

# 干旱胁迫和复水对扁蓿豆幼苗生理特性的影响

蔡丽艳 孙启忠 李志勇 李鸿雁 师文贵 刘磊

(中国农业科学院 草原研究所,内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:**采用温室模拟干旱胁迫-复水法,研究不同干旱程度对6份扁蓿豆种质材料幼苗生理特性的影响,分别于连续干旱胁迫1、4、7、10 d以及复水2 d后,对其叶片相对含水量、细胞膜透性、丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性蛋白含量5个抗旱生理指标进行测定分析,结果表明:扁蓿豆叶片相对含水量随干旱胁迫程度增强而降低,在复水后快速恢复;细胞膜透性、丙二醛含量及可溶性蛋白含量随干旱程度的增加而升高,而脯氨酸含量则呈先下降后上升的趋势;5个生理指标中脯氨酸含量对干旱胁迫最敏感。采用欧氏距离法对5个生理指标进行综合聚类分析,将6份扁蓿豆种质材料划分为3个抗旱等级,即相对抗旱的包括MR4和MR5;中等抗旱的包括MR1、MR2和MR3;对干旱胁迫最敏感的是MR6。

**关键词:**扁蓿豆;干旱胁迫;复水;生理特性

中图分类号:Q945.78;S643.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2012)06-0107-06

## Effects of Drought Stress and Rehydration on Physiological Characteristics of *Medicago ruthenica* Seedling

CAI Li-yan, SUN Qi-zhong, LI Zhi-yong, LI Hong-yan, SHI Wen-gui, LIU Lei

(Grassland Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Huhhot 010010, China)

**Abstract:** The drought resistance of 6 germplasm materials of *Medicago ruthenica* was identified and evaluated using simulated drought stress and rehydration in a green house. The relative water content of leaves, cell membrane permeability, malondialdehyde content, proline content and soluble protein content were measured at 1, 4, 7, 10 d of drought stress and 2 days after rehydration. The relative water content of *Medicago ruthenica* leaves decreased with drought stress enhanced, but rapid recovery after rehydration. Cell membrane permeability, malondialdehyde content and soluble protein content increased with drought stress enhanced, but proline content was first decreased and then increased. Proline content was the most sensitive to drought stress in five physiological indexes. The three drought resistant classes: high drought resistance (MR4 and MR5), medium drought resistance (MR1, MR2 and MR3) and weak drought resistance (MR6) were classified using the above 5 physiological indexes by the Euclidean distance clustering method.

**Key words:** *Medicago ruthenica* (Linn.) Trautv.; Drought stress; Rehydration; Physiological characteristics

水资源短缺是目前公认的全球性环境焦点问题之一。水分胁迫是植物生长最普遍的限制因子<sup>[1-2]</sup>。我国是世界上最干旱的国家之一,干旱、半干旱面积占国土面积的52.5%<sup>[3]</sup>。特别是我国北方水资源相对匮乏,干旱已成为发展农业和畜牧业的主要限制因素。

扁蓿豆(*Medicago ruthenica*)是我国北方地区不

可或缺的优质蛋白质饲料之一,其生态适应性广,生态幅较宽,生态类型多样,在草地改良、生态治理及草产业开发等多种领域极具潜力<sup>[4]</sup>。近年来,许多专家学者对扁蓿豆种质资源的抗旱性鉴定与评价开展研究<sup>[5]</sup>。如石凤翎等<sup>[6]</sup>采用聚乙二醇(PEG 6000)溶液模拟干旱胁迫对种子萌发期抗旱性进行分析指出,相对发芽势及相对活力指数可作为扁蓿

收稿日期:2012-08-04

基金项目:农业部农作物种质资源保护与利用项目(NB2012-2130135-33);农业部牧草种质资源保护项目(2012-45);内蒙古自治区科技计划项目(优良牧草新品种土默特扁蓿豆标准化生产示范)

