

# 华南地区4种阔叶幼苗水分胁迫条件下的抗旱性初探

史小玲<sup>1</sup>, 薛立<sup>1\*</sup>, 任向荣<sup>1,2</sup>, 冯慧芳<sup>1</sup>, 郑卫国<sup>1</sup>, 傅静丹<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学林学院, 广东 广州 510642; 2. 新疆农科院综合试验场, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:**以火力楠、山杜英、木荷、黛蕨幼苗为试验材料,利用聚乙二醇 6000(PEG-6000)人工模拟水分胁迫环境,研究了水分胁迫对这4种幼苗的影响。结果表明:随着水分胁迫强度的增加,火力楠和木荷叶片的相对含水量下降幅度较小,山杜英次之,黛蕨下降幅度最大;火力楠和木荷叶片的相对电导率上升幅度较小,山杜英次之,黛蕨叶片的相对电导率大幅增加;火力楠和木荷幼苗叶片脯氨酸含量变化不大,而山杜英和黛蕨比对照有明显的增加;4种幼苗叶片的可溶性糖含量随着水分胁迫强度的增加呈上升趋势;4种幼苗叶片的叶绿素含量一般呈小幅波动;重度胁迫36 h后,火力楠和木荷叶片的SOD活性显著提高,山杜英显著低于对照,黛蕨接近对照水平;火力楠叶片的MDA含量略有增加,木荷保持稳定,山杜英明显增加,黛蕨大幅增加。用主成分分析评价4种幼苗的抗旱性,结果表明:4种幼苗的抗旱性为木荷>火力楠>山杜英>黛蕨。

**关键词:**阔叶树种;幼苗;华南地区;水分胁迫;抗旱性

中图分类号: S722.3<sup>+</sup>6

文献标识码: A

## Preliminary Study on Drought Resistance of Four Broadleaved Seedlings under Water Stress in South China

SHI Xiao-ling<sup>1</sup>, XUE Li<sup>1</sup>, REN Xiang-rong<sup>1,2</sup>, FENG Hui-fang<sup>1</sup>, ZHENG Wei-guo<sup>1</sup>, FU Jing-dan<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China;

2. Integrated Experimental Station of Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

**Abstract:** The drought resistance of *Michelia macclurei*, *Elaeocarpus sylvestris*, *Schima superba* and *Castanopsis fissa* seedlings was studied under artificial simulated water stress by using PEG-6000. The results are as follows: With the water stress increasing, the decrease of relative water contents in leaves of *M. macclurei* and *S. superba* seedlings was relatively small, followed by *E. sylvestris*, whereas that of *C. fissa* was the largest. The relative conductivities of leaves of *M. macclurei* and *S. superba* seedlings increased slightly, followed by *E. sylvestris*, whereas that of the *C. fissa* increased greatly. The contents of free proline in leaves of *M. macclurei* and *S. superba* changed a little, whereas those of *E. sylvestris* and *C. fissa* increased significantly compared to the controls. The contents of soluble sugar in leaves of the four seedlings tended to increase with increasing stress intensity; the chlorophyll contents in leaves of the four seedlings fluctuated slightly with increasing stress intensity; the activities of SOD in leaves of *M. macclurei* and *S. superba* seedlings were significantly greater than that of the controls, and that of *E. sylvestris* was significantly smaller than the control, whereas that of *C. fissa* seedling was close to the control under severe stress with 36 hours. The content of MDA slightly increased for *M. macclurei* seedling, significantly increased for *E. syl-*

收稿日期: 2009-05-08

基金项目: 广东省林业局资助项目(4400-F07064, 4400-F08018)

作者简介: 史小玲(1985—),女,安徽人,硕士研究生,主要从事森林培育学和森林生态学研究。

\* 通讯作者。

vestris seedling, kept steady for *S. superba* seedling and greatly increased for *C. fissa* seedling. The drought resistance of the four seedlings was evaluated with principal component analysis, indicating that their drought resistance was in the order of  $t S. superba > M. macclurei > E. sylvestris > C. fissa$ .

