

网络出版时间:2020-04-28 17:30 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.11.003

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200428.0926.003.html>

PEG-6000 胁迫下苜蓿萌发期抗旱性鉴定与评价

郝俊峰¹,张玉霞²,贾玉山¹,格根图¹,田永雷³,李宇宇¹

(1 内蒙古农业大学 草原与资源环境学院,农业部饲草栽培、加工与高效利用重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010019;
2 内蒙古民族大学 农学院,内蒙古 通辽 028043;3 内蒙古自治区农牧业科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010031)

【摘 要】 【目的】分析国内外 11 份苜蓿种子萌发期的抗旱性,以筛选出适宜内蒙古科尔沁半干旱地区种植的苜蓿品种。【方法】采用 15%聚乙二醇 6000(PEG-6000)溶液模拟干旱胁迫条件,以蒸馏水为对照(CK),测定 11 份苜蓿种子萌发期的胚根长、胚芽长,计算胚根长/胚芽长、发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数及其抗旱系数等 14 项指标,通过方差分析筛选差异显著的指标。在主成分分析的基础上,利用加权隶属函数对供试种子的抗旱性进行综合评价。【结果】与 CK 相比,在 15%PEG-6000 胁迫下,除骑士 T 和威神以外,其他苜蓿品种种子的发芽率均降低;除威神以外,其他苜蓿品种种子的活力指数均降低;11 份苜蓿种子的发芽势和发芽指数均降低。通过方差分析筛选出了差异显著的 9 项指标,在主成分分析的基础上,根据加权隶属函数法,综合评价出 11 份苜蓿种子萌发期抗旱性强弱表现为:农菁 8 号>公农 1 号>威神>骑士 T>敖汉苜蓿>巨能 MT3015>Dryland>挑战者>宁苜 1 号>32 IQ>北极熊。【结论】根据种子萌发试验,初步认为农菁 8 号、公农 1 号和威神抗旱性较强,更适合内蒙古科尔沁半干旱地区种植;主成分分析结合加权隶属函数法对于苜蓿抗旱性综合性评价具有较好应用效果。

【关键词】 苜蓿;种子萌发;抗旱性;加权隶属函数;半干旱地区

【中图分类号】 S551⁺.701 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2020)11-0023-10

Identification and evaluation of drought resistance of alfalfa at germination stage under PEG-6000 stress

HAO Junfeng¹,ZHANG Yuxia²,JIA Yushan¹,
GE Gentu¹,TIAN Yonglei³,LI Yuyu¹

(1 Key Laboratory of Forage Cultivation, Processing and High Efficient Utilization of Ministry of Agriculture, College of Grassland Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China;
2 College of Agriculture, Inner Mongolia University for the Nationalities, Tongliao, Inner Mongolia 028043, China;
3 Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Science, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China)

Abstract: 【Objective】 This study analyzed the drought resistance of 11 seeds from domestic and foreign countries to select alfalfa varieties suitable for planting in the semi-arid area of Horqin, Inner Mongolia. 【Method】 The drought stress condition was simulated by using 15% polyethylene glycol 6000 (PEG-6000) solution and distilled water was used as the control (CK). The radicle length and embryo length of each seed during germination period were measured, and 14 indexes including radicle length/embryo length, germination rate, germination potential, germination index and drought resistance coefficient were

【收稿日期】 2019-10-21

【基金项目】 国家牧草产业技术体系专项(CARS-34);“十三五”重点研发计划项目“干草低损耗高品质规范化生产及产品加工技术研究”与示范”(2017YFD0502103)

【作者简介】 郝俊峰(1995—),男(蒙古族),内蒙古呼和浩特人,在读硕士,主要从事牧草加工与贮藏研究。
E-mail: hujf7756@126.com

【通信作者】 格根图(1973—),男,内蒙古呼伦贝尔人,教授,博士生导师,主要从事牧草加工与贮藏研究。E-mail: gegentu@163.com

calculated. Significant differences were tested through analysis of variance. On the basis of principal component analysis, the weighted membership function was used to comprehensively evaluate the drought resistance of tested alfalfa. 【Result】 Compared with the control, germination rates of materials declined except Knight T and Weishen, and vigor index declined except Weishen. Germination potential and germination index of all materials declined under drought stress. Nine indexes with significant differences were screened by analysis of variance. Based on principal component analysis and weighted membership function method, the drought resistance was in the order of Nongjing No. 8>Gongnong No. 1>Weishen> Knight T>Aohan alfalfa>GN MT3015>Dryland>Challenger>Ningmu No. 1>32 IQ>Polar bear. 【Conclusion】 Nongjing No. 8, Gongnong No. 1 and Knight T had strong drought resistance and were more suitable for planting in the semi-arid area of Horqin, Inner Mongolia. Principal component analysis combined with weighted membership function method had good application potential for the comprehensive evaluation of drought resistance.

Key words: alfalfa; seed germination; drought resistance; weighted membership function; semi-arid area

随着我国农业产业结构的调整,牧草饲料作物在畜牧业发展和生态环境治理方面逐渐发挥着重要作用^[1]。苜蓿(*Medicago sativa*)是多年生优质豆科牧草,具有叶量多、叶茎比高、粗蛋白含量高优点,素有“牧草之王”的美称^[2]。苜蓿根系十分发达,具有保持水土和防风固沙的能力,可有效改善生态环境^[3]。近年来,科尔沁沙地在苜蓿种植、加工业方面取得了快速发展,截至 2017 年,以阿鲁科尔沁旗为代表的科尔沁沙地苜蓿种植面积已达 7 万 hm^2 ,干草产量达 $10.5 \sim 12.0 \text{ t}/\text{hm}^2$,被国家标准化委员会确定为“全国紫花苜蓿种植示范区”之一^[4-5]。然而在科尔沁沙地种植苜蓿,由于水分不充足造成苜蓿原生质脱水,影响苜蓿萌发速率、光合作用和呼吸作用,进而影响苜蓿的产量和品质^[6-7]。有证据表明,决定阿鲁科尔沁旗紫花苜蓿越冬返青的限制因素为干旱和严寒,其中干旱为主要限制因子,严寒为次要限制因子^[5,8-9]。因此,选择抗旱性较强的苜蓿品种对该地区苜蓿产业的发展尤为重要。