作者简介:蔡丽艳(1980-),女,内蒙古扎兰屯人,博士,在站博士后,主要从事草种质资源与遗传育种研究。

通讯作者:孙启忠(1959-),男,内蒙古五原人,研究员,博士,主要从事饲草栽培与利用研究。

豆种子萌发期抗旱性鉴定指标;赵丽丽<sup>[7]</sup>和胡卉芳<sup>[8]</sup>等发现扁蓿豆在种子萌发期的抗旱性高于黄花苜蓿,并初步提出扁蓿豆的抗旱性强于黄花苜蓿。郝建辉<sup>[9]</sup>和党伟光<sup>[10]</sup>先后测定了扁蓿豆在大田条件下的电导率、叶夹角、保水力及光合生理特性,认为光合强度、水分利用效率和保水力是评价扁蓿豆抗旱性适宜指标。石凤翎等<sup>[11]</sup>对扁蓿豆的根、茎、叶形态结构进行了观察研究,结果表明,可初步将叶片小、叶色淡绿、气孔密度大、细胞小、叶片栅栏组织排列紧密、具表皮毛作为扁蓿豆抗旱的形态解剖指标;乌日娅等<sup>[12]</sup>也指出扁蓿豆叶片具有一定的旱生解剖结构,侧脉维管束外有多层厚壁组织构成的维管束鞘。李鸿雁等<sup>[13]</sup>以6种豆科牧草的成熟叶片为材料,测定了与抗旱相关的解剖结构特征参数,得出扁蓿豆的抗旱性高于其他牧草;随后综合分析这

些解剖结构特征参数,将来自内蒙古的32份野生扁蓿豆种质资源聚合划分成五大类群,并初步筛选出抗旱性较强的种质材料<sup>[14]</sup>。然而,关于在干旱及复水条件下扁蓿豆幼苗生理特性分析的研究很少。本试验采用温室模拟干旱胁迫-复水法,分析6份扁蓿豆种质资源的幼苗对干旱胁迫的响应,探讨扁蓿豆幼苗在干旱胁迫及复水后的生理变化,并对抗旱性进行综合分析评价,划分不同抗旱级别,旨在为扁蓿豆抗旱性鉴定与利用提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试扁蓿豆材料均由中国农业科学院草原研究所国家牧草种质中期库提供(表1),种子均在2006年采收,4℃低温保存。

表1 试验材料及来源

Tab. 1 Materials and collection places

序号 Number	种质编号 Germplasm number	种子采集地 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	年降水量/mm AMP	草地类型 Grassland type
MR1	02920	锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗巴彦乌拉镇	E117°32'25"	N44°38'21"	1 018	350	典型草原
MR2	02956	锡林郭勒盟白音锡勒	E115°13'00"	N43°02'00"	989	345	典型草原
MR3	02972	通辽市大青沟自然保护区	E119°14'00"	N42°15'00"	650	500	典型草原
MR4	02982	呼和浩特市武川县	E111°28'55"	N41°02'43"	2 246	300	荒漠草原
MR5	02988	包头市土默特右旗	E110°32'00"	N40°33'00"	999	359	荒漠草原
MR6	03056	包头市土默特右旗	E110°50'55"	N40°48'12"	1 050	359	荒漠草原

### 1.2 试验设计

于2011年4月至6月和2012年4月6月在人工智能温室中进行。试验期间,温室平均气温32℃(白天)/16.5℃(夜晚),相对湿度60%~70%。将各扁蓿豆种子播种在口径为20 cm、高25 cm塑料花盆中,盆内装经过筛的干土2 kg,试验用基质由大田土:沙:羊粪按体积比2:2:1均匀混合而成。种子均匀撒播于盆中,轻轻用土覆盖1 cm,然后用水浇透,保持基质湿润,待苗齐后,间苗、定苗,每盆选留长势均匀的苗15株。播种后45 d(4~5片真叶)进行干旱胁迫处理。

### 1.3 指标测定

干旱胁迫前将水浇透,分别于连续干旱胁迫1, 4, 7, 10 d及复水后2 d上午8:00~9:00时取样,测定如下生理指标,3次重复,计算平均值。

土壤含水量采用烘干称重法<sup>[15]</sup>测定;叶片相对含水量采用重量法测定,  $RWC/\% = (\text{叶片鲜质量} - \text{干质量}) / (\text{水饱和质量} - \text{干质量}) \times 100$ <sup>[16]</sup>;细胞膜相对透性,用电导法测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法;游离脯氨酸含量(Pro)采用

