

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第12期 Vol.33 No.12 **2013**

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 33 卷 第 12 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 森林低温霜冻灾害干扰研究综述 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等 (3563)
- 碱蓬属植物耐盐机理研究进展 张爱琴, 庞秋颖, 阎秀峰 (3575)

个体与基础生态

- 中国东部暖温带刺槐花期空间格局的模拟与预测 徐琳, 陈效速, 杜星 (3584)
- 长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化 胡启鹏, 郭志华, 孙玲玲, 等 (3594)
- 油松天然次生林居群遗传多样性及与产地地理气候因子的关联分析 李明, 王树香, 高宝嘉 (3602)
- 施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响 张蕊, 王艺, 金国庆, 等 (3611)
- 围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响 王若梦, 董宽虎, 何念鹏, 等 (3622)
- 干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应 段爱国, 张建国, 何彩云, 等 (3630)
- 生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响 黄杰勋, 莫建民, 李非里, 等 (3639)
- 3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应 吴芹, 张光灿, 裴斌, 等 (3648)
- 冬小麦节水栽培群体“穗叶比”及其与产量和水分利用的关系 张永平, 张英华, 黄琴, 等 (3657)
- 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响 彭斌, 李潘林, 周楠, 等 (3668)
- 根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响 陶先萍, 罗宏海, 张亚黎, 等 (3676)
- 光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响 王文林, 王国祥, 万寅婧, 等 (3688)
- 植物病原菌拮抗性野生艾蒿内生菌的分离、筛选和鉴定 徐亚军, 赵龙飞, 陈普, 等 (3697)
- 不同生物型棉蚜对夏寄主葫芦科作物的选择 肖云丽, 印象初, 刘同先 (3706)
- 性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响 曾宾宾, 邵明勤, 赖宏清, 等 (3712)

种群、群落和生态系统

- 基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价 袁菲, 张星耀, 梁军 (3722)
- 洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价 李建军, 刘帅, 张会儒, 等 (3732)

景观、区域和全球生态

- 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应 徐宁, 王晓春, 张远东, 等 (3742)
- 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等 (3752)
- 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响 侯明行, 刘红玉, 张华兵, 等 (3765)
- 毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征 周淑琴, 荆耀栋, 张青峰, 等 (3774)
- 贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5 kaB. P. 以来的气候变化 杜荣荣, 陈敬安, 曾艳, 等 (3783)

典型河谷型城市春季温湿场特征及其生态环境效应..... 李国栋,张俊华,王乃昂,等 (3792)

秦岭南北近地面水汽时空变化特征..... 蒋 冲,王 飞,喻小勇,等 (3805)

露天矿区景观生态风险空间分异..... 吴健生,乔 娜,彭 建,等 (3816)

基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较 孔 艳,江 洪,张秀英,等 (3825)

资源与产业生态

中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析 潘 丹,应瑞瑶 (3837)

舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估..... 宋 科,赵 晟,蔡慧文,等 (3846)

不同基因型玉米间混作优势带型配置..... 赵亚丽,康 杰,刘天学,等 (3855)

气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响..... 陈 伟,熊 晶,陈 懿,等 (3865)

城乡与社会生态

成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益 张艳丽,费世民,李智勇,等 (3878)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 长白山南坡的岳桦林——长白山岳桦林位于海拔约 1700—2000m 之间的山坡。这种阔叶林分布在针叶林带的上面,成为山地森林的上缘种类,在世界山地森林中实属罕见。岳桦能够顽强地抗御长白山潮湿、寒冷、强风等恶劣气候因素,在严酷的环境条件下形成纯林,是与其独特的生长发育机理密切相关的。岳桦的枝干颇具韧性,在迎风处,由于风吹雪压,树干成片地向背风侧倾斜,这种特性使它能不畏风雪,顽强生存。随着海拔的升高,岳桦林也逐渐矮化,这是岳桦林保护自身生存,适应大自然的结果。

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/stxb201204080490

段爱国, 张建国, 何彩云, 刘娟娟, 曾艳飞, 崔永忠, 李昆. 干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应. 生态学报, 2013, 33(12): 3630-3638.

Duan A G, Zhang J G, He C Y, Liu J J, Zen Y F, Cui Y Z, Li K. Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha River. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3630-3638.

干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应

段爱国¹, 张建国^{1,*}, 何彩云¹, 刘娟娟¹, 曾艳飞¹, 崔永忠², 李 昆²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 昆明 650224)

摘要: 植物光合与水分生理特征是植物逆境适应能力评价的重要参考指标。极端生境下, 坡位的选择有时成为造林成败的关键。探讨了元谋金沙江干热河谷 9 个主要造林树种光合与蒸腾作用在不同坡位间的空间差异及干热季向湿润季转换的时序差异。结果表明, 低的坡位有助于树种维持相对高的净光合速率, 且树种不同, 由坡位引起的光合增益效应亦具有较大差别; 低坡位的光合增益效应在干热季更为明显, 而在湿润季, 干热胁迫解除, 低坡位的光合增益效应具有较大程度的降低; 在不同坡位间发生的光合限制主要受非气孔因素主导。无论在干热季或湿润季, 与净光合速率的变化情形一致, 低的坡位均促进了树种的蒸腾速率。水分利用效率受坡位的影响较为复杂, 因树种、季节而异。

关键词: 干热河谷; 干热胁迫; 净光合速率; 蒸腾速率; 水分利用效率; 坡位效应

Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha River

DUAN Aiguo¹, ZHANG Jianguo^{1,*}, HE Caiyun¹, LIU Juanjuan¹, ZENG Yanfei¹, CUI Yongzhong², LI Kun²

