

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

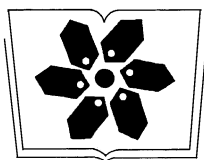
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第12期 Vol.32 No.12 **2012**

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 32 卷 第 12 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

- 河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应——以大洋河口为例..... 孙永光,赵冬至,吴 涛,等 (3645)
- 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征..... 张全军,于秀波,钱建鑫,等 (3656)
- 青岛市湿地生态网络评价与构建..... 傅 强,宋 军,毛 锋,等 (3670)
- 大堤型湖滨带生态系统健康状态驱动因子——以太湖为例..... 叶 春,李春华,王秋光,等 (3681)
- 绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态..... 王书敏,何 强,张峻华,等 (3691)
- 坡度对农田土壤动物群落结构及多样性的影响..... 何先进,吴鹏飞,崔丽巍,等 (3701)
- 枣园桃蛀果蛾寄生蜂种类及其与寄主的关系..... 姚艳霞,赵文霞,常聚普,等 (3714)
- 基于逻辑斯蒂回归模型的鹭科水鸟栖息地适宜性评价..... 邹丽丽,陈晓翔,何 莹,等 (3722)
- 温度、盐度和 pH 对马氏珠母贝稚贝清滤率的联合效应 朱晓闻,王 辉,刘 进,等 (3729)
- 鸡桑药共生模式库区土壤养分变化及流失风险..... 赵丽平,杨贵明,赵同科,等 (3737)
- 黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系 张俊华,李国栋,南忠仁 (3745)
- DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响 邱临静,郑粉莉,Yin Runsheng (3754)
- 粒度变化对城市热岛空间格局分析的影响..... 郭冠华,陈颖彪,魏建兵,等 (3764)
- 基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例 陈 杰,梁国付,丁圣彦 (3773)
- 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例..... 林剑艺,孟凡鑫,崔胜辉,等 (3782)
- 高寒牧区村域生态足迹——以甘南州合作市为例..... 王录仓,高 静 (3795)
- 太湖湖滨带生态系统健康评价..... 李春华,叶 春,赵晓峰,等 (3806)
- 秦岭大熊猫栖息地巴山木竹生物量..... 党坤良,陈俊娴,孙飞翔,等 (3816)
- 盐胁迫对盐生植物黄花补血草种子萌发和幼苗生长的影响..... 尤 佳,王文瑞,卢 金,等 (3825)
- 海南霸王岭山地原始林与伐后林中木质藤本对支持木的选择..... 刘晋仙,陶建平,何 泽,等 (3834)
- 闽楠幼树光合特性及生物量分配对光环境的响应..... 王振兴,朱锦懋,王 健,等 (3841)
- 基于形态及分子标记的濒危植物夏蜡梅自然居群的遗传变异研究 金则新,顾婧婧,李钧敏 (3849)
- 不同径级油松径向生长对气候的响应..... 姜庆彪,赵秀海,高露双,等 (3859)
- 珍稀濒危植物长蕊木兰种群的年龄结构与空间分布..... 袁春明,孟广涛,方向京,等 (3866)
- 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..... 胡红玲,张 健,万雪琴,等 (3873)
- 银木凋落叶腐解过程对小白菜生长和抗性生理的影响..... 黄激激,胡庭兴,张念念,等 (3883)
- 基于氡示踪剂和热扩散技术的栓皮栎水分运输速率与效率研究..... 孙守家,孟 平,张劲松,等 (3892)
- 石漠化干旱环境中石生藓类水分吸收特征及其结构适应性..... 张显强,曾建军,湛金吾,等 (3902)
- 含铜有机肥对土壤酶活性和微生物群落代谢的影响..... 陈 琳,谷 洁,高 华,等 (3912)
- 钝叶枧不同性别花的花部形态与传粉特征比较..... 王 茜,邓洪平,丁 博,等 (3921)
- 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性..... 何奇瑾,周广胜 (3931)
- 烯效唑干拌种对小麦氮素积累和运转及籽粒蛋白质品质的影响..... 樊高琼,杨恩年,郑 亭,等 (3940)

专论与综述

- 中国产业共生发展模式的国际比较及对策 石 磊,刘果果,郭思平 (3950)

研究简报

- 吉林省镇赉县近 10 年景观格局变化 张国坤,卢京花,宋开山,等 (3958)
- 杨树人工林生态系统通量贡献区分析..... 金 莹,张志强,方显瑞,等 (3966)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 330 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-06



封面图说: 鸳鸯——在分类上属雁形目,鸭科。英文名为 Mandarin Duck(即“中国官鸭”)。鸳指雄鸟,鸯指雌鸟,故鸳鸯属合成词。常常栖息于山地河谷、溪流、湖泊、水田等处,雌雄偶居,以植物性食物为主,也食昆虫等小动物。繁殖期 4—9 月间,雌雄配对后迁至营巢区。巢往往置于树洞中,用干草和绒羽铺垫,每窝产卵 7—12 枚。江西省婺源鸳鸯湖是亚洲最大的野生鸳鸯越冬栖息地。鸳鸯是一种美丽的禽鸟,中国传统文化又赋予它很多美好的寓意,因此,在许多文学艺术作品中经常用以表达爱情。

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

DOI: 10.5846/stxb201110171541

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.
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.

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

胡红玲^{1,2}, 张 健^{1,2,*}, 万雪琴², 陈 洪², 易万洋², 周永春²

(1. 四川农业大学林学院生态林业研究所, 雅安 625014; 2. 长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 成都 610000)

摘要:巨桉因生长迅速且经济效益高,在我国南方被广泛用于营造短周期工业原料林,但其蒸腾耗水状况与其他常见或乡土树种存在怎样的差异,大面积种植是否会改变栽培区原有的水分平衡,是一个尚未明确的问题。利用 LI-6400 光合作用仪测定了巨桉与其他 5 种木本植物在不同光强、温度、湿度下的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE),用称重法测定了参试植物载叶量、生物量和耗水量,并对这些树种的蒸腾耗水特性进行了评价。结果表明:(1)相同环境条件下,巨桉的 T_r 最大,WUE 最低,单位质量耗水量最多,单株蒸腾耗水量远高于其他树种,其明显较大的叶面积可能是重要原因之一,虽然其 P_n 仅次于杨树,生物量积累最大,因此为高光合、高蒸腾、低水分利用效率植物。(2)阔叶树种的 P_n 和 T_r 明显高于针叶树种,而 WUE 低于针叶树种。(3)环境因子(光照强度、温度和湿度)对植物 P_n 、 T_r 和 WUE 的影响较大,其中 P_n 主要受光照强度影响, T_r 对湿度最为敏感,一般情况下 WUE 随湿度的增大而升高。在试验设置的温度范围(24—32 °C)内,光合作用变化幅度不大。光照强度 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和温度 28 °C 最有利于参试植物的光合作用。(4)巨桉等速生树种较强的光合作用使其生长迅速,固碳潜力大,但其高蒸腾和低水分利用效率的特点意味着在栽培区替代原有植被进行大规模造林时,可能会消耗更多的水资源而对生态环境造成一定的不利影响,因此在发展巨桉人工林时应选择水分条件好的区域(尤其是年降雨量充沛且季节间分配相对均匀的地区),并进行科学的经营管理。

