

缺苞箭竹气体交换对 CO₂ 浓度及光照强度的响应

王亚萍¹, 王开运^{1,2*}, 张远彬², 乔匀周²

(1. 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 华东师范大学 资源与环境科学学院, 上海 200062;
2. 中国科学院 成都生物研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 为了了解缺苞箭竹的气体交换对短期 CO₂ 浓度升高的响应, 用 Li-6400 光合测定系统测定了缺苞箭竹叶净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)和叶面饱和水汽压亏缺(V_{pdl})随光照强度的变化。结果表明: 缺苞箭竹 P_n 、 G_s 和 Tr 随光强增强先增大并维持在一定水平然后又呈现下降趋势, 水分利用效率(WUE)随光照强度增强先增大然后维持在一个较高水平, V_{pdl} 呈现先减小后增大的规律; P_n 和 WUE 随 CO₂ 浓度升高先增大然后减小, G_s 和 Tr 随 CO₂ 浓度升高先减小后增大, V_{pdl} 随 CO₂ 浓度升高而增大。随 CO₂ 浓度升高光饱和和光合速率提高 20%~61%, 气孔导度降低 36%~57%, 蒸腾速率降低 30%~53%, 水分利用效率提高 120%~215%, 饱和水汽压亏缺提高 4%~11%。

关键词: CO₂ 浓度升高; 缺苞箭竹; 气体交换; 水分利用效率

中图分类号: S718.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7461(2008)01-0006-04

The Responses of Gas Exchange of Bamboo (*Fargesia denudata*) Leaf on Elevated CO₂ Concentration and Light Intensity

WANG Ya-ping¹, WANG Kai-yun^{1,2}, ZHANG Yuan-bin², QIAO Yun-zhou²

(1. Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, College Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 416, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: To determine bamboo (*Fargesia denudata*) response on short-term elevated CO₂ concentrations under 400, 800, 1 200 and 1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, LI-6400 Portable Photosynthesis System was used to examine the changes of the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (G_s) and vapor deficit at the leaf surface (V_{pdl}) of bamboo (*Fargesia denudata*) leaf with light intensity under different CO₂ concentration. The results showed that with enhanced light intensity, P_n , G_s and Tr increased first and sustained at a high level then decreased, WUE (water use efficiency) increased first and sustained at a high and WUE increased first and then decreased, G_s and Tr decreased first and then increased and V_{pdl} increased. Under elevated CO₂, the light saturation photosynthetic rate increased by 20%~61%, G_s and Tr decreased by 36%~57% and 30%~53% separately, WUE increased by 120%~215%, while V_{pdl} increased by 4%~11%.

Key words: elevated CO₂ concentrations; bamboo (*Fargesia denudata*); gas exchange; water use efficiency

大气中 CO₂ 浓度的升高是当前全球关注的焦点问题, 由于矿物燃料的燃烧和人类活动使大气中 CO₂ 浓度以每年 1~2 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 的速度递增, 预计到 21 世纪末, 大气 CO₂ 浓度将达到目前的 2 倍^[1]。大气中 CO₂ 浓度的迅速增加, 不但会引起全球变暖

和气候变化, 而且会对植物, 特别是构成陆地生态系统主体的树木产生最直接的影响。在全球气候变化研究中, 光合作用^[2,3]、气孔导度、蒸腾作用及水分利用效率等植物气体交换参数指标对 CO₂ 浓度升高的响应是植物生理生态学研究的重要内容^[4,5]。

收稿日期: 2007-03-29 修回日期: 2007-06-19

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(90202010); 中芬国际合作项目(30211130504); 中国科学院“百人计划”项目(01200108B); 国家自然科学基金项目(30471378)。

作者简介: 王亚萍(1983-)女, 山西榆次人, 硕士, 主要研究方向植物生态学, 全球变化生态学。

* 通讯作者: 王开运; Email: wangky@cib.ac.cn

缺苞箭竹(*Fargesia*)是我国国宝大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)的主食竹^[6],也是亚高山针叶林下层最重要的优势种群,在亚高山生态系统中的水源涵养、水土保持、养分平衡等生态功能发挥中具有重要的作用^[7]。始于20世纪70年代的岷江山系、邛崃山系的两次大面积箭竹开花死亡,导致大熊猫缺血危机,其种群分布范围和数量急剧减少^[8]。因此,箭竹生态学效应一方面是亚高山恢复生态学研究的重点之一,另一方面又是当前大熊猫保护生物学研究的一个重要领域,但国内未见对缺苞箭竹在高浓度 CO₂ 下光合响应特性的研究。本文通过在 CO₂ 浓度升高条件下研究缺苞箭竹光合参数的变化,试图揭示缺苞箭竹对 CO₂ 浓度升高的响应机制,为预测未来大气 CO₂ 浓度升高对缺苞箭竹的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验区自然概况