1 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

2 Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China

Abstract: Plant photosynthesis and transpiration are important reference indices for evaluating adaptable ability in adverse habits. In extreme growth environment, the selection of slope position is often becoming the key factor determining the success or failure of reforestation. Valley-type savanna is a unique type of savanna that develops in deep-incised river valleys, such as those of the dry-hot valleys in the Hengduan Mountains, southwest China, and the total area of this type in China is approximately $3.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$. In the dry-hot valleys of China, the dry-hot valley of Jingsha River is typical, where the environment shows the changes from dry-hot to wet weather in one year, and because of its long dry-hot season, tree species often are difficult to survive and grow well. In this study, based on the consideration that different slope positions have different soil and atmosphere condition in the extreme habitat, the effects of slope position on photosynthesis and transpiration of nine main tree species for vegetation restoration in dry-hot season and wet season of the dry-hot river valleys were analyzed. The trial tree species include nine species, there are *Azadirachta indica* A. Juss., *Leucaena glauca* L. Benth., *Tephrosia candida* DC., *Eucalyptus camaldolensis* Dehn., *Acacia auriculiformis* A. Cunn., *Melia toosenden* Sieb. et Zucc., *Dodonaea viscosa* L. Jacq., *Phyllanthus emblica* L. and *Jatropha curcas* L. These tree species all grow in fields. The results showed that: comparing with upper slope position, lower slope position was in favor of keeping leaf net

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201104002-3); 国家林业局林业重点工程科技支撑项目(2004-6)

收稿日期: 2012-04-08; 修订日期: 2013-03-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjg@forestry.ac.cn

photosynthetic rate (P_n) a relative high level, but this favorable effect of lower slope position on P_n had obvious difference among different tree species. The effect of slope position on P_n was more obvious in dry-hot season than in wet season, while in wet season the favorable effect of lower slope position on P_n decreased at great extent because the dry-hot stress got relieved. Photosynthesis restriction, induced by raise of slope position, was mainly controlled by non-stomatal factor. Whether in dry-hot season or wet season, lower slope position both promoted transpiration rate (Tr) of the tested tree species, which was accordant with the change of P_n . The change of water use efficiency (WUE) with different slope positions was relatively complicated, the effects were different among different tree species and between the two seasons. It is obvious that the lower slope position benefits the photosynthesis of the tested tree species, and which helps trees to spend the dry-hot season. Because water deficit is one of the main factors that restrict the growth of tree species for vegetation restoration in the dry-hot valley of Jingsha River, and the leaf water potential of trees in lower slope position is more higher than in upper slope position, it can be known that the difference of water condition may be the main factor that cause the difference of photosynthesis in different slope positions.

Key Words: dry-hot river valley; dry-hot stress; net photosynthetic rate; transpiration rate; water using efficiency; slope position

干热河谷的概念最早来源于云南当地所称的“干坝子”或“干热坝子”^[1]。我国干热河谷主要分布于金沙江、元江、怒江、南盘江等沿江的四川攀枝花、云南和贵州等地区^[2],该区气候干旱炎热,土壤养分与水分亏缺严重^[3],是我国典型的生态脆弱区和造林极端困难地带。更为重要的是,干热河谷地处长江上游,防治该区正发生的严重水土流失已成为我国长江流域生态环境治理的重点与难点。

植物叶片光合作用和蒸腾作用是土壤-植物-大气系统(SPAC: soil-plant-atmosphere continuum)中物质与能量运转的关键环节或枢纽,胁迫条件下植物光合与水分生理特征可作为其适应性评价的理论依据^[4]。自国家“七五”时期以来,围绕干热河谷区生态植被的恢复,国内学者展开了大量的科学试验工作,重点在立地分类评价^[5-6]、造林树种选择^[7-10]及造林技术^[11-13]等方向取得明显进展。但受限于研究工作的阶段性及研究手段的缺乏,对干热河谷生境条件下主要造林树种的光合与水分生理特性仅有少量研究^[9,14],仍缺乏足够探讨,以致难以深入揭示所选造林树种适生或不适生的内在机理。

坡位在造林规划设计中是重要的划分单元,在极端生境条件下,造林树种坡位的选择有时成为造林成败的关键。在干热河谷区,以往造林试验中亦常发现不同坡位适宜生长的树种具有较大差别^[7],但对坡位引起造林树种生长差异的生理机制缺乏深入探讨。鉴于此,本研究以金沙江干热河谷元谋县境内生长的9个野外生长树种为试材,探讨了干热季及湿润季典型晴天里不同树种在不同坡位的净光合速率、蒸腾速率及水分利用效率大小变化规律,以揭示干热河谷主要造林树种生理生态特性的坡位效应,为该区造林树种生态适应幅度及选择提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于云贵高原云南省境内金沙江中段的元谋县,地处云南省北部,位于东经 $101^{\circ}52'$ — $102^{\circ}00'$,北纬 $25^{\circ}40'$ — $26^{\circ}00'$ 之间,海拔约1 100 m,属典型的干热河谷气候特征,雨季约5个月(6—10月),降水集中,但连续降雨日数较少,昼夜温差不大,空气闷热;干季6—7个月(11月—翌年5月),主要为3—5月,年降水量613.9 mm,其中6—10月份降雨占全年降水量的92%,年蒸发量3 847.8 mm,年均空气相对湿度53%。试验区土壤干旱瘠薄,水肥条件极差。自然植被以草丛为主,杂以灌木,稀少乔木,称为半自然稀树草原或稀树灌草丛。

1.2 试验材料

测定生长于上、中、下3个不同坡位的野外试验树种9个,包括有印楝(*Azadirachta indica* A. Juss)、新银合

欢(*Leucaena glauca* (L.) Benth.)、山毛豆(*Tephrosia candida* DC.)、赤桉(*Eucalyptus camaldolensia* Dehn.)、大叶相思(*Acacia auriculiformis* A. Cunn.)、川楝(*Melia toosenden* Sieb. et Zucc.)、车桑子(*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq.)、余甘子(*Phyllanthus emblica* L.)、小桐子(*Jatropha curcas* L.)。除赤桉为萌生外,试验所采用的引进树种均栽植于2002年,测定时林龄为5a,所有树种均生长发育良好。不同坡位土壤均为燥红土,土层厚度均超过1 m,坡度约35°,上坡与中坡、中坡与下坡高差30m左右。