聚乙二醇 6000(polyethylene glycol 6000, PEG-6000)是一种亲水性很强的惰性高分子聚合物,因其可阻碍植物系统的输导组织,常作为水分胁迫剂应用于干旱模拟中^[10]。目前,国内对 PEG-6000 模拟干旱胁迫应用于牧草及饲料作物抗旱性研究的报道较多。张晨妮等^[11]用 PEG-6000 溶液处理披碱草属牧草种子来比较其抗旱性;陈新等^[12]以 17 个裸燕麦品种为材料,研究了 20%PEG-6000 模拟干旱条件对裸燕麦发芽率、发芽势等 11 个鉴定指标的影响,并用隶属函数法筛选出 3 份抗旱性较强的裸燕麦品种;鱼小军等^[13]研究了不同浓度 PEG 处理下苜蓿和扁蓿豆的发芽率、发芽指数、活力指数等指标

并进行综合评价,发现苜蓿的抗旱性强于扁蓿豆;程波等^[1]采用不同渗透势的 PEG 溶液对内蒙古半干旱地区常见的 5 种紫花苜蓿进行综合评价,发现 PEG 溶液对种子萌发的抑制效果随渗透势的降低而增强;王焱等^[14]研究了在 -0.6 MPa PEG-6000 溶液下国内外 59 份苜蓿材料的根长、芽长等 7 个指标的变化,结果表明根长、发芽率和活力指数是较敏感指标,可作为抗旱选育的优先考虑指标;张立全等^[15]采用不同浓度 PEG 溶液对 3 个紫花苜蓿品种进行干旱胁迫,结果表明 3 个紫花苜蓿品种幼苗的主根长和主根粗受 PEG 胁迫抑制与胁迫程度呈正相关。上述研究对牧草抗旱性的评价多集中在单一指标评价或模糊隶属函数综合评价,对于主成分分析与加权隶属函数法相结合进行苜蓿抗旱性综合评价的研究尚未见报道。为此,本试验采用 15%PEG-6000 溶液对 11 份供试苜蓿种子进行萌发期抗旱性试验,测定各供试种子的胚根长和胚芽长,并计算胚根长/胚芽长、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数及其抗旱系数等 14 项指标,通过方差分析筛选出差异显著的指标;在主成分分析的基础上,利用加权隶属函数法结合热图聚类法分析干旱胁迫下 11 份苜蓿种子的萌发特性,旨在对供试苜蓿种子的抗旱性进行综合评价,从而为内蒙古科尔沁半干旱地区苜蓿品种的选择提供一定的理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

11 份供试苜蓿种子均由内蒙古星圣农牧业有限责任公司提供。参试苜蓿种子的编号、品种和来源如表 1 所示。

表 1 参试苜蓿种子的名称及来源
Table 1 Name and origin of tested alfalfa seeds

编号 Code	品种 Cultivar	来源 Origin
1	宁苜 1 号 Ningmu No. 1	中国宁夏 Ningxia, China
2	敖汉苜蓿 Aohan alfalfa	中国内蒙古 Inner Mongolia, China
3	公农 1 号 Gongnong No. 1	中国吉林 Jilin, China
4	农菁 8 号 Nongjing No. 8	中国黑龙江 Heilongjiang, China
5	北极熊 Polar bear	北美 North American
6	挑战者 Chanllenger	美国 American
7	巨能 MT3015 GN MT3015	美国 American
8	威神 Weishen	美国 American
9	Dryland	美国 American
10	32 IQ	美国 American
11	骑士 T Knight T	美国 American

1.2 试验方法

1.2.1 材料培养与处理 采用盆栽试验,选用直径为 40 cm、高 30 cm 的塑料盆。每个盆内装入等量均匀的混合土壤(土壤与珍珠岩的体积比为 2 : 1),参照《国际牧草检验规程》^[16]选取颗粒饱满、均匀一致、无病虫害的 11 份苜蓿种子,用 1 g/L 的 K₂MnO₄ 溶液表面消毒,蒸馏水冲洗后播种。每份苜蓿种子设置 2 个处理:对照(CK)和干旱胁迫(PEG-6000)处理,即加入蒸馏水 150 mL 或 15% 的 PEG-6000 溶液 150 mL。每个处理 3 个重复,每个苜蓿品种 6 盆,每盆播种 100 粒。

1.2.2 测定指标及方法 试验共进行 7 d,从第 2 天下午 20:00 记录各处理的发芽数,直至发芽数量变化缓慢时停止记录。从 3 个重复中各随机选取 10 株正常生长的苜蓿,去除附着的土壤,用蒸馏水冲洗干净,分别测定胚根长(radicle length, RL)及胚芽长(embryo length, EL),计算胚根长/胚芽长(radicle length/embryo length, RL/EL)、发芽率(gemination rate, GR)、发芽势(gemination potential, GP)、发芽指数(gemination index, GI)^[12]和活力指数(vigour index, VI)^[13]。计算公式如下:

GR=前 7 d 发芽种子数/供试种子数×100%; (1)

GP=前 4 d 发芽种子数/供试种子数×100%; (2)

GI=∑(Gt/Dt); (3)

VI=GI×S; (4)

抗旱系数=PEG 胁迫指标值/对照指标值。(5)
式中:Gt 为第 t 天的萌发种子数,Dt 为相对应的种子萌发时间(d),S 为胚根长和胚芽长之和。各指标的抗旱系数以其英文缩写前加 R 表示,如 RGR 表示发芽率的抗旱系数。

1.3 数据统计及分析

加权隶属函数^[11]如下:

$$Z_j = \sum_{i=1}^n \{ [(X_i - \bar{X}_i) / S_i] \cdot a_j \},$$
$$(i=1, 2, 3, \dots, 9; j=1, 2, 3); \tag{6}$$

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^m P_j; \tag{7}$$

$$\mu(Z_j) = (Z_j - Z_{j\min}) / (Z_{j\max} - Z_{j\min}); \tag{8}$$

$$D = \sum_{j=1}^m \mu[(Z_j) \cdot W_j]. \tag{9}$$

式中:Z_j 为各品种综合指标值,X_i、 $\bar{X}_i$ 、S_i 分别为各品种苜蓿在指标 i 上的鉴定值、平均值、标准差,a_j 为综合指标 j 的主成分(principal component, PC)因子载荷值,Z_{jmax}、Z_{jmin} 分别为各苜蓿品种中 Z_j 的最大值和最小值,W_j 为综合指标 j 的权重,P_j 为综合指标 j 的方差贡献率,μ(Z_j) 为各品种 Z_j 的隶属函数值,D 为各品种的抗旱性综合评价值。

