

网络出版时间:2019-11-04 15:56 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2020.05.008  
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20191101.0929.016.html

# 基于苗期叶片形态及光合特性的苜蓿种质资源抗旱性综合评价

常巍<sup>1a</sup>,李雪<sup>1a</sup>,周燕飞<sup>1a</sup>,张则宇<sup>1a</sup>,高雪芹<sup>1b,2</sup>,伏兵哲<sup>1a,2</sup>

(1 宁夏大学 a 农学院, b 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021;

2 宁夏优势特色作物现代分子育种重点实验室, 宁夏 银川 750021)

**【摘要】**【目的】对苜蓿 52 份种质资源进行抗旱性鉴定和抗旱指标筛选,为抗旱苜蓿新品种的选育提供基础材料和理论依据。【方法】采用盆栽反复干旱胁迫法对 52 份苜蓿种质材料进行了干旱胁迫,测定其株高、叶长、叶宽、叶面积、叶片相对含水量、相对叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、水分利用率、PS II 最大光化学量子产量等 11 个相关指标,计算各个指标的抗旱系数和 52 份材料的抗旱性综合度量值、综合抗旱系数、加权抗旱系数,以抗旱系数为基础,结合相关分析、主成分分析、灰色关联度分析、逐步回归和聚类分析等统计分析,综合评价不同苜蓿材料抗旱性,并筛选抗旱性指标。【结果】干旱胁迫对苜蓿的 11 个指标均有极显著影响,但敏感程度不同;主成分分析、灰色关联度分析和逐步回归分析表明,净光合速率、叶宽、PS II 最大光化学量子产量、叶长、叶面积与苜蓿抗旱性关系密切。根据系统聚类结果,依据每类材料抗旱性综合度量值的均值大小将材料的抗旱性划分为极强、强、中等、弱和极弱 5 个等级。【结论】净光合速率、叶宽、PS II 最大光化学量子产量、叶长和叶面积可作为苜蓿种质苗期抗旱性鉴定指标;筛选出苜蓿苗期抗旱能力极强的品种有标杆(ZHMX)、甘农 3 号、威廉斯、草原 3 号、3010、MT3015、SPYDER 和 0129 苏联,抗旱能力极弱的品种有甘农 1 号、甘农 2 号、礼县、WL656 和爱开夏。

**【关键词】** 苜蓿种质;苗期;光合特性;抗旱性;综合评价

**【中图分类号】** S551<sup>+</sup>.7

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2020)05-0057-12

## Screening of drought resistance indices and comprehensive evaluation of alfalfa germplasm resources based on leaf morphology and photosynthetic characteristics at seedling stage

CHANG Wei<sup>1a</sup>, LI Xue<sup>1a</sup>, ZHOU Yanfei<sup>1a</sup>, ZHANG Zeyu<sup>1a</sup>, GAO Xueqin<sup>1b,2</sup>, FU Bingzhe<sup>1a,2</sup>

(1 a Agronomy College, b Breeding Base of State Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2 Key Laboratory of Modern Molecular Breeding for Dominant and Special Crops in Ningxia, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:**【Objective】Drought resistance identification and drought resistance index selection of 52 alfalfa germplasm resources were conducted to provide basis for the selection and breeding of new drought-resistant varieties.【Method】Drought stress was applied to 52 alfalfa germplasm materials in pots using repeated drought method. Eleven indicators including plant height, leaf length, leaf width, leaf area, leaf relative water content, relative chlorophyll content, net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, water use efficiency and PS II maximum quantum yield of photochemical reaction were measured. The

**【收稿日期】** 2019-05-09

**【基金项目】** 宁夏自然科学基金项目(NZ17019);宁夏牧草育种专项(2014NYYZ04);宁夏大学草学一流学科建设项目(NXYL-XK2017A01);宁夏青年科技人才托举工程项目(TJGC2018083)

**【作者简介】** 常巍(1993-),男,河南周口人,在读硕士,主要从事牧草育种与栽培利用研究。E-mail:changwei526@163.com

**【通信作者】** 伏兵哲(1982-),男,陕西扶风人,副教授,博士,主要从事牧草育种与栽培利用研究。E-mail:fbzhe19@163.com

drought resistance coefficient of each index and the comprehensive measure value, comprehensive drought resistance coefficient and weighted drought resistance coefficient of 52 materials were calculated. The statistical analysis based on drought resistance coefficients including correlation analysis, principal component analysis, grey correlation analysis, stepwise regression and cluster analysis were conducted, the drought resistance of each alfalfa material was evaluated comprehensively and the drought resistance indexes were selected. 【Result】 Drought stress had significant effects on 11 indicators of alfalfa with different sensitivities. Principal component analysis, grey correlation analysis and stepwise regression analysis showed that net photosynthetic rate, leaf width, maximal quantum yield of PS II, leaf length and leaf area were closely related to drought resistance. According to system clustering based on average value of comprehensive measure value, the drought resistance was divided into five grades of very strong, strong, medium, weak and very weak. 【Conclusion】 Net photosynthetic rate, leaf width, maximal quantum yield of PS II, leaf length and leaf area can be used as indicators for drought resistance evaluation of alfalfa germplasm at seedling stage. Varieties with very strong drought resistance at seedling stage included Biaogan (ZHMX), Gannong No. 3, Williams, Caoyuan No. 3, 3010, MT3015, SPYDER and 0129 Soviet Union, while varieties with very weak drought resistance included Gannong No. 1, Gannong No. 2, Lixian, WL656 and Ackershlre.

**Key words:** alfalfa germplasm; seedling stage; photosynthetic characteristics; drought resistance; comprehensive evaluation

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 是豆科苜蓿属多年生草本植物, 是全球广泛种植的一种优质蛋白饲料<sup>[1]</sup>。我国紫花苜蓿主要分布在新疆、甘肃、青海、陕西和宁夏等西北省区, 占全国种植面积的 60% 以上<sup>[2]</sup>, 然而该地区普遍存在水资源缺乏, 往往因干旱而造成苜蓿产量低下和品质差。筛选和培育抗旱品种是提高该地区苜蓿产量和品质的根本途径<sup>[3]</sup>。目前, 对紫花苜蓿抗旱性研究已经有诸多报道, 韩瑞宏等<sup>[4]</sup>、张荟荟等<sup>[5]</sup>通过测定农艺指标对苜蓿种质材料进行抗旱性综合评价, 筛选出株高、根长、根冠比等指标来评价苜蓿抗旱性。Zhang 等<sup>[6]</sup>研究发现, 干旱环境下叶片相对含水量高的苜蓿种质材料产量下降相对较低。孟林等<sup>[7]</sup>研究认为, 相对含水量、细胞质膜透性和脯氨酸含量可作为苜蓿苗期抗旱性评价的生理指标。Tina 等<sup>[8]</sup>研究表明, 苜蓿通过提高抗氧化酶活性和清除活性氧来提高抗旱能力。Maghsoodi 等<sup>[9]</sup>研究认为, 过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶可以作为筛选抗旱性苜蓿品种的指标。当前对苜蓿苗期抗旱性评价的指标大多集中在农艺指标和生理生化指标上, 而关于叶片特征和光合特性与苜蓿抗旱相关性的研究较少。