**Key words:** broadleaved tree; seedling; South China; water stress; drought resistance

水分是影响树木成活与生长的重要限制因子。我国有约1/3的国土面积处于干旱、半干旱地区,即使在非干旱的地区,也常常会受到旱灾的侵袭<sup>[1]</sup>,在我国多雨的亚热带,也存在旱季、早年和缺水的立地条件,在干旱条件下,树木会在生理生化方面表现出一定的特点以适应干旱环境。叶片相对含水量在一定程度上体现了树木对干旱的抵抗力,干旱条件下的膜透性反映了膜的稳定性。水分胁迫下,树木叶绿素含量发生变化,其脯氨酸、可溶性糖等物质的渗透调节是适应干旱胁迫的一种重要生理机制,而丙二醛(MDA)、植物内源保护酶系如SOD的变化可以反映植物抗旱性的强弱。国外关于干旱对草地<sup>[2-4]</sup>、热带森林<sup>[5-6]</sup>的影响进行了广泛的研究,国内关于干旱对植物影响的研究集中在北方森林<sup>[7-9]</sup>。火力楠(*Michelia macclurei* Dandy)、木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)、鬃蕨(*Castanopsis fissa* Rehd. et Wils.)是我国南方重要的优良乡土阔叶树种,山杜英(*Elaeocarpus sylvestris* (Lour.) Poir.)在华南地区广泛栽植,但目前还没有这4种树种抗旱性研究的报道。本试验利用聚乙二醇(PEG-6000)人工模拟干旱条件,对这4个树种的抗旱性进行研究,并用主成分分析法对各树种的抗旱性进行定量评价,可以为干旱条件下的树种选择提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验地在华南农业大学林学院的教学苗圃内,所用幼苗为营养袋培育的实生苗,苗龄6个月。幼苗生长基本情况见表1。采用长60 cm,宽37 cm,深17 cm的塑料盆作水培器材,在塑料泡沫板打孔后置于盆表面,将幼苗插于盆内的营养液中。营养液选用霍格兰(Hoagland)营养液配方。

表1 4种幼苗的基本情况

幼苗	平均地径/cm	平均苗高/cm	平均冠幅/cm
火力楠	0.54	46.9	22
山杜英	0.53	48.1	21
木荷	0.39	31.6	19
鬃蕨	0.33	34.0	25

### 1.2 试验方法

1.2.1 不同水分胁迫强度处理 在新鲜营养液里加入PEG6000配制成不同浓度的胁迫溶液:轻度胁迫5% (50 g · L<sup>-1</sup>PEG)、中度胁迫10% (100 g · L<sup>-1</sup>PEG)、重度胁迫15% (150 g · L<sup>-1</sup>PEG),对应的渗透势分别为-0.054、-0.177、-0.393 MPa<sup>[10]</sup>。把苗的根部浸入胁迫溶液中进行水分胁迫处理,以不加PEG6000的1/2Hoagland营养液中的幼苗为对照。

1.2.2 不同水分胁迫持续时间处理 各胁迫强度均设3组持续时间处理,分别在胁迫持续12、24、36 h时采集叶片,以不加PEG6000持续12 h的幼苗为对照,测定各项生理指标。

1.2.3 幼苗处理 选取形态长势基本一致的幼苗,洗净根部后插入打好孔的泡沫板中,板置于盛有营养液的塑料盆上。水培苗先在1/2Hoagland营养液中恢复2 d,再移入用营养液配制的具有不同渗透势的PEG6000溶液中进行不同强度及不同持续时间的不同水分胁迫处理。各处理均在28℃左右的室温下进行,相对湿度为75%~85%,水培后每天通气1次。幼苗处理后,不同树种选择生长良好,大小均一的叶片在早晨8:30从3株幼苗上采集样品,从下而上取每棵植株的第3位至第8位功能叶,用自来水轻轻冲洗除去表面污物,再用蒸馏水冲洗2~3次后,用吸水纸轻轻吸干叶片表面水分,混合采集叶片后进行生理指标测定。

### 1.3 生理指标测定

叶片相对含水量按照饱和含水量法测定<sup>[11]</sup>,叶片相对电导率用电导法,叶绿素含量用分光光度法,脯氨酸含量用酸性茚三酮法,丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸(TBA)比色法,超氧化物歧化酶(SOD)活性用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)光化还原法测定<sup>[11]</sup>,可溶性糖按照蒽酮比色法测定<sup>[12]</sup>。每指标3次重复。

### 1.4 综合评价

为综合评价不同树种的抗旱性,采用主成分分析方法进行综合评定,并计算各树种得分,以确定4个树种的抗旱性<sup>[13]</sup>。

## 1.5 数据统计

数据统计分析和作图由 Microsoft Excel 和 SAS8.1 软件系统完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分胁迫对幼苗叶片相对含水量的影响

叶片相对含水量是植物有效吸收并运输至叶片的水分,抗旱性强的树种其叶片结构特征有利于保持水分,叶片相对含水量下降的速度往往比抗旱性弱的树种要迟缓<sup>[14]</sup>。由图1可见:随着胁迫强度的增加,处理12 h的火力楠和山杜英叶片的相对含水量逐步下降,处理24 h的下降后小幅回升,处理