利用 Excel 2016 整理试验数据,使用 SAS 9.4 进行方差分析、相关性分析和主成分分析,用 SigmaPlot 14.0 绘图,Mev 4.9.0 进行热图聚类分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对 11 份苜蓿种子萌发的影响

干旱胁迫下 11 份苜蓿种子萌发指标及其抗旱系数见表 2~4。由表 2 和表 3 可知,在 PEG-6000 模拟干旱胁迫和 CK 条件下,农菁 8 号的发芽率、发芽势、发芽指数、胚根长、胚芽长、活力指数均高于挑战者。从参试苜蓿种子来看,干旱胁迫条件下,所有材料的发芽势和发芽指数均呈下降趋势;除骑士 T 和威神外,其他所有材料的发芽率均呈下降趋势;胚根长、胚芽长和胚根长/胚芽长无明显规律,表现上升或下降趋势的品种各半;除威神外,其他所有材料的活力指数均呈下降趋势。说明不同材料受 15% PEG-6000 胁迫程度存在差异。

表 2 11 份苜蓿种质材料在干旱胁迫和正常条件下的种子发芽情况

Table 2 Seed germination of 11 germplasm materials of alfalfa under drought stress and CK

品种 Cultivar	发芽率/% GR		发芽势/% GP		发芽指数 GI	
	CK	PEG	CK	PEG	CK	PEG
宁苜 1 号 Ningmu No. 1	15.67	6.33	9.33	1.67	4.48	1.43
敖汉苜蓿 Aohan alfalfa	20.67	14.00	13.67	3.33	6.31	2.86
公农 1 号 Gongnong No. 1	28.00	23.66	23.33	13.00	9.52	6.02
农菁 8 号 Nongjing No. 8	75.00	54.00	29.67	14.67	12.43	11.12
北极熊 Polar bear	35.33	16.33	29.33	3.67	12.89	3.42
挑战者 Chanllenger	35.00	30.66	19.67	4.33	9.79	5.77
巨能 MT3015 GN MT3015	35.33	34.67	16.00	6.33	8.51	6.75
威神 Weishen	28.00	44.67	13.00	7.00	8.54	7.01
Dryland	32.67	25.33	20.00	3.67	9.79	5.31
32 IQ	23.33	20.00	15.67	14.00	6.48	3.87
骑士 T Knight T	37.67	41.33	25.33	7.00	10.65	9.18
平均值 Average	33.33	28.27	19.55	7.15	8.91	5.84
标准误 SE	15.48	14.40	6.75	4.64	2.62	2.92
变异系数 CV	0.46	0.51	0.35	0.65	0.29	0.50

表 3 11 份苜蓿种质材料在干旱胁迫和正常条件下的萌发种子胚发育情况

Table 3 Seed embryo development of 11 germplasm materials of alfalfa under drought stress and CK

品种 Cultivar	胚根长/cm RL		胚芽长/cm EL		胚根长/胚芽长 RL/EL		活力指数 VI	
	CK	PEG	CK	PEG	CK	PEG	CK	PEG
宁苜 1 号 Ningmu No. 1	2.44	2.87	1.74	1.85	1.40	1.55	18.74	6.64
敖汉苜蓿 Aohan alfalfa	2.05	2.77	1.01	2.18	2.03	1.27	19.31	14.14
公农 1 号 Gongnong No. 1	3.05	2.87	1.40	1.53	2.18	1.87	42.35	26.47
农菁 8 号 Nongjing No. 8	2.53	2.41	3.90	2.83	0.65	0.85	79.95	58.25
北极熊 Polar bear	1.52	2.02	4.44	1.84	0.34	1.10	76.82	13.21
挑战者 Chanllenger	2.15	1.97	2.06	1.35	1.04	1.46	41.23	19.15
巨能 MT3015 GN MT3015	2.09	2.31	3.01	2.41	0.69	0.96	43.38	31.86
威神 Weishen	2.29	1.90	1.52	2.80	1.51	0.68	27.20	39.98
Dryland	2.20	1.67	3.24	3.48	0.68	0.48	53.25	27.32
32 IQ	2.45	2.79	2.86	1.53	0.86	1.82	34.40	16.73
骑士 T Knight T	2.79	3.27	2.08	1.52	1.34	2.15	51.86	43.96
平均值 Average	2.32	2.44	2.48	2.12	1.16	1.29	44.41	27.06
标准误 SE	0.40	0.51	1.10	0.69	0.59	0.53	20.37	15.47
变异系数 CV	0.17	0.21	0.44	0.32	0.51	0.41	0.46	0.57

表 4 11 份苜蓿种质材料在干旱胁迫和正常条件下种子的抗旱系数

Table 4 Drought-resistance coefficient of 11 germplasm materials of alfalfa under drought stress and CK

品种 Cultivar	抗旱系数 DC						
	发芽率 GR	发芽势 GP	发芽指数 GI	胚根长 RL	胚芽长 EL	胚根长/胚芽长 RL/EL	活力指数 VI
宁苜 1 号 Ningmu No. 1	0.40	0.18	0.32	1.18	1.06	1.11	0.35
敖汉苜蓿 Aohan alfalfa	0.68	0.24	0.45	1.35	2.16	0.63	0.73
公农 1 号 Gongnong No. 1	0.85	0.56	0.63	0.94	1.09	0.86	0.63
农菁 8 号 Nongjing No. 8	0.72	0.49	0.89	0.95	0.73	1.31	0.73
北极熊 Polar bear	0.46	0.13	0.27	1.33	0.41	3.21	0.17
挑战者 Chanllenger	0.88	0.22	0.59	0.92	0.66	1.40	0.46
巨能 MT3015 GN MT3015	0.98	0.40	0.79	1.11	0.80	1.38	0.73
威神 Weishen	1.60	0.54	0.82	0.83	1.84	0.45	1.47
Dryland	0.78	0.18	0.54	0.76	1.07	0.71	0.51
32 IQ	0.86	0.89	0.60	1.14	0.53	2.13	0.49
骑士 T Knight T	1.10	0.28	0.86	1.17	0.73	1.60	0.85
平均值 Average	0.84	0.37	0.65	1.06	0.85	1.34	0.65
标准误 SE	0.32	0.23	0.27	0.20	0.63	0.79	0.34
变异系数 CV	0.38	0.62	0.42	0.18	0.74	0.59	0.52