茆三酮法测定;可溶性蛋白质含量(SP)的测定采用考马斯亮蓝G-250蛋白染色法<sup>[17]</sup>。

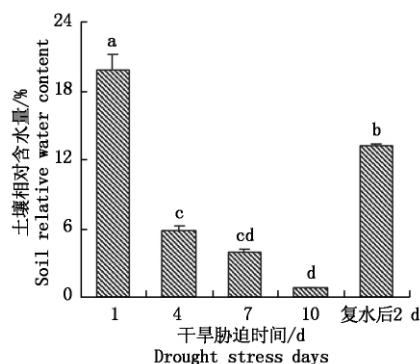
### 1.4 数据统计分析

采用Excel 2003整理,SAS 9.0统计分析试验数据。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异;利用NTSYSpc 2.1软件,采用欧氏距离法将标准化以后的数据进行聚类分析。研究中数据为3次重复的平均值  $\text{Mean} \pm \text{标准差}(\text{SE})$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱和复水过程中土壤相对含水量的变化

由图1可知,未进行干旱胁迫时土壤相对含水量为19.87%,停止浇水后土壤相对含水量逐渐降低,干旱10 d时各处理的土壤相对含水量降低到0.81%左右,仅为干旱胁迫1 d时的4.07%。经方差分析发现,处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。干旱10 d后开始复水,复水2 d时的土壤相对含水量恢复到13.23%,达到干旱胁迫1 d时的66.58%。



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level.

图1 干旱和复水过程中土壤相对含水量的变化

Fig.1 Changes of relative soil water content under drought stress and rehydration

表2 干旱和复水条件下扁蓿豆叶片相对含水量

Tab.2 Relative water content of *Medicago ruthenica* seedlings under drought stress and rehydration

%

种质材料 Material	干旱胁迫天数 Drought stress days				复水 2 天 2 days after rehydration
	1 d	4 d	7 d	10 d	
MR1	96.50 ± 0.90a	87.71 ± 0.71bc	71.75 ± 0.33e	42.58 ± 0.19b	86.70 ± 2.39b
MR2	82.72 ± 1.12b	81.71 ± 1.94d	79.79 ± 1.03bc	45.91 ± 2.50b	85.44 ± 1.85b
MR3	94.35 ± 0.39a	91.57 ± 1.28ab	76.92 ± 0.90cd	61.50 ± 2.67a	84.26 ± 0.81b
MR4	94.69 ± 0.43a	94.09 ± 0.47a	90.86 ± 0.09a	72.02 ± 1.22a	97.65 ± 0.65a
MR5	84.38 ± 2.43b	83.92 ± 1.05cd	82.65 ± 0.62b	66.09 ± 2.86a	88.74 ± 2.86ab
MR6	93.18 ± 0.77a	92.46 ± 1.28ab	72.90 ± 2.02de	40.58 ± 1.84b	86.90 ± 0.80b

注: 同列不同小写字母间差异显著 ( $P < 0.05$ )。表 3 ~ 6 同。

Notes: Means with different letters in the same column are significantly different at the 0.05, the same as Tab. 3 ~ 6.

### 2.3 干旱和复水过程中扁蓿豆叶片细胞膜相对透性的变化

干旱胁迫时,细胞膜的损伤使膜透性增加,电解质大量外渗,外渗液电导率越高,质膜损伤程度越大,抗逆性越弱<sup>[21]</sup>。从表 3 可以看出,随着持续干旱胁迫天数的增加,各材料叶片相对电导率逐渐增大;干旱胁迫到第 10 天时,叶片相对电导率均达到

