

# 苜蓿种质资源萌发期抗旱指标筛选及抗旱性综合评价

王 焱<sup>1</sup>, 沙柏平<sup>1</sup>, 李明雨<sup>1</sup>, 李 雪<sup>1</sup>, 高雪芹<sup>1,2</sup>, 伏兵哲<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup>宁夏大学农学院, 银川 750021; <sup>2</sup>西北土地退化与重建教育部重点实验室, 银川 750021;

<sup>3</sup>宁夏优势特色作物现代分子育种重点实验室, 银川 750021)

**摘要:** 为筛选苜蓿萌发期抗旱性鉴定指标以及抗旱苜蓿种质材料, 为苜蓿抗旱新品种选育提供理论和基础材料。以 59 份抗旱性不同的国内外苜蓿种质为材料, 设置加蒸馏水和加  $-0.6$  Mpa PEG-6000 水溶液 2 个处理, 研究了与抗旱性相关的根长、芽长、发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数和根芽比等 7 个指标的变化, 采用相关性分析、隶属函数、综合抗旱系数、灰色关联、逐步回归和聚类分析相结合的方法, 对 59 份苜蓿种质萌发期抗旱性进行综合评价及抗旱指标筛选。结果表明: 干旱胁迫对苜蓿萌发期各指标均有显著影响。筛选出萌发期抗旱性较强的苜蓿种质材料有草原 3 号、赛迪 7、WL903, 可作为抗旱育种和抗旱机理研究材料。根长、发芽率和活力指数对干旱胁迫的反应较其他指标敏感, 可作为苜蓿品种抗旱性鉴定及抗旱品种选育时优先考虑的指标。试验结果也说明采用以抗旱性度量值(D 值)为主要参数, 以加权抗旱系数(WDC 值)作为辅助参数的综合评价方法进行苜蓿抗旱性综合评价、评价指标筛选是合理准确的。

**关键词:** 苜蓿; 萌发期; 抗旱性; 综合评价

## Indices Screening and Comprehensive Evaluation of Drought Resistance in Alfalfa Germplasm Resources at Germinating Stage

WANG Yan<sup>1</sup>, SHA Bai-ping<sup>1</sup>, LI Ming-yu<sup>1</sup>, LI Xue<sup>1</sup>, GAO Xue-qin<sup>1,2</sup>, FU Bing-zhe<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup>Agricultural College, Ningxia University, Yinchuan 750021; <sup>2</sup>Key Laboratory of Northwest Land Degradation and Reconstruction,

Ministry of Education, Yinchuan 750021; <sup>3</sup>Key Laboratory of Modern Molecular Breeding of

Superior Characteristic Crops in Ningxia, Yinchuan 750021)

**Abstract:** In order to screen the drought resistance identification index and the drought-resistant alfalfa germplasm materials, and provide the theory and basic materials for the breeding of new drought-resistant varieties. In this study, we investigated the changes of root length, bud length, germination potential, germination rate, germination index, vitality index and root bud ratio of 59 alfalfa germplasms with different drought resistance that are from different region under drought stress condition, which was stimulated by using two treatments including distilled water and  $-0.6$  MPa PEG-6000 water solution. Correlation analysis, subordinate function coefficients, comprehensive drought resistance coefficient, grey relational analysis, stepwise regression and clustering analysis were used to evaluate the drought resistance and select evaluation indices in tested alfalfa cultivars during the germination period. The results showed that drought stress had significant effects on all indexes at the germination stage. By employment of this approach, we obtained three alfalfa genotypes, including Caoyuan NO.3, Sidey7 and WL903, which showed strong drought-resistant at the germination stage. These germplasms were selected as the research material for drought resistance breeding and drought resistance

收稿日期: 2018-09-01 修回日期: 2018-10-03 网络出版日期: 2018-11-23

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20181122.0923.001.html>

第一作者研究方向为牧草种质资源及遗传育种研究, E-mail: 649376016@qq.com

通信作者: 伏兵哲, 研究方向为牧草种质资源及遗传育种研究, E-mail: fbzhe19@163.com

基金项目: 宁夏牧草育种专项(2014NYYZ04); 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)资助项目(NXYLXK2017A01)

**Foundation project:** Ningxia Forage Breeding Projects (2014NYYZ04), Funding Project for First-class Discipline Construction (Grass Science) in Ningxia Higher Education (NXYLXK2017A01)

mechanism. Notably, root length, germination rate and vitality index were more sensitive than other indicators and could be used as a priority indicator for drought resistance identification and breeding of drought-resistant varieties. The results also showed that it is reasonable and accurate to use the comprehensive evaluation method with D value as the main index and WDC value as the auxiliary index in alfalfa to carry out comprehensive evaluation of drought resistance and screening of evaluation indicators.

**Key words:** alfalfa; germination stage; drought resistance; comprehensive evaluation

苜蓿被称为“牧草之王”,是世界上栽培最早、分布最广的优质豆科牧草之一,由于其高产稳定、适应性广、营养价值高,目前已被列为栽培牧草中优良草种的典型代表。苜蓿在全世界的种植面积已达 3330 万  $\text{hm}^2$ , 其中我国种植面积达 471 万  $\text{hm}^2$ , 居世界第三<sup>[1-2]</sup>。而且种植苜蓿能有效改土培肥、保持水土,在农业产业结构调整、生态环境治理以及丰富自然界生物多样性等方面具有极为重要的意义<sup>[3]</sup>。近年来,由于气温升高、降雨量减少以及环境的人为破坏,导致干旱日趋严重,在我国北方地区,干旱对农业生产的影响更为严重。因此,对苜蓿种质资源进行抗旱性鉴定,筛选抗旱种质材料,对苜蓿抗旱新品种选育及人工草地生产具有重要意义。

植物抗旱性鉴定与指标筛选的方法有很多,需根据不同的研究目的和所测定的指标来选择合适的方法<sup>[4]</sup>。大量学者长期的研究与实践表明,PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫具有稳定性强、灵敏度高和操作简单等优点,在水稻、大豆、油菜、番茄、牧草等植物萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选上被广泛应用<sup>[5]</sup>。本研究以 59 份苜蓿种质为材料,通过 PEG-6000 溶液进行萌发期模拟干旱胁迫,通过芽长、根长、发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数和根芽比等指标的鉴定分析,利用综合评价法从 59 份苜蓿种质资源中筛选出了萌发期抗旱性强的苜蓿种质材料,以及与抗旱性相关的指标,为苜蓿抗旱新品种选育、抗旱机理的研究提供理论依据和基础材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验选用的 59 份苜蓿种质材料详细信息来源见表 1。

### 1.2 试验设计

试验于 2016 年 10-12 月在宁夏大学草业科学牧草育种实验室进行。每份种质材料中挑选大小均匀一致、饱满的种子,用 0.1% 的  $\text{HgCl}_2$  消毒 8 min 后用蒸馏水冲洗 5 次,用滤纸吸干后,均匀地置于铺有 2 层滤纸的培养皿(直径 10 cm,高 2 cm)中,