实验区位于中国科学院成都生物研究所茂县生态站(31°41′07″N, 103°53′58″E, 海拔1 816 m)。该站位于四川省阿坝藏族羌族自治州茂县大沟流域,属青藏高原东缘横断山系北段高山峡谷地带的长江重要支流岷江上游中部,在中国大地形中处于一级阶梯向二级阶梯的过渡地带,是青藏高原东缘和长江上游生态环境十分脆弱的高山峡谷区的典型代表。该地区属暖温带气候类型,年均温 8.6℃,年均降水量 919.5 mm,年均蒸发量 795.8 mm。年均日

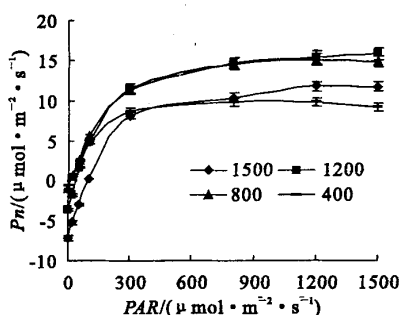
照时数 1 139.8 h,年无霜期 200 d 左右。该区域地形相对高差最高达 3 000 m 以上,植被和气候垂直带谱明显,为我国山地环境变化的敏感区^[9],也是我国乃至世界的一个独特山地类型区,是研究森林恢复重建与生物多样性保育的重要区域。

1.2 研究方法

在2006年8月上旬选取3株生长正常无病虫害的缺苞箭竹为试验材料,利用美国拉哥公司(LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA)生产的 LI-6400 便携式光合作用测定系统对缺苞箭竹生长主枝上第三或四片叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i) 和叶面饱和水汽压亏缺(V_{pdl}) 进行测定,测量光合作用的叶室配备红、蓝人工光源(LED Light Source) 及 CO₂ 注射器(CO₂ injector)。光照强度梯度设置为:1 500, 1 200, 800, 300, 100, 50, 20, 0 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 共 8 个水平,分别在 CO₂ 浓度为 1 500, 1 200, 800, 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 下进行测定。在数据采集前对叶片进行 20 min 左右的适应,测定过程中环境条件变化幅度如下:叶温 $25 \pm 1^\circ\text{C}$, 空气相对湿度 50%~60%。水分利用效率(WUE) = P_n / T_r 。数据分析与绘图采用 Excel, SPSS 软件完成。

2 结果与分析

2.1 净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)在不同 CO₂ 浓度下随光照强度的变化



1500, 1200, 800, 400 为 CO₂ 浓度,下同

图1 P_n 在不同 CO₂ 浓度下随 PAR 的变化

Fig. 1 The variation of net photosynthetic(P_n) with enhanced light intensity under different CO₂ levels

图1是4个 CO₂ 浓度水平上缺苞箭竹的光合—光响应曲线。在4个 CO₂ 浓度下,箭竹叶片 P_n 在光强为 0~300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时快速增大,之后增长缓慢并维持在一个较高的水平。在各光照强度下, P_n 随 CO₂ 浓度的升高不断增大,CO₂ 浓度为 1 200 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 时 P_n 值达到最大,为 15.75 μmol 万方数据

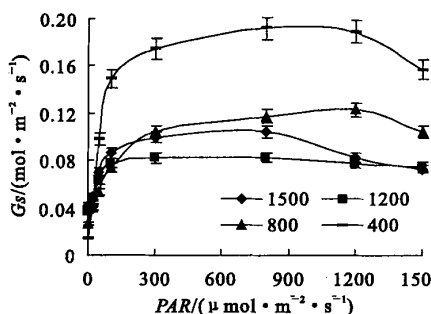


图2 G_s 在不同 CO₂ 浓度下随 PAR 的变化

Fig. 2 The variation of stomatal conductance (G_s) with enhanced light intensity under different CO₂ levels