关键词:巨桉;水分利用效率;耗水性;光合速率;蒸腾速率

The water consumption and water use efficiency of the seedlings of *Eucalyptus grandis* and other five tree species in Sichuan Province

HU Hongling^{1,2}, ZHANG Jian^{1,2,*}, WAN Xueqin², CHEN Hong², YI Wanyang², ZHOU Yongchun²

1 The Ecological Forestry Institute of Forestry College, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

2 Sichuan Provincial Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in Upper Reaches of Yangtze River, Sichuan, Chengdu 610000, China

Abstract: *Eucalyptus grandis*, a fast-growing timber species with outstanding economic efficiency, has been extensively planted as short-term industrial material in southern China. But what's the difference of features in relation to water consumption between *E. grandis* and common or native tree species of Sichuan Province, whether or not the amount of water consumption of *E. grandis* would change the original water balance in its cultivation area remains to be answered. In this paper, the net photosynthetic rate(P_n), the transpiration rate(T_r) and the water use efficiency(WUE) of seedlings of *E. grandis* and other five tree species under different light intensities, air temperatures and atmosphere humidities were determined with the help of LI-6400 photosynthesis meter, the plant total leaf weight, biomass and the water consumption were measured using weighing method, then the water consumption characteristics of these species were evaluated and

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAC09B05)

收稿日期:2011-10-17; 修订日期:2012-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sicauzhangjian@163.com

compared based on the indicators mentioned above. The results were showed as follows: (1) Of all the tested species, *E. grandis* possessed the highest T_r and the lowest WUE under the same condition, in addition the maximum water consumption per unit biomass, so the water consumption per plant of which was significantly larger than the others, its largest total leaf area was probably one of the important reasons. Its P_n was lower than that of $P. \times R270$, but its biomass accumulation was the largest. We drew a conclusion that *E. grandis* was a tree species with strong photosynthesis, high transpiration, and low water use efficiency. (2) The P_n and the T_r of the broad-leaved tree species were obviously higher than those of the coniferous tree species, while the WUE of the former was lower than that of the latter. (3) Environmental factors (the light intensity, the air temperature and the atmosphere humidity) influenced the P_n , the T_r and the WUE of plants to a large extent. Particularly, the P_n was mainly affected by the light intensity, the T_r was most sensitive to the atmosphere humidity, and generally the WUE rose with the increase of the atmosphere humidity. In the range of variation temperature (24—32 °C), which was set in the experiment, the photosynthesis of these tree species did not changed to a large extent. The light intensity of 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and the temperature of 28 °C in this study were observed most conducive to plant photosynthesis. (4) Fast-growing tree species such as *E. grandis*, grew more rapidly and were more potential to fix considerable carbon because of its comparatively stronger capability of photosynthesis, thus higher economic benefit could be obtained. However, in terms of the higher transpiration and lower water use efficiency, replacing the former vegetation (mainly composed by indigenous tree species) with large-scale plantations of *E. grandis* was more likely to be adverse to the environment of introduction areas because of more water consumption. Therefore, the area for *E. grandis* plantation should be in a good water condition, especially where abundant annual rainfall and uniform rainfall distribution were seen. Moreover, adequate attention should be paid to the scientific and rational water management.

Key Words: *Eucalyptus grandis*; water use efficiency; water consumption characteristics; photosynthetic rate; transpiration rate

巨桉 (*Eucalyptus grandis*) 为桃金娘科 (Myrtaceae) 桉树属 (*Eucalyptus*) 双蒴盖亚属、横脉组、柳桉系高大乔木, 适应性强, 生长速度快, 树干通直饱满, 自然整枝良好, 伐桩萌蘖力强, 是优良的速生用材树种^[1], 在其适生区造林 6—8a 后即可达工艺成熟, 经济效益高^[2], 广泛用于热带和亚热带地区的人工造林, 是世界范围内栽培面积最大的一种桉树^[3]。我国 20 世纪 60 年代开始引种巨桉, 80 年代中期开展了巨桉区域试验, 建立了短轮伐期工业用材林基地, 取得了较好的经济效益^[4]。2000 年实施退耕还林以来, 巨桉在四川、云南等地得到大规模栽培。同时, 通过低效林改造发展了大面积的巨桉人工纯林。巨桉的发展一方面解决了当地木材短缺的问题, 产生了巨大的经济效益, 并增加了森林的碳汇能力, 但另一方面, 大面积种植桉树也引发了关于其生态安全问题的广泛关注和讨论, 焦点集中在养分消耗, 林地质量变化, 林下生物多样性变化, 林分稳定性, 化感效应等方面^[2-3, 5-6]。对其水分的利用和消耗方面也有过报道^[7], 但对巨桉这方面的研究尚不多见, 尤其是关于巨桉人工林是“抽水机”, 大面积种植会改变当地生态水文过程, 减少降雨量, 造成水库蓄水不足并加剧干旱等争论则倍受关注。因此, 研究巨桉人工林的水分消耗, 适宜巨桉生长的水分条件以及巨桉对栽培区生态水文过程的影响非常重要。

蒸腾耗水是植物光合、蒸腾作用的综合反映, 是评价植物生长适应性的重要指标^[8]。土壤水分由树木根系吸收后经树干运输到树冠, 99.8% 以上以蒸腾的形式从叶表面散失到空气中^[9]。因此森林的生存和更新需要足够的水分来支撑, 其耗水量非常大^[10]。在造林设计和对环境水分的研究中, 由于对林木和林分的蒸腾耗水量考量不足而引起的环境恶化时有发生, 因此了解林木和林分的蒸腾耗水特性显得十分重要^[11]。目前, 国内外学者在植物水分利用机理^[12]、蒸腾耗水尺度^[13-14]、林木耗水研究方法^[11, 15-17]、林木耗水主要影响因素^[18-20]、林木耗水特性^[21-24]等方面都进行了大量研究, 但详细研究不同环境因子下巨桉水分利用和消耗的报道还较少^[7], 综合对比多个树种的耗水特性的研究更是少见。

本文选择四川发展人工林常用的巨桉与其他 5 个主要树种,通过盆栽试验,测定、分析和评价其在几种环境因子(光强、温度、湿度)影响下水分利用与消耗特点,以避免水分利用不合理造成林木生长不良或引起环境问题,为正确评价巨桉人工林生态经济效益,促进巨桉人工林可持续发展提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2010 年 4 月至 7 月在四川农业大学教学科研园区塑料大棚中进行。试验材料为四川人工林主栽区常见的巨桉(*Eucalyptus grandis*)、欧美 R270 杨(*Populus × euramericana* cv. R270)、桉木(*Alnus cremastogyne*)、光皮桦(*Betula luminifera*)、马尾松(*Pinus massoniana*)和柏木(*Cupressus funebris*)6 个树种。巨桉选用无性系(广林 19 号)组培苗,苗龄 100 d,平均高 10 cm,由四川省林科院黑龙滩林木良种基地提供;杨树为欧美 R270 杨为插条,平均长 15 cm;桉木、光皮桦、马尾松和柏木均采用实生苗,平均高均为 50 cm,苗高均为适应性生长前高度。