每个培养皿放置 100 粒种子。每份材料分成对照和胁迫处理 2 组,对照组加入 6 mL 蒸馏水,处理组加入 6 mL 渗透势为  $-0.6 \text{ Mpa}$  (质量浓度为 17.6%) 的 PEG-6000 溶液,每组处理 5 次重复。培养皿置于 RXZ-1000B 型人工气候箱,培养条件为昼/夜温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}/20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,湿度为 60%,光照/黑暗时间为 12 h/12 h,光照强度为 5000 lx。以胚根突破种皮且达到 1/2 种子长为发芽标准,每天观察 1 次种子发芽情况,记录发芽种子数和发霉种子数,对照组每 2 天补充适量蒸馏水,胁迫组每 2 天更换 1 次滤纸并补充相应量的 PEG 溶液以维持培养皿内渗透势。进行到第 17 天结束发芽试验。

### 1.3 测定指标

(1) 芽长 (BL, bud length)、根长 (RL, root length): 试验结束后,从每个培养皿中随机选取 10 株生长正常的种苗,用直尺测量芽长和根长。

(2) 根芽比 (RBR, root bud ratio): 根长与芽长的比值。

(3) 发芽率 (GR, germination rate) = 发芽结束时正常发芽种子数 / 供试种子数  $\times 100\%$ 。

(4) 发芽势 (GP, germination potential) = 发芽 5 d 时正常发芽的种子数 / 供试种子数  $\times 100\%$ 。

(5) 发芽指数 (GI, germination index) =  $\sum (G_t / D_t)$ , 其中:  $G_t$  为第  $t$  日的发芽数,  $D_t$  为对应的发芽天数。

(6) 活力指数 (VI, vitality index) =  $GI \times S$ ,  $S$  为平均苗长。

### 1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 2007 进行数据统计、分析和表格编制及隶属函数分析,用 DPS 进行灰色关联分析,用 SPSS 21.0 进行相关性分析及主成分分析。

**1.4.1 抗旱系数** 根据所测得的各项指标数据,分别计算对照和处理各指标的平均值。然后用公式 (1) 将原始数据进行转换,求得各指标性状的抗旱系数<sup>[6]</sup>,并进行相关分析。

$$\text{单项抗旱系数 (DC)} = \frac{\text{处理测定值}}{\text{对照测定值}} \times 100\% \quad (1)$$

表1 供试苜蓿种质材料类型及来源

Table 1 Information of alfalfa germplasms used in this study

编号 Numbers	名称 Name	种质类型 Germplasms type	来源 Origin	编号 Numbers	名称 Name	种质类型 Germplasms type	来源 Origin
1	巨能7	商业品种	克劳沃公司	31	安吉斯	地方品种	甘肃农业大学
2	阿尔冈金	商业品种	克劳沃公司	32	驯鹿	商业品种	克劳沃公司
3	中苜3号	育成品种	宁夏草原站	33	巨能CR	商业品种	克劳沃公司
4	草原3号	育成品种	内蒙古农业大学	34	礼县	地方品种	甘肃农业大学
5	MT3015	商业品种	克劳沃公司	35	甘农1号	育成品种	甘肃农业大学
6	VNS	商业品种	克劳沃公司	36	甘农2号	育成品种	甘肃农业大学
7	4030	商业品种	克劳沃公司	37	皇冠	商业品种	克劳沃公司
8	中苜1号	育成品种	北京畜牧所	38	WL903	商业品种	北京正道公司
9	SPYDER	商业品种	克劳沃公司	39	杂6	育种材料	甘肃农业大学
10	3010	商业品种	克劳沃公司	40	Tecun	育种材料	甘肃农业大学
11	巨能(耐湿)	商业品种	克劳沃公司	41	赛迪5	商业品种	百绿集团
12	巨能SALT	商业品种	克劳沃公司	42	三德利	商业品种	百绿集团
13	赛迪7	商业品种	百绿集团	43	WL440HQ	商业品种	北京正道公司
14	CW200	商业品种	克劳沃公司	44	猎人河	引进材料	甘肃农业大学
15	4010	商业品种	克劳沃公司	45	甘农6号	育成品种	甘肃农业大学
16	巨能551	商业品种	克劳沃公司	46	挑战者	商业品种	宁夏草原站
17	甘农4号	育成品种	甘肃农业大学	47	罗马尼亚	引进材料	甘肃农业大学
18	旱地巨能	商业品种	克劳沃公司	48	WL656	商业品种	北京正道公司
19	Nataw wakaba	育种材料	甘肃农业大学	49	0129 苏联	育种材料	甘肃农业大学
20	爱开夏	育种材料	甘肃农业大学	50	美国1号	引进材料	甘肃农业大学
21	美11	育种材料	甘肃农业大学	51	巨能2号	商业品种	克劳沃公司
22	标杆(ZHMX)	育种材料	北京正道公司	52	拉达克	引进材料	甘肃农业大学
23	先行者	商业品种	北京正道公司	53	康赛	商业品种	宁夏草原站
24	盐宝	商业品种	北京正道公司	54	罗默	引进材料	甘肃农业大学
25	北方SLT	商业品种	猛犸种业	55	德国	引进材料	甘肃农业大学
26	保定	地方品种	北京畜牧所	56	超音速	商业品种	克劳沃公司
27	敖汉	地方品种	北京畜牧所	57	威廉斯	引进材料	甘肃农业大学
28	甘农3号	育成品种	甘肃农业大学	58	和田	地方品种	甘肃农业大学
29	金皇后	商业品种	克劳沃公司	59	东德	引进材料	甘肃农业大学
30	74-56	育种材料	甘肃农业大学				

$$\text{综合抗旱系数(CDC)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC \quad (2)$$

$$1.4.2 \text{ 权重 } W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

根据公式(3)计算因子权重系数( $W_i$ )<sup>[5]</sup>,式中, $P_i$ 为第*i*个综合指标贡献率,表示第*i*个指标在所有指标中的重要程度。

$$1.4.3 \text{ 隶属函数值 } U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

按公式(4)<sup>[7]</sup>计算各综合指标的隶属函数值 $[U(X_i)]$ , $X_i$ 表示第*i*个测定指标; $X_{\min}$ 表示第*i*个测定指标最小值; $X_{\max}$ 表示第*i*个测定指标最大值。

$$1.4.4 \text{ 抗旱性度量值 } D = \sum_{i=1}^n [U(X_i) \times W_i] \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

根据因子权重 $W_i$ 和隶属函数值 $U(X_i)$ ,按公式(5)计算抗旱性度量值 $D$ <sup>[8-9]</sup>。

1.4.5 权重系数及加权抗旱系数 以各指标DC值为比较序列, $D$ 值为参考序列进行灰色关联度分析,获得各指标两者间的关联度( $\gamma_D$ ),根据各性状

