

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2024.04.07

# PEG 渗透胁迫下不同品种绿豆萌芽期抗旱性评价

王桂梅<sup>1</sup>, 邢宝龙<sup>2</sup>, 刘支平<sup>1</sup>

(1. 山西农业大学 高寒区作物研究所, 山西 大同 037008; 2. 山西农业大学, 山西 太原 030031)

**摘要:**为了探讨聚乙二醇(PEG)渗透胁迫对绿豆萌发的影响,明确干旱胁迫条件下绿豆萌发期的相关各项指标,筛选出抗旱性绿豆品种(系),从而为在绿豆抗旱新品种的筛选过程中提供理论依据,以18个绿豆品种(系)为研究对象,采用浓度为20%的PEG-6000溶液模拟干旱胁迫,对其萌发指标进行测定和分析,并对参试品种的抗旱性采用主成分分析和隶属函数方法进行鉴定和评价。结果表明,与对照相比,20%PEG渗透胁迫绿豆种子后,种子萌发的相关指标都有不同程度的下降,不同品种之间表现出一定的差异性。对6个抗旱性指标进行主成分分析,结果显示,累计贡献率为89.55%,可以有效地反映各数据的变化。18个绿豆品种(系)的综合评价D值为0.389~0.858,依据D值将其聚类分析分为3类,筛选出6个耐旱性品种:晋绿9号、同123-33、同绿5号、同118-6、同绿6号、黄荚绿。通过对18个绿豆品种的抗旱性综合评价,最终得到6个强耐旱品种,3个耐旱品种,9个较敏感品种。萌发期鉴定结果可作为衡量作物抗旱性强弱的一个重要指标,在此基础上,可以进一步结合全生育期的抗旱性评价结果进行综合分析。

**关键词:**PEG渗透胁迫;绿豆;抗旱性评价;主成分分析;隶属函数方法

中图分类号:S522

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2024)04-0051-07

## Evaluation of Drought Resistance of Different Varieties of Mung Bean during Germination under PEG Osmotic Stress

WANG Guimei<sup>1</sup>, XING Baolong<sup>2</sup>, LIU Zhiping<sup>1</sup>

(1. Institute of High Latitude Crops, Shanxi Agricultural University, Datong 037008, China;

2. Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of polyethylene glycol(PEG) osmotic stress on mung bean germination, clarify the relevant indicators of the mung bean germination under drought stress conditions, screen the drought resistant varieties(lines) of mung bean, and provide a theoretical basis for the screening process of new drought resistant mung bean varieties, in this study, taking 18 mung bean varieties(lines) as the research objects, a 20% of PEG-6000 solution was employed to simulate drought stress, and the germination indicators of the 18 mung bean varieties(lines) were measured and analyzed. The drought resistance of the tested varieties was identified and evaluated using principal component analysis and membership function methods. The results indicated that, compared with the control group, after subjecting mung bean seeds to 20% of PEG osmotic stress, the relevant indicators for seed germination varied in their degrees of decrease, with differences observed among the different varieties. Principal component analysis was performed on six drought resistance indicators, yielding a cumulative contribution rate of 89.55%, effectively capturing the data changes. The comprehensive evaluation of the 18 mung bean varieties(lines) resulted in a D value range of 0.389 to 0.858. Through cluster analysis based on the D value, the varieties were categorized into three groups. Six drought-tolerant varieties were screened, and they were Jinlü 9, Tong123-33, Tonglü 5, Tong118-6, Tonglü 6, and Huangjialü. Following a comprehensive assessment of the drought resistance of the 18 mung bean varieties, 6 were classified as strongly drought-tolerant varieties, 3 as drought-tolerant varieties, and 9 as more sensitive varieties. It should be noted that the identification results during the germination served as an important indicator to measure crop drought resistance, based on which comprehensive analysis could be conducted in further conjunction with the evaluation results for drought resistance throughout the entire growth period.

