

# 5种豆科绿肥作物种子萌发期与苗期的抗旱性研究

彭亚萍,朱文露,吴基正,李正华,唐云会,周凯\*

(云南农业大学动物科学技术学院,云南 昆明 650000)

**摘要:**【目的】本文围绕绿肥作物抗旱性的研究,为筛选出适宜干旱地区的绿肥品种提供理论依据。【方法】以毛苕子(*Vicia villosa*)、光叶紫花苕(*V. villosa* var. *glabresens*)、紫云英(*Astragalus sinicus*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)、箭筈豌豆(*V. sativa*)5种绿肥作物为研究对象,设置0%、5%、10%、15%和20%的聚乙二醇(PEG-6000)高渗溶液模拟干旱胁迫,萌发期测定发芽率、发芽势并计算萌发指数、抗旱指数和隶属函数值,苗期测定可溶性糖、脯氨酸、丙二醛含量以及电导率等指标,计算隶属函数值。【结果】PEG-6000浓度为5%和10%时,除箭筈豌豆外,其他绿肥作物的发芽率均高于对照,说明低浓度的PEG-6000对种子萌发具有一定的促进作用。随着胁迫浓度的升高,5种绿肥作物的发芽率、发芽势、萌发指数及抗旱系数不断下降,根据隶属函数综合分析评估指标值得出5种绿肥种子抗旱性顺序为:紫云英>草木樨>光叶紫花苕>箭筈豌豆>毛苕子。苗期可溶性糖含量、脯氨酸含量、丙二醛含量及电导率与对照相比均有所升高,其中草木樨的可溶性糖与丙二醛含量相比对照分别增加了16.27 mg/g和0.39  $\mu$ mol/g,毛苕子、光叶紫花苕的脯氨酸含量增加幅度较大,与CK相比较脯氨酸增加量分别为46.13  $\mu$ g/g、31.03  $\mu$ g/g,毛苕子的电导率较CK增加22.06%,在5种豆科绿肥中增加量最大,苗期各指标整合分析显示抗旱性强弱顺序为:箭筈豌豆>毛苕子>草木樨>光叶紫花苕>紫云英。【结论】综合萌发期及苗期5种绿肥作物的抗旱性,箭筈豌豆、光叶紫花苕这2种绿肥作物较草木樨、紫云英、毛苕子更适宜在干旱缺水地区推广种植。

**关键词:**绿肥;萌发期;苗期;抗旱性能;PEG胁迫

中图分类号:S551 文献标志码:A 文章编号:1009-5500(2024)02-0182-10

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.02.019



我国南方地区地形主要为山地和丘陵,耕地面积少,由于土壤肥力不足且零星耕种,在每年秋收之后就因撂荒而闲置<sup>[1-2]</sup>,土地撂荒不仅会造成大量水、土、光、热等农业资源浪费,而且不利于现代农业的可持续发展<sup>[3]</sup>,种植绿肥作物则是解决该问题的一个合理有效的方法。西南地区秋冬季干热少雨,降水量骤减,导致土壤干旱,进而降低绿肥作物的发芽率及出苗率,严重影响绿肥作物的生长及生物量,因此,绿肥作物的抗旱性是其能否被应用的关键因素之一。而

利用秋冬空闲季(10月至次年3月)种植具有耐旱性的绿肥作物,是农业生产上解决因撂荒造成农业资源浪费的行之有效的办法之一<sup>[4]</sup>。

绿肥是能够翻耕入土壤中用作肥料的绿色植物,目前已在农业生产中被广泛利用,在农业土地可持续利用上发挥着重大作用<sup>[5]</sup>,可以有效解决农业可持续发展的问题<sup>[6]</sup>。植物生命周期是以种子萌发为起点,而种子萌发期是植物出苗的关键阶段,是植物抗旱性研究的重要时期之一<sup>[7]</sup>,苗期是作物在生长发育过程中,对于外界环境变化最为敏感的一个时期。在干旱条件下,作物在苗期的表现,对于农艺性状及产量具有决定性作用<sup>[8-9]</sup>。为应对干旱条件下合理种植绿肥作物的问题,目前已开展了部分的绿肥作物抗旱性研究,但更多研究集中在萌发期<sup>[10-11]</sup>,绿肥作物萌发期

收稿日期:2023-03-17;修回日期:2023-08-26

基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目(2019J0151)

作者简介:彭亚萍(1998-),女,江西上饶人,硕士研究生。

E-mail:2043306256@qq.com

\*通信作者。E-mail:zhoukai1988@126.com

苗期综合抗旱性研究报道较少,如何进行萌发期及苗期综合抗旱性评价成为一个关键问题。综合萌发期和苗期抗旱性,则能更精准地筛选出适宜干旱地区种植的绿肥作物。

针对绿肥作物的抗旱性进行深入系统的研究,特别是针对绿肥作物生长早期的抗旱性,将会为绿肥作物抗旱品种的筛选提供一定的理论依据。本研究通过对毛苕子(*Vicia villosa*)、光叶紫花苕(*V. villosa* var. *glabresens*)、箭筈豌豆(*V. sativa*)、紫云英(*Astragalus sinicus*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)等5种豆科绿肥作物萌发期和苗期进行干旱胁迫,用盆栽控水法模拟干旱时作物的生长发育情况,观察作物农艺性状、测定生理生化指标,为筛选出适宜西南干旱地区种植的绿肥种类提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试材料为北京正道公司提供的毛苕子、光叶紫花苕、箭筈豌豆、紫云英、草木樨5种绿肥作物种子。

### 1.2 试验设计

1.2.1 萌发期 挑选子粒饱满,无虫害并且生命力旺盛的5种豆科绿肥作物种子于实验室培养皿内分别进行纸上萌发试验,用75%酒精消毒3 min,无菌蒸馏水反复冲洗,蒸馏水浸泡24 h;设计0(CK)、5%、10%、15%、20%共5个浓度梯度的PEG-6000高渗溶液模拟干旱胁迫,双层滤纸作为芽床,每个培养皿内50粒种子,重复3次;以25℃/12 h光照±20℃/12 h黑暗,70%湿度培养箱中进行培养,每天补充适量蒸馏水。观察发芽情况,发芽以胚根突破种皮,露白为标志,定时记录种子萌发数,直至第8天。在第4天调查发芽势,第8天调查发芽率。