### 2.2 干旱和复水过程中扁蓿豆叶片相对含水量的变化

水分是维持植物体正常生理作用的基础,叶片相对含水量可以反映植物体内水分亏缺程度,干旱胁迫下植物叶片相对含水量可反映植物的保水能力<sup>[18-20]</sup>。从表 2 可以看出,6 份扁蓿豆种质材料的幼苗叶片相对含水量均随着干旱胁迫程度的加剧而下降。当持续干旱 1,4,7 d 时,叶片相对含水量下降的较缓慢;持续干旱 10 d 时,叶片相对含水量急剧下降,材料 MR1 和 MR6 的相对含水量均不足对照的 50%;复水 2 d 后叶片相对含水量均能恢复到干旱胁迫 1 d 时的 89.31% ~ 105.17%。整体来看,材料 MR4 和 MR5 的叶片相对含水量随干旱胁迫的加剧下降得较慢,复水后恢复得较快,说明其叶片相对保水能力较强。

最大,特别是 MR1 和 MR6 与胁迫 1 d 时的比较,分别增加了 236.19%、372.85%,而 MR4 和 MR5 仅增加了 43.42%、89.29%;复水 2 d 后叶片的相对电导率均有不同程度的回落,其中 MR4 仅恢复到干旱胁迫 1 d 时的 36.69%,其余均能恢复到 72.16% ~ 116.45%。表明在干旱胁迫时,MR4 和 MR5 的叶片细胞膜受损程度相对较小,抗旱性较强。

表3 干旱和复水条件下扁蓿豆叶片相对电导率

Tab.3 Leaf relative electrical conductivity of *Medicago ruthenica* seedlings under drought stress and rehydration

%

种质材料 Material	干旱胁迫天数 Drought stress days				复水 Rehydration
	1 d	4 d	7 d	10 d	
MR1	3.15 ± 0.02e	4.34 ± 0.01b	6.97 ± 0.01b	10.59 ± 0.04b	2.48 ± 0.03cd
MR2	5.37 ± 0.04a	5.53 ± 0.02a	5.80 ± 0.15c	10.77 ± 0.05b	1.97 ± 0.09e
MR3	3.89 ± 0.02c	4.43 ± 0.01b	6.18 ± 0.01c	8.84 ± 0.06c	4.53 ± 0.03a
MR4	4.69 ± 0.01b	5.59 ± 0.07a	5.70 ± 0.17c	7.70 ± 0.09d	3.98 ± 0.15b
MR5	3.71 ± 0.01d	4.35 ± 0.01b	4.92 ± 0.10d	7.02 ± 0.14e	2.73 ± 0.09c
MR6	2.91 ± 0.01f	3.06 ± 0.01c	8.36 ± 0.17a	13.76 ± 0.09a	2.10 ± 0.01de

### 2.4 干旱和复水过程中扁蓿豆叶片丙二醛含量的变化

植物在干旱胁迫下往往发生膜过氧化作用,丙二醛是膜脂过氧化最终分解产物,它的含量不但标志着膜脂过氧化程度,也间接反映组织中自由基的

含量<sup>[22]</sup>。从表 4 可以看出,随着持续干旱胁迫天数的增加,各材料叶片丙二醛的含量逐渐增大,持续干旱 1 ~ 7 d 的增加幅度缓慢;持续干旱胁迫 10 d 时,叶片丙二醛的含量急剧增加,此时各材料丙二醛含量为干旱胁迫 1 d 时的 4.09 ~ 5.34 倍;复水后显著

下降。整体看来材料 MR3 和 MR6 在持续干旱胁迫时叶片丙二醛含量增加的速度较快,而复水后含量

仍为干旱胁迫 1 d 时的 1.78,1.75 倍,而其他材料均为对照的 1.04~1.35 倍。

表 4 干旱和复水条件下扁蓿豆叶片丙二醛含量

Tab. 4 MDA content in leaves of *Medicago ruthenica* seedlings under drought stress and rehydration  $\mu\text{mol/g}$