1.2 试验方法

1.2.1 苗木培育

栽植容器为上口径 35 cm,底径 25 cm,高 35 cm 的陶瓷盆,土壤为当地常见的沙壤土,用多菌灵消毒并混匀后平铺晾晒 2 d,然后装盆(25 kg/盆)。2009 年 4 月 23 日,将各树种材料分别栽入盆中,每盆 1 株,定期浇水、除草、防治病虫害,保证苗木正常生长。

1.2.2 试验设计及测定条件

在供试材料中选择生长健壮,无损伤,形态指标基本一致的植株,每个树种 5 株(5 盆),进行 2 个月的适应性生长后(2009 年 6 月 23 日),开始进行耗水量测定。同时,使用 LI-6400 便携式光合作用仪(LI-COR, USA)于 9:00—11:00 分别测定各树种不同光强、温度、湿度下的净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 和水分利用效率 WUE。分别设定叶室内:(1)光强为 200、800 和 1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 400 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol}$,温度 28 $^{\circ}\text{C}$,湿度 50%;(2)温度为 24、28 和 32 $^{\circ}\text{C}$,光强为 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 400 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol}$,湿度 50%;(3)湿度为 70、30 和 1%—2%(通过调节空气流速进行控制),光强为 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 400 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol}$,温度 28 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.3 测定项目及方法

(1) 净光合速率 P_n 、蒸腾速率 T_r 和水分利用效率 WUE: P_n 和 T_r 使用 LI-6400 测定。测定时选取各植株中上部,无遮挡的健康、完整叶片,每树种每一光强 PAR、温度 T_a 、湿度 RH 下测定 5 个重复(不同植株),待稳定后每个重复读取 5 个数据。参照 Penuelas 等^[25]的方法计算瞬时水分利用效率,即 $\text{WUE} = P_n/T_r$ 。

(2) 蒸腾耗水量: 2009 年 6 月 23 日—7 月 5 日,按表 1 所示流程测定耗水量。每次浇透水后,用塑料薄膜将各陶瓷盆口覆盖,并用透明胶带封严。用精度 0.1 g,量程 32 kg 的电子天平称重。将所得耗水量累加即得此期间各树种的总蒸腾耗水量。根据测得的叶面积和生物量,便得到单位面积和单位质量叶片的蒸腾耗水量。

表 1 实验测定时间安排

Table 1 Design for treatment and measurement time

时间 Time/d	日期 Date	时间 Time		耗水量 Water consumption
		7:00	19:00	
0	06-23	—	浇透水	—
1	06-24	称重(W_1)	—	—
2	06-25	—	称重(W_2),后浇透水	$W_1 - W_2$
3	06-26	称重(W_3)	—	—
4	06-27	—	称重(W_4),后浇透水	$W_3 - W_4$
...	...	...	...	...
$n-1$	07-04	称重(W_{n-1})	—	—
n	07-05	—	称重(W_n),后浇透水	$W_{n-1} - W_n$ 总耗水量(累加)

(3) 单株叶面积及地上部分生物量: 耗水量测定完成后, 摘下各植株所有叶片, 混匀后随机抽取鲜叶约 30 g, 用 LI-3100 便携式激光叶面积仪 (LI-COR, USA) 扫描叶面积 (S_0), 然后在 105 °C 下杀青 30 min, 80 °C 下烘干称重 (W_a), 同样的方法得到剩余叶片干重 (W_b)。因此, 叶面积与质量比率 $k = S_0/W_a$, 单株总叶面积 $S = k \cdot (W_a + W_b)$; 另外, 除叶片外的其余地上部分, 也在 105 °C 下杀青, 80 °C 下烘干至恒重 (W_c), 那么植株地上部分生物量 $W = W_a + W_b + W_c$ 。

1.2.4 统计分析

运用 SPSS18.0 (SPSS Inc., USA) 统计分析软件对数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和多重比较 (LSD 法), Excel 2007 制表。文中所述“显著”、“极显著”分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 各树种不同光强下的 P_n 、 T_r 和 WUE

在 200—1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光强范围内, 6 个树种的 P_n 、 T_r 均随光强增加而升高, 而 WUE 均在光强为 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时最高, 1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时有所降低 (表 2)。可能是在低光强范围 (200—800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 内, 光强增大导致光合速率的增幅大于蒸腾速率的增幅, 而在较高光强下 (接近 1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时) 则正好相反。

表 2 各树种不同光强下的水分利用效率比较

Table 2 The comparison of water use efficiency under different light intensities within selected tree species

光强 (PAR) Light intensity /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	树种 Tree species	净光合速率 (P_n) Photosynthetic rate /($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 (T_r) Transpiration rate /($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	水分利用效率 (WUE) Water use efficiency /($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$)
200	巨桉 <i>E. grandis</i>	8.94±0.54 ABab	4.66±0.20 Aa	1.92±0.05 Ee
	欧美杨 <i>P. ×R270</i> *	9.48±0.54 Aa	4.15±0.46 Bb	2.32±0.34 Dd
	桉木 <i>A. cremastogyne</i>	8.68±0.61 Bb	3.11±0.39 Cc	2.81±0.20 Cc
	光皮桦 <i>B. luminifera</i>	7.47±0.28 Cc	2.57±0.09 Dd	2.90±0.13 Cc
	马尾松 <i>P. massoniana</i>	3.46±0.07 Dd	1.02±0.04 Ee	3.41±0.09 Bb
	柏木 <i>C. funebris</i>	2.62±0.02 Ee	0.53±0.00 Ff	4.91±0.04 Aa
800	巨桉 <i>E. grandis</i>	14.56±0.50 Aa	4.81±0.12 Aa	3.03±0.15 Ee
	欧美杨 <i>P. ×R270</i>	15.49±0.37 Aa	4.39±0.22 Bb	3.53±0.14 Dd
	桉木 <i>A. cremastogyne</i>	12.84±1.48 Bb	3.29±0.46 Cc	3.91±0.13 CDd
	光皮桦 <i>B. luminifera</i>	9.87±1.08 Cc	2.69±0.22 Dd	3.67±0.17 Cc
	马尾松 <i>P. massoniana</i>	5.15±0.04 Dd	1.05±0.05 Ee	4.89±0.21 Bb
	柏木 <i>C. funebris</i>	4.89±0.02 Dd	0.67±0.01 Ef	7.29±0.05 Aa
1500	巨桉 <i>E. grandis</i>	18.32±0.76 Aa	6.27±0.20 Aa	2.93±0.21 Dd
	欧美杨 <i>P. ×R270</i>	17.98±0.93 Aa	5.50±0.65 Bb	3.29±0.26 CDc
	桉木 <i>A. cremastogyne</i>	14.56±1.97 Bb	4.44±0.58 Cc	3.28±0.19 CDc
	光皮桦 <i>B. luminifera</i>	10.63±1.27 Cc	3.08±0.38 Dd	3.46±0.19 Cc
	马尾松 <i>P. massoniana</i>	5.73±0.10 Dd	1.23±0.08 Ee	4.70±0.40 Bb
	柏木 <i>C. funebris</i>	5.86±0.01 Dd	0.94±0.01 Ee	6.23±0.07 Aa

同一光强下各树种数值所带大、小写字母不同分别表示差异达 0.01 和 0.05 显著水平; * 欧美杨拉丁名 *Populus×euramericana* cv. R270 的简写