1.2.2 苗期 挑选子粒饱满,无虫害并且生命力旺盛的5种豆科绿肥作物种子,用75%酒精消毒3 min,无菌蒸馏水反复冲洗,蒸馏水浸泡24 h;以规格为26 cm×21 cm的一次性塑料花盆作为容器,有机土与红土1:1为基质,在25℃/12 h光照、25℃/12 h黑暗,70%湿度培养室中播种,每供试材料重复6次。当植株出现第2片真叶时进行疏苗(各供试材料幼苗数量根据植株大小、面积而定)。试验设计分为2组,正常给水2周之后,对照组正常给水,试验组进行自然干

旱,当试验组出现50%植株萎蔫时,测定生理生化指标<sup>[12]</sup>。

### 1.3 测定指标

1.3.1 萌发指标的测定 发芽率(%)=(试验时间内发芽种子总数/供试种子数)×100%

发芽势(%)=(第4天种子发芽数/供试种子总数)×100%

种子萌发抗旱指数<sup>[13]</sup>(GDRI)=胁迫下种子萌发指数(P<sub>Is</sub>)/对照种子萌发指数(P<sub>Ic</sub>)

萌发指数=(1.00)nd<sub>2</sub>+ (0.75)nd<sub>4</sub>+ (0.5)nd<sub>6</sub>+ (0.25)nd<sub>8</sub>。

式中:nd<sub>2</sub>、nd<sub>4</sub>、nd<sub>6</sub>、nd<sub>8</sub>分别表示第2、4、6、8天种子萌发率。

1.3.2 苗期指标的测定 可溶性糖含量测定采用蒽酮-硫酸法<sup>[14]</sup>;脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮法<sup>[15]</sup>;丙二醛含量测定采用比色法<sup>[16]</sup>;电导率测定采用电导仪法<sup>[17]</sup>。测定指标所用材料均为不同品种绿肥的叶片,洗净擦干后用上述方法进行测定。

1.3.3 各指标抗旱系数的计算 在干旱条件下,水溶性很强的脯氨酸和可溶性糖含量增大,增强细胞的渗透调节能力,提高植株的抗旱性。为消除品种间各指标固有的差异性,脯氨酸、可溶性总糖按下面公式计算抗旱系数<sup>[18]</sup>:

$$\text{抗旱系数} = \frac{\text{干旱测定值} - \text{对照测定值}}{\text{对照测定值}}$$

干旱使丙二醛含量、电导率等值增大,破坏细胞膜的选择透性,因此丙二醛含量、电导率指标值的增大和升高都是植株不抗旱的表现。丙二醛、电导率指标的抗旱系数<sup>[18]</sup>计算公式如下:

$$\text{抗旱系数} = 1 - \frac{\text{干旱测定值} - \text{对照测定值}}{\text{对照测定值}}$$

用隶属函数法进行抗旱性综合评价,公式如下:

$$Xu = \frac{(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}$$

式中:X为某一抗旱指标的测定值;X<sub>max</sub>为一该指标的最大值;X<sub>min</sub>为该指标的最小值。把每个豆科牧草各项指标隶属函数值累加,取其平均值,根据各豆科牧草平均隶属函数值大小确定其抗旱性强弱<sup>[19-20]</sup>。

### 1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2019进行数据处理以及绘图,SPSS 23.0对数据进行统计。采用Duncan法进行

多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度 PEG-6000 胁迫对绿肥作物种子萌发的影响

2.1.1 不同浓度 PEG-6000 胁迫对绿肥作物种子发芽势的影响 不同绿肥作物种子发芽势在不同浓度 PEG-6000 胁迫下表现不同。箭筈豌豆种子发芽势随着 PEG-6000 浓度升高逐渐下降,在 20%PEG 浓度处理下发芽势仅为 18.67%,较 CK 下降 37.33%。在 5%PE 浓度处理下,各绿肥种子发芽势较 CK 相比均有同程度的降低,其中紫云英种子发芽势下降不明显,较 CK 仅下降 0.67%;毛苕子与光叶紫花苕发芽势较 CK 下降较为明显,下降率分别为 16.67%、14.67%。10% PEG 浓度处理下,除箭筈豌豆外,其余 4 种绿肥种子发芽势较 5% PEG 处理均有所升高,光叶紫花苕与紫云英发芽势较 CK 分别高出 1.33%、8.00%。15% PEG、20% PEG 处理种子发芽势较 CK 均呈下降趋势,其中毛苕子发芽势仅为 12.00%。

2.1.2 不同浓度 PEG-6000 胁迫对绿肥作物种子发芽率的影响 在 5% PEG 浓度处理下,5 种绿肥作物种子的发芽率较 CK 高,分别高出 7.33%、10%、6.67%、6%、6%(图 2)。在 10% PEG 浓度处理下,箭筈豌豆种子发芽率较 CK 呈下降趋势,下降 25.33%。其他绿肥作物种子发芽率均较 CK 高,分别高出 4.67%、6.66%、7.33%、5.33%,其中毛苕子、光叶紫花苕发芽率虽较 CK 高,但低于 5% 处理下的发芽率。此外,10% 浓度处理下紫云英种子发芽率较 5% 处理下发芽率高出 0.66%。由此说明:适当浓度 PEG-6000 胁迫下,可促进紫云英种子萌发。在 15%、20% PEG 浓度处理下 5 种豆科绿肥种子发芽率随着 PEG

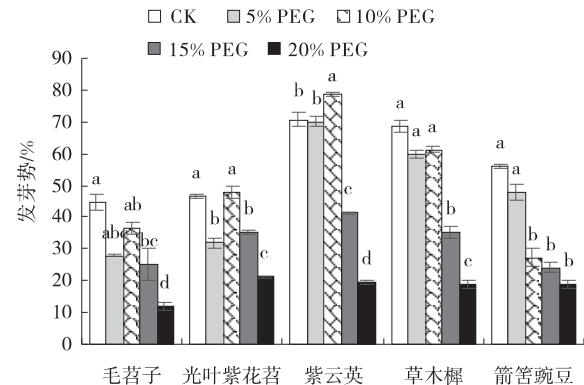


图 1 PEG-6000 胁迫对不同豆科种子发芽势的影响

Fig. 1 Effects of PEG-6000 Concentration Stress on Germination Potential of Different Legumes Seeds