种质材料 Material	干旱胁迫天数 Drought stress days				复水 Rehydration
	1 d	4 d	7 d	10 d	
MR1	12.84 $\pm$ 0.15a	13.09 $\pm$ 0.11b	18.46 $\pm$ 0.43a	52.50 $\pm$ 0.56b	14.16 $\pm$ 0.14ab
MR2	12.81 $\pm$ 0.05a	14.88 $\pm$ 0.05a	18.66 $\pm$ 1.20a	52.89 $\pm$ 0.03b	13.36 $\pm$ 0.34ab
MR3	9.69 $\pm$ 0.75b	8.47 $\pm$ 0.01c	17.18 $\pm$ 0.99a	51.72 $\pm$ 0.49bc	17.28 $\pm$ 0.43ab
MR4	11.94 $\pm$ 0.38ab	15.57 $\pm$ 0.45a	15.18 $\pm$ 0.02a	55.81 $\pm$ 0.37b	12.95 $\pm$ 0.10b
MR5	12.38 $\pm$ 0.18a	12.14 $\pm$ 0.29b	14.08 $\pm$ 0.00a	61.28 $\pm$ 1.27a	16.69 $\pm$ 1.06ab
MR6	10.33 $\pm$ 0.59ab	8.12 $\pm$ 0.14c	16.59 $\pm$ 1.58a	50.11 $\pm$ 0.70c	18.10 $\pm$ 0.45a

## 2.5 干旱和复水过程中扁蓿豆叶片脯氨酸的变化

脯氨酸和可溶性蛋白是植物在逆境条件下积累的一种小分子渗透调节物质。干旱胁迫 4 d 时,从表 5 可以看出,各扁蓿豆叶片的脯氨酸含量均低于对照,为对照的 26.86%~87.57%,其中 MR2 和 MR3 下降较慢分别为对照的 86.29%,87.57%,其他材料均小于 71%;随着干旱胁迫时间的延续,脯氨酸含量呈急剧增加趋势,当持续干旱胁迫 10 d

时,MR4 和 MR5 的脯氨酸含量已高达 1 882.23,1 520.63 ng/g,显著高于其他材料( $P<0.05$ ),此时 MR2 脯氨酸含量最低,也达到对照的 18.25 倍以上。复水 2 d 后,脯氨酸含量均有不同程度的回落,但均不能回到干旱胁迫前的水平,MR4 回落幅度最明显,含量仅为 224.73 ng/g,显著低于其他材料( $P<0.05$ ),但仍为对照的 2.77 倍。

表 5 干旱和复水条件下扁蓿豆叶片脯氨酸含量

Tab. 5 Proline content in leaves of *Medicago ruthenica* seedlings under drought stress and rehydration ng/g

种质材料 Material	干旱胁迫天数 Drought stress days				复水 Rehydration
	1 d	4 d	7 d	10 d	
MR1	41.69 $\pm$ 0.03b	25.02 $\pm$ 0.94b	971.34 $\pm$ 0.00ab	1 028.31 $\pm$ 29.53cb	465.99 $\pm$ 6.26bc
MR2	46.69 $\pm$ 0.06b	40.29 $\pm$ 1.32a	252.01 $\pm$ 6.43d	852.36 $\pm$ 41.57d	287.03 $\pm$ 6.38cd
MR3	31.13 $\pm$ 1.08b	27.26 $\pm$ 0.21c	933.88 $\pm$ 0.31b	1 072.39 $\pm$ 42.31cd	643.00 $\pm$ 13.42ab
MR4	81.12 $\pm$ 2.64a	21.79 $\pm$ 0.79c	241.91 $\pm$ 0.62d	1 882.23 $\pm$ 10.03a	224.73 $\pm$ 3.34d
MR5	66.40 $\pm$ 6.98a	44.86 $\pm$ 2.51a	408.73 $\pm$ 5.00c	1 520.63 $\pm$ 65.48b	450.58 $\pm$ 29.60bc
MR6	35.99 $\pm$ 0.58b	25.28 $\pm$ 0.38c	996.16 $\pm$ 19.63a	1 216.56 $\pm$ 103.02bc	835.08 $\pm$ 87.82a

## 2.6 干旱和复水过程中扁蓿豆叶片可溶性蛋白的变化

在持续干旱胁迫下,扁蓿豆叶片中可溶性蛋白含量呈逐渐增加的趋势,但变化幅度不及脯氨酸明显(表 6)。干旱胁迫 4 d 时,各扁蓿豆叶片的可溶性蛋白含量为对照的 1.13~2.01 倍;当干旱胁迫持

