



66个紫花苜蓿品种无性系苗期抗旱性评价

陈云鑫 马巧利 麻冬梅 刘晓霞 兰剑 邓建强 胡海英 蔡春江 项凌飞 王静

Evaluation of the drought resistance of 66 alfalfa clones at the seedling stage

CHEN Yunxin, MA Qiaoli, MA Dongmei, LIU Xiaoxia, LAN Jian, DENG Jianqiang, HU Haiying, CAI Chunjiang, XIANG Lingfei, WANG Jing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0483>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

箭豌豆种质资源苗期抗旱性综合评价

Comprehensive evaluation of drought resistance in the *Vicia sativa* germplasm at the seedling stage

草业科学. 2023, 40(1): 188 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0077>

河西地区苜蓿苗期除草剂的筛选及安全性评价

Screening and safety evaluation of herbicides in the alfalfa seedling stage in the Hexi area

草业科学. 2023, 40(6): 1608 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0327>

外源激素对于旱胁迫下黑麦草生理特性的影响及抗旱性评价

Effects of exogenous hormones on physiological characteristics and drought resistance of *Lolium perenne* under drought stress

草业科学. 2024, 41(2): 425 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0928>

甲咪唑烟酸对紫花苜蓿的安全性评价

Evaluation of the safety of imazapic for alfalfa crops

草业科学. 2022, 39(2): 343 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0231>

黄花草木樨苗期耐盐性综合评价

Comprehensive evaluation of the salt tolerance of *Melilotus officinalis* at the seedling stage

草业科学. 2022, 39(1): 123 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0022>

30份草地早熟禾苗期耐盐性综合评价

Tolerance of 30 Kentucky bluegrass varieties to NaCl stress during the seedling stage

草业科学. 2023, 40(12): 3124 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0713>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0483

陈云鑫, 马巧利, 麻冬梅, 刘晓霞, 兰剑, 邓建强, 胡海英, 蔡春江, 项凌飞, 王静. 66 个紫花苜蓿品种无性系苗期抗旱性评价. 草业科学, 2024, 41(4): 908-918.

CHEN Y X, MA Q L, MA D M, LIU X X, LAN J, DENG J Q, HU H Y, CAI C J, XIANG L F, WANG J. Evaluation of the drought resistance of 66 alfalfa clones at the seedling stage. Pratacultural Science, 2024, 41(4): 908-918.

66 个紫花苜蓿品种无性系苗期抗旱性评价

陈云鑫¹, 马巧利¹, 麻冬梅², 刘晓霞², 兰剑¹, 邓建强¹,
胡海英¹, 蔡春江¹, 项凌飞¹, 王静³

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021;
3. 宁夏工商职业技术学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为筛选出紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 最精准的评价指标和抗旱性较强的紫花苜蓿品种, 本研究对来自不同国家的 66 个紫花苜蓿品种的无性系进行了温室干旱胁迫试验。通过测定株高、鲜重、干重、根长及叶片相对含水量, 分析不同紫花苜蓿品种幼苗对干旱胁迫的敏感程度, 结合抗旱系数、鲜重抗旱指数、综合抗旱系数以及隶属函数法综合评价其抗旱性。结果表明: 株高、鲜重、干重、根长及叶片相对含水量可作为干旱条件下紫花苜蓿抗旱性评价指标。综合比较筛选出‘Dryland’‘比佛’‘陇东’‘杂 20’及‘巨能 7’为抗旱性强的紫花苜蓿品种, 适宜在干旱地区推广种植。

关键词: 干旱胁迫; 紫花苜蓿; 苗期; 生理指标; 品种筛选; 抗旱性; 综合评价

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2024)04-0908-11

Evaluation of the drought resistance of 66 alfalfa clones at the seedling stage

CHEN Yunxin¹, MA Qiaoli¹, MA Dongmei², LIU Xiaoxia², LAN Jian¹, DENG Jianqiang¹,
HU Haiying¹, CAI Chunjiang¹, XIANG Lingfei¹, WANG Jing³

(1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

2. College of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;

3. Ningxia Vocational College of Industry and Commerce, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: To identify the most accurate index for evaluating drought resistance in alfalfa and to select for drought tolerance in alfalfa, 66 alfalfa varieties from clones of diverse geographical origins were used in drought stress experiments in a greenhouse in this study. The sensitivity of different alfalfa varieties to drought stress was analyzed by measuring plant height, fresh weight, dry weight, root length, and leaf relative water content. Drought resistance was comprehensively evaluated using the drought resistance coefficient, fresh weight drought resistance index, comprehensive drought resistance coefficient, and the membership function approach. The results indicated that plant height, fresh weight, dry weight, root length, and leaf relative water content were viable metrics for assessing the drought resistance of alfalfa under water-deficit conditions. Through a comprehensive comparison, cultivars such as ‘Dryland’ ‘Permanent 101’ ‘Befo’ ‘Ondaka’ ‘Lanrelaiende’, and ‘Keshanshaertu’ were selected as drought-tolerant alfalfa cultivars, rendering them suitable for cultivation in arid regions.

收稿日期: 2023-09-08 接受日期: 2023-12-26

基金项目: 宁夏自然科学基金 (2022AAC03088)

第一作者: 陈云鑫 (1996-), 男, 河南驻马店人, 在读硕士生, 研究方向为牧草育种与栽培利用。E-mail: chen1597889@163.com

通信作者: 马巧利 (1987-), 女, 宁夏银川人, 讲师, 硕导, 博士, 主要从事牧草分子育种及抗逆性研究。E-mail: mql_2008@126.com

Keywords: drought stress; alfalfa; seedling stage; physiologic index; variety screening; drought resistance; comprehensive evaluation

