

## 3种幼苗对水淹胁迫的生理响应

叶龙华, 杨振意, 薛立, 列淦文, 黄香兰

(华南农业大学林学院, 广东广州510642)

**摘要:**以灰木莲 *Manglietia glauca*、木麻黄 *Casuarina equisetifolia*、乐昌含笑 *Michelia chapensis* 幼苗为试验材料, 人工模拟水淹胁迫环境, 研究了水淹胁迫对这3种幼苗叶片5项生理指标的影响. 结果表明, 随着水淹持续时间的延长, 灰木莲的叶片叶绿素含量小幅波动后急剧升降, 木麻黄先微降后上升, 而乐昌含笑小幅波动, 峰值在  $(1.73 \pm 0.02) \sim (2.37 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  之间; 灰木莲的可溶性糖含量在水淹初期下降后又回升, 木麻黄则不断上升, 乐昌含笑先升后降, 峰值在  $(3.21 \pm 0.14) \% \sim (4.96 \pm 0.34) \%$  之间; 灰木莲的蛋白质含量波动大, 木麻黄小幅波动后下降, 乐昌含笑先升后降, 峰值在  $(17.97 \pm 0.83) \sim (28.10 \pm 2.16) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  之间; 灰木莲、乐昌含笑的叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性呈逐渐下降的趋势, 而木麻黄先升高后下降, 峰值在  $(177.39 \pm 4.86) \sim (183.94 \pm 1.71) \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$  之间; 灰木莲和乐昌含笑的丙二醛(MDA)含量均有上升, 而木麻黄保持稳定, 峰值在  $(0.018 \pm 0.001) \sim (0.037 \pm 0.002) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  之间. 主成分分析综合评价得出3个树种的抗涝性为: 木麻黄 > 灰木莲 > 乐昌含笑.

**关键词:** 幼苗; 水淹胁迫; 生理指标; 主成分分析

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2012)03-0368-05

### Physiological Response of Three Tree Species Seedlings to Submergence Stress

YE Long-hua, YANG Zhen-yi, XUE Li, LIE Gan-wen, HUANG Xiang-lan  
(College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** In order to provide reference for selection of submergence-resistant tree species, seedling physiological changes of *Manglietia glauca*, *Casuarina equisetifolia*, and *Michelia chapensis* were studied under submerged stress environment. Effect of seedling physiological indexes on submergence stress was evaluated by testing contents of chlorophyll, soluble sugar, soluble protein, content of malondialdehyde (MDA) and superoxide dismutase (SOD) activity. With increasing submergence time, the chlorophyll content of *M. glauca* increased after slight fluctuation, that of *C. equisetifolia* slightly decreased followed by an increase, whereas it changed a little for *M. chapensis*. The peak of chlorophyll content in three seedlings was between  $(1.73 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  and  $(2.37 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; the content of soluble sugar of *M. glauca* decreased followed by an increase, *C. equisetifolia* continuously increased and *M. chapensis* increased gradually at the beginning and then decreased, and their peak was between  $(3.21 \pm 0.14) \%$  and  $(4.96 \pm 0.34) \%$ ; the contents of soluble protein of *M. glauca* rapidly fluctuated, *C. equisetifolia* fluctuantly decreased, *M. chapensis* increased and then decreased, with a peak between  $(17.97 \pm 0.83) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  and  $(28.10 \pm 2.16) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; the activity of SOD of *M. glauca* and *M. chapensis* gradually decreased, whereas that of *C. equisetifolia* increased and then decreased, with a peak between  $(177.39 \pm 4.86) \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$  and  $(183.94 \pm 1.71) \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ . The content of MDA of *M. glauca* and *M. chapensis* tended to increase, whereas that of *M. chapensis* remained steady, with a peak between  $(0.018 \pm 0.001) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  and  $(0.037 \pm 0.002) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ . The comprehensive evaluation showed

收稿日期: 2011-12-01

作者简介: 叶龙华(1988—), 男, 硕士研究生; 通信作者: 薛立(1958—), 男, 教授, 博士, E-mail: forxue@scau.edu.cn

基金项目: 广东省林业局资助项目(F09054); 广东省林业科技创新专项资金项目(2010KJCX013-01)

that the order of submerging resistance of the three seedlings was *C. equisetifolia* > *M. glauca* > *M. chapensis*.