注:小写字母表示相同浓度不同绿肥作物差异显著( $P < 0.05$ )。

浓度上升呈下降趋势。15% PEG 处理下的种子,发芽率较 CK 都受到不同程度的抑制,供试材料不同受抑制的程度不同,箭筈豌豆表现最为明显,发芽率为 51.33%,较 CK、5% PEG 处理分别降低 34.67%、43.67%。20% PEG 处理下,种子虽然能发芽但发芽率在 50% 以下。5 种豆科绿肥种子发芽率的差异显著性表现为:草木樨 > 光叶紫花苕 = 箭筈豌豆 > 毛苕子 = 紫云英( $P < 0.05$ )。

2.1.3 不同浓度 PEG-6000 胁迫对种子发芽指数的影响 箭筈豌豆种子萌发指数随着 PEG-6000 浓度升高呈下降趋势;毛苕子、光叶紫花苕、紫云英以及草木樨种子萌发指数随着 PEG-6000 浓度升高呈下降—升高—下降趋势(表 1)。5% PEG 浓度处理下,5 种绿肥作物种子萌发指数较 CK 处理均有所下降,10% PEG 浓度处理下,毛苕子、光叶紫花苕、紫云英和草木樨的萌发指数较 5% 浓度处理下均有所增加,15%、20% PEG 浓度处理下 4 种种子的萌发指数较 10% 浓度处理下逐步下降。

表 1 PEG-6000 胁迫对不同豆科种子萌发指数的影响

Table 1 Effects of PEG-6000 concentration stress on seed germination indexes of different legumes

材料	PEG-6000 浓度				
	0	5%	10%	15%	20%
毛苕子	86.67±4.37 <sup>a</sup>	75.00±1.53 <sup>ab</sup>	77.83±4.60 <sup>ab</sup>	61.50±14.00 <sup>b</sup>	32.67±5.51 <sup>c</sup>
光叶紫花苕	102.00±2.93 <sup>a</sup>	86.50±3.79 <sup>b</sup>	98.00±1.89 <sup>a</sup>	80.00±2.02 <sup>b</sup>	48.83±1.74 <sup>c</sup>
紫云英	157.33±8.08 <sup>b</sup>	152.50±5.41 <sup>b</sup>	182.83±8.09 <sup>a</sup>	84.17±0.44 <sup>c</sup>	50.17±2.33 <sup>d</sup>
草木樨	161.00±4.58 <sup>a</sup>	133.33±6.22 <sup>b</sup>	148.50±3.61 <sup>a</sup>	80.50±3.33 <sup>c</sup>	47.67±4.00 <sup>d</sup>
箭筈豌豆	124.50±3.62 <sup>a</sup>	97.33±6.65 <sup>b</sup>	64.33±4.92 <sup>c</sup>	53.17±6.13 <sup>c</sup>	47.67±5.29 <sup>c</sup>

注:同行数据后不同小写字母表示不同处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

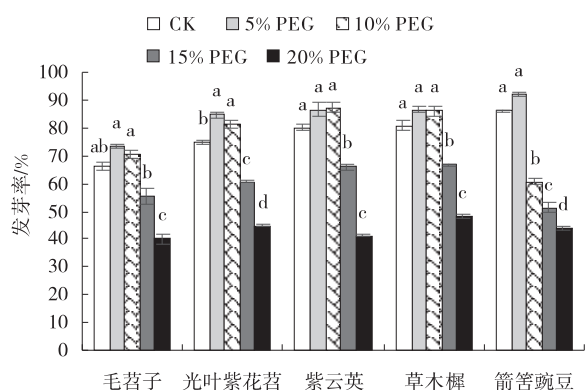


图2 PEG-6000浓度胁迫对不同豆科种子发芽率的影响

Fig. 2 Effects of PEG-6000 Concentration Stress on Germination Rate of Seeds of Different Legumes

2.1.4 不同PEG-6000浓度胁迫对绿肥作物种子抗旱指数的影响 随着PEG-6000浓度升高,箭筈豌豆种子抗旱指数呈下降趋势;毛苕子、光叶紫花苕、紫云

英、草木樨4种种子抗旱指数呈升高-降低趋势(表2)。5% PEG浓度处理下,毛苕子、光叶紫花苕、紫云英、草木樨种子抗旱指数均在0.8以上,其中紫云英种子抗旱指数高达0.97。10% PEG浓度处理下,箭筈豌豆种子抗旱指数为0.52,其余4种绿肥种子抗旱指数均达0.9以上,其中紫云英种子抗旱指数达1.17。15% PEG、20% PEG浓度处理下,5种绿肥种子抗旱指数与5%、10% PEG浓度相比有所降低。其中紫云英种子抗旱指数在15% PEG浓度下下降明显,抗旱指数为0.54;箭筈豌豆种子抗旱指数最低,为0.43。20% PEG浓度下,5种绿肥作物种子抗旱指数均在0.5以下,抗旱指数最高为0.48,属光叶紫花苕,紫云英与草木樨种子抗旱指数与其他绿肥作物相比较低,分别为0.32、0.30。

表2 不同PEG-6000浓度对不同豆科种子抗旱指数的影响

Table 2 Effects of Different PEG-6000 Concentrations on Drought Resistance Index of Different Leguminous Seeds

材料	PEG-6000浓度			
	5%	10%	15%	20%
毛苕子	0.87±0.04 <sup>a</sup>	0.91±0.10 <sup>a</sup>	0.72±0.18 <sup>ab</sup>	0.39±0.09 <sup>b</sup>
光叶紫花苕	0.85±0.06 <sup>ab</sup>	0.96±0.02 <sup>a</sup>	0.79±0.04 <sup>b</sup>	0.48±0.03 <sup>c</sup>
紫云英	0.97±0.02 <sup>b</sup>	1.17±0.07 <sup>a</sup>	0.54±0.02 <sup>c</sup>	0.32±0.02 <sup>d</sup>
草木樨	0.83±0.06 <sup>a</sup>	0.92±0.01 <sup>a</sup>	0.50±0.02 <sup>b</sup>	0.30±0.02 <sup>c</sup>
箭筈豌豆	0.79±0.07 <sup>a</sup>	0.52±0.05 <sup>b</sup>	0.43±0.06 <sup>b</sup>	0.38±0.03 <sup>b</sup>

2.1.5 萌发期抗旱综合评价 毛苕子、光叶紫花苕、紫云英、草木樨、箭筈豌豆种子萌发期各指标隶属函数值平均依次为0.34、0.45、0.60、0.53、0.36。5种绿肥作物种子萌发期抗旱性强弱顺序为:紫云英>草木樨>光叶紫花苕>箭筈豌豆>毛苕子(表3)。