1.3 研究方法

选取各供试树种典型单株并挂牌,测定前先固定各单株树冠中部四周2—4个典型小枝上的健康叶片,其中,对于冠层较小的树种如车桑子选取2片叶,冠层较大的树种如赤桉则在4个方位均选取一个叶片,采用红线予以标记作长期观测。选择干热季(5月份)、湿润季(10月份)的连续典型晴天(表1),采用Licor-6400便携式光合测定系统测定供试树种的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(Cond)及细胞间 CO_2 浓度(C_i),记录测定时的大气温度(T)、相对湿度(RH)及光合有效辐射(PAR)。干热季测定时间为8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00,湿润季测定时间为8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00。干热季测定大叶相思、新银合欢、印楝等5个树种,在湿润季,补充测量了赤桉、余甘子、车桑子和山毛豆等4个树种。各树种在干热季和湿润季典型晴天 P_n 及 T_r 均以8:00至18:00时段内测定值的算术平均数作为日变化平均值,采用 P_n 日均值与 T_r 日均值的比值作为树种WUE的平均值,对各树种树冠外围叶片 P_n 、 T_r 、WUE日变化平均值采用SPSS统计软件进行差异显著性分析。

表1 元谋干热河谷不同季节典型晴天主要气象因子概况

Table 1 The main weather factors of Yuanmou dry-hot river valley on typical sunny day in dry-hot and wet seasons

时间 Time	5月 May			10月 October		
	温度 Temperature /°C	相对湿度 Relative humidity/%	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation /(mmol m ⁻¹ s ⁻¹)	温度 Temperature /°C	相对湿度 Relative humidity/%	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation /(mmol m ⁻¹ s ⁻¹)
8:00	33.20	21.75	1185.29	24.22	53.55	108.33
10:00	37.31	16.61	1649.80	33.13	41.62	689.67
12:00	40.13	10.76	1804.00	32.25	33.24	1348.00
14:00	40.52	10.57	1783.50	35.91	36.38	1835.33
16:00	39.62	11.69	1531.90	35.67	35.66	1331.75
18:00	35.79	15.08	1150.00	30.00	36.83	115.20
20:00	32.74	19.62	5.00			

2 结果与分析

2.1 P_n 、Cond 及 C_i 坡位效应

2.1.1 干热季 P_n 、Cond 及 C_i 坡位效应

图1描述了5月干热季节典型晴天里元谋干热河谷区野外坡地不同坡位5个树种的 P_n 、Cond、 C_i 和 T_r 的日变化进程。从图1可以看出,5个供试树种生长在坡底时的净光合速率均明显高于中坡或上坡,且坡底的新银合欢、印楝和川楝的净光合速率日变化的最高值分别出现在12:00、10:00、10:00,相对于上坡或中坡的同一树种而言, P_n 的日变化峰值有所延后,这可能与坡底较好的土壤水分条件及所受的大气干热胁迫程度相对较轻有关。新银合欢、川楝、大叶相思、印楝及小桐子等5个树种在坡底时的净光合速率日均值依次减小,分别为9.56、5.47、4.00、3.04 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 及2.65 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,比生长于相对高坡位的同一树种分别增加85.19%、64.20%、103.81%、138.98%及750.65%;有重复双因素方差分析结果表明(表2),新银合欢、大叶相思、印楝和小桐子的净光合速率日变化在不同坡位间具极显著差异,仅川楝差异不显著,但在8:00至14:00时段亦具极显著差异。这表明,在极度干热的生境里,试验树种的净光合速率受坡度影响较大,低的坡

位能显著提高树种的光合能力。同样是在干热的生境中,在中坡的小桐子光合值接近于 0,而在坡底却能达到 $2.65 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,这亦说明坡位的选择对树种在干热河谷的生存具有重要作用。

