

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

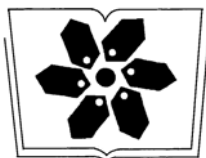
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 **2014**

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 34 卷 第 6 期 2014 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松峰,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO₂ 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 郭军庭,张志强,王盛萍,等 (1559)

长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力,尹云鹤,赵东升,等 (1568)

石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英,李月丛,吕素青,等 (1575)

不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞,辛晓平,王 旭,等 (1587)

南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕,李玉环,李增兵,等 (1596)

资源与产业生态

跨国土地利用及其生态影响 陆小璇 (1606)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说: 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境,发源于长白山东南部的石乙水,河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河,下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河,并由这里流入日本海,我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一,随着我国经济的迅速崛起,图们江地区进入到多国合作联合开发阶段,湿地生态系统处于中度预警状态,并有向重度预警发展的趋势,生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究,可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201210231473

邱权, 潘昕, 李吉跃, 何茜, 苏艳, 林雯. 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率. 生态学报, 2014, 34(6): 1401-1410.

Qiu Q, Pan X, Li J Y, He Q, Su Y, Lin W. Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1401-1410.

速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率

邱 权, 潘 昕, 李吉跃*, 何 茜, 苏 艳, 林 雯

(华南农业大学林学院, 广州 510642)

摘要:速生树种尾巨桉和竹柳因其水分消耗和利用问题引起了一些争议,因而受到了广泛的关注,由于尚缺乏科学的观测数据,而其中许多指责或支持也尚无定论,因此必须深入研究此 2 种树种耗水性能和水分利用效率,以期科学评价其水分消耗和利用性能。采用盆栽苗木称重法和 Li-6400 光合系统测定方法分别测定尾巨桉 (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*) 和竹柳 (*Salix* sp.) 苗木在不同土壤水分条件下耗水量、耗水速率和苗木不同生长期叶片净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (Tr) 和水分利用效率 (WUE), 研究表明: (1) 正常水分条件下, 尾巨桉和竹柳日总耗水量和最大耗水速率分别为 $(182.05 \pm 12.74) \text{ g/d}$ 、 $(100.48 \pm 10.95) \text{ g/d}$ 和 $(66.31 \pm 9.91) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(89.50 \pm 13.54) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 土壤水分条件下降时, 2 种苗木耗水量和耗水速率均呈显著下降趋势, 严重干旱胁迫时尾巨桉降幅更大。 (2) 正常水分条件和轻度水分胁迫下 2 种苗木耗水速率日变化趋势均为明显“单峰”曲线, 且峰值均出现在 12:00—14:00, 中度干旱胁迫时则其变化趋势呈“双峰”曲线, 峰值分别在 10:00—12:00 和 14:00—16:00 出现, 严重干旱胁迫时日变化规律不明显。 (3) 正常水分条件和轻度水分胁迫下 2 种苗木耗水速率与环境温度显著正相关, 与相对湿度显著负相关, 随着干旱胁迫的发展, 环境因子对耗水速率的影响有所减弱。 (4) 叶片水平来看, 与尾巨桉相比, 竹柳具有高光合、低蒸腾、高水分利用效率的特点, 2 种苗木由生长初期进入生长旺期时, 净光合速率和蒸腾速率均发生相同幅度增加, 而水分利用效率基本保持不变。 (5) 从单株耗水量和耗水速率以及叶片水分利用效率综合来看, 竹柳属节水性能较好速生树种, 而尾巨桉虽然存在叶片水平高蒸腾和低水分利用效率的情况, 但从单株苗木水平上来讲, 其耗水速率甚至低于竹柳, 特别在土壤水分严重亏缺情况下其白天平均耗水速率仅为 $(4.02 \pm 0.60) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 也表现出了一定的抗旱节水能力。

关键词:尾巨桉; 竹柳; 耗水量; 耗水速率; 水分利用效率

Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow seedlings

QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue*, HE Qian, SU Yan, LIN Wen

College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract: *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow have attracted wide concerns due to the debates on their water consumption (WC) and utilization efficiency problems. Insufficiency of scientific observation data and consequent uncertainty of the rationality of blame or support on the two trees' development make it a necessity to further study their WC characteristics and water use efficiency (WUE). In this study, WC and water consumption rate (WCR) of *E. urophylla* × *E. grandis* and bamboo-willow seedlings under different soil moisture conditions were measured by pot seedling weight method, and net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr) and WUE of them in different growth periods were investigated by Li-6400 photosynthetic system measuring method. Under normal water condition, day-and-night WC and maximum WCR of *E. urophylla* × *E. grandis* and bamboo-willow seedlings were $(182.05 \pm 12.74) \text{ g/d}$, $(100.48 \pm 10.95) \text{ g/d}$, $(66.31 \pm 9.91) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ and $(89.50 \pm 13.54) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, respectively. Water consumption and WCR of the

基金项目: 广东省科技计划项目 (2010B020303006)

收稿日期: 2012-10-23; 修订日期: 2013-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljyymy@vip.sina.com

seedlings significantly declined with soil moisture decreases, with those of *E. urophylla* × *E. grandis* declining more sharply than bamboo-willow under serious drought stress. The daily variation of WCR exhibited a one-peak curve (the peak appearing at 12:00—14:00) under normal water condition and light drought stress, but changed to a double-peak curve (the peaks appearing at 10:00—12:00 and 14:00—16:00, respectively) under moderate drought stress, and showed no regular pattern under serious drought stress. Under normal water condition and light drought stress, a significant positive correlation and a significant negative correlation were observed between WCR and environmental temperature and between WCR and relative humidity, respectively. The influence of environmental factors on WCR weakened along with the development of drought stress. At leaf level, bamboo-willow had higher photosynthetic rate and WUE, and lower transpiration rate than *E. urophylla* × *E. grandis*. In initial through vigorous growth period, net photosynthetic rate and transpiration rate of both seedlings increased at similar amplitude, while their WUE remained unchanged. In terms of WC and WCR of individual seedling and leaf WUE, bamboo-willow was a good water-saving fast-growing tree species. *E. urophylla* × *E. grandis* had higher leaf transpiration rate and lower WUE at leaf level, but had lower WCR at individual seedling level than bamboo-willow, which was particularly true when under serious drought stress, with its average daytime WCR being only $(4.02 \pm 0.60) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Therefore, *E. urophylla* × *E. grandis* seedlings also showed a certain ability of drought resistance and water-saving.