巨桉的 T_r 在各光强下均为最高, 其 P_n 在 200 和 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光强下仅次于欧美杨, 1500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光强下则是最大的, 其 WUE 则在各光强下明显低于其他树种。从树种类型来看, 在各光照强度下, 巨桉、欧美杨、桉木、光皮桦等阔叶树的 P_n 、 T_r 极显著高于中生和慢生的针叶树种马尾松和柏木, 而 WUE 则极显著低于马尾松和柏木。表明马尾松、柏木虽然光合速率较低, 但是蒸腾速率更低, 所以水分利用效率高于速生树种。

不同光照强度下,巨桉的水分利用效率最低为 1.92,3.03,2.93,是水分利用效率最高的柏树的 40% 左右。而巨桉的净光合速率较高,蒸腾速率最高,因此具有高光合、高蒸腾、低水分利用效率的特点。

2.2 各树种不同温度下的 P_n 、 T_r 和 WUE

由表 3 可见,随着温度升高,除巨桉的 P_n 不断升高外,其他 5 个树种均表现出先升高后降低的趋势;巨桉、欧美杨、光皮桦和桤木的 T_r 随温度升高而先降低后升高,WUE 呈明显的先升高后降低趋势,而马尾松和柏木的 T_r 则持续升高,与此同时 WUE 呈现迅速降低的规律。对于速生的阔叶树种,28 °C 能促进光合系统的同化反应,因而其在 28 °C 时具有最高的 WUE,而马尾松和柏木则适合在 24 °C 生长。因为温度的变化改变了叶片内外的水汽饱和差,从而影响植物的蒸腾作用。同时随着温度的升高,植物通过加强蒸腾作用来降低叶温,但超过一定限度会导致叶片气孔关闭,造成蒸腾速率的下降。

24 °C 和 28 °C 时,巨桉的 P_n 仅显著低于欧美杨,与桤木的 P_n 差异较小,并极显著高于其余 3 个树种,约为马尾松和柏木的 3 倍。而在 32 °C 时,其 P_n 值高于欧美杨,尽管未达显著水平,同时极显著高于其余 4 个树种;巨桉的 T_r 在各温度下均极显著高于其他树种(28 °C 下与欧美杨差异不显著除外);就 WUE 来看,巨桉基本上处于最低水平,与 2 种针叶树差异达极显著水平,但与另外 3 种阔叶树差异并不明显,但随着温度上升,马尾松和柏木 WUE 的优势逐渐降低,到 32 °C 时已无显著差异。

各温度条件下巨桉的水分利用效率分别为 2.51、4.14 和 2.71,在供试的 6 个树种中最低。因此,在不同温度下,巨桉也表现出了高光合、高蒸腾、低水分利用效率的特点。

表 3 各树种不同温度下的水分利用效率比较

Table 3 The comparison of water use efficiency under different air temperatures within selected tree species

空气温度(T_a) Air temperature /°C	树种 Tree species	净光合速率(P_n) Photosynthetic rate /($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率(T_r) Transpiration rate /($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	水分利用效率(WUE) Water use efficiency /($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$)
24	巨桉 <i>E. grandis</i>	11.38±0.76 Bb	4.56±0.31 Aa	2.51±0.30 Cc
	欧美杨 <i>P. ×R270</i>	13.98±1.35 Aa	4.38±0.13 Aa	3.19±0.29 Cc
	桤木 <i>A. cremastogyne</i>	11.58±0.43 Bb	3.74±0.25 Bb	3.10±0.14 Cc
	光皮桦 <i>B. luminifera</i>	8.33±0.55 Cc	2.97±0.17 Cc	2.80±0.13 Cc
	马尾松 <i>P. massoniana</i>	4.31±0.11 Dd	0.21±0.01 Dd	20.11±0.67 Aa
	柏木 <i>C. funebris</i>	4.20±0.03 Dd	0.23±0.02 Dd	18.62±1.48 Bb
28	巨桉 <i>E. grandis</i>	13.22±0.84 Bb	3.19±0.06 Aa	4.14±0.21 Dd
	欧美杨 <i>P. ×R270</i>	14.65±1.18 Aa	2.87±0.17 Bb	5.12±0.49 Cc
	桤木 <i>A. cremastogyne</i>	12.97±0.31 Bb	2.92±0.12 Bb	4.43±0.08 CDd
	光皮桦 <i>B. luminifera</i>	9.06±0.54 Cc	2.20±0.18 Cc	4.13±0.19 Dd
	马尾松 <i>P. massoniana</i>	5.59±0.03 Dd	0.43±0.03 Dd	13.04±0.99 Aa
	柏木 <i>C. funebris</i>	5.40±0.03 Dd	0.66±0.04 Dd	8.26±0.46 Bb
32	巨桉 <i>E. grandis</i>	14.12±0.63 Aa	5.23±0.25 Aa	2.71±0.22 Ccd
	欧美杨 <i>P. ×R270</i>	14.02±0.97 Aa	4.55±0.47 Bb	3.09±0.13 BCbcd
	桤木 <i>A. cremastogyne</i>	11.18±1.83 Bb	3.52±0.37 Cc	3.17±0.29 BCbc
	光皮桦 <i>B. luminifera</i>	8.04±0.71 Cc	3.01±0.20 Cd	2.69±0.34 Cd
	马尾松 <i>P. massoniana</i>	4.62±0.97 Dd	0.97±0.32 De	4.95±0.70 Aa
	柏木 <i>C. funebris</i>	4.13±0.08 Dd	1.22±0.07 De	3.40±0.24 Bb

2.3 各树种不同湿度下的 P_n 、 T_r 、WUE

从表 4 可知,空气湿度的变化对供试树种的 P_n 影响相对较小,即使空气湿度从 70% 降至 1%—2%, P_n 的降幅也不大;而空气湿度降低,各树种的 T_r 明显升高,可能随着空气湿度的下降,植物叶片内外水汽压差增大,蒸腾作用增强;另外,各树种均以湿度为 70% 时 WUE 最高,空气湿度减小,WUE 迅速下降,各树种在湿度 30% 时较 70% 时降低幅度就已达 60% 以上,可见空气湿度对 WUE 的影响非常明显。

各湿度下 P_n 的大小顺序均为:欧美杨>巨桉≈桉木>光皮桦>马尾松≈柏木, T_r 则以巨桉最高, 2 种针叶树的 T_r 明显较小, 且随着湿度减小, 差异更加明显。但马尾松和柏木的 WUE 则极显著高于 4 种阔叶树, 差异随着空气湿度降低而变小。

在不同空气湿度下巨桉也体现出了高蒸腾效率和低水分利用效率的特征。

表 4 各树种不同大气湿度下的水分利用效率比较

Table 4 The comparison of water use efficiency under different atmosphere relative humidities within selected tree species