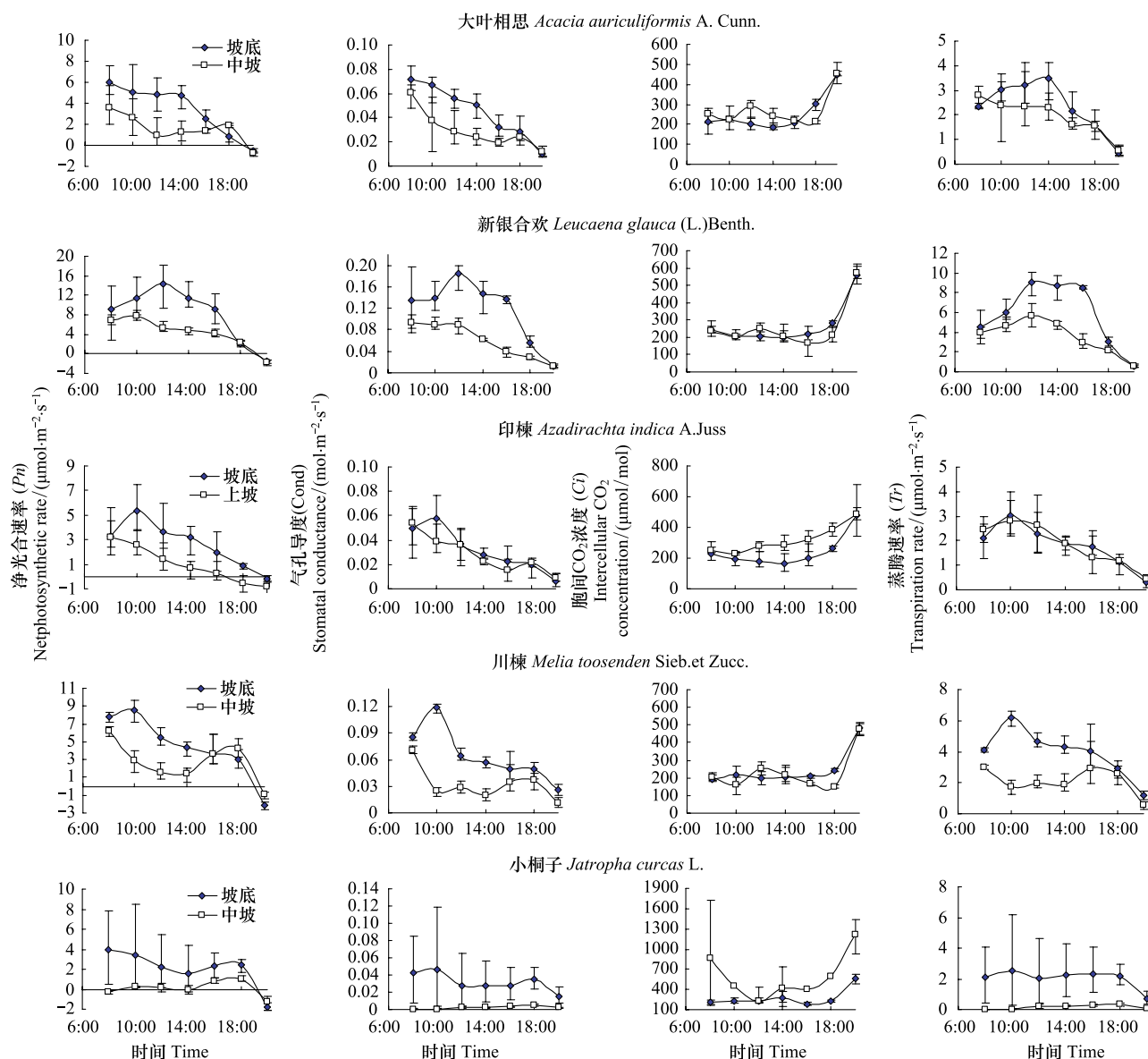


图1 5月干热季节典型晴天里元谋干热河谷区野外坡地不同坡位5个树种的净光合速率(P_n)、气孔导度(Cond)、细胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)日变化进程

Fig. 1 Comparison of daily change of net photosynthesis rate (P_n), stomatal conductance (Cond), intercellular CO_2 concentration (C_i) and transpiration rate (T_r) of 5 tree species at different slope locations of dry-hot river valley on typical sunny day in dry-hot May

从图1亦可看出,坡底的5个供试树种的气孔导度 Cond 要高于中坡或上坡,其中,新银合欢、大叶相思、小桐子均具极显著差异,川楝达显著差异水平,而印楝差异不显著;印楝和小桐子的 C_i 在不同坡位间分别达极显著和显著水平,另3个树种差异不显著(表2)。

2.1.2 湿润季 P_n 、Cond 及 C_i 坡位效应

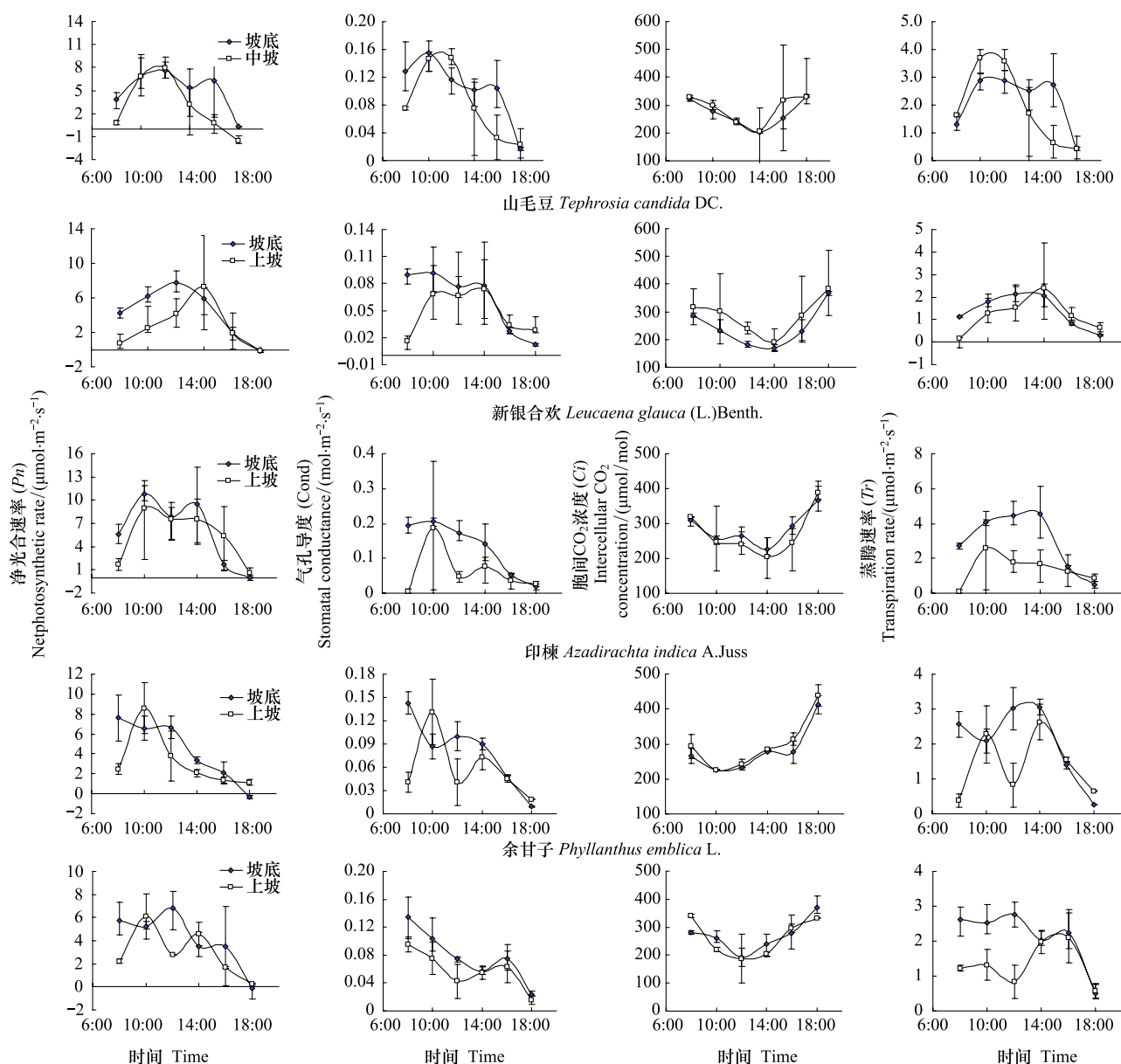
从图2可见,在湿润季节,不同坡位对树种光合参数亦具有不同程度的影响。在坡底部位,8个树种的净光合速率日变化平均值大小排序为赤桉>小桐子>新银合欢>大叶相思>车桑子>印楝>山毛豆>余甘子,其中,赤桉、小桐子和新银合欢的净光合速率日均值最大,分别达 6.83 、 6.35 、 $5.92 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,大叶相思与车桑子其次,分别为 $5.03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $4.94 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,印楝、山毛豆及余甘子最小且非常接近,分别为 4.34 、