Key Words: *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*; bamboo-willow; water consumption; water consumption rate; water use efficiency

近年来,关于速生树种经营而产生的系列生态问题受到了极大地关注,尤其对于水资源消耗问题关注较多。其中,桉树经常被指责消耗大量水导致水资源减少,部分专家学者认为桉树是“抽水机”,会减少流域产流量和地下水补给,破坏区域水资源平衡^[1-2],也有专家持反对意见,认为桉树“有害论”被过分夸大^[3-4],但均缺乏科学数据支持,所以一直存在争议。尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*)是尾叶桉(*E. urophylla*)和巨桉(*E. grandis*)杂交种,作为华南地区常见的桉树品种,得到的关注较多。竹柳又称美国竹柳,为杨柳科(*Salicaceae*)柳属(*Salix*)乔木植物,美国寒竹、朝鲜柳、筐柳组合杂交选育的优良杂交品系,生长快、耐盐碱、耐水淹、材质优良、干形优美,作为近几年从美国引入国内栽种新兴起速生树种,很快受到了普遍关注^[5-6],而对于其水分消耗和利用问题相关研究未见报道。对单株树木耗水量的精确计算一直是蒸腾耗水方面相关研究的关键内容。国内外关于单株树木蒸腾耗水的研究方法主要包括整树容器法^[7-9]、盆栽称重法^[10-12]、称重式蒸渗仪法^[13]、非称量测渗仪法^[14]、茎流计法以及热脉冲、热平衡和热扩散等树干液流测定方法。植物水分利用效率是植物本身性能一种测量,已经成为研究植物水分利用问题的热点,而其中叶片水

平水分利用效率相关研究最多^[15]。国内很多学者已经针对速生树种如毛白杨^[16](*Populus tomentosa*)、楸树^[17](*Catalpa bungei*)进行了耗水特性和水分利用效率的研究。在最新报道中,胡红玲等^[18]通过将巨桉(*Eucalyptus grandis*)与其他木本植物对比进行了耗水特性和水分利用效率综合研究,但对于其它桉树品种此方面研究鲜见报道。因此,开展尾巨桉和竹柳两种速生树种苗木水分消耗和利用问题相关研究很有必要。

本文选择尾巨桉和竹柳两种速生树种幼苗为研究材料,采用盆栽苗木称重法和 Li-6400 光合系统测定方法分别测定两种树种在不同土壤水分条件下耗水生理指标(耗水量、耗水速率)和苗木生长初期(6月)和旺期(8月)叶片水分利用效率,分析、评价其不同土壤水分条件下水分消耗特点和节水能力差异以及苗木在生长期水分利用规律,为正确评价此两种速生树种水分消耗和利用特点提供理论支持,并为科学审视速生树种人工林水资源消费问题提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择常见桉树品系尾巨桉(广林-9号)无性系 1

年生组培苗和竹柳 1 年生扦插苗,2011 年 4 月初于华南农业大学林学院大棚内将所有供试材料上盆,每盆 1 株。所用花盆规格为 200 mm×150 mm,基质土壤取自华南农业大学树木园,其田间持水量为

(26.87±2.07)%,容重为(1.34±0.07)g/cm³。注意定期浇水,除草,防病虫害,保证苗木正常生长。实验测定开始时苗木基本情况见表 1。

表 1 苗木生长情况
Table 1 Growth status for seedlings

树种 Tree species	苗高/m Height	地径/mm Basal diameter	单株叶面积/cm ² Leaf area per plant
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	0.40±0.03	3.92±0.65	2844.09±305.32
竹柳 Bamboo-willow	0.45±0.07	9.10±2.12	1254.08±202.26

1.2 研究方法

1.2.1 耗水特性测定

本次研究中耗水量测定方法为盆栽苗木称重法。2011 年 7 月 1 日,每种选择 30 株生长正常、长势接近的苗木,对所有供试苗木浇透水后,停止浇水进行自然干旱处理,即用保鲜膜进行覆盖密封盆栽土壤,同时将苗盆用塑料袋完全套住(从苗木根茎处覆盖整个表面,并密封花盆底部),以防止土壤的水分的蒸发影响苗木蒸腾耗水的研究。每种苗木固定 6 盆,自覆膜套盆时起选择 3 个连续的典型晴天,前 2 d 于 08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00 和 20:00 分别用 SP-30 电子天平(美国)称盆重 1 次,第 3 天上午 08:00 称盆重 1 次,注意每次称盆过程控制在 10 min 以内,避免时间过长造成误差,并且采用便携式手持气象站记录每次称盆时的环境温、湿度,每次 5 个重复。保持盆栽覆膜密封良好,防止外部水源进入。每隔 2 d 选择典型的晴天,每间隔 2 h 对覆膜供试苗木从 08:00—20:00 进行称重,并于翌日 08:00 进行盆重测定,同时监测环境温、湿度。土壤含水量采用 FOM/mts 便携式土壤湿度计进行连续监测,即封盆后每种苗木固定 5 盆,与耗水测定同步,每间隔 2 d 于 18:00 测定盆栽苗木的土壤体积含水量,根据容重换算成土壤质量含水量。测定持续 30 d,直至苗木枯萎死亡。

(1) 耗水量

用 SP-30 电子天平(美国)于试验要求的时间点对供试苗木进行盆重测定,然后根据称量结果分别计算出全天耗水量(当日 08:00—翌日 08:00)、白天耗水量(当日 08:00—20:00)、夜晚耗水量(当日 20:00—翌日 08:00)。

(2) 单株叶面积

将叶片分级,每级记录叶片数量,并找出各级典型叶片计算出叶面积,以分级叶片数×叶面积再相加之总和得到单株叶面积。

(3) 耗水速率

根据盆重称量结果分别计算出白天、夜晚以及白天每个时间段(2 h)的耗水量,并用公式:耗水速率=每个时间段的耗水量/(单株叶面积×时间)计算出对应的耗水速率。

(4) 土壤水分条件设置

本研究中,封盆后 0—3d 视为土壤处在正常水分条件(此期间土壤质量含水量约占田间持水量 80%—85%),而当土壤质量含水量下降至田间持水量 65%、55%、30%则分别对应为轻度干旱(LD)、中度干旱(MD)、严重干旱(SD)。