$\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,当 CO₂ 浓度升高到 1 500 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 时 P_n 值降低到 11.65 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,降幅为 26%。一定范围内 CO₂ 浓度升高对光合作用有一定程度的促进作用,超过 CO₂ 饱和点之后,继续升高 CO₂ 浓度对光合作用的影响不大,相反环境 CO₂ 浓度升高使 P_n 急速下降,主要是由于环境 CO₂ 浓度高于饱和

点后气孔导度的下降造成的。

缺苞箭竹气孔导度(G_s)在不同 CO_2 浓度下随光照强度的变化规律如图 2。在 4 个 CO_2 水平上,缺苞箭竹气孔导度(G_s)在光强为 $0 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时随 PAR 升高迅速增大,在 $100 \sim 1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内缓慢上升,最大值为 $0.19 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,随着光强增大到 $1\,500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 气孔导度均有不同程度下降,最大降幅可达 18%。气孔是植物进行 CO_2 和水汽交换的主要通道, PAR 升高导致 P_n 增大,对 CO_2 消耗量也增大,植物通过调节气孔来增大 G_s ,从而增加外界 CO_2 向叶细胞扩散,使 G_s 随光照强度增强而增大,但在达到光饱和后,光照强度的继续增强会导致叶温过高,蒸腾失水过多,植物叶片通过调节气孔开闭程度减少水分散失,从而使得 G_s 随 PAR 增强而又减小。在各光照强度下, G_s 在 CO_2 从 400 增大到 $1\,200 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 范围内随 CO_2 浓度升高而减小,当 CO_2 浓度增加到 $1\,500 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 过程中 G_s 又略有增大。大气中 CO_2 浓度的升高,导致细胞间 CO_2 浓度(C_i)的增加,植物为保持胞间 CO_2 分压始终低于大气 CO_2 分压(20%~30%),必须调节气孔开闭程度,进而减少 C_i [10,11]。气孔对 C_i 很敏感, C_i 的增加常伴随着气孔的关闭和气孔导度降低 [12,13]。

2.2 蒸腾速率(T_r)在不同 CO_2 浓度下随光照强度的变化

缺苞箭竹蒸腾速率(T_r)在不同 CO_2 浓度下随光照强度的变化规律如图 3。在 4 个 CO_2 浓度下,箭竹叶片的 T_r 在 $0 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 随 PAR 的升高先迅速上升,然后缓慢上升,在 CO_2 浓度为 400

$\mu\text{mol}/\text{mol}$ 光强为 $1\,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 T_r 达到最大值为 $2.63 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在 PAR 增加到 $1\,500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 过程中又略有下降,最大降幅为 11%。在各光照强度下, T_r 随着 CO_2 浓度升高基本呈现先减小后略有增大的变化规律。

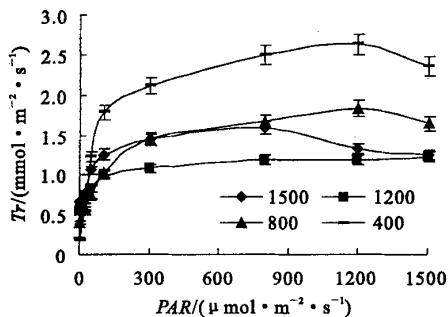


图 3 T_r 在不同 CO_2 浓度下随 PAR 的变化

Fig. 3 The variation of transpiration rate (T_r) with enhanced light intensity under different CO_2 levels

在 CO_2 浓度从低浓度上升到高浓度的过程中植物的光合作用增强,为增强对 CO_2 的利用效率,植物调节使气孔张开程度增大,水分由植物内向外排放的阻力减小,增腾速率升高;随着光合作用增强保卫细胞内光合产物多碳糖浓度随之提高,细胞水势增加,这样保卫细胞吸水膨胀,从而使气孔关闭。并且光强高于光饱和点时植物为了避免叶温过高蒸腾失水过多也会调节关闭气孔。由于气孔关闭,水分由植物内向外排放的阻力增大,从而使蒸腾速率降低。