## 2.2 干旱胁迫对不同绿肥苗期的影响

2.2.1 干旱胁迫对不同绿肥渗透调节物质的影响 在正常水分下,各绿肥作物的可溶性糖含量不一,毛苕子、光叶紫花苕、紫云英、草木樨、箭筈豌豆的可溶

性糖含量依次为46.87、38.15、65.85、54.87、70.37 mg/g(图3-A)。干旱胁迫下的5种绿肥作物中可溶性糖含量与正常水分条件下(CK)相比均表现为上升趋势,但供试材料不同增加量有所差异。从可溶性糖增加量看,草木樨的可溶性糖含量由原来54.87 mg/g增加至71.22 mg/g,增加了近2倍;光叶紫花苕可溶性糖含量由原来38.15 mg/g增加至54.42 mg/g,与CK相比增加了16.27 mg/g;箭筈豌豆干旱胁迫下可溶性糖含量为85.50 mg/g,较CK增加了15.13

表3 5种种子抗旱综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of drought resistance of 5 seeds

材料	隶属函数值					排名
	发芽率	发芽势	萌发指数	抗旱指数	平均值	
毛苕子	0.41	0.26	0.23	0.49	0.34	5
光叶紫花苕	0.56	0.37	0.34	0.54	0.45	3
紫云英	0.62	0.66	0.62	0.52	0.60	1
草木樨	0.65	0.55	0.54	0.39	0.53	2
箭筈豌豆	0.52	0.34	0.30	0.27	0.36	4

mg/g,虽然在5种绿肥作物中可溶性糖含量最高,但可溶性糖增加量比草木樨和光叶紫花苕低。紫云英可溶性糖含量较CK增加8.73 mg/g。毛苕子CK处理下可溶性糖含量为46.87 mg/g,干旱胁迫下含量为49.74 mg/g,与CK相比增加量较小,仅增加2.87 mg/g。在正常水分及干旱胁迫条件下,箭筈豌豆的可溶性糖含量与紫云英、草木樨存在差异但不明显( $P<0.05$ ),与毛苕子、光叶紫花苕存在显著差异( $P<0.05$ )。

干旱胁迫下的5种绿肥作物与CK处理下脯氨酸含量相比均表现为上升趋势(图3-B)。从增加量来看,毛苕子、光叶紫花苕脯氨酸含量增加的幅度较大,分别由原来72.61、76.32增加至118.74、107.35  $\mu\text{g/g}$ ,

与CK相比较脯氨酸增加量分别为46.13、31.03  $\mu\text{g/g}$ 。紫云英、草木樨的脯氨酸含量增加幅度较少,分别由原来12.07、23.69  $\mu\text{g/g}$ 增加至16.92、29.28  $\mu\text{g/g}$ ,与CK相比脯氨酸增加量分别仅为4.85、5.59  $\mu\text{g/g}$ 。干旱胁迫下箭筈豌豆脯氨酸含量为72.56  $\mu\text{g/g}$ ,较CK增加了24.05  $\mu\text{g/g}$ 。在正常水分及干旱胁迫条件下,5种绿肥作物之间存在差异。其中毛苕子与光叶紫花苕除在正常水分下与箭筈豌豆差异不显著,与其他作物在正常水分及干旱胁迫下均差异显著( $P<0.05$ )。正常水分条件下箭筈豌豆与紫云英、草木樨之间也存在差异,但不显著,而干旱胁迫条件下则存在显著差异( $P<0.05$ )。紫云英与草木樨之间无显著性差异。

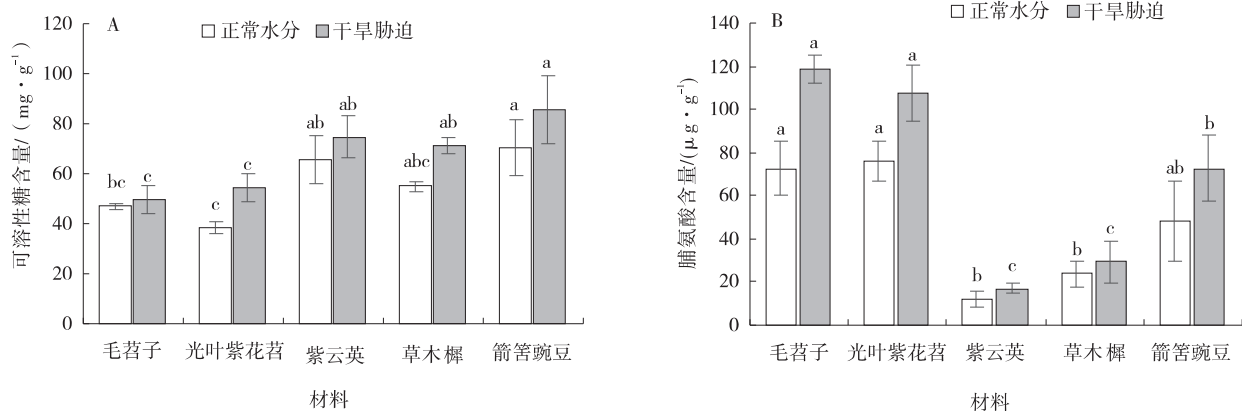


图3 干旱胁迫对植物可溶性糖和脯氨酸含量的影响

Fig. 3 Effects of water stress on soluble sugar and proline content in plants

注:不同字母表示相同条件下不同绿肥作物之间差异性( $P<0.05$ )。下同。

2.2.2 干旱胁迫对不同绿肥电导率和丙二醛的影响 在干旱处理下,5种绿肥作物的外渗电导率均呈上升趋势(图4-A),说明在水分胁迫条件下,不同绿肥品种的抗旱性不同。从相对电导率来看,不同处理下,各材料的电导率表现各不相同。毛苕子、光叶紫花苕、紫云英、草木樨以及箭筈豌豆5种绿肥作物在CK处理下的电导率分别为39.27%、28.16%、22.74%、18.34%、23.01%,在干旱胁迫下的电导率分别为61.33%、41.49%、33.87%、24.08%、38.31%,毛苕子在干旱胁迫下的电导率较CK增加22.06%,在5种豆科绿肥中增加量最大,而草木樨较CK增加5.74%,增长量较其他4种作物最小。光叶紫花苕、紫云英、箭筈豌豆的增加量依次为13.33%、11.13%、15.30%。毛苕子在不同水分条件下与其他4种作物相比均差异显著( $P<0.05$ )。在不同水分条

