

中国百种杰出学术期刊  
中国精品科技期刊  
中国科协优秀期刊  
中国科学院优秀科技期刊  
新中国 60 年有影响力的期刊  
国家期刊奖

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 2 期  
Vol.31 No.2  
**2011**



中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 2 期      2011 年 1 月      (半月刊)

## 目 次

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 长白山山杨种群的性比格局及其空间分布 .....                                     | 潘春芳,赵秀海,夏富才,等 (297)              |
| 冬季融冻过程中白三叶叶片抗氧化酶活力和渗透调节物含量变化与抗冻性的关系 .....                    | 赵 梅,周瑞莲,刘建芳,等 (306)              |
| 黄土高原主要森林类型自然性的灰色关联度分析 .....                                  | 王乃江,刘增文,徐 钊,等 (316)              |
| 两种抗生素对龙须菜的光合生理效应 .....                                       | 简建波,邹定辉,刘文华,等 (326)              |
| 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征 .....                        | 潘复静,张 伟,王克林,等 (335)              |
| 塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响 .....                            | 陈亚鹏,陈亚宁,徐长春,等 (344)              |
| 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价 .....                           | 宋富强,邢开雄,刘 阳,等 (354)              |
| 火因子对荒漠化草原草本层片植物群落组成的影响 .....                                 | 贺郝钰,苏洁琼,黄 磊,等 (364)              |
| 4 种阔叶幼苗对 PEG 模拟干旱的生理响应 .....                                 | 冯慧芳,薛 立,任向荣,等 (371)              |
| 城市带状绿地宽度与温湿效益的关系 .....                                       | 朱春阳,李树华,纪 鹏,等 (383)              |
| 西藏斧钺水鸟多样性及斑头雁繁殖活动区的变化 .....                                  | 张国钢,刘冬平,钱法文,等 (395)              |
| 王朗自然保护区大熊猫生境选择 .....   | 康东伟,康 文,谭留夷,等 (401)              |
| 东方田鼠警觉对其功能反应的作用格局 .....                                      | 陶双伦,杨锡福,邓凯东,等 (410)              |
| 台州市路桥区重金属污染对土壤动物群落结构的影响 .....                                | 白 义,施时迪,齐 鑫,等 (421)              |
| 青岛湾小型底栖生物周年数量分布与沉积环境 .....                                   | 杜永芬,徐奎栋,类彦立,等 (431)              |
| 叉尾斗鱼种群遗传变异与亲缘地理 .....  | 王培欣,白俊杰,胡隐昌,等 (441)              |
| C <sub>3</sub> 和 C <sub>4</sub> 植物寄主对华北地区棉铃虫越冬代和第一代的影响 ..... | 叶乐夫,付 雪,戈 峰 (449)                |
| 3 种海拔高度茶园中 2 种害虫与其天敌间的数量和空间关系 .....                          | 毕守东,柯胜兵,徐劲峰,等 (455)              |
| 坝上地区农田和恢复生境地地表甲虫多样性 .....                                    | 刘云慧,宇振荣,王长柳,等 (465)              |
| 若尔盖高寒湿地干湿土壤条件下微生物群落结构特征 .....                                | 牛 佳,周小奇,蒋 娜,等 (474)              |
| 红枣贮藏期果面微生物多样性 .....  | 沙月霞 (483)                        |
| CO <sub>2</sub> 和温度升高情况下白粉菌侵染对西葫芦生长特性的影响 .....               | 刘俊稚,葛亚明,Pugliese Massimo,等 (491) |
| 丛枝菌根真菌对中性紫色土土壤团聚体特征的影响 .....                                 | 彭思利,申 鸿,袁俊吉,等 (498)              |
| 新疆断裂带泉水中细菌群落结构的 PCR-DGGE 分析 .....                            | 吴江超,高小其,曾 军,等 (506)              |
| 石油污染对海洋浮游植物群落生长的影响 .....                                     | 黄逸君,陈全震,曾江宁,等 (513)              |
| 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应 .....                                 | 何俊瑜,任艳芳,王阳阳,等 (522)              |
| 基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析 .....                         | 潘 影,刘云慧,王 静,等 (529)              |
| 基于生态足迹的生态地租分析 .....  | 龙开胜,陈利根,赵亚莉 (538)                |
| 深圳市植被受损分级评价及其与景观可达性的关系 .....                                 | 刘语凡,陈 雪,李贵才,等 (547)              |
| <b>专论与综述</b>   |                                  |
| 美国、加拿大环境和健康风险管理方法 .....                                      | 贺桂珍,吕永龙 (556)                    |
| 植物蜡质及其与环境的关系 .....   | 李婧婧,黄俊华,谢树成 (565)                |
| 油田硫酸盐还原菌酸化腐蚀机制及防治研究进展 .....                                  | 庄 文,初立业,邵宏波 (575)                |
| 叶际微生物研究进展 .....  | 潘建刚,呼 庆,齐鸿雁,等 (583)              |

## 4 种阔叶幼苗对 PEG 模拟干旱的生理响应

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

(1. 华南农业大学林学院 广州 510642; 2. 乌鲁木齐市农科院试验场, 乌鲁木齐 830000)

**摘要:**研究了 PEG 模拟干旱胁迫环境下的火力楠 (*Michelia macclurei*)、尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla*)、枫香 (*Liquidambar formosana*)、荷木 (*Schima superba*) 幼苗的生理变化。结果表明, 干旱胁迫下, 4 种幼苗叶片的相对含水量小于对照, 其中, 尾叶桉和枫香下降明显; 不同干旱胁迫条件下, 4 种树种幼苗叶片的相对电导率均显著大于对照, 其中尾叶桉和枫香上升幅度大; 干旱胁迫下的火力楠和荷木幼苗叶片的脯氨酸含量呈现波动, 尾叶桉和枫香幼苗则显著大于对照; 不同干旱胁迫时间下的幼苗叶片的叶绿素含量小幅波动; 4 个树种幼苗的过氧歧化酶 (SOD) 活性随胁迫时间增加而呈现先升后降的趋势, 其中火力楠和荷木的幼苗的 SOD 活性持续维持在较高水平; 荷木叶片的丙二醛 (MDA) 含量先升后降, 最后和对照水平相近, 其余幼苗的 MDA 含量均大于对照; 干旱胁迫下 4 种幼苗叶片的可溶性糖含量增加幅度较大。主成分分析表明, 4 种幼苗的抗旱能力排序为荷木 > 火力楠 > 尾叶桉 > 枫香。

**关键词:**阔叶幼苗; PEG; 干旱胁迫; 生理指标; 主成分分析

## Physiological responses of four broadleaved seedlings to drought stress simulated by PEG

FENG Huifang<sup>1</sup>, XUE Li<sup>1,\*</sup>, REN Xiangrong<sup>1,2</sup>, FU Jingdan<sup>1</sup>, ZHENG Weiguo<sup>1</sup>, SHI Xiaoling<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

<sup>2</sup> Synthetic Proving Ground of Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi 830000, China

**Abstract:** The amount and seasonality of rainfall varies strongly in South China, so that drought is a very obvious ecological factor limiting tree growth in drought season, whereas drought stress of tree species in this region has received less attention. Understanding how tree physiological characteristics respond to drought is a key element for a deeper understanding of sustainable management of forest ecosystems. Tree species with relatively high water requirements are very sensitive to periodical soil drought because of low rainfall level during the drought season, whereas those with relatively low water requirements have evolved a wide variety of physiological tolerance mechanisms in response to drought. A deficiency of water often results in physiological changes of tree species, which depends on the drought severity and duration of the drought stress. *Michelia macclurei*, *Eucalyptus urophylla*, *Liquidambar formosana* and *Schima superba* are important tree species in South China. To develop a drought stress response function in these tree species, efficient laboratory tests were used to analyze the effect of drought on their physiological characteristics under varying degrees of stress and different stress duration time. Different responses among four seedlings were observed, and the physiological differences that confer drought resistance or susceptibility are well explained. Experiment of seedlings of *Michelia macclurei*, *Eucalyptus urophylla*, *Liquidambar formosana*, *Schima superba* was conducted under drought stress using treatments of different PEG6000 concentrations (mild stress, moderate stress, severe stress) and different stress duration time (12 hours, 24 hours, 36 hours). The results showed that relative water content of four seedlings decreased after being treated with drought stress, and decrement of the *E. urophylla* and *L. formosana* was greater than *M. macclurei* and *S. superba*. Relative conductivity of the four seedlings significantly was greater than the controls, and increment of the *E. urophylla* and *L. formosana* was

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

收稿日期: 2009-11-21; 修订日期: 2010-09-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: forxue@scau.edu.cn

greater than *M. macclurei* and *S. superba*. Under drought stress, complex carbohydrates and proteins can be broken down by enzymes into soluble compounds simpler sugars and amino acids, such as proline, respectively, and accumulation of soluble compounds in cells increase osmotic potential and reduce water loss from cells. The content of free proline of *M. macclurei* and *S. superba* fluctuated after being treated with drought stress, whereas that of *E. urophylla* and *L. formosana* increased significantly compared to the controls. With increasing stress intensity and prolonging duration, chlorophyll content of the four seedlings slightly fluctuated. With increasing stress intensity and prolonging duration, the activity of super oxide dismutase (SOD) of the four seedlings increased and then decreased, and that of *M. macclurei* and *S. superba* remained relatively high level. The content of malondialdehyde (MDA) of *S. superba* increased and then declined to level of the control, whereas that of other seedlings was greater than the controls. The content of soluble sugar of four seedlings increased obviously under drought stress. Principal component analysis can provide a quantitative evaluation of the different physiological indices for the seedlings under drought, which indicated that the order of drought resistance of the four seedlings was *S. superba* > *M. macclurei* > *E. urophylla* > *L. formosana*.