由表 2 和表 3 还可以看出,与 CK 相比,在 15% PEG-6000 胁迫条件下,发芽率、发芽势、发芽指数、胚芽长以及活力指数均有不同程度的下降,其中下降最多的是发芽势(63.41%),其次是活力指数(39.06%)、发芽指数(34.44%),下降最少的是胚芽长(14.45%);而胚根长/胚芽长和胚根长较 CK 分别增加 30.44%和 5.05%。说明 15% PEG-6000 胁迫对苜蓿种子的萌发产生了抑制作用,但适当的干

旱胁迫有利于根系生长。

由表 4 可知,各指标抗旱系数中变异系数最大的为胚芽长抗旱系数,最小的为胚根长抗旱系数。

方差分析结果(表 5)表明,除发芽率抗旱系数、发芽势抗旱系数、发芽指数抗旱系数、胚根长抗旱系数、活力指数抗旱系数外,其他 9 项指标材料间均存在显著或极显著差异,区组间(重复)差异不显著。

表 5 11 份苜蓿材料萌发期性状的方差分析(F 检验值)

Table 5 Analysis of variation of germination traits of 11 materials of alfalfa(F-test value)

鉴定指标 Identification index	种质资源间差异 Difference among germplasm resources	区组间差异 Difference among replication	鉴定指标 Identification index	种质资源间差异 Difference among germplasm resources	区组间差异 Difference among replication
发芽率 GR	0.062**	0.008	发芽率抗旱系数 RGR	0.506	0.397
发芽势 GP	0.007**	0.001	发芽势抗旱系数 RGP	0.226	0.261
发芽指数 GI	25.585**	2.492	发芽指数抗旱系数 RGI	0.321	0.272
胚根长 RL	2.520*	0.915	胚根长抗旱系数 RRL	1.918	0.999
胚芽长 EL	4.704**	0.561	胚芽长抗旱系数 REI	7.653**	2.075
活力指数 VI	718.273**	54.657	胚根长/胚芽长抗旱 系数 R-RL/EL	7.021**	1.892
胚根长/胚芽长 RL/EL	3.881**	0.931	活力指数抗旱系数 RVI	3.064	3.467

注: * 表示差异显著($P<0.05$); ** 表示差异极显著($P<0.01$)。表 6 同。

Note: * indicates significant difference at $P<0.05$ level; ** indicates significant difference at $P<0.01$ level. The same for Table 6.

2.2 苜蓿种子萌发期抗旱性综合评价

2.2.1 主成分分析 主成分分析是将多个指标转化为少数几个综合指标^[17],能够较好地反映苜蓿的抗旱性。本研究对方差分析选取的 9 个萌发期抗旱性指标进行简单相关性分析,结果见表 6。由表 6

可以看出,发芽指数与发芽率呈极显著相关性($R=0.984,P<0.01$),可以认为发芽指数与发芽率所携带的萌发信息有 98.4%是相同的,其他具有相关性的鉴定指标之间也存在信息重叠的现象。

表 6 11 份苜蓿种质材料 9 个萌发期抗旱性指标间的简单相关性

Table 6 Simple correlation among 9 drought resistance indexes of 11 alfalfa germplasm materials at seeding stage

鉴定指标 Identification index	发芽率 GR	发芽势 GP	发芽指数 GI	胚根长 RL	胚芽长 EL	胚根长/ 胚芽长 RL/EL	活力指数 VI	胚芽长抗 旱系数 REL	胚根长/胚芽 长抗旱系数 R-RL/EL
发芽率 GR	1								
发芽势 GP	0.683*	1							
发芽指数 GI	0.984**	0.800**	1						
胚根长 RL	-0.145	0.325	-0.04	1					
胚芽长 EL	0.34	0.08	0.294	-0.588	1				
胚根长/胚芽长 RL/EL	-0.215	0.084	-0.152	0.671*	-0.957**	1			
活力指数 VI	0.957**	0.812**	0.979**	-0.003	0.412	-0.26	1		
胚芽长抗旱系数 REL	-0.046	-0.099	-0.047	0.053	0.253	-0.284	-0.007	1	
胚根长/胚芽长抗旱系数 R-RL/EL	-0.181	0.133	-0.105	0.399	-0.234	0.221	-0.115	0.787**	1

对 9 个萌发期抗旱性指标进行主成分分析,结果如表 7 所示。由表 7 可知,依据特征值大于 1 以及累积贡献率大于 85%的原则,前 3 个主成分的累积贡献率达到 91.79%,表明前 3 个主成分能有效反映出 11 份苜蓿种子抗旱性 91.79%的信息,因此选取前 3 个主成分作为 9 项萌发期抗旱性指标的综合指标。第 1 主成分的特征根为 3.885 6,方差贡献率为 43.17%,在发芽率、发芽势、发芽指数、活力指

数上有较高载荷,分别为 0.943 2,0.726 3,0.945 9 和 0.969 7,反映苜蓿种子的萌发状况,因此可以将第 1 主成分概括为“萌发因子”;第 2 主成分的特征根为 2.538 3,方差贡献率为 28.20%,在胚根长、胚根长/胚芽长上有较高载荷,分别为 0.830 2 和 0.827 2,反映苜蓿种子根部生长状况,因此可以将第 2 主成分概括为“根部生长因子”;第 3 主成分的特征根为 1.837 4,方差贡献率为 20.40%,在胚芽长

抗旱系数、胚根长/胚芽长抗旱系数上有较高载荷，长情况，因此可以将第 3 主成分概括为“芽部生长因子”。分别为 0.973 7 和 0.865 0，反映苜蓿种子的芽部生长因子”。

表 7 11 份苜蓿种质材料萌发期抗旱性的主成分分析

Table 7 Principal component analysis of drought resistance of 11 alfalfa germplasm materials at germination stage			
项目 Item	第 1 主成分 PC1	第 2 主成分 PC2	第 3 主成分 PC3
发芽率 GR	0.943 2	0.174 9	−0.050 0
发芽势 GP	0.726 3	0.565 5	0.047 0
发芽指数 GI	0.945 9	0.283 4	−0.017 5
胚根长 RL	−0.231 9	0.830 2	0.137 1
胚芽长 EL	0.576 5	−0.724 5	0.233 8
胚根长/胚芽长 RL/EL	−0.445 8	0.827 2	−0.248 2
活力指数 VI	0.969 7	0.224 0	0.033 1
胚芽长抗旱系数 REL	−0.027 4	−0.096 6	0.973 7
胚根长/胚芽长抗旱系数 R-RL/EL	−0.219 0	0.386 9	0.865 0
特征根 Eigenvalue	3.885 6	2.538 3	1.837 4
方差贡献率/% Variance contribution rate	43.17	28.20	20.42
累积贡献率/% Accumulated contribution rate	43.17	71.37	91.79