1.2.2 叶片水分利用效率测定

分别选择苗木生长初期(6 月)和生长旺盛时期(8 月)进行苗木叶片水分利用效率测定。于 2011 年 6 月中旬和 8 月中旬,用 Li-6400 便携式光合作用分析系统(美国)分别选择 3 个典型晴天于 09:00—11:30 测定苗木叶片净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r),每种苗木选择 3 株,每株测定 3 片功能叶,其中测定过程中采用人工叶室,使用 LI-6400-2B 红蓝光源,光强设置为 1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,温度 35℃,CO₂ 浓度 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

水分利用效率:

$$\text{WUE} = \text{净光合速率 } P_n / \text{蒸腾速率 } T_r$$

计算出苗木叶片瞬时水分利用效率。

1.3 数据分析

采用 Excel 2007 进行作图,SPSS 19.0 对实验数据进行 ANOVA 方差分析、多重比较(Duncans 法)和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 耗水特性的比较

2.1.1 耗水量的比较

植物耗水主要包括自身蒸腾和土壤蒸发两部分,本研究中供试苗木土壤均经过覆膜密封处理,因此苗木自身的蒸腾耗水是其向外界失水的唯一途径。由表 2 可以看出,不同土壤水分条件下,两种苗木日总耗水量和昼夜耗水量均存在一定差异,总体上来讲,随着干旱胁迫的发展,两种苗木耗水量均呈下降趋势,但降幅有所不同。从表 2 中可以明显看出,正常水分条件下和轻度干旱胁迫条件下,尾巨桉苗木日总耗水量和昼夜耗水量都显著高于竹柳($P < 0.05$)。中度水分胁迫时,两种苗木日总耗水量和昼夜耗水量出现大幅度下降,与正常水分条件相比,尾巨桉和竹柳日总耗水量分别下降了 74.61% 和 59.71%,由于尾巨桉降幅更大,表 2 中显示中度干

旱胁迫下两树种耗水量数值比较接近,由此可见尾巨桉在中度水分胁迫下通过大幅降低耗水量来减少对水分的消耗。当苗木处于严重水分胁迫时期,尾巨桉的日总耗水量和昼夜耗水量低于竹柳,其中全天耗水量仅为 15.97g,说明尾巨桉在土壤水分亏缺时期表现出了比竹柳更优的节水能力。另一方面,不同干旱时期两种苗木全天耗水量中白天耗水量占 90% 左右,可见两种苗木的耗水主要来自于白天,因此,对于苗木白天耗水的耗水规律可以作为研究的主要内容。总体上来讲,随着干旱胁迫的发展,尾巨桉和竹柳苗木耗水量的变化趋势为总体下降,但下降幅度存在明显差异,可从耗水量方面看出两种苗木在不同土壤水分条件下的节水能力差异。因此,在进行苗木耗水特性比较时,苗木耗水量可以作为一个很重要的评价指标,其中苗木白天详细耗水规律可以作为研究的重点。

表 2 不同水分条件下苗木耗水量($\pm$ 标准误差)/g

Table 2 Water consumption ($\pm$ standard error) of seedlings under different soil moisture conditions

树种 Tree species	CK			LD			MD			SD		
	白天 Day	夜晚 Night	全天 Day and night	白天 Day	夜晚 Night	全天 Day and night	白天 Day	夜晚 Night	全天 Day and night	白天 Day	夜晚 Night	全天 Day and night
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	162.07 $\pm$ 10.72	19.98 $\pm$ 2.02	182.05 $\pm$ 12.74	149.85 $\pm$ 15.62	17.03 $\pm$ 4.15	166.88 $\pm$ 20.15	40.74 $\pm$ 5.46	5.48 $\pm$ 1.01	46.22 $\pm$ 6.47	13.53 $\pm$ 2.01	2.43 $\pm$ 0.51	15.97 $\pm$ 3.05
竹柳 Bamboo-willow	88.78 $\pm$ 8.07	11.70 $\pm$ 2.88	100.48 $\pm$ 10.95	61.20 $\pm$ 8.15	11.40 $\pm$ 3.02	72.60 $\pm$ 9.07	35.08 $\pm$ 5.30	5.40 $\pm$ 1.02	40.48 $\pm$ 6.32	19.10 $\pm$ 3.58	2.48 $\pm$ 0.52	21.58 $\pm$ 4.05

LD: 轻度干旱 Light dry; MD: 中度干旱 Middle dry; SD: 严重干旱 Serious dry

2.1.2 耗水速率日变化

蒸腾耗水量能一定程度表现不同树种之间耗水差异,但苗木耗水量并不能完全表明其耗水能力和节水能力的强弱,要比较不同树种的耗水和节水性能,还必须考虑苗木的叶面积,即以苗木的耗水速率来进行分析比较,因为苗木的耗水速率是由耗水量和苗木叶面积共同决定的。图 1 可以看出,当土壤处于正常水分条件和轻度水分胁迫条件下,尾巨桉和竹柳苗木耗水速率日变化趋势均为明显单峰曲线,且峰值均出现在 12:00—14:00 时段,而中度水分胁迫下的两种苗木耗水速率日变化趋势均为双峰曲线,两个峰值分别出现在 10:00—12:00 和 14:00—16:00 时段。随着水分胁迫的发展,土壤处于严重干旱状态,此时两种苗木耗水速率日变化趋势趋于稳定(图 1),尾巨桉和竹柳在白天不同时段