**Key Words:** broadleaved seedling; PEG; drought stress; physiological indices; principal component analysis

干旱是限制作物产量最重要的环境因子<sup>[1-2]</sup>,也是影响树木成活与生长的重要限制因子<sup>[3-4]</sup>。近年全球的气候变化使得干旱问题更加严重<sup>[5]</sup>。干旱条件下,树木体内产生一系列生理和生化变化来适应干旱胁迫生境。渗透调节是植物忍耐干旱的一种适应性反应<sup>[6]</sup>,细胞通过大量积累渗透调节物质来保持一定的膨压,以维持植物生理过程的正常进行<sup>[7-8]</sup>。在水分胁迫下引发的丙二醛(MDA)含量可以反映细胞膜伤害程度<sup>[9]</sup>,而 SOD 酶活性可以减少脂质过氧化,稳定膜的透性<sup>[10]</sup>。火力楠、荷木是我国南方重要的优良乡土阔叶树种,尾叶桉、枫香在华南地区广泛栽植。这些树种大多栽培于丘陵和山地,易受到干旱胁迫的影响。目前仍未见有关这些树种抗旱方面的报道。本研究利用聚乙二醇(PEG6000)人工模拟干旱条件,测定其生理指标的变化,通过主成分分析法对各树种的抗旱性进行了综合评价,可以比较其抗旱能力,为干旱胁迫条件下的树种选择提供依据。

## 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 6 号楼北面的教学苗圃内,试验用苗为营养袋培育的半年生实生苗,幼苗生长基本情况见表 1。采用长 40 cm,宽 37 cm,深 17 cm 的塑料盆作为水培器材,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。营养液选用霍格兰营养液配方。

表 1 4 种幼苗的基本情况(平均值 ± 标准差)

Table 1 General Characteristics of four seedlings (mean ± SD)

| 4 种幼苗 Seedlings                 | 平均地径/cm     | 平均苗高/cm    | 平均冠幅/cm |
|---------------------------------|-------------|------------|---------|
| 火力楠 <i>Michelia macclurei</i>   | 0.54 ± 0.03 | 46.9 ± 6.8 | 22 ± 5  |
| 尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i> | 0.42 ± 0.04 | 53.4 ± 6.1 | 21 ± 4  |
| 枫香 <i>Liquidambar formosana</i> | 0.41 ± 0.03 | 42.5 ± 3.7 | 22 ± 4  |
| 荷木 <i>Schima superba</i>        | 0.39 ± 0.04 | 31.6 ± 2.6 | 19 ± 3  |

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 不同干旱胁迫强度处理

在新鲜营养液里加入 PEG6000 配制不同浓度的胁迫溶液:轻度胁迫 5% (50 g/L PEG)、中度胁迫 10% (100 g/L PEG)、重度胁迫 15% (150 g/L PEG)。将苗的根部浸入胁迫溶液中进行干旱胁迫处理,以不加 PEG6000 的 1/2Hoagland 营养液中的幼苗作为对照。

### 1.2.2 不同干旱胁迫持续时间处理

各胁迫强度均设 3 组持续时间处理,分别在胁迫持续 12、24、34 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,小心剥落营养袋中的泥土,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,每孔一株苗,植株用海绵固定。水培苗在 1/2Hoagland 营养液中恢复 2d,再移入用营养液配制的具有不同渗透势的聚乙二醇(PEG6000)溶液中进行不同强度及不同持续时间的干旱胁迫处理。各处理均在室温下进行,室内温度为 28 ℃ 左右,相对湿度为 75%—85%,水培后每天通气 1 次。幼苗处理后,选择生长良好,大小均一的叶片为供试材料。不同树种的样品均在 8:30 采样,每个指标用 3 株幼苗采样,取每棵幼苗完全舒展并且成熟的叶(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>[11-12]</sup>;叶片相对电导率用电导法、脯氨酸含量用酸性茚三酮法、叶绿素含量用分光光度法、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>、丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸(TBA)比色法;可溶性糖按照蒽酮比色法测定<sup>[13]</sup>。每个指标做 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 SAS8.1 软件系统对各项指标测定结果进行主成分分析,以确定 4 个树种的抗旱性<sup>[14]</sup>。

### 1.5 数据统计

数据统计分析和作图由 Microsoft Excel,多重比较用 SAS8.1 软件系统完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对相对含水量的影响

轻度、中度和重度胁迫各时间处理的 4 种幼苗叶片的相对含水量均小于对照(图 1)。火力楠叶片轻度胁迫

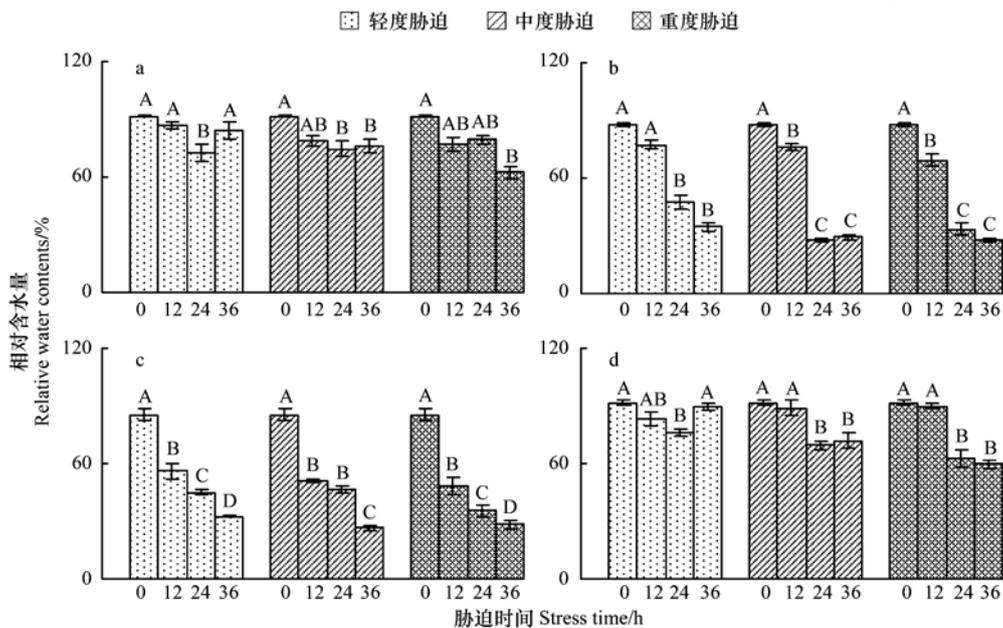


图 1 不同干旱胁迫持续时间对各幼苗相对含水量的影响

Fig. 1 Effect of drought stress on the relative water content in leaves of seedlings

a. 火力楠 *Michelia macclurei*; b. 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*; c. 枫香 *Liquidambar formosana*, d. 荷木 *Schima superba*

不同字母表示差异性显著

迫 24 h、中度胁迫 24 h 和 36 h 和重度胁迫 36 h 的显著低于对照 ( $P < 0.05$ ); 经干旱胁迫处理的尾叶桉和枫香的幼苗叶片相对含水量呈下降趋势, 除尾叶桉轻度胁迫 12 h 处理外, 其他处理的显著低于对照 ( $P < 0.05$ ); 荷木叶片轻度胁迫 24 h 处理、中度和重度胁迫 24 h 和 36 h 的显著低于对照 ( $P < 0.05$ )。火力楠和荷木在中度胁迫和重度胁迫 36 h 叶片相对含水量显著低于对照, 表明避免脱水能力强, 抗旱能力较强。