关联度( $\gamma_i$ ),按公式(6)计算各性状指标权重系数 $oi(\gamma)$ ,根据公式(7)计算加权抗旱系数WDC<sup>[10]</sup>。其中, $\gamma_i$ 为各指标关联度。

$$oi(\gamma) = \gamma_i \div \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad (6)$$

$$WDC = \sum_{i=1}^n [DC \times oi(\gamma)] \quad (7)$$

以各指标DC值及WDC值进行灰色关联度分析,获得两者间的关联度( $\gamma_{WDC}$ )。对基于苜蓿种质D值进行聚类分析,划分抗旱级别;并分别以D值、CDC值和WDC值为参考序列,对各指标DC值进行逐步回归分析,求得回归方程。

## 2 结果与分析

### 2.1 苜蓿种质材料各性状测定值和抗旱性分析

苜蓿种质材料各性状平均值的差异显著性分析结果表明(表2),干旱胁迫对供试各种质的性状均有显著影响,处理间差异均极显著( $P < 0.01$ ),品种间差异也达极显著水平( $P < 0.01$ ),种质间各性状均



表 2(续)

编号 Number	发芽势 (%)		发芽率 (%)		根长 (cm)		芽长 (cm)		根芽比		发芽指数		活力指数		抗旱系数		
	GP	抗旱系 数 DC	CK	T	CK	T	CK	T	RBR	抗旱系 数 DC	GI	抗旱系 数 DC	CK	T	CK	T	抗旱系 数 DC
38	85.00	53.00	86.20	85.80	1.00	5.25	3.45	0.66	2.98	1.76	5.23	2.97	68.08	17.33	560.30	71.31	0.13
39	72.60	7.00	73.80	36.40	0.49	5.35	2.41	0.45	2.44	2.19	6.28	2.87	55.37	5.70	431.34	15.92	0.04
40	83.20	24.60	84.00	54.60	0.65	5.77	2.72	0.47	2.50	2.30	5.02	2.18	73.16	10.16	605.31	33.15	0.05
41	76.40	27.60	77.00	41.80	0.54	5.15	2.23	0.43	2.50	2.06	4.96	2.40	69.84	8.50	534.24	22.79	0.04
42	82.00	5.00	82.20	21.00	0.26	5.09	2.89	0.57	2.54	2.00	1.39	0.69	75.91	3.52	579.62	17.48	0.03
43	76.60	20.40	77.40	59.60	0.77	6.00	3.23	0.54	1.98	3.04	6.45	2.12	66.14	12.63	527.54	47.05	0.09
44	81.20	24.40	81.60	46.80	0.57	4.72	2.27	0.48	2.28	2.07	4.90	2.36	69.76	8.93	487.89	24.44	0.05
45	79.00	20.80	79.60	35.20	0.44	5.40	1.91	0.35	2.61	2.07	4.65	2.25	68.13	6.81	545.71	15.78	0.03
46	82.60	32.60	83.00	60.20	0.73	5.12	2.96	0.58	2.31	2.21	5.39	2.43	73.91	11.75	549.31	41.29	0.08
47	84.00	27.60	84.20	54.60	0.65	5.13	2.58	0.50	2.80	1.83	6.08	3.32	78.35	11.11	621.30	33.36	0.05
48	85.80	37.40	85.80	69.80	0.81	4.67	1.82	0.39	2.40	1.94	3.47	1.78	67.45	14.91	476.78	34.90	0.07
49	84.60	19.40	85.20	45.60	0.54	4.98	2.18	0.44	2.42	2.06	5.45	2.64	64.01	8.64	473.15	22.29	0.05
50	81.20	9.80	81.80	41.60	0.51	5.11	3.20	0.63	2.15	2.38	6.35	2.66	74.46	6.80	540.30	25.17	0.05
51	73.60	33.60	74.20	59.60	0.80	4.72	2.06	0.44	2.25	2.10	4.98	2.37	62.85	11.83	438.06	29.28	0.07
52	76.80	11.20	78.00	52.20	0.67	4.64	2.09	0.45	2.53	1.83	4.62	2.52	67.79	8.45	485.93	21.47	0.04
53	67.80	25.20	68.20	41.80	0.61	5.44	2.53	0.46	2.34	2.33	6.38	2.74	60.36	10.39	469.56	30.38	0.06
54	84.00	8.40	84.60	40.40	0.48	4.32	2.16	0.50	2.58	1.67	7.15	4.28	67.30	5.82	464.61	14.32	0.03
55	80.00	14.00	80.20	47.00	0.59	4.01	2.51	0.62	2.81	1.43	5.38	3.77	67.96	8.07	463.37	23.99	0.05
56	80.60	32.40	80.80	69.00	0.85	4.71	2.46	0.52	2.06	2.29	3.95	1.73	62.75	12.72	424.83	39.27	0.09
57	72.80	11.80	74.00	38.00	0.51	4.97	2.24	0.45	2.40	2.08	5.33	2.57	62.26	5.77	458.73	15.35	0.03
58	82.00	27.40	82.00	55.60	0.68	5.65	1.95	0.34	2.52	2.24	4.77	2.13	71.17	11.11	581.63	26.16	0.04
59	84.00	25.00	84.40	42.40	0.50	5.04	3.49	0.69	2.78	1.81	6.90	3.81	74.09	7.83	579.38	31.29	0.05
平均值	85.40	19.60	85.99	50.68	0.59	4.81	2.47	0.52	2.34	2.07	5.05	2.47	70.40	9.00	502.64	27.38	0.06
Average	0.10	0.58	0.09	0.31	0.29	0.12	0.25	0.25	0.09	0.14	0.20	0.23	0.14	0.36	0.16	0.49	0.53
变异系	1.833		1.977		0.091				0.040		0.129		1.282		9.960		
标准误																	
SE	35.908		17.862*		25.861*				46.122		-23.122		47.882		47.718		
t-test																	
value	0.0001		0.0001		0.0001				0.0001		0.0001		0.0001		0.0001		
P value																	
P value	-0.001		0.305		0.329				0.074		0.233		0.145		0.201		
相关系																	
数 r																	

CK: 正常浇水组; T: 干旱胁迫处理。\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平 (双侧) 显著相关。下同

CK: irrigated treatments, T: drought-stress treatment. \* and \*\* indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels (bilaterally), respectively. GP: germination potential, GR: germination rate, RL: root length, BL: bud length, RBR: root bud ratio, GI: germination index, VI: vitality index. The same as below

值变异系数在 0.09~0.58 之间。说明本试验所选苜蓿种质类型较丰富,所考察的性状对干旱胁迫反应较为敏感。此外,各性状在干旱胁迫和对照处理下的相关系数介于 -0.001~0.329 之间,说明不同性状对干旱胁迫的敏感性不同,单纯利用某一个性状测定值来评价种质抗旱性是有局限性的。