Corresponding author: MA Qiaoli E-mail: mql_2008@126.com

为应对气候变化带来的挑战,育种家通过传统的选择方法和基因工程不断提高作物的抗逆性,尤其是提高作物对于干旱的耐受性^[1-2]。目前对耐旱性的研究主要集中在可以改变的表型和机理上,尽管科学家已经做了很多努力,但是对于耐旱性的提高远低于预期^[3-4]。植物的耐旱性由于受多基因控制,且受环境影响较大,遗传力低^[5]。紫花苜蓿对于干旱胁迫的响应主要取决于不同的胁迫程度、不同的生长阶段以及生理状态^[6]。苗期作为植物生长发育的开始阶段,对水分亏缺较为敏感,此时的水分胁迫不仅威胁幼苗的生存,对后期的生长、生物量的形成以及能否顺利越冬等都有一定影响^[7-8]。此外,苗期的耐旱筛选具有时间短、重复性强和简单易行等优点,因此广泛地应用于高粱(*Sorghum bicolor*)^[9]、粳稻(*Oryza sativa*)^[10]等作物抗性鉴定中。本试验亦选择苗期进行抗旱性评价。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)抗旱性鉴定首要问题是抗旱性指标的选择,抗旱性指标约有百余种,但简便、实用又准确可靠的指标却为数不多,归纳起来有形态指标、生理生化指标、生长发育指标、生产性能指标等^[11]。紫花苜蓿是一种异花授粉的同源四倍体($2n=4\times 32$),基本染色体个数为8,基因组大小为800~1 000 Mb^[12]。紫花苜蓿是高度杂合体,表现出严重的近交不亲和,因此提高其农艺性状和育种很具有挑战性^[13]。本试验在温室条件下采用扦插无性系,确保品种基因型的稳定性,可为抗旱性精准评价奠定重要的基础,为紫花苜蓿抗旱新品种选育以及生产实践提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为国内外66个紫花苜蓿品种,产地、品种名称及编号如表1所列。

1.2 试验方法

盆栽试验在宁夏大学试验基地温室进行。为确保研究基因类型的一致性,所有紫花苜蓿品种均采

用扦插的方法获得基因一致的无性系后代。待扦插成苗后,将植株转入含有珍珠岩和蛭石(V:V=1:1)的塑料花盆(高10 cm,直径8 cm)中,每盆1株,每个品种18盆。将花盆放在室温22℃、相对湿度40%的温室中生长。成苗后,所有植株修剪两次,以确保植株生长一致。4周后,将植株随机分为对照组和干旱胁迫组。对照组连续浇水以保持80%的土壤含水量,而干旱组不浇水。使用带有GS3传感器的ProCheck分别在上午和下午测定对照组每个花盆的土壤含水量。当土壤含水量低于平均水平且变化幅度大于10%时,通过适量补水将土壤水分调整到平均水平,保持干旱组植株都在相似的干旱胁迫条件下。干旱胁迫一直持续到第4天,干旱组植株含水量下降至30%时测定生长和生理指标。

1.3 测定指标和方法

土壤含水量采用MST3000+水分测定仪测定。植株高度测定植株的绝对高度(cm),即地而至植株顶端高度(不包括顶端叶片长度)。鲜重、干重采用称重法测定植株鲜重后,60℃烘干后再测定干重。根长测定主根的绝对长度(cm)。叶绿素含量测定选取顶层完全伸展的成熟叶片,用手持式SPAD-502叶绿素仪测定叶片总叶绿素的相对含量。叶片相对含水量采用称量法测定,剪取幼苗同一部位叶片30片,迅速放入已知质量的干燥干净的铝盒里,3次重复,称得鲜质量(FW),然后在铝盒中加入蒸馏水浸泡8 h,取出叶片并用吸水纸擦干叶片表面的水分,称得饱和鲜质量(WT),最后105℃下杀青,80℃下烘干至质量恒定,称得干质量(DW),利用公式:叶片相对含水量(LRWC)=(FW-DW)/(WT-DW)×100%得出叶片相对含水百分率;3次生物学重复。

1.4 抗旱性评价方法

抗旱系数(drought resistance coefficient, DRC) = Y_d/Y_w ;

抗旱指数(drought resistance index, DRI) = $(Y_d/Y_w)(Y_d/Y_{md})$;

表 1 苜蓿品种、名称及产地
Table 1 Alfalfa varieties, names, and production areas

产地 Production area	品种名称 Variety name	编号 Code	产地 Production area	品种名称 Variety name	编号 Code
中国 China	永久101 Permanent 101	1	美国 USA	挑战者 Tiaozhazhe	103
	陕北子洲 Northern Shaanxi Zizhou	5		骑士3 Qishi 3	108
	杂22 Hybrid22	7		标靶 Biaoba	111
	喀什 Kashgar	22		进口苜蓿7G4 Imported alfalfa 7G4	130
	陕北 Northern Shanxi	26		贝尼乌 Beniu	131
	杂20 Hybrid 20	29		劲能 Jinneng	138
	杂23 Hybrid 23	30		Dryland	140
	伊盟 Yimeng	31		皇冠 Phabulous	146
	杂5 Hybrid 5	33		WL168	148
	抗旱15 Drought-defying 15	36		巨能7 Magnum7	149
	兰热来恩德 Lanrelaiende	37		普沃 Puwo	155
	克山萨尔图 Keshanshaertu	39	澳大利亚 Australia	185澳大利亚 185 Australia	9
	抗旱 Drought-defying	41		肉牛中心澳大利亚 Beef Cattle Central Australia	14
	吉农一号 Jinong No. 1	43		140澳大利亚140 Australia	55
	公农一号 Gongnong No. 1	48	德国 Germany	Gymm	16
	草原符 Caoyuanfu	70		德国 Germany	47
	中牧1号 Zhongmu No. 1	82		德国大叶 Germany Daye	132
	中苜1 Zhongmu 1	84	荷兰 Holland	荷兰向阳 Holland Xiangyang	69
	中苜3 Zhongmu 3	109		赛特 Saite	150
	陇东 Longdong	114	俄罗斯 Russian	斯大林格勒 Stalingrad	21
	南苜5 South muxu 5	142		0129苏联0129 Soviet Union	71
美国 USA	罗默 Romer	2	日本 Japan	日本 Japan	59
	亚利桑那 Arizona	24	阿根廷 Argentina	阿根廷 Argentina	17
	美11-1 Usa11-1	45	法国 France	法国 France	52
	普利洛夫午 Puliluofuwu	58	哥萨克 Cossacks	哥萨克 Cossacks	73
	罗佐玛 Luoazuoma	64	捷克 Czech	捷26-2 Jie 26-2	81
	阿尔冈金 Algonquin	72	加拿大 Canada	比佛 Bifo	52
	美11Usa11	78	乌克兰 Ukraine	敖德萨 Aodesa	61
	骑士 T qishi T	93	匈牙利 Hungary	匈牙利 Hungary	76
	WL354	94	不详 unknown	Asi	23
	阿迪娜 Adrenalin	96		Pulana	42
	勇士 Yongshi	99		Ondaka	46
	康赛 Kangsai	100		Solaigob	57

综合抗旱系数 (comprehensive drought resistance coefficient, CDRC) = $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Y_d}{Y_w}$ 。