**Key words:** PEG osmotic stress; mung bean; drought resistance evaluation; principal component analysis; membership function methods

收稿日期:2023-07-04

基金项目:国家重点研发计划子课题(2021YFD1600605-07, 2021YFD1600602-07);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系(CARS-08-Z5);山西农业大学生物育种工程项目(YZGC077)

作者简介:王桂梅(1970-),女,山西原平人,副研究员,主要从事食用豆育种与栽培研究工作。

通信作者:邢宝龙(1973-),男,山西左云人,研究员,主要从事食用豆育种与栽培研究及示范推广工作。

水资源短缺是一个全球性问题<sup>[1]</sup>,全球干旱和半干旱地区面积约占陆地面积的 2/3,对作物生长造成了严重的影响,干旱严重制约着农业生产,已成为影响作物产量的主要原因之一<sup>[2-3]</sup>。因此,对作物抗旱性进行综合评价,探索作物的抗旱机制,培育抗旱新品种是应对干旱胁迫的关键<sup>[4]</sup>。李培英等<sup>[5]</sup>对 29 份偃麦草种子采用 20% 的聚乙二醇(PEG)-6000 进行模拟干旱胁迫,结果显示,PEG 胁迫种子的活力指标降低,胚芽和胚根的生长受到了抑制。杜吉到等<sup>[6]</sup>对芸豆种子的萌发进行了研究,结果表明,不同浓度胁迫对芸豆种子的萌发指标产生不同的影响,活力指数和发芽指数的影响最为明显。张凤银等<sup>[7]</sup>采用不同浓度的 PEG 对长豇豆种子萌发进行模拟干旱胁迫,结果表明,长豇豆种子的活力值和幼苗的芽长和根长均随 PEG 浓度的增加呈下降的趋势;对种子萌发和抑制作用也愈严重。绿豆抗旱、耐瘠、适应性强,多种植在干旱半干旱地区,是这些地区的重要经济作物之一。目前,关于绿豆芽期的抗旱性研究主要集中在水分胁迫对作物生理指标的影响方面<sup>[8-11]</sup>,而有关发芽能力方面的研究报道相对较少,采用高渗溶液 PEG 进行干旱胁迫模拟<sup>[12-13]</sup>,是植物抗旱性研究应用最多的手段之一,该方法的特点是重复性好,稳定性强,被广泛应用。

本研究通过对 18 份绿豆新品种(系)采用 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫,对绿豆种子的抗旱性进行综合评价,探讨绿豆种质萌发对干旱胁迫的适应性和耐受性<sup>[13-14]</sup>,旨在为绿豆新品种抗旱性筛选提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试绿豆新品种(系)18 个:晋绿 9 号、同 123-33、同 18-16、同绿 5 号、同 09-17、同 107-9、同 116-3、同 226-7、同 08-16、同 29-12、同 121-1、同 166-28、同 118-6、同绿 6 号、同 139-12、同 103-11、黄荚绿、同 62-36,均由山西农业大学高寒区作物研究所豆类课题组提供。PEG-6000 购自天津凯通化学试剂有限公司。

### 1.2 试验方法

挑选籽粒饱满、大小均匀的绿豆种子,用 0.1% 的氯化汞分别浸泡 1~2 min,再用蒸馏水反复冲洗干净,置于铺有双层滤纸的带盖培养皿中。采用浓度为 20% 的 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫(DS)<sup>[12]</sup>,

蒸馏水为对照(CK),共 2 个处理,每个处理重复 3 次。每个培养皿中放入绿豆种子 20 粒,分别加入 10 mL 溶液,每 2 d 更换一次溶液,以尽量减少水势变动。将种子放在温度为 25 °C、湿度为 50%~60% 的人工气候培养箱中,连续避光培养 8 d。

### 1.3 测定项目及方法

放入培养箱第 2 天开始,直到第 8 天,观察记录种子发芽情况,以胚根突破种皮达种子长度 1/2 为发芽标准,分别利用第 4 天和第 8 天统计数据,计算发芽势和发芽率。试验结束后,测定根长、芽长<sup>[16]</sup>,各指标的相对值为干旱胁迫处理测定值和对照测定值的比值,计算方法参考文献<sup>[16-19]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 对原始数据进行处理,用 SPSS 22.0 对试验数据进行主成分分析;采用隶属函数法对绿豆种质资源进行萌发期抗旱性综合评价。

$$\text{隶属函数值 } \mu(X_j) = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} (j=1, 2, 3 \dots n) \quad (1)$$

式中, $X_j$ 为某一种质某指标的实测值, $X_{\max}$ 为该指标的最大值, $X_{\min}$ 为该指标的最小值, $n$ 为测定指标数。

$$\text{权重 } W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} (j=1, 2, 3 \dots n) \quad (2)$$

式中, $P_j$ 为第  $j$  个指标的贡献率。

$$\text{综合耐旱性指数 } D = \sum_{j=1}^n (\mu(X_j) \times W_j) (j=1, 2, 3 \dots n) \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 PEG 渗透胁迫对不同品种绿豆种子萌发的影响