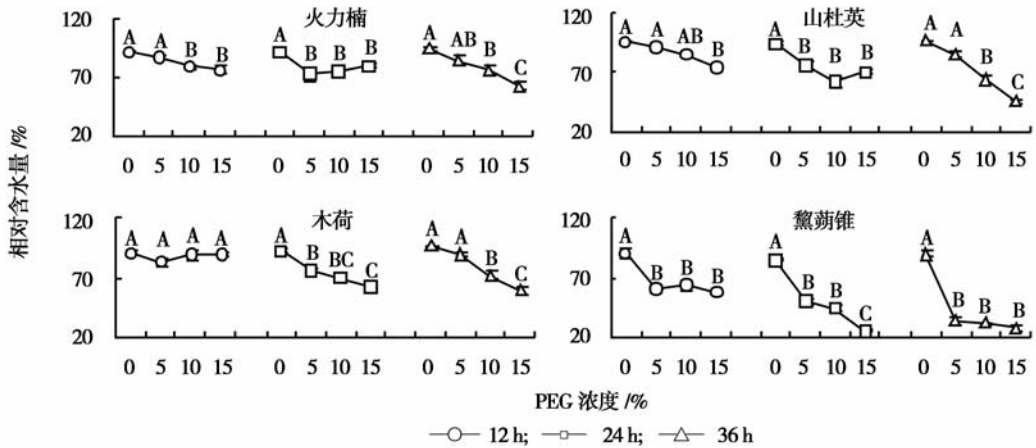


图1 水分胁迫对4种阔叶幼苗叶片相对含水量的影响

### 2.2 水分胁迫对幼苗叶片相对电导率的影响

水分胁迫能造成质膜的选择性丧失,膜的相对透性增加,离子大量外渗,组织浸泡液的相对电导率增加。抗旱性强的树种这种质膜的透性的变化可以逆转,易恢复正常<sup>[15]</sup>。由图2可见:随着胁迫强度的增加,处理12、24 h的火力楠叶片的相对电导率在PEG浓度5%时出现高峰,各处理都明显高于对照( $P < 0.05$ ),处理36 h的呈逐渐上升趋势。处理12 h的山杜英叶片的相对电导率逐渐升高;处理24、36 h的急剧上升后又下降,各处理均显著高于对照( $P < 0.05$ )。处理12 h的木荷叶片的相对电导率在PEG浓度5%时达到最大后下降;处理24 h的显著上升( $P < 0.05$ );处理36 h的显著上升后缓慢上升。处理12、24 h的藜蒴锥叶片的相对电导率急剧上升后又下降,然后再上升;处理36 h的上升后下降,各处理均显著高于对照( $P < 0.05$ )。随着水分胁迫强度的加深及胁迫时间的延长,尽管火力楠和木荷幼苗叶片的相对电导率有所上升,但通常上升幅度小,表明抗旱性较强。藜蒴锥在处理12 h时相

36 h的持续下降;处理12 h的木荷叶片相对含水量无显著变化,处理24、36 h的逐渐下降;处理12、36 h的藜蒴锥叶片相对含水量急剧下降后小幅波动,处理24 h的急剧下降后,又缓慢下降,接着大幅下降。植物组织的水分分为自由水与束缚水2种,植物体内的自由水与植物的结构物质结合不牢固,很容易散失到植物体外;束缚水是亲和细胞胶体的水,不易蒸腾,与植物抗旱能力有关。火力楠和木荷叶片的相对含水量变化较小,表明其束缚水的含量较高,对干旱胁迫有一定的适应能力,而山杜英和藜蒴锥叶片的相对含水量急剧下降,表明其自由水的含量较高,蒸腾强烈,抗旱能力弱。

对电导率大幅度增加,山杜英的相对电导率增幅也较大,说明二者的外渗电解质比较多,抗旱性较弱。

### 2.3 水分胁迫对幼苗叶片脯氨酸含量和可溶性糖含量的影响

渗透调节物质有较强的水合能力,在植物遭受干旱时有助于细胞或组织的持水作用,保持膨压,在水势低的情况下调节某些生理过程,减少组织或细胞由于脱水造成的伤害。由图3可见:随着胁迫强度的增加,处理12 h的火力楠叶片的脯氨酸含量先下降后又上升,处理24、36 h的上升后下降。处理12 h的山杜英叶片的脯氨酸含量略降后显著上升( $P < 0.05$ ),最后又下降到对照水平;处理24 h的上升后略降,在PEG浓度15%时急剧增加到最大值;处理36 h的在PEG浓度5%时达到最大值后下降。处理12 h的木荷叶片脯氨酸含量小幅波动,处理24、36 h的上升后又下降。处理12、24、36 h的藜蒴锥叶片的脯氨酸含量均表现上升后下降,处理12 h的在PEG浓度5%时达最大值,而处理24、36 h的在PEG浓度10%时达最大值。研究表明:干旱可

以刺激细胞内脯氨酸的增加<sup>[16-17]</sup>,以提高其渗透调节能力,增强植物的抗旱能力<sup>[18]</sup>。经水分胁迫处理后,火力楠和木荷幼苗叶片脯氨酸含量上升幅度小,山杜英和藜蒴锥与对照相比脯氨酸含量有明显