表 2 分析表明,7 个指标的 DC 值变异系数介于 0.23~0.58 之间,同一指标各种质材料的 DC 值具有明显差异,发芽率中 DC 值最大为 1.00,而最小值为 0.20,根芽比中 DC 值最大为 4.28,最小为 0.69,差异性较大;而且同一品种各指标的 DC 值也有明显差异,54 号材料发芽率 DC 值为 0.48,而根芽比 DC 值为 4.28,7 个指标中 DC 值最小的为 0.03,最大值为 4.28,其 DC 值差异较大;42 号材料指标中 DC 值最小的是 0.03,最大的为 0.82,差异较小,说明不同指标对干旱胁迫的敏感性不同,所测指标之间关系复杂。

相关性分析显示(表 3),所有种质材料中 7 项

指标之间均存在不同程度的相关性,其中发芽率、活力指数与发芽指数极显著( $P<0.01$ )相关,其相关系数分别高达 0.912、0.877;发芽率与活力指数极显著相关,相关系数高达 0.810。

59 份种质材料各性状 DC 值的连续变数次数分布统计分析表明(表 4),同一区间各指标 DC 值分布次数和频率差异较大。在  $0<DC\leq 0.2$  区间,活力指数分布频率最高,达到了 100.00%,对干旱胁迫最为敏感,其次为发芽指数和发芽势,频率分别为 91.53% 和 44.07%;在  $0.2<DC\leq 0.4$  区间,芽长分布频率最高,达到 61.02%;在  $0.4<DC\leq 0.6$  区间,根长分布频率最高为 64.41%;在  $0.6<DC\leq 0.8$  区间,发芽率频率最高为 33.90%;在  $0.8<DC\leq 1$  区间,发芽率频率最高,达到 15.25%。 $1\leq DC$  区间根芽比对干旱胁迫的反应最为迟钝,达到了 98.31%。综合表明各指标对干旱胁迫的反应的敏感程度依次为:活力指数>发芽指数>发芽势>芽长>根长>发芽率>根芽比。

表 3 苜蓿种质材料各表型性状抗旱系数的相关性

Table 3 Correlations of drought resistance coefficients of phenotypic traits in alfalfa germplasm materials

相关性 Correlation coefficient	发芽势 GP	发芽率 GR	根长 RL	芽长 BL	根芽比 RBR	发芽指数 GI	活力指数 VI
发芽势 GP	1						
发芽率 GR	0.686**	1					
根长 RL	0.118	0.384**	1				
芽长 BL	-0.075	-0.035	0.374**	1			
根芽比 RBR	0.041	0.162	0.392**	-0.522**	1		
发芽指数 GI	0.780**	0.912**	0.362**	-0.02	0.144	1	
活力指数 VI	0.580**	0.810**	0.709**	0.185	0.221	0.877**	1

表 4 苜蓿种质材料各指标抗旱系数在不同区间的分布

Table 4 Different distributions of drought resistance coefficients of all indices in alfalfa germplasm materials

指标 Indexes	0<DC≤0.2		0.2<DC≤0.4		0.4<DC≤0.6		0.6<DC≤0.8		0.8<DC≤1		1≤DC	
	次数	频率(%)	次数	频率(%)	次数	频率(%)	次数	频率(%)	次数	频率(%)	次数	频率(%)
	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency	Times	Frequency
根长 RL	0	0	8	13.56	38	64.41	11	18.64	2	3.39	0	0
芽长 BL	22	37.29	36	61.02	0	0	0	0	1	1.70	0	0
发芽势 GP	26	44.07	27	45.76	5	8.47	1	1.70	0	0	0	0
发芽率 GR	1	1.70	8	13.56	21	35.59	20	33.90	9	15.25	0	0
发芽指数 GI	54	91.53	5	8.47	0	0	0	0	0	0	0	0
活力指数 VI	59	100.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
根芽比 RBR	0	0	0	0	0	0	1	1.70	0	0	58	98.31

## 2.2 主成分分析

对7个指标的DC值进行主成分分析,获得特征向量、因子载荷和贡献率(表5),以便进一步确定和评价抗旱鉴定的重要指标。按照累计贡献率大于80%,可以考虑保留;其次考虑特征值大于1,可以保留的方法<sup>[11-12]</sup>。结果表明,各因子特征值中前3个因子的特征根均大于1,累计贡献率达91.93%,信息损失量为8.07%。故提取前3个因子,其贡献率分别为52.08%、21.88%、17.97%,可将原来各单项性状指标转化为3个新的相互独立的指标(用F1、F2和F3表示)。因子载荷矩阵表明(表5),F1在发芽指数、活力指数和发芽率上有较高载荷,分别为0.949、0.948、0.916;F2在芽长和根芽比上有较高载荷,分别为0.956和-0.722;F3在根长上有较高载荷,为0.732。

表5 各综合指标的系数和贡献率

Table 5 Coefficients of comprehensive indexes and their proportions

性状 Trait	因子载荷 Factor pattern		
	F1	F2	F3
根长 RL	0.599	0.254	0.732
芽长 BL	0.056	0.956	0.164
发芽势 GP	0.754	-0.089	-0.481
发芽率 GR	0.916	-0.049	-0.187
发芽指数 GI	0.949	-0.034	-0.238
活力指数 VI	0.948	0.145	0.157
根芽比 RBR	0.276	-0.722	0.589
特征根 Characteristic root	3.646	1.531	1.258
贡献率(%) Contribution rate	52.08	21.88	17.97
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	52.08	73.96	91.93
因子权重( $\omega$ ) Factor weight	0.567	0.238	0.196

## 2.3 隶属函数分析及抗旱性综合评价

试验所用苜蓿种质材料CDC值介于0.353~0.875之间,变异系数为0.179。根据CDC值<sup>[6]</sup>大小对供试苜蓿种质进行抗旱性排序(表6),59份苜蓿种质中,抗旱性排名前10位的种质材料为草原3号、WL903、驯鹿、东德、罗默、德国、3010、罗马尼亚、旱地巨能和甘农2号;抗旱性排名后10位的种质材料为巨能SALT、甘农3号、金皇后、巨能7、巨能551、中苜1号、CW200、敖汉、礼县和三德利和。

在各公因子(F1、F2和F3)特征向量和贡献率的基础上,根据公式(3)求得各公因子权重系

数( $\omega$ )(表5),以此来计算加权隶属函数值。在各公因子特征向量的基础上,根据公式(4)计算各因子隶属函数值(U)<sup>[7]</sup>,并根据各因子权重系数( $\omega$ ),对各因子隶属函数值(U)赋予相应权重系数( $\omega$ ),按公式(5)计算加权隶属函数值,作为综合抗旱性度量值(D值)<sup>[13]</sup>。据此可准确地评价供试紫花苜蓿品种的抗旱性,D值越大抗旱性越强。