光合作用是植物最基本的生命活动, 是干旱影响植物生长和代谢的第一环节<sup>[10]</sup>, 植物的叶片是进行光合作用和蒸腾作用的主要器官, 常作为衡量植物生长发育和生理特性的主要观测指标<sup>[11]</sup>。苗期作为植物生长发育的开始阶段对干旱较为敏感, 此

时的水分胁迫不仅威胁幼苗的生存, 对其后期的生长、生物量的形成以及顺利越冬等都有一定影响<sup>[5]</sup>。因此, 通过苜蓿苗期的叶片形态和光合特性来评价其抗旱性可靠性更高。本研究利用反复干旱法对 52 份苜蓿种质材料进行干旱胁迫, 测量株高及与叶片形态和光合特性相关的 11 个指标, 通过主成分分析、灰色关联分析和聚类分析等方法对苜蓿抗旱性进行综合评价, 并筛选抗旱指标, 旨在为抗旱苜蓿新品种的选育提供基础材料和理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

供试材料为收集自国内外的 52 份苜蓿, 材料详情见表 1。

### 1.2 试验设计

试验于 2019 年 3 月在宁夏大学科研实训基地智能温室内进行。试验材料种植于装有 0.6 kg 大田土壤(土壤相对含水量为 45%)的塑料花盆(高 14.5 cm, 底径 6 cm, 口径 8.5 cm)中, 每份苜蓿材料种植 10 盆, 每盆播种 10 粒成熟饱满、均匀一致的苜蓿种子, 待幼苗长到 3 叶期时进行间苗, 每盆保留 5 株, 待幼苗长到 5 叶期时进行试验处理。试验采用盆栽反复干旱法<sup>[12]</sup>, 设处理组(T)和对照组(CK), 对照组每份材料 5 盆进行正常浇水, 土壤含水量保持在 75%~80%; 处理组每份材料 5 盆进行干旱胁迫, 当 50% 以上的植株叶片出现萎蔫(土壤相对含

水量 35%左右)时进行复水,反复干旱 3 次后测定 相关指标。

表 1 供试苜蓿种质材料名称及来源

Table 1 Names and sources of alfalfa germplasm materials

材料 Material	名称 Name	来源 Origin	材料 Material	名称 Name	来源 Origin
1	阿尔冈 Algonquin	克劳沃公司 Clover Company	27	金皇后 Golden Empress	克劳沃公司 Clover Company
2	中苜 3 号 Zhongmu No. 3	宁夏草原站 Ningxia Grassland Station	28	74-56	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
3	草原 3 号 Caoyuan No. 3	内蒙古农业大学 Inner Mongolia Agricultural University	29	礼县 Lixian	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
4	MT3015	克劳沃公司 Clover Company	30	甘农 1 号 Gannong No. 1	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
5	VNS	克劳沃公司 Clover Company	31	甘农 2 号 Gannong No. 2	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
6	4030	克劳沃公司 Clover Company	32	皇冠 Phabulous	克劳沃公司 Clover Company
7	中苜 1 号 Zhongmu No. 1	北京畜牧所 Beijing Animal Husbandry Institute	33	WL903	北京正道公司 Beijing Zhengdao Company
8	SPYDER	克劳沃公司 Clover Company	34	Tecun	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
9	3010	克劳沃公司 Clover Company	35	赛迪 5 Saidi 5	百绿公司 Barenbrug Company
10	巨能 Magnum	克劳沃公司 Clover Company	36	三得利 Sanditi	百绿公司 Barenbrug Company
11	巨能 SALT Magnum SALT	克劳沃公司 Clover Company	37	WL440HQ	北京正道公司 Beijing Zhengdao Company
12	CW200	克劳沃公司 Clover Company	38	猎人河 Hunter River	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
13	4010	克劳沃公司 Clover Company	39	甘农 6 号 Gannong No. 6	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
14	巨能 551 Magnum 551	克劳沃公司 Clover Company	40	挑战者 Challenger	宁夏草原站 Ningxia Grassland Station
15	甘农 4 号 Gannong No. 4	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University	41	罗马尼亚 Romania	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
16	旱地巨能 Dryland Magnum	克劳沃公司 Clover Company	42	WL656	北京正道公司 Beijing Zhengdao Company
17	Nataw wakaba	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University	43	0129 苏联 0129 Soviet Union	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
18	爱开夏 Ackershre	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University	44	美国 1 号 American No. 1	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
19	美 11 Mei 11	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University	45	巨能 2 号 Magnum No. 2	克劳沃公司 Clover Company
20	标杆(ZHMX) Biaogan(ZHMX)	北京正道公司 Beijing Zhengdao Company	46	拉达克 Ladakh	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
21	先行者 Forthgoer	北京正道公司 Beijing Zhengdao Company	47	康赛 Kangsai	宁夏草原站 Ningxia Grassland Station
22	盐宝 Yanbao	北京正道公司 Beijing Zhengdao Company	48	罗默 Luomo	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
23	北方 SLT North SLT	猛犸种业 Mammoth seed	49	德国 Germany	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
24	保定 Baoding	北京畜牧所 Beijing Animal Husbandry Institute	50	超音速 Supersonic	克劳沃公司 Clover Company
25	敖汉 Aohan	北京畜牧所 Beijing Animal Husbandry Institute	51	威廉斯 Williams	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
26	甘农 3 号 Gannong NO. 3	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University	52	和田 Hetian	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University

### 1.3 指标测定

利用直尺测量植株从土壤表层到最高部位的拉伸长度,即为株高。每个处理随机选取 10 片叶片,利用 LI-3100C 叶面积仪测定叶长、叶宽和叶面积;用 SPAD-502Plus 便携式叶绿素测定仪测定相对叶绿素含量(SPAD);用饱和称重法测定叶片相对含水量(RWC);用 LI-6400 便携式光合仪(LI-COR, Lincoln, USA)测定净光合效率、气孔导度、蒸腾速

率等光合参数,并计算水分利用率:水分利用率=净光合速率/蒸腾速率;用 M-PEA 叶绿素荧光测定仪测定 PSII 最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ )。

### 1.4 抗旱性分析与抗旱指标筛选

利用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据统计、分析和表格编制,用 DPS 软件进行灰色关联分析,用 SPSS 软件进行相关性分析、聚类分析及主成分分析。

1.4.1 综合抗旱系数 根据各项指标数据的平均值,利用公式(1)求得单项指标抗旱系数(DC)<sup>[13]</sup>,利用公式(2)求得抗旱指数(DI)<sup>[14]</sup>。

$$DC = \frac{T_j}{CK_j}, j=1,2,3,\dots,n; \quad (1)$$

$$DI = \frac{T_j}{CK_j} \times \frac{T_j}{T_{mj}}, j=1,2,3,\dots,n. \quad (2)$$

式中: $T_j$ 表示干旱处理 $j$ 指标测定值的平均值; $CK_j$ 表示对照处理 $j$ 指标测定值的平均值; $T_{mj}$ 表示干旱处理所有品种某一指标测定值的平均值; $n$ 为测定指标数, $n=11$ 。