大气相对湿度 (RH) Atmosphere relative humidity/%	树种 Tree species	净光合速率 (P_n) Photosynthetic rate /($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 (T_r) Transpiration rate /($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	水分利用效率 (WUE) Water use efficiency /($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$)
70	巨桉 <i>E. grandis</i>	13.00±1.05 Bb	3.18±0.07 Aa	4.08±0.28 Dd
	欧美杨 <i>P. ×R270</i>	15.19±0.98 Aa	2.66±0.41 Bb	5.80±0.76 Cc
	桉木 <i>A. cremastogyne</i>	12.97±0.69 Bb	2.93±0.13 ABa	4.43±0.13 Dd
	光皮桦 <i>B. luminifera</i>	9.06±0.67 Cc	2.20±0.20 Cc	4.14±0.28 Dd
	马尾松 <i>P. massoniana</i>	5.59±0.03 Dd	0.43±0.03 De	13.04±1.00 Aa
	柏木 <i>C. funebris</i>	5.34±0.05 Dd	0.70±0.07 Dd	7.74±0.87 Bb
30	巨桉 <i>E. grandis</i>	13.47±0.41 Bb	8.85±0.17 Aa	1.52±0.06 Cd
	欧美杨 <i>Populus×R270</i>	15.11±1.47 Aa	8.77±0.45 Aa	1.73±0.18 Cc
	桉木 <i>A. cremastogyne</i>	12.28±0.90 Bc	7.43±0.35 Bb	1.65±0.05 Ccd
	光皮桦 <i>B. luminifera</i>	9.84±0.61 Cd	6.49±0.36 Cc	1.52±0.08 Cd
	马尾松 <i>P. massoniana</i>	3.42±0.76 Ef	1.00±0.33 Ee	3.50±0.31 Aa
	柏木 <i>C. funebris</i>	4.96±0.03 De	1.98±0.00 Dd	2.51±0.02 Bb
1—2	巨桉 <i>E. grandis</i>	12.15±0.69 Bb	12.81±0.13 Aa	0.95±0.05 Cc
	欧美杨 <i>Populus×R270</i>	14.51±1.09 Aa	11.85±0.24 Bb	1.23±0.11 Bb
	桉木 <i>A. cremastogyne</i>	11.36±1.67 Bb	10.65±0.99 Cc	1.06±0.06 Cc
	光皮桦 <i>B. luminifera</i>	8.62±0.59 Cc	8.91±0.49 Dd	0.97±0.09 Cc
	马尾松 <i>P. massoniana</i>	3.51±0.95 Dd	1.61±0.32 Ee	2.16±0.14 Aa
	柏木 <i>C. funebris</i>	3.89±0.01 Dd	1.75±0.02 Ee	2.22±0.02 Aa

2.5 各树种的载叶量、生物量积累与耗水量

表 5 反映的是同一生长期, 各供试树种的单株载叶情况。巨桉的单株载叶面积为 8064.72 cm², 为其他树种的 2 倍以上。结合上述不同环境条件下巨桉单位叶面积蒸腾速率均大于其他树种, 可知其整株水平上单位时间内的蒸腾耗水量明显较高, 总耗水量也证实了这一点。通过测定表明巨桉总耗水量远高于其他树种的耗水量, 不过, 相同时间内巨桉生物量积累也大, 同样约为其他树种的 2 倍甚至更高, 因此其单位质量水分消耗与其他树种差异明显减小, 尽管仍然达到了显著水平。巨桉的生物量积累为马尾松的 2 倍, 单位质量的蒸腾耗水为马尾松的 3 倍, 其整株耗水量约为马尾松的 6 倍。

3 讨论

3.1 不同树种的耗水性及水分利用效率差异

植物的光合作用与蒸腾作用由其生物学特性和环境因子共同决定。植物自身的遗传特性不同, 根系分布、木质部、叶片结构等都有所区别, 相同环境条件下, 其光合、蒸腾作用不同, 水分利用效率也表现出较大差异^[26-27]。总体来看, 不管环境条件如何, 巨桉等 4 种速生阔叶树的净光合速率和蒸腾速率均远高于慢生的 2 种针叶树, 而水分利用效率明显较低。因此, 速生阔叶树, 特别是巨桉, 为高光合、高蒸腾和低水分利用效率类型植物, 而马尾松和柏木则具有低光合、低蒸腾、高水分利用效率的特点。不过巨桉的水分消耗与其物质产出具有正的相关性, 从表 5 可见, 巨桉的总耗水量远大于其他树种, 其明显较大的总叶面积可能是重要原因之一。不过, 相同时间内其生物量积累也最高, 因此单位质量耗水量与其他树种 (特别是其他 3 种阔叶树) 差距明显缩小。考虑到不同树种耗水特性及其受环境因子影响的差异, 在选择造林树种时, 应充分了解当地降水

及季节分布情况。在较为干旱或降水分布极不均匀的地区,应尽可能选择蒸腾耗水较少的树种,而在降雨充沛且分配较均匀的地区,为经济发展需要可适当选择巨桉等水分需求较大的速生树种,但应科学的选择造林地并进行合理的树种配置,避免林木因缺水而生长不良或水分消耗过多影响当地水资源供需平衡。此外,在水分不充裕地区引种栽培巨桉应当慎重,进行充分的分析论证,同时采取科学的经营管理措施,减少人工林对环境造成的负面影响^[28]。

表 5 各树种载叶量、生物量积累和蒸腾耗水量比较

Table 5 The comparison of leaf amount, biomass accumulation and transpiration consumption within selected tree species

树种 Tree species	地上部分干重 Dry weight of above-ground /g	叶片干重 Dry weight of leaf /g	叶面积与质量比率 Ratio of leaf area to leaf weight /%	总叶面积 Total leaf area /cm ²	总耗水量 Total water consumption /g	单位质量蒸腾耗水量 Transpiration consumption per unit mass /(g H ₂ O/g 干质量)
巨桉 <i>E. grandis</i>	46.20±3.27 Aa	23.50±1.79 Aa	343.50±36.63 Aa	8064.72±829.55 Aa	6407.55±572.46Aa	138.56±2.60 Aa
欧美杨 <i>P. ×R270</i>	23.12±1.39 Bc	11.46±0.48 Bb	285.14±14.56 Ab	3266.32±187.21 Bb	2845.62±334.19Bb	122.83±8.61 Bb
桉木 <i>A. cremastogyne</i>	21.60±3.98 Bc	10.38±1.69 Bb	277.00±56.57 Ab	2895.88±753.01 Bb	1726.70±297.77Cd	86.11±8.87 Cd
光皮桦 <i>B. luminifera</i>	22.15±1.20 Bc	9.95±0.21 Bb	275.60±25.88 Ab	2744.97±315.97 Bb	2319.43±180.09BCc	105.09±17.20 BCc
马尾松 <i>P. massoniana</i>	21.45±1.21 Bc	11.88±0.87 Bb	—	—	881.90±98.38De	41.33±6.20 De
柏木 <i>C. funebris</i>	29.46±8.02 Bb	22.42±8.14 Aa	—	—	583.1±105.98 De	19.24±4.69 Ef

数值后大、小写字母不同分别表示差异达 0.01 和 0.05 显著水平

3.2 不同环境因子对树种耗水性的影响

除自身特性外,植物光合、蒸腾作用还受到了环境因子的影响,其中以光强、温度、湿度 3 个环境因子的影响较大^[26,29-30],各因子之间的相互作用又使得植物的光合作用及蒸腾耗水状况变得更加复杂。