为了更形象地展示前 3 个主成分下 9 个萌发期抗旱性指标的联系,根据主成分分析中前 3 个主成分的因子载荷值绘图,结果如图 1 所示。由图 1 可知,各项鉴定指标由于不同的主成分因子载荷值而分布在不同的空间位置,其中发芽率、发芽指数和活力指数在 3 个主成分下的欧式距离较近,说明三者之间在 15% PEG-6000 溶液处理下有相似响应^[18]。

2.2.2 抗旱性评价 根据公式(6),依据 9 项萌发期抗旱性指标和 3 个综合指标的因子载荷,得到 11 份苜蓿种子的综合指标值,然后根据公式(7)、(8)、(9)分别计算出各苜蓿种子的权重、隶属函数值、抗旱性综合评价值(D 值)(表 8)。根据 D 值大小可知,各苜蓿种质的抗旱性强弱依次为农菁 8 号>公农 1 号>威神>骑士 T>敖汉苜蓿>巨能 MT3015>

Dryland>挑战者>宁苜 1 号>32 IQ>北极熊。

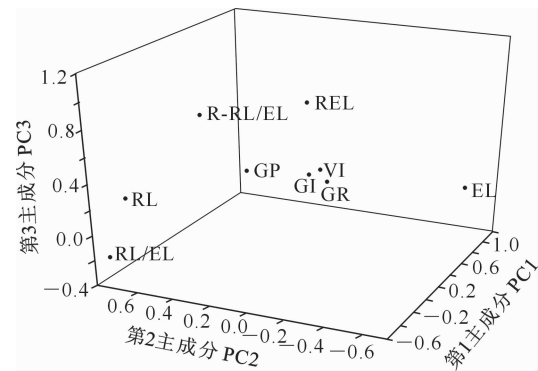


图 1 干旱胁迫对 11 份苜蓿种质材料抗旱性影响的前 3 个主成分的散点图

Fig. 1 First three principal components of drought-resistance of 11 alfalfa germplasm materials under drought stress

表 8 11 份苜蓿种质材料的综合指标值、权重、隶属函数值、D 值及抗旱性排序

Table 8 Comprehensive index value, weight, membership function value, D value and drought ranking of 11 germplasm materials of alfalfa								
材料编号 Code of material	综合指标值 Comprehensive index value			隶属函数值 Membership function value			D 值 D value	抗旱性排序 Drought ranking
	Z ₁	Z ₂	Z ₃	μ(Z ₁)	μ(Z ₂)	μ(Z ₃)		
1	−5.210 5	−0.610 2	0.307 3	0.000 0	0.428 7	0.531 6	0.250 0	9
2	−2.051 1	−0.007 9	1.241 9	0.257 3	0.494 7	0.852 7	0.462 7	5
3	−0.085 5	3.787 0	1.670 7	0.417 4	0.911 0	1.000 0	0.698 7	2
4	7.067 3	0.144 6	−0.171 8	1.000 0	0.511 5	0.367 0	0.720 7	1
5	−3.853 7	−1.194 4	−1.239 9	0.110 5	0.278 0	0.000 0	0.137 4	11
6	−0.320 8	0.039 9	−0.930 0	0.235 4	0.500 0	0.106 5	0.288 0	8
7	1.575 6	−1.125 0	−0.444 0	0.552 7	0.372 2	0.273 4	0.435 1	6
8	5.304 2	−1.241 0	0.969 4	0.856 4	0.359 5	0.759 0	0.682 1	3
9	1.835 5	−4.518 6	0.018 5	0.573 9	0.000 0	0.432 3	0.366 1	7
10	−4.348 3	0.917 0	−0.908 7	0.070 2	0.596 2	0.113 8	0.241 5	10
11	2.087 3	4.598 5	−0.421 3	0.594 4	1.000 0	0.281 3	0.649 3	4
指标权重 Index weight				0.470 3	0.307 2	0.222 5		

2.3 11 份苜蓿种质材料种子萌发期抗旱性的热图分析及聚类

通过对 11 份苜蓿种子 9 项萌发期抗旱性指标标准化值热图的分析(图 2)可以发现,热图很清晰地反映出 11 份苜蓿种子的发芽率、发芽势、发芽指数、胚根长、胚芽长、胚根长/胚芽长、活力指数、胚芽长抗旱系数和胚根长/胚芽长抗旱系数的标准化值。从颜色区域来看,农菁 8 号、公农 1 号、威神和骑士 T 鉴定指标颜色大多为红色,说明其鉴定指标整体较高;挑战者、宁苜 1 号、32 IQ 和北极熊鉴定指标

颜色多为绿色,说明其鉴定指标整体较低;敖汉苜蓿、巨能 MT3015 和 Dryland 颜色居中,属于鉴定指标值中间型。该结果与各苜蓿种质抗旱性评价排序一致。从鉴定指标树形聚类图来看,将鉴定指标分为 3 类:第 1 类为胚芽长、发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数;第 2 类为胚根长和胚根长/胚芽长;第 3 类为胚芽长抗旱系数和胚根长/胚芽长抗旱系数。该结果与因子载荷矩阵结果一致。由此可以发现,热图聚类所得结果较为可靠。