1.4.2 抗旱性综合评价 (1)抗旱性综合度量值。对苜蓿种质材料各指标DC进行相关性分析,若指标间存在信息重叠,则需要通过主成分分析将多指标降维至少数的综合指标以进行进一步分析。

主成分分析是运用降维的思想将多指标变量简化的方法<sup>[15]</sup>,在进行主成分分析前需进行因子的适应型检验,即KMO检验和Bartlett球形检验,在本试验中KMO检验结果为 $0.629 > 0.5$ ,Bartlett球形检验结果为 $0.000 < 0.05$ ,数据符合要求,可以进行主成分分析。对11个指标的DC进行主成分分析,获得因子载荷矩阵和贡献率,在主成分载荷矩阵中根据特征值大于1保留的方法提取前3个主成分(PC1、PC2、PC3)。根据PC1、PC2、PC3的载荷和贡献率,用公式(3)计算各主成分的权重系数( $\omega_i$ )<sup>[16]</sup>:

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

式中: $P_i$ 为第 $i$ 个主成分贡献率。

根据公式(4)计算各主成分的隶属函数值<sup>[4]</sup>:

$$U_i = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, i=1,2,3,\dots,n. \quad (4)$$

表2 干旱胁迫下苜蓿种质材料各指标测量值及DC、DI差异分析

Table 2 Differences of DC and DI in measured values of alfalfa germplasms under drought stress

指标 Index	处理 Treat	均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV	$t$ 值 $t$ value	$P$ 值 $P$ value	相关系数 $R$	DC		DI	
								均值 Average	变异系数 CV	均值 Average	变异系数 CV
株高/cm Plant height	CK	7.82	2.87	0.37	11.653**	0.000 1	0.64	0.56	0.26	0.57	0.53
	T	4.14	1.41	0.34							
叶长/mm Leaf length	CK	11.02	2.37	0.22	10.533**	0.000 1	0.57	0.75	0.17	0.76	0.28
	T	8.13	1.43	0.18							
叶宽/mm Leaf width	CK	11.06	2.17	0.20	11.607**	0.000 1	0.58	0.75	0.16	0.76	0.28
	T	8.15	1.41	0.17							
叶面积/mm <sup>2</sup> Leaf area	CK	84.95	28.54	0.34	10.894**	0.000 1	0.56	0.60	0.27	0.62	0.54
	T	48.6	15.76	0.32							
叶片相对含水量/% Relative water content	CK	73.95	8.58	0.12	11.938**	0.000 1	-0.12	0.65	0.28	0.70	0.47
	T	47.74	11.93	0.25							
相对叶绿素含量 Chlorophyll relative	CK	48.55	3.03	0.06	18.195**	0.000 1	-0.04	0.80	0.09	0.80	0.13
	T	38.76	2.2	0.06							

式中: $U_i$ 表示第 $i$ 个主成分的隶属函数值, $T$ 表示各品种在主成分分析中的因子综合得分, $T_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 分别表示各品种因子综合得分的最小值和最大值。

根据公式(5)计算抗旱性综合度量值 $D$ <sup>[16]</sup>:

$$D = \sum_{i=1}^n [U_i \times \omega_i], i=1,2,3,\dots,n. \quad (5)$$

(2)综合抗旱系数(CDC)<sup>[17]</sup>。用公式(6)计算CDC:

$$CDC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC, i=1,2,3,\dots,n. \quad (6)$$

(3)加权抗旱系数。利用DPS软件,以各指标的DC为比较序列,以 $D$ 为参考序列进行灰色关联度分析,获得各个指标间的关联度( $\gamma_i$ ),然后按公式(7)求得各个指标的权重系数( $\omega_{i(\gamma)}$ ),再根据公式(8)计算出加权抗旱系数(WDC)<sup>[16]</sup>:

$$\omega_{i(\gamma)} = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}, i=1,2,3,\dots,n; \quad (7)$$

$$WDC = \sum_{i=1}^n [DC \times \omega_{i(\gamma)}], i=1,2,3,\dots,n. \quad (8)$$

以DC值作为比较序列,WDC值作为参考序列进行灰色关联度分析,筛选抗旱性指标。

1.4.3 逐步回归与聚类分析 以所有品种各指标DC的平均值为自变量,分别以所有品种 $D$ 、CDC、WDC的平均值为因变量进行逐步回归分析,建立抗旱性模型,筛选抗旱性指标。基于各品种 $D$ 值按照最远邻元素方法对52个供试材料进行系统聚类。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对苜蓿种质材料各指标的影响

干旱胁迫下苜蓿种质材料各指标测量值及DC、DI差异分析如表2所示。

表 2(续) Continued table 2

指标 Index	处理 Treat	均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV	<i>t</i> 值 <i>t</i> value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value	相关系数 <i>R</i>	<i>DC</i>		<i>DI</i>	
								均值 Average	变异系数 CV	均值 Average	变异系数 CV
净光合效率/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ Net photosynthetic rate	CK	10.66	2.8	0.26	6.715**	0.000 1	0.92	0.91	0.08	0.91	0.25
	T	9.58	2.3	0.24							
气孔导度/ $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ Stomatal conductance	CK	0.11	0.09	0.84	8.535**	0.000 1	0.86	0.45	0.47	0.57	1.82
	T	0.05	0.06	1.21							
蒸腾速率/ $(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ Transpiration rate	CK	3.55	2.4	0.67	9.742**	0.000 1	0.82	0.46	0.47	0.57	1.54
	T	1.66	1.64	0.99							
水分利用率/% Water use efficiency	CK	4.24	2.87	0.68	8.857**	0.000 1	0.67	2.40	0.44	2.66	0.82
	T	9.33	5.44	0.58							
PS II 最大光化学 量子产量 $F_v/F_m$	CK	0.84	0.01	0.01	5.883**	0.000 1	0.50	0.99	0.02	0.99	0.03
	T	0.83	0.01	0.02							

注:CK. 对照处理;T. 干旱胁迫处理。\* \* 表示差异极显著( $P < 0.01$ )。

Note:CK. Comparative treatment;T. Drought stress treatment. \* \* indicate significant difference ( $P < 0.01$ ).

由表 2 可知,干旱胁迫对供试材料各指标均有极显著影响,处理组与对照组间各指标的差异均达到了极显著水平( $P < 0.01$ )。变异系数的大小在一定程度上可以反映出不同指标对于干旱胁迫的敏感程度<sup>[17]</sup>。供试材料各指标的变异系数在 0.01~1.21, *DC* 变异系数为 0.02~0.47, *DI* 变异系数为 0.03~1.82,其中气孔导度变异系数及 *DC* 和 *DI* 的变异系数均最大,PS II 最大光化学量子产量的变异系数均最小。说明不同指标对于干旱胁迫敏感程度差异较大,气孔导度对于干旱胁迫反应较敏感,PS II 最大光化学量子产量对于干旱胁迫反应较迟钝,可见用单一指标对苜蓿抗旱性进行评价的结果不够客观,使用多个指标进行综合评价,才能得到更可靠、更准确的结果。