续 7 d 时叶片可溶性蛋白含量达到对照的 1.39~2.50 倍;当持续干旱 10 d 时,可溶性蛋白的含量最高,也仅达到对照的 1.63~2.76 倍;复水 2 d 时,可溶性蛋白含量均有不同程度的回落,但仍为对照的 1.02~1.56 倍。整体看来,材料 MR1 和 MR3 可溶性蛋白含量变化幅度较大,而 MR2 变化较缓慢。

表 6 干旱和复水条件下扁蓿豆叶片可溶性蛋白含量

Tab. 6 Soluble protein in leaves of *Medicago ruthenica* seedlings under drought stress and rehydration  $\mu\text{g/g}$

种质材料 Material	干旱胁迫天数 Drought stress days				复水 Rehydration
	1 d	4 d	7 d	10 d	
MR1	1 737.44 $\pm$ 98.94b	3 499.90 $\pm$ 25.40a	4 337.28 $\pm$ 129.47ab	4 581.12 $\pm$ 78.05b	2 212.79 $\pm$ 127.31c
MR2	2 830.98 $\pm$ 38.80a	3 405.44 $\pm$ 41.15a	3 973.80 $\pm$ 94.68ab	4 609.22 $\pm$ 20.16b	3 313.21 $\pm$ 231.50a
MR3	2 038.36 $\pm$ 63.30b	3 444.97 $\pm$ 71.53a	4 440.48 $\pm$ 266.48a	4 672.62 $\pm$ 230.84b	2 078.25 $\pm$ 50.32c
MR4	1 787.85 $\pm$ 94.87b	2 021.05 $\pm$ 146.15b	3 341.13 $\pm$ 55.44c	4 932.51 $\pm$ 86.94ab	2 794.35 $\pm$ 45.88ab
MR5	2 022.90 $\pm$ 230.67b	2 478.81 $\pm$ 116.24b	3 773.44 $\pm$ 78.91bc	4 871.75 $\pm$ 210.79ab	2 553.52 $\pm$ 3.76bc
MR6	2 911.49 $\pm$ 41.72a	3 745.41 $\pm$ 83.70a	4 052.13 $\pm$ 67.07ab	5 530.17 $\pm$ 47.16a	3 057.34 $\pm$ 179.19ab

## 2.7 聚类分析

在分析整个干旱胁迫过程中,各扁蓿豆种质材

料的叶片相对含水量、细胞膜透性、丙二醛含量、脯氨酸含量及可溶性蛋白含量 5 个生理指标的变化趋

势, 及其变化幅度与其抗旱性的关系分析的基础上, 将持续干旱胁迫 10 d 时测定的叶片相对含水量、细胞膜透性、丙二醛含量、脯氨酸含量及可溶性蛋白含量 5 个生理指标的数据, 进行标准化处理后, 采用欧氏距离聚类分析方法进行综合聚类分析(图 2), 当欧氏距离为 201.83 时, 可将 6 份扁蓿豆种质材料聚合划分为 3 个抗旱等级, 即相对抗旱的包括来源于荒漠草原的 MR4 和 MR5, 这二者的叶片相对含水量、丙二醛和脯氨酸含量在 6 份扁蓿豆种质材料中最高, 而膜透性最低, 可溶性蛋白含量处于中等水平; 抗旱中等的包括来源于典型草原的 MR1、MR2 和 MR3, 他们在持续干旱 10 d 时的叶片相对含水量和丙二醛含量均处于中等水平, 细胞膜透性较高, 脯氨酸和蛋白含量较低; MR6 对干旱胁迫最敏感, 其叶片相对含水量的丙二醛含量在 6 份材料中最低, 可溶性蛋白含量最高, 细胞膜透性和脯氨酸含量中等。

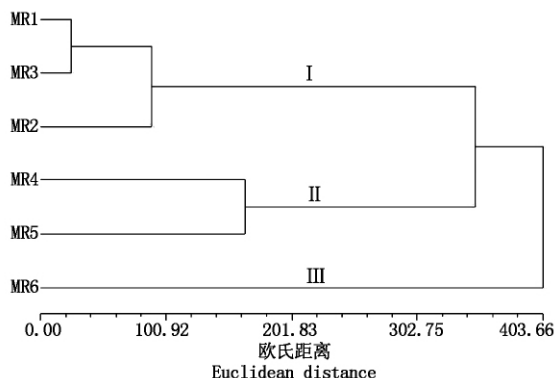


图 2 6 份扁蓿豆种质材料抗旱性欧氏距离聚类分析

Fig. 2 Synthesis clustering of drought resistance for 6 germplasm materials of *Medicago ruthenica*