## 2.2 干旱胁迫对相对电导率的影响

轻度、中度和重度胁迫各时间处理的 4 种幼苗叶片的相对电导率均显著大于对照 ( $P < 0.05$ ) (图 2)。随着干旱胁迫时间的延长, 各胁迫各处理的火力楠幼苗叶片的相对电导率先增加后减少; 轻度和重度胁迫的尾叶桉幼苗叶片的相对电导率先升后降, 而中度胁迫处理的随时间增加而持续上升; 随时间的增加, 轻度干旱胁迫的枫香叶片的电导率先升后降, 中度和重度胁迫处理的呈上升趋势; 轻度胁迫下的荷木叶片的相对电导率上升后下降再小幅上升, 中度胁迫的持续上升, 重度胁迫的先升后降。火力楠和荷木的相对电导率随胁迫时间的延长变化较小, 在胁迫 36 h 多有下降, 说明外渗电解质少, 抗旱性较强。

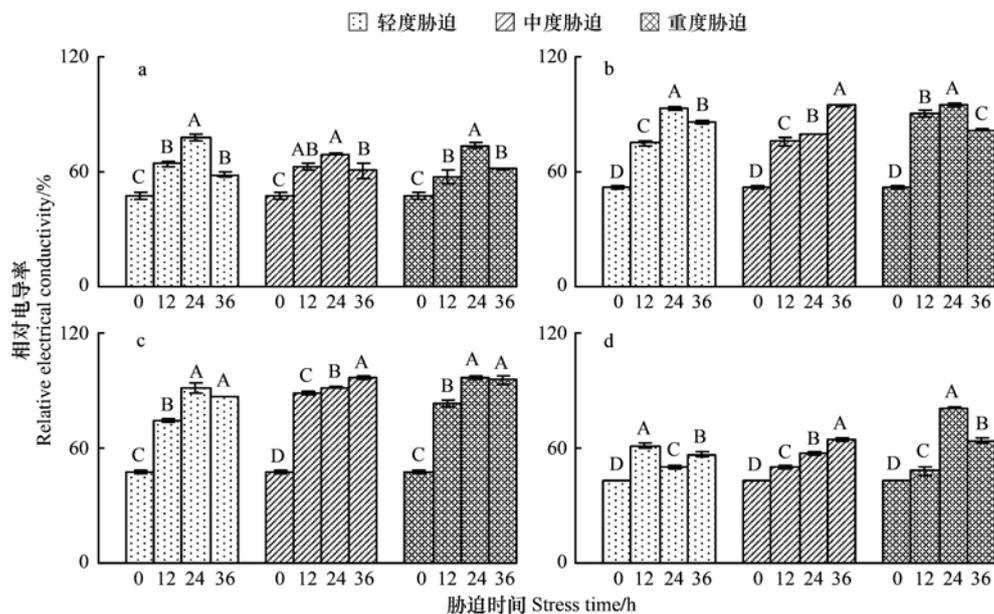


图 2 不同干旱胁迫持续时间对各幼苗相对电导率的影响

Fig. 2 Effect of drought stress on the relative electrical conductivity in leaves of seedlings

a, 火力楠 *Michelia macclurei*; b, 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*; c, 枫香 *Liquidambar formosana*; d, 荷木 *Schima superba*  
不同字母表示差异性显著

## 2.3 干旱胁迫对脯氨酸含量的影响

随着胁迫时间的增加, 轻度胁迫的火力楠叶片的脯氨酸含量先降后升, 中度胁迫的呈现显著下降、显著上升、再显著下降 ( $P < 0.05$ ) (图 3); 重度胁迫的先升后降, 其中 24 h 处理的显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), 36 h 处理的显著低于对照 ( $P < 0.05$ ); 随胁迫时间的增加, 各强度胁迫处理的尾叶桉叶片的脯氨酸含量先升后降, 均在 24 h 处理时达到最大值。除重度胁迫 12 h 处理的外, 其余各处理均显著高于对照 ( $P < 0.05$ )。轻度胁迫的枫香叶片脯氨酸含量呈上升趋势, 中度和重度胁迫处理的先升后降; 所有胁迫强度处理的均显著高于对照 ( $P < 0.05$ )。随着胁迫时间的增加, 轻度和重度胁迫的荷木叶片的脯氨酸含量上升后下降, 中度胁迫处理的有所上升, 24 h 和 36 h 处理的均显著高于对照 ( $P < 0.05$ )。火力楠和荷木在干旱胁迫过程中脯氨酸含量变化较小, 可能是其叶片进行了适应性代谢调节, 对干旱胁迫产生了一定的适应性。

## 2.4 干旱胁迫对叶绿素含量的影响

由图 4 可以看出, 经各干旱胁迫处理的火力楠幼苗叶片的叶绿素含量均显著低于对照 ( $P < 0.05$ )。随胁迫时间的延长, 轻度胁迫的叶绿素含量持续下降, 而中度与重度胁迫的呈现下降、上升再下降; 轻度与中度胁

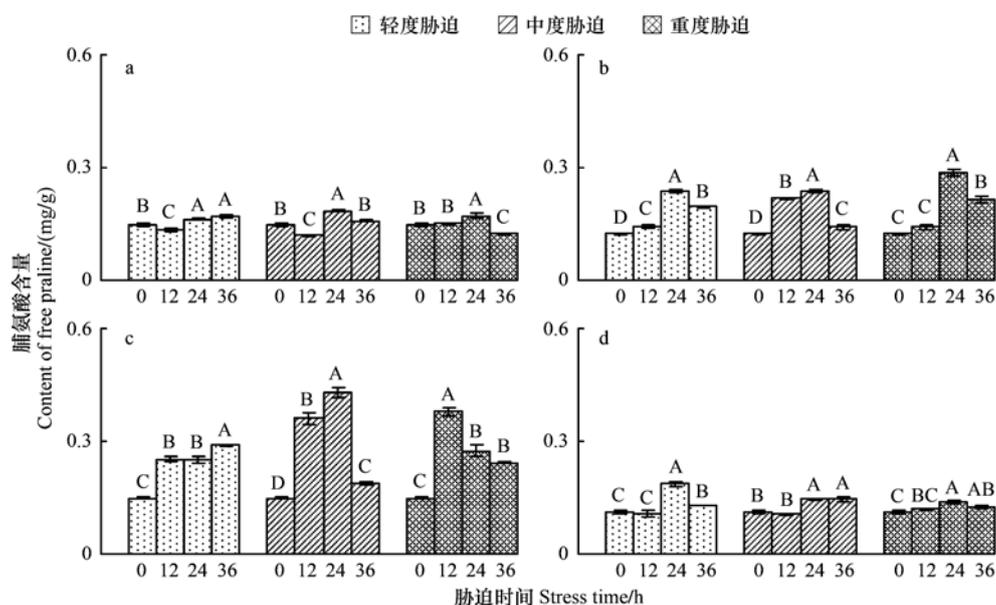


图3 不同干旱胁迫持续时间对各幼苗脯氨酸含量的影响

Fig. 3 Effect of drought stress on the content of free proline in leaves of seedlings

a, 火力楠 *Michelia macclurei*; b, 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*; c, 枫香 *Liquidambar formosana*; d, 荷木 *Schima superba*  
不同字母表示差异性显著

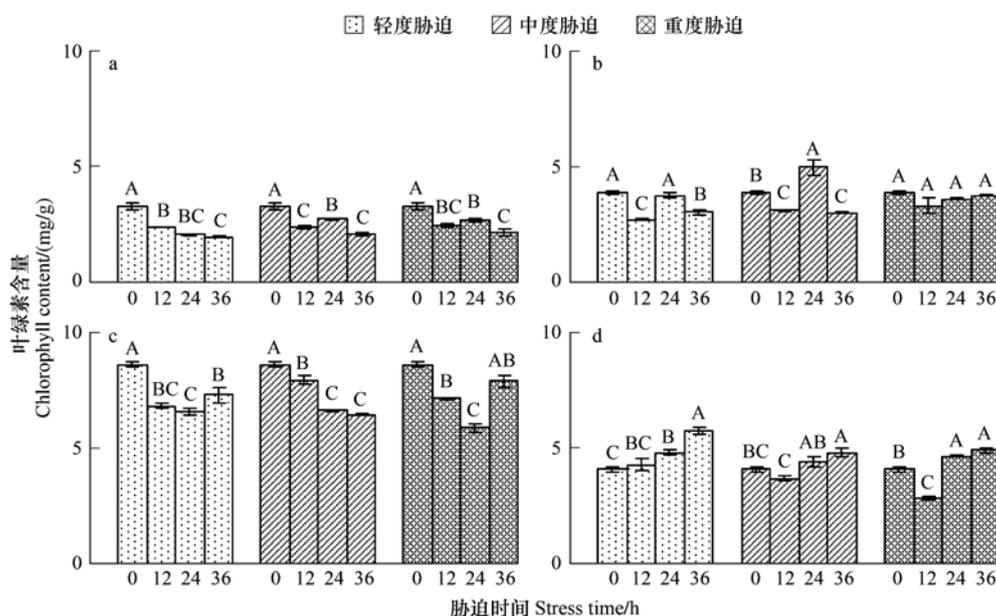


图4 不同干旱胁迫持续时间对各幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effect of drought stress on the chlorophyll content in leaves of seedlings

a, 火力楠 *Michelia macclurei*; b, 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*; c, 枫香 *Liquidambar formosana*; d, 荷木 *Schima superba*  
不同字母表示差异性显著