由表 1 可知,与对照相比,20% PEG 渗透胁迫绿豆种子后,种子的发芽率都有不同程度的下降,降幅最小的是晋绿 9 号,为 0.20%,降幅最大的是同 123-33,为 25.84%;发芽势也均下降,降幅最小的是晋绿 9 号,为 1.60%,降幅最大的是同 123-33,为 24.39%。不同品种绿豆的芽长和根长均有所缩短,结果充分表明,PEG 渗透胁迫对绿豆种子幼苗的生长有明显的抑制作用,其中,抑制作用最小的是晋绿 9 号,抑制率为 50.99%,抑制作用最大的是同 118-6,抑制率为 84.10%。绿豆主根生长受到抑制最小的是晋绿 9 号,抑制率为 36.28%,抑制作用最大的是同 226-7,抑制率为 91.35%。发芽指数不

仅受发芽种子数影响,也受发芽速度的影响,与对照相比,经过20%PEG渗透胁迫绿豆种子后发芽指数降幅最小的是同121-1,为22.80%,发芽指数降幅最大的是同107-9,为58.12%。

表1 不同绿豆品种干旱胁迫与正常条件下萌发期的生长情况  
Tab.1 Growth data of different mung bean varieties during germination under drought stress and normal conditions

品种 Variety	干旱胁迫(20% PEG-6000) Drought stress(20% of PEG-6000)					蒸馏水(CK) Distilled water(CK)				
	发芽率/% Germination percentage	芽长/cm Bud length	根长/cm Root length	发芽指数 Germination index	发芽势/% Germination potential	发芽率/% Germination percentage	芽长/cm Bud length	根长/cm Root length	发芽指数 Germination index	发芽势/% Germination potential
晋绿9号 Jinlü 9	98.4	99.8	5.87	0.83	15.86	100.0	100.0	14.06	4.72	27.49
同123-33 Tong 123-33	98.1	98.5	4.07	0.81	13.11	100.0	100.0	15.47	7.62	25.46
同08-16 Tong 08-16	85.8	77.3	3.77	0.75	10.33	96.8	97.6	13.21	5.93	24.91
同绿5号 Tonglü 5	97.8	97.6	3.27	0.79	11.41	98.3	100	14.82	5.53	27.19
同09-17 Tong 09-17	81.7	70.9	3.43	0.75	17.72	93.8	95.1	15.13	6.28	23.40
同107-9 Tong 107-9	73.8	72.9	3.64	0.71	18.83	97.6	98.3	14.63	5.03	26.99
同116-3 Tong 116-3	83.7	72.7	3.26	0.73	18.91	94.2	96.8	15.68	6.36	27.12
同226-7 Tong 226-7	92.2	88.6	3.13	0.82	13.21	97.3	100.0	15.69	6.59	26.33
同18-16 Tong 18-16	78.1	91.3	3.02	0.71	14.11	91.2	100.0	13.69	6.12	25.12
同29-12 Tong 29-12	82.3	73.2	2.68	0.69	18.01	89.3	100.0	14.12	7.02	24.36
同121-1 Tong 121-1	90.9	75.1	3.39	0.74	18.37	95.2	96.5	15.33	7.63	25.71
同166-28 Tong 166-28	86.3	89.3	3.48	0.76	13.69	96.0	97.1	14.35	8.79	26.33
同118-6 Tong 118-6	92.6	73.6	4.32	0.79	19.23	96.1	100.0	15.39	7.83	24.91
同绿6号 Tonglü 6	97.2	98.2	5.02	0.82	14.68	98.8	100.0	13.71	6.11	27.01
同139-12 Tong 139-12	78.6	80.7	3.89	0.77	10.34	91.3	93.2	13.69	5.33	24.69
同103-11 Tong 103-11	87.3	77.6	4.17	0.76	11.23	92.3	94.1	14.23	5.67	26.33
黄荚绿 Huangjiälü	75.9	89.1	2.62	0.73	13.96	89.3	100.0	6.48	5.12	25.64
同62-36 Tong 62-36	77.1	77.3	3.81	0.76	17.97	91.2	92.6	14.67	6.19	26.11

2.2 PEG渗透胁迫对绿豆芽期性状各生理指标间的相关性分析

对发期的7个性状指标进行相关性分析,结果如表2所示。

对在PEG渗透胁迫下18个绿豆品种(系)萌

表2 PEG渗透胁迫下绿豆萌发期性状指标相关性分析  
Tab.2 Correlation analysis of mung bean germination traits under PEG osmotic stress