### 3 结论与讨论

植物抗旱性是由多基因控制的性状或多种因素相互作用的结果, 单一的指标很难说明某种植物抗旱性的强弱, 因此选用多种指标, 并在此基础上进行综合分析, 才能反映植物抗旱性的真实情况<sup>[23]</sup>。本试验选用的叶片相对含水量、细胞膜透性、丙二醛量、脯氨酸及可溶性蛋白含量等 5 个生理指标均与植物抗旱性密切相关, 且均是近年来较常用的生理生化指标<sup>[24-25]</sup>。

植物叶片相对含水量能反映出植物水分状况与蒸腾作用之间的平衡关系, 抗旱性强弱在很大程度上取决于水分胁迫下细胞的持水能力以及干旱胁迫后细胞的复水能力。6 份扁蓿豆种质材料叶片相对含水量随着干旱胁迫程度的加剧而下降, 说明在干旱胁迫过程中扁蓿豆叶片的水分亏缺程度在逐渐增大; 复水后恢复到接近胁迫前水平。从整个胁迫过

程来看, MR4 和 MR5 的叶片相对含水量随干旱胁迫的加剧下降的较慢, 复水后恢复得较快, 说明其叶片相对保水能力较强。

植物在逆境条件下, 细胞体内活性氧的不断积累加速质膜过氧化的反应, 引起丙二醛等有害物质的积累, 严重损伤生物膜, 导致细胞膜透性的增大和胞间物质的外渗, 植物的相对电导率增大<sup>[26]</sup>。本研究中, 随着持续干旱胁迫天数的增加, 扁蓿豆叶片丙二醛含量和细胞膜透性逐渐增大, 说明干旱胁迫加剧了丙二醛等对细胞膜有害物质的积累, 使细胞膜受到损伤; 复水后丙二醛含量和细胞膜透性均显著下降, 表现出扁蓿豆叶片细胞膜具有较强的修复能力。

在干旱胁迫下植物细胞内游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质大量积累, 以降低渗透势和水势, 有利于植物在干旱条件下吸收水分<sup>[27-28]</sup>。在本试验中可溶性蛋白含量随着干旱胁迫的加剧, 逐渐增大; 脯氨酸含量则先降低后增加, 这与王彬等<sup>[23]</sup>的研究结果一致, 可能是扁蓿豆幼苗对干旱胁迫的一种适应, 其叶片可能产生了暂时的生理休克。游离脯氨酸和可溶性蛋白作为渗透调节物质, 在干旱胁迫下表现出不同的趋势, 可能是渗透胁迫物质所起的作用和调节机制不同, 其原因有待于进一步研究。此外, 与可溶性蛋白相比, 在干旱胁迫时, 游离脯氨酸的变化幅度更大, 说明其对干旱更为敏感。

总之, 在持续干旱胁迫下, 扁蓿豆幼苗叶片相对含水量逐渐降低, 复水后快速恢复; 细胞膜透性、丙二醛含量及可溶性蛋白含量逐渐升高, 而脯氨酸含量则呈先下降, 后上升的趋势。在这 5 项指标中, 脯氨酸含量对干旱胁迫最敏感。综合聚类分析可知, 幼苗期 MR4 和 MR5 相对抗旱, MR1、MR2 和 MR3 的抗旱性中等, 而 MR6 对干旱胁迫最敏感。

#### 参考文献:

- [1] 张智猛, 戴良香, 丁红, 等. 中国北方主栽花生品种抗旱性鉴定与评价[J]. 作物学报, 2012, 38(3): 495-504.
- [2] 山仑, 徐炳成. 黄土高原半干旱区建设稳定人工草地的探讨[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 1-2.
- [3] 牛瑞明, 王燕, 吴桂丽, 等. 裸燕麦种子萌发对模拟干旱胁迫的响应及其耐旱性综合评价[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(4): 753-756.
- [4] Guan B, Zhou D, Zhang H, et al. Germination responses of *Medicago ruthenica* seeds to salinity alkalinity and temperature[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(1): 135-138.

