

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.007

红壤坡地自然恢复生态系统黄檀叶片 蒸腾特性与生理生态因子日变化

陈新芳¹, 陈 喜¹, 任立良¹, 张丹蓉¹, 关保华², 郑建伟³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 3. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要:为了揭示红壤坡地自然恢复生态系统碳-水耦合循环的生理生态机制, 采用 Licor-6400 (LICOR Lincoln USA) 便携式光合仪对中国科学院桃源农业生态试验站自然恢复生态系统中重要树种黄檀不同部位叶片的蒸腾速率以及主要生理生态因子进行了测定, 分析了黄檀叶片蒸腾速率的日变化规律, 估算了其水分利用效率, 并对蒸腾速率、水分利用效率与生理生态因子进行了相关分析和回归分析. 结果表明: (a) 蒸腾速率日变化表现为单峰型曲线, 同一生长季节不同部位叶片蒸腾速率的大小不同, 6 月下旬晴天, 蒸腾速率大小排序依次为上层叶、中层叶和下层叶; (b) 黄檀蒸腾作用与生理生态因子的关系随着叶片部位不同而有一定的差异, 黄檀蒸腾速率与气温、叶温、气孔导度、光合有效辐射和水汽压亏缺呈正相关关系, 与胞间 CO_2 浓度和相对湿度呈负相关关系; (c) 黄檀上层叶片水分利用效率日变化呈现单峰曲线, 最大水分利用效率出现在 14 00 左右, 中、下层叶片水分利用效率日变化都呈现双峰曲线, 且各层叶片最大水分利用效率都出现在 10 00 左右.

关键词: 黄檀 蒸腾速率 水分利用效率 生理生态因子

中图分类号: Q945.1 S792.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2011)01-0029-05

蒸腾速率, 作为定量衡量植物蒸腾特性的重要指标之一, 其大小在一定程度上反映了植物调节水分损失的能力及适应逆境的能力^[1-3]. 近年来, 随着对土壤-植物-大气连续体 (soil-plant-atmosphere continuum, SPAC) 系统研究的深入以及蒸腾测定方法和技术的进步^[4], 尤其是随着 Licor-6400 (LICOR Lincoln USA) 便携式光合仪在国内的广泛应用, 国内对植物蒸腾作用, 特别是乔木的蒸腾特性进行了较多的研究和报道^[2,3,5]. 由于乔木个体高大、生长年限长, 蒸腾作用不仅受树种、环境的影响, 而且还受到空间、树龄等多因素的控制, 所以不同地区的同种植物表现出不同的蒸腾生理特征^[4,6].

黄檀 (*Dalbergia hupeana* Hance), 作为热带和亚热带植被恢复、群落演替的重要树种^[7], 迄今未止, 国内有关红壤坡地自然恢复生态系统中主要树种黄檀的蒸腾特性和水分利用效率的研究鲜有报道. 本文研究分析了红壤坡地自然恢复生态系统中主要树种黄檀的蒸腾特性和水分利用效率的日变化, 并对影响黄檀蒸腾速率和水分利用效率的主要生理生态因子进行相关分析和回归分析.

1 研究地概况

中国科学院桃源农业生态试验站定位观测试验地点位于湖南省桃源县漳江镇宝洞峪村 (111°30' E, 28°55' N), 地处武陵山区向洞庭湖平原过渡的丘岗地带, 属湘西北丘陵区, 为中亚热带向北亚热带过渡地段, 气候系典型的亚热带湿润气候, 气候特点是冷热四季分明, 干湿两季明显; 年均气温 16.5℃, 年均降雨量 1440 mm, 年均相对湿度 82%, 年日照时数 1520 h, 海拔高度 92~125 m, 属典型低丘红壤分布区; 土壤类型为第四纪红土发育的红壤, 植被为武陵山植被区系. 试验林分是自然恢复植被小区, 小区投影面积 1 000 m², 即 20 m × 50 m. 郁闭度为 0.7~0.8, 林分平均胸径为 7.4 cm, 平均树高 7.5 m, 林内乔木层伴生树种主要有山鸡椒