测定指标 Indicators measured	相对发芽势 Relative germination potential	相对发芽率 Relative germination percentage	相对根长 Relative root length	相对芽长 Relative bud length	相对鲜质量 Relative fresh weight	相对干质量 Relative dry weight	相对发芽指数 Relative germination index
相对发芽率 Relative germination percentage	0.873**						
相对根长 Relative root length	0.651**	0.447*					
相对芽长 Relative bud length	0.736**	0.401*	0.306				
相对鲜质量 Relative fresh weight	0.568*	0.345	0.412	0.783**			
相对干质量 Relative dry weight	0.423*	0.263	0.358	0.464*	0.613**		
相对发芽指数 Relative germination index	0.926**	0.753**	0.629**	0.568**	0.651**	0.432*	
相对活力指数 Relative vitality index	0.788**	0.581**	0.668**	0.617**	0.721**	0.816**	0.863**

注:\*和\*\*分别表示0.05水平显著相关和0.01水平极显著相关。  
Note: \* and \*\* indicated significant correlation at 0.05 level and extremely significant correlation at 0.01 level, respectively.

由表 2 可知,相对发芽势与相对发芽率、相对根长、相对芽长、相对发芽指数<sup>[14,20]</sup>和相对活力指数呈极显著正相关( $P<0.01$ ),相关系数介于 0.651~0.926,相对发芽势与相对鲜质量和干质量呈显著正相关( $P<0.05$ )<sup>[14,20-21]</sup>,与相对根长和芽长呈显著正相关( $P<0.05$ )。在此基础上,通过主成分分析法进行进一步分析。

### 2.3 PEG 渗透胁迫下绿豆各性状的主成分分析

主成分分析法已经在小麦、向日葵、花生等作物资源综合评价中进行了广泛应用。根据主成分分析的一般性原则,提取主成分时需要考虑特征值是否大于 1<sup>[14]</sup>,试验提取前 3 个主成分,其特征值均大于 1,累计贡献率为 89.55%,可以有效地反映各

数据的变化,由表 3 可知,第 1 主成分的特征值为 3.754,贡献率最大为 46.92%,萌发抗旱指数、相对发芽势和相对发芽率有较高的载荷,说明第 1 主成分的抗旱能力主要由这 3 个指标决定;第 2 主成分特征值为 2.203,贡献率为 27.53%,相对活力指数和相对芽长有较高的载荷,说明第 2 主成分的抗旱能力主要由这 2 个指标决定;第 3 主成分特征值为 1.208,贡献率为 15.09%,相对活力指数和相对发芽率有较高的载荷,说明第 3 主成分的抗旱能力主要由这 2 个指标决定。综上所述,3 个主成分包含了 18 份绿豆 7 个指标 89.55% 的信息,对绿豆进行评价时,可以将相对发芽率、相对发芽势和相对活力指数作为评定指标。

表 3 PEG 渗透胁迫下绿豆各性状指标的主成分分析  
Tab.3 Principal component analysis of mung bean trait indicators under PEG osmotic stress

指标 Indicator	主成分 Principal component		
	1	2	3
相对发芽率 Relative germination percentage	0.606	0.596	0.297
相对发芽势 Relative germination potential	0.784	0.385	-0.277
相对根长 Relative root length	-0.510	0.532	-0.368
相对芽长 Relative bud length	-0.621	0.612	0.121
相对活力指数 Relative vitality index	0.465	0.737	0.322
萌发抗旱指数 Germination drought resistance index	0.822	-0.121	-0.183
特征值 Eigenvalue	3.754	2.203	1.208
贡献率/% Contribution rate	46.920	27.530	15.090
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	46.920	74.450	89.550

### 2.4 PEG 渗透胁迫下不同绿豆品种(系)萌发期抗旱性综合评价

根据每个主成分的特征值占所提取主成分的

总特征值的比例权重,得到主成分的综合得分<sup>[18,22]</sup>,再通过隶属函数值公式计算出各综合性状指标的隶属函数值,进一步得出综合评价 D 值(表 4)。

表 4 不同绿豆品种(系)综合评价价值、隶属函数值和综合评价 D 值  
Tab.4 Comprehensive evaluation value, membership function value, and comprehensive evaluation D value of different mung bean varieties (lines)