2.3 水分利用效率和叶面饱和水汽压亏缺在不同 CO_2 浓度下随光照强度的变化

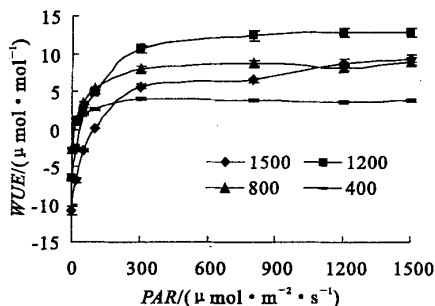


图 4 WUE 在不同 CO_2 浓度下随 PAR 的变化

Fig. 4 The variation of water use efficiency (WUE) with enhanced light intensity under different CO_2 levels

缺苞箭竹水分利用效率(WUE)在不同 CO_2 浓度下随光照强度的变化规律如图 4。在 4 个 CO_2 水平上,箭竹叶片 WUE 在 PAR 在 $0 \sim 300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内随 PAR 的升高先迅速上升,然后缓慢上升,最后维持在一个较高的水平,各 CO_2 浓度下

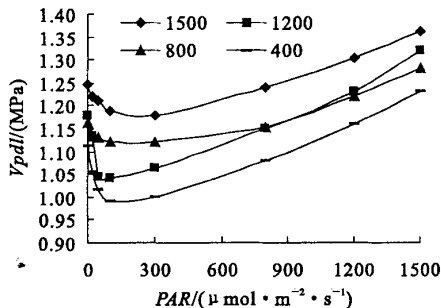


图 5 V_{pd} 在不同 CO_2 浓度下随 PAR 的变化

Fig. 5 The variation of vapor deficit at the leaf surface (V_{pd}) with enhanced light intensity under different CO_2 levels

度下的最大值分别为 4.1, 9.0, 10.9 和 9.4 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,最大增幅为 215%。在各光照强度下 WUE 随着 CO_2 浓度升高呈先增大后减小的变化规律,在 CO_2 浓度低于 $1\,200 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 时, WUE 随 CO_2 浓度升高而增大,当 CO_2 浓度升高到大于 $1\,200 \mu\text{mol}/\text{mol}$

mol 时, WUE 下降到 CO₂ 为 800 $\mu\text{mol/mol}$ 时的水平。以 CO₂ 为 1 200 和 1 500 $\mu\text{mol/mol}$ 时作为例子来说明, CO₂ 浓度在 1 200 $\mu\text{mol/mol}$ 时 Pn 明显大于 CO₂ 浓度为 1 500 $\mu\text{mol/mol}$ 时的 Pn , 而 CO₂ 浓度在 1 200 $\mu\text{mol/mol}$ 时的 Tr 明显小于 CO₂ 浓度为 1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时的 Tr , 从而使得 Pn 与 Tr 的比值 WUE 随 CO₂ 浓度升高而呈现先增大后减小的变化趋势。

缺苞箭竹叶面饱和水汽压亏缺 (V_{pdl}) 在不同 CO₂ 浓度下随光照强度的变化规律 (图 5)。在 4 个 CO₂ 水平上, 箭竹叶片 V_{pdl} 随 PAR 的升高先减小, 在光强为 100 $\mu\text{mol/mol}$ 时达到最小值为 0.98 MPa, 然后以较大速率上升, 最后维持在一个较高的水平, 最大值达到 1.36 MPa。在各光照强度下缺苞箭竹叶 V_{pdl} 随着 CO₂ 浓度升高基本呈现逐渐增大的规律。 V_{pdl} 受叶面环境水蒸气压变动的影响, 与植物叶片蒸腾失水密切相关, 由于外界环境 CO₂ 浓度升高导致 $Cond$ 减小, Tr 减小, 叶片蒸腾失水减少, 周围环境水蒸气压减小, 叶细胞到大气的饱和水汽压亏缺逐渐增大, 因此 V_{pdl} 随 CO₂ 浓度升高而增大。

3 结论与讨论

对缺苞箭竹气体交换对 CO₂ 浓度及光照强度的响应的研究表明, CO₂ 浓度升高可以促进缺苞箭竹光合作用, 光饱和和光合速率和水分利用效率明显增强, 气孔导度和蒸腾速率有较大幅度降低。