收稿日期: 2010-03-31

基金项目: 教育部重大项目 (308012) 国家自然科学基金 (106950905111) 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2006CB40050X)

作者简介: 陈新芳 (1973—), 女, 河南南阳人, 讲师, 博士, 主要从事生态系统碳水循环模拟研究. E-mail: xinfangnju@yahoo.com.cn

(*Litaea cubeba* (Lour.) Pers)和盐肤木(*Rhus chinensis* Mill),灌木层树种主要有淡竹(*Lopnatner gracile* Beauv)、箬竹(*Zndocalamus longiavritus* Hand)、地茶(*Ardisia pusilla* A. Dc.)、继木(*Loropetalum chinense* (R. Br.) Oliver)和黄檀(*Dalbergia hupeana* Hance)幼木.自然恢复区自1995年清除地表植被之后就停止人为干预而使植被自然恢复,林分处于近自然状态,几乎无人为干扰.

2 研究方法

在自然恢复林分内选取具有代表性黄檀样木3株,在6月下旬(6月24—28日)选择晴天连续5个测定日,从8∶00—18∶00每隔1h测定1次,分别在黄檀树冠的上、中、下3层各选取3片叶,采用Licor-6400便携式光合仪进行光-蒸腾作用日进程观测,测定指标包括叶片的净光合速率、气温、叶温、光合有效辐射、空气相对湿度、胞间CO₂浓度、蒸腾速率、气孔导度和叶片水气压亏缺,重复5次.净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率计算公式为

$$P_n = \frac{F(c_r - c_s)}{100S} - c_sE$$

(1)

$$E = \frac{F(W_s - W_r)}{100S(1000 - W_s)}$$

(2)

$$R_{WUE} = \frac{P_n}{E}$$

(3)

式中:—— P_n 净光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; F ——气体流量, $\mu\text{mol}/\text{s}$; c_r, c_s ——对照与样品通道内CO₂浓度, $\mu\text{mol}/\text{mL}$; E ——蒸腾速率, $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; W_s, W_r ——样本室与参比室水汽摩尔分数, 10^{-3} ; S ——叶面积, cm^2 ; R_{WUE} ——水分利用效率, $\mu\text{mol}/\text{mmol}$.数据为3~5次测定值的平均值,利用SPSS统计软件进行变量分析,所得数据通过最小显著性检验,采用Excel 2003作图.

3 结果与分析

3.1 蒸腾速率的日变化

林冠层日平均蒸腾速率为 $0.62 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,变动系数为0.2.蒸腾速率最大值($1.63 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)出现在林冠顶层,最小值($0.19 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)出现在林冠下层.日平均蒸腾速率大小排序依次为林冠顶层($0.76 \pm 0.17 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、中层($0.57 \pm 0.09 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、下层($0.51 \pm 0.08 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$).方差分析表明,林冠内不同高度间的蒸腾速率差异极显著($p < 0.01, n = 76$).进一步多重比较表明,顶层与中层差异不显著($p = 0.05, n = 25$),顶层与下层差异显著($p = 0.01, n = 28$),中层与下层差异显著($p = 0.05, n = 28$).

从图1可以看出,黄檀日蒸腾速率变化表现为单峰型变化曲线,从8∶00开始,蒸腾速率逐步上升至峰值,各层叶片蒸腾速率的峰值都比较明显,上层和中层叶片蒸腾速率的峰值都出现在11∶00左右,下层叶片蒸腾速率的峰值出现在12∶00左右,然后各层叶片的蒸腾速率就逐渐下降,上层叶片蒸腾速率变化较剧烈,日变幅较大($1.23 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),中层叶片和下层叶片的蒸腾速率变化较平缓.