**Key words:** seedling; submergence stress; physiological index; principal component analysis

近年来,全球异常天气增多,局部地区暴雨频发,致使低洼的农田、林地积水发生涝害,使很多原有植物的形态结构发生变化,甚至死亡,对涝害地区的农林生产、生态效益及环境质量等方面都造成了潜在的威胁<sup>[1]</sup>. 植物生长需要适当的水分,水分过多或过少对植物生长都是不利的. 土壤水分过多会阻碍植物与大气环境间的气体交换,造成植物组织缺氧,严重影响植物的生长发育<sup>[2]</sup>,还能使树木叶片细胞膜脂过氧化加剧,保护酶系统受损,可溶性糖和可溶性蛋白含量变化,叶绿素降解,丙二醛含量积累<sup>[3-6]</sup>,因此可通过测定有效生理指标的方法预测植物的耐水淹能力. 灰木莲 *Manglietia glauca*、木麻黄 *Casuarina equisetifolia*、乐昌含笑 *Michelia chapensis* 是我国华南地区优良的园林绿化和造林树种,具有很高的经济价值、观赏价值和很强的生态功能. 尽管有学者研究了木麻黄淹水时的茎部皮孔和不定根变化<sup>[7]</sup>、干旱<sup>[8-9]</sup>或低温<sup>[10]</sup>条件下的生理指标变化,乐昌含笑的抗寒生理指标<sup>[11]</sup>,鲜见对这3个树种淹水条件下生理指标变化的报道. 本研究模拟水淹条件,通过测定不同水淹胁迫持续时间下3种幼苗的叶片叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白、丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化,研究3种幼苗的抗涝性,以便为筛选抗涝树种提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验地点设在华南农业大学林学院六楼北面的教学苗圃,处理所用灰木莲、木麻黄和乐昌含笑幼苗为营养袋培育的1年生实生苗,购于广东省龙眼洞林场林木种苗示范基地. 供试幼苗的营养袋直径为10 cm,高10 cm. 营养袋内基质由林下表土与黄心土按3:7的质量比混合而成,土壤容重 $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . 幼苗生长基本情况见表1.

表1 3种树幼苗生长基本情况<sup>1)</sup>

Tab.1 Growth status of three tree species seedlings

树种	地径/cm	苗高/cm	冠幅/cm
灰木莲	0.70 ± 0.10	49.75 ± 6.61	12.39 ± 2.36
木麻黄	0.45 ± 0.10	56.56 ± 12.77	12.26 ± 4.10
乐昌含笑	0.66 ± 0.11	51.83 ± 6.73	10.90 ± 2.09

1)表中数据为平均值 ± 标准差.

### 1.2 试验方法

选取形态长势基本一致的幼苗,将营养袋装苗放入水盆中进行水淹处理. 处理强度为水淹土表0 cm,每天补换水1次,以正常栽培管理的幼苗作对照,对照每天定时定量浇水1次,保持对照的毛管持水量为33.76%,田间持水量为25.48%. 置于室温下(28℃左右)生长,室内相对湿度75%~85%. 分别在持续胁迫7、14、21、28和35 d采集叶片,并统计不同持续时间各树种所有幼苗的存活率. 选择生长良好、大小均一的叶片为供试材料,测定各项生理指标. 不同树种的相同指标均在早晨8:30采样,每个指标用6株幼苗采样,取每株幼苗的第3~8位功能叶,用自来水冲去表面污物,再用蒸馏水冲洗2~3次后,用吸水纸吸干表面水分,混合采集叶片后进行生理指标测定,3次重复.

可溶性糖含量参照李合生<sup>[12]</sup>蒽酮比色法测定,其余生理指标按陈建勋等<sup>[13]</sup>的方法测定.

数据统计分析和作图由Microsoft Excel和SAS 8.1软件系统完成<sup>[14]</sup>. 运用主成分分析对各树种的抗涝性进行综合评价.