胁迫处理的尾叶桉叶片叶绿素含量经历显著下降、显著上升再显著下降的过程 ( $P < 0.05$ ), 重度胁迫的与对照差异不显著; 随着胁迫时间的增加, 轻度和重度胁迫处理的枫香叶片叶绿素含量显著减少后显著增加 ( $P < 0.05$ ), 中度胁迫处理的则显著下降 ( $P < 0.05$ ); 随着胁迫时间的增加, 轻度胁迫处理的荷木叶片叶绿素含量持续上升, 中度和重度胁迫处理的减少后上升。干旱会引起的光合作用和叶片含水量下降, 前者导致叶绿素

含量下降,后者引起单位鲜重的叶绿素含量相对升高,所以6个树种叶片的叶绿素含量小幅波动。

## 2.5 干旱胁迫对 SOD 含量的影响

经干旱胁迫处理后,4种幼苗叶片的SOD活性增加后减少(图5)。火力楠幼苗叶片的SOD活性除了中度胁迫12h处理外,其余的均显著大于对照( $P < 0.05$ );尾叶桉幼苗12h和24h处理的叶片SOD活性显著高于对照( $P < 0.05$ ),重度胁迫36h处理的显著低于对照( $P < 0.05$ );枫香幼苗叶片SOD活性除了重度胁迫36h的显著低于对照外,其余处理的显著高于对照( $P < 0.05$ );除中度胁迫36h处理的外,各干旱胁迫的荷木叶片SOD活性显著高于对照( $P < 0.05$ )。火力楠和荷木叶片的SOD活性在重度胁迫时仍显著高于对照,表明其SOD保护酶增强了抗氧化能力,避免了活性氧等各种自由基的大量积累。

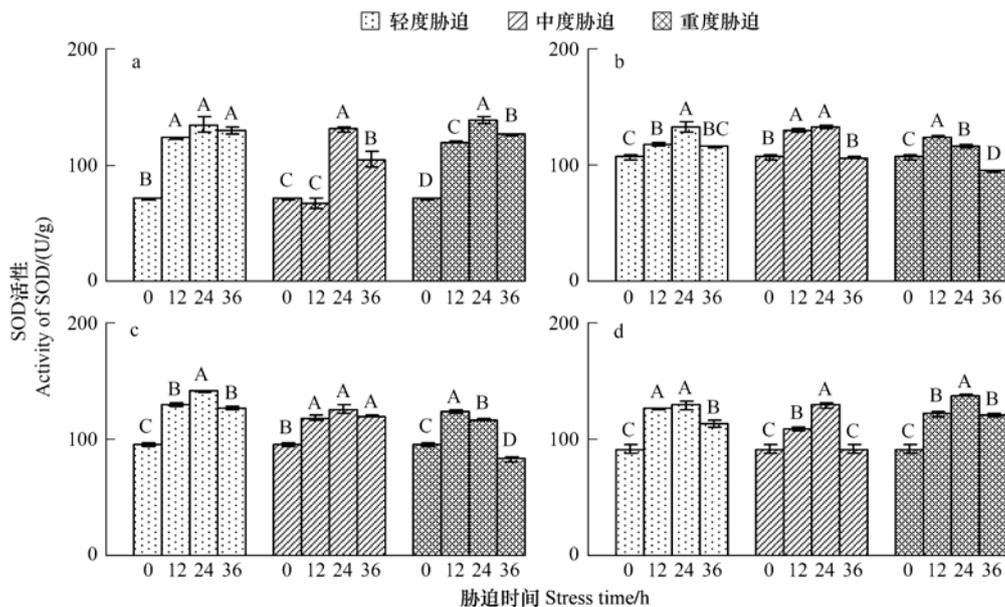


图5 不同干旱胁迫持续时间对各幼苗SOD活性的影响

Fig. 5 Effect of drought stress on the activity of SOD in leaves of seedlings

a, 火力楠 *Michelia macclurei*; b, 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*; c, 枫香 *Liquidambar formosana*; d, 荷木 *Schima superba*  
不同字母表示差异性显著

## 2.6 干旱胁迫对MDA含量的影响

火力楠幼苗叶片的MDA含量随着胁迫时间的增加呈上升趋势,各干旱胁迫处理的结果均显著高于对照( $P < 0.05$ )(图6);各干旱胁迫处理的尾叶桉幼苗叶片的MDA含量上升后下降,24h处理的显著高于对照( $P < 0.05$ );所有胁迫处理的枫香叶片MDA含量均大于对照,其中轻度和中度胁迫下各时间处理的和重度胁迫24h及36h处理的枫香叶片MDA含量显著高于对照( $P < 0.05$ );经干旱胁迫处理后,荷木叶片的MDA含量经历了先升后降的过程,轻度胁迫中12h和24h处理的、中度和重度胁迫的24h处理的显著大于对照( $P < 0.05$ )。火力楠叶片的MDA含量增幅较小,荷木叶片的MDA含量小幅波动后回到对照水平,表明这两种幼苗减少了脂质过氧化。

## 2.7 干旱胁迫对可溶性糖含量的影响

轻度胁迫的火力楠叶片的可溶性糖含量变化较小,24h处理的显著高于对照( $P < 0.05$ )(图7),而中度和重度胁迫处理的随时间推移呈波动性上升,各处理的显著高于对照( $P < 0.05$ )。轻度和中度胁迫的尾叶桉可溶性糖含量随时间的延长而上升,重度胁迫的先升后降,除轻度胁迫的12h处理外,其余各处理的均显著高于对照( $P < 0.05$ )。各胁迫强度处理的枫香幼苗叶片可溶性糖含量均显著高于对照( $P < 0.05$ )。随胁迫时间的增加,荷木叶片的可溶性糖的含量呈持续上升的趋势,各胁迫强度处理的显著高于对照( $P < 0.05$ )。干旱胁迫下,火力楠和荷木叶片的可溶性糖含量增加,增强了其细胞的抗脱水能力,有利于幼苗抗旱。

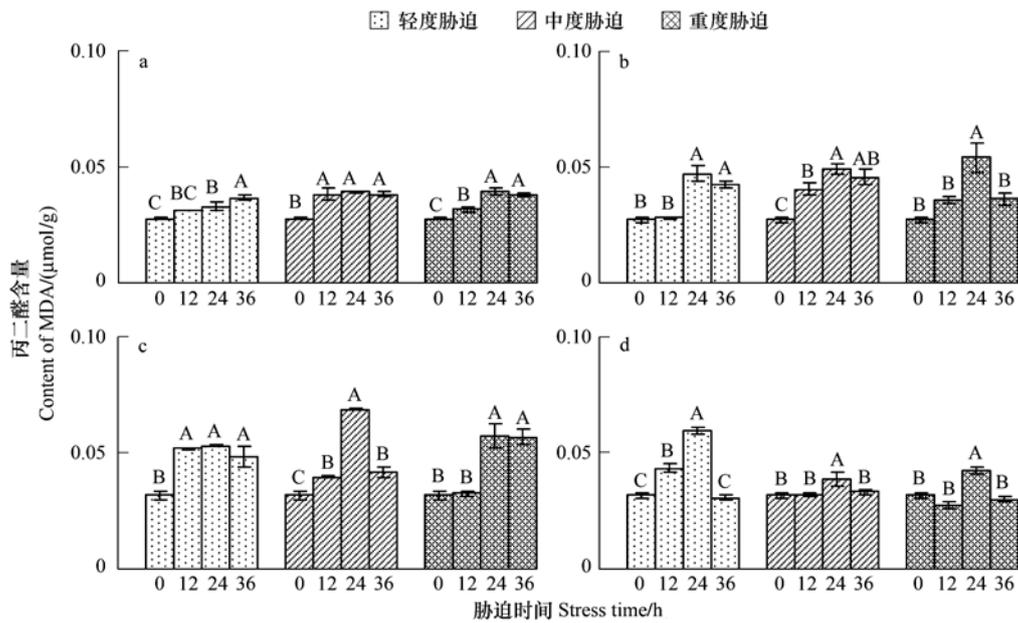


图 6 不同干旱胁迫持续时间对各幼苗丙二醛含量的影响

Fig. 6 Effect of drought stress on the content of MDA in leaves of seedlings

a, 火力楠 *Michelia macclurei*; b, 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*; c, 枫香 *Liquidambar formosana*; d, 荷木 *Schima superba*  
不同字母表示差异性显著