4.31 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 4.12 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。按净光合速率日均值大小排列顺序,在坡底的 8 个供试树种的净光合速率日均值相对高坡位的同一树种分别增加了 51.67%、108.24%、11.83%、33.46%、80.44%、33.73%、57.43%、40.51%。可以看出,小桐子和车桑子增幅最为明显,但与在干热的 5 月份相比,小桐子、新银合欢、大叶相思及印楝的增幅明显下降。有重复双因素方差分析结果表明(见表 2),在湿润季节,坡底的小桐子、车桑子和余甘子的净光合速率极显著高于在相对高坡位的同一树种,大叶相思和山毛豆在两个不同的坡位间的净光合速率亦达显著差异,而印楝、新银合欢和赤桉在两个坡位间差异不显著。

这一结果表明,即使是在湿润季节,低的坡位亦有助于树种维持相对高的净光合速率,且这种低坡位的光合增益效应因树种而异;同时,干热季节低坡位的光合增益效应更为明显,而随着干热胁迫的解除,低坡位的光合增益效应具有较大程度的降低。

结合图 2 及表 2 可知,与净光合速率一样,在坡底的供试树种的气孔导度 Cond 相对高坡位的同一树种亦有所增加,其中,小桐子、新银合欢、余甘子和车桑子呈极显著增加,大叶相思亦表现为显著增加,而印楝、山毛豆及赤桉增加不显著。总的来说,8 个供试树种在湿润季节里的 C_i 值变化较小,变幅在 2%—15% 之间,山毛豆、赤桉、车桑子、大叶相思及印楝的 C_i 值在不同坡位间差异达显著或极显著水平,新银合欢、小桐子及余甘

大叶相思 *Acacia auriculiformis* A. Cunn.



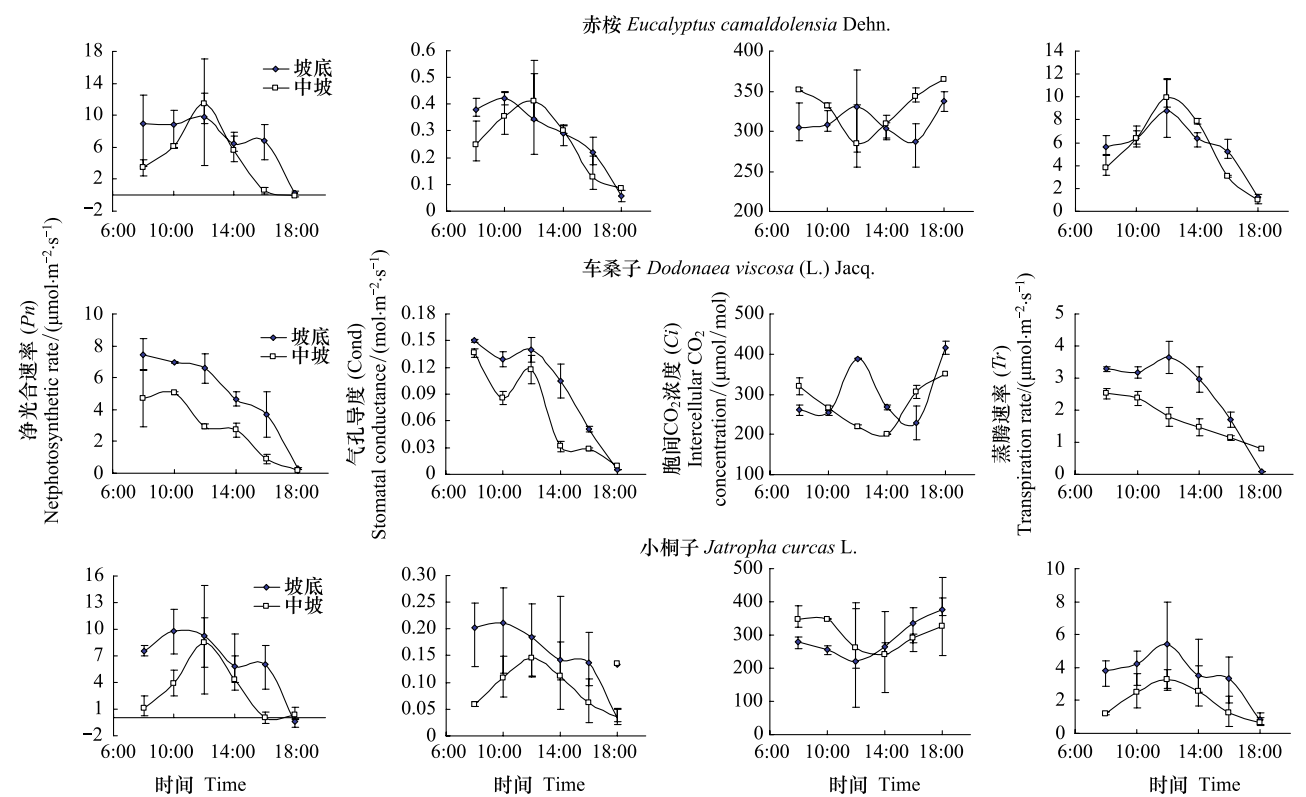


图2 10月湿润季节典型晴天里元谋干热河谷区野外坡地不同坡位8个树种的净光合速率(P_n)、气孔导度(Cond)、细胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)日变化进程

Fig.2 Comparion of daily change of net photosynthesis rate (P_n), stoma conductance (Cond), inter-cell concentration of CO_2 (C_i) and transpiration rate (T_r) of 8 tree species at different slope location of dry-hot river valley on typical sunny day in wet October