植物光合作用的光抑制是普遍存在的现象, 光抑制的最明显特征是光合效率的降低。在光抑制的过程中, 强光是引起光抑制的主要因子。对缺苞箭竹的研究表明在各 CO₂ 浓度下高光强时都出现了不同程度的光抑制, 其中 CO₂ 为 400 $\mu\text{mol/mol}$ 时的光抑制较为明显。CO₂ 浓度升高使光饱和点提高延缓光抑制的发生, 这与张小全等^[14]的研究结果是一致的。本研究结果表明: 高 CO₂ 浓度可以增加叶片的净光合速率, 其原因有两个: 第一, 普通空气条件下 CO₂ 浓度对 Rubisco 是不饱和的, 第二: CO₂ 浓度升高提高了 Rubisco 的活性。但这只是缺苞箭竹对短期高 CO₂ 浓度的响应, 对于是否会出现光合适应或下调现象将在后续实验中进一步研究。

气孔是植物进行 CO₂ 和水汽交换的主要通道, 而 G_s 则是反映对两者交换能力的一个极其重要的生理指标, 所以 CO₂ 浓度增加对 G_s 的影响就显得非常重要^[15]。从结果分析可知, 缺苞箭竹 G_s 随着 CO₂ 浓度升高先减小而后逐渐上升。就现在的研究

结果看, CO₂ 浓度升高引起 G_s 减小的原因有以下两个: 一是气孔密度降低所引起^[16], 二是植物叶内部 CO₂ 增加直接引起气孔的部分关闭^[17]。本研究是在短期高 CO₂ 浓度作用下测得, 所以气孔的部分关闭是 G_s 降低的主要原因。

光强和 CO₂ 浓度是影响植物光合生理的两个重要因子, 绝大多数研究认为光强和 CO₂ 浓度升高都可以促进光合作用, 但本研究结果表明, 过高的光强和 CO₂ 浓度都将抑制植物的光合作用, 其原因有待进一步研究。此外目前还不能预测到 CO₂ 在本世纪末加倍后还会继续上升到什么样的程度, 因此开展长期的 CO₂ 浓度升高实验具有更加重要。

参考文献:

- [1] Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M, et al. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980 [J]. *Nature*, 1995, 375: 660-670.
- [2] Szarek S R, Holthe P A, Ting I P. Minor physiological response to elevated CO₂ by the CAM plant *Agave cylindrica* [J]. *Plant Physiol*, 1987, 83: 938-940.
- [3] Wong S C. Elevated atmospheric partial pressure of CO₂ and plant growth I. Interactions of nitrogen nutrition and photosynthetic capacity in C3 and C4 plants [J]. *Oecologia*, 1979, 44: 68-74.
- [4] Idso K E, Idso S B. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment in the face of environmental constraints: A review of the past 10 years research [J]. *Agric For Meteorol*, 1994, 69: 153-203.
- [5] Murray D R. Plant responses to carbon dioxide [J]. *Am J Bot*, 1995, 82: 690-697.
- [6] 胡锦涛. 大熊猫生物学研究与进展 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1990. 288-289.
- [7] 刘庆, 吴宁, 陈庆恒. 亚高山退化针叶林生态系统的非平衡性探讨及其研究动态 [J]. *世界科技研究与发展*, 2000, 22 (增刊): 58-63.
- [8] 冯文和. 大熊猫研究论文集 [C]. 四川大学学报, 1991, (专辑) 7-13.
- [9] 肖玲, 王开运, 杨万勤. 升高 CO₂ 浓度和温度对针叶林的影响以及在川西亚高山针叶林研究中的展望 [J]. *世界科技研究与发展*, 2004, 26 (2): 55-63.
- [10] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1982, 33: 317-345.
- [11] Berry J A, Downton W J S. Environmental of photosynthesis [A]. In: Govindjee T J ed., *photosynthesis*, Vol II. Development, Carbon Metabolism, and Plant Productivity [C]. New York: Academic Press, 1992. 263-343.
- [12] Long S P, Drake B G. photosynthetic CO₂ assimilation and rising atmospheric CO₂ concentrations [A]. In: Baker N R, Thomas Heds., *Crop Photosynthesis: Spatial and Temporal Determinant* [C]. New York: Elsevier Science Publishers BV, 1992. 63-103.