式中: Y_w 为浇水处理测定值, Y_d 为干旱处理测定值, Y_{md} 为干旱处理所有品种平均测定值。 X_{ij} 表示第 i 个品种的第 j 个综合指标值。

采用各个指标抗旱系数 DRC 进行综合评价。首先按公式 (1) 对各个指标的 DRC 值标准化处理, 然后用公式 (2) 计算各指标的标准差系数, 再用公式 (3) 计算各指标的权重系数 W_j , 最后用公式 (4) 计算各品种综合评价值 D 值, 依据 D 值对各品种抗旱性强弱进行排序, 可判断抗旱能力的大小。

$$\mu(X) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}; \tag{1}$$

$$V_j = \frac{1}{X_j} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}; \tag{2}$$

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{i=1}^m V_j}; \tag{3}$$

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_i) \times W_j]. \tag{4}$$

式中: X_j 表示第 j 个指标值, $X_{\max}$ 表示第 j 个指标的最大值, $X_{\min}$ 表示第 j 个指标的最小值。

1.5 数据统计分析

试验数据使用 Excel 2021 整理, 利用 SPSS 22.0、Origin 2022 以及 GraphPad Prism 8 对 66 个紫花苜蓿品种无性系苗期抗旱相关性状进行显著性、相关性和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下 66 个紫花苜蓿品种生长及生理指标的影响

与正常灌溉条件相比, 干旱胁迫降低了各个品种的株高、干重、鲜重及叶片含水量, 下降程度从大到小依次为叶片相对含水量 (42.59%) > 株高 (32.89%) > 鲜重 (29.44%) > 干重 (2.08%) (表 2); 而根长和叶绿素含量略有增高, 增高程度从大到小依次为根长 (43.64%) > 相对叶绿素含量 (7.00%)。此外, 叶片因为失水导致叶绿素浓度增加进而导致 SPAD 值增高, 但因为不同品种抗旱能力的差异, 根长和叶绿素 SPAD 值并未在处理前后出现明显分层。

2.2 干旱胁迫下 66 个紫花苜蓿品种生长及生理指标相关性比较

各产量相关性状的抗旱系数变化幅度较大, 平均值为 0.54~1.05, 变异系数为 0.07%~0.65%, 说明各产量相关性状对干旱胁迫表现出的敏感程度各有差异 (表 3)。其中, 叶片相对含水量抗旱系数平均

表 2 正常条件和干旱胁迫条件下 66 个紫花苜蓿品种的表型值
Table 2 Phenotypic values of 66 alfalfa varieties under control and drought treatments

处理 Treatment	性状 Trait	变幅 Range	平均值 ± 标准差 Mean ± SD	变异系数 CV/%
对照处理 Control	鲜重 Fresh weight/g	6.84~21.99	9.24 ± 2.97	0.23
	干重 Dry weight/g	1.39~7.06	0.48 ± 3.43	0.14
	株高 Plant height/cm	35.50~76.23	54.98 ± 7.13	0.13
	根长 Root length/cm	23.50~27.83	27.43 ± 6.70	0.25
	叶片相对含水量 Leaf relative water content/%	20.00~99.00	54.00 ± 9.00	0.17
	相对叶绿素含量 Relative chlorophyll content	31.80~74.00	58.60 ± 5.99	0.10
干旱处理 Drought	鲜重 Fresh weight/g	3.19~12.88	6.52 ± 1.28	0.20
	干重 Dry weight/g	1.01~6.26	0.47 ± 3.02	0.16
	株高 Plant height/cm	19.56~60.23	36.90 ± 5.75	0.16
	根长 Root length/cm	17.70~60.67	39.40 ± 8.54	0.22
	叶片相对含水量 Leaf relative water content/%	5.00~95.00	31.00 ± 8.00	0.08
	相对叶绿素含量 Relative chlorophyll content	31.80~74.00	62.70 ± 5.02	0.09

值最低，根长最高，说明不同紫花苜蓿品种在各产量相关性状上的抗旱系数之间也存在较大差异(图 1A)。通过对各产量性状抗旱系数相关性比较发现，鲜重和干重、叶片相对含水量均显著正相关，相关系数分别为 0.24 和 0.29 (图 1B)。此外，株高与根长正相关，但叶绿素含量与干重和鲜重负相关，株高、叶片相对含水量与根长正相关。

2.3 66 个紫花苜蓿品种抗旱性综合评价结果

综合 6 个抗旱性评价指标，66 个紫花苜蓿品种抗旱性评价选取前 15% 的品种为耐旱性品种，排序在后 15% 的品种为敏旱性品种 (表 4)。参试苜蓿至少在两种抗旱评价中排名靠前或靠后作为评价标

准，筛选到 15 个品种为高度抗旱类型，13 个品种为高度敏感类型。15 个高度抗旱的紫花苜蓿品种分别为‘罗默’‘Gymm’‘陕北’‘杂 20’‘杂 23’‘伊盟’‘兰热来恩德’‘克山萨尔图’‘抗旱’‘吉农一号’‘比佛’‘哥萨克’‘陇东’‘Dryland’及‘巨能 7’。13 份高度敏感型紫花苜蓿品种分别为‘亚利桑那’‘美 11-1’‘敖德萨’‘荷兰向阳’‘WL354’‘阿迪娜’‘康赛’‘骑士 3’‘贝尼乌’‘德国大叶’‘劲能’‘南苜 5’及‘赛特’。通过对不同抗旱性进行聚类分析 (图 2A)，在欧氏距离阈值 6.7 处可将 66 个品种聚为 3 大类，第 I 类有 14 个品种，占总数的 21.21%，为抗旱性较强的品种，分别为‘永久 101’‘杂 22’‘肉牛中心澳大利亚’‘杂 20’‘杂 5’‘比佛’

表 3 66 个紫花苜蓿品种产量相关性状的抗旱系数
Table 3 Drought tolerance coefficients of yield-related traits of 66 alfalfa varieties

统计量 Statistical quantity	抗旱系数 Drought resistance coefficient					
	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	株高 Plant height	根长 Root length	叶片相对含水量 Leaf relative water content	相对叶绿素含量 Relative chlorophyll content
平均值 Mean	0.76	0.89	0.67	1.05	0.54	0.97
变幅 Variation	0.34~1.35	0.43~1.19	0.35~0.10	0.75~1.46	0.16~0.95	0.53~1.73
变异系数 CV/%	0.65	0.34	0.32	0.07	0.19	0.60