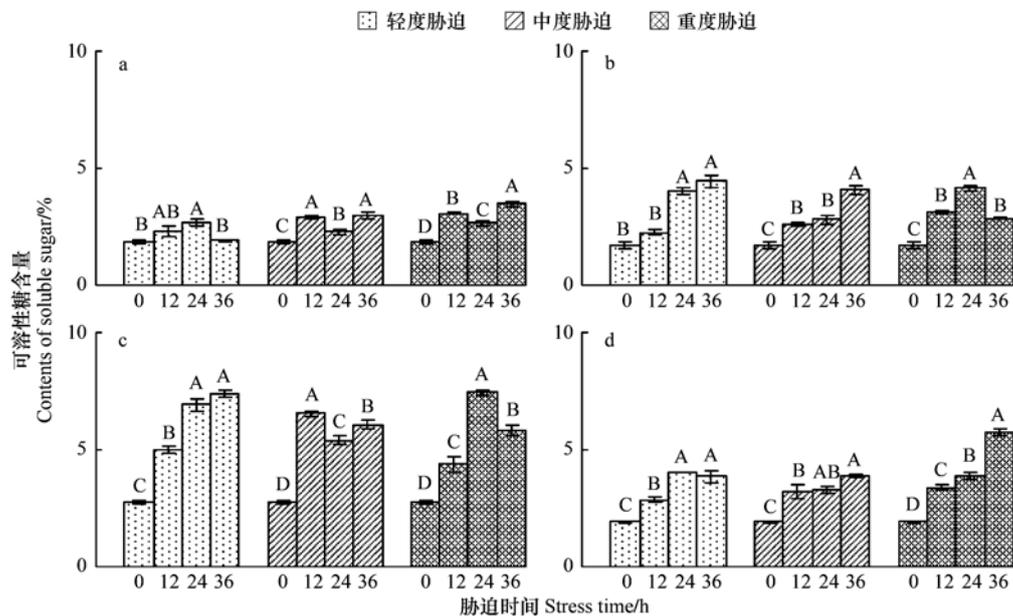


图 7 不同干旱胁迫持续时间对各幼苗可溶性糖含量的影响

Fig. 7 Effect of drought stress on the contents of soluble sugar in leaves of seedlings

a, 火力楠 *Michelia macclurei*; b, 尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*; c, 枫香 *Liquidambar formosana*; d, 荷木 *Schima superba*  
不同字母表示差异性显著

## 2.8 幼苗抗旱性的综合评价

主成分综合评价具有全面性、可比性、合理性和可行性的优点<sup>[15]</sup>,其评价结果较为准确,可信度高。为了研究影响 4 种树种抗旱性的主导因素,作者采用多元统计分析中的主成分分析进行综合评价<sup>[14]</sup>,7 种生理指标抗旱主成分分析结果见表 2。

干旱胁迫处理的主成分分析表明,第 1、2 和 3 主成分累积贡献率达 98.89%,第 1 主成分中叶片相对含水量较大,第 2 主成分系数最大的是 SOD 活性和 MDA 含量,第 3 主成分中相对电导率系数较大,说明相对含水量是反映干旱胁迫的最重要的指标,其次为 SOD 活性、MDA 含量和相对电导率。

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,本研究选取了 3 个主成分,由于主成分之间相互独立且有着不同的贡献率,因此,每个主成分得分就是其加权值,其中权重就是主成分对应的贡献率。每个树种的生理指标值分别和各主成分中的生理指标的特征值相乘后,按树种累加各生理指标得分,再分别与各主成分的权重相乘,求和计算出主成分的综合得分,得分高的树种其抗旱性强。由表 3 可知,干旱胁迫处理的 4 个树种的抗旱性大小由高到低的顺序为荷木、火力楠、尾叶桉、枫香。

表 2 干旱胁迫处理对幼苗生理指标的主成分分析

Table 2 Principal components of drought stress of seedlings

| 测定指标 Determination index               | 主成分 Principal components |          |          |
|--|--------------------------|----------|----------|
|  | Prin1                    | Prin2    | Prin3    |
| 叶片相对含水量 Relative water content         | 2.64842                  | -0.08829 | -0.14108 |
| 相对电导率 Relative electrical conductivity | -1.20289                 | -0.34241 | 1.13845  |
| 脯氨酸 Free proline                       | -0.82799                 | -0.69154 | -0.04196 |
| 叶绿素 Chlorophyll                        | -0.82832                 | 0.8701   | -0.67811 |
| 超氧化物歧化酶 SOD                            | 0.69523                  | 1.11672  | 0.74954  |
| 丙二醛 MDA                                | 0.50519                  | -1.11178 | -0.26135 |
| 可溶性糖 Soluble sugar                     | -0.98966                 | 0.2472   | -0.76549 |
| 贡献率 Contribution rate                  | 0.6191                   | 0.2093   | 0.1605   |
| 累积贡献率 Cumulative contribution rate     | 0.6191                   | 0.8284   | 0.9889   |

表 3 4 种幼苗的抗旱能力

Table 3 Drought resistance ability of four seedlings

| 参试树种 Experimental tree species     | 荷木                    | 火力楠                       | 尾叶桉                         | 枫香                           |
|------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|
|                                    | <i>Schima superba</i> | <i>Michelia macclurel</i> | <i>Eucalyptus urophylla</i> | <i>Liquidambar formosana</i> |
| 主成分得分 Score of principal component | 3.99                  | 3.79                      | -0.47                       | -4.67                        |
| 抗旱位次 Ranking of drought resistance | 1                     | 2                         | 3                           | 4                            |

### 3 结论与讨论

#### 3.1 幼苗抗旱性与叶片相对含水量

水分是活细胞的必要组成和代谢活动的重要物质,抗旱性强的树种其叶片结构特征更有利于减少水分损失。因此,叶片的保水力直接体现植株的抗旱能力<sup>[16]</sup>。在小麦等的抗旱研究中表明干旱胁迫下各品种叶片相对含水量值与抗旱性呈正相关<sup>[17]</sup>。在本研究中,经干旱胁迫处理后,各树种叶片的相对含水量都呈现下降的趋势。火力楠轻度胁迫时,叶片的相对含水量随胁迫持续时间的延长波动较小,重度胁迫 36 h 时,叶片的相对含水量仍能维持在较高的水平,表示抗旱能力较强。随着胁迫强度的加剧,荷木叶片的相对含水量在胁迫中后期这种差异才表现出来,说明短期内具有较强的抵旱力。随着胁迫持续时间的延长,尾叶桉叶片的相对含水量降幅较大,说明其对干旱胁迫很敏感,保水能力弱。

#### 3.2 幼苗抗旱性与细胞膜透性

植物细胞的原生质膜具有选择透性<sup>[18]</sup>,在干旱胁迫下,通过代谢活动使细胞内溶质的主动增加而导致细胞渗透势的下降,从而降低体内水势,保证植物可从外界水势降低的环境中继续吸水以维持细胞内各种生理生化代谢的正常进行<sup>[6,19]</sup>。渗透调节物质对渗透调节的贡献随物种、干旱胁迫时间的进程和渗透调节物质的种类而异<sup>[20]</sup>。水分亏缺过于严重时渗透调节能力会变小甚至丧失<sup>[21]</sup>,表现为质膜结构和功能的选择性丧失,电解质和某些小分子有机物渗漏<sup>[22]</sup>,从而引起组织浸泡液的电导率增加。因此,质膜透性的变化是植物

细胞结构和功能完整性的可靠指标<sup>[23]</sup>。通常耐旱树种比不耐旱树种具有较低的电解质外渗率<sup>[24]</sup>,相对电导率增加的幅度小<sup>[16]</sup>。抗旱性强的树种或受害较轻者,这种透性的变化可以逆转,易恢复正常<sup>[25]</sup>。本试验中,随着干旱胁迫强度的加深及胁迫时间的延长,4 种树种幼苗叶片内相对电导率呈波动性上升的趋势。尾叶桉、枫香在轻度胁迫时相对电导率就有大幅度的增加,说明外渗电解质比较多,细胞膜受损严重,抗旱性较弱,而火力楠和荷木与对照比变化较小,与其脯氨酸含量的变化相似。说明这两种幼苗在干旱胁迫初期通过提高脯氨酸含量等渗透调节物质增加其渗透调节能力,因而相对电导率增加,干旱胁迫后期对干旱有所适应,脯氨酸含量下降,引起相对电导率下降,表明其通过干旱锻炼获得一定的抗旱能力。两种幼苗干旱胁迫后期的 MDA 含量多有下降也表明细胞膜损伤程度小。