品种 Variety	综合评分值 Comprehensive score value			隶属函数值 Membership function value			综合评价 D 值 Comprehensive evaluation D value	排序 Ranking
	F1	F2	F3	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$		
晋绿 9 号 Jinlü 9	1.435	0.681	0.481	0.864	0.553	0.631	0.898	1
同 123-33 Tong 123-33	0.783	0.431	1.563	0.669	0.482	0.936	0.811	4
同 08-16 Tong 08-16	0.936	-1.252	-1.151	0.723	0.038	0.163	0.521	11
同绿 5 号 Tonglü 5	1.871	0.276	-1.214	1.032	0.461	0.156	0.841	3
同 09-17 Tong 09-17	-0.571	0.762	0.361	0.271	0.583	0.562	0.503	12
同 107-9 Tong 107-9	-0.158	-0.452	-0.421	0.387	0.271	0.381	0.446	15
同 116-3 Tong 116-3	-0.831	1.076	0.722	0.196	0.682	0.663	0.532	10
同 226-7 Tong 226-7	0.126	0.143	0.872	0.481	0.417	0.721	0.629	8
同 18-16 Tong 18-16	-0.251	1.026	-1.611	0.367	0.663	0.035	0.471	14
同 29-12 Tong 29-12	-0.513	-1.132	1.236	0.291	0.082	0.847	0.426	17

续表 4 不同绿豆品种(系)综合评价值、隶属函数值和综合评价 D 值  
 Tab.4 (Continued) Comprehensive evaluation value, membership function value, and comprehensive evaluation D value of different mung bean varieties (lines)

品种 Variety	综合评分值 Comprehensive score value			隶属函数值 Membership function value			综合评价 D 值 Comprehensive evaluation D value	排序 Ranking
	F1	F2	F3	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$		
同 121-1 Tong 121-1	-0.981	0.548	0.073	0.146	0.531	0.503	0.389	18
同 166-28 Tong 166-28	-0.461	-0.283	0.946	0.312	0.303	0.731	0.476	13
同 118-6 Tong 118-6	-0.061	2.233	0.932	0.431	1.026	0.751	0.789	6
同绿 6 号 Tonglü 6	1.781	-1.212	1.856	0.936	0.061	1.003	0.863	2
同 139-12 Tong 139-12	-0.551	-0.213	0.282	0.281	0.336	0.571	0.432	16
同 103-11 Tong 103-11	-0.269	1.481	-0.052	0.363	0.772	0.481	0.622	9
黄荚绿 Huangjiälü	1.762	-0.473	-0.181	0.943	0.263	0.451	0.803	5
同 62-36 Tong 62-36	0.966	1.083	-1.731	0.731	0.678	0.012	0.711	7

由表 4 可知,18 份绿豆种子的抗旱综合评价值各不相同,存在一定的差异,数值为 0.389~0.858,其中晋绿 9 号的综合评价值最大为 0.858,同 121-1 的综合评价值最小为 0.389,抗旱能力越强,其综合评价值越大,18 个品种的抗旱综合评价值大小依次为晋绿 9 号>同绿 6 号>同绿 5 号>同 123-33>黄荚绿>同 118-6>同 62-36>同 226-7>同 103-11>同 116-3>同 08-16>同 09-17>同 166-28>同 18-16>同 107-9>同 139-12>同 29-12>同 121-1。

### 2.5 PEG 渗透胁迫下不同绿豆品种(系)耐旱性聚类分析

对绿豆品种(系)的综合评价 D 值进行聚类分析,结果如图 1 所示。

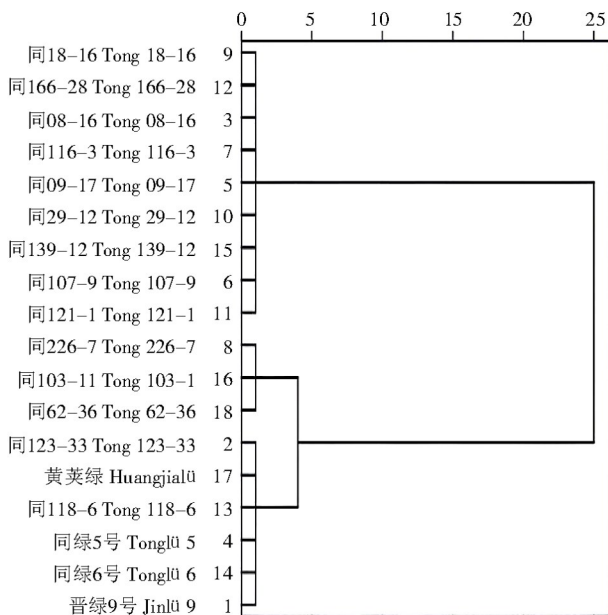


图 1 不同绿豆品种(系)耐旱指数聚类分析  
 Fig.1 Cluster analysis of drought tolerance index of different mung bean varieties (lines)