## 2.2 苜蓿种质材料各指标抗旱系数的相关性分析

苜蓿种质材料各个指标 *DC* 的相关性分析结果(表 3)表明,各指标之间存在不同程度的相关性,其中株高与净光合速率、气孔导度与蒸腾速率及叶长、叶宽和叶面积两两之间均呈现极显著正相关( $P < 0.01$ ),水分利用率与株高和净光合速率之间均呈显著正相关( $P < 0.05$ );相对叶绿素含量与叶长和叶宽、水分利用率与气孔导度和蒸腾速率均呈极显著负相关,叶面积与相对叶绿素含量、净光合速率与叶片相对含水量、株高与气孔导度和蒸腾速率均呈显著负相关。以上结果表明,各指标信息间存在重叠,需要通过主成分分析将多指标降维至少数的综合指标。

表 3 不同苜蓿种质材料各指标抗旱系数(*DC* 值)的相关性分析Table 3 Correlation analysis of drought-resistance coefficient (*DC*) of each index in different alfalfa germplasm

指标 Index	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	1										
B	0.17	1									
C	0.15	0.93**	1								
D	0.04	0.77**	0.84**	1							
E	-0.11	-0.01	0.05	0.13	1						
F	-0.13	-0.36**	-0.36**	-0.29*	-0.04	1					
G	0.41**	-0.03	-0.07	-0.25	-0.31*	0.06	1				
H	-0.28*	0.01	0.03	-0.06	-0.04	0.08	-0.08	1			
I	-0.28*	0	0.01	-0.05	-0.02	0.10	-0.10	1.00**	1		
J	0.34*	-0.05	-0.05	-0.09	-0.03	-0.08	0.32*	-0.86**	-0.86**	1	
K	0.11	0.15	0.08	0.11	-0.16	-0.11	0.14	0.08	0.08	-0.12	1

注:A. 株高;B. 叶长;C. 叶宽;D. 叶面积;E. 叶片相对含水量;F. 相对叶绿素含量;G. 净光合速率;H. 气孔导度;I. 蒸腾速率;J. 水分利用率;K. PS II 最大光化学量子产量。\* 和 \* \* 分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平上显著相关。

Note:A. Plant height;B. Leaf length;C. Leaf width;D. Leaf area;E. Relative water content;F. Chlorophyll relative content;G. Net photosynthetic rate;H. Stomatal conductance;I. Transpiration rate;J. Water use efficiency;K. Maximal quantum yield of PS II. \* and \* \* indicate significant correlation at the  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively.

### 2.3 苜蓿抗旱指标的主成分分析

由表 4 可知,气孔导度、蒸腾速率和水分利用率在 PC1 上有较大载荷,可见 PC1 主要概括了叶片光合功能指标;叶长、叶宽、叶面积在 PC2 上有较大载

荷,可见 PC2 主要概括了叶片形状指标;净光合速率、叶片相对含水量和 PSII 最大光化学量子产量在 PC3 上有较大载荷,可见 PC3 主要概括了光合效率指标。

表 4 苜蓿抗旱指标主成分分析因子的载荷矩阵和贡献率

Table 4 Factor load matrix and contribution rate of principal component analysis on drought index of alfalfa

指标 Index	因子载荷 Factor loading		
	PC1	PC2	PC3
株高 Plant height	0.510	0.073	0.490
叶长 Leaf length	0.183	0.916	0.109
叶宽 Leaf width	0.170	0.939	0.033
叶面积 Leaf area	0.149	0.886	-0.152
叶片相对含水量 Relative water content	-0.035	0.103	-0.650
相对叶绿素含量 Chlorophyll relative content	-0.222	-0.474	-0.012
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.296	-0.216	0.738
气孔导度 Stomatal conductance	-0.928	0.166	0.241
蒸腾速率 Transpiration rate	-0.934	0.158	0.221
水分利用率 Water use efficiency	0.909	-0.248	-0.053
PSII 最大光化学量子产量 $F_v/F_m$	-0.037	0.199	0.504
特征值 Characteristic root	3.043	2.946	1.608
贡献率/% Contribution rate	27.667	26.779	14.614
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	27.667	54.447	69.061
因子权重 Factor weight	0.401	0.388	0.212

### 2.4 苜蓿种质材料抗旱性的综合评价

根据主成分分析获得的因子载荷矩阵和贡献率,按照公式(3)、(4)和(5)分别计算  $\omega_i$ 、 $U_i$  和  $D$ 。

然后分别根据  $D$ 、 $CDC$  和  $WDC$  对 52 份供试材料进行抗旱性排序,结果见表 5。

表 5 苜蓿种质材料抗旱性评价的  $WDC$ 、 $CDC$  和  $D$  值

Table 5  $WDC$ ,  $CDC$  and  $D$  values of drought resistance evaluation on alfalfa germplasm materials

材料 Material	抗旱性综合度量值 $D$		综合抗旱系数 $CDC$		加权抗旱系数 $WDC$	
	数值 Value	排序 Rank	数值 Value	排序 Rank	数值 Value	排序 Rank
1	0.61	11	0.81	30	0.81	30
2	0.46	44	0.77	43	0.77	43
3	0.63	5	0.94	9	0.94	7
4	0.67	2	0.95	6	0.95	6
5	0.54	27	0.84	24	0.84	24
6	0.61	12	0.97	3	0.96	3
7	0.53	29	0.80	36	0.80	36
8	0.67	3	0.92	12	0.92	12
9	0.65	4	0.90	15	0.90	14
10	0.55	22	0.81	34	0.81	33
11	0.53	28	0.84	26	0.84	25
12	0.57	15	0.87	19	0.87	18
13	0.56	17	0.93	11	0.92	11
14	0.55	24	0.97	4	0.96	5
15	0.50	35	0.76	45	0.77	44
16	0.55	20	0.80	37	0.80	37
17	0.59	13	0.77	42	0.78	41
18	0.35	52	0.74	50	0.74	50
19	0.47	43	0.85	22	0.85	22
20	0.62	6	1.05	1	1.04	1
21	0.54	26	0.94	8	0.93	8
22	0.52	31	1.00	2	0.99	2
23	0.49	37	0.90	14	0.89	16
24	0.43	47	0.75	49	0.75	49

表 5(续) Continued table 5

材料 Material	抗旱性综合度量值 $D$		综合抗旱系数 $CDC$		加权抗旱系数 $WDC$	
	数值 Value	排序 Rank	数值 Value	排序 Rank	数值 Value	排序 Rank
25	0.61	10	0.91	13	0.91	13
26	0.62	7	0.89	16	0.89	15
27	0.55	21	0.80	35	0.81	32
28	0.48	40	0.78	40	0.78	39
29	0.38	50	0.72	51	0.72	51
30	0.40	48	0.71	52	0.71	52
31	0.37	51	0.76	47	0.75	48
32	0.49	36	0.79	38	0.80	38
33	0.56	18	0.84	25	0.84	23
34	0.48	42	0.81	32	0.81	35
35	0.44	46	0.95	7	0.92	10
36	0.48	41	0.77	44	0.76	46
37	0.55	23	0.86	20	0.86	20
38	0.57	16	0.83	28	0.83	28
39	0.61	9	0.94	10	0.93	9
40	0.50	34	0.84	23	0.83	26
41	0.48	39	0.81	33	0.81	34
42	0.40	49	0.78	39	0.78	40
43	0.68	1	0.96	5	0.96	4
44	0.52	30	0.87	18	0.87	19
45	0.54	25	0.89	17	0.89	17
46	0.51	32	0.83	27	0.83	27
47	0.45	45	0.77	41	0.77	42
48	0.58	14	0.85	21	0.86	21
49	0.55	19	0.76	46	0.77	45
50	0.51	33	0.81	31	0.81	31
51	0.62	8	0.82	29	0.82	29
52	0.49	38	0.76	48	0.76	47
均值 Mean	0.53	—	0.85	—	0.84	—
变异系数 CV	0.15	—	0.09	—	0.09	—