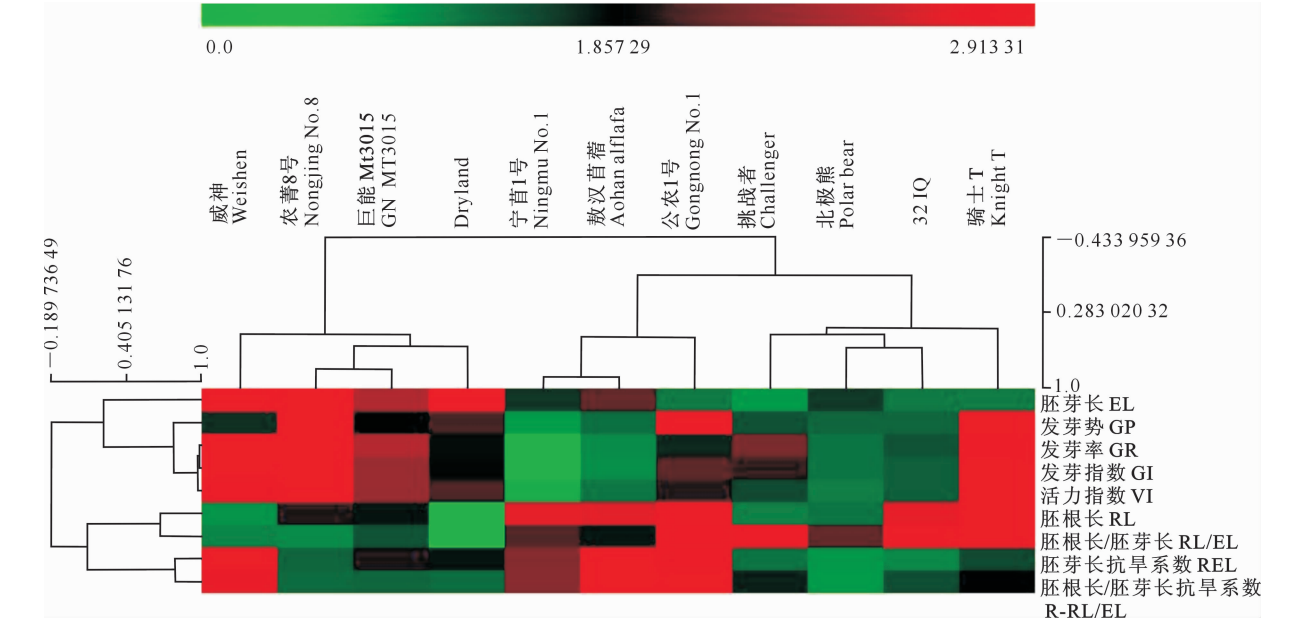


图 2 11 份苜蓿种质材料萌发期品种、鉴定指标的热图聚类分析

Fig. 2 Heat map and clustering analysis of cultivar and indicators of 11 germplasm materials of alfalfa in germination stage

3 讨论与结论

3.1 干旱胁迫对苜蓿种子萌发的影响

PEG 作为比较理想的渗透调节剂,通过调节溶液的渗透压来限制水分进入种子内以达到模拟干旱胁迫的目的^[19-20]。陈小倩等^[20]研究表明,15% PEG-6000 溶液能使紫花苜蓿萌发降至最低,可作为最佳模拟浓度。本研究选择 15% PEG-6000 作为干旱胁迫条件,结果表明 11 份供试苜蓿种子的发芽势和发芽指数均呈下降趋势,但个别品种的发芽率、胚根长、胚芽长、活力指数优于对照。这一结果在陈新等^[12]对裸燕麦抗旱性的研究中也曾出现,其研究指出 20% PEG-6000 处理对裸燕麦的初生根数、胚芽鞘长表现为促进作用,且优于对照。朱学海^[21]发现,−0.25~0.50 MPa PEG-6000 对谷子胚根长、胚芽长具有促进作用,说明同一植物不同品种对于干

旱胁迫的耐受范围不同,一定的干旱胁迫对根系的生长表现为促进作用。本研究发现,15%PEG-6000 胁迫对骑士 T 和威神发芽率表现为促进作用,初步说明在种子萌发期,骑士 T 和威神的抗旱性较其他苜蓿品种强,这一结果与张立全等^[15]对紫花苜蓿的研究结果一致。

3.2 抗旱指标筛选及综合评价

植物的抗旱性与多个因素相关,每项指标与抗旱性均存在联系,使用单一指标进行植物抗旱性评价存在片面性^[22]。目前对抗旱鉴定指标的选择主要集中于农艺性状、生理指标和生化指标,不同指标对干旱的响应也不同^[14],因此选择合理的指标对抗旱性评价有着十分重要的作用。王士强等^[23]认为小麦的抗旱相关性状中,与农艺性状相比,生理性状对干旱的敏感性更强。祁旭升等^[24]认为,胡麻的农艺性状鉴定指标均与综合抗旱系数有极显著关系。

本研究对 14 项鉴定指标进行方差分析,初步筛选出 9 项具有显著性差异的种子萌发期抗旱性指标,用于主成分分析和加权隶属函数综合评价。韩瑞宏等^[25]对紫花苜蓿抗旱性评价也采用了同样的方法。由此可以发现,作为抗旱性的鉴定指标尚未明确,需进一步探究。

目前认为,采用多指标评价过于繁琐且盲目性大,主成分分析可以在不损失或很少损失原有信息的基础上,通过变量之间的相关性,用少数几项综合指标代替多项指标从而降维,该方法已在玉米^[26]、小麦^[27]、谷子^[28]、大豆^[29]等作物上广泛应用,效果良好。本研究通过主成分分析,将方差分析筛选出的具有显著性差异的 9 项指标综合为 3 个彼此独立的综合指标,消除了由于指标之间信息重叠对综合指标的影响。目前,关于植物抗旱性评价常用的方法多为模糊隶属函数法^[14,30-31],因各指标之间存在一定的联系,故仅用模糊隶属函数进行抗旱性评价也有欠缺^[32]。加权隶属函数通过量化将鉴定指标转化为 $[0,1]$ 的度量值,从而将不同鉴定指标放在度量值上,可增强各品种的对比性且较好地定量每个品种,同时考虑了各个鉴定指标对抗旱性的贡献,是一种有效、科学的评价方法^[11]。在本研究中,第 1 主成分(PC1)包含发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数所载荷的萌发期信息较多,权重为 0.470 3;第 3 主成分(PC3)包含胚芽长抗旱系数、胚根长/胚芽长抗旱系数,所载荷的萌发信息较少,权重为 0.022 5。为使抗旱评价更为清晰明确,本研究结合热图聚类分析使试验数据分布更加视觉化、直观化,可对差异化数据和数据质量控制具象化展示,并对样品和指标进行聚类^[33]。本研究对 11 份苜蓿种质材料和 9 项指标进行热图聚类并结合进行主成分分析,表达清晰直观且结果一致,可作为苜蓿抗旱性评价的主要方法之一。