的增加。在处理36 h时,山杜英和藜蒴锥分别在PEG浓度5%和10%时达到了耐受胁迫的极限,胁迫强度再增加,脯氨酸含量开始下降。说明水分胁迫很严重时,其渗透调节能力有所减弱或丧失<sup>[19]</sup>。

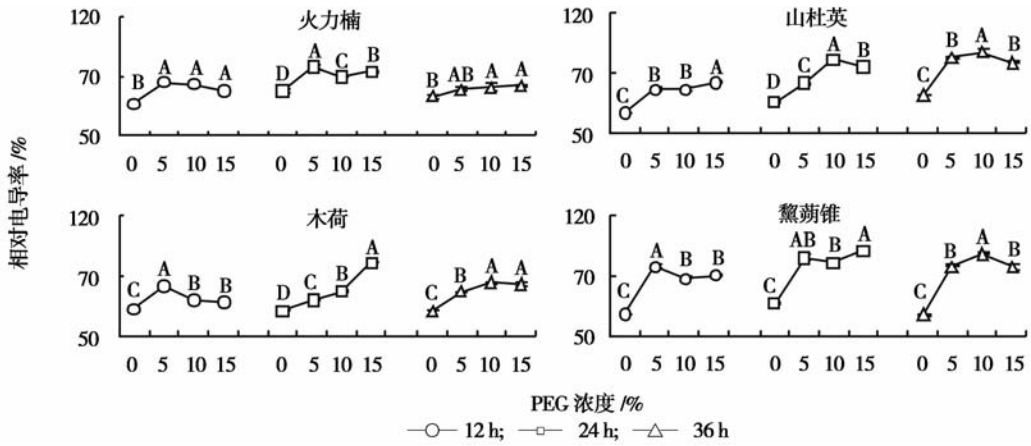


图2 水分胁迫对4种阔叶幼苗叶片相对电导率的影响

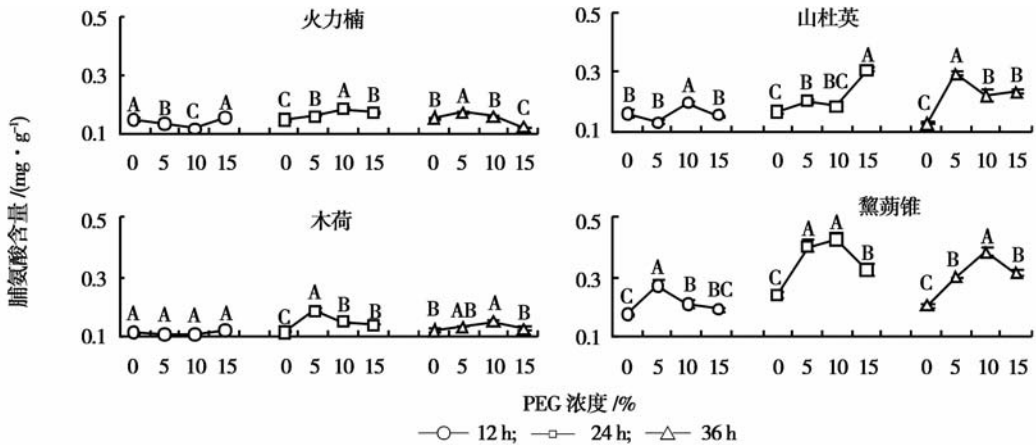


图3 水分胁迫对4种阔叶幼苗叶片脯氨酸含量的影响

当受到水分胁迫时,植物体内常积累大量的可溶性糖,以降低原质体的渗透势,有利于细胞从外界水势降低的介质中继续吸水,使植物体保持一定的含水量和膨压势,维持细胞正常的功能,提高抗逆适应性<sup>[20]</sup>。由图4可见:随着胁迫强度的加剧,处理12 h的火力楠叶片的可溶性糖含量逐渐上升,当PEG浓度为10%和15%时其含量显著大于对照( $P < 0.05$ );处理24 h的上升略降又升,在PEG浓度5%、15%时显著高于对照( $P < 0.05$ );处理36 h的微降后显著上升( $P < 0.05$ )。处理12、24 h的山杜英叶片的可溶性糖含量先升后降,处理36 h的上升下降再上升;处理24、36 h的在PEG浓度15%时显著高于对照( $P < 0.05$ )。处理12 h的木荷叶片的

可溶性糖含量逐渐上升,处理24 h的大幅上升后下降,最后又回升,处理36 h的上升、稳定后又升,各处理的可溶性糖含量均显著高于对照( $P < 0.05$ )。处理12 h的藜蒴锥叶片的可溶性糖含量在PEG浓度5%时出现高峰,显著大于对照( $P < 0.05$ ),之后下降;处理24、36 h的先升后降再升,在PEG浓度15%时的含量显著高于对照( $P < 0.05$ )。各幼苗叶片的可溶性糖含量均随着水分胁迫强度的加剧呈升高趋势,有利于通过积累可溶性糖来提高细胞的渗透调节能力,减轻干旱的不良影响。对植物体渗透调节而言,严重干旱会使植物体渗透调节能力丧失;因此,在干旱后期脯氨酸含量降低,而可溶性糖大量积累,可能是对脯氨酸下降的补偿策略<sup>[21]</sup>。