### 3.3 幼苗抗旱性与脯氨酸含量

干旱胁迫下游离脯氨酸大量积累的现象已在许多植物上得到证实<sup>[26]</sup>。叶片脯氨酸含量增加,可提高细胞的溶质含量,有助于细胞组织的持水,防止脱水<sup>[27]</sup>,提高其渗透调节能力,对干旱胁迫能起一个缓冲保护作用,增强植物的抗旱能力和抗逆性<sup>[28]</sup>。因此,许多人把脯氨酸的积累能力看作是植物抗旱性选择的基础<sup>[29]</sup>。本研究中,经干旱胁迫处理后,火力楠和荷木幼苗叶片的脯氨酸含量变化不大,其余树种与对照相比脯氨酸含量都有明显的增加,这是植物叶片对干旱胁迫进行适应性代谢调节的结果<sup>[16]</sup>。根据马宗仁等<sup>[30]</sup>的“时间差”理论,各树种存在一个耐受胁迫的极限。尾叶桉叶片在干旱胁迫 24 h 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,枫香在中度胁迫 24 h 和重度胁迫 12 h 时达到极限。而火力楠和荷木在干旱胁迫过程中脯氨酸含量未出现明显的高峰,可能是对干旱胁迫的适应性较强。

### 3.4 幼苗抗旱性与叶绿素含量

叶绿素含量的高低在一定程度上能反映叶片的光合能力<sup>[31]</sup>,如能在适度干旱下保持叶绿素含量的稳定性甚或有所提高,将有助于在逆境中生存生长<sup>[32]</sup>。惠竹梅等<sup>[33]</sup>认为干旱胁迫可以引起叶绿素的分解。抗旱性越强的植物,随水分亏缺程度的加深,叶绿素含量降低的幅度会随之变小<sup>[16]</sup>。本研究表明,随着干旱胁迫强度的增大和胁迫持续时间的延长,6 个树种叶片的叶绿素含量一般呈小幅波动,并且出现含量升高的现象,原因是幼苗在干旱胁迫处理后,叶片含水量下降,叶绿素呈相对浓缩状态,单位鲜重中含量就会相对升高,也可能与植物对环境因子的补偿和超补偿效应有关<sup>[34-35]</sup>。这与冯玉龙等<sup>[36]</sup>的研究结果有相似之处。另外,通常情况下,干旱时植物的光合作用会减弱,但黎祐琛<sup>[37]</sup>报道干旱胁迫时光合作用的抑制有严重的滞后效应,这也说明在逆境条件下叶绿素的降解速度可能较慢。

### 3.5 幼苗抗旱性与 SOD 活性

干旱胁迫下,植物体内的活性氧大量积累,破坏细胞膜,加速细胞的衰老和解体。处于逆境下的植物自身会形成一些防御机制,如活性氧的酶促清除系统,超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)在活性氧清除反应过程中,首先发挥作用,在该系统中处于核心地位。在干旱胁迫的诱导下,植物叶片中的 SOD 酶活性提高以增强其抗氧化能力,减少脂质过氧化,稳定了膜的透性。一般情况下,细胞内的活性氧与防御系统之间保持着平衡<sup>[38]</sup>。在本研究中,经不同干旱胁迫强度处理 36 h 后,火力楠和荷木叶片的 SOD 活性在重度胁迫时显著升高,能够使得活性氧代谢处于一定的平衡,从而增强了其抗旱性。尾叶桉和枫香的 SOD 活性在轻度和中度胁迫 24 h 时和重度胁迫 12 h 达到高峰,重度胁迫 36 h 后, SOD 活性显著小于对照,说明二者清除活性氧的能力要弱于火力楠和荷木。

### 3.6 幼苗抗旱性与丙二醛含量

MDA 是一种高活性的脂膜过氧化物,它能交联脂类、糖类、核酸及蛋白质<sup>[39]</sup>,强烈地与细胞内各种成分发生反应<sup>[40]</sup>,通过影响细胞膜透性及膜蛋白而影响细胞对离子的吸收和积累及活性氧代谢系统的平衡<sup>[41]</sup>。因而抗旱性较强的品种出现膜脂氧化的程度比抗旱性较弱的品种低。在干旱胁迫下,植物 MDA 含量增幅越小,抗旱性越强,反之,MDA 含量增幅越大,抗旱性越弱<sup>[42]</sup>。尾叶桉和枫香叶片的 MDA 含量随胁迫时间的增加逐渐上升的趋势,胁迫 36 h 时有所下降,但是仍然显著大于对照。火力楠叶片的 MDA 含量增幅较小,表

明其可能有较强的防止膜脂过氧化作用的能力,这与其较高的 SOD 活性是分不开的。荷木叶片的 MDA 含量在轻度胁迫持续 24 h 时增幅较大,其余处理小幅波动后回到对照水平,这可能是对干旱胁迫一种应激的反应,表明细胞膜受损伤程度较小。

### 3.7 幼苗抗旱性与可溶性糖含量

可溶性糖是一类具有渗透调节功能的小分子有机化合物,而渗透调节可能是植物在干旱胁迫下主要的适应机制,尤其是在低水势下更可能如此<sup>[43]</sup>。本研究中,随着干旱胁迫强度的加剧,火力楠和荷木叶片的可溶性糖含量在胁迫前期逐渐增加,中后期波动性上升,重度胁迫 36 h 后可溶性糖含量分别比对照增加了 74% 和 197%。可见,荷木的渗透调节能力要高于火力楠,两种幼苗通过提高可溶性糖含量,增加了细胞的抗脱水能力,可以减缓干旱对其的伤害。尾叶桉和枫香在轻度胁迫时含量最大,重度胁迫 36 h 时下降,说明这种渗透调节能力是有限的,严重干旱会使其渗透调节能力丧失。

### 3.8 幼苗抗旱性的综合评价

植物的抗旱性是一个复杂的综合性状,它受多种因素影响,而各因素间又存在微妙的关系,其重要性也不甚相同。对树木抗旱性的评价,当涉及到多种树木、多个指标的情况时,因各指标所表达的树木抗旱性顺序往往不一致,利用一般的简单方法很难得出确切结果。本研究运用主成分分析对 4 个树种的 7 个干旱生理指标进行了综合评定,主成分中各因子的负荷量大小说明,干旱胁迫下抗旱性强的树种可维持较高的组织含水量,水分亏缺少,细胞膜伤害率低,对活性氧的清除能力强。叶片相对含水量、相对电导率以及 SOD 活性和 MDA 含量可作为这 4 个树种抗旱性评价的有效依据。根据加权后的主成分得分可知,不同干旱胁迫强度及持续时间处理的 4 个树种的抗旱性大小由高到低的顺序为荷木、火力楠、尾叶桉、枫香,这与其生理指标的变化一致,说明主成分分析适用于评价树木抗旱生理指标。

### References:

- [ 1 ] Patnaik D, Khurana P. Wheat biotechnology: a mini-review. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2002, 4: 74-102.
- [ 2 ] Glombitza C, Dubuis P H, Thulke O, Welzl G, Bovet L, Götz M, Affenzeller M, Geist B, Hehn A, Asnaghi C, Ernst D, Seidlitz H K, Gundlach H, Mayer K F, Martinoia E, Werck-Reichhart D, Mauch F, Schäffner A R. Crosstalk and differential response to abiotic and biotic stressors reflected at the transcriptional level of effect or genes from secondary metabolism. *Plant Molecular Biology*, 2004, 51: 1-19.
- [ 3 ] Gower S T, Vogt K A, Grier C C. Carbon dynamics of Rocky Mountain Douglas-fir: influence of water and nutrient availability. *Ecological Monographs*, 1992, 62: 43-65
- [ 4 ] Becker M, Nieminen T M, Geremia F. Short-term variation and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annales des Sciences Forestieres*, 1994, 51: 477-492.
- [ 5 ] Wang W X, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 2003, 218: 1-14.
- [ 6 ] Morgan J M. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 1984, 35: 299-319.
- [ 7 ] Hare P D, Cress W A, Staden J V. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress. *Plant, Cell and Environment*, 1998, 21: 535-553.
- [ 8 ] Li Y, Xue L, Wu M. Research advances in mechanisms of tree species drought resistance. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(6): 1857-1866.
- [ 9 ] Souza R P, Machado E C, Silva J A B, Lagoa A M M A, Silveira J A G. Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 51: 45-56
- [ 10 ] Sofo A, Dichio B, Xiloyannis C, Masia A. Effects of different irradiance levels on some antioxidant enzymes and on malondialdehyde content during rewatering in olive tree. *Plant Science*, 2004, 166: 293-302.
- [ 11 ] Chen J X, Wang X F. *Plant Physiology Experimental Guidance*. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002.
- [ 12 ] Zhang W H, Zhang F Q, Zhang S G, Xu D P, Chen Z X. Study on the drought-resistance of three seedlings of Acacia. *Forest Research*, 2005, 18(6): 695-700.
- [ 13 ] Li H S. *Principle and Technologies to Plant Physiological Biochemical Experiment*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [ 14 ] Ou J X, Qu J D. *Statistical Analysis Method of Multivariate Data*. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000: 63-80.
- [ 15 ] He X Q. *Methods and Applications of Modern Statistical Analysis*. Beijing: Chinese People University Press, 1998.