件下,光叶紫花苕与紫云英之间、草木樨与箭筈豌豆之间存在显著性差异( $P<0.05$ )。正常水分条件下,箭筈豌豆、紫云英与草木樨间存在显著差异( $P<0.05$ ),但二者间无显著差异。干旱胁迫条件下,箭筈豌豆与紫云英、草木樨之间存在显著差异( $P<0.05$ ),紫云英与草木樨存在显著差异( $P<0.05$ )。在干旱胁迫下5种绿肥作物的丙二醛含量较CK均呈上升趋势(图4-B)。在正常水分下,毛苕子、光叶紫花苕、紫云英、草木樨及箭筈豌豆5种绿肥作物的丙二醛含量依次为0.25、0.34、0.51、0.98、0.56  $\mu\text{mol/g}$ 。干旱胁迫下箭筈豌豆的丙二醛含量为0.59  $\mu\text{mol/g}$ ,较CK仅增加0.04  $\mu\text{mol/g}$ ;光叶紫花苕的丙二醛含量在干旱胁迫下为0.58  $\mu\text{mol/g}$ ,较CK增加0.24  $\mu\text{mol/g}$ 。不同处理下草木樨的丙二醛含量在5种绿肥作物中均最高,丙二醛含量增加量也最高。毛苕子与紫云英丙二

醛含量分别从原来 0.25、0.51  $\mu\text{mol/g}$  增加至 0.38、0.69  $\mu\text{mol/g}$ 。草木樨丙二醛含量在不同水分条件下与其他 4 种作物相比均差异显著 ( $P < 0.05$ )。在不同

水分条件下,毛苕子、光叶紫花苕、紫云英、箭筈豌豆四者之间无显著差异。

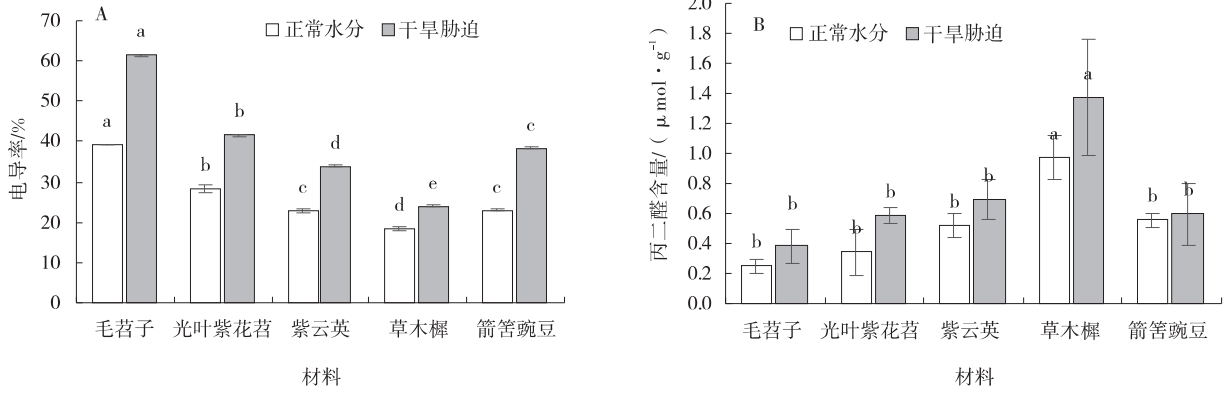


图 4 干旱胁迫下植物相对电导率和丙二醛含量的变化

Fig. 4 Changes in plant relative conductivity and malondialdehyde content under water stress

2.2.3 不同绿肥各单项指标的抗旱系数及相关分析 从可溶性糖含量看,毛苕子、光叶紫花苕、紫云英、草木樨以及箭筈豌豆的抗旱系数依次为 0.06、0.42、0.14、0.30、0.21,其中光叶紫花苕抗旱系数最高,其抗旱性较强。毛苕子抗旱系数仅仅为 0.06,抗旱系数最低,抗旱性较差。从脯氨酸含量看,5 种绿肥作物抗旱系数依次为 0.75、0.43、0.58、0.17、0.68,毛苕子抗旱系数最高,对应其抗旱性能最强;草木樨抗旱系数最低,对应其抗旱性能最弱。从丙二醛含量上看,箭筈豌豆抗旱系数为 0.93,抗旱系数最高。光叶

紫花苕的抗旱系数最小,为 -0.61。从相对电导率看,毛苕子的抗旱系数为 0.44,在 5 种绿肥作物中抗旱系数最小,草木樨的抗旱系数为 0.69,在 5 种绿肥作物种中抗旱系数最大,光叶紫花苕、紫云英、箭筈豌豆的抗旱系数分别为 0.52、0.51、0.34(表 4)。

2.2.4 不同绿肥苗期的抗旱性综合评价 毛苕子、光叶紫花苕、紫云英、草木樨、箭筈豌豆 5 种绿肥作物苗期综合隶属平均值依次为 0.45、0.37、0.31、0.39、0.47。因此这 5 种绿肥作物苗期抗旱性强弱顺序为箭筈豌豆 > 毛苕子 > 草木樨 > 光叶紫花苕 > 紫云英(表 5)。

表 4 5 种绿肥作物各单项指标的抗旱系数

Table 4 Drought resistance coefficients of each individual index of 5 green manure crops

材料	可溶性糖含量	脯氨酸含量	电导率	丙二醛含量
毛苕子	0.06 ± 0.11 <sup>b</sup>	0.75 ± 0.34 <sup>a</sup>	0.44 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.48 ± 0.28 <sup>a</sup>
光叶紫花苕	0.42 ± 0.17 <sup>a</sup>	0.43 ± 0.21 <sup>a</sup>	0.52 ± 0.05 <sup>b</sup>	-0.61 ± 1.01 <sup>a</sup>
紫云英	0.14 ± 0.04 <sup>b</sup>	0.58 ± 0.43 <sup>a</sup>	0.51 ± 0.04 <sup>b</sup>	0.52 ± 0.51 <sup>a</sup>
草木樨	0.30 ± 0.03 <sup>ab</sup>	0.17 ± 0.15 <sup>a</sup>	0.69 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.41 ± 0.67 <sup>a</sup>
箭筈豌豆	0.21 ± 0.03 <sup>ab</sup>	0.68 ± 0.30 <sup>a</sup>	0.34 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.93 ± 0.39 <sup>a</sup>

表 5 5 种绿肥作物苗期抗旱性综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of drought resistance at the seedling stage of five green manure crops