隶属函数法作为抗旱性评价的常用方法,所用的指标可分为 3 种:一是用发芽率、发芽势、发芽指数、抗旱指数等来评价,二是用各指标的隶属函数值累加求平均来评价,三是用各指标的相对值来评价^[34-36]。本研究采用发芽率、发芽势、发芽指数、胚芽长抗旱系数等 9 项指标进行主成分分析并计算加权隶属函数值,11 份苜蓿种质抗旱性强弱依次为:农菁 8 号>公农 1 号>威神>骑士 T>敖汉苜蓿>巨能 MT3015>Dryland>挑战者>宁苜 1 号>32 IQ>北极熊,这与前人的研究结果^[25,37]基本一致。本试验得到了 11 份苜蓿种质材料在萌发期的耐旱

性比较结果,其在幼苗及生产实践中的耐旱性还需进一步讨论。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 陈士超,王猛,汪季,等. 紫花苜蓿种子萌发及幼苗生理特性对 PEG-6000 模拟渗透势的响应 [J]. 应用生态学报,2017,28(9):2923-2931.
Chen S C, Wang M, Wang J, et al. Response of seed germination and seedling physiological characteristics of *Medicago sativa* to the simulated osmotic potential of PEG-6000 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9): 2923-2931.
- [3] 贾振伟. 紫花苜蓿在内蒙古草地畜牧业发展中的作用及利用方式 [J]. 草业科学, 2007, 24(12): 79-81.
Jia Z W. A review on the role of alfalfa and its utilization in grassland animal husbandry development in Inner Mongolia [J]. Prata Cultural Science, 2007, 24(12): 79-81.
- [4] 杨秀芳,梁庆伟,张晴晴,等. 基于不同生长长度日的刈割对科尔沁沙地紫花苜蓿产量、品质和越冬率的影响 [J]. 草地学报, 2019, 27(4): 1068-1074.
Yang X F, Liang Q W, Zhang Q Q, et al. Effect of different growing degress-days cutting on yield, quality and survival rate of alfalfa in Keerqin Sandy Land [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(4): 1068-1074.
- [5] 郝培彤,李玉龙,宁亚明,等. 不同干旱处理对科尔沁沙地不同苜蓿品种生产性能的影响 [J]. 草地学报, 2018, 26(6): 1368-1373.
Hao P T, Li Y L, Ning Y M, et al. Effects of different drought treatments on productive performance of different alfalfa varieties in Horqin Stany Land [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(6): 1368-1373.
- [6] 刘彬彬. 水分胁迫对玉米幼苗形态建成、生理代谢及根系吸水的影响 [D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2008.
Liu B B. Effects of water stress on morphogenesis, physiological metabolism and root water uptake of maize seedlings [D]. Beijing: Graduate University of Chinses Academy of Science (Research Centre of Soil and Water Conservation, MER), 2008.
- [7] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress [J]. Plant Cell and Environment, 2002, 25(2): 239-250.
- [8] 孙洪仁,武瑞鑫,李品红,等. 中国草都紫花苜蓿越冬返青成败的关键原因 [J]. 中国奶牛, 2015(18): 15-18.
Sun H R, Wu R X, Li P H, et al. The key reason of success or failure of overwintering and reviving of alfalfa in China forage capital [J]. China Dairy Cattle, 2015(18): 15-18.

- [9] 刘 敏,龚吉蕊,张梓瑜,等. 北方干旱区优良牧草抗旱性和抗寒性研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015,43(3):56-62,76.
- Liu M, Gong J R, Zhang Z Y, et al. Progress in drought resistance and cold tolerance of artificial pastures in northern arid areas [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015,43(3):56-62,76.
- [10] 万里强,李向林,石永红,等. PEG 胁迫下 4 个黑麦草品种生理生化指标响应与比较研究 [J]. 草业学报, 2010,19(1):83-88.
- Wan L Q, Li X L, Shi Y H, et al. A study on the response and on the comparison of physiological and biochemical index of four *Lolium perenne* varieties under PEG stress [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010,19(1):83-88.
- [11] 张晨妮,周青平,颜红波,等. PEG-6000 对老芒麦种质材料萌发期抗旱性影响的研究 [J]. 草业科学, 2010,27(1):119-123.
- Zhang C N, Zhou Q P, Yan H B, et al. Effect of PEG-6000 on drought resistance of *Elymus sibiricus* germplasm at germination stage [J]. Prata Cultural Science, 2010,27(1):119-123.
- [12] 陈 新,宋高原,张宗文,等. PEG-6000 胁迫下裸燕麦萌发期抗旱性鉴定与评价 [J]. 植物遗传资源学报, 2014,15(6):1188-1195.
- Chen X, Song G Y, Zhang Z W, et al. Indetification and evaluation of drought resistance of naked oat (*Avena nuda* L.) under PEG-6000 stress at germination [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2014,15(6):1188-1195.
- [13] 鱼小军,肖 红,徐长林,等. 扁蓿豆和苜蓿种子萌发期抗旱性和耐盐性比较 [J]. 植物遗传资源学报, 2015,16(2):405-410.
- Yu X J, Xiao H, Xu C L, et al. Comparative study on drought resistance and salt tolerance of *Medicago ruthenica* and *Medicago varia* at seed germination period [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2015,16(2):405-410.
- [14] 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):598-609,623.
- 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):598-609,623.
- [15] 张立全,贾旭慧,赵静玮. PEG 模拟干旱胁迫对紫花苜蓿种子发芽及幼苗生长的影响 [J]. 分子植物育种, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20190528.1539.014.html>.
- Zhang L Q, Jia X H, Zhao J W. Effect of PEG simulated drought stress on seed germination and seedling growth of alfalfa [J]. Molecular Plant Breeding, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20190528.1539.014.html>.
- [16] Ista T I S T. International rules for seed testing. Rules 1985 [J]. Seed Science and Technology, 1985,2(13):299-513.
- [17] 任雪松,于秀林. 多元统计分析 [M]. 北京:中国统计出版社, 2010:184-204.
- Ren X S, Yu X L. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010:184-204.
- [18] 王艺陶,周宇飞,李丰先,等. 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 [J]. 作物学报, 2014,40(1):110-121.
- Wang Y T, Zhou Y F, Li F X, et al. Identification and classification of sorghum cultivars for drought resistance during germination stage based on principal components analysis and self organizing map cluster analysis [J]. Acta Agronomica Sinica, 2014,40(1):110-121.
- [19] 温日宇,刘建霞,张珍华,等. 干旱胁迫对不同藜麦种子萌发及生理特性的影响 [J]. 作物杂志, 2019(1):121-126.
- Wen R Y, Liu J X, Zhang Z H, et al. Effect of drought stress on germination and physiological characteristics of diferent Quinoa seeds [J]. Crops, 2019(1):121-126.
- [20] 陈小倩,徐庆国. PEG-6000 干旱胁迫对 5 种牧草种子萌发的影响研究 [J]. 中国农学通报, 2015,31(26):7-11.
- Chen X Q, Xu Q G. Effects of PEG-6000 drought stress on seed germination of five gress species [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015,31(26):7-11.
- [21] 朱学海. 谷子耐旱资源筛选及其遗传多样性分析 [D]. 北京:中国农业科学院, 2008.
- Zhu X H. Selecting of drought resistant resources and its analysis of genetic diversity in foxtail millet [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [22] 张博文,李富平,许永利,等. PEG-6000 模拟干旱胁迫下五种草本植物的抗旱性 [J]. 分子植物育种, 2018,16(8):2686-2695.
- Zhang B W, Li F P, Xu Y L, et al. Drought resistance of five herbs under drought stress simulated by PEG-6000 [J]. Molecular Plant Breeding, 2018,16(8):2686-2695.
- [23] 王士强,胡银岗,余奎军,等. 小麦抗旱相关农艺性状和生理生化性状的灰色关联度分析 [J]. 中国农业科学, 2007,40(11):2452-2459.
- Wang S Q, Hu Y G, She K J, et al. Gray relational grade analysis of agronomical and physi-biochemical traits related to drought tolerance in wheat [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007,40(11):2452-2459.
- [24] 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.
- Qi X S, Wang X R, Xu J, et al. Drought-resistance evaluation of flax germplasm at adult plant stage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010,43(15):3076-3087.
- [25] 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, 2006,14(2):142-146.
- Han R H, Lu X S, Gao G J, et al. Analysis of main components and membership function of drought resistance of alfalfa [J]. Acta Agrestia Sinica, 2006,14(2):142-146.
- [26] 胡树平,苏治军,于晓芳,等. 玉米自交系抗旱相关性状的主成分分析与模糊聚类 [J]. 干旱地区农业研究, 2016,34(6):81-88.
- Hu S P, Su Z J, Yu X F, et al. Principal component analysis and fuzzy clustering on drought tolerance related traits of