子等3个树种差异不显著。

表2 干热与湿润季节里不同供试树种在不同坡位的 P_n 、Cond 和 C_i 的有重复双因素方差分析

树种 Tree species	假定值 P -value					
	5月(干热季节) May (dry-hot season)			10月(湿润季节) October (wet season)		
	Net photosynthetic Rate (P_n)	Stomatal conductance (Cond)	Inter-cellular CO_2 concentration (C_i)	P_n	Cond.	C_i
新银合欢 <i>Leucaena glauca</i> (L.) Benth.	0.0011	0.0000	0.3979	0.5182	0.0021	0.2377
川楝 <i>Melia toosenden</i> Sieb. et Zucc.	0.1491	0.0287	0.4250			
大叶相思 <i>Acacia auriculiformis</i> A. Cunn.	0.0001	0.0000	0.1460	0.014	0.0379	0.0265
印楝 <i>Azadirachta indica</i> A. Juss	0.0002	0.3910	0.0012	0.1969	0.0703	0.0466
小桐子 <i>Jatropha curcas</i> L.	0.0029	0.0003	0.0150	0.0007	0.0016	0.2981
余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> L.				0.0017	0.0048	0.9332
车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> (L.) Jacq.				0.0004	0.0002	0.0165
赤桉 <i>Eucalyptus camaldolensia</i> Dehn.				0.1815	0.2603	0.0148
山毛豆 <i>Tephrosia candida</i> DC.				0.0258	0.0903	0.0021

由以上的分析可以看出,相对坡底,中坡或上坡供试树种 P_n 下降同时,Cond 亦下降,在绝大部分时刻 C_i 却上升,表明随着坡位的上升,树种光合限制的发生主要由非气孔限制因素主导,即更多地表现为光合细胞活

性下降。

2.2 *Tr*、WUE 坡位效应

2.2.1 干热季 *Tr*、WUE 坡位效应

表 3 描述了元谋试验区不同坡位的 5 个树种在 5 月干热季节时的蒸腾作用与水分利用效率日均值。从表 3 及图 1 可知,在干热季节,小桐子在坡底的蒸腾速率要远远高于中坡,增加了 11.18 倍,川楝、新银合欢及大叶相思在坡底时的蒸腾速率亦不同程度地增加,分别增加了 86.84%、63.93%、22.15%,印楝在不同坡位的蒸腾速率变化较为稳定。这表明低的坡位增强了树种的蒸腾速率。方差分析结果表明,川楝在不同坡位间蒸腾速率的差异达极显著水平($P<0.01$),小桐子与新银合欢达显著水平($P<0.05$),而印楝与大叶相思均未达显著水平($P>0.05$)。大叶相思与新银合欢在蒸腾速率提高的同时,其水分利用效率亦有所增加,分别增加了 66.86% 和 12.97%,其中大叶相思在坡底的水分利用效率极显著高于中坡($P<0.01$);印楝在坡底时水分利用效率显著上升($P<0.05$),上升幅度为 140.37%;而小桐子及川楝在坡底时水分利用效率下降,降幅分别为 30.14%、12.12%。

表 3 5 月干热季节时元谋试验区不同坡位试验树种的蒸腾速率(*Tr*)与水分利用效率(WUE)日均值

Table 3 Daily average of transpiration rate (*Tr*) and water using efficiency (WUE) of 5 tree species growing at different slope location in dry and hot May in Yunmou County

树种 Tree species	蒸腾速率 Transpiration rate/(mmol m ⁻² s ⁻¹)						水分利用效率 Water using efficiency/(μmol/mmol)					
	坡底 Bottom of slope			中坡或上坡 Middle or up slope			坡底 Bottom of slope			中坡或上坡 Middle or up slope		
	上限 Upper limit	下限 Lower limit	平均值 Average value	上限 Upper limit	下限 Lower limit	平均值 Average value	上限 Upper limit	下限 Lower limit	平均值 Average value	上限 Upper limit	下限 Lower limit	平均值 Average value
大叶相思	2.89	2.17	2.64	2.29	1.98	2.16	1.69	1.49	1.52	1.09	0.70	0.91
新银合欢	7.30	5.99	6.64	5.92	2.17	4.05	1.49	1.44	1.44	1.38	1.10	1.27
印楝	2.40	1.72	2.04	2.49	1.52	2.05	1.71	1.07	1.49	0.79	0.43	0.62
川楝	4.37	4.37	4.37	2.81	2.10	2.34	1.25	1.25	1.25	1.43	1.27	1.43
小桐子	4.37	0.76	2.23	0.22	0.16	0.18	1.25	0.73	1.19	2.33	0.87	1.70

2.2.2 湿润季 *Tr*、WUE 坡位效应

表 4 为湿润季节里 8 个试验树种在不同坡位时的蒸腾作用与水分利用效率日均值。由表 4 及图 2 可知,当处于水分条件相对较好的季节时,新银合欢、小桐子、余甘子、车桑子、印楝及山毛豆等 6 个树种在坡底的蒸腾速率均高于中坡或上坡,增幅依次减小,分别为 115.84%、85.96%、58.32%、49.72%、48.91%、15.73%,其中,新银合欢、余甘子、车桑子达极显著差异水平($P<0.01$),印楝达显著差异($P<0.05$),赤桉与大叶相思的蒸腾速率几乎没有变化。这表明,与干热季节一样,在湿润季节里低的坡位更加有利于树种的蒸腾作用,赤桉、大叶相思、山毛豆、车桑子、小桐子等 5 个树种在坡底时的水分利用效率高于中坡或上坡的同一树种,增幅分别达 44.43%、40.12%、36.02%、20.51%、11.98%,而新银合欢、余甘子及印楝相反,分别下降了 48.19%、11.25%、10.19%。其中,新银合欢及车桑子水分利用效率在 2 个不同坡位间达极显著差异($P<0.01$),山毛豆、赤桉、小桐子及大叶相思等 4 个树种亦达显著差异($P<0.05$),余甘子和印楝差异不显著($P>0.05$)。

3 结论与讨论

通过测定不同坡位生长树种在干热季与湿润季的叶片气体交换参数,以对坡位引起造林树种生长差异的生理机制进行探讨,结果发现:(1)低的坡位有助于树种维持相对高的净光合速率,且这种低坡位的光合增益效应因树种而异;在干热季节里,低坡位的光合增益效应更为明显,而随着湿润季节来临,干热胁迫解除,低坡位的光合增益效应具有较大程度的降低;由坡位差异形成的光合限制主要受非气孔因素主导。(2)无论在干热季或湿润季,与净光合速率的变化情形一致,低的坡位均有利于树种蒸腾速率的提高。(3)水分利用效率受坡位的影响较为复杂,因树种及季节而异。