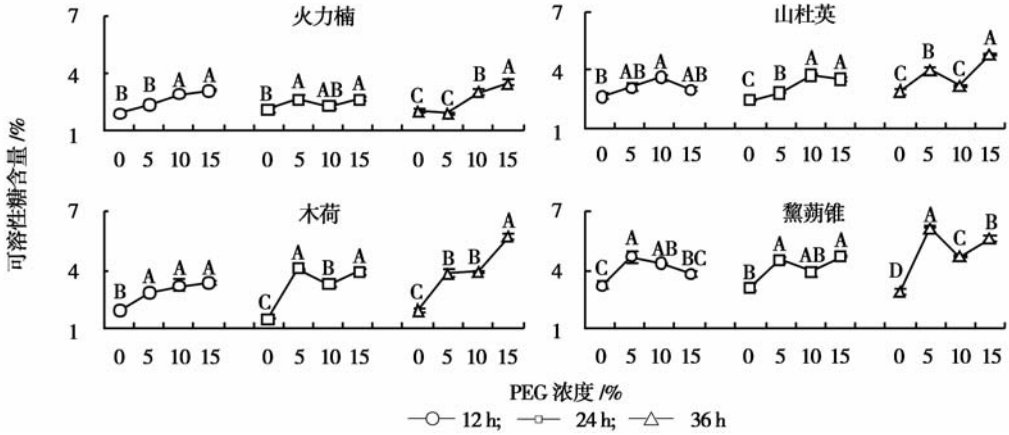


图4 水分胁迫对4种阔叶幼苗叶片可溶性糖含量的影响

## 2.4 水分胁迫对幼苗叶片叶绿素含量的影响

水分胁迫可以引起叶绿素的分解, 叶绿素含量降低<sup>[22-23]</sup>。由图5可见: 随着胁迫强度的增加, 处理12 h的火力楠叶片的叶绿素含量显著下降后保持稳定; 处理24 h的下降后上升, 处理36 h的叶绿素含量无明显变化。处理12 h的山杜英叶片的叶绿素含量在PEG浓度10%时显著增加( $P < 0.05$ ), 然后下降; 处理24 h的叶绿素含量下降、上升、再下

降; 处理36 h的在PEG浓度5%时显著降低( $P < 0.05$ )后上升。处理12 h的木荷叶片的叶绿素含量略升后持续下降; 处理24、36 h的上升后下降, 接着略升。处理12 h的藜蒴锥叶片的叶绿素含量微升后下降; 处理24 h的微降后上升, 最后下降到与对照相近的水平; 处理36 h的微降后微升。随着水分胁迫强度的增大和胁迫持续时间的延长, 4个树种叶片的叶绿素含量一般呈小幅波动<sup>[24]</sup>。

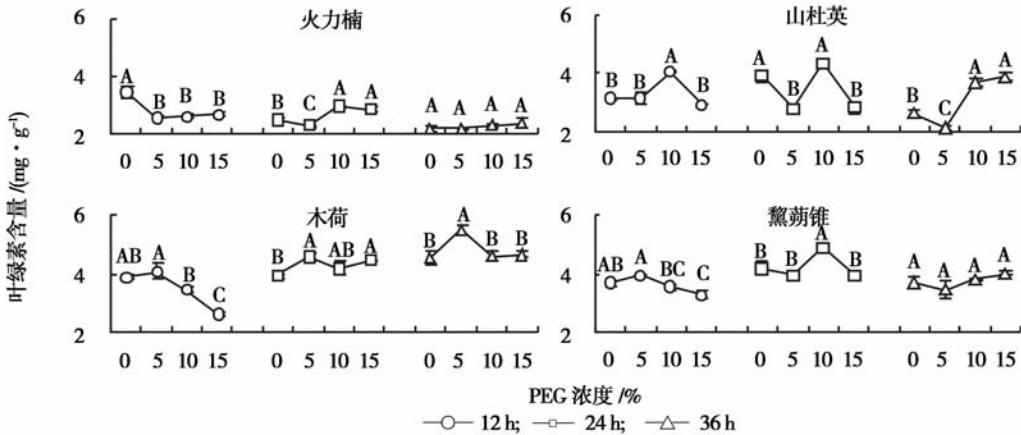


图5 水分胁迫对4种阔叶幼苗叶片叶绿素含量的影响

## 2.5 水分胁迫对幼苗叶片SOD活性和MDA含量的影响

干旱引起活性氧自由基增加, 使植物细胞遭受氧化胁迫。SOD可以清除破坏细胞膜的活性氧, 以保护细胞、减轻干旱带来的伤害。由图6可见: 随着胁迫强度的加剧, 处理12、36 h的火力楠叶片的SOD活性波动较大, 处理24 h的上升后小幅波动, 在PEG浓度15%时, SOD的活性均显著高于对照( $P < 0.05$ )。处理12 h的山杜英叶片的SOD活性在PEG浓度5%时达最大值, 在PEG浓度10%时回