- [16] Zhao L, Lang N J, Wen S L, Zheng K. A study on drought resistance mechanism of four kinds of plants in dry and hot valley of Yunnan Province. *Journal of West China Forestry Science*, 2006, 35(2):9-16.
- [17] Li D Q, Zou Q, Chen B S. Relationship between water status and osmotic adjustment of water leaves different in drought resistance. *Chinese Bulletin of Botany*, 1990, 16(4):43-48.
- [18] Li Z G, Liu W, Lin Z W, Gu J G. Study on biophysical-chemical change of asparagus under PEG stress. *Ecological Science*, 2006, 25(1):21-24.
- [19] Li D Q, Zou Q, Chen B S. Osmotic adjustment and osmotic of wheat cultivars with different drought resistance under soil drought. *Journal of Plant Physiology*, 1992, 18(1):37-44.
- [20] Gao J, Cao K F, Wang H X. Water relation and stomatal conductance in nine tree species during a dry period grown in a hot and dry valley. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(2):186-190.
- [21] Jones M M, Turner N C. Osmotic adjustment in leaves of sorghum in response to water deficits. *Plant Physiology*, 1978, 61:122-126.
- [22] Yang D H, Yang M S, Wang J M, Wang S L, Li S Y, Ye Z K, Naujoks G. Europe birch's membrane system changes under low temperature menace in the period of seedling. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, 32(6):13-15.
- [23] Wang R H, Shi L, Tang G G, Liang Y C, Zhang C Y. Effect of osmotic stress on activities of protective enzymes system in *agropyron mongolicum* seedling. *Chinese Bulletin of Botany*, 2003, 20(3):330-335.
- [24] Zhang C L, Zeng G P, Chen J X. Effects of drought stress on the protective enzymes activities and membrane lipid peroxidation in leaves of *Brassica parachinensis* L. H. Bailey. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2000, 8(4):23-26.
- [25] Zhu X H, Hao S J, Ru G X, Ru T Q, Wang S K, Zhao Q. Relationship between physiology indexes and drought resistance of variety for *Robinia Pseudoacacia* clones under drought gradient. *Shandong Agricultural Sciences*, 2006, (2):48-50.
- [26] Ha S G, Sun Y M, Li J Y, Zhou Z F. The Influence of draught stress on the physiological indexes of seedlings of four tree species in Maowusu. *Forest Research*, 2006, 19(3):358-363.
- [27] Wu Y, Chen C J, Liu B, Zhang G F, Peng D H, Li S. Callus changes of leaves of *Tectona grandis* under drought stress. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2006, 26(2):103-106.
- [28] Bohnert H J, Jensen R G. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants. *Trends in Biotechnology*, 1996, 14(3):89-97.
- [29] Stajner D, Mimica-Dukic N, Gasic O. Adaptability to drought in sugar beet cultivars. *Biologia Plantarum*, 1995, 37:107-112.
- [30] Ma Z R, Liu R T. The Basic Principle on Physiology of Drought Resistance for Forages. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1993.
- [31] An Y Y, Liang Z S, Han R L, Liu G B. Effect of soil drought on seedling growth and water metabolism of three tree species in Loess Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(1):91-97.
- [32] Wang Y Y, Chen K R. An adaptability study on drought resistance of Caribbean pine. *Journal of Southwest Forestry College*, 1996, 16(3):129-134.
- [33] Hui Z M, Sun W J, Zhang Z W. Effect of exogenous  $Ca^{2+}$  on drought resistance physiological indexes of wine grape cultivar Pinot Noir under water stress. *Journal of Northwest A & F University. Natural Science Edition*, 2007, 35(9):137-140, 146.
- [34] Zou C J, Han S J, Xu W D, Li D T. Eco-physiological responses of *Picea mongolica* ecotypes to drought stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 14(9):1446-1450.
- [35] Yu X L, Di X Y, Sun L P. Effects of water stress on the growth and eco-physiology of seedlings of the *Rhus typhina*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(11):57-61.
- [36] Feng Y L, Wang W Z, Ao H. Drought resistance of *Larix olgensis* Henry and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* etc. *Journal of Northeast Forestry University*, 1998, 26(6):16-20.
- [37] Li H C, Qiu Z J. A review of studies of drought resistance in tree species and drought resistant forestation technology. *World Forestry Research*, 2003, 16(4):17-22.
- [38] Prasad T K. Mechanism of chilling-induced oxidative stress injury and tolerances in developing maize seedlings: changes in antioxidant system, oxidation of proteins and lipids, and protease activities. *Plant Journal*, 1996, 10:1017-1026.
- [39] Yu F M, Yan L Y, Liu Y Y, Li Y C. The physiological influence on grafted water melon of different stocks. *Journal of Hebei Normal University of Science & Technology*, 2002, 16(4):34-36.
- [40] Shen B. Studies on physiology of leaf senescence of Indica-Japonica hybrid rice during grain filling. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2003, 19(4):21-24.
- [41] Yuan L, Karim A L, Zhang L Q. Effects of NaCl stress on active oxygen metabolism and membrane stability in *Pistacia vera* seedlings. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29, 985-991.
- [42] He K Y, Li X C, Huang L B, Zhang Y B, Hu X J. Effects of drought stress on physiological and biochemical indices in five tree species of Magnoliaceae. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2004, 13(4):20-23.

- [43] Hu X S, Wang S J. A review of studies on water stress and drought tolerance in tree species. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, 34(2):77-89.

#### 参考文献:

- [8] 李燕,薛立,吴敏. 树木抗旱机理研究进展. *生态学杂志*, 2007, 26(6):1857-1866.
- [11] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导. 广州:华南理工大学出版社, 2002.
- [12] 张卫华,张方秋,张守攻,徐大平,陈祖旭 3 种相思幼苗抗旱性研究. *林业科学研究*, 2005, 18(6):695-700.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京:高等教育出版社,2000.
- [14] 区靖祥,邱健德. 多元数据的统计分析方法. 北京:中国农业科学技术出版社, 2002:63-80.
- [15] 何晓群. 现代统计分析方法与应用. 北京:中国人民大学出版社,1998.
- [16] 赵琳,郎南军,温绍龙,郑科. 云南干热河谷 4 种植物抗旱机理的研究. *西部林业科学*, 2006,35(2):9-16.
- [17] 李德全,邹琦,程炳嵩. 抗旱性不同的小麦叶片的渗透调节与水分状况的关系. *植物学通报*,1990, 16(4):43-48.
- [18] 李志刚,刘威,林彰文,顾继光. 芦笋在 PEG 模拟干旱条件下的生理生化变化. *生态科学*, 2006,25(1):21-24.
- [19] 李德全,邹琦,程炳嵩. 土壤干旱下不同抗旱性小麦品种的渗透调节和渗透调节物质. *植物生理学报*, 1992,18(1):37-44.
- [20] 高洁,曹坤芳,王焕校. 干热河谷 9 种造林树种在旱季的水分关系和气孔导度. *植物生态学报*, 2004,28(2):186-190.
- [22] 杨德浩,杨敏生,王进茂,王世兰,李帅英,叶振魁, Naujoks G. 欧洲白桦苗期低温胁迫时膜系统的变化. *东北林业大学学报*,2004,32(6):13-15.
- [23] 王荣华,石雷,汤庚国,梁寅初,张称意. 渗透胁迫对蒙古冰草幼苗保护酶系统的影响. *植物学通报*, 2003,20(3):330-335.
- [24] 章崇玲,曾国平,陈建勋. 干旱胁迫对菜苔叶片保护酶活性和膜脂过氧化物的影响. *植物资源与环境学报*,2000,8(4):23-26.
- [25] 朱秀红,郝绍菊,茹广欣,茹桃勤,王苏柯,赵晴. 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. *山东农业科学*, 2006, 2:48-50.
- [26] 哈申格日乐,宋云民,李吉跃,周泽福. 水分胁迫对毛乌素地区 4 树种幼苗生理特性的影响. *林业科学研究*, 2006,19(3):358-363.
- [27] 武勇,陈存及,刘宝,张国防,彭东辉,李生. 干旱胁迫下柚木叶片生理指标的变化. *福建林学院学报*,2006,26(2):103-106.
- [30] 马宗仁,刘荣堂. 牧草抗旱生理的基本原理. 兰州:兰州大学出版社,1993.
- [31] 安玉艳,梁宗锁,韩蕊莲,刘国彬. 土壤干旱对黄土高原 3 个常见树种幼苗水分代谢及生长的影响. *西北植物学报*, 2007, 27(1):91-97.
- [32] 王永义,陈坤荣. 加勒比松抗旱适应性研究. *西南林学院学报*, 1996,16(3):129-134.
- [33] 惠竹梅,孙万金,张振文. 外源  $Ca^{2+}$  对水分胁迫下酿酒葡萄黑比诺主要抗旱生理指标的影响. *西北农林科技大学学报*, 2007,35(9):137-140,146.
- [34] 邹春静,韩士杰,徐文铎,李道棠. 沙地云杉生态型对干旱胁迫的生理生态响应. *应用生态学报*, 2004,14(9):1446 - 1450.
- [35] 喻晓丽,邸雪颖,宋丽萍. 水分胁迫对火炬树幼苗生长和生理特性的影响. *林业科学*,2007,43(11):57-61.
- [36] 冯玉龙,王文章,敖红. 长白落叶松和樟子松等五种树种抗旱性的比较. *东北林业大学学报*,1998,26(6):16-20.
- [37] 黎祐琛,邱治军. 树木抗旱性及抗旱造林技术研究综述. *世界林业研究*, 2003,16(4):17-22.
- [39] 于凤鸣,闫立英,刘玉艳,李艳春. 砧木对嫁接西瓜的生理影响. *河北职业技术师范学院学报*, 2002,16(4):34-36.
- [40] 沈波. 水稻籼粳亚种间杂交组合灌浆期叶片衰老生理研究. *上海农业学报*, 2003,19(4):21-24.
- [41] 袁琳,克热木·伊力,张利权. NaCl 胁迫对阿月浑子实生苗活性氧代谢与细胞膜稳定性的影响. *植物生态学报*, 2005,29(6):985-991.
- [42] 何开跃,李晓储,黄利斌,张永兵,胡晓健. 干旱胁迫对木兰科 5 树种生理生化指标的影响. *植物资源与环境学报*, 2004,13(4):20-23.
- [43] 胡新生,王世绩. 树木水分胁迫生理与耐旱性研究进展及展望. *林业科学*, 1998,34(2):77-89.