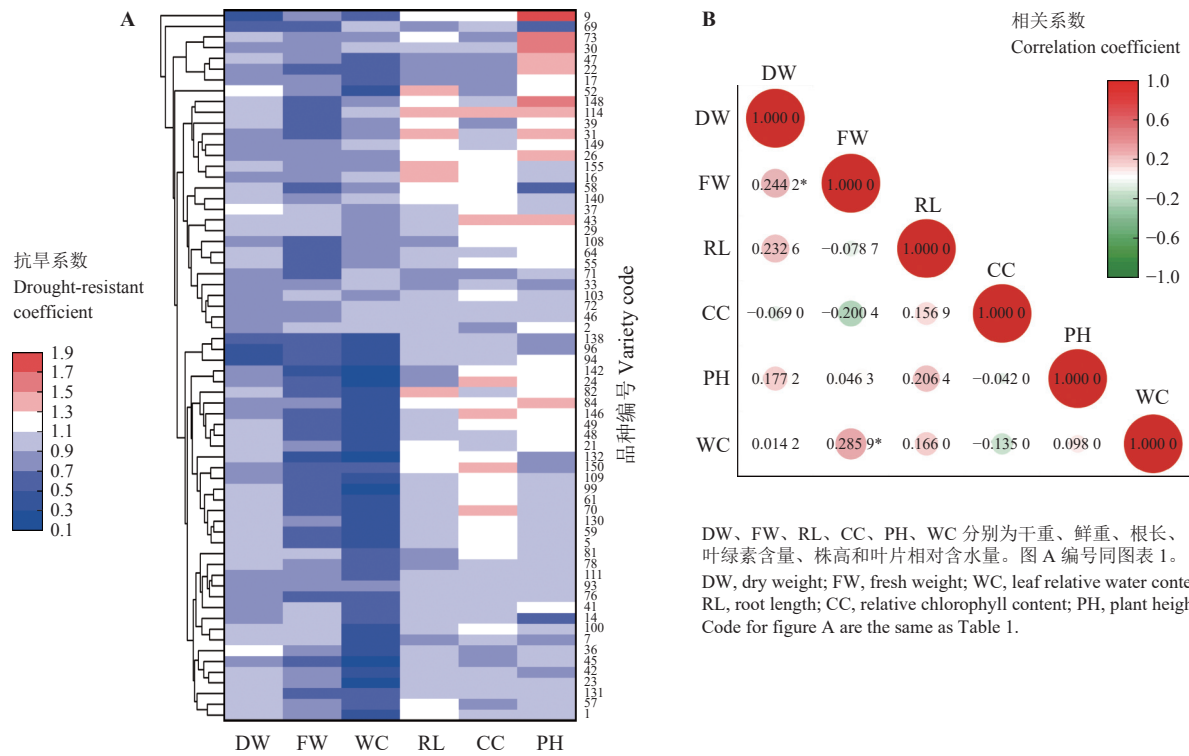


图 1 紫花苜蓿品种产量相关性状抗旱系数热图 (A) 及抗旱系数相关性比较 (B)
Figure 1 Drought resistance coefficients (A) and correlation of drought tolerance coefficients with yield-related traits of alfalfa varieties (B)

表4 66个紫花苜蓿品种和抗旱性评价
Table 4 Evaluation of the drought resistance of 66 alfalfa varieties

编号 Code	品种名称 Variety name	综合抗旱系数 CDRC	抗旱系数(鲜重) DRC (FW)	抗旱系数(干重) DRC (DW)	抗旱指数法(鲜重) DRI (FW)	抗旱指数法(干重) DRI (DW)	隶属函数法 D
1	永久101 Permanent 101	0.92	0.85	0.99	0.48	0.92	0.30
2	罗默 Romer	0.94	0.93	0.83	0.91	0.83	0.32
5	陕北子洲 Northern Shaanxi Zizhou	0.86	0.63	0.93	0.36	0.74	0.16
7	杂22 Hybrid22	0.84	0.99	0.93	0.53	0.85	0.15
9	185澳大利亚 185 Australia	0.95	0.70	0.43	0.99	0.86	0.14
14	肉牛中心澳大利亚 Beef Cattle Centre Australia	0.84	0.94	0.87	0.68	0.87	0.18
16	Gymm	1.01	0.71	0.83	0.29	1.20	0.31
17	阿根廷 Argentina	0.83	0.74	0.87	0.46	0.80	0.27
21	斯大林格勒 Stalingrad	0.93	0.73	0.92	0.43	0.91	0.24
22	喀什 Kashgar	0.86	0.62	0.85	0.25	0.88	0.23
23	Asi	0.79	0.73	0.91	0.39	0.85	0.12
24	亚利桑那 Arizona	0.82	0.56	0.78	0.25	0.79	0.03
26	陕北 Northern Shanxi	1.01	0.80	0.80	0.95	0.81	0.49
29	杂20 Hybrid 20	1.02	0.99	0.93	0.73	1.17	0.24
30	杂23 Hybrid 23	1.04	0.86	0.87	0.77	0.91	0.18
31	伊盟 Yimeng	1.02	0.59	0.82	0.32	0.81	0.32
33	杂5 Hybrid 5	0.91	0.87	0.82	0.66	1.09	0.18
36	抗旱15 Drought-defying 15	0.87	0.88	1.11	0.22	0.84	0.21
37	兰热来恩德 Lanrelaiende	1.00	0.99	1.10	0.52	1.43	0.27
39	克山萨尔图 Keshanshaertu	0.98	0.62	1.09	0.25	1.39	0.37
41	抗旱 Drought-defying	0.92	0.94	0.87	0.24	1.38	0.15
42	Pulana	0.81	0.76	0.91	0.41	1.46	0.12
43	吉农一号 Jinong No. 1	1.05	0.94	0.93	0.84	0.91	0.22
45	美11-1 Usa11-1	0.76	0.56	0.89	0.26	0.80	0.12
46	Ondaka	0.94	0.81	0.84	0.42	1.13	0.28
47	德国 Germany	0.91	0.71	0.94	0.33	0.98	0.21
48	公农一号 Gongnong No. 1	0.91	0.68	0.94	0.34	1.00	0.15
49	法国 France	0.91	0.68	1.01	0.23	1.02	0.16
52	比佛 Bifo	0.98	0.79	1.19	0.44	0.93	0.32
55	140澳大利亚 140 Australia	0.95	0.64	1.05	0.25	1.03	0.23
57	Solaigob	0.90	0.79	0.91	0.31	1.18	0.24
58	普利洛夫午 Puliluofuwu	0.91	0.68	1.02	0.37	1.09	0.22
59	日本 Japan	0.86	0.68	0.95	0.28	1.38	0.07
61	敖德萨 Aodesa	0.84	0.57	0.92	0.19	1.00	0.09