## 2 结果与分析

### 2.1 水淹胁迫对3种幼苗叶片叶绿素含量的影响

由图1中A<sub>1</sub>、B<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>可知,经不同持续时间的淹水胁迫处理后,3种幼苗叶片叶绿素含量均有显著差异. 随着胁迫时间的持续,灰木莲的叶片叶绿素含量呈波动性变化,水淹28 d时达到峰值,为(2.37 ± 0.02) mg · g<sup>-1</sup>,在水淹7和35 d时,显著低于对照,水淹14和28 d时显著高于对照;木麻黄的叶片叶绿素含量显著下降后显著上升,然后波动性变化,水淹35 d时达到峰值,为(1.73 ± 0.02) mg · g<sup>-1</sup>. 水淹7和14 d时显著低于对照,水淹21和35 d时显著高于对照;乐昌含笑的叶片叶绿素含量波动不大,水淹14 d时达到峰值,为(2.29 ± 0.07) mg · g<sup>-1</sup>,水淹7、14和28 d时显著高于对照. 水淹35 d时,灰木莲的叶片叶绿素含量显著低于对照,木麻黄的叶片叶绿素含量显著高于对照,乐昌含笑的叶片叶绿素含量与对照无显著差异. 3种幼苗中,木麻黄的叶片叶绿素含量变化表现最为抗涝.

### 2.2 水淹胁迫对3种幼苗叶片可溶性糖含量的影响

由图1中A<sub>2</sub>、B<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>可知,经不同持续时间的淹水

淹胁迫处理后,3种幼苗叶片可溶性糖含量均有显著差异.随着胁迫时间的持续,灰木莲的叶片可溶性糖含量略降后显著上升,接着显著下降,水淹14和35 d时显著低于对照,水淹28 d时达到最大值,为 $(4.02 \pm 0.05)\%$ ,显著高于对照;木麻黄的叶片可溶性糖含量不断上升,水淹35 d时达到最大值,为 $(3.21 \pm 0.14)\%$ ,各水淹时间处理时可溶性糖含量均显著高于对照;乐昌含笑的叶片可溶性糖含量显著上升后显著下降,水淹28 d时达到峰值,为 $(4.96 \pm 0.34)\%$ ,各水淹时间处理时均显著高于对照.水淹35 d时,灰木莲的叶片可溶性糖含量显著低于对照,木麻黄和乐昌含笑的叶片可溶性糖含量显著高于对照,与对照相比,木麻黄增幅达302%,乐昌含笑增幅为16%,3种幼苗中,木麻黄的叶片可溶性糖含量变化表现得最为抗涝.