到对照水平, 在PEG浓度15%时又有所回升, 且显著高于对照( $P < 0.05$ ); 处理24 h的升高后略有下降, 各处理的SOD活性均显著高于对照( $P < 0.05$ ); 处理36 h的缓慢升高后下降, 在PEG浓度15%时显著低于对照( $P < 0.05$ )。处理12 h的木荷叶片的SOD活性与对照相比有显著增加( $P < 0.05$ ), 在PEG浓度10%时增幅最小; 处理24 h的SOD活性在PEG浓度5%、10%时相近, 均显著高于对照而低于PEG浓度15%的( $P < 0.05$ )。处理36 h的为略升、下降再回升, 在PEG浓度15%时显著高于对照。

处理 12、24 h 的藜苳锥叶片的 SOD 活性为上升、下降再上升,在 PEG 浓度 15% 时显著高于对照 ( $P < 0.05$ ); 处理 36 h 的 SOD 活性在 PEG 浓度 10% 时显著高于对照 ( $P < 0.05$ ),而在 PEG 浓度 5%、15% 时与对照无显著差异。随着水分胁迫强度的加大和胁迫时间的延长,火力楠和木荷叶片 SOD 活性呈现

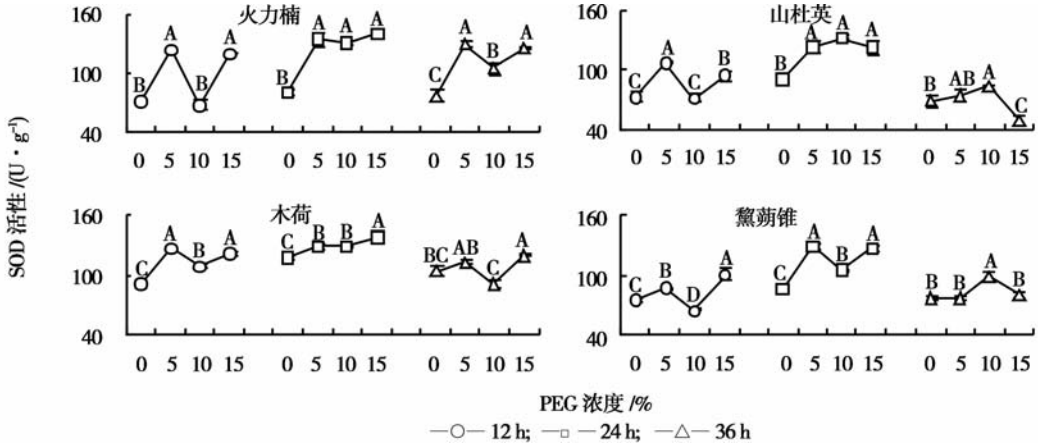


图6 水分胁迫对4种阔叶幼苗叶片SOD活性的影响

丙二醛是植物脂质过氧化的产物,其含量可以表示脂膜过氧化的程度。在水分胁迫下,丙二醛含量增幅小的植物抗旱性强。由图7可见:随着胁迫强度的加剧,处理 12 h 的火力楠叶片的丙二醛含量先升后降,在 PEG 浓度 15% 时与对照差异不显著;处理 24 h 的丙二醛含量逐渐升高,在 PEG 浓度 10%、15% 时显著高于对照 ( $P < 0.05$ );处理 36 h 的丙二醛含量缓慢上升,各处理的丙二醛含量均显著高于对照 ( $P < 0.05$ )。处理 12、24 h 的山杜英叶片的丙二醛含量先上升后下降,后者在 PEG 浓度 15% 时显著高于对照 ( $P < 0.05$ );处理 36 h 的略降后回升,在 PEG 浓度 15% 时显著高于对照 ( $P < 0.05$ )。处理 12、24 h 的木荷叶片的丙二醛含量上升后下

上升趋势,特别在处理 36 h 时,在 PEG 浓度 15% 时,火力楠和木荷叶片的 SOD 活性显著大于对照,而此时的山杜英和藜苳锥的 SOD 活性显著下降,说明后二者清除活性氧的能力要弱于火力楠和木荷,不利于其抗旱。