CONTENTS

Sex ratio and spatial pattern in *Populus davidiana* in Changbai Mountain ..... PAN Chunfang, ZHAO Xiuhai, XIA Fucui, et al (297)

The relationship between freeze-tolerance and changes in activities of antioxidant enzymes and osmolyte content in the leaves of white clover during early winter freeze-thaw cycles ..... ZHAO Mei, ZHOU Ruilian, LIU Jianfang, et al (306)

Gray correlation analysis on naturalness of the primary forest types on the Losses Plateau ..... WANG Naijiang, LIU Zengwen, XU Zhao, et al (316)

Photosynthetic responses of *Gracilaria lemaneiformis* to two antibiotics ..... JIAN Jianbo, ZOU Dinghui, LIU Wenhua, et al (326)

Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression ..... PAN Fujing, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (335)

Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River ..... CHEN Yapeng, CHEN Yaning, XU Changchun, et al (344)

Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI ..... SONG Fuqiang, XING Kaixiong, LIU Yang, et al (354)

Effects of fire on the structure of herbage synusia vegetation in desertified steppe, North China ..... HE Haoyu, SU Jieqiong, HUANG Lei, et al (364)

Physiological responses of four broadleaved seedlings to drought stress simulated by PEG ..... FENG Huifang, XUE Li, REN Xiangrong, et al (371)

Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity ..... ZHU Chunyang, LI Shuhua, JI Peng, et al (383)

Diversity of waterbirds and change in home range of bar-headed geese *Anser indicus* during breeding period at Hangcuo Lake of Tibet, China ..... ZHANG Guogang, LIU Dongping, QIAN Fawen, et al (395)

The habitat selection of Giant panda in Wanglang Nature Reserve, Sichuan Province, China ..... KANG Dongwei, KANG Wen, TAN Liuyi, et al (401)

Effects of vigilance on the patterns of functional responses of foraging in voles (*Microtus fortis*) ..... TAO Shuanglun, YANG Xifu, DENG Kaidong, et al (410)

Influence of heavy metal pollution on soil animal community in Luqiao, Taizhou City ..... BAI Yi, SHI Shidi, QI Xin, et al (421)

Annual quantitative distribution of meiofauna in relation to sediment environment in Qingdao Bay ..... DU Yongfen, XU Kuidong, LEI Yanli, et al (431)

Population genetic variations and phylogeography of *Macropodus opercularis* ..... WANG Peixin, BAI Junjie, HU Yinchang, et al (441)

Contribution of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> host plants for the overwintering and 1<sup>st</sup> generation of *Helicoverpa armigera* (Hübner) in Northern China ..... YE Lefu, FU Xue, GE Feng (449)

Relationships between two species of insect pests and their natural enemies in tea gardens of three different altitudes ..... BI Shoudong, KE Shengbing, XU Jinfeng, et al (455)

The diversity of ground-dwelling beetles at cultivated land and restored habitats on the Bashang plateau ..... LIU Yunhui, YU Zhenrong, WANG Changliu, et al (465)

Characteristics of soil microbial communities under dry and wet condition in Zoige alpine wetland ..... NIU Jia, ZHOU Xiaoqi, JIANG Na, et al (474)

Microbial diversity of the jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) fruits surface during harvesting and storage stages ..... SHA Yuexia (483)

Effects of powdery mildew infection on zucchini growth under elevated CO<sub>2</sub> and temperature ..... LIU Junzhi, GE Yaming, Pugliese Massimo, et al (491)

Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation dynamics of neutral purple soil ..... PENG Sili, SHEN Hong, YUAN Junji, et al (498)

The bacterial community structures in Xinjiang fault belt spring analyzed by PCR-DGGE ..... WU Jiangchao, GAO Xiaoqi, ZENG Jun, et al (506)

The impact of oil pollution on marine phytoplankton community growth change ..... HUANG Yijun, CHEN Quanzhen, ZENG Jiangning, et al (513)

Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress ..... HE Junyu, REN Yanfang, WANG Yangyang, et al (522)

Non-point pollution control for landscape conservation analysis based on CLUE-S simulations in Miyun County ..... PAN Ying, LIU Yunhui, WANG Jing, et al (529)

Analysis on ecological land rent based on ecological footprint ..... LONG Kaisheng, CHEN Ligen, ZHAO Yali (538)

Relationship of vegetation degradation classification and landscape accessibility classification in Shenzhen ..... LIU Yufan, CHEN Xue, LI Guicai, et al (547)

**Review and Monograph**

Risk management approaches for environmental and human health risks in the United States and Canada ..... HE Guizhen, LÜ Yonglong (556)

Plant wax and its response to environmental conditions: an overview ..... LI Jingjing, HUANG Junhua, XIE Shucheng (565)

Acid corrosion mechanism of the sulfate-reducing bacteria and protecting studies in oilfield ..... ZHUANG Wen, CHU Liye, SHAO Hongbo (575)

Advance in the research of phyllospheric microorganism ..... PAN Jiangang, HU Qing, QI Hongyan, et al (583)

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

| 排序<br>Order | 期刊 Journal                              | 总被引频次<br>Total citation | 排序<br>Order | 期刊 Journal    | 影响因子<br>Impact factor |
|-------------|---|-------------------------|-------------|---------------|-----------------------|
| 1           | 生态学报                                    | 11764                   | 1           | 生态学报          | 1.812                 |
| 2           | 应用生态学报                                  | 9430                    | 2           | 植物生态学报        | 1.771                 |
| 3           | 植物生态学报                                  | 4384                    | 3           | 应用生态学报        | 1.733                 |
| 4           | 西北植物学报                                  | 4177                    | 4           | 生物多样性         | 1.553                 |
| 5           | 生态学杂志                                   | 4048                    | 5           | 生态学杂志         | 1.396                 |
| 6           | 植物生理学通讯                                 | 3362                    | 6           | 西北植物学报        | 0.986                 |
| 7           | JOURNAL OF INTEGRATIVE<br>PLANT BIOLOGY | 3327                    | 7           | 兽类学报          | 0.894                 |
| 8           | MOLECULAR PLANT                         | 1788                    | 8           | CELL RESEARCH | 0.873                 |
| 9           | 水生生物学报                                  | 1773                    | 9           | 植物学报          | 0.841                 |
| 10          | 遗传学报                                    | 1667                    | 10          | 植物研究          | 0.809                 |

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任:孔红梅

执行编辑:刘天星 段 靖

生态学报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 31 卷 第 2 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 31 No. 2 2011

**编 辑** 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**主 编** 冯宗炜  
**主 管** 中国科学技术协会  
**主 办** 中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

**出 版** 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

**印 刷** 北京北林印刷厂  
**发 行** 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail:journal@cspg.net

**订 购** 全国各地邮局  
**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

**广告经营** 京海工商广字第 8013 号  
**许 可 证**

**Edited** by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**Editor-in-chief** FENG Zong-Wei  
**Supervised** by China Association for Science and Technology  
**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**Published** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

**Distributed** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel:(010)64034563  
E-mail:journal@cspg.net

**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元