续表 4

Table 4 (Continued)

编号 Code	品种名称 Variety name	综合抗旱系数 CDRC	抗旱系数(鲜重) DRC (FW)	抗旱系数(干重) DRC (DW)	抗旱指数法(鲜重) DRI (FW)	抗旱指数法(干重) DRI (DW)	隶属函数法 D
64	罗佐玛 Luoazuoma	0.91	0.58	0.90	0.28	1.02	0.16
69	荷兰向阳 Holland Xiangyang	0.77	0.59	0.62	0.68	0.82	0.00
70	草原符 Caoyuanfu	0.93	0.68	0.95	0.89	0.72	0.17
71	0129苏联 0129 Soviet Union	0.85	0.65	0.88	0.36	1.16	0.06
72	阿尔冈金 Algonquin	0.93	0.74	0.76	0.29	1.01	0.19
73	哥萨克 Cossacks	1.04	0.90	0.91	0.96	0.62	0.14
76	匈牙利 Hungary	0.87	0.69	0.88	0.36	0.86	0.02
78	美11 Usa 11	0.87	0.84	0.99	0.28	0.82	0.02
81	捷26-2 Jie 26-2	0.91	0.99	0.92	0.36	0.81	0.08
82	中牧1号 Zhongmu No. 1	0.92	0.69	0.90	0.31	0.93	0.15
84	中苜1 Zhongmu 1	0.97	0.79	0.89	0.46	1.79	0.15
93	骑士 Tqishi T	0.92	0.86	0.86	0.77	0.95	0.18
94	WL354	0.77	0.63	0.49	0.19	0.63	0.06
96	阿迪娜 Adrenalin	0.71	0.65	0.50	0.43	0.96	-0.06
99	勇士 Yongshi	0.82	0.66	0.92	0.36	0.77	0.08
100	康赛 Kangsai	0.87	0.95	0.97	0.30	0.51	0.03
103	挑战者 Tiaozhanzhe	0.97	0.91	0.88	0.49	0.80	0.12
108	骑士3 Qishi 3	0.87	0.52	0.73	0.30	0.51	0.02
109	中苜3 Zhongmu 3	0.84	0.52	0.83	0.39	0.75	0.10
111	标靶 Biaoba	0.86	0.82	0.86	0.47	0.98	0.01
114	陇东 Longdong	1.11	0.59	1.01	0.55	0.85	0.35
130	进口苜蓿 7G4 Imported alfalfa 7G4	0.89	0.77	0.94	0.61	0.77	0.07
131	贝尼乌 Beniu	0.82	0.54	0.91	0.56	0.63	0.12
132	德国大叶 Germany Daye	0.82	0.47	1.07	0.32	0.53	0.06
138	劲能 Jinneng	0.73	0.56	0.63	0.13	0.88	-0.05
140	Dryland	1.02	0.88	1.00	0.47	1.09	0.29
142	南苜5 South muxu 5	0.80	0.47	0.83	0.38	1.04	-0.03
146	皇冠 Phabulous	0.93	0.65	0.88	0.31	0.92	0.08
148	WL168	1.03	0.60	0.91	0.31	0.44	0.23
149	巨能7 Magnum7	1.02	0.82	0.89	0.63	0.73	0.28
150	赛特 Saite	0.85	0.57	0.79	0.22	0.80	0.03
155	普沃 Puwo	1.04	0.78	0.92	0.18	0.85	0.23

FW表示鲜重, DW表示干重; 下图同。

CDRC: comprehensive drought resistance coefficient; DRC: drought resistance coefficient; DRI: drought resistance index; D: membership function method. FW: fresh weight; DW: dry weight. This is applicable for the following figures as well.

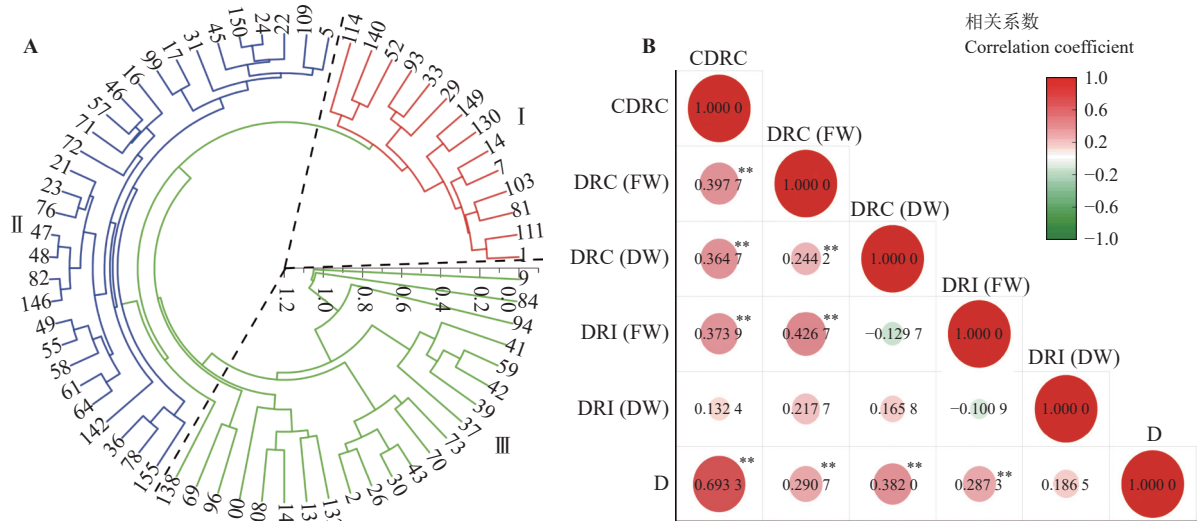


图 2 66 个紫花苜蓿品种苗期抗旱评价指标的比较

Figure 2 Cluster analysis of relative values of drought resistance indexes of 66 alfalfa varieties in seedling stage

A: 不同紫花苜蓿品种抗旱性聚类分析; B: 不同抗旱性评价方法相关性比较。**表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。

A: Cluster analysis of drought resistance evaluation of different alfalfa cultivars; B: Correlation comparison of different drought resistance evaluation methods. ** indicate significant correlation at the 0.01 level.