以欧氏距离为遗传距离,聚类分析采用离差平方和法<sup>[23]</sup>,在欧式距离为 5.0 时,将 18 个品种(系)聚为 3 个类型,6 个强耐旱品种分别为晋绿 9 号、同绿 6 号、同绿 5 号、同 118-6、黄荚绿、同 123-33;3 个耐旱品种分别为同 62-36、同 103-11、同 226-7;9 个较敏感的品种分别为同 121-1、同 107-9、同 139-12、同 29-12、同 09-17、同 116-3、同 123-33、同 166-28、同 18-16(图 1)。

### 3 结论与讨论

PEG-6000 是一种水溶性和脂溶性很好的高分子渗透剂,一定浓度的 PEG 能够有效模拟土壤干旱环境,植物细胞和组织处于类似于干旱胁迫之中,对其不会造成影响<sup>[17]</sup>。利用 PEG 模拟水分胁迫鉴定不同品种耐旱性是一种较为可靠的方法,广泛应用于小麦<sup>[19]</sup>、苜蓿<sup>[24]</sup>、油菜<sup>[25]</sup>等作物的抗旱性研究。张毅等<sup>[26]</sup>采用 5%~20% 的 PEG-6000 模拟干旱胁迫,研究不同程度的干旱胁迫对青稞各活力指标的影响,结果发现,随干旱胁迫程度的增大,发芽率、苗(芽)长、根(胚)鲜质量、发芽指数均呈现不同程度的降低趋势,且当 PEG-6000 胁迫浓度超过 10% 时,各指标出现急剧下降趋势,发芽势对胁迫响应下降趋势最小,地下部分比地上部分对于干旱胁迫更敏感。李静静等<sup>[16,27]</sup>研究表明,20% 的 PEG-6000 胁迫处理小麦种子后的芽长、主胚根长、芽鲜质量、根鲜质量、发芽率、发芽势、发芽指数均受到抑制,但不同品种的降幅存在显著差异。徐小玉等<sup>[28]</sup>研究表明,20% PEG 胁迫下,豇豆品种的萌发指标变化情况与本试验结果一致,这充分说明品种种类、PEG 浓度和处理时间等是影响植物种子萌发的重要因素<sup>[13,18]</sup>。