表 4 10 月湿润季节时元谋试验区不同坡位试验树种的蒸腾速率(Tr)与水分利用效率(WUE)日均值

Table 4 Daily average of transpiration rate (Tr) and water using efficiency (WUE) of 8 tree species growing at different slope location in wet October in Yunmou County

树种 Tree species	蒸腾速率 Transpiration rate/(mmol m ⁻² s ⁻¹)						水分利用效率 Water using efficiency/(μmol/mmol)					
	坡底 Bottom of slope			中坡或上坡 Middle or up slope			坡底 Bottom of slope			中坡或上坡 Middle or up slope		
	上限 Upper limit	下限 Lower limit	平均值 Average value	上限 Upper limit	下限 Lower limit	平均值 Average value	上限 Upper limit	下限 Lower limit	平均值 Average value	上限 Upper limit	下限 Lower limit	平均值 Average value
大叶相思	2.33	1.87	2.12	2.34	2.10	2.22	2.55	1.81	2.38	1.68	1.71	1.70
山毛豆	1.51	1.30	1.37	1.78	0.67	1.19	3.18	2.88	3.14	2.31	1.67	2.22
新银合欢	3.13	2.73	2.97	1.83	0.97	1.38	2.21	1.66	1.99	3.48	4.32	3.84
印楝	2.26	1.86	2.06	1.76	1.01	1.39	2.32	1.84	2.10	2.42	2.21	2.34
余甘子	2.37	1.82	2.12	1.40	1.27	1.34	2.09	1.72	1.95	2.40	1.96	2.19
赤桉	6.35	5.10	5.62	6.01	5.01	5.35	1.35	1.00	1.22	0.85	0.73	0.84
车桑子	2.68	2.28	2.48	1.80	1.52	1.66	2.04	1.95	1.99	1.72	1.57	1.65
小桐子	4.84	2.13	3.53	2.28	1.49	1.90	1.82	1.75	1.80	1.67	1.49	1.61

在以往对相同试验点、相同试验树种叶水势时空变化的研究中已发现,与高的坡位相比较,低的坡位有利于树种叶水势维持在一个相对高的水平^[15],且土壤养分条件相对更好,这样坡位差异就导致了土壤养分、水分条件的差异,亦因此在元谋金沙江干热河谷,往往可以看到不同坡位生长的自然植被不同^[14]。本试验中供试树种在低坡位的 Pn 与 Tr 均高于高坡位,这一现象意味着低坡位相对良好的水分条件等环境因子更有利于供试树种与环境物质与能量的交换,亦说明在干热河谷区,植被恢复工作宜遵循先易后难原则,前期选择低坡位造林,确保取得成效,而后逐步向中、高坡位推进。而不同树种 Pn 与 Tr 坡位效应上的差异,无疑表明不同树种适宜生长的坡位生态幅度不一,造林时需根据具体坡位选择适宜造林树种,如小桐子,其在干热季中坡的光合与蒸腾作用几乎停滞,表现为不能进行正常的生理活动,故在元谋可能仅适宜于坡底或水分条件较好的地方造林。

References:

[1] Zhao J C. Studies on Economics of dry-Hot River Valley. Hongkong: Culture Publishing House of China, 1992: 1-3.

[2] Zhang R Z. dry-Hot River Valley in Crossing Mountainous Area. Beijing: Science Publishing House, 1996.

[3] Zhao L, Lang N J, Zheng K, Peng M J. A study on eco-environmental characteristics of Dry and Hot Valley of Yunnan province. Forest Inventory and Planning, 2006, 31(3): 114-117.

[4] Zhang J G, Li J Y, Sheng G F. Studies on Tree Drought Tolerance Characteristics and Mechanism. Beijing: Forest Publishing House of China, 2000.

[5] Zhang C Y, Zhu H Y, Wu S R. Land resources and it's development potential of dry-Hot Valley in Jinsha River. Mountain Research, 1996, 14(3): 188-193.

[6] Yang Z Q, Wang L X, Pan B C, Xie Y P. Site type division for conversion of cropland to forestland and management pattern of dry-Hot River Valley in the west of Pangzhihua City. Sichuan Forestry Exploration and Design, 2003, 2(2): 33-35.

[7] Li K, Zhang C H, Cui Y Z, Zhao Y H, Shi Y Z. A study on the fitting afforestation tree species during coverting the Land for Forestry in Hot and Arid Valley of Jinsha-river. Forest Research, 2004, 17(5): 555-563.

[8] Ma H C, Xu H, Cheng D Q, Zhou J, Ruan X J. Estimation of water consumption of a few kinds of Acacia and Eucalyptus in Yuanmou dry-Hot River Valley. Forest Science and Technology, 2000, (4): 9-11.

[9] Gao J, Liu C K, Zhang S Y. The estimation on drought tolerance of main silvicultural species in the dry-Hot River Valley of Yuanmou. Journal of Southwest Forestry College, 1997, 17(2): 19-23.

[10] Wang K Q, Qi J C. Studies on growth laws of *Eucalyptus camaldulensis* in Xerothermic Valleyin Yuanmou County, Yunnan, China. Journal of Southwest Forestry College, 2000, 20(2): 67-73.

[11] Zhang X B, Yang Z, Wen A B, Xiang G X, Lei C H. Micro-water harvesting technique to establish ever-green forests in the view area from

Panzhihua City Urban. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4): 6-9.

- [12] Lin W J, Ma H C, Zhou J. Study on water dynamics of different hydrogel treatments under drought stress. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(2): 121-123.
- [13] Ma H C. *New Technologies for Reforestation in dry-hot River Valleys*. Kunming: Yunnan Technology Publishing House, 2001.
- [14] Duan A G, Zhang J G, Zhang S G, Zhang J P, Wang J H, He C Y, Li Y. Transpiration of tree species for vegetation restoration in dry-hot river valleys. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6691-6701.
- [15] Duan A G, Zhang J G, Zhang J P, Wang J H. Spatial and temporal variations of water potential of the main tree species for vegetation restoration in the dry-hot Valleys of the Jinsha River. *Forest Research*, 2007, 20(2): 151-159.