光照是植物光合作用的能源,同时也影响着植物的光合机构及其功能^[31-32],过高或过低的光强都会抑制光合作用^[33]。本试验中,各树种 P_n 均随光强增大(200—1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内)而升高,可能还未达光饱和点,而 WUE 均在 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 下有所降低,验证了前人报道的过高或过低的光强都会降低植物水分利用效率^[33-35]的结论。巨桉在 200、800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下, P_n 低于欧美杨而居于第 2 位,而当光强为 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时高于欧美杨,是否暗示其对光照的需求更高。

温度直接关系到光合酶活性,因而植物的光合作用需要在适宜的温度范围内进行,过高或过低的温度都会对植物造成伤害^[36-37]。本实验的 6 个树种中,仅巨桉的净光合速率(P_n)随温度升高(24—32 $^{\circ}\text{C}$ 范围内)而增大,其他树种的 P_n 均在 28 $^{\circ}\text{C}$ 时最大。另外,巨桉在 24 和 28 $^{\circ}\text{C}$ 下 P_n 皆明显低于欧美杨,甚至在 24 $^{\circ}\text{C}$ 时不及桉木,而在 32 $^{\circ}\text{C}$ 下 P_n 最高。这说明巨桉可能具有更大的温度适应范围,即在遇到较高的温度时而生理性不会降低。不过在 32 $^{\circ}\text{C}$ 下各树种 WUE 均有所降低,因此从林地水分利用效率考虑,32 $^{\circ}\text{C}$ 并不是发展巨桉的最适温度。

通常情况下,大气相对湿度与蒸腾耗水量呈负相关,这是因为随着空气湿度的下降,植物叶片内外水汽压差增大,叶片蒸腾速率增加,叶片内水分子有更易逸出的趋势,而叶片水势迅速降低后,水汽压差减小,气孔趋于关闭,蒸腾速率逐渐降低^[38]。本研究结果符合这一理论,大气相对湿度 70% 时植物水分消耗最少。在本试验中,28 $^{\circ}\text{C}$ 、800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、70% 分别是受试树种水分利用效率最高时的温度(针叶树除外)、光强和湿度。

3.3 巨桉与柏木、马尾松单位质量蒸腾耗水量的比较及其树种更替可能造成的影响

植物单位质量的蒸腾耗水量反映了其水分利用状况^[39]。试验表明,在相同生长期,柏木单位质量的蒸腾耗水量和总耗水量最低,而生物量积累仅次于巨桉。巨桉的总耗水量最大,其单位质量蒸腾耗水量也最大,与其他速生阔叶树种也有明显的差异;马尾松虽生物量积累较低,但总耗水量和单位质量蒸腾耗水量仅高于柏木而远低于其它阔叶树种。因此,在四川盆地西部丘陵区,将生长较为缓慢且耗水量小的马尾松林大规模改造成巨桉人工林,可能会因为林分蒸腾作用增强而加重林地水分的散失,从而降低林地土壤含水量,导致该区域发生干旱。

本实验是在温室大棚盆栽条件下进行的,与自然环境条件下的蒸腾耗水情况有一定差异。受试对象为各树种幼苗,处于不同生长发育阶段的林木其耗水特性也有所不同。这些都有待进一步验证和完善。另外,本研究分别就各因子的效应进行了探讨,并未考虑因子间的互作关系,若要充分了解发展某一树种的最适环境条件,还需综合考虑多种因子进行全面分析。

4 结论

(1)巨桉等6个树种的光合蒸腾速率受环境因子影响较大,且不同树种对环境因子变化的响应方式和程度有所区别。进行造林规划时,应充分了解备选树种生物学特性,如光合、蒸腾及生长特点,根据造林地立地条件及造林用途选择适宜的树种,使得水分条件既满足林木生长的需要,又不影响区域生态平衡,实现经济生态效益的可持续发展。

(2)相同环境条件下,供试树种中巨桉的蒸腾速率最高,且单株叶面积较大,水分消耗较多,所以在降雨少且土壤水分条件差的地区应慎重发展。在降水较为充足的地区发展时应合理规划,并采用块状混交的方式,尽量不要大规模的替代当地乡土树种,以免对当地其它对水分变化敏感的树种造成影响进而影响当地的森林结构组成和群落演替。

References:

- [1] Hu T Y, Li C K. Research on the introduction of *Eucalyptus grandis* provenance. Journal of Sichuan Agricultural University, 1999, 17(1): 44-49.
- [2] Feng M S, Zhang J, Zhong Y. Vector diagnosis of nutrient balance of *Eucalyptus grandis* fast-growth plantation. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(2): 56-62.
- [3] Wang H G, Zhang J, Yang W S, Huang Q M, Zou P. A research on the allelopathic substances in root system and root system soil of *Eucalyptus grandis*. Journal of Sichuan Normal University: Natural Science, 2006, 29(3): 368-371.
- [4] Xie X J, Zhang J, Lai T, Feng M S. Studies on the above-ground biomass and productivity of the short rotation *Eucalyptus grandis* plantation. Journal of Sichuan Agricultural University, 2005, 23(1): 66-74.
- [5] Chen Q B. A review of researches on biodiversity in eucalyptus plantations. Chinese Journal of Tropical Crops, 2001, 22(4): 82-90.
- [6] Gao D, Hu T X, Wan X, Tang T Y, Chen L H. Allelopathic constituents from litterfall of *Eucalyptus grandis*. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25(2): 191-194.
- [7] Calder I R. Water use of eucalypts — a review with special reference to south India. Agricultural Water Management, 1986, 11(3/4): 333-342.
- [8] Shan L. Water use efficiency of plants and agricultural water use in semi-arid areas. Plant Physiology Communications, 1994, 30(1): 61-66.
- [9] Shi Q, Yu X X, Li W Y, You X L. Experiment of water consumption of water conservation forest by weighing methods. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(2): 84-87.
- [10] Wullschlegel S D, Hanson P J, Tschaplinski T J. Whole-plant water flux in understory red maple exposed to altered precipitation regimes. Tree Physiology, 1998, 18(2): 71-79.
- [11] Liu F J, Zheng S K, Ju G S, Edwards WRN, Wu Y D. A study comparison of measuring water-consumption for transpiration in poplar. Scientia Silvae Sinicae, 1997, 33(2): 117-126.
- [12] Xi R C, Ma L Y, Wang R H, Xu J L. Research advances in water consumption controlling mechanisms of forest tree species. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(6): 692-697.
- [13] Guo M X, Bi H X, Liu X, Li J, Guo C Y, Lin L L. Review on the water consumption of tree transpiration. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(4): 114-120.
- [14] Wang H T. Review of tree species water consumption. World Forestry Research, 2003, 16(2): 23-27.
- [15] Chen Y J, Chen Y N, Xue Y. The progress and perspective of study on water consumption of vegetation in arid region. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(6): 152-158.
- [16] Su J P, Kang B W. Research proceeding of trees transpiration in China. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(2): 177-186.
- [17] Qu Y P, Kang S Z, Zhang X T, Zhang B Z, Li S E. A review of methods for measurement of evapotranspiration from plants. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(3): 72-77.
- [18] Kramer P J, Boyer J S. Water Relations of Plants and Soils. San Diego: Academic Press, 1995.
- [19] Liu F J, Zheng S K, Ju G S. A measurement of sap flow in poplar by HPVR. Plant Physiology Communications, 1993, 29(2): 110-115.