(下转第 13 页)

伤害已非常明显。反映了油松在干旱下对生物自由基的清除,维持膜系统稳定性方面相比樟子松及食松有一定的差距。进一步的干旱胁迫将会导致伤害加深,最终造成苗木死亡。

3.2 应用隶属函数值法,三树种基于以上7项指标的抗旱性综合排序为樟子松>食松>油松。但从7项指标的隶属函数平均值来看,食松和樟子松抗旱性基本处于同一水平,因此在樟子松适生的毛乌素沙区,尽管干旱缺水,仍有着良好的生长表现。与油松相比,食松抗旱性明显强大的多,因此在油松的适生分布区,水分条件相对较好,使食松更具有了生长发展空间。综合来看,在以水分为主要限制因子的干旱半干旱区,食松有着广泛的适生范围,陕西境内的毛乌素沙区、黄土高原丘陵沟壑区及渭北旱塬区均具有发展前景。

参考文献:

- [1] 韩恩贤,韩刚,武建超. 黄土高原引进美国可食松可行性分析[J]. 陕西林业科技, 2002(4): 7-9.
- [2] 吴中伦. 国外树种引种概论[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 89-91.
- [3] 彭少兵,王德祥,彭禹磊. 用正交设计优化四翅椴的育苗方法[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(2): 85-87.
- [4] 施积炎,丁贵杰,袁小凤. 不同家系马尾松苗木水分参数的研究[J]. 林业科学, 2004, 40(3): 51-55.
- [5] 周广生,周竹青,朱旭彤. 用隶属函数法评价小麦的耐湿性[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(4): 34-37.
- [6] 郭连声,田友亮. 八种针阔叶幼树清晨叶水势与土壤含水量关系及其抗旱性研究[J]. 生态学杂志, 1992, 11(2): 4-7.
- [7] 谢寅峰,沈惠娟,罗爱珍,等. 南方七个造林树种幼苗抗旱生理指标的比较[J]. 南京林业大学学报, 1999, 23(4): 13-16.
- [8] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 1-3.
- [9] 李雪华,蒋德明,范士香,等. 科尔沁沙地4种植物抗旱性的比较研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1385-1388.
- [10] 裴保华,陈绍光. 741 杨耐旱性的研究[J]. 河北林学院学报, 1994, 9(4): 282-287.
- [11] 杨敏生,秦安臣,丛金山. 白杨双交无性系抗旱性鉴定研究[J]. 河北农业大学学报, 1997, 20(1): 17-23.
- [12] 韩蕊莲,梁宗锁,邹厚远. 四个树种在干旱下的生理适应性研究[J]. 西北林学院学报, 1991, 6(4): 23-28.
- [13] 杨文斌. 干旱区几种树木的蒸腾速率及其与环境的比较[J]. 干旱区研究, 1988, 5(4): 47-55.
- [14] 王爱国,罗广华. 羟自由基启动下的脱氧核糖降解及其产物的TBA反应[J]. 生物化学与生物物理进展, 1993(20): 150-152.
- [15] 蒋进,高海峰. 桉柳属植物抗旱性排序研究[J]. 干旱区研究, 1992, 9(4): 41-44.
- [16] Dong J G, Olson D Silverstone A, Yang SF. Sequence of a Cdna coding for a 1-aminocyclopropan-1-carboxylate oxidase homolog from apple fruit[J]. Plant Physiol, 1982, 98: 1530-1531.
- [17] Mott K A. Sensing of atmospheric CO₂ by plants [J]. Plant, Cell Environm, 1990, (13): 731-737.
- [18] 张小全,徐德应,赵茂盛,等. CO₂增长对杉木中龄林针叶光合生理生态的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 390-396.
- [19] 龚伟,宫渊波,胡庭兴,等. CO₂浓度升高对湿地松针叶蒸腾特性和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 178-182.
- [20] Berryman C A. Stomatal responses to a range of variables in two tropical tree species grown with CO₂ enrichment [J]. J. Exp. Bot., 1994, 45: 539-546.
- [21] Morison J I L, Gifford R M. Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity[J]. Plant Physiol, 1983, 71: 789-796.

(上接第9页)

- [13] Mott K A. Sensing of atmospheric CO₂ by plants [J]. Plant, Cell Environm, 1990, (13): 731-737.
- [14] 张小全,徐德应,赵茂盛,等. CO₂增长对杉木中龄林针叶光合生理生态的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 390-396.
- [15] 龚伟,宫渊波,胡庭兴,等. CO₂浓度升高对湿地松针叶蒸腾