由表 5 可知,供试材料的  $D$  为 0.35~0.68,变异系数 0.15,参考吕学莲等<sup>[18]</sup>的逐级分类方法,根据  $D$  值大小将 52 份供试材料抗旱性划分为极强 ( $D \geq 0.62$ )、强 ( $0.62 > D \geq 0.55$ )、中等 ( $0.55 > D \geq 0.49$ )、弱 ( $0.49 > D \geq 0.42$ ) 和极弱 ( $D < 0.42$ ),各级抗旱性材料数分别为 8,16,14,9 和 5,分别占供试材料总数的 15.38%,30.77%,26.92%,17.31% 和 9.62%,其中抗旱性极强的材料有 0129 苏联、MT3015、SPYDER、3010、草原 3 号、标杆 (ZH-MX)、甘农 3 号、威廉斯;抗旱性极弱的材料有爱开夏、甘农 2 号、礼县、WL656、甘农 1 号。

由公式(6)和公式(8)得到供试材料的  $CDC$  和  $WDC$  分别为 0.71~1.05 和 0.71~1.04,均值分别为 0.85 和 0.84,变异系数均为 0.09; $CDC$  和  $WDC$  排序结果基本相同,与  $D$  的排序结果略有差异,按照  $D$  的分级标准,结合  $D$ 、 $CDC$  和  $WDC$  排序结果,抗旱性极强的材料有 MT3015 和标杆 (ZHMX),抗旱性极弱的材料有甘农 1 号、礼县和爱开夏。

## 2.5 苜蓿抗旱指标的筛选

灰色关联度实质上是比较 2 个系统数据发展趋势的接近程度,发展趋势越接近,关联度就越大<sup>[19]</sup>。以  $DC$  作为比较序列, $D$  作为参考序列进行灰色关联度分析,结果(表 6)表明,在苗期进行干旱处理,苜蓿叶宽、叶长、净光合速率、PS II 最大光化学量子产量、叶面积、相对叶绿素含量和株高等指标受到的影响较大,而气孔导度、蒸腾速率受到的影响较小。

以  $DC$  作为比较序列, $WDC$  作为参考序列进行灰色关联度分析,结果(表 6)表明,在苗期进行干旱处理,苜蓿净光合速率、PS II 最大光化学量子产量、叶宽、相对叶绿素含量、叶长、株高和叶面积等指标受到的影响较大,而气孔导度、蒸腾速率受到的影响较小。可见,以  $WDC$  作为比较序列,所得到的关联度排序前 7 项和后 2 项的指标与以  $D$  作为参考序列得到的结果相同,因此叶宽、叶长、净光合速率、PS II 最大光化学量子产量、叶面积、相对叶绿素含量和株高等指标可作为抗旱指标。

表 6 苜蓿种质材料各指标 DC 值与 D 值和 WDC 值的关联度

Table 6 Correlation degree between DC with D and WDC values in alfalfa germplasm materials

指标 Index	DC 值与 D 值关联度 Correlation degree of DC value and D value		$\omega_i(\gamma)$	DC 值与 WDC 值关联度 Correlation degree of DC value and WDC value	
	数值	排序 Rank		数值	排序 Rank
	株高 Plant height	0.824 2		7	0.092 2
叶长 Leaf length	0.907 7	2	0.101 5	0.868 1	5
叶宽 Leaf width	0.911 8	1	0.101 9	0.882 2	3
叶面积 Leaf area	0.846 0	5	0.094 6	0.809 9	7
叶片相对含水量 Relative water content	0.736 2	9	0.082 3	0.773 0	8
相对叶绿素含量 Chlorophyll relative	0.841 8	6	0.094 1	0.878 9	4
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.880 5	3	0.098 4	0.915 5	1
气孔导度 Stomatal conductance	0.687 1	11	0.076 8	0.688 0	11
蒸腾速率 Transpiration rate	0.690 8	10	0.077 2	0.691 0	10
水分利用率 Water use efficiency	0.740 1	8	0.082 7	0.750 6	9
PSⅡ最大光化学量子产量 $F_v/F_m$	0.877 9	4	0.098 2	0.914 4	2

## 2.6 苜蓿抗旱指标的逐步回归分析

D 与 CDC、WDC 的相关系数分别为 0.64 和 0.67, CDC 与 WDC 的相关系数为 1.00, 3 个指标两两间的相关系数均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 说明 3 种评价方法关系密切。分别以供试苜蓿材料的 D、CDC、WDC 的平均值为因变量, 以各指标的 DC 的平均值为自变量进行逐步回归分析, 结果见表 7。

表 7 苜蓿种质材料抗旱性模型预测

Table 7 Model prediction of drought resistance in alfalfa germplasm materials

多元回归方程 Stepwise regression	判定系数 $R^2$	统计量 Statistic	F 值 F value	P 值 P value
$D = 0.01 + 0.206X_2 + 0.143X_1 - 0.114X_5 + 0.17X_{10} + 0.126X_4 + 0.138X_7 - 0.105X_6 + 0.148X_3 + 0.103X_{11} + 0.025X_8 - 0.015X_9$	0.998	2.106	3 055.46 **	0.000
$CDC = -0.19 + 0.091X_{10} + 0.079X_3 + 0.084X_9 + 0.091X_5 + 0.089X_1 + 0.099X_4 + 0.1X_7 + 0.095X_6 + 0.097X_2 + 0.099X_8 + 0.099X_{11}$	0.999	2.015	3 124.25 **	0.000
$WDC = 0.01 + 0.081X_{10} + 0.091X_3 + 0.040X_9 + 0.091X_1 + 0.084X_5 + 0.110X_6 + 0.116X_2 + 0.09X_4 + 0.091X_7 + 0.110X_8 + 0.087X_{11}$	0.999	2.287	4 422.76 **	0.000

注:  $X_1 \sim X_{11}$  分别为供试苜蓿种质材料株高、叶长、叶宽、叶面积、叶片相对含水量、相对叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、水分利用率和 PSⅡ 最大光化学量子产量 DC 的平均值。\* \* 表示在 0.01 水平显著相关。

Note:  $X_1 \sim X_{11}$ . Plant height, leaf length, leaf width, leaf area, relative water content, chlorophyll relative content, net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, water use efficiency and maximal quantum yield of PSⅡ of alfalfa germplasm materials, respectively. \* \* indicate significant at the 0.01 level.