降,在 PEG 浓度 5% 时出现高峰;处理 36 h 的各处理间的丙二醛含量差异小,与对照均无显著差异。处理 12、24 h 的藜苳锥叶片的丙二醛含量大幅上升后下降,各处理的显著高于对照 ( $P < 0.05$ );处理 36 h 的丙二醛含量显著上升,各处理的显著高于对照 ( $P < 0.05$ )。随着水分胁迫强度的加大和胁迫时间的延长,火力楠叶片丙二醛含量微升,木荷保持稳定,表明火力楠和木荷有较强的防止膜脂过氧化作用的能力,细胞膜受损伤程度较小。处理 36 h 时山杜英叶片的丙二醛含量含量略降后显著上升,藜苳锥则大幅增加,说明山杜英和藜苳锥细胞内自由基产生和清除的不平衡引起了自由基的积累,并由此引发或加剧了细胞的膜脂过氧化,细胞膜可能受到了伤害。

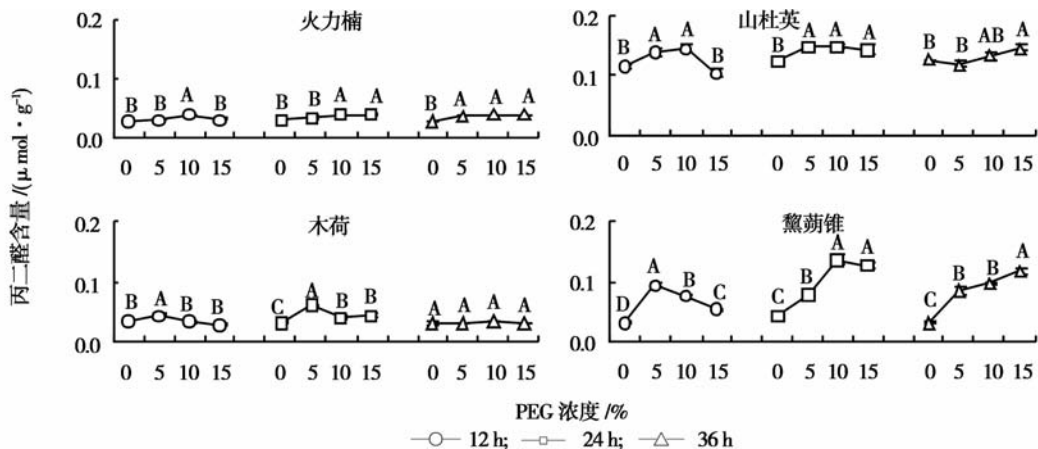


图7 水分胁迫对4种阔叶幼苗叶片丙二醛含量的影响

## 2.6 4种幼苗抗旱性的综合评价

环境胁迫下植物的抗性反应是一个复杂的生理、生化和生态过程,各个生理生化因子都在不同程度上反映了植物抗性的某些信息,并且指标之间有一定的相关性。为了全面准确地利用各种指标对植物的抗旱性进行综合评价,采用主成分分析量化指标以评价幼苗的抗旱性。主成分为2个时,累积贡献率大于0.85,故采用前2个主成分进行评价(表2)。

表2 幼苗水分胁迫的主成分分析

测定指标	主成分	
	主成分1	主成分2
叶片相对含水量	1.721 11	1.355 5
相对电导率	-0.793 9	-0.567 86
脯氨酸	-1.553 45	-0.334 39
叶绿素	0.308 71	-0.695 98
超氧化物歧化酶	2.030 67	-0.841 94
丙二醛	-1.069 31	1.599 03
可溶性糖	-0.643 83	-0.514 36
贡献率	0.596 6	0.318 4
累积贡献率	0.596 6	0.915 0

第1主成分中叶片的超氧化物歧化酶(SOD)、相对含水量和脯氨酸系数较大,第2主成分系数最大的是丙二醛含量,说明以上生理指标是反映水分胁迫的最重要的指标。

根据生理指标与抗旱性的联系,由主成分的特征向量可计算出每个树种的主成分得分,由表3可知:水分胁迫处理的4个树种的抗旱性大小由高到低的顺序为:木荷、火力楠、山杜英、鹧鸪锥。

表3 4种幼苗的抗旱能力

参试树种	木荷	火力楠	山杜英	鹧鸪锥
主成分得分	4.62	3.56	0.214	-4.39
抗旱位次	1	2	3	4

## 3 结论

随着水分胁迫强度的增加,火力楠和木荷叶片的相对含水量下降幅度较小,山杜英叶片的相对含水量下降明显,而鹧鸪锥大幅下降,说明后二者保水能力弱。火力楠和木荷叶片的相对电导率上升幅度较小,表明抗旱性较强;山杜英的相对电导率增幅较大,鹧鸪锥叶片的相对电导率大幅增加,说明后二者外渗电解质比较多,抗旱性较弱。