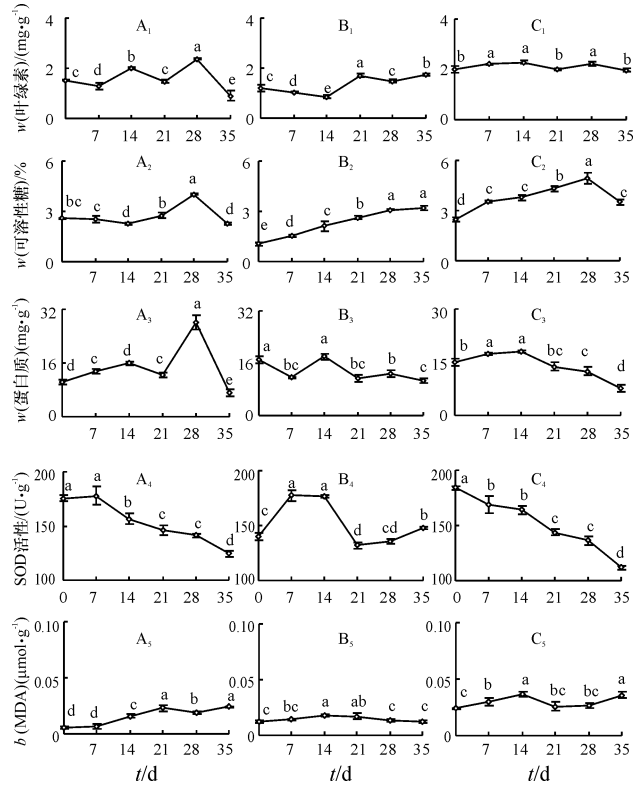
### 2.3 水淹胁迫对3种幼苗叶片可溶性蛋白质含量的影响

由图1中 $A_3$ 、 $B_3$ 、 $C_3$ 可知,经不同持续时间的淹胁迫处理后,3种幼苗的叶片可溶性蛋白质含量均有显著差异.随着胁迫时间的持续,灰木莲的叶片可溶性蛋白质含量呈现反复的显著上升后显著下降,水淹28 d时达到峰值,为 $(28.10 \pm 2.16) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ .除了35 d时显著低于对照外,其余水淹时间处理的均显著高于对照;木麻黄的叶片可溶性蛋白质含量呈波动性下降趋势,在水淹14 d时达到峰值,为 $(17.97 \pm 0.83) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其他水淹时间处理的均显著低于对照;乐昌含笑的叶片可溶性蛋白质含量上升后下降,水淹14 d时达到峰值,为 $(18.12 \pm 0.34) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,水淹7和14 d时显著高于对照,水淹21 d时与对照无显著差异,其余水淹时间处理的显著低于对照.水淹35 d时,3种幼苗的叶片可溶性蛋白质含量均显著低于对照,水淹28 d时,灰木莲的叶片可溶性蛋白质含量显著高于对照,其余2种幼苗的叶片可溶性蛋白质含量显著低于对照.与对照相比,水淹28 d的木麻黄和乐昌含笑降幅分别为18%和25%,3种幼苗中,灰木莲的叶片可溶性蛋白质含量表现得最为抗涝,木麻黄次之,乐昌含笑最弱.

### 2.4 水淹胁迫对3种幼苗叶片SOD活性的影响

由图1中 $A_4$ 、 $B_4$ 、 $C_4$ 可知,经不同持续时间的淹胁迫处理后,3种幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性均有显著差异.随着胁迫时间的持续,灰木莲的叶片SOD活性呈下降趋势,水淹7 d时达到峰值,为 $(177.92 \pm 8.60) \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ ,与对照差异不显著,其余水淹时间处理的显著低于对照;木麻黄的叶片SOD活性显著上升后下降,接着又上升,水淹7 d时达到峰值,为 $(177.39 \pm 4.86) \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ .水淹7、14和35 d

的显著高于对照,水淹21 d的显著低于对照;乐昌含笑的叶片SOD活性随着水淹时间的持续而逐渐下降,且均显著低于对照.水淹35 d时,木麻黄幼苗的叶片SOD活性显著高于对照,灰木莲和乐昌含笑显著低于对照,降幅分别为29%和39%.3种幼苗中,木麻黄的叶片SOD活性表现得最为抗涝,灰木莲次之,乐昌含笑最弱.



$A_1 \sim A_5$  为灰木莲;  $B_1 \sim B_5$  为木麻黄;  $C_1 \sim C_5$  为乐昌含笑; 同一坐标图中, 凡具有相同英文小写字母者, 表示差异不显著 (Duncan's 多重比较法,  $P > 0.05$ ).

图1 水淹胁迫对3种幼苗生理指标的影响

Fig. 1 Effects of submergence stress on physiological indexes of the three tree species seedlings

### 2.5 水淹胁迫对3种幼苗叶片丙二醛含量的影响

由图1中 $A_5$ 、 $B_5$ 、 $C_5$ 可知,经不同持续时间的淹处理后,3种幼苗叶片丙二醛(MDA)含量均有显著差异.随着水淹时间的持续,灰木莲的叶片MDA含量呈上升趋势,水淹35 d时达到峰值,为 $(0.024 \pm 0.001) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ .除水淹7 d外,其他水淹时间处理均显著高于对照;木麻黄的叶片MDA含量先升后降,水淹14 d时达到峰值,为 $(0.018 \pm 0.001) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ .水淹14和21 d时显著高于对照;乐昌含笑的叶片MDA含量显著上升后下降,然后又上升,水淹14 d时达到峰值,为 $(0.037 \pm 0.002) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ .水淹21和28 d时与对照无显著差异,其余水淹时间处理的显著高于对照.灰木莲和乐昌含