‘捷 26-2’‘骑士’‘挑战者’‘标靶’‘陇东’‘进口苜蓿 7G4’‘Dryland’及‘巨能 7’; 第 II 类有 30 个品种, 占总数的 45.45%, 为抗旱性较弱的品种; 第 III 类有 22 个品种, 占总数的 33.33%, 为极度敏旱性品种, 分别为‘罗默’‘185 澳大利亚’‘陕北’‘杂 23’‘兰热来恩德’‘克山萨尔图’‘抗旱’‘Pulana’‘吉农一号’‘日本’‘荷兰向阳’‘草原符’‘哥萨克’‘中苜 1’‘WL354’‘阿迪娜’‘康赛’‘骑士 3’‘贝尼乌’‘德国大叶’‘劲能’及‘WL168’。6 个抗旱性评价指标相关性分析表明, 评价方法除 DRI (DW) 之外, CDRC 和 D 与其他评价指标均具有极强的相关性 ($P < 0.01$), 说明 CDRC 和 D 值均可以作为抗旱性综合评价指标 (图 2B)。另外, 相关性分析还显示, DRC (FW) 与其他抗旱性评价指标也有较强的相关性, 与 DRC (DW)、DRI (FW) 以及 D 值均极显著正相关 ($P < 0.01$), 说明这 3 种评价方法对紫花苜蓿品种的抗旱性鉴定结果是可靠的 (图 2B)。

3 讨论

植物的抗旱性受多种因素的影响, 是基因和环境相互作用下的综合表现, 单一的指标不能准确反映抗旱性强弱^[14-15]。不同品种的紫花苜蓿在干旱环境下所采用的抗旱策略不同, 紫花苜蓿生物量是生产实践中最主要的指标。研究表明紫花苜蓿生物量、分枝密度和株高随含水量降低而降低, 呈正线性

关系^[16]; 地上生物量减少、根冠比增大和根系吸水相对增加等可提高紫花苜蓿抗旱性^[17-18]; 干旱胁迫下植物会增加根系的吸水能力, 减少水分流失以维持水分平衡^[19], 同时会增加比根长。比根长反映了单位重量根系的根长, 是一个重要的抗旱性指标, 植物通过增加比根长来增加对土壤水分的吸收, 从而提高抗旱性^[20]。近年来, 在紫花苜蓿抗旱育种过程中, 高光效特性已成为抗旱资源筛选主流方向, 有研究认为紫花苜蓿吸收的光能多以热能的形式损耗, 引起光合产物降低从而抑制其生长^[21]。因此光合作用相关指标的测定也可以作为抗旱资源筛选的重要部分^[22]。本研究中, 干旱降低了植物的干重、鲜重以及叶片相对含水量, 但短期干旱并没有完全抑制所有植株的生长, 部分植株的株高及根长在干旱胁迫后仍略有增长表现出了较强的耐旱性, 韩志顺等^[18]研究发现紫花苜蓿在干旱胁迫下, 干重和根长的变化趋势是先升后降。于思敏等^[21]研究发现轻度干旱会促进紫花苜蓿的株高生长; 而叶绿素含量在不同品种中变化差异较大, 有研究认为在干旱胁迫下叶绿素含量和抗旱性之间未表现出明显的线性关系^[13, 23]。乌日娜等^[24]研究发现, 直立型扁蓿豆 (*Medicago ruthenica*) 在干旱胁迫下表现出主动适应策略, 使体内的叶绿素含量增加; 而当进入被动适应阶段时, 其体内叶绿素含量又表现出下降的趋势。关于苜蓿的

抗旱性研究,大多将株高、地上生物量及叶片含水量作为重要性状进行综合评价^[25-27]。本研究结果也显示,叶绿素含量、鲜重及干重均未表现出相关性,因此不能很好地代表紫花苜蓿在干旱胁迫下的产量变化。而叶片相对含水量、株高、叶片及根长与紫花苜蓿的干重、鲜重均表现出较高的相关性,因此可将干重、鲜重、株高、根长及叶片相对含水量作为干旱条件下紫花苜蓿抗旱性评价的初选指标。

在以往的许多研究中,多采用表型观测和数学公式统计方法(耐旱指数、生物量或粮食产量与生理性状的相关性)来识别对干旱胁迫条件响应的基因型^[28]。目前普遍认为,采用多指标多种方法相结合的抗旱性综合评价更为可靠^[29]。本研究选择了DRC、DRI、CDRC及D值4个常用的指标对参试紫花苜蓿进行综合评价。抗旱系数DRC是较为经典的抗旱系数法,适宜于紫花苜蓿品种的筛选,该方法兼顾了植物在正常条件和逆境条件下的产量表现,可筛选出丰产的品种^[30]。抗旱指数法DRI适宜在旱地筛选高产的紫花苜蓿品种,该方法在紫花苜蓿^[31]、玉米(*Zea mays*)^[32]、小麦(*Triticum aestivum*)^[33]等品种筛选中均有广泛应用。综合抗旱系数CDRC法也被认为是一种应用广泛的抗旱评价方法。隶属函数法是一种种质资源综合评价方法,可以对多个指标进行综合评价,其结果更为科学、全面,应用也

较为广泛^[34]。本研究DRC和DRI评价结果与前人研究结果较为相似,采用DRI鲜重计算得到的结果相似性高于DRI干重,其主要原因可能是短期的干旱胁迫下,鲜重变化的幅度明显高于干重,而值越大对各种评价结果的计算影响也越大。在本研究中,通过鲜重抗旱系数DRC和鲜重抗旱指数DRI评价方法筛选出若干耐旱品种和若干敏旱品种,其结果与韩瑞宏等^[35]结果一致。总体来说,采用鲜重能够更简单、直接地评价紫花苜蓿的抗旱性,但不同抗旱性评价的结果也存在一定差异,因此本研究将鲜重、干重、株高、根长以及叶片相对含水量作为抗旱性评价的有效指标,对参试紫花苜蓿苗期的抗旱性进行评价。

4 结论

本研究采用抗旱系数DRC、抗旱指数DRI、综合抗旱系数CDRC、隶属函数法D值及聚类分析等方法综合评估其抗旱性,结果表明:综合抗旱系数CDRC和隶属函数法D值评测抗旱性最为可靠。综合多种评价方法,筛选出‘阿迪娜’‘劲能’‘WL354’‘骑士3’‘荷兰向阳’‘康赛’‘德国大叶’及‘贝尼乌’为敏旱性品种;‘Dryland’‘比佛’‘陇东’‘杂20’及‘巨能7’为抗旱性品种。

参考文献 References:

- [1] JACKSON M B, RAM P C. Physiological and molecular basis of susceptibility and tolerance of rice plants to complete submergence. *Annals of Botany*, 2003, 91(2): 227-241.
- [2] KAMOSHITA A, BABU R C, BOOPATHI N M, SHU F K. Phenotypic and genotypic analysis of drought-resistance traits for development of rice cultivars adapted to rainfed environments. *Field Crops Research*, 2008, 109(1/3): 1-23.
- [3] MITTLER R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science*, 2006, 11(1): 15-19.
- [4] SHARMA A, BASU U, MALIK N, DAWARE A, THAKRO V, NARNOLIYA L, BAJAJ D, TRIPATHI S, HEGDE V S, UPADHYAYA H D, TYAGI A K, PARIDA S K. Genome-wide *cis*-regulatory signatures for modulation of agronomic traits as exemplified by drought yield index (DYI) in chickpea. *Functional and Integrative Genomics*, 2019, 19(6): 973-992.
- [5] FLEURY D, JEFFERIES S, KUCHEL H, LANGRIDGE P. Genetic and genomic tools to improve drought tolerance in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(12): 3211-3222.
- [6] BOUIZGAREN A, FARISSI M, GHOULAM C, KALLIDA R, FAGHIRE M, BARAKATE M, FEDDY M N A. Assessment of summer drought tolerance variability in Mediterranean alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars under Moroccan fields conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, 59(1): 147-160.
- [7] 张荟荟, 甄世财, 张一弓, 杨刚, 顾祥, 沙吾列·沙比汗, 王玉, 热娜·阿布都克力木. 12份苜蓿种质材料苗期抗旱性综合评价. *草业科学*, 2014, 31(4): 737-743.
ZHANG H H, ZHEN S C, ZHANG Y G, YANG G, GU X, Shawulie·Shabihan, WANG Y, Rena·Abdukelimu. Comprehensive evaluation of drought resistance of twelve alfalfa accessions at seedling stage. *Pratacultural Science*, 2014, 31(4): 737-743.

- [8] 翟春梅. 紫花苜蓿抗旱性评价及对水分胁迫适应机制的研究. 长春: 吉林农业大学硕士学位论文, 2008.
ZHAI C M. Study on drought resistance assessment and adaptive mechanism of alfalfa in drought stress. Master Thesis. Changchun: Jilin Agricultural University, 2008.
- [9] 王艺陶, 周宇飞, 李丰先, 依兵, 白薇, 闫彤, 许文娟, 高明超, 黄瑞东. 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. *作物学报*, 2014, 40(1): 110-121.
WANG Y T, ZHOU Y F, LI F X, YI B, BAI W, YAN T, XU W J, GAO M C, HUANG R D. Identification and classification of sorghum cultivars for drought resistance during germination stage based on principal components analysis and self organizing map cluster analysis. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(1): 110-121.
- [10] 吕学莲, 白海波, 惠建, 田小燕, 杨宸刚, 马斯霜, 蔡正云, 李树华. 粳稻杂交衍生 RIL 系的苗期抗旱性评价. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(3): 556-563.
LYU X L, BAI H B, HUI J, TIAN X Y, YANG C G, MA S S, CAI Z Y, LI S H. Evaluation of seedling drought resistance of RIL derived from *indica* rice and *japonica* rice. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(3): 556-563.
- [11] 云锦凤. 牧草及饲料作物育种学. 北京: 中国农业出版社, 2001.
YUN J F. Grass and Forage Crop Breeding. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
- [12] LONG R C, ZHANG F, ZHANG Z W, LI M N, CHEN L, WANG X, LIU W W, ZHANG T J, YU L X, HE F, JANG X Q, YANG X J, YANG C F, WANG Z, KANG J M, YANG Q C. Genome assembly of alfalfa cultivar Zhongmu-4 and identification of SNPs associated with agronomic traits. *Genomics, Proteomics and Bioinformatics*, 2022, 20(1): 14-28.
- [13] 倪霞, 周本智, 曹永慧, 鲁小珍. 干旱胁迫对植物光合生理影响研究进展. *江苏林业科技*, 2017, 44(2): 34-39, 52.
NI X, ZHOU B Z, CAO Y H, LU X Z. Impact of drought stress on plant photosynthetic physiology: A review. *Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology*, 2017, 44(2): 34-39, 52.
- [14] 刘佳月, 杜建材, 王照兰, 崔乐乐, 赵彦慧. 紫花苜蓿和黄花苜蓿种子萌发期对 PEG 模拟干旱胁迫的响应. *中国草地学报*, 2018, 40(3): 27-34, 61.
LIU J Y, DU J C, WANG Z L, CUI L L, ZHAO Y H. Response of *Medicago sativa* L. and *M. falcata* L. to PEG drought stress in seed germination period. *Chinese Journal of Grassland*, 2018, 40(3): 27-34, 61.
- [15] 许爱云, 曹兵, 谢云. 干旱风沙区煤炭基地 12 种草本植物对干旱胁迫的生理生态响应及抗旱性评价. *草业学报*, 2020, 29(10): 22-34.
XU A Y, CAO B, XIE Y. Physiological-ecological responses of twelve herbaceous plant species under drought stress and evaluation of their drought resistance when planted in coal producing basis in arid windy and sandy areas. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(10): 22-34.
- [16] 李硕, 苗丽宏, 聂中南, 李向林, 万里强. 干旱胁迫对不同紫花苜蓿品种生产性能的影响. *草原与草坪*, 2020, 40(3): 15-22.
LI S, MIAO L H, NIE Z N, LI X L, WAN L Q. Comparison of production performance yield of 8 alfalfa cultivars under drought stress. *Grassland and Turf*, 2020, 40(3): 15-22.
- [17] 李跃, 李振松, 苗丽宏, 王宇菲, 全宗永, 何峰, 万里强, 李向林. 不同生育期干旱对紫花苜蓿生长和根系 ABA 含量的影响. *草地学报*, 2017, 25(6): 1245-1250.
LI Y, LI Z S, MIAO L H, WANG Y F, TONG Z Y, HE F, WAN L Q, LI X L. Effects of drought stress at different growth stages on growth and root ABA content of alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(6): 1245-1250.
- [18] 韩志顺, 郑敏娜, 梁秀芝, 康佳惠, 陈燕妮. 干旱胁迫对不同紫花苜蓿品种形态特征和生理特性的影响. *中国草地学报*, 2020, 42(3): 37-43.
HAN Z S, ZHENG M N, LIANG X Z, KANG J H, CHEN Y N. Effects of drought stress on morphological and physiological characteristics of different alfalfa cultivars. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(3): 37-43.
- [19] GUPTA A, RICO-MEDINA A, CANO-DELGADO A I. The physiology of plant responses to drought. *Science*, 2020, 368: 266-269.
- [20] 李振松, 万里强, 李硕, 李向林. 苜蓿根系构型及生理特性对干旱复水的响应. *草业学报*, 2021, 30(1): 189-196.
LI Z S, WAN L Q, LI S, LI X L. Response of alfalfa root architecture and physiological characteristics to drought and rehydration. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(1): 189-196.
- [21] 于思敏, 罗永忠, 康芳明, 邱应德, 李转桃. 干旱胁迫对紫花苜蓿生长和叶绿素荧光特性的影响. *草地学报*, 2023, 31(6): 1762-1771.
YU S M, LUO Y Z, KANG F M, QIU Y D, LI Z T. Effects of drought stress on growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Medicago sativa* L. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(6): 1762-1771.
- [22] 李苏涛, 陈思齐, 李妍, 史文娇, 苏德伟, 林辉, 罗海凌, 周晶. 3 种植物生长调节剂对不同干旱胁迫下巨菌草光合指标的影响.