供试材料D值介于0.113~0.772之间,平均值为0.393,变异系数为0.325。根据D值大小对59份苜蓿种质进行排序,抗旱性排名前10位的种质材料为草原3号、WL903、赛迪7、甘农2号、驯鹿、3010、旱地巨能、Nataw wakaba、超音速和皇冠;抗旱性排名后10位的种质材料为盐宝、巨能7、巨能CR、甘农4号、中苜1号、巨能SALT、甘农6号、甘农3号、甘农1号和礼县。除个别品种外,这与基于CDC值的抗旱性排序结果基本吻合,且抗旱性最强的种质草原3号D值较所有种质平均值高出96.44%,远高于其他品种。

供试材料WDC值<sup>[10]</sup>介于0.349~0.857之间,变异系数为0.177。根据WDC值大小对59份苜蓿种质排序,抗旱性排名前10位的种质材料为草原3号、WL903、驯鹿、东德、罗默、德国、3010、罗马尼亚、旱地巨能和甘农2号;抗旱性排名后10位的种质材料为巨能SALT、巨能7、金皇后、甘农3号、巨能551、中苜1号、CW200、敖汉、三德利和礼县。其结果与按CDC值排序基本相同,表明WDC值可以反映综合抗旱系数CDC值,且与D值关系密切(表6)。

## 2.4 DC值与D值、WDC值的灰色关联分析

对所有性状抗旱系数DC值(比较数列)与D值(参考数列)做灰色关联分析,可得到各性状DC值与D值的关联度( $\gamma_D$ )。结果显示(表7),各性状与D值的密切程度依次为:根长、发芽率、活力指数、发芽指数、芽长、根芽比、发芽势。与苜蓿种质抗旱性关系最为密切的是与植株根系密切相关的指标(如根长),其次是发芽率,它们对于干旱胁迫的反应最为直接,所受影响最大,因而根长与抗旱性关联度最大,而发芽势与抗旱性关联度最弱。根据DC值与WDC值(参考序列)做灰色关联( $\gamma_{WDC}$ ),用以辅助评价各性状与苜蓿种质抗旱性的关联度以及各种种质材料抗旱性。除根芽比外,各性状同WDC值的密切程度与各性状同D值的密切程度基本一致。

表 6 59 个苜蓿种质材料抗旱性评价的 CDC 值、D 值、WDC 值

Table 6 CDC value, D value and WDC value of drought resistance evaluation in 59 alfalfa germplasm materials

编号 Number	隶属函数 Membership function			D 值 D value	排序 Rank	CDC 值 CDC value	排序 Rank	WDC 值 WDC value	排序 Rank
	U1	U2	U3						
1	0.226	0.293	0.415	0.279	51	0.498	53	0.485	51
2	0.492	0.338	0.544	0.466	14	0.623	21	0.603	22
3	0.308	0.277	0.494	0.337	37	0.555	40	0.543	40
4	0.904	0.268	1.000	0.772	1	0.875	1	0.857	1
5	0.563	0.265	0.353	0.452	15	0.644	17	0.622	17
6	0.564	0.334	0.189	0.436	19	0.565	38	0.548	38
7	0.359	0.447	0.512	0.410	25	0.519	48	0.512	44
8	0.164	0.296	0.477	0.257	54	0.478	55	0.463	55
9	0.466	0.293	0.567	0.445	17	0.628	20	0.614	19
10	0.641	0.277	0.678	0.562	6	0.752	7	0.733	7
11	0.372	0.223	0.345	0.332	44	0.584	32	0.563	33
12	0.133	0.283	0.572	0.255	55	0.505	50	0.488	50
13	0.771	0.477	0.580	0.664	3	0.671	12	0.664	12
14	0.274	0.310	0.320	0.292	48	0.472	56	0.462	56
15	0.441	0.282	0.413	0.398	29	0.583	34	0.568	31
16	0.180	0.352	0.506	0.285	49	0.479	54	0.465	54
17	0.231	0.237	0.425	0.271	53	0.524	45	0.509	45
18	0.707	0.294	0.455	0.560	7	0.716	9	0.695	9
19	0.670	0.370	0.438	0.554	8	0.656	16	0.633	15
20	0.404	0.155	0.362	0.337	38	0.635	19	0.604	20
21	0.282	0.311	0.506	0.333	39	0.533	43	0.518	43
22	0.566	0.296	0.149	0.421	23	0.588	28	0.570	29
23	0.257	0.341	0.644	0.353	34	0.538	42	0.525	42
24	0.182	0.279	0.572	0.282	50	0.523	46	0.508	46
25	0.468	0.308	0.357	0.409	26	0.587	29	0.569	30
26	0.374	0.273	0.428	0.361	33	0.579	35	0.558	34
27	0.179	0.384	0.510	0.293	47	0.463	57	0.451	57
28	0.041	0.154	0.497	0.157	57	0.503	51	0.480	53
29	0.374	0.276	0.107	0.299	45	0.499	52	0.480	52
30	0.510	0.298	0.625	0.483	13	0.668	13	0.647	13
31	0.441	0.293	0.536	0.425	22	0.618	22	0.603	21
32	0.614	0.235	0.883	0.577	5	0.818	3	0.791	3
33	0.324	0.215	0.225	0.279	52	0.529	44	0.506	47
34	0.000	0.260	0.262	0.113	59	0.366	58	0.349	59
35	0.128	0.077	0.253	0.141	58	0.519	47	0.494	48
36	0.736	0.338	0.436	0.583	4	0.714	10	0.687	10
37	0.698	0.210	0.298	0.504	10	0.696	11	0.671	11
38	1.000	0.243	0.328	0.689	2	0.836	2	0.803	2



表 6(续)

编号 Number	隶属函数 Membership function			D 值	排序	CDC 值	排序	WDC 值	排序
	U1	U2	U3	D value	Rank	CDC value	Rank	WDC value	Rank
39	0.285	0.177	0.521	0.306	40	0.600	25	0.578	25
40	0.449	0.291	0.284	0.380	31	0.572	36	0.553	36
41	0.388	0.223	0.264	0.325	41	0.583	33	0.557	35
42	0.126	1.000	0.554	0.418	24	0.353	59	0.359	58
43	0.624	0.348	0.338	0.503	11	0.605	24	0.591	24
44	0.421	0.259	0.338	0.366	32	0.586	31	0.564	32
45	0.259	0.213	0.242	0.245	56	0.513	49	0.489	49
46	0.617	0.306	0.375	0.496	12	0.658	14	0.635	14
47	0.495	0.115	0.458	0.398	30	0.735	8	0.702	8
48	0.636	0.311	0.000	0.435	20	0.562	39	0.544	39
49	0.396	0.201	0.375	0.346	35	0.599	26	0.575	26
50	0.350	0.293	0.669	0.399	28	0.613	23	0.596	23
51	0.634	0.225	0.141	0.441	18	0.643	18	0.617	18
52	0.369	0.222	0.396	0.340	36	0.591	27	0.574	27
53	0.521	0.187	0.305	0.400	27	0.656	15	0.627	16
54	0.302	0.000	0.782	0.324	42	0.798	5	0.760	5
55	0.451	0.117	0.752	0.431	21	0.784	6	0.752	6
56	0.687	0.419	0.178	0.524	9	0.586	30	0.573	28
57	0.273	0.218	0.440	0.293	46	0.571	37	0.550	37
58	0.433	0.215	0.098	0.316	43	0.550	41	0.528	41
59	0.471	0.129	0.780	0.451	16	0.806	4	0.769	4
平均值 Mean	—	—	—	0.393	—	0.602	—	0.582	—
变异系数 CV	—	—	—	0.325	—	0.179	—	0.177	—