本试验采用 20%PEG 模拟干旱胁迫,对 18 个绿豆种子萌发期的相对发芽率、相对发芽势、相对胚根长、相对芽长、相对活力指数和萌发抗旱指数<sup>[14,18,29]</sup> 6 个相对性状指标,采用主成分分析和隶属函数法相结合的方法对其抗旱性进行综合评价<sup>[14]</sup>,通过聚类分析法对不同绿豆品种进行了筛选,在测定的 18 个品种中,晋绿 9 号、同绿 6 号、同绿 5 号、同 118-6、黄荚绿、同 123-33 耐旱性强,121-1、同 107-9、同 139-12、同 29-12、同 09-17、同 116-3 耐旱性弱。但是作物的抗旱性是由多种因素和相互作用构成的一个较为复杂的过程,萌发期鉴定结果只能作为衡量作物抗旱性强弱的一个方面,苗期和全生育期也有很大的不同,因此,可与全生育期相结合进行抗旱性综合评价,为绿豆抗旱新品种选育提供了理论依据<sup>[14,17]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 刘翔,左凯峰,许伟,等. PEG 6000 模拟干旱胁迫下甘蓝型油菜芽期及苗期抗旱指标筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5):66-70.  
LIU X, ZUO K F, XU W, et al. Selecting drought resistance indexes of *Brassica napus* L. under PEG 6000 simulated drought stress at germination and seedling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5):66-70.
- [2] 孙可蒙,隋晓青,王玉祥,等. PEG 模拟干旱胁迫下 12 份新疆野生无芒雀麦种质萌发期抗旱性评价[J]. 草原与草坪, 2020, 40(6):102-107.  
SUN K M, SUI X Q, WANG Y X, et al. Evaluation of drought resistance for 12 *Bromus inermis* germplasms in Xinjiang under PEG stress at germination stage[J]. Grassland and Turf, 2020, 40(6):102-107.
- [3] 王雅坤,李鸿萍,徐真真,等. 高温干旱复合胁迫对玉米光合生理的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(5):17-23.  
WANG Y K, LI H P, XU Z Z, et al. Effects of combined stress of high temperature and drought on photosynthetic physiology of maize[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(5):17-23.
- [4] 刘一明,冯宇,张瑜,等. PEG 模拟干旱胁迫下 3 种臂形草属植物种子萌发期抗旱性评价[J]. 草学, 2017(6):21-26.  
LIU Y M, FENG Y, ZHANG Y, et al. Evaluation of drought resistance of 3 *Brachiaria* plants at seed germination stage under PEG simulated drought stress[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2017(6):21-26.
- [5] 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, SONG Z J, ABULAITI. Evaluation of drought resistance of 29 germplasm seeds of *Elymus altissima* during germination under peg simulated drought stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2010, 32(1):32-39.
- [6] 杜吉到,屈春媛,李明,等. PEG 模拟干旱胁迫对芸豆萌发的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2015, 27(5):1-5.  
DU J D, QU C Y, LI M, et al. The effect of PEG simulation of drought stress on the germination of kidney beans[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural and Reclamation University, 2015, 27(5):1-5.
- [7] 张凤银,陈禅友,张萍,等. PEG 模拟不同程度干旱胁迫对长豇豆种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2014, 37(2):28-32.  
ZHANG F Y, CHEN C Y, ZHANG P, et al. Effects of different degrees of PEG simulated drought stress on seed germination and seedling physiology characteristics of cowpea[J]. Journal of Natural Sciences of Hunan Normal University, 2014, 37(2):28-32.
- [8] 龚子端,李高阳. PEG 干旱胁迫对植物的影响[J]. 河南林业科技, 2006, 26(3):21-23.  
GONG Z D, LI G Y. Effects of PEG drought stress on plants [J]. Journal of Henan Forestry Science and Technology, 2006, 26(3):21-23.
- [9] 杨柳. 聚乙二醇模拟干旱胁迫对黄/红麻种子萌发及茎段扦插的效应[D]. 南宁:广西大学, 2011.  
YANG L. Effects of simulated drought stress with polyethylene glycol on the seed germination and cutting of Jute and Kenaf[D]. Nanning:Guangxi University, 2011.
- [10] 刘世鹏,曹娟云,刘冲,等. 水分胁迫对绿豆幼苗渗透调节物质的影响[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2008, 27(1):55-58.  
LIU S P, CAO J Y, LIU C, et al. The effect of water stress on adjusting osmotic substance of mung seedling[J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition), 2008, 27(1):55-58.
- [11] 段义忠. 干旱胁迫对绿豆和黑豆发芽的影响[J]. 榆林学院学报, 2014, 24(4):7-11.  
DUAN Y Z. Resistance evaluation and response of different *Vigna radiata* varieties at germination stage to drought stress [J]. Journal of Yulin University, 2014, 24(4):7-11.
- [12] 段慧荣,李毅,马彦军. PEG 胁迫对沙冬青种子萌发过程的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3):221-225.  
DUAN H R, LI Y, MA Y J. Effects of PEG stress on seed germination of *Ammopiptanthus mongolicus*[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3):221-225.
- [13] 李萍,张雁霞,刘玉皎. PEG 胁迫下西北不同蚕豆种子萌发期的抗旱性鉴定[J]. 四川农业大学学报, 2015, 33(3):251-257.  
LI P, ZHANG Y X, LIU Y J. Drought tolerance of different fava beans during the germination stage under PEG stress in the Northwest China[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2015, 33(3):251-257.
- [14] 张凤银,陈禅友,徐小玉. 不同种质菜豆对 PEG 渗透胁迫的响应[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2014, 32(2):62-67.  
ZHANG F Y, CHEN S Y, XU X Y. Responses of different germplasms of *Phaseolus vulgaris* to PEG osmotic stress[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), 2014, 32(2):62-67.
- [15] 赵相勇,周雪,马培杰,等. 贵州扁穗雀麦种质萌发期和苗期的抗旱性鉴定与评价[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(8):19-29.  
ZHAO X Y, ZHOU X, MA P J, et al. Identification and evaluation on drought resistance of 41 *Bromus catharticus* germ-