经水分胁迫处理后,火力楠和木荷幼苗叶片脯氨酸含量变化较小,山杜英和鹧鸪锥与对照相比有明显的增加。4种幼苗叶片的可溶性糖含量随着水

分胁迫强度的增加呈上升趋势,有利于通过积累可溶性糖来提高细胞的渗透调节能力,减轻干旱的不良影响。4种幼苗叶片的叶绿素含量呈小幅波动。

随着水分胁迫强度的加大和胁迫时间的延长,火力楠和木荷叶片的SOD活性呈现上升趋势,在处理36h时,在PEG浓度15%时的火力楠和木荷叶片的SOD活性显著大于对照,而此时的山杜英和鹧鸪锥的SOD活性显著下降。火力楠叶片的MDA含量略有增加,木荷保持稳定,山杜英明显增加,鹧鸪锥大幅增加,表明火力楠和木荷有较强的防止膜脂过氧化作用的能力,细胞膜受损伤程度较小,对干旱胁迫已具有一定的适应性。

植物的抗旱性受多种生理指标影响,各指标的重要性不相同,利用单一指标对比难以得出准确的结果。本研究运用主成分分析对4种幼苗的7个生理指标进行定量评价,得出抗旱性大小的顺序为:木荷、火力楠、山杜英、鹧鸪锥。

## 参考文献:

- [1] 李燕,薛立,吴敏. 树木抗旱机理研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 1857-1866
- [2] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, *et al.* Effects of a strong drought on Amazonian forest fragments and edges[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2001, 7: 771-785
- [3] Morecroft M D, Masters G J, Brown V K, *et al.* Changing precipitation patterns alter plant community dynamics and succession in an ex-arable grassland[J]. *Functional Ecology*, 2004, 18: 648-655
- [4] Stampfli A, Zeiter M. Plant regeneration directs changes in grassland composition after extreme drought: a 13-year study in southern Switzerland[J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92: 568-576
- [5] Laurance W F, Williamson G B, Delamônica P, *et al.* Effects of a strong drought on Amazonian forest fragments and edges[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2001, 17: 771-785
- [6] Delisio L J, Primack R B. The impact of drought on the population dynamics of canopy-tree seedlings in an aseasonal Malaysian rain forest[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2003, 19: 489-500
- [7] 孙国荣,彭永臻,阎秀峰,等. 干旱胁迫对白桦实生苗保护酶及脂质过氧化作用的影响[J]. *林业科学*, 2003, 39(1): 165-167
- [8] 孙志虎,王庆成. 应用PV技术对北方4种阔叶树抗旱性的研究[J]. *林业科学*, 2003, 39(2): 34-38
- [9] 哈申格日乐,宋云民,李吉跃,等. 水分胁迫对毛乌素地区4种树幼苗生理特性的影响[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(3): 358-363
- [10] Michel B E, Kaufmann M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000[J]. *Plant Physiology*, 1973, 51: 914-916
- [11] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2002
- [12] 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, 2000
- [13] 区靖祥, 邱健德. 多元数据的统计分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002
- [14] Marshall J G, Rutledge R G, Blumwald E, *et al.* Reduction in turgid water volume in jack pine, white spruce and black spruce in response to drought and paclobutrazol[J]. *Tree Physiology*, 2000, 20: 701 - 707
- [15] 朱秀红, 郝绍菊, 茹广欣, 等. 干旱梯度下刺槐无性系生理指标的变化与品种抗旱性的关系[J]. *山东农业科学*, 2006(2): 48 - 50
- [16] Clifford S C, Arndt S K, Corlett J E, *et al.* The role of solute accumulation, osmotic adjustment and changes in cell wall elasticity in drought tolerance in *Ziziphus mauritiana* (Lamk) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49(323): 967 - 977
- [17] Heuer R, Nadler A. Physiological Response of potato plants to soil salinity and water deficits[J]. *Plant Science*, 1998, 137: 43 - 51
- [18] Bohnert H J, Jensen R G. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants[J]. *Trends in Biotechnology*, 1996, 14(3): 89 - 97
- [19] Jones M M, Turner N C. Osmotic adjustment in leaves of sorghum in response to water deficits[J]. *Plant Physiology*, 1978, 61: 122 - 126
- [20] Saladin G, Clement C, Magne C. Stress effects of flumioxazin herbicide on grapevine (*Vitis vinifera* L.) grown in vitro[J]. *Plant Cell Reports*, 2003, 21(12): 1221 - 1227
- [21] 王霞, 候平, 伊林克. 水分胁迫对怪柳植物可溶性糖的影响[J]. *干旱地区研究*, 1999, 16(2): 6 - 11
- [22] Guan X Q, Zhao S J, Li D Q, *et al.* Photoprotective function of photorespiration in several grapevine cultivars under drought stress[J]. *Photosynthetica*, 2004, 42(1): 31 - 36
- [23] Bindi M, Bellesi S, Orlandini S, *et al.* Influence of water deficit stress on leaf area development and transpiration of sangiovese grapevines grown in pots[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2005, 56(1): 68 - 72
- [24] 邹春静, 韩士杰, 徐文铎, 等. 沙地云杉生态型对于干旱胁迫的生理生态响应[J]. *应用生态学报*, 2004, 14(9): 1446 - 1450