表 7 苜蓿种质各指标 DC 值与 D 值和 WDC 值的关联度及各指标权重

Table 7 Correlation degree between DC value of all indices and D value together with WDC value and indices weight in alfalfa germplasm materials

指标 Indexes	关联度 $\gamma_D$	排序 Rank	权重系数 Weight	关联度 $\gamma_{WDC}$	排序 Rank
根长 RL	0.6897	1	0.1704	0.7228	2
芽长 BL	0.6405	5	0.1523	0.6630	4
发芽势 GP	0.4402	7	0.0985	0.4622	7
发芽率 GR	0.6826	2	0.1503	0.6642	3
发芽指数 GI	0.6433	4	0.1422	0.6210	5
活力指数 VI	0.6795	3	0.1469	0.5718	6
根芽比 RBR	0.5692	6	0.1394	0.7797	1

## 2.5 逐步回归分析及抗旱性预测评价

分别利用供试苜蓿材料的 D 值、CDC 值、WDC 值与各性状抗旱系数进行逐步回归分析,得到回归方程(表 8),统计分析显示 3 个模型方程的决定系数  $R^2=1$ ,  $F$  检验差异极显著 ( $P<0.01$ ),说明预测值与实际值之间拟合度好(统计量  $d \approx 2$ ,  $P<0.01$ ),回归方程最优,解释能力强,预测精度高,用这 3 个方程进行供试苜蓿种质材料萌发期抗旱性评价可有效预测所测种质抗旱性的强弱,提高抗旱育种效率。根据回归方程(1),在苜蓿种质萌发期抗旱性鉴定中,与 D 值密切相关的指标,有活力指数、根长、芽长等指标,根据回归方程(2)、

表 8 苜蓿种质抗旱性模型预测

Table 8 Model predict of drought resistance in alfalfa germplasm materials

因变量 Dependent	多元逐步回归方程 Stepwise regression	决定系数 R <sup>2</sup>	F 值 F value	P 值 P value	统计量 Statistic	相关系数 r		
						D 值 D value	CDC 值 CDC value	WDC 值 WDC value
D 值 D value	$y = -0.138 + 1.325X_6 + 0.368X_1 + 0.133X_4 + 0.28X_2 + 0.022X_7 + 0.466X_5$ (1)	1	14320.850**	0.0001	1.998	1	0.738**	0.767**
CDC 值 CDC value	$y = 0.001 + 0.142X_7 + 0.117X_6 + 0.147X_3 + 0.138X_2 + 0.14X_4 + 0.147X_1 + 0.156X_5$ (2)	1	107470.048**	0.0001	2.189	—	1	0.998**
WDC 值 WDC value	$y = -0.001 + 0.13X_7 + 0.12X_6 + 0.142X_2 + 0.155X_4 + 0.105X_3 + 0.164X_1 + 0.165X_5$ (3)	1	93199.973**	0.0001	2.179	—	—	1

X<sub>1</sub>: 相对根长; X<sub>2</sub>: 相对芽长; X<sub>3</sub>: 相对发芽势; X<sub>4</sub>: 相对发芽率; X<sub>5</sub>: 相对发芽指数; X<sub>6</sub>: 相对活力指数; X<sub>7</sub>: 根芽比

X<sub>1</sub>: relative root length, X<sub>2</sub>: relative bud length, X<sub>3</sub>: relative germination potential, X<sub>4</sub>: relative germination rate, X<sub>5</sub>: relative germination index, X<sub>6</sub>: relative vigor index, X<sub>7</sub>: root bud ratio

(3) 可知, 与 CDC 值和 WDC 值密切相关的指标, 有发芽指数、活力指数、根长、发芽率、芽长等指标, 可有效鉴定苜蓿种质萌发期抗旱性, 使鉴定工作简化。

2.6 聚类分析及抗旱级别的划分

采用欧氏聚类法对参试的 59 份苜蓿种质材料的抗旱性进行聚类分析(图 1), 在欧氏距离阈值 7 处可将 59 份材料聚为 4 类, 根据聚类结果分别计算每一类材料中 CDC 值、D 值和 WDC 值的平均值(表 9)。第 I 类有 3 份材料, 占总数的 5.08%, CDC 值、D 值和 WDC 值的平均值最大, 为 0.76, 划分为极强抗旱型种质。第 II 类材料共 11 份, 占总数的 18.64%, CDC 值、D 值和 WDC 值的平均值是 0.62, 为较强抗旱型种质。第 III 类材料共 42 份, 占总数的 71.19%, CDC 值、D 值和 WDC 值的平均值是 0.51, 为较弱抗旱型种质。第 IV 类材料共 3 份, 占总数的 5.08%, CDC 值、D 值和 WDC 值的平均值是 0.35, 为极弱抗旱型种质。

2.7 不同抗旱性综合评价方法的比较

根据不同抗旱性综合评价方法的比较, 结果表明, 基于 WDC 值和基于 D 值的苜蓿抗旱性评价排序结果基本相近, 排序前 10 名的苜蓿品种基本相同。相关性分析显示(表 8), D 值、WDC 值和 CDC 值均两两之间呈极显著相关, 说明以 D 值为主要抗旱性评价指标, 以 WDC 值为辅助评价指标的苜蓿抗旱性评价是准确的。另外, 相关性分析中 CDC 值与 D 值、WDC 值也呈极显著相关, 但在分析过程中未考虑到各性状权重及其重要程度, 将其作为抗旱性评价指标还有待研究。