的耗水速率的变化范围分别介于 1.43—4.29 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 7.52—19.28 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,说明严重水分胁迫下苗木耗水速率受环境因子日变化规律影响不大。最大耗水速率是反映苗木最大耗水潜力的水分生理指标。正常水分条件下竹柳最大耗水速率比尾巨桉更大,达到了 $(89.50 \pm 13.54) \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,而尾巨桉仅为 $(66.31 \pm 9.91) \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。当土壤处于轻度水分胁迫时,竹柳最大耗水速率迅速下降至 $(64.20 \pm 10.32) \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,并且比尾巨桉低 16.74%,可见当土壤遭受轻度水分胁迫时,竹柳响应更为迅速。中度水分胁迫时两种苗木最大耗水速率均出现在 10:00—12:00,但竹柳高于尾巨桉,分别为 $(41.53 \pm 5.69) \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $(26.37 \pm 3.45) \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,说明尾巨桉对中度干旱胁迫逆境作出更迅速响应,通过大幅降低自身耗水速率来抵抗逆境。值得注意的是在实验

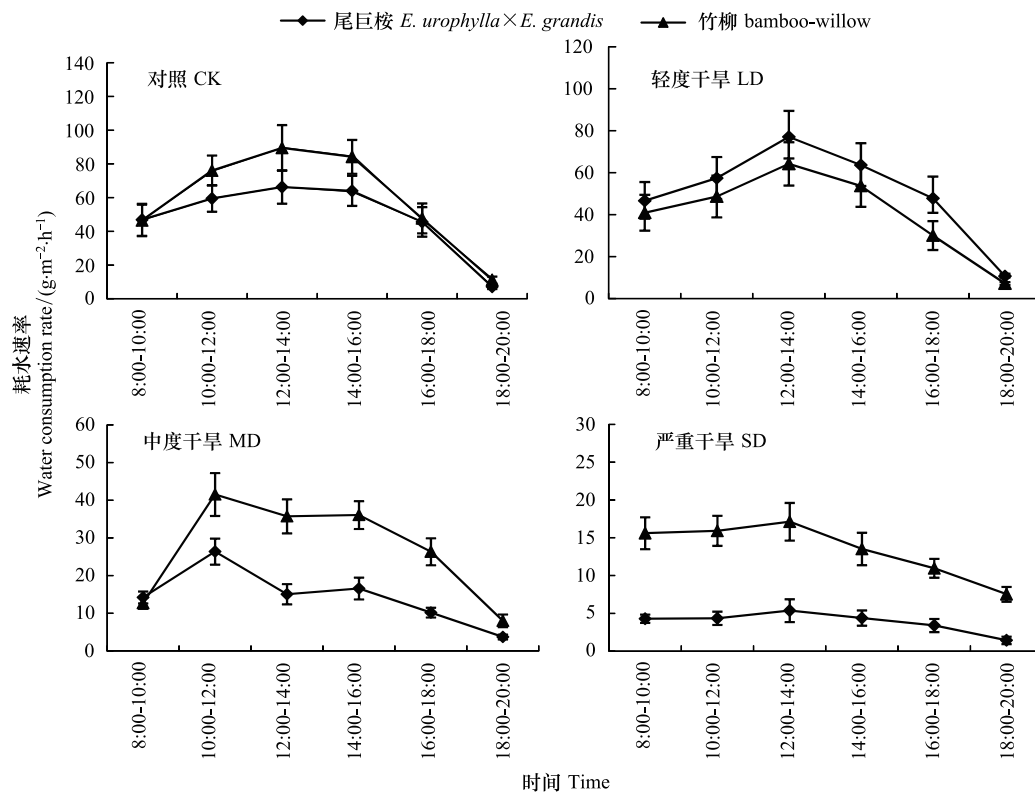


图1 不同土壤水分条件下苗木白天各时段耗水速率(±标准误差)

Fig.1 Water consumption rate (±standard error) of seedlings in each period in the daytime under different soil moisture conditions

测定后期即土壤中度水分胁迫以后,尾巨桉白天最大耗水速率一直低于竹柳。白天平均耗水速率也是衡量树种耗水能力差异的重要评价指标。方差分析和多重比较结果表明两个树种在不同水分条件下白天平均耗水速率均存在显著性差异 ($P < 0.05$),说明

土壤水分含量对白天平均耗水速率产生了直接影响。图2可以看出,苗木白天平均耗水速率变化趋势跟最大耗水速率基本一致,均呈下降趋势,并且降幅变化规律基本一致,都是正常水分条件下尾巨桉低于竹柳,但轻度胁迫时竹柳更低而中度胁迫以后尾巨桉持续低于竹柳,由此可见,最大耗水速率与白天平均耗水速率可能存在特定的比例关系,而早前有报道很多学者通过大量研究得到了正常条件下最大耗水速率与白天平均耗水速率比值接近1.60的结论^[16-17,19],但目前缺乏科学依据尚无定论,本研究中正常水分条件下尾巨桉和竹柳这一比值分别为1.37和1.51,与上述结论比较接近。

2.1.3 耗水速率与环境温度和空气相对湿度的关系

大量研究表明,蒸腾速率与环境因子如环境温度、相对湿度等具有密切关系^[20-23]。由表3可以看出,苗木在不同土壤水分条件下的耗水速率受环境温度和相对湿度的影响程度不一致,并且两种树种之间也存在一定差异。在土壤水分充足情况下,尾巨桉和竹柳的耗水速率均与环境温度显著正相关,而与相对湿度则极显著负相关。当苗木遭受轻度水

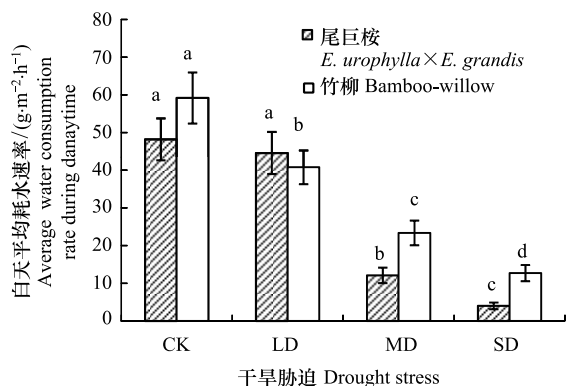


图2 不同土壤水分条件下苗木白天平均耗水速率(±标准误差)

Fig. 2 Average water consumption rate (±standard error) of seedlings during daytime under different soil moisture conditions

不同字母表示在0.05水平上差异显著(Duncan's法)