笑的MDA含量均有上升,而木麻黄保持相对稳定.水淹35 d时,木麻黄的叶片MDA含量与对照无显著差异,灰木莲和含笑显著高于对照.水淹35 d时,灰木莲的MDA含量小于乐昌含笑,但是与对照相比的增幅大于后者.3种幼苗中,木麻黄的叶片MDA含量表现得最为抗涝.

## 2.6 主成分分析法对3种幼苗抗涝性的综合评价

根据生理指标与抗涝性的联系,由主成分的特征向量可计算出每个树种的主成分得分(抗涝分数).利用主成分总分对3个树种的抗涝性进行对比分析,得分高的树种其抗涝性较强.主成分分析方法综合评价结果表明,水淹胁迫处理的3个树种的抗涝性得分分别为木麻黄1.049分,灰木莲0.820分,乐昌含笑0.765分.因此,3个树种的抗涝性为木麻黄>灰木莲>乐昌含笑.

## 3 讨论

水淹胁迫从多方面限制植物的生长,然而,耐淹植物在水淹胁迫时会产生积极的响应和适应对策<sup>[15]</sup>,有效生理指标的变化是植物对水淹胁迫响应的体现.

叶绿素含量是植物叶片光合性能、营养状况和衰老程度的直观表现,其含量是一个有效的涝害鉴定指标.在水淹环境下,无氧呼吸使根系能量缺乏,叶绿素含量显著降低<sup>[16-17]</sup>.本研究表明,随着水淹胁迫时间的持续,灰木莲的叶片叶绿素含量小幅波动后急剧升降,这与姜东等<sup>[18]</sup>的研究结果相似.木麻黄的叶绿素含量微降后上升,而乐昌含笑的叶片叶绿素含量小幅波动.木麻黄的叶绿素含量上升是在涝害时加强了叶绿素的合成,是耐涝性强的表现<sup>[5]</sup>.

植株体内的碳水化合物含量与植株的耐淹性呈显著相关<sup>[19-20]</sup>.在水淹条件下,可溶性糖含量的增加可提高细胞渗透势,维持细胞的膨压.本研究中随着水淹胁迫时间的持续,灰木莲的可溶性糖含量在水淹初期下降后又回升,水淹前期由于缺氧而抑制灰木莲的有氧呼吸,大量消耗可溶性糖,说明其渗透调节能力减弱,可能是严重的水淹胁迫导致了可溶性糖的加速分解和合成减少<sup>[6]</sup>,后期回升,可能是对水淹胁迫的适应性反映.木麻黄的叶片可溶性糖含量不断上升,有利于抗涝.乐昌含笑的可溶性糖含量先升后降,表明其早期有一定的抗涝性,但是后期抗涝能力下降.

植物体内可溶性蛋白的含量影响着植物的生长发育和衰老过程.在涝渍胁迫下,耐涝性强的品种可溶性蛋白含量高于耐涝性弱的<sup>[21]</sup>,前者的可溶性蛋

白下降较慢<sup>[22]</sup>.随着水淹胁迫时间的持续,灰木莲的蛋白质含量波动大,这与徐锡增等<sup>[23]</sup>对杨树无性系的涝害胁迫的研究结论相似,可能是幼苗对涝渍胁迫的一种生理反应,经过代谢调节,幼苗重新建立起与水涝环境之间的平衡关系.木麻黄的蛋白质含量波动性下降,但是下降幅度较小<sup>[24]</sup>,这与曾淑华等<sup>[25]</sup>对烟草的研究结果相似.乐昌含笑的叶片可溶性蛋白质含量在水淹前期有所上升,后期急剧下降,说明其不能长期抗涝.