- [20] Bao J J, Liu F. Research on the water-consuming value of evapotranspiration of plant communities. Inner Mongolia Environmental Protection, 2005, 17(1): 58-60.
- [21] Che W R, Ma L Y, Wang R H, Fan M, Duan J. Water consumption and transpiration for seedlings of three ornamental tree species in Beijing. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25(5): 609-613.
- [22] Yue G Y, Zhao H L, Zhang T H, Yun J Y, Niu L, He Y H. Characteristics of *Caragana microphylla* sap flow and water consumption under different weather conditions on Horqin sandy land of northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(10): 2173-2178.
- [23] Zhang N N, Xu D P, Morris J, Zhou G Y, Bai J Y, Zhou T. Water consumption of *Eucalyptus urophylla* plantations on the Leizhou Peninsula. Forest Research, 2007, 20(1): 1-5.
- [24] Zhao M, Li A D, Wang Y L, Zhang D K, Jia B Q. A study on relations between transpiration of psammophyte and the meteorological components. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003, 17(6): 131-137.
- [25] Peñuelas J, Filella I, Llusà J, Siscart D, Piñol J. Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*. Journal of Experimental Botany, 1998, 49(319): 229-238.
- [26] Zhou P, Li J Y, Zhao L J. Characteristics of seedlings water consumption by transpiration of main afforestation tree species in north China. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5/6): 50-55.
- [27] Zhang X S, Liu Y H. Study on the water consumption of main afforestation trees in Guizhou Karst Mountainous Regions. Guizhou Forestry Science and Technology, 2005, 33(4): 25-27, 40-40.
- [28] Calder I R. Water use of *eucalyptus* — a review//Calder I R, Hall R I, eds. Growth and Water Use of Forest Plantation. England, Chichester: John Wiley and Sons, 1992: 167-179.
- [29] Ma D, Li J Y, Lin P. Primary studies on water consumption of man-made forest in mountain area in Beijing. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 48-51.
- [30] Kong J J, Jia L M, Li G D. Advances in the researches of exterior effect factors on tree water consumption. World Forestry Research, 2007, 20(1): 16-21.
- [31] Macarthur R H, Connell J H. The Biology of Populations. New York: Wiley and Sons Press, 1966.
- [32] Yu X T, Lu J H. A comparative study on the photosynthetic rates of different provenances of Masson's Pine. Journal of Fujian College of Forestry, 1991, 11(2): 131-135.
- [33] Nunes M A, Ramalho J D C, Dias M A. Effect to nitrogen supply on the photosynthetic performance of leaves from coffee plants exposed to bright light. Journal of Experimental Botany, 1993, 44(5): 893-899.
- [34] Wang Y, Wei X L. Advance on the effects of different light environments on growth, physiological biochemistry and morphostructure of plant. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2010, 29(4): 353-359, 370-370.
- [35] Liu S M, Sun B Y, Sun C Z. Relationship between *Pinus tabulaeformis* transpiration and environmental elements. Journal of Northwest Forestry University College, 1999, 14(4): 27-30.
- [36] Li H J, Wu Y H, Zhang Z X, Liu P, Zhang D, Zheng C H, Huang B W, Liu J L, Zhang J Y. Effect of temperature stress on photosynthetic physioecological characteristic of wood plants. Guizhou Agricultural Sciences, 2009, 37(9): 39-42, 45-45.
- [37] Yang J Y, Yang W Q, Wang K Y, Sun J P. Woody plants respond to interactions between elevated CO₂ and increased temperature. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(3): 304-310.
- [38] Qie Y B, Lai N N, Lin Y. Study on the water consumption of common used arbor species in Beijing. Modern Landscape Architecture, 2009, (7): 14-17.
- [39] Yang T, Liang Z S, Xue J Q, Kang S Z. Water consumption characteristics and water use efficiency of different maize varieties under drought stress. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(5): 103-107.

参考文献:

- [1] 胡天宇, 李臣坤. 巨桉种源引种选择研究. 四川农业大学学报, 1999, 17(1): 44-49.
- [2] 冯茂松, 张健, 钟宇. 巨桉短周期工业原料林养分平衡的矢量诊断. 林业科学, 2006, 42(2): 56-62.
- [3] 王晗光, 张健, 杨婉身, 黄乾明, 邹平. 巨桉根系和根系土壤化感物质的研究. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2006, 29(3): 368-371.
- [4] 谢贤健, 张健, 赖挺, 冯茂松. 短轮伐期巨桉人工林地上部分生物量和生产力研究. 四川农业大学学报, 2005, 23(1): 66-74.
- [5] 陈秋波. 桉树人工林生物多样性研究进展. 热带作物学报, 2001, 22(4): 82-90.
- [6] 高丹, 胡庭兴, 万雪, 唐天云, 陈良华. 巨桉枯落物化感物质的研究. 浙江林学院学报, 2008, 25(2): 191-194.
- [8] 山仑. 植物水分利用效率和半干旱地区农业用水. 植物生理学通讯, 1994, 30(1): 61-66.