分胁迫时,尾巨桉和竹柳耗水速率与环境温度、相对湿度相关程度与正常水分条件基本相同。值得注意的是在土壤水分充足和遭受轻度水分胁迫情况下,相对湿度与耗水速率的相关程度均明显高于环境温度,由此可见此两种土壤水分条件下,相对湿度是影响耗水速率的最主要因子。随着干旱胁迫的发展,尾巨桉和竹柳的耗水速率与环境温度正相关程度及与相对湿度负相关程度均有所减弱,相关性分析结果显示中度和重度干旱胁迫下尾巨桉和竹柳的耗水

速率与环境温度和相对湿度的相关程度均不显著,其相关系数均在 0.8 以下,特别是在严重干旱时期,竹柳耗水速率与环境温度的相关系数仅为 0.412,而与相对湿度的相关系数则低至 0.347。总体而言,土壤水分条件相对充足时,环境温度和相对湿度是影响两种苗木耗水速率的重要环境因子,而当土壤水分亏缺较严重时,环境温度和相对湿度对两种苗木耗水速率的影响不显著。

表 3 耗水速率与环境因子相关系数

Table 3 Correlation coefficient of water consumption rates and environmental factors

处理 Treatment	树种 Tree species	环境温度 Environmental temperature	相对湿度 Relative humidity
CK	尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	0.863 *	-0.987 **
	竹柳 bamboo-willow	0.860 *	-0.982 **
LD	尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	0.850 *	-0.924 **
	竹柳 bamboo-willow	0.859 *	-0.959 **
MD	尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	0.769	-0.552
	竹柳 bamboo-willow	0.752	-0.734
SD	尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	0.659	-0.435
	竹柳 bamboo-willow	0.412	-0.347

* 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关

2.2 瞬时水分利用效率的比较

从表 4 中可以看出,苗木生长初期和生长旺盛时期,竹柳的净光合速率分别比尾巨桉高 57.27% 和 43.14%,可见竹柳苗期光合生长能力比尾巨桉更优,是一种较好的速生树种。而单就叶片蒸腾速率而言,处于生长初期和旺盛期的竹柳均略高于尾巨桉,因此,从叶片水平上来讲,尾巨桉的节水能力稍优于竹柳。叶片瞬时水分利用效率方面,竹柳显示出了更高的水分利用效率,其生长初期和生长旺盛时期的

水分利用效率分别比尾巨桉高 55.24% 和 48.46%。另一方面,尾巨桉和竹柳从生长初期到生长旺期,净光合速率和蒸腾速率均显著提高 ($P < 0.01$),而叶片瞬时水分利用效率差异不显著,只是略微提高,主要原因是两种在生长旺盛时期净光合速率均出现一定程度增加,同时叶片蒸腾速率也发生相同幅度增加,导致水分利用效率基本保持不变。总体而言,叶片水平上来看,尾巨桉具有更高的蒸腾速率和更低的水分利用效率。

表 4 苗木瞬时水分利用效率的比较

Table 4 Comparison on instantaneous water use efficiency of seedlings

树种 Tree species	净光合速率 (P_n) Net photosynthetic rate/ ($\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		蒸腾速率 (Tr) Transpiration rate ($\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		水分利用效率 (WUE) Water use efficiency ($\mu\text{molCO}_2 / \text{mmolH}_2\text{O}$)	
	6 月	8 月	6 月	8 月	6 月	8 月
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	9.90±0.29	11.52±0.93	3.99±0.22	4.46±0.29	2.48±0.07	2.60±0.32
竹柳 bamboo-willow	15.57±1.23	16.49±0.74	4.04±0.22	4.27±0.26	3.85±0.09	3.86±0.6

3 讨论

3.1 与其它速生树种耗水特性的比较

耗水量在进行抗旱节水树种筛选时经常作为重

要评价指标,能很好地反映树种耗水能力差异^[11-12,14,18-19,24]。耗水速率是树种内在的水分生理特征,具有稳定遗传性,可以反映植物调节自身水分损耗能力和在不同环境中的实际耗水特征,常被用

来比较不同植物固有的耗水能力^[12,16-17]。为了更好地分析评价尾巨桉和竹柳的耗水能力,特将此两种树种与其他两种常见速生树种毛白杨和楸树进行了对比(表 5),其数据测定时间均为当年 7 月份,测定方法均为盆栽苗木称重法。表 5 中仅列举了 4 个速生树种苗木在正常水分条件下白天耗水量、最大耗水速率和白天平均耗水速率 3 个主要耗水测定指标。白天总耗水量,最大耗水速率和白天平均耗水速率尾巨桉和竹柳均低于毛白杨和楸树,其大小顺序均为:楸树>毛白杨>竹柳>尾巨桉,可以看出当土壤水分充足时,4 种速生树种中,尾巨桉和竹柳耗水相对较低,属于节水性能较好树种,而据段爱国等^[24]研究其他树种如大叶相思(*Acacia auriculaeformis*)、马占相思(*Acacia mangium*)、圆柏(*Sabina chinensis*)、黑荆(*Acacia mearnsii*)盆栽苗木白天单株耗水量分别为 498.5、232.1、306.5、631.7 g/d,也均高于尾巨桉

和竹柳,邱权等^[25]最新研究中任豆(*Zenia insignis*)、石斑木(*Rhaphiolepis indica*)、棟叶吴茱萸(*Evodia glabrifolia*)的盆栽苗木白天单株耗水量与尾巨桉和竹柳比较接近,分别为 127.93、84.24、62.75 g/d。将尾巨桉和竹柳进行对比时发现,尾巨桉白天耗水量是竹柳的 1.82 倍,但其耗水速率(最大耗水速率和白天平均耗水速率)却比竹柳更低。主要因为尾巨桉叶面积更大导致耗水量更大,而单就耗水速率而言,尾巨桉节水性能反而更好。因此在具体的造林实际中,应该综合考虑树种的耗水量和耗水速率两方面因素,而不仅仅是单纯选择耗水量小的树种。表 5 中数据显示在 4 种速生树种中尾巨桉属于节水性能强树种,其中耗水速率显著低于其它 3 种树种,从单株苗木耗水角度来讲,过分指责尾巨桉高耗水缺乏科学性。