在作物抗涝性机理研究中SOD活性的变化已广泛作为植物抵御水涝伤害的指标之一.SOD能催化超氧化物阴离子自由基的歧化作用,消除超氧化物阴离子自由基,维持活性氧代谢的平衡,保护膜结构,从而使植物在一定程度上忍耐、减缓或抵抗水分胁迫.研究表明,植物抗性与SOD活性密切相关<sup>[26]</sup>.本研究中随着水淹胁迫时间的持续,灰木莲、乐昌含笑的叶片SOD活性呈逐渐下降的趋势,后者下降幅度大.木麻黄的SOD活性先升高,后下降再微升,这与王义强等<sup>[27]</sup>在银杏*Ginkgo biloba*抗涝的研究结果一致.该结果是幼苗对环境的一种适应反应,使过多的超氧自由基被及时清除,延长了其在水淹环境中的存活时间.

MDA是膜脂过氧化最终产物,是膜系统受损的重要标志之一.MDA的积累越多,表明组织的保护能力越弱.因而抗涝性较强的品种膜脂氧化的程度比抗涝性较弱的品种低.在水涝胁迫下,MDA含量随胁迫强度的增加而上升,变化幅度均以耐涝品种较不耐涝品种为小<sup>[28]</sup>.本研究中水淹胁迫处理后,灰木莲和乐昌含笑的MDA含量均有上升,这与陈永华等<sup>[29]</sup>的研究结果一致.木麻黄的MDA含量总体保持在一个稳定水平,与对照差异不显著,这与安渊等<sup>[30]</sup>的研究结果相同,表明其可能有较强的防止膜脂过氧化作用的能力,耐涝性强.

植物的抗涝性是一个复杂的综合性状,受多种因素影响.3种幼苗中,从叶片的叶绿素、可溶性糖、MDA含量和SOD活性来看,木麻黄的抗涝性最强,从可溶性蛋白含量来看,灰木莲的抗涝性最强.植物的抗涝生理指标间存在相互关系,其重要性也不甚相同,弄清各因素对抗涝性影响的主次关系,对于筛选抗涝性鉴定指标具有重要意义.主成分分析已成功运用于研究幼苗的抗旱生理指标<sup>[31]</sup>和抗寒生理指标<sup>[32]</sup>中.本研究运用主成分分析对3个树种抗涝的5个生理指标进行了综合评定,得出抗涝能力排序为木麻黄>灰木莲>乐昌含笑,可以为这3种树

种造林时提供参考.

参考文献:

- [1] 潘澜,薛晔,薛立. 植物淹水胁迫形态学研究进展[J]. 中国农学通报,2011,27(11):11-15.
- [2] 教忠意,罗祺,张纪林,等. 10个树种耐水淹能力的比较[J]. 江苏林业科技,2007,34(1):15-18.
- [3] 卓仁英,陈益泰. 木本植物抗涝性研究进展[J]. 林业科学研究,2001,14(2):215-222.
- [4] 汤玉喜,刘友全,吴敏,等. 淹水胁迫下美洲黑杨无性系生理生化指标的变化[J]. 中国农学通报,2008,24(8):157-161.
- [5] YE Y, TAM N F Y, Wong Y S, et al. Growth and physiological responses of two mangrove species (*Bruguiera gymnorhiza* and *Kandelia candel*) to waterlogging[J]. Environ Exp Bot, 2003,49:209-221.
- [6] 朱万泽,王金锡,薛建辉. 台湾桉木和四川桉木种源苗木对水分胁迫的生理响应[J]. 西北植物学报,2005,25(10):1969-1975.
- [7] OSUNDINA M A. Nodulation and growth of mycorrhizal *Casuarina equisetifolia* J. R. and G. First in response to flooding[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 26: 95-99.
- [8] 陈由强,叶冰莹,朱锦懋,等. 水分胁迫对木麻黄(*Casuarina* sp.)小枝活性氧伤害的定量分析[J]. 生命科学,2000,14:343-350.
- [9] 叶冰莹,陈由强,朱锦懋,等. 水分胁迫对三种木麻黄小枝活性氧伤害的研究[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2000,16:76-79.
- [10] 何贵平,卓仁英,陈雨春,等. 低温处理对耐寒粗枝木麻黄无性系生理指标的影响[J]. 林业科学研究,2011,24(4):523-526.
- [11] 田如男,薛建辉,李晓储,等. 深山含笑和乐昌含笑的抗寒性测定[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2004,28,(6):55-57.
- [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,2000:119-120.
- [13] 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,2002:31-32,54,119-121.
- [14] 黄少伟,谢维辉. 实用SAS编程与林业试验数据分析[M]. 广州:华南理工大学出版社,2001:171-178.
- [15] 谭淑端,朱明勇,张克荣,等. 植物对水淹胁迫的响应与适应[J]. 生态学杂志,2009,28(9):1871-1877.
- [16] HUANG Bing-ru, JOHNSON J W, NASMITH S, et al. Growth, physiological and anatomical responses of two wheat genotypes to waterlogging and nutrient supply[J]. Journal of Experimental Botany, 1994, 45(2):193-202.
- [17] 王萍,胡永红,王丽勉,等. 观赏植物耐涝性鉴定指标的
- 种类及其评价方法[J]. 北方园艺,2007(11):78-81.
- [18] 姜东,谢祝捷,曹卫星,等. 花后干旱和渍水对冬小麦光合特性和物质运转的影响[J]. 作物学报,2004,30(2):175-182.
- [19] PANDA D, SHARMA S G, SARKAR R K. Chlorophyll fluorescence parameters, CO<sub>2</sub> photosynthetic rate and regeneration capacity as a result of complete submergence and subsequent re-emergence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Aquatic Botany, 2008, 88: 127-133.
- [20] KAWANO N, ITO O, SAKAGAMI J I. Relationship between shoot elongation and dry matter weight during submergence in *Oryza sativa* L. and *O. glaberrima* Steud. rice cultivars [J]. Plant Production Science, 2008, 11: 316-323.
- [21] 陈大清,董登峰,李亚南,等. 小麦抗涝的基因型差异对逆境胁迫的比较生理学效应[J]. 湖北农学院学报,1998,18(4):295-298.
- [22] 刘华山,韩锦峰,孟凡庭,等. 土壤渍涝下芝麻叶片中几个与抗逆能力有关的生理指标的变化[J]. 植物生理学通讯,2001,37(2):106-108.
- [23] 徐锡增,唐罗忠. 渍涝胁迫下杨树内源激素及其它生理反应[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,1999,23(1):1-5.
- [24] 李玉昌,李阳生,李绍清. 淹涝胁迫对水稻生长发育危害与耐淹性机理研究的进展[J]. 中国水稻科学,1998,12(增刊):70-76.
- [25] 曾淑华,赵正雄,覃鹏,等. 淹水对烟草某些生理生化指标的影响[J]. 植物生理学通讯,2005,41(5):603-606.
- [26] 王建华,刘鸿先,徐同. 超氧化物歧化酶(SOD)在植物逆境和衰老生理中的作用[J]. 植物生理学通讯,1989(1):1-7.
- [27] 王义强,谷文众,姚水攀,等. 淹水胁迫下银杏主要生化指标的变化[J]. 中南林学院学报. 2005, 25(4):78-81.
- [28] 董登峰,骆炳山,陈大清. 小麦苗期和孕穗期渍涝的某些生理特性比较研究[J]. 广西农业大学学报,1998,17(4):351-355.
- [29] 陈永华,赵森,严钦泉. 不同淹涝胁迫强度对杂交稻和常规稻农艺性状和生化特性的影响[J]. 中国水稻科学,2006,20(5):512-516.
- [30] 安渊,陈凡毅,王俊,等. 半秋眠和非秋眠紫花苜蓿品种耐涝性能研究[J]. 中国草地,2004,26(4):31-36.
- [31] 冯慧芳,薛立,任向荣,等. 4种阔叶苗木对PEG模拟干旱的生理响应[J]. 生态学报,2011,31(2):371-382.
- [32] 何跃君,薛立,任向荣,等. 低温胁迫对6种幼苗生理特性的影响[J]. 生态学杂志,2008,27(4):524-531.

【责任编辑 李晓卉】