- [5] 韩海波,师文贵,李志勇,等.扁蓿豆的抗性研究进展[J].草业科学,2011,28(4):631-635.
- [6] 石凤翎,王素巍,李俊海.扁蓿豆属牧草种子及其幼苗抗旱的初步研究[C]//中国草学会第六届二次学术会议论文集,2004:497-503.
- [7] 赵丽丽,王照兰,杜建材,等.扁蓿豆不同种质材料种子萌发期抗旱性比较[J].种子,2007,26(12):13-16.
- [8] 胡卉芳,王照兰,杜建材,等.PEG胁迫下不同品系扁蓿豆种子的萌发特性[J].草原与草坪,2010,30(3):74-77.
- [9] 郝建辉,石凤翎.不同扁蓿豆材料抗旱性比较研究[J].中国草地学报,2006,28(3):39-43.
- [10] Dang W G, Hao J H, Shi F L. Primary Research of Photosynthesis Traits of *Melilotoides ruthenicus* (L.) Sojak Forage[J]. Chinese Journal of Grassland, 2006, 28(5): 46-53.
- [11] 石凤翎,郭晓霞,李红.扁蓿豆抗旱形态解剖结构观察与分析[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):115-118.
- [12] 乌日娅,雍世鹏,包贵平.扁蓿豆生态生物学特性的比较研究[J].中国草地,1994(2):1-7.
- [13] 李鸿雁,李志勇,师文贵,等.6种豆科牧草叶片解剖性状与抗旱性关系研究[J].西北植物学报,2010,30(10):1989-1994.
- [14] 李鸿雁,李志勇,师文贵,等.内蒙古扁蓿豆叶片解剖性状与抗旱性的研究[J].草地学报,2012,21(3):138-146.
- [15] Schmuge T J, Jackson T J, McKim H L. Survey of methods for soil moisture determination [J]. Water Resources Research, 1980, 16(6): 961-979.
- [16] 张治安,张美善,蔚荣海.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业科学技术出版社,2004:65-67.
- [17] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2002:59-60,184-263.
- [18] 霍红,张勇,陈年来,等.干旱胁迫下五种荒漠灌木苗期的生理响应和抗旱评价[J].干旱区资源与环境,2010,25(1):185-189.
- [19] 张冬玲,刘建宁,王运琦,等.羊茅种质资源苗期抗旱生理响应及综合评价[J].山西农业科学,2010,38(10):20-25.
- [20] 石永红,万里强,刘建宁,等.干旱胁迫对6个坪用多年生黑麦草品种抗旱性的影响[J].草地学报,2009,17(1):52-57.
- [21] 孟林,杨宏新,毛培春,等.偃麦草属植物种间苗期抗旱性评价[J].草业学报,2011,20(5):34-41.
- [22] 赵世杰.植物组织中丙二醛测定方法的改进[J].植物生理学通讯,1994,30(3):207-210.
- [23] 王彬,李长鼎,马仲泽,等.4个高羊茅品种幼苗期抗旱性比较研究[J].农业科学研究,2011,32(3):22-26.
- [24] 张国芳,孟林,毛培春.偃麦草和中间偃麦草种质材料苗期抗旱性鉴定研究[J].华北农学报,2007,22(3):54-59.
- [25] 孟林,毛培春,张国芳.不同居群马蔺抗旱性评价及生理指标变化分析[J].草业学报,2009,18(5):18-24.
- [26] 杨帆,苗灵凤,胥晓,等.植物对干旱胁迫的响应研究进展[J].应用与环境生物学报,2007,13(4):586-591.
- [27] 范苏鲁,苑兆和,冯立娟,等.干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响[J].应用生态学报,2011,22(3):651-657.
- [28] 董伊晨,刘悦秋.土壤水分对异株荨麻保护酶和渗透调节物质的影响及其与叶片光合和生物量的相关性[J].生态学报,2009,29(6):2845-2851.