## 2.7 苜蓿种质材料的聚类分析

依据 D 值, 按照最远邻元素方法对 52 个供试材料进行系统聚类, 结果在阈值 6.5 处可以将 52 个材料聚为 5 类(图 1), 第 I 类中有 12 个材料, 占总材料的 23.08%; 第 II 类有 15 个材料, 占总材料 28.85%; 第 III 类有 8 个材料, 占总材料的 15.38%; 第 IV 类有 12 个材料, 占总材料的 23.08%; 第 V 类有 5 个材料, 占总材料的 9.62%。第 I、II、III、IV、V 类材料 D 的均值分别为 0.63, 0.56, 0.52, 0.47, 0.38, 根据 D 均值大小可将其抗旱性分别划分为极强、强、中等、弱和极弱。

由表 7 可知, 3 个回归方程的  $R^2$  均  $> 0.99$ ,  $P < 0.01$ , 表明回归方程拟合度好, 预测精准度高, 具有很强的解释性。由回归方程各自变量的系数可知, 叶长、水分利用率、叶宽、株高、净光合速率、叶面积、叶片相对含水量、相对叶绿素含量和 PSⅡ 最大光化学量子产量与 D、CDC、WDC 均密切相关, 可作为抗旱性评价指标。

## 3 讨论

### 3.1 苜蓿抗旱性评价方法的选择

近年来, 国内外研究人员对作物种质资源抗旱性综合评价做了大量的研究<sup>[20]</sup>, 评价方法也多种多样。厉广辉等<sup>[21]</sup>利用产量抗旱系数评价法探讨了花生结荚期叶片生理生化特性与品种抗旱性的关系; Bellague 等<sup>[22]</sup>利用判别函数法研究认为, 生长到第 3 年的苜蓿抗旱性最强; 程波等<sup>[23]</sup>利用隶属函数法筛选出最适宜内蒙古半干旱地区种植的紫花苜蓿品种为金皇后; 俞华先等<sup>[24]</sup>采用主成分分析与聚类分析结合的方法筛选出生长期抗旱性较强的甘蔗

细茎野生种种质;王凯等<sup>[25]</sup>利用灰色关联度分析不同树种在春季干旱环境下的适应情况。目前苜蓿抗旱性评价常用的有隶属函数法、主成分分析法、聚类分析法、分级赋分法等<sup>[12]</sup>,这些方法各有优缺点,单一应用会导致结果不够客观。本研究采用多种分析方法,利用抗旱系数和抗旱指数对 52 份苜蓿材料的 11 个指标进行初步分析,结合各个指标的相关分析

和主成分分析的结果,得到 *D*、*CDC* 和 *WDC*,然后通过灰色关联度分析各指标与以上 3 个值之间的关系,利用逐步回归建立苜蓿苗期抗旱模型,最后通过聚类分析对供试材料划分抗旱等级。结果表明,以 *D* 为主,*CDC* 和 *WDC* 为辅的评价方法,可以较准确地分析材料间的抗旱性差异以及指标与抗旱性之间的关系,评价结果更客观、更可靠。

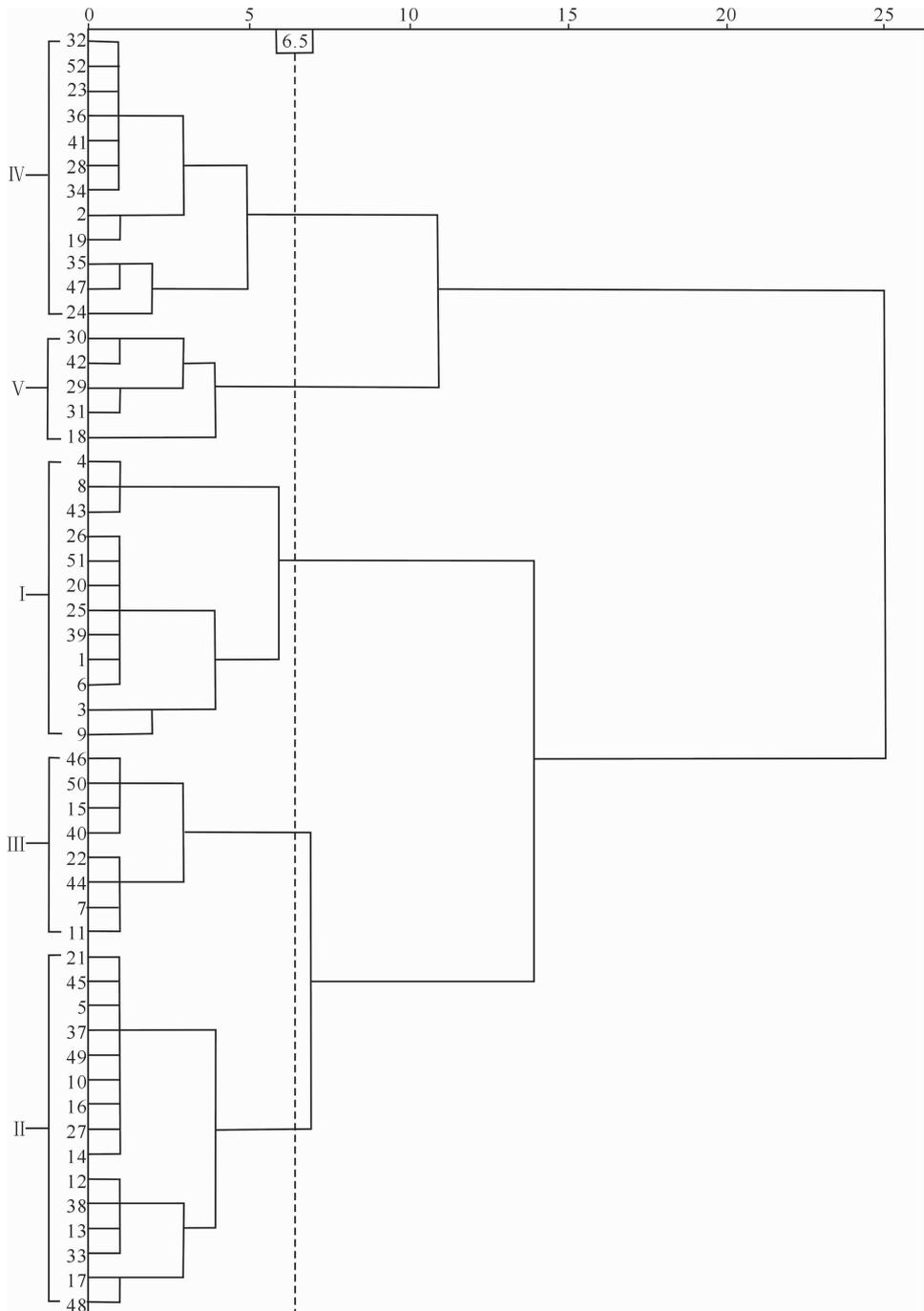


图 1 基于抗旱性综合度量值的苜蓿种质材料抗旱性系统聚类树状图

Fig. 1 Cluster tree diagram of drought resistance system of alfalfa germplasm based on comprehensive evaluation of drought resistance