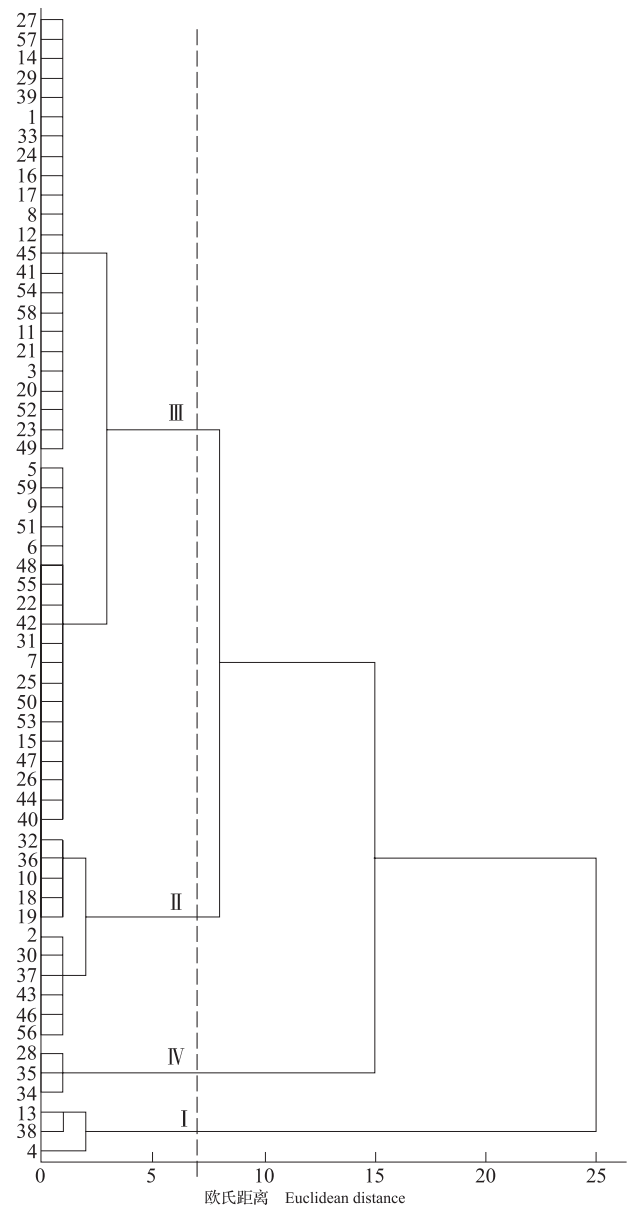


图 1 基于 D 值的苜蓿种质抗旱性系统聚类图  
Fig.1 Fuzzy clustering dendrogram of drought resistance in alfalfa germplasm based on D value

表9 基于聚类结果的 CDC 值、D 值和 WDC 值的均值

Table 9 Mean values of CDC, D and WDC values based on clustering results

聚类划分 Clustering division	CDC 值 CDC value	D 值 D value	WDC 值 WDC value	均值 Mean	抗旱等级划分 Classification of drought resistance
第 I 类 Class I	0.79	0.71	0.77	0.76	极强
第 II 类 Class II	0.68	0.66	0.53	0.62	较强
第 III 类 Class III	0.59	0.57	0.36	0.51	较弱
第 IV 类 Class IV	0.46	0.14	0.44	0.35	极弱

### 3 讨论

#### 3.1 苜蓿种质萌发期抗旱性分析方法的选择

在评价抗旱性时不同作物所利用的抗旱性鉴定方法也不同,近年来,国内外学者普遍以多指标多方法相结合的抗旱性综合评价运用较多<sup>[14-16]</sup>。以往研究中多采用等权重的方法进行抗旱性评价,忽略了各指标对干旱胁迫的敏感程度的差异<sup>[17-18]</sup>。本研究以苜蓿萌发期抗旱相关的 7 个指标,利用隶属函数法、相关分析等得到抗旱性度量值 D,结合综合抗旱系数 CDC 值和加权抗旱系数 WDC 值对萌发期苜蓿进行抗旱性评价。由于 D 值和 WDC 值既考虑了各指标的相关性,又考虑了各指标的权重,且基于 D 值的苜蓿抗旱性聚类与各材料实际抗旱表现结果更接近,因此以 D 值为综合评价指标,以 WDC 值作为辅助评价指标,可以较准确地评价苜蓿抗旱性,该方法已在胡麻<sup>[17]</sup>、油菜<sup>[18]</sup>、小麦<sup>[19]</sup>等作物上广泛应用。另外,本研究结合聚类等相关分析进行抗旱性评价,其结果与抗旱性度量值分析结果有较强的一致性。刘光辉等<sup>[10]</sup>对棉花的研究表明,采用主成分分析、隶属函数分析和灰色关联度等分析对棉花花铃期进行抗旱性评价,可筛选抗旱性棉花材料;李贵全等<sup>[20]</sup>对大豆的研究也表明,利用主成分分析结合抗旱指数 DI 和抗旱度量值 D 值对大豆抗旱性进行综合评价,可筛选抗旱性大豆材料。因此,采用综合抗旱系数、抗旱指数、聚类分析、灰色关联度等相结合的方法对苜蓿萌发期进行抗旱性评价,可以较准确地对性状与抗旱性关系进行分析,同时,这种方法也适用于其他作物的抗旱性评价。

#### 3.2 苜蓿种质萌发期抗旱性鉴定

植物抗旱性鉴定的目的是对其抗旱等级进行划分,评价供试种质的抗旱能力,进而筛选出耐旱种质<sup>[21]</sup>。本研究采用 D 值、CDC 值和 WDC 值对 59 份苜蓿种质的抗旱性进行排序的结果较为一致。另外,以 D 值为依据进行聚类分析,将 59 份苜蓿种

质分为 4 类,第 I 类种质抗旱性极强,为材料草原 3 号、赛迪 7、WL903,占总数的 5.08%;第 II 类抗旱性较强,为驯鹿、甘农 2 号等 11 份材料,占总数的 18.64%;第 III 类种质抗旱性较弱,为敖汉、威廉斯等 42 份材料,占总数的 71.19%;第 IV 类种质抗旱性极弱,共 3 份,为甘农 3 号、甘农 1 号、礼县,占总数的 5.08%。因此,本研究筛选出萌发期抗旱性极强的苜蓿种质为草原 3 号、赛迪 7、WL903,可作为干旱地区推广种植及抗旱型苜蓿育种的基础材料。

#### 3.3 苜蓿种质萌发期抗旱指标的筛选

植物受干旱胁迫后表现出抗旱性是一个复杂的过程,其抗旱能力的大小受多种机制共同影响,也会因发育阶段或所选评价指标不同而不同<sup>[10]</sup>。因此,评价指标的合理选择对作物抗旱性评价至关重要,国内外学者已对此进行了大量研究<sup>[22-23]</sup>。主要集中于生理指标、农艺指标、生化指标,而且不同的指标对干旱胁迫的响应不同。王士强等<sup>[19]</sup>对小麦抗旱相关性状的研究认为,与农艺性状相比,生理生化性状对干旱胁迫更加敏感;祁旭升等<sup>[21]</sup>认为,农艺性状指标均与综合抗旱系数有极显著相关性;岳爱琴等<sup>[23]</sup>对大豆的抗旱性研究表明,苗期生理指标与抗旱系数无显著相关性,开花结荚期生理指标与抗旱系数呈极显著相关。目前来看,可以作为抗旱性鉴定的指标尚未明确定论,有待进一步深入研究。