参考文献:

- [1] 赵俊臣. 干热河谷经济学初探. 香港: 中国文化出版社, 1992: 1-3.
- [2] 张荣祖. 横断山区干旱河谷. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] 赵琳, 郎南军, 郑科, 彭明俊. 云南干热河谷生态环境特性研究. *林业调查规划*, 2006, 31(3): 114-117.
- [4] 张建国, 李吉跃, 沈国舫. 树木耐旱特性及其机理研究. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [5] 张映翠, 朱宏业, 吴仕荣. 金沙江干热河谷土地资源及其开发潜力. *山地研究*, 1996, 14(3): 188-193.
- [6] 杨再强, 王立新, 潘步昌, 谢以萍. 攀西干旱干热河谷退耕还林立地类型的划分及经营模式探讨. *四川林勘设计*, 2003, 2(2): 33-35.
- [7] 李昆, 张春华, 崔永忠, 赵一鹤, 施永泽. 金沙江干热河谷区退耕还林适宜造林树种筛选研究. *林业科学研究*, 2004, 17(5): 555-563.
- [8] 马焕成, 胥辉, 陈德强, 周蛟, 阮兴俊. 元谋干热河谷几种相思和桉树水分消耗量估测. *林业科技通讯*, 2000, (4): 9-11.
- [9] 高洁, 刘成康, 张尚云. 元谋干热河谷主要造林植物的耐旱性评估. *西南林学院学报*, 1997, 17(2): 19-23.
- [10] 王克勤, 起家聪. 元谋干热河谷赤桉林生长规律研究. *西南林学院学报*, 2000, 20(2): 67-73.
- [11] 张信宝, 杨忠, 王安邦, 向国喜, 雷彻虹. 微水造林建设攀枝花市视野区常绿森林植被. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 6-9.
- [12] 林文杰, 马焕成, 周蛟. 干旱胁迫下不同保水剂处理的水分动态研究. *水土保持研究*, 2004, 11(2): 121-123.
- [13] 马焕成. 干热河谷造林新技术. 昆明: 云南科技出版社, 2001.
- [14] 段爱国, 张建国, 张守攻, 张俊佩, 王军辉, 何彩云, 李燕. 干热河谷主要植被恢复树种蒸腾作用. *生态学报*, 2009, 29(12): 6691-6701.
- [15] 段爱国, 张建国, 张俊佩, 王军辉. 金沙江干热河谷主要植被恢复树种叶水势的时空变化规律. *林业科学研究*, 2007, 20(2): 151-159.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 12 Jun. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research on the disturbance of frost damage to forests LI Xiufen, ZHU Jiaojun, WANG Qingli, et al (3563)
- Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants ZHANG Aiqin, PANG Qiuying, YAN Xiufeng (3575)

Autecology & Fundamentals

- Simulation and prediction of spatial patterns of *Robinia pseudoacacia* flowering dates in eastern China's warm temperate zone
..... XU Lin, CHEN Xiaoqiu, DU Xing (3584)
- Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal Variation
..... HU Qipeng, GUO Zhihua, SUN Lingling, et al (3594)
- Analysis of genetic diversity of chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) natural secondary forest populations and correlation with theirs
habitat ecological factors LI Ming, WANG Shuxiang, GAO Baojia (3602)
- Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil
..... ZHANG Rui, WANG Yi, JIN Guoqing, et al (3611)
- Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia
..... WANG Ruomeng, DONG Kuanhu, HE Nianpeng, et al (3622)
- Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha
River DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, HE Caiyun, et al (3630)
- Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil
..... HUANG Jiexun, MO Jianmin, LI Feili, et al (3639)
- Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species
..... WU Qin, ZHANG Guangcan, PEI Bin, et al (3648)
- The ear-leaf ratio of population is related to yield and water use efficiency in the water-saving cultivation system of winter wheat
..... ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, et al (3657)
- Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density ...
..... PENG Bin, LI Panlin, ZHOU Nan, et al (3668)
- Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip
irrigation TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al (3676)
- The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots
..... WANG Wenlin, WANG Guoxiang, WAN Yinjing, et al (3688)
- Isolation, screening and characterization of phytopathogen antagonistic endophytes from wild *Artemisia argyi*
..... XU Yajun, ZHAO Longfei, CHEN Pu, et al (3697)
- Performance of the two host-biotypes of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on different cucurbitaceous host plants
..... XIAO Yunli, YIN Xiangchu, LIU Tongxian (3706)
- The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser
..... ZENG Binbin, SHAO Mingqin, LAI Hongqing, et al (3712)

Population, Community and Ecosystem

- Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry
..... YUAN Fei, ZHANG Xingyao, LIANG Jun (3722)
- Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake
..... LI Jianjun, LIU Shuai, ZHANG Huiru, et al (3732)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China
..... XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al (3742)

- Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al (3752)
- Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng
..... HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing, et al (3765)
- Vegetation landscape pattern change and characteristics of spatial distribution in south edge of Mu Us Sandy Land
..... ZHOU Shuqin, JING Yaodong, ZHANG Qingfeng, et al (3774)
- Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P.
..... DU Rongrong, CHEN Jing'an, ZENG Yan, et al (3783)
- Characteristics of temperature field, humidity field and their eco-environmental effects in spring in the typical valley-city
..... LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al (3792)
- Spatial and temporal variation of surface water vapor over northern and southern regions of Qinling Mountains
..... JIANG Chong, WANG Fei, YU Xiaoyong, et al (3805)
- Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area WU Jiansheng, QIAO Na, PENG Jian, et al (3816)
- The comparison of ecological geographica regionlization in China based on Holdridge and CCA analysis
..... KONG Yan, JIANG Hong, ZHANG Xiuying, et al (3825)
- Resource and Industrial Ecology**
- Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model PAN Dan, YING Ruiyao (3837)
- The emergy analysis of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan
..... SONG Ke, ZHAO Sheng, CAI Huiwen, et al (3846)
- Optimum stripe arrangement for inter-cropping and mixed-cropping of different maize (*Zea mays* L.) genotypes
..... ZHAO Yali, KANG Jie, LIU Tianxue, et al (3855)
- Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves
..... CHEN Wei, XIONG Jing, CHEN Yi, et al (3865)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of
Sha River, Chengdu ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, et al (3878)

《生态学报》2013 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,300 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 吴文良

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 33 卷 第 12 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 12 (June, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元