- 草业科学, 2021, 38(12): 2406-2420.
- LI S T, CHEN S Q, LI Y, SHI W J, SU D W, LIN H, LUO H L, ZHOU J. Effects of three plant growth regulators on the photosynthetic indices/indexes of giant juncao under different drought stress conditions. *Pratacultural Science*, 2021, 38(12): 2406-2420.
- [23] 梁欢, 韦宝, 陈静, 宫文龙, 马琳, 王学敏, 王赞. 基于叶绿素荧光参数的紫花苜蓿种质苗期抗旱性评价. *草地学报*, 2020, 28(1): 45-55.
- LIANG H, WEI B, CHEN J, GONG W L, MA L, WANG X M, WANG Z. Evaluation of the drought resistance in alfalfa germplasm by chlorophyll fluorescence parameters at seedling stage. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(1): 45-55.
- [24] 乌日娜, 石凤翎, 徐舶. 直立型扁蓿豆对干旱胁迫和复水的响应及适应策略. *中国生态农业学报*, 2020, 28(12): 1901-1912.
- Wurina, SHI F L, XU B. *Medicago ruthenica* (L.) Sojak. cv. Zhilixing response and adaptation strategy to drought stress and rehydration. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(12): 1901-1912.
- [25] 王园园, 赵明, 张红香, 卢正宽, 穆春生. 干旱胁迫对紫花苜蓿幼苗形态和生理特征的影响. *中国草地学报*, 2021, 43(9): 78-87.
- WANG Y Y, ZHAO M, ZHANG H X, LU Z K, MU C S. Effects of drought stress on morphological and physiological characteristics of alfalfa seedlings. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(9): 78-87.
- [26] 李贺洋, 黄悠, 陈超超, 热孜亚·艾力, 申玉华, 张铁军. 黄花苜蓿种质资源苗期抗旱性鉴定评价. *中国草地学报*, 2023, 45(10): 34-45.
- LI H Y, HUANG Y, CHEN C C, Reziya·Aili, SHEN Y H, ZHANG T J. Evaluation of drought resistance in seedling stage germplasm resources of *Medicago falcata*. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(10): 34-45.
- [27] 方明月, 汪溢磐, 赵奕, 热孜亚·艾力, 申玉华, 张铁军. 低温干旱复合胁迫对 8 个紫花苜蓿品种形态和生理特征的影响. *草地学报*, 2022, 30(11): 2967-2974.
- FANG M Y, WANG Y P, ZHAO Y, Reziya·Aili, SHEN Y H, ZHANG T J. Morphological and physiological responses of eight alfalfa cultivars to combined stress of cold and drought. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(11): 2967-2974.
- [28] KHANZADEH H, JALAL KAMALI M R, ALIZADEH B, ROOSTAEI M, GHASEMI M, AMINZADEH G, SHAHBAZI K. Evaluation of promising (advanced) bread wheat genotypes to drought stress by using drought tolerance and susceptibility indices. *Agronomy Journal*, 2011, 88: 10-21.
- [29] 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.
- [30] 祁旭升, 刘章雄, 关荣霞, 王兴荣, 苟作旺, 常汝镇, 邱丽娟. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究. *作物学报*, 2012, 38(4): 665-674.
- QI X S, LIU Z X, GUAN R X, WANG X R, GOU Z W, CHANG R Z, QIU L J. Comparison of evaluation methods for drought-resistance at soybean adult stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 665-674.
- [31] 武瑞鑫, 李源, 游永亮, 刘贵波, 赵海明. 紫花苜蓿全生育期抗旱性鉴定评价方法探讨. *草地学报*, 2020, 28(5): 1444-1453.
- WU R X, LI Y, YOU Y L, LIU G B, ZHAO H M. Study on drought resistance identification and evaluation methods of alfalfa during whole growth period. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(5): 1444-1453.
- [32] 黎裕, 王天宇, 刘成, 石云素, 宋燕春. 玉米抗旱品种的筛选指标研究. *植物遗传资源学报*, 2004(3): 210-215.
- LI Y, WANG T Y, LIU C, SHI Y S, SONG Y C. Analysis on criteria for screening drought tolerant maize hybrids. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2004(3): 210-215.
- [33] 陈卫国, 张政, 史雨刚, 曹亚萍, 王曙光, 李宏, 孙黛珍. 211 份小麦种质资源抗旱性的评价. *作物杂志*, 2020(4): 53-63.
- CHEN W G, ZHANG Z, SHI Y G, CAO Y P, WANG S G, LI H, SUN D Z. Drought-tolerance evaluation of 211 wheat germplasm resources. *Crops*, 2020(4): 53-63.
- [34] 周元成, 曹永立, 王镇, 贾志荣, 姚勇, 陈爱萍. 不同大麦品种抗旱性鉴定指标的筛选与评价. *中国农业科技导报*, 2022, 24(2): 86-92.
- ZHOU Y C, CAO Y L, WANG Z, JIA Z R, YAO Y, CHEN A P. Screening and evaluation of drought resistance indexes in different barley varieties. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(2): 86-92.
- [35] 韩瑞宏, 蒋超, 董朝霞, 陈平, 张丹词. 47 份苜蓿种质材料抗旱性综合评价. *中国草地学报*, 2017, 39(4): 27-35.
- HAN R H, JIANG C, DONG Z X, CHEN P, ZHANG D C. Comprehensive evaluation of drought resistance of 47 *Medicago* germplasm materials under drought stress. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(4): 27-35.

(责任编辑 张瑾)