表 5 速生树种耗水特性对比

Table 5 Comparison on water consumption of fast-growing species

树种 Tree species	白天耗水量/(g/d) Water consumption during the daytime	最大耗水速率 Maximum water consumption rate /(g·m ⁻² ·h ⁻¹)	白天平均耗水速率 Average water consumption rate during the daytime /(g·m ⁻² ·h ⁻¹)	数据来源 Data source
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	162.07	66.31	48.23	本研究
竹柳	88.78	89.50	59.19	本研究
毛白杨 <i>P. tomentosa</i>	177.30	148.50	90.00	何茜 ^[16]
楸树 <i>C. bungei</i>	1500.70	179.60	121.10	陈博 ^[17]

3.2 不同土壤水分条件对速生树种耗水特性的影响

土壤水分是植物生长的重要限制因子,大量研究表明不同土壤水分条件下,植物耗水特性存在明显差异^[10,24]。本研究中随着土壤水分含量的下降,尾巨桉和竹柳耗水量和耗水速率均呈现大幅下降的趋势,特别是在土壤水分严重亏缺时,其中尾巨桉下降更多,其白天耗水量和白天最大耗水速率分别下降至正常条件下的 8.35%和 8.08%。华南降水丰富,但降水主要集中在雨季(4—9 月),且主要以大、暴雨出现并以径流形式流失、蒸发量大,季节性缺水和水质性缺水也比较明显^[26],此两种速生树种均能很好地调节自身耗水来减少对有限水源的过度消耗。有研究表明,干旱逆境下气孔关闭是植物蒸腾下降的重要因素^[27],而气孔关闭程度主要受环境因子影响。对比不同水分条件下环境因子(环境温度、相对湿度)对苗木耗水速率的影响来看,随着干旱胁迫的

发展,环境因子对耗水速率的影响有所减弱,可能是由于干旱胁迫使得植物通过关闭大部分气孔来调节自身耗水,而气孔关闭导致环境因子失去了对植物耗水特性的间接控制,因此本研究进一步证实了气孔关闭是植物蒸腾下降主要原因这一结论。

3.3 苗木生长期叶片水分利用效率差异

植物叶片水分利用效率能解释植物内在的耗水机制,存在明显的季节变化差异^[15]。本研究表明,从苗木生长期来看,光合生长能力和蒸腾速率表现出了一定的差异性,可能是环境因子的改变(如温度升高等)所致,也可能与苗木在不同生长时期的生理特性不同有关。叶片水分利用效率则相对稳定,整个生长期变化幅度不大,说明环境因子改变对苗木生长期内叶片水分利用效率影响不大,可见生长旺期的较佳水热条件并未引起水分利用效率的显著提高,但此结果是否是苗木生长期一般变化规律还

有待进一步研究。胡红玲等^[18]通过巨桉和其他 5 种木本植物水分利用效率的对比发现巨桉具有高光合、高蒸腾、低水分利用效率的特点,而本研究中尾巨桉也表现出了比竹柳更低水分利用效率的特点,说明尾巨桉低水分利用效率的事实可能确实存在,而其它桉树品系是否与此结论一致还有待进一步研究,在今后的桉树良种选育工作中,提高水分利用效率可以作为一个很好的研究方向。

3.4 速生树种水分消耗和利用问题的综合分析

速生树种水分消耗和利用问题一直是各界对于速生树种人工林种植领域的关注焦点。通过对不同水分条件下尾巨桉和竹柳耗水特性研究以及与其它速生树种的比较表明,两种速生树种苗木表现出了较好的抗旱节水能力,而许多对于尾巨桉的指责与此事实不符。本研究中需要注意的是,尾巨桉叶片蒸腾强但竹柳单株耗水速率更大,说明不同研究层次会产生不同研究结果,即使同一层次不同指标也会有差异,如本研究中尾巨桉单株耗水量更大但是耗水速率却更低。与竹柳相比,尾巨桉水分利用效率低,但是抗旱节水能力强,所以不能单方面评价其优劣,进一步说明对于速生树种耗水的评价需要全面科学的综合性研究。本次研究主要针对苗木水平耗水特性的比较,反映出了 2 个速生树种苗木生长时期的基本耗水规律,但无法完全反映出成熟林木的耗水能力差异,另外本研究中采用国内外常用的薄膜密封覆盖土壤的方法测定单株苗木耗水量也存在一定局限性,会对土壤和植物根系呼吸产生一定影响,因此研究方法需要进一步的改进。国内外对于植物的蒸散耗水主要集中在 4 个层次上,即枝叶水平、单木水平、林分水平、区域以及更高的水平^[28]。本研究主要针对盆栽苗木单株水平进行蒸腾耗水研究,具有一定的局限性,在具体的造林实际中,无法准确反映出林分和区域水平的耗水规律,因此,对于单株水平和林分水平之间耗水量的转换以及区域水平总耗水量的推算还有待进一步研究,而目前的国内外很多学者已经针对单株树木和林分水平尺度之间的耗水量转换进行大量的研究工作^[29-35],并积累了大量的方法和经验,其中张宁南等^[29]对雷州半岛尾叶桉人工林耗水量进行了深入研究。另一方面,本研究中植物叶片水分利用效率测定只适用于瞬时和短期植物水分利用效率研究,

可即时开展长期水分利用效率的相关研究。

4 结论

(1) 不同土壤水分条件下尾巨桉和竹柳耗水量和耗水速率均存在差异,但响应程度有所不同,其中随着土壤水分条件的改变,两种苗木耗水速率日变化规律及其受环境因子的影响程度均产生相应变化。在土壤水分不足时,桉树和竹柳均能调节耗水来适应干旱逆境,尾巨桉较佳的抗旱节水能力能使其很好地生存并能有效降低对土壤水分的消耗。苗木不同生长期,叶片光合、蒸腾存在明显差异,并且变化趋势基本一致,但水分利用效率基本保持稳定。在进行速生树种耗水性能评价时,应该综合考虑其不同生长时期光合生长能力、蒸腾耗水能力和水分利用效率的不同表现。