### 3.2 苜蓿抗旱性指标的筛选

植物抗旱性是一个复杂的生物学特性,抗旱性相关指标繁多,实际中无法测量所有的指标,任何一个指标都不能完全对植物抗旱性作出全面评价<sup>[26]</sup>,研究人员针对植物不同生长时期提出很多抗旱性鉴定指标。张怀山等<sup>[11]</sup>研究表明,在旱作条件下不同苜蓿品种的抗旱性与其叶面积大小有直接关系,叶面积越大其抗旱性越强;韩瑞宏等<sup>[27]</sup>通过主成分分析将 17 个苜蓿抗旱性指标缩减到 10 个;魏霞等<sup>[28]</sup>研究表明,当水分胁迫超过一定程度时,会显著影响光合作用的进行,抑制植物的生长发育。通过指标测量值的差异分析表明,本试验选取的 11 个指标对干旱胁迫敏感度差异很大,其中气孔导度具有较高的敏感度;主成分分析中,气孔导度、蒸腾速率、水分利用率、叶长、叶宽、叶面积、净光合速率、相对含水量和 PSⅡ最大光化学量子产量与抗旱性相关度高;灰色关联度分析表明,苜蓿净光合速率、叶宽、PSⅡ最大光化学量子产量、叶长、相对叶绿素含量、叶面积和株高与抗旱性的关联度较大,反应较为敏感;逐步回归方程中叶长、水分利用率、叶宽、株高、净光合速率、叶面积、叶片相对含水量、相对叶绿素含量和 PSⅡ最大光化学量子产量与 *D*、*CDC* 和 *WDC* 密切相关。不同分析方法得到的抗旱性指标略有不同,综合主成分分析、灰色关联度和逐步回归方程认为,净光合速率、叶宽、PSⅡ最大光化学量子产量、叶长和叶面积 5 个指标可以作为苜蓿种质苗期抗旱性鉴定指标。

### 3.3 苜蓿种质材料抗旱性鉴定

苜蓿抗旱性是一个综合特性,选择指标太少很难全面、精准地反映各品种的耐旱性强弱,指标太多又会因一些相关性很小指标的引入而带来偏差<sup>[29]</sup>,所以根据所选的综合指标去评价苜蓿的抗旱性比较可靠<sup>[30]</sup>。目前常用的抗旱性综合指标有 *D*、*CDC* 和 *WDC*,已经应用于高粱<sup>[30]</sup>、苦荞<sup>[31]</sup>、薏苡<sup>[32]</sup>等作物的抗旱性鉴定。本研究根据每类材料 *D* 的均值大小将材料的抗旱性划分为极强、强、中等、弱和极弱 5 个等级,各级分别包含 8,16,14,9,5 份材料;系统聚类将材料的抗旱性划分为极强、强、中等、弱和极弱 5 个等级,各级分别包含 12,15,8,12,5 份材料;2 种方法结果的吻合度较高,结合两种方法可以确定 52 份苜蓿种质材料中抗旱性极强的材料有标杆(ZHMX)、甘农 3 号、威廉斯、草原 3 号、3010、MT3015、SPYDER 和 0129 苏联 8 份,抗旱性极弱的材料有礼县、甘农 1 号、甘农 2 号、WL656、爱

开夏 5 份。

本试验采用盆栽反复干旱法对苜蓿种质材料进行干旱模拟,试验材料多,工作量大,尽管试验中尽量控制水分和光照等外部条件一致,但仍然存在不可避免的试验误差;另外,苜蓿抗旱性评价指标众多,评价方法也多种多样,导致试验结果与以往研究存在差异,其中甘农 2 号在本试验中被鉴定为极弱抗旱性,这与韩瑞宏等<sup>[4]</sup>的研究结果有偏差,但与朱新强等<sup>[33]</sup>的研究结果相同,敖汉在本试验中被鉴定为强抗旱性,与徐向南等<sup>[34]</sup>的评价结果不一致,这些与以往研究结果差异较大的种质材料有待于进一步研究以确定其真实的抗旱性。

## 4 结 论

筛选出净光合速率、叶宽、PSⅡ最大光化学量子产量、叶长和叶面积作为苜蓿种质材料苗期抗旱性评价指标。抗旱性极强的苜蓿材料有标杆(ZH-MX)、甘农 3 号、威廉斯、草原 3 号、3010、MT3015、SPYDER 和 0129 苏联,而礼县、甘农 1 号、甘农 2 号、WL656、爱开夏 5 份苜蓿材料抗旱性极弱。

### [参考文献]

- [1] 张玉发,王庆锁,苏加楷.试论中国苜蓿产业化[J].中国草地,2000(1):65-70.  
Zhang Y F,Wang Q S,Su J K. On commercialization of alfalfa in China [J]. Grassland of China,2000(1):65-70.
- [2] 李新一,罗峻,田双喜,等.我国苜蓿生产总体形势分析[J].中国奶牛,2015,33(16):58-64.  
Li X Y,Luo J,Tian S X,et al. Analysis of the overall situation of alfalfa production in China [J]. China Dairy Cattle,2015,33(16):58-64.
- [3] Zhang T,Yu L,Zheng P,et al. Identification of loci associated with drought resistance traits in heterozygous autotetraploid alfalfa (*Medicago sativa* L.) using genome-wide association studies with genotyping by sequencing [J]. PLoS ONE,2015,10(9):e138931.
- [4] 韩瑞宏,蒋超,董朝霞,等.47 份苜蓿种质材料抗旱性综合评价[J].中国草地学报,2017,39(4):27-35.  
Han R H,Jiang C,Dong Z X,et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 47 *Medicago* germplasm materials under drought stress [J]. Chinese Journal of Grassland,2017,39(4):27-35.
- [5] 张荟荟,甄世财,张一弓,等.12 份苜蓿种质材料苗期抗旱性综合评价[J].草业科学,2014,31(4):737-743.  
Zhang H H,Zhen S C,Zhang Y G,et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of twelve alfalfa accessions at seedling stage [J]. Pratacultural Science,2014,31(4):737-743.
- [6] Zhang T,Kesoju S,Green S L,et al. Genetic diversity and