材料	隶属函数值					排名
	可溶性糖含量	脯氨酸含量	丙二醛含量	细胞膜透性	平均值	
毛苕子	0.21	0.78	0.06	0.74	0.45	2
光叶紫花苕	0.17	0.75	0.19	0.38	0.37	4
紫云英	0.68	0.02	0.31	0.23	0.31	5
草木樨	0.53	0.14	0.82	0.07	0.39	3
箭筈豌豆	0.84	0.45	0.29	0.29	0.47	1

### 3 讨论

#### 3.1 不同浓度 PEG-6000 胁迫对绿肥作物种子萌发的影响

本研究通过采用 PEG-6000 模拟干旱水分胁迫对 5 种豆科牧草种子萌发的差异性来反映它们的抗旱能力大小,研究发现 5% PEG 处理对 5 种豆科牧草种子的萌发具有一定促进作用,10% 处理下除箭筈豌豆外都有促进作用;研究结果表明,低浓度的 PEG-6000 胁迫对种子萌发具有一定的促进作用。Stefania 等<sup>[21]</sup>的研究表明,随着 PEG-6000 浓度的增加,种子的发芽率、发芽势等均呈下降趋势,但也有出现低浓度的 PEG 溶液能够促进种子萌发的现象,如刘佳月等<sup>[22]</sup>研究表明,低浓度 PEG-6000 溶液能够促进紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 和黄花苜蓿 (*M. falcata*) 种子发芽,而高浓度 PEG 溶液则抑制发芽;王亚楠等<sup>[7]</sup>研究发现,采用 5% PEG 溶液可以使草本植物种子的萌发出出现促进作用。Min<sup>[23]</sup>研究发现, -1 MPa PEG 浓度胁迫下,白菜的发芽率有所提高,低浓度低浓度 PEG 溶液能促进种子萌发。

种子萌发期的抗旱性采用单一指标进行评价不能对植物作出真实判断<sup>[24]</sup>。本研究利用 PEG-6000 模拟水分对 5 种豆科绿肥种子进行干旱胁迫,采用隶属函数对 5 种豆科绿肥种子的发芽率、发芽势、萌发指数以及抗旱指数进行综合抗旱评价,其萌发期抗旱性强弱依次为紫云英、草木樨、光叶紫花苜蓿、箭筈豌豆、毛苕子。秦文静等<sup>[25]</sup>评价了 4 种牧草萌发期对干旱胁迫的影响,研究结果表明毛苕子具有较强抗旱性;董浩等<sup>[26]</sup>通过隶属函数法,综合评估出 4 种果园绿肥种子在 PEG-6000 干旱胁迫下种子萌发抗旱性顺序中毛叶苕子抗旱能力较强;孙艳茹等<sup>[11]</sup>对包括毛苕子、黑麦草 (*Lolium multiflorum*)、沙打旺 (*Astragalus adsurgens*) 等 8 种绿肥作物进行了种子萌发期抗旱研究,评价结果显示毛苕子抗旱性为中等;赵佳阳等<sup>[27]</sup>研究表明,毛苕子抗旱萌发能力较强于紫云英,本研究中通过隶属函数法得出毛苕子在本研究中表现出较弱抗旱性,与上述学者研究结果不一致。原因可能是所采用的研究对象品种不同,不同品种的毛苕子抗旱性有所不同。

#### 3.2 干旱胁迫对不同绿肥苗期的影响

在苗期研究不同绿肥植物在干旱胁迫下的生理响应可以较好的反映植物生长期间抗旱性能的差异。Wang<sup>[28]</sup>及 Evandro 等<sup>[29]</sup>的研究表明:在受到干旱胁迫时,大多数植物会通过可溶性有机溶质或无机离子的主动积累来改善植株体内的水分和维持细胞内外渗透压,为植物正常生命活动创造条件,并且植物的抗旱性越强,可溶性物质积累量越高<sup>[30]</sup>。有大量研究表明,当植物受到干旱胁迫时,脯氨酸可作为渗透剂参与植物的渗透调节作用。因此干旱胁迫会导致植物体内脯氨酸的积累量增加<sup>[31-32]</sup>。本研究结果表明,在受到水分胁迫时,各绿肥作物叶片内脯氨酸含量增加,与洪开祥<sup>[33]</sup>及徐燕<sup>[34]</sup>等在毛苕子、箭筈豌豆、油菜 (*Brassica napus*) 等作物所得的结果基本一致。本研究结果表明,在干旱胁迫下,不同绿肥作物的脯氨酸含量和可溶性糖含量对干旱作出很快的响应,脯氨酸含量变化较大,各绿肥作物之间存在一定的差异。苗期一定的干旱胁迫时间下可溶性糖、脯氨酸的含量是上升的,而且其含量和供试材料的抗旱性显著相关,增加了植物体内的渗透势,增强了其抗旱能力。因此可溶性糖、脯氨酸含量可作为 5 种豆科绿肥作物苗期抗旱性鉴定的生理指标。

当植物受到干旱胁迫时,体内细胞膜最先受到损伤,从而引起电解质外渗,因此相对电导率的变化可反映植物在干旱胁迫下细胞组织受到伤害的程度,且在抗旱育种方面已经得到广泛应用<sup>[35-36]</sup>。大量研究表明,干旱胁迫会导致植物的相对电导率增加,且抗旱性强的植物相对电导率低,抗旱性弱的植物相对电导率高<sup>[37-38]</sup>。本研究结果表明,植物在受到一定程度的干旱胁迫后,植物的相对电导率增加,说明干旱处理下叶片细胞膜受到伤害,电解质大量外渗,且供试材料不同电解质的渗出量不同。因此外渗电导率含量越小,植株抗旱能力越强。

丙二醛含量是反映干旱胁迫对植物造成伤害的重要参数,当细胞受到干旱胁迫时,细胞膜就会发生氧化分解,丙二醛会大量积累,从而引起代谢失调和细胞内含物大量外渗和降解,最终导致细胞死亡<sup>[39-40]</sup>。本研究结果显示抗旱性强的绿肥作物丙二醛含量变化幅度较小,而抗旱性差的绿肥作物在干旱胁迫下含量变化较大。说明干旱胁迫使叶片细胞中

的过氧化物丙二醛含量增加,从而使细胞膜中酶蛋白发生交联、失活,以致使膜产生空隙,透性增强,因此丙二醛含量越小,植株抗旱能力越强。本研究结果表明:叶片电导率、丙二醛含量和供试材料的抗旱性关系密切。因此,叶片电导率、丙二醛含量可以作为5种豆科绿肥作物苗期抗旱性鉴定和评价的生理指标。