(2) 竹柳苗木生长期叶片具有高光合、低蒸腾、高水分利用效率的特点,是很好的速生树种,有很大的推广价值。尾巨桉虽叶片水分利用效率偏低,但单株耗水量和耗水速率与竹柳比较接近,并且其在土壤水分亏缺条件下表现出了比竹柳更优的抗旱节水能力,充分说明其能在相对干旱地区和干旱季节起到很好的节水作用,从这个角度来看,尾巨桉“抽水机”理论需要被重新科学论证。总体而言,尾巨桉和竹柳都是节水性能较好树种,可在速生树种人工造林中进行树种选择时给予重点考虑。

致谢: 感谢华南农业大学林学院曾曙才教授对英文摘要的润色修改

References:

- [1] Calder I R. Water use of Eucalypts — A review with special reference to South India, Agricultural Water Management, 1986, 11(3/4):333-342.
- [2] Shiva S, Bandyopadhyay J. Eucalyptus — A disastrous tree for India. Ecologist, 1983, 13(4):184-187.
- [3] Bai J W, Gan S M. Social, economical and ecological significance of *eucalyptus* plantation. World Forestry Research, 1996, 9(2):63-68.
- [4] Hou Y Z. Understanding scientifically the issue of developing fast-growing and high-yielding eucalypt plantation in South China. World Forestry Research, 2006, 19(3):71-76.
- [5] Lu D W. Introduction experiment of bamboo willow. Protection Forest Science and Technology, 2011, (5):42-43, 53.
- [6] Wang W C, Guo Y C, Li K Y, Dong W Q, Zhou H L, Wang Y H.

- Effects of NaCl stress on the morphological and physiological indexes of Zhuliu plants. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(S1): 143-146.
- [7] Ladefod K. A method for measuring the water consumption of large intact tree. *Physiologia Plantarum*, 1960, 13(4): 648-658.
- [8] Roberts J. The use of tree-cutting technique in the study of water relation of mature *Pinus sylvestris* L.. *J Exp Bot*, 1977, 28(3): 751-767.
- [9] Knight D H, Fahey T J, Running S W, Harrison A T, Wallace, L L. Transpiration from 100-yr-old lodgepole pine forests estimated with whole-tree potometers. *Ecology*, 1981, 62(3): 717-726.
- [10] Li J Y, Zhou P, Zhao L J. Influence of drought stress on transpiring water-consumption of seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1380-1386.
- [11] He Q, Li J Y, Chen X Y, Zhang Z Y. Water utilization and its distribution in day and night in different *Populus tomentosa* clones. *Journal of South China Agricultural University*, 2010, 31(1): 47-50.
- [12] Zhou P, Li J Y, Zhao L J. Characteristics of seedlings wof Beijing Forestry University, 2002, 24(5/6): 50-55.
- [13] Sun H R, Zhang Y J, Li W H, Lu T L, Gao F, Han J G. Water consumption coefficient and water use efficiency of *Medicago sativa* in the establishment year in the Beijing Plain. *Acta Pratacul Turae Sinica*, 2007, 16(1): 41-46.
- [14] Zhao M, Guo Z Z, Wang Y L, Li A D, Zhang D K, Jia B Q. Study on the transpiration on characteristics of 10 species of plants under the different depths groundwater level. *Arid Zone Research*, 2003, 20(4): 286-291.
- [15] Cao S K, Feng Q, Si J H, Chang Z Q, Zhuo M C, Xi H Y, Su Y H. Summary on the plant water use efficiency at leaf level. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3883-3892.
- [16] He Q. Evaluation and selection on *Populus tomentosa* superior clones with drought resistance and water-saving. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [17] Chen B. Evaluation and selection on precious tree *Catalpa bungei* superior clones. Guangzhou: South China Agricultural University, 2012.
- [18] Hu H L, Zhang J, Wan X Q, Chen H, Yi W Y, Zhou Y C. The water consumption and water use efficiency of the seedlings of *Eucalyptus grandis* and other five tree species in Sichuan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(12): 3873-3882.
- [19] Zhu Y, Li J Y, Shi J B. Comparison of transpiration of six potted afforestation species in Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(1): 65-70.
- [20] Guo L S, Tian Y L. Transpiration rate of coniferous and broadleaf young trees as a function of water potential of their leaves and of environmental factors. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, 12(1): 47-52.
- [21] Li H L, Dong Z, Ding G D, Zhang G S, Wang L H, Hao Y L. Research on plant transpiration characteristics of Hunshandake Sand. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2003, 17(5): 135-140.
- [22] Yue G Y, Zhang T H, Zhao H L, Niu L, Liu X P, Huang G. Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejewii* and *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3205-3213.
- [23] Guo W H, Li B, Zhang X S, Wang R Q. The impact of water stress on transpiration indices in *Hippophae rhamnoides* and *Caragana intermedia*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4132-4140.
- [24] Duan A G, Zhang J G, He C Y, Zhang J P, Zhang S G. Studies on transpiration of seedlings of the main tree species under the condition of drought stress in the dry hot river valleys of the Jinsha River. *Forestry Research*, 2008, 21(4): 436-445.
- [25] Qiu Q, Pan X, He Q, Li J Y, Su Y, Lin W. Comparison of daily variations in photosynthesis and water-consumption of seedlings in vigorous growth period of three tree species from South China. *Journal of South China Agricultural University*, 2012, 33(4): 524-528.
- [26] Feng H H, Xiong Y J. Study on the situation of rocky desertification in karst area in Guangdong Province and its comprehensive control measures. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2011, 30(1): 15-19.
- [27] Huang Y M, Zhang J, Luo C D. Literature review on tree's drought resistance capacities. *Journal of Sichuan Agricultural University* 1997, 15(1): 49-54.
- [28] Sun P S, Ma L Y, Wang X P, Zhai M P. Temporal and spacial variation of sap flow of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*). *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(5): 1-6.
- [29] Zhang N N, Xu D P, Morris J M, Zhou G Y, Bai J Y, Zhou T. Water consumption of *Eucalyptus urophylla* plantations on the Leizhou Peninsula. *Forestry Research*, 2007, 20(1): 1-5.
- [30] Hatton T J, Vertessy R A. Transpiration of plantation *Pinus* estimated by the heat pulse method and the Bowen Ratio. *Hydrol Proc*, 1990, 4: 289-298.
- [31] Hatton T J, Wu H I. Scaling theory to extrapolate individual tree water use to stand water use. *Hydrol Proc*, 1995, 9: 527-540.
- [32] Liu F J, Edwards W R N, Zheng S K, Ju G S, Wang G J, Lu Y N. A study on the dynamic of sap flow in space and time in *poplar* stems. *Forestry Research*, 1993, 6(4): 368-372.
- [33] Kumagi T, Aoki S, Shimizu T, et al. Sap flow estimates of stand transpiration at two slope positions in Japanese cedar forest watershed. *Tree Physiology*, 2007, 27(2): 161-168.
- [34] Zhai H B, Li J Y, Nie L S. Forestland evapotranspiration and water balance of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus variabilis* mixed stand. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 26(2): 48-51.
- [35] Ma L Y, Sun P S, Ma L Y. Sapwood area calculation and water use scaling up from individual trees to stands of Chinese pine and black locust. *Journal of Beijing Forestry University* 2001, 23(4): 1-5.