- phenotypic variation for drought resistance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) germplasm collected for drought tolerance [J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2018, 65(2): 471-484.
- [7] 孟 林,毛培春,张国芳,等. 17个苜蓿品种苗期抗旱性鉴定 [J]. 草业科学, 2008, 25(1): 21-25.  
Meng L, Mao P C, Zhang G F, et al. Identification and assessment of drought resistance for 17 alfalfa varieties at the seedling period [J]. Pratacultural Science, 2008, 25(1): 21-25.
- [8] Tina R R, Shan X R, Wang Y, et al. Response of antioxidant system to drought stress and re-watering in alfalfa during branching [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 94(1): 12129.
- [9] Maghsoodi M, Razmjoo J, Gheysari M. Application of biochemical markers for the assessment of drought tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars [J]. Grassland Science, 2017, 63(1): 3-14.
- [10] 李 倩,王 明,王雯雯,等. 华山新麦草光合特性对干旱胁迫的响应 [J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4278-4284.  
Li Q, Wang M, Wang W W, et al. Response of photosynthetic characteristics of *Psathyrostachys huashanica* Keng to drought stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4278-4284.
- [11] 张怀山,代立兰,乔国华,等. 不同苜蓿品种叶面积与抗旱性的关联性研究 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10510-10512.  
Zhang H S, Dai L L, Qiao G H, et al. Study on the correlation between leaf area and drought resistance in different alfalfa varieties [J]. Journal of Anhui Agri, 2011, 39(17): 10510-10512.
- [12] 赵海明,游永亮,李 源,等. 紫花苜蓿资源抗旱性鉴定评价方法研究 [J]. 草地学报, 2017, 25(6): 1308-1316.  
Zhao H M, You Y L, Li Y, et al. Drought resistant identification and evaluation methods of alfalfa germplasm [J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(6): 1308-1316.
- [13] 祁旭升,王兴荣,张彦军,等. 胡麻成株期抗旱指标筛选与种质抗性鉴定 [J]. 核农学报, 2015, 29(8): 1596-1606.  
Qi X S, Wang X R, Zhang Y J, et al. Drought resistance indexes selection for oil flax at the adult stage and drought resistance identification of oil flax germplasm [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(8): 1596-1606.
- [14] 胡福顺,兰巨生. 作物抗旱指数的概念和统计方法 [J]. 华北农学报, 1990, 5(2): 20-25.  
Hu F S, Lan J S. Concept and statistical method of crop drought resistance index [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1990, 5(2): 20-25.
- [15] 王 彤. 医学统计学与 SPSS 软件应用 [M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2008: 392.  
Wang T. Medical statistics and SPSS software application [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2008: 392.
- [16] 王 焱,沙柏平,李明雨,等. 苜蓿种质资源萌发期抗旱指标筛选及抗旱性综合评价 [J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 598-609.  
Wang Y, Sha B P, Li M Y, et al. Indices screening and comprehensive evaluation of drought resistance in alfalfa germplasm resources at germinating stage [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(3): 598-609.
- [17] 李海明,刘绍东,张思平,等. 陆地棉种质资源花铃期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选 [J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 583-597.  
Li H M, Liu S D, Zhang S P, et al. Identification and indices screening of drought tolerance at flowering and boll setting stage in upland cotton germplasm resources [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(3): 583-597.
- [18] 吕学莲,白海波,惠 建,等. 粳稻杂交衍生 RIL 系的苗期抗旱性综合评价 [J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 556-563.  
Lü X L, Bai H B, Hui J, et al. Comprehensive evaluation of seedling drought resistance of RILs population derived from indica rice and japonica rice [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(3): 556-563.
- [19] 陈 勇,陈 明,王 钧,等. 基于灰色关联分析法辨识中药生产过程关键工艺参数 [J]. 中草药, 2019, 50(3): 582-587.  
Chen Y, Chen M, Wang J, et al. Identification of key process parameters of Chinese materia medica production process based on grey relation analysis [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50(3): 582-587.
- [20] 李 怡,侯向阳,武自念,等. 羊草种质资源抗旱性综合评价 [J]. 中国草地学报, 2019, 41(1): 75-82.  
Li Y, Hou X Y, Wu Z N, et al. Comprehensive evaluation on drought-resistance of *Leymus chinensis* germplasm resources [J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(1): 75-82.
- [21] 厉广辉,张 昆,刘凤珍,等. 不同抗旱性花生品种荚果期叶片生理特性 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1988-1996.  
Li G H, Zhang K, Liu F Z, et al. Leaf physiological traits at pod-setting stage in peanut cultivars with different drought resistance [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 1988-1996.
- [22] Bellague D, M' Hammedi-Bouzina M, Abdelguerfi A. Measuring the performance of perennial alfalfa with drought tolerance indices [J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2016, 76(3): 273-284.
- [23] 程 波,胡生荣,高 永,等. PEG 模拟干旱胁迫下 5 种紫花苜蓿萌发期抗旱性的评估 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 53-59.  
Cheng B, Hu S R, Gao Y, et al. Drought resistance of 5 alfalfa species at germination period under PEG simulated drought stress [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(1): 53-59.
- [24] 俞华先,周清明,安汝东,等. 基于主成分与聚类分析的云南甘蔗细茎野生种 F<sub>2</sub> 代的抗旱性综合评价 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 88-93.  
Yu H X, Zhou Q M, An R D, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of *Saccharum spontaneum* L. F<sub>2</sub> generation based on principal component and hierarchical cluster analysis [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(21): 88-

- 93.
- [25] 王 凯,雷 虹,刘建华. 春季辽宁西北部主要绿化树种根叶抗旱生理指标评价 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1853-1860.
- Wang K, Lei H, Liu J H. Evaluation of drought-resistant physiological characteristics of roots and leaves for main greening tree species in Northwest Liaoning Province, China in spring [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(6): 1853-1860.
- [26] 田恩云. 小麦不同品种苗期抗旱性差异比较 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2017.
- Tian E Y. Comparison of drought resistance of different wheat cultivars at seedling stage [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2017.
- [27] 韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 等. 紫花苜蓿抗旱性主成分及隶属函数分析 [J]. 草地学报, 2006(2): 142-146.
- Han R H, Lu X S, Gao G J, et al. Analysis of the principal components and the subordinate function of alfalfa drought resistance [J]. Acta Agrestia Sinica, 2006(2): 142-146.
- [28] 魏 霞, 李守中, 郑怀舟, 等. 叶片气体交换和叶绿素荧光在植物逆境生理研究中的应用 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2007(4): 124-128.
- Wei X, Li S Z, Zheng H Z, et al. Application of leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence to plant stress physiology [J]. Journal of Fujian Normal University(Natural Science Edition), 2007(4): 124-128.
- [29] 高志军, 周 伟, 侯建华. 玉米芽苗期抗旱性鉴定指标的选取 [J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 66-69.
- Gao Z J, Zhou W, Hou J H. Selection of the drought resistance indexes in maize seedling emergence stage [J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(5): 66-69.
- [30] 汪 灿, 周棱波, 张国兵, 等. 酒用糯高粱资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1388-1402.
- Wang C, Zhou L B, Zhang G B, et al. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of liquor-making waxy sorghum resources at adult plant stage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(8): 1388-1402.
- [31] 路之娟, 张永清, 张 楚, 等. 不同基因型苜蓿苗期抗旱性综合评价及指标筛选 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3311-3322.
- Lu Z J, Zhang Y Q, Zhang C, et al. Comprehensive evaluation and indicators of the drought resistance of different genotypes of *Fagopyrum tataricum* at seedling stage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(17): 3311-3322.
- [32] 汪 灿, 周棱波, 张国兵, 等. 苜蓿种质资源苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2872-2887.
- Wang C, Zhou L B, Zhang G B, et al. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of Job's Tears (*Coxi lacryma-jobi* L.) germplasm resources at seedling stage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(15): 2872-2887.
- [33] 朱新强, 张新颖, 师尚礼, 等. 干旱胁迫下 4 个苜蓿品种根系抗旱性的比较 [J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(1): 103-107.
- Zhu X Q, Zhang X Y, Shi S L, et al. Comparison on the root drought resistance of four alfalfa cultivars under drought stress [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2012, 47(1): 103-107.
- [34] 徐向南, 易 津, 于林清, 等. 不同种质苜蓿苗期耐旱性评价及其方法的比较 [J]. 草业科学, 2011, 28(2): 217-225.
- Xu X N, Yi J, Yu L Q, et al. Evaluation on drought resistance of different alfalfa cultivars at seedling stage and comparison of the evaluating methods [J]. Pratacultural Science, 2011, 28(2): 217-225.