### 3.3 不同绿肥萌发期苗期的抗旱性差异

当萌发期受到干旱胁迫时会影响种子的出苗率;而苗期受到干旱胁迫时会影响作物后期的生长发育。前人在研究作物的抗旱性时通常只选择单一时期,如成镨等<sup>[41]</sup>和 Adele 等<sup>[42]</sup>均只针对萌发期的抗旱性表现进行了研究。张达斌等<sup>[43]</sup>和 Zhang 等<sup>[44]</sup>针对苗期的抗旱性性状进行研究。也有学者同时研究萌发期及苗期的抗旱性,李亮等<sup>[45]</sup>研究结果显示,在萌发期中表现出强抗旱优势的品种,在苗期没有表现强抗旱的优势。吴奇等<sup>[46]</sup>对多份高粱(*Sorghum bicolor*)种子萌发期以及部分高粱品种幼苗抗旱性进行评价,结果发现在中后期表现较强抗旱性品种,在萌发期没有表现出该优势。邵欢欢等<sup>[47]</sup>研究表明黍稷(*Panicum miliaceum*)的萌发期与苗期抗旱性没有显著相关性。在本研究中,萌发期采用的是不同浓度的 PEG-6000 高渗溶液模拟干旱的方式,苗期采用的是自然干旱法。萌发期抗旱性较强的紫云英、草木樨在苗期中并没有表现出强抗旱性的优势;苗期抗旱性较强的箭筈豌豆、毛苕子在萌发期中也没有表现出对干旱敏感,说明不同绿肥作物在萌发期和苗期的抗旱性存在差异,原因可能是由于不同时期的抗旱性机制因品种不同而有差异;也有可能是采用干旱胁迫的方式不同。

## 4 结论

对5种豆科绿肥作物萌发期和苗期进行干旱胁迫,种子萌发期抗旱性强弱顺序为:紫云英>草木樨>光叶紫花苕>箭筈豌豆>毛苕子,苗期抗旱性强弱顺序为:箭筈豌豆>毛苕子>草木樨>光叶紫花苕>紫云英。综合种子萌发期及苗期的发芽率、发芽势、发芽指数、可溶性糖含量、脯氨酸含量、丙二醛含量、电导率等指标,箭筈豌豆和紫花光叶苕是适合西南地区干旱区种植和利用的2个绿肥品种。

### 参考文献:

- [1] 王华,杨知建,李果.我国南方双季稻区冬闲田种草模式探讨[J].作物研究,2014,28(2):201-203.
- [2] 黄国勤.中国南方农业生态系统可持续发展面临的问题及对策[J].中国生态农业学报,2017,25(1):13-18.
- [3] 曹卫东,包兴国,徐昌旭,等.中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1450-1461.
- [4] 曹卫东,黄鸿翔.关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J].中国土壤与肥料,2009(4):1-3.
- [5] 王先伟,孟庆宏,王术科,等.绿肥在烤烟生产中的利用[J].中国烟草科学,2001(4):44.
- [6] 周孚美,唐红丽,谷云松,等.绿肥还田对植烟土壤·烟叶产质量的影响[J].安徽农业科学,2015,43(21):87-88.
- [7] 王亚楠,赵思明,曹兵.PEG-6000模拟干旱胁迫下10种草本植物萌发期抗旱性比较[J].草地学报,2020,28(4):983-989.
- [8] 蔺豆豆,赵桂琴,琚泽亮,等.15份燕麦材料苗期抗旱性综合评价[J].草业学报,2021,30(11):108-121.
- [9] 路之娟,张永清,张楚,等.不同基因型苦苣苔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.
- [10] 赵阳佳,吕鹏辉,徐小萌,等.7种绿肥作物种子萌发期抗旱性的研究[J].北京农学院学报,2019,34(4):32-35+76.
- [11] 孙艳茹,石屹,陈国军,等.PEG模拟干旱胁迫下8种绿肥作物萌发特性与抗旱性评价[J].草业学报,2015,24(3):89-98.
- [12] 张荟荟,杨钢,高洪文,等.10份豆科牧草的苗期抗旱性综合评价[J].新疆农业科学,2013,50(5):938-943.
- [13] 霍可以,刘英,向仰州,等.聚乙二醇浸种对高羊茅种子萌发的影响[J].种子,2021,40(10):74-79.
- [14] 吴文荣.玉米不同品种芽苗期抗旱性及指标的研究[D].北京:中国农业科学院,2008.
- [15] 杨娟,姜阳明,周芳,等.PEG模拟干旱胁迫对不同抗旱性玉米品种苗期形态与生理特性的影响[J].作物杂志,2021(1):82-89.
- [16] 王军,赵桂琴,柴继宽,等.BYDV侵染对燕麦总酚和渗透调节物质含量的影响[J].草原与草坪,2020,40(5):29-35.
- [17] 田小霞,许明爽,郑明利,等.黄花草木樨苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J].干旱区资源与环境,2021,35(10):120-127.