- maize inbred lines [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(6): 81-88.
- [27] 白志英, 李存东, 孙红春, 等. 小麦代换系抗旱生理指标的主成分分析及综合评价 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(12): 4264-4272.
- Bai Z Y, Li C D, Sun H C, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation of physiological indices of drought resistance in wheat substitution [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(12): 4264-4272.
- [28] 孟庆立, 关周博, 冯佰利, 等. 谷子抗旱相关性状的主成分与模糊聚类分析 [J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2667-2675.
- Meng Q L, Guan Z B, Feng B L, et al. Principal component analysis and fuzzy clustering of drought-tolerance related traits of foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2667-2675.
- [29] 潘相文, 李文滨, 李艳华, 等. 主成分分析在大豆抗旱性评价上的应用 [J]. 大豆科学, 2006, 25(4): 379-384.
- Pan X W, Li W B, Li Y H, et al. Application of principal component analysis to evaluate the drought resistance of soybean genotypes [J]. Soybean Science, 2006, 25(4): 379-384.
- [30] 张鸭关, 吴丽芳, 刘品华, 等. 4 个紫花苜蓿品种幼苗抗旱性的模糊隶属函数分析 [J]. 江苏农业科学, 2010(6): 349-352.
- Zhang Y G, Wu L F, Liu P H, et al. Analysis of fuzzy subordinate function of drought resistance of seeds of four alfalfa varieties [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2010(6): 349-352.
- [31] 王艳慧, 高洪文, 王 赞, 等. 胶质苜蓿种质资源萌发期抗旱性综合评价 [J]. 植物遗传资源学报, 2009, 10(3): 443-447.
- Wang Y H, Gao H W, Wang Z, et al. Study and evaluation of drought resistance capacity of *Medicago glutinosa* germplasm resources at seedling stage [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2009, 10(3): 443-447.
- [32] 贾寿山, 朱俊刚, 王曙光, 等. 山西小麦地方品种萌发期的抗旱性 [J]. 华北农学报, 2011, 26(2): 213-217.
- Jia S S, Zhu J G, Wang S G, et al. Drought resistance of Shanxi wheat land races at sprouting stage [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2011, 26(2): 213-217.
- [33] 崔静宇, 关小康, 杨明达, 等. 基于主成分分析的玉米萌发期抗旱性综合评定 [J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 62-72.
- Cui J Y, Guan X K, Yang M D, et al. Integrative evaluation of maize drought tolerance in germination period by PCA method [J]. Journal of Maize Science, 2019, 27(5): 62-72.
- [34] 李培英, 孙宗玖, 阿不来提. PEG 模拟干旱胁迫下 29 份偃麦草种质种子萌发期抗旱性评价 [J]. 中国草地学报, 2010, 32(1): 32-39.
- Li P Y, Sun Z J, Abulaiti. Evaluation of drought resistance of 29 accession of *Elytrigia repens* at seed germination stage under PEG-6000 stress [J]. Chinese Journal of Grassland, 2010, 32(1): 32-39.
- [35] 刘佳月, 杜建材, 王照兰, 等. 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 [J]. 中国草地学报, 2018, 40(3): 27-34.
- Liu J Y, Du J C, Wang Z L, et al. Response of *Medicago sativa* L. and *M. falcata* L. to PEG drought stress in seed germination period [J]. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(3): 27-34.
- [36] 彭玉梅, 石国亮, 崔辉梅. PEG-6000 模拟干旱胁迫下不同加工番茄种子萌发期抗旱性评价 [J]. 种子, 2013, 32(7): 44-49.
- Peng Y M, Shi G L, Cui H M. Drought resistance evaluation of different processing tomato seeds at germination stage under drought stress simulated by PEG-6000 [J]. Seed, 2013, 32(7): 44-49.
- [37] 贾 蓉, 庞妙甜, 杜利霞, 等. 5 个苜蓿品种种子萌发期干旱耐受性研究 [J]. 中国草地学报, 2018, 40(5): 114-119.
- Jia R, Pang M T, Du L X, et al. Study on drought tolerance of five alfalfa cultivars at germination stage [J]. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(5): 114-119.