000 溶液浓度;根据聚类分析将供试种质划分为 5 类,表明芽长和发芽率对干旱胁迫反应较其他性状敏感,可作为胡麻种质萌发期抗旱性评价的适宜指标;同时发现不同来源的种质抗旱性差异较大,建议在今后胡麻抗旱新品种选育中加大对中国甘肃地方资源的利用。

参考文献

[1]　林汉明,常汝镇,邵桂花,等. 中国大豆耐逆研究[M]. 北京:中国农业出版社,2009:1-60
[2]　赵利,党占海,张建平,等. 不同类型胡麻品种资源品质特性及其相关性研究[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(5):6-9
[3]　祁旭升,王兴荣,许军,等. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价[J]. 中国农业科学,2010,43(15):3076-3087
[4]　姚玉璧,邓振镛,王润元. 气候暖干化对甘肃马铃薯生产的影响[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(3):16-20
[5]　姚玉璧,王毅荣,李耀辉,等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学,2005,27(5):146-152
[6]　姚玉璧,王润元,杨金虎,等. 黄土高原半干旱区气候变暖对胡麻生育和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(10):2635-2642
[7]　张永平,王志敏,黄琴,等. 不同水分供给对小麦叶与非叶器官叶绿体结构和功能的影响[J]. 作物学报,2008,34(7):1213-1219
[8]　宋凤斌,戴俊英. 玉米茎叶和根系的生长对干旱胁迫的反应和适应性[J]. 干旱区研究,2005,22(2):256-258
[9]　张微,李春艳,曹连莆,等. 春性小黑麦材料抗旱性的比较研究[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2009,27(5):529-535
[10]　Almansouri M, Kinet J M, Lutts S. Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat[J]. Plant Soil,2001,231(2):243-254
[11]　El-Sayed N E, E1-Aref H M, Taghian A S. Molecular genetic markers in tomato Soma clones selected for drought to lerance[J]. Assent J Agric Sci,2002,33(5):159-180
[12]　陈荣敏,杨学举,梁凤山,等. 利用隶属函数法综合评价冬小麦的抗旱性[J]. 河北农业大学学报,2002,25(2):7-9
[13]　王敏,张从宇,马同富,等. 大豆品种苗期抗旱性研究[J]. 中国油料,2004,26(3):29-32
[14]　祁旭升,刘章雄,关荣霞,等. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究[J]. 作物学报,2012,38(4):665-674
[15]　石仓吉. 亚麻品种抗旱性评价研究[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(5):1-5
[16]　梁国玲,周青平,颜红波. 聚乙二醇对羊茅属 4 种植物种子萌发特性的影响研究[J]. 草业科学,2007,24(6):50-53
[17]　邢鹏,杨玉玲,刘广辉,等. 水分胁迫下亚麻种子萌发的生理响应[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2011,29(1):79-82
[18]　胡新元,周义龙. PEG 胁迫对胡麻种子萌发的影响[J]. 甘肃农业科技,2011(7):22-23
[19]　吴文荣,郜玉珍,康建伟,等. PEG 模拟干旱胁迫对亚麻幼苗形态和抗旱性的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(32):16032-16034
[20]　朱学海,宋海燕,赵治海,等. 用渗透剂胁迫鉴定谷子芽期耐旱性的方法研究[J]. 植物遗传资源学报,2008,9(1):62-67
[21]　郝建辉. 扁蓿豆抗旱性鉴定及抗旱指标的筛选[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2006
[22]　秦岭,杨延兵,管延安,等. 不同生态区主要育成谷子品种芽期耐旱性鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(1):144-150
[23]　梁建秋,张明荣,吴海英. 大豆抗旱性研究进展[J]. 大豆科学,2001,29(2):341-346
[24]　孔照胜,武云帅,岳爱琴,等. 不同大豆品种抗旱性生理指标综合分析[J]. 华北农学报,2001,16(3):40-45
[25]　张海燕,李贵全. 大豆抗旱性与生理生态指标关系的研究[J]. 农艺科学,2005,21(8):140-142
[26]　尹利,逯晓萍,傅晓峰,等. 高丹草杂交种灰色关联分析与评判[J]. 中国草地学报,2006,28(3):21-25
[27]　Hohl M, Schopfer P. Water relations of g rowing maize coleoptiles:comparison between mannitol and polyethylene glycol 6000 as external osmotica for adjusting turg or pressure[J]. Plant Physiol,1991,95:716-722
[28]　Bouslama M. Stress tolerance in soybeans evaluation[J]. Crop Sci,1984,24:933-937
[29]　Ravikumar R L, Patil B S, Salimath P M. Drought tolerance in sorghum by pollen selection using osmotic stress[J]. Euphytica,2003,133:371-376
[30]　安永平,强爱玲,张媛媛,等. 渗透胁迫下水稻种子萌发特性及抗旱性鉴定指标研究[J]. 植物遗传资源学报,2006,7(4):421-426
[31]　刘宁涛. PEG-6000 模拟干旱胁迫下春小麦萌芽期抗旱性评价[J]. 小麦研究,2009,30(2):10-14
[32]　吴妍,张岁岐,刘小芳,等. 水分胁迫及复水条件下外源 Ca^{2+} 对玉米幼苗根系水力导度及生长的影响[J]. 作物学报,2010,36(6):1044-1049
[33]　刘天鹏,董孔军,何继红,等. 糜子育成品种芽期抗旱性鉴定与评价研究[J]. 植物遗传资源学报,2014,15(4):746-752
[34]　王兰芬,武晶,景蕊莲,等. 绿豆种质资源芽期抗旱性鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2014,15(4):498-503
[35]　李龙,王兰芬,武晶,等. 普通菜豆种质资源芽期抗旱性鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(4):600-605
[36]　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
[37]　Kamoshita A, Babu R C, Boopathi N M, et al. Phenotypic and genotypic analysis of drought-resistance traits for development of rice cultivars adapted torainfed environments [J]. Field Crops Res,2008,109:1-23
[38]　罗俊杰,石有太,陈玉梁,等. 甘肃不同色彩陆地棉抗旱指标筛选及评价研究[J]. 核农学报,2012,26(6):952-959
[39]　Condon A G, Richards R A, Rebetzke G J, et al. Breeding for high water use efficiency[J]. J Exp Bot,2004,55:2447-2460
[40]　Subrahmanyam D, Subash N, Haris A, et al. Influence of water stress on leaf photosynthetic characteristics in wheat cultivars differing in their susceptibility to drought[J]. Photosynthetica,2006,44:125-129
[41]　陈玉梁,石有太,罗俊杰,等. 干旱胁迫对彩色棉花农艺、品质性状及水分利用效率的影响[J]. 作物学报,2013,39(11):2074-2082
[42]　鲁守平,孙群,洪露,等. 不同种源地乌拉尔甘草发芽期抗旱性鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2007,8(2):189-194