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<sup>[14,18]</sup>,但本试验中,各性状关联度  $\gamma_D$  和  $\gamma_{WDC}$ ,除根芽比和活力指数外,其他性状位次基本一致,与汪灿等<sup>[5]</sup>得出各性状关联度  $\gamma_D$  和  $\gamma_{WDC}$  显著相关,有所差异。原因可能是本试验的苜蓿指标测定方法与薏苡的有所不同,造成单项指标间相关性不强,这有待在今后的研究中找到一种较为准确的统一测定方法。

以综合评价值 D 值和加权抗旱系数 WDC 值作为抗旱综合评价方法,结合相关分析、灰色关联及逐步回归分析,综合筛选出根长、活力指数和发芽率

等与抗旱性密切相关的指标,这与以往研究<sup>[24-26]</sup>结果一致。

### 参考文献

- [1] 徐向南. 133份苜蓿幼苗耐旱性评价及生理基础研究. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010  
Xu X N. Drought tolerance evaluation and physiological basic research of 133 seedlings of alfalfa. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010
- [2] 李红, 李波, 马赫, 李祥利. 模拟干旱胁迫对苜蓿幼苗抗氧化酶系统的影响. 草原与草坪, 2016, 36(4): 54-58  
Li H, Li B, Ma H, Li X L. Effects on antioxidative enzymes of alfalfa seedlings under simulated drought. Grassland and Turf, 2016, 36(4): 54-58
- [3] 郑红梅. 22个苜蓿品种生长和品质特性研究及综合评价. 杨凌:西北农林科技大学, 2005  
Zheng H M. Study on the growth and quality characteristics of 22 alfalfa varieties and their comprehensive evaluation. Yangling: Northwest A&F University, 2005
- [4] 张鹤山, 陈明新, 王凤, 田宏, 蔡化, 刘洋. 18个紫花苜蓿品种苗期抗旱性综合评价. 江苏农业科学, 2012, 40(3): 168-171  
Zhang H S, Chen M X, Wang F, Tian H, Cai H, Liu Y. Comprehensive evaluation of drought resistance of 18 alfalfa varieties at seedling stage. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(3): 168-171
- [5] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜纳, 邵明波. 苜蓿种质资源萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 植物遗传资源学报, 2017, 18(5): 846-859  
Wang C, Zhou L B, Zhang G B, Zhang L Y, Xu Y, Gao X, Jiang N, Shao M B. Identification and indices screening of drought resistance in 'adlay germplasm resources at germination stage. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(5): 846-859
- [6] 梁焯赫, 王雪, 赵鑫, 曹铁华. 吉林省西部半干旱区主栽玉米品种抗旱性比较. 分子植物育种, 2018, 16(13): 4466-4472  
Liang X H, Wang X, Zhao X, Cao T H. Drought resistance comparison of main maize varieties in west semiarid areas of Jilin province. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(13): 4466-4472
- [7] 李禄军, 蒋志荣, 李正平, 邵玲玲. 3树种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取. 水土保持研究, 2006(6): 253-254, 259  
Li L J, Jiang Z R, Li Z P, Shao L L. Comprehensive evaluation on drought-resistance of three tree species and the choice of drought-resistance indexes. Research of Soil and Water Conservation, 2006(6): 253-254, 259
- [8] 贺佳, 卢健. SAS 8.2 统计软件应用教程. 北京: 人民卫生出版社, 2011: 201-203  
He J, Lu J. SAS 8.2 statistical software application tutorial. Beijing: People's Medical Publishing House, 2011: 201-203
- [9] 庞丹波, 李生宝, 潘占兵, 蔡进军, 董立国, 张源润, 王川. 基于主成分分析和隶属函数的紫花苜蓿引种初步评价. 西南农业学报, 2015, 28(6): 2815-2819  
Pang D B, Li S B, Pan Z B, Cai J J, Dong L G, Zhang Y R, Wang C. Preliminary evaluation of alfalfa introduction based on principal component analysis and subordinate function. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(6): 2815-2819
- [10] 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, 69  
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, 69
- [11] Shao X W, Han M, Han Z M, Kong W W, Yang L M. Effects of water supply on growth and photosynthesis in *Scutellaria baicalensis*. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3214-3220
- [12] 孙宗玖, 李培英, 阿不来提, 吉鹏飞. 种子萌发期 38 份偃麦草种质耐盐性评价. 草业科学, 2012, 29(7): 1105-1113  
Sun Z J, Li P Y, Abulaiti, Ji P F. Evaluation on the salt tolerance of 38 germplasm resources of *Elytrigia repens* at seed germination stage. Pratacultural Science, 2012, 29(7): 1105-1113
- [13] 田小霞, 毛培春, 张琳, 郭强, 孟林. 苜蓿属植物苗期耐盐指标筛选及耐盐性综合评价. 植物资源与环境学报, 2018, 27(2): 46-56  
Tian X X, Mao P C, Zhang L, Guo Q, Meng L. Screening on salt tolerance index and comprehensive evaluation of salt tolerance of *Medicago* Linn. Plants at Seedling Stage, 2018, 27(2): 46-56
- [14] 朱学海, 宋燕春, 赵治海, 石云素, 刘颖慧, 黎裕, 王天宇. 用渗透剂胁迫鉴定谷子芽期耐旱性的方法研究. 植物遗传资源学报, 2008, 9(1): 62-67  
Zhu X H, Song Y C, Zhao Z H, Shi Y S, Liu Y H, Li Y, Wang T Y. Methods for identification of drought tolerance at germination period of foxtail millet by osmotic stress. Journal of Plant Genetic Resources, 2008, 9(1): 62-67
- [15] 王利彬, 刘丽君, 裴宇峰, 董守坤, 孙聪姝, 祖伟, 阮英慧. 大豆种质资源芽期抗旱性鉴定. 东北农业大学学报, 2012, 43(1): 36-43  
Wang L B, Liu L J, Pei Y F, Dong S K, Sun C S, Zu W, Ruan Y H. Drought resistance identification of soybean germplasm resources at bud stage. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(1): 36-43
- [16] 孙军伟, 冀天会, 杨子光, 孟丽梅, 张珂, 宋韶帅. 玉米萌芽期抗旱性鉴定研究. 中国农学通报, 2009, 25(3): 104-107  
Sun J W, Ji T H, Yang Z G, Meng L M, Zhang K, Song S S. Study on identification of the drought resistant in maize seedling emergence stage. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(3): 104-107
- [17] 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
- [18] 谢小玉, 张霞, 张兵. 油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析. 中国农业科学, 2013, 46(3): 476-485  
Xie X Y, Zhang X, Zhang B. Evaluation of drought resistance and analysis of variation of relevant parameters at seedling stage of rapeseed. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(3): 476-485