- plasmids at germination and seedling stage in Guizhou[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2021, 49(8):19-29.
- [16] 惠雅佺, 罗永忠. 4个紫花苜蓿品种萌发期抗旱性比较[J]. 草原与草坪, 2021, 41(6):111-118.  
HUI Y N, LUO Y Z. Comparison of drought resistance among four alfalfa cultivars during germination[J]. Grassland and Turf, 2021, 41(6):111-118.
- [17] 杨忠仁, 郭霏, 张东, 等. 不同贮藏年限沙葱种子萌发及呼吸生理的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(11):91-96.  
YANG Z R, GUO F, ZHANG D, et al. Changes of germination and respiration physiology of *Allium mongolicum* seeds under different storage times[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2021, 49(11):91-96.
- [18] 李云, 杨梦涵, 王健, 等. PEG胁迫下谷子品种(系)萌发期耐旱性鉴定及评价[J]. 种子, 2022, 41(4):29-35.  
LI Y, YANG M H, WANG J, et al. Identification and evaluation of drought tolerance of millet varieties (lines) at germination stage under PEG stress[J]. Seed, 2022, 41(4):29-35.
- [19] 郑立龙, 李兴茂. 10个冬小麦品种萌发期抗旱性评价[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(2):70-75.  
ZHENG L L, LI X M. Evaluation of drought resistance of ten winter wheat cultivars at germination stage[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2021, 52(2):70-75.
- [20] 陈波, 张燕, 蔡光泽, 等. 玉米地方品种耐盐性鉴定及评价指标筛选[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(21):4722-4727.  
CHEN B, ZHANG Y, CAI G Z, et al. Screening of evaluation indices for salt tolerance of maize local varieties[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(21):4722-4727.
- [21] 张笛, 苗兴芬, 王雨婷. 100份谷子品种资源萌发期耐盐性评价及耐盐品种筛选[J]. 作物杂志, 2019(6):43-49.  
ZHANG D, MIAO X F, WANG Y T. Evaluation and screening of salt tolerance in 100 foxtail millet at germination stage[J]. Crops, 2019(6):43-49.
- [22] 殷丽丽, 邢宝龙. 晋北地区不同芸豆品种(系)的适应性评价[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(4):151-157.  
YIN L L, XING B L. Adaptability evaluation of different kidney bean varieties (lines) in northern Shanxi[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(4):151-157.
- [23] 朱东旭, 关中波, 徐桂真, 等. 油用向日葵品种主要农艺性状的主成分分析和聚类分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(12):152-156.  
ZHU D X, GUAN Z B, XU G Z, et al. Principal component analysis and cluster analysis of main agronomic traits of oil-sunflower varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(12):152-156.
- [24] 吴森, 刘信宝, 丁立人, 等. PEG模拟干旱胁迫下硅对紫花苜蓿萌发及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(6):1258-1264.  
WU M, LIU X B, DING L R, et al. Effects of silicon on germination and physiological characteristics of alfalfa under drought stress simulated by PEG[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(6):1258-1264.
- [25] 郭雪松, 唐章林. PEG胁迫下42个油菜品种(系)耐旱性的评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(10):1-7.  
GUO X S, TANG Z L. Evaluation of drought tolerance of 42 rapeseed genotypes in different PEG concentration treatments[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2009, 31(10):1-7.
- [26] 张毅, 韩玉娥, 张银乐, 等. PEG-6000模拟干旱胁迫下3个青稞品种的萌发特性及抗旱性评价[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15):139-142.  
ZHANG Y, HAN Y E, ZHANG Y L, et al. Germination characteristics and drought resistance evaluation of three highland barley cultivars under PEG-6000 simulated drought stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(15):139-142.
- [27] 李静静, 任永哲, 白露, 等. PEG-6000模拟干旱胁迫下不同基因型小麦品种萌发期抗旱性的综合鉴定[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(3):368-377.  
LI J J, REN Y Z, BAI L, et al. Comprehensive identification and evaluation of drought tolerance of different genotypic wheat varieties at germination stage by PEG-6000 simulated drought stress[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(3):368-377.
- [28] 徐小玉, 张凤银, 李俊芳. PEG渗透胁迫下12个豇豆品种萌芽期抗旱性评价[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(1):15-20.  
XU X Y, ZHANG F Y, LI J F. Evaluation of drought resistance of 12 cultivars of *Vigna unguiculata* under PEG osmotic stress during seed germination[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(1):15-20.
- [29] 余如刚, 张迪, 余心悦, 等. 13种小白菜苗期耐盐比较分析及耐性指标筛选[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(1):24-31.  
YU R G, ZHANG D, YU X Y, et al. Comparison analysis of salinity tolerance and screening of salinity tolerance indicators in 13 *Brassica rapa* l. ssp. chinensis varieties at seedling stage[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2022, 37(1):24-31.