- [9] 石青, 余新晓, 李文宇, 有祥亮. 水源涵养林林木耗水称重法试验研究. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 84-87.
- [11] 刘奉觉, 郑世锴, 巨关升, Edwards WRN, 吴衍德. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究. 林业科学, 1997, 33(2): 117-126.
- [12] 奚如春, 马履一, 王瑞辉, 徐军亮. 林木耗水调控机理研究进展. 生态学杂志, 2006, 25(6): 692-697.
- [13] 郭孟霞, 毕华兴, 刘鑫, 李俊, 郭超颖, 林靛靛. 树木蒸腾耗水研究进展. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 114-120.
- [14] 王华田. 林木耗水性研究述评. 世界林业研究, 2003, 16(2): 23-27.
- [15] 陈永金, 陈亚宁, 薛燕. 干旱区植物耗水量的研究与进展. 干旱区资源与环境, 2004, 18(6): 152-158.
- [16] 苏建平, 康博文. 我国树木蒸腾耗水研究进展. 水土保持研究, 2004, 11(2): 177-186.
- [17] 屈艳萍, 康绍忠, 张晓涛, 张宝忠, 李思恩. 植物蒸发蒸腾量测定方法述评. 水利水电科技进展, 2006, 26(3): 72-77.
- [19] 刘奉觉, 郑世锴, 巨关升. 用热脉冲速度记录仪(HPVP)测定树干液流. 植物生理学通讯, 1993, 29(2): 110-115.
- [20] 包俊江, 刘芳. 植物群落蒸散耗水量研究进展. 内蒙古环境保护, 2005, 17(1): 58-60.
- [21] 车文瑞, 马履一, 王瑞辉, 樊敏, 段劼. 北京3个园林观赏树种苗木耗水特性初探. 浙江林学院学报, 2008, 25(5): 609-613.
- [22] 岳广阳, 赵哈林, 张铜会, 云建英, 牛丽, 何玉惠. 不同天气条件下小叶锦鸡儿茎流及耗水特性. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2173-2178.
- [23] 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.
- [24] 赵明, 李爱德, 王耀琳, 张德魁, 贾宝全. 沙生植物的蒸腾耗水与气象因素的关系研究. 干旱区资源与环境, 2003, 17(6): 131-137.
- [26] 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.
- [27] 张晓珊, 刘延惠. 贵州喀斯特山地主要造林树种生长耗水量研究. 贵州林业科技, 2005, 33(4): 25-27, 40-40.
- [29] 马达, 李吉跃, 林平. 北京山区造林树种耗水规律初探. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 48-51.
- [30] 孔俊杰, 贾黎明, 李广德. 影响树木蒸腾耗水的外部因子研究进展. 世界林业研究, 2007, 20(1): 16-21.
- [32] 俞新妥, 卢建煌. 不同种源马尾松光合能力的比较研究. 福建林学院学报, 1991, 11(2): 131-135.
- [34] 王艺, 韦小丽. 不同光照对植物生长、生理生化和形态结构影响的研究进展. 山地农业生物学报, 2010, 29(4): 353-359, 370-370.
- [35] 刘淑明, 孙丙寅, 孙长忠. 油松蒸腾速率与环境因子关系的研究. 西北林学院学报, 1999, 14(4): 27-30.
- [36] 李洪军, 吴玉环, 张志祥, 刘鹏, 张丹, 郑春浩, 黄帮文, 刘菊莲, 张家银. 温度变化对木本植物光合生理生态的影响. 贵州农业科学, 2009, 37(9): 39-42, 45-45.
- [37] 杨金艳, 杨万勤, 王开运, 孙建平. 木本植物对CO₂浓度和温度升高的相互作用的响应. 植物生态学报, 2003, 27(3): 304-310.
- [38] 郅怡彬, 赖娜娜, 蔺艳. 北京常用园林乔木耗水特性的研究. 农业科技与信息: 现代园林, 2009, (7): 14-17.
- [39] 杨涛, 梁宗锁, 薛吉全, 康绍忠. 干旱胁迫下不同玉米品种的耗水特性及其水分利用效率的差异. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5): 103-107.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 12 June, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Temporal and spatial dynamic changes and landscape pattern response of Hemeroby in Dayang estuary of Liaoning Province, China	SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, WU Tao, et al (3645)
Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland	ZHANG Qianjun, YU Xiubo, QIAN Jianxin, et al (3656)
Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City	FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al (3670)
Driving forces analysis for ecosystem health status of littoral zone with dikes: a case study of Lake Taihu	YE Chun, LI Chunhua, WANG Qiuguang, et al (3681)
The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff from green roofs	WANG Shumin, HE Qiang, ZHANG Junhua, et al (3691)
Effects of slope gradient on the community structures and diversities of soil fauna	HE Xianjin, WU Pengfei, CUI Liwei, et al (3701)
Investigation of populations of parasitic wasps parasitizing <i>Carposina sasakii</i> Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae) in jujube orchards in China, with respect to the wasp-host relationship	YAO Yanxia, ZHAO Wenxia, CHANG Jupu, et al (3714)
Assessment of ardeidae waterfowl habitat suitability based on a binary logistic regression model	ZOU Lili, CHEN Xiaoxiang, HE Ying, et al (3722)
Combined effects of temperature, salinity and pH on the clearance rate of juveniles of <i>Pinctada martensii</i> (Dunker)	ZHU Xiaowen, WANG Hui, LIU Jin, et al (3729)
Soil nutrient dynamics and loss risks in a chicken-forage mulberry-medicinal plant intercropping system	ZHAO Liping, YANG Guiming, ZHAO Tongke, et al (3737)
Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe river	ZHANG Junhua, LI Guodong, NAN Zhongren (3745)
Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed	QIU Linjing, ZHENG Fenli, YIN Runsheng (3754)
Impacts of grid sizes on urban heat island pattern analysis	GUO Guanhua, CHEN Yingbiao, WEI Jianbing, et al (3764)
Landscape connectivity analysis for the forest landscape restoration: a case study of Gongyi City	CHEN Jie, LIANG Guofu, DING Shengyan (3773)
Carbon footprint analysis on urban energy use: a case study of Xiamen, China	LIN Jianyi, MENG Fanxin, CUI Shenghui, et al (3782)
The ecological footprint of alpine pastures at the village-level: a case study of Hezuo in Gannan Autonomous Prefecture, China	WANG Lucang, GAO Jing (3795)
The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu	LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al (3806)
The biomass of <i>Bashania fargesii</i> in giant pandas habitat in Qinling Mountains	DANG Kunliang, CHEN Junxian, SUN Feixiang, et al (3816)
Effects of salinity on seed germination and seedling growth in halophyte <i>Limonium aureum</i> (L.) Hill	YOU Jia, WANG Wenrui, LU Jin, et al (3825)
Liana-host tree associations in the tropical montane primary forest and post-harvest forest of Bawangling, Hainan Island, China	LIU Jinxian, TAO Jianping, HE Zeet al (3834)
The response of photosynthetic characters and biomass allocation of <i>P. bournei</i> young trees to different light regimes	WANG Zhenxing, ZHU Jinmao, WANG Jian, et al (3841)
Genetic variation among populations of the endangered <i>Sinocalycanthus chinensis</i> based on morphological traits and ISSR profiles	JIN Zexin, GU Jingjing, LI Junmin (3849)
Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter	JIANG Qingbiao, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (3859)
Age structure and spatial distribution of the rare and endangered plant <i>Alcimandra cathartii</i>	YUAN Chunming, MENG Guangtao, FANG Xiangjing, et al (3866)
The water consumption and water use efficiency of the seedlings of <i>Eucalyptus grandis</i> and other five tree species in Sichuan Province	HU Hongling, ZHANG Jian, WAN Xueqin, et al (3873)
Effects of leaf litter of <i>Cinnamomum septentrionale</i> on growth and resistance physiology of <i>Brassica rapa</i> in the decomposition process of litter	HUANG Weiwei, HU Tingxing, ZHANG Niannian, et al (3883)
Water transport velocity and efficiency in <i>Quercus variabilis</i> detected with deuterium tracer and thermal dissipation technique	SUN Shoujia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (3892)
The saxicolous moss's features of absorbing water and its structural adaptability in the heterogeneous environment with rock desertification	ZHANG Xianqiang, ZENG Jianjun, CHEN Jinwu, et al (3902)
Effects of organic materials containing copper on soil enzyme activity and microbial community	CHEN Lin, GU Jie, GAO Hua, et al (3912)
Comparison of floral morphology and pollination characteristics between the sexes in <i>Eurya obtusifolia</i>	WANG Qian, DENG Hongping, DING Bo, et al (3921)
Climatic suitability of potential spring maize cultivation distribution in China	HE Qijin, ZHOU Guangsheng (3931)
Effects of uniconazole dry seed dressing on nitrogen accumulation and translocation and kernel protein quality in wheat	FAN Gaoqiong, YANG Ennian, ZHENG Ting, et al (3940)
Review and Monograph	
International comparison and policy recommendation on the development model of industrial symbiosis in China	SHI Lei, LIU Guoguo, GUO Siping (3950)
Scientific Note	
The Change of landscape pattern in Zhenlai Xian, Jilin Province in recent ten years	ZHANG Guokun, LU Jinghua, SONG Kaishan, et al (3958)
Footprint analysis of turbulent flux over a poplar plantation in Northern China	JIN Ying, ZHANG Zhiqiang, FANG Xianrui, et al (3966)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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 70 元/册,全年定价 1680 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

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 32 卷 第 12 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 12 (June, 2012)

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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