- [18] 梁晓华,梁晓东,徐成东,等. 云南3种蕨类植物部分生理生化指标的测定[J]. 江苏农业科学, 2010(4): 378—380.
- [19] 宋瑞军. 大豆耐旱指标评价、种质筛选及相关性状SSR标记关联分析[D]. 太谷:山西农业大学, 2015.
- [20] 闫春娟,宋书宏,王文斌,等. 大豆耐旱种质的鉴定[J]. 大豆科学, 2015, 34(1):163—167.
- [21] Stefania T, Daniela R, Alessandro T, *et al.* Effects of drought stress on seed germination of ornamental sunflowers[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2017, 39(8):184.
- [22] 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.
- [23] Min Y. Seed priming stimulate germination and early seedling growth of Chinese cabbage under drought stress [J]. *South African Journal of Botany*, 2015, 99:88—92.
- [24] 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.
- [25] 秦文静,梁宗锁. 四种豆科牧草萌发期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 草业学报, 2010, 19(4):61—70.
- [26] 董浩,史桂芳,牟小翎,等. 四种果园绿肥种子在PEG—6000模拟干旱胁迫下的萌发特性与抗旱性评价[J]. 山东农业科学, 2020, 52(11):141—145.
- [27] 赵阳佳,吕鹏辉,徐小萌,等. 7种绿肥作物种子萌发期抗旱性的研究[J]. 北京农学院学报, 2019, 34(4):32—35.
- [28] Wang X, Liu H, Yu F, *et al.* Differential activity of the antioxidant defence system and alterations in the accumulation of osmolyte and reactive oxygen species under drought stress and recovery in rice (*Oryza sativa* L.) tillering[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1):1—24.
- [29] Evandro N S, Sérgio L F, Ricardo A V, *et al.* The role of organic and inorganic solutes in the osmotic adjustment of drought-stressed *Jatropha curcas* plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 69(3): 279—285.
- [30] 王启明,徐心诚,吴诗光,等. 干旱胁迫对不同大豆品种苗期叶片渗透调节物质含量和细胞膜透性的影响[J]. 种子, 2005, 24(8):9—12.
- [31] 吴银明,王平,刘洪升,等. 分根PEG胁迫对羊草幼苗植物量、活性氧代谢及脯氨酸含量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(2):114—119.
- [32] 崔秀敏,王秀峰,许衡. 甜椒穴盘苗对不同程度水分胁迫—复水的生理生化响应[J]. 应用与环境生物学报, 2006(1):5—8.
- [33] 洪开祥,龙忠富,张建波,赵相勇. 5种一年生豆科牧草苗期的抗旱性[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(12): 113—115.
- [34] 徐燕. 土壤水分胁迫对菜心生理生化指标及气孔发育的影响[D]. 广州:暨南大学, 2010.
- [35] Stefani D, Wang L X, Pierre—André J. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179:18—33.
- [36] Daniel H, Matthias S, Nina B, *et al.* Nitrogen status of functionally different forage species explains resistance to severe drought and post-drought overcompensation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 236: 312—322.
- [37] 王文佳,李爽,马泽众,等. 水分胁迫对春大豆叶片保护酶活性及相对电导率的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(11):14—18.
- [38] 杨鹏辉,李贵全,郭丽. 干旱胁迫对不同抗旱大豆品种花荚期质膜透性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003(3): 127—130.
- [39] 张涛. 干旱和盐胁迫对花楸幼苗生理生化特性的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2019.
- [40] Li Z Y, Long R C, Zhang T J, *et al.* Molecular cloning and functional analysis of the drought tolerance gene MsHSP70 from alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Journal of Plant Research*, 2017, 130(2):387—396.
- [41] 成锴,苏晓慧,栗建枝,等. PEG—6000胁迫下玉米品种萌发期抗旱性鉴定与评价[J]. 玉米科学, 2017, 25(5): 85—90.
- [42] Adele M, Maria S, Umberto A, *et al.* Effect of PEG—induced drought stress on seed germination of four lentil genotypes [J]. *Journal of Plant Interactions*, 2014, 9(1): 354—363.
- [43] 张达斌,黄文凤,惠蕾,等. PEG胁迫下旱地油菜绿肥苗期抗旱性筛选和评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(1):168—180.
- [44] Zhang F T, Cui F L, Zhang X F, *et al.* Development and identification of a introgression line with strong drought resistance at seedling stage derived from *Oryza sativa* L. mating with *Oryza rufipogon* Griff [J]. *Euphytica*, 2014, 200(1):1—7.
- [45] 李亮,郝转芳,翁建峰,等. 玉米自交系萌发期与苗期的

- 耐旱性评价[J]. 玉米科学, 2011, 19(4): 5-9.
- [46] 吴奇, 周宇飞, 高悦, 等. 不同高粱品种萌发期抗旱性筛选与鉴定[J]. 作物学报, 2016, 42(8): 1233-1246.
- [47] 邵欢欢, 陆平, 史梦莎, 等. 黍稷芽、苗期抗旱性评价及抗旱资源鉴定[J]. 分子植物育种, 2021, 19(4): 1284-1296.

## Study on drought resistance during seed germination and seedling stage of five leguminous green manures

PENG Ya-ping, ZHU Wen-lu, WU Ji-zheng, LI Zheng-hua, TANG Yun-hui,

ZHOU Kai\*

(College of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650000, China)

**Abstract:** [Objectives] Drought significantly affects crop growth and yield, making the improvement of crop varieties' drought resistance a crucial aspect of contemporary agricultural research. This experiment delved into the drought resistance of green manure crops to provide a theoretical foundation for selecting green manure varieties in arid areas. [Method] Five green manure crops, i. e. *Vicia villosa*, *V. villosa* var. *glabbresens*, *Astragalus sinicus*, *Melilotus officinalis* and *V. sativa*, were studied. Hyperosmotic solutions of 0, 5%, 10%, 15%, and 20% PEG-6000 were employed to simulate drought stress. Germination rate and potential were measured during the germination stage, while germination index, drought resistance index, and membership function were calculated. At the seedling stage, soluble sugar, proline, malondialdehyde, and electrical conductivity were determined, and the membership function was calculated. [Result] The results showed that except for *V. sativa*, the germination rate of other green manure crops was higher than the control at 5% and 10% PEG-6000 concentrations, suggesting that low PEG-6000 concentrations promoted seed germination to some extent. However, stress concentration increased, the germination rate, potential, index, and drought resistance coefficient of the five green manure seeds decreased continuously. Evaluation index values suggested the drought resistance order as follows: *A. sinicus* > *M. officinalis* > *V. villosa* var. *glabbresens* > *V. sativa* > *V. villosa*. At the seedling stage, the activity of soluble sugar, proline, malondialdehyde, and electrical conductivity increased compared to the control. The soluble sugar and malondialdehyde content increased by 16.27 mg/g and 0.39  $\mu$ mol/g compared with the control, respectively. *V. villosa* and *V. villosa* var. *glabbresens* exhibited a notable increase in proline content compared to the control, with *V. villosa* showing a 46.13  $\mu$ g/g increase and *V. villosa* var. *glabbresens* a 31.03  $\mu$ g/g increase. The electrical conductivity of *V. villosa* increased by 22.06% compared with CK, and the increase was the largest among the five legumes. The integration analysis of indexes indicated the drought-resistance order as *V. sativa* > *V. villosa* > *M. officinalis* > *V. villosa* var. *glabbresens* > *A. sinicus*. [Conclusions] The study concluded that *V. sativa* and *V. villosa* var. *glabbresens* are more suitable for cultivation in arid and water-scarce areas compared to *M. officinalis*, *A. sinicus* and *V. villosa*.

**Key words:** green manure; emergence; seedling stage; drought tolerance; PEG stress

(责任编辑 刘建荣)