参考文献:

- [3] 白嘉雨,甘四明.桉树人工林的社会、经济和生态问题.世界林业研究,1996,9(2):63-68.
- [4] 侯元兆.科学地认识我国南方发展桉树速生丰产林问题.世界林业研究,2006,19(3):71-76.
- [5] 吕德文.竹柳引种试验初报.防护林科技,2011,(5):42-43,53.
- [6] 王文成,郭艳超,李克晔,董文琦,周汉良,王玉花.盐胁迫对竹柳种苗形态及生理指标的影响.华北农学报,2011,26(增刊):143-146.
- [10] 李吉跃,周平,招礼军.干旱胁迫对苗木蒸腾耗水的影响.生态学报,2002,22(9):1380-1386.
- [11] 何茜,李吉跃,陈晓阳,张志毅.毛白杨不同无性系苗木耗水量及其昼夜分配.华南农业大学学报自然科学版,2010,31(1):47-50.
- [12] 周平,李吉跃,招礼军.北方主要造林树种苗木蒸腾耗水特性研究.北京林业大学学报,2002,24(5/6):50-55.
- [13] 孙洪仁,张英俊,历卫宏,逯涛林,高飞,韩建国.北京地区紫花苜蓿建植当年的耗水系数和水分利用效率.草业学报,2007,16(1):41-46.
- [14] 赵明,郭志中,王耀琳,李爱德,张德魁,贾宝全.不同地下水位植物蒸腾耗水特性研究.干旱区研究,2003,20(4):286-291.
- [15] 曹生奎,冯起,司建华,常宗强,卓玛措,席海洋,苏永红.植物叶片水分利用效率研究综述.生态学报,2009,29(7):3882-3892.
- [16] 何茜.毛白杨抗旱节水优良无性系评价与筛选.北京:北京林业大学,2008.
- [17] 陈博.珍贵树种楸树优良无性系评价与筛选.广州:华南农业大学,2012.
- [18] 胡红玲,张健,万雪琴,陈洪,易万洋,周永春.巨桉与5种木本植物幼树的耗水特性及水分利用效率的比较.生态学报,2012,32(12):3873-3882.
- [19] 朱妍,李吉跃,史剑波.北京六个绿化树种盆栽蒸腾耗水量的比较研究.北京林业大学学报,2006,28(1):65-70.
- [20] 郭连生,田有亮.9种针阔叶幼树的蒸腾速率、叶水势与环境因子关系的研究.生态学报,1992,12(1):47-52.
- [21] 李红丽,董智,丁国栋,张国盛,王林和,郝云龙.浑善达克沙地植物蒸腾特征的研究.干旱区资源与环境,2003,17(5):135-140.
- [22] 岳广阳,张铜会,赵哈林,牛丽,刘新平,黄刚.科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征.生态学报,2006,26(10):3205-3213.
- [23] 郭卫华,李波,张新时,王仁卿.水分胁迫对沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)蒸腾作用影响的比较.生态学报,2007,27(10):4132-4140.
- [24] 段爱国,张建国,何彩云,张俊佩,张守攻.干旱胁迫下金沙江干热河谷主要造林树种盆植苗的蒸腾耗水特性.林业科学研究,2008,21(4):436-445.
- [25] 邱权,潘昕,何茜,李吉跃,苏艳,林雯.华南地区3种苗木生长旺盛时期光合特性及蒸腾耗水日变化规律的比较.华南农业大学学报自然科学版,2012,33(4):524-528.
- [26] 冯汉华,熊育久.广东岩溶地区石漠化现状及其综合治理措施探讨.中南林业调查规划,2011,30(1):15-19.
- [27] 黄颜梅,张健,罗成德.树木抗旱性研究.四川农业大学学报,1997,15(1):49-54.
- [28] 孙鹏森,马履一,王小平,翟明普.油松树干液流的时空变异性研究.北京林业大学学报,2000,22(5):1-6.
- [29] 张宁南,徐大平,Jim Morris,周光益,白嘉雨,周涛.雷州半岛尾叶桉人工林耗水量研究.林业科学研究,2007,20(1):1-5.
- [32] 刘奉觉,Edwards W R N,郑世锴,巨关升,王广举,卢永农.杨树树干液流时空动态研究.林业科学研究,1993,6(4):368-372.
- [34] 翟洪波,李吉跃,聂立水.油松栓皮栎混交林林地蒸散和水量平衡研究.北京林业大学学报,2004,26(2):48-51.
- [35] 马李一,孙鹏森,马履一.油松、刺槐单木与林分水平耗水量的尺度转换.北京林业大学学报,2001,23(4):1-5.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Impacts of global warming on litter decomposition SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

Autecology & Fundamentals

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow
seedlings QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect the morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer
and winter in a typical karst valley LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

Population, Community and Ecosystem

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*
plantation FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO₂ concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and
nitrogen, and nematode communities CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the
Qinling Mountains LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...
 MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species
 HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method
 WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Appling SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern
 China GUO Juntong, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China
 CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang
 LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe
 YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region
 WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)

Resource and Industrial Ecology

- Transnational land use and its potential environmental consequence LU Xiaoxuan (1606)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 薛建辉

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 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

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 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
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 WANG Rusong
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 90.00 元