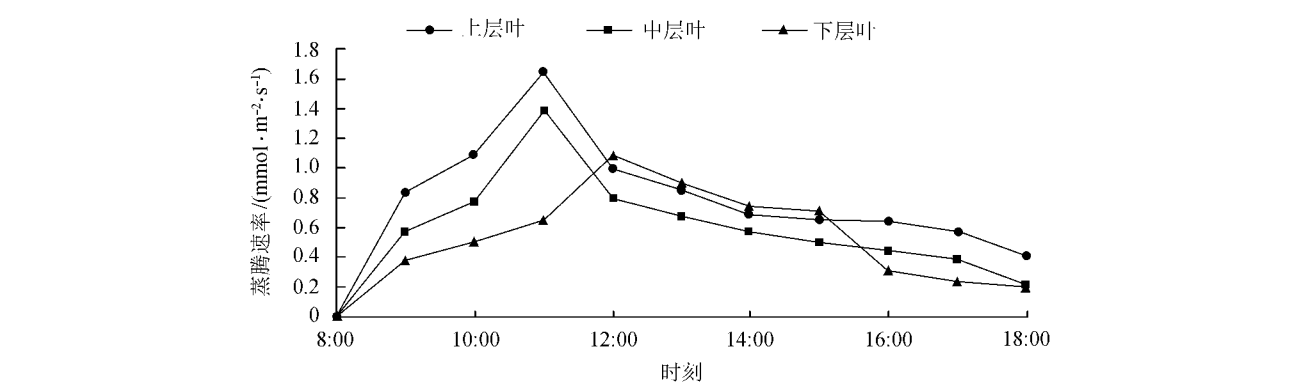


图1 黄檀蒸腾速率的日变化

Fig. 1 Diurnal variations of transpiration rate of *Dalbergia hupeana* Hance

3.2 黄檀蒸腾速率日变化与生理生态因子回归分析

对黄檀蒸腾速率与气温、叶温、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度、蒸腾速率、相对湿度、叶面水汽压亏缺和光合有效辐射进行逐步多元回归分析,结果见表 1.

表 1 黄檀蒸腾速率日变化与生理生态因子回归分析结果

Table 1 Regression analysis results of diurnal variation of transpiration rates and physio-ecological factors of <i>Dalbergia hupeana</i> Hance		
叶片部位	回归方程	R ²
上层叶	$y = 12.964 + 10.793x_1 + 1.01 \times 10^{-5}x_2 + 0.075x_3 + 0.147x_4 + 0.038x_5 - 0.042x_6 + 0.003x_7$	0.99
中层叶	$y = 2.894 + 17.653x_1 + 1.11 \times 10^{-5}x_2 + 0.098x_3 + 0.106x_4 + 0.027x_5 - 0.002x_6 + 0.001x_7$	0.97
下层叶	$y = 10.997 + 9.487x_1 + 0.21 \times 10^{-5}x_2 + 0.019x_3 + 0.196x_4 + 0.017x_5 - 0.078x_6 + 0.001x_7$	0.95

注 : y 为蒸腾速率 ; x_1 为气孔导度 ; x_2 为胞间 CO₂ 浓度 ; x_3 为叶面水汽压亏缺 ; x_4 为气温 ; x_5 为叶温 ; x_6 为相对湿度 ; x_7 为光合有效辐射.

从表 1 可以看出,黄檀蒸腾作用与生理生态因子的关系随着叶片部位不同而有一定的差异,说明黄檀蒸腾速率与生态因子关系复杂.从所有模型可以看出,黄檀蒸腾速率与叶温、气孔导度、叶面水汽压亏缺、胞间 CO₂ 浓度和光合有效辐射呈正相关关系,仅仅与相对湿度和气温呈负相关关系,而且气孔导度、叶面水汽压亏缺以及气温对黄檀各层叶片的蒸腾速率贡献大,光合有效辐射对上层叶片的蒸腾速率贡献较中下部大.

3.3 黄檀叶片水分利用效率的日变化

从图 2 可以看出,黄檀上层叶片水分利用效率日变化呈现单峰曲线,中、下层叶片水分利用效率日变化几乎完全一致,都呈现双峰曲线,上层叶片最大水分利用效率峰值出现在 14 ∞ 左右,而中、下层最大水分利用效率第 1 次峰值都出现在 10 ∞ 左右,第 2 次峰值都出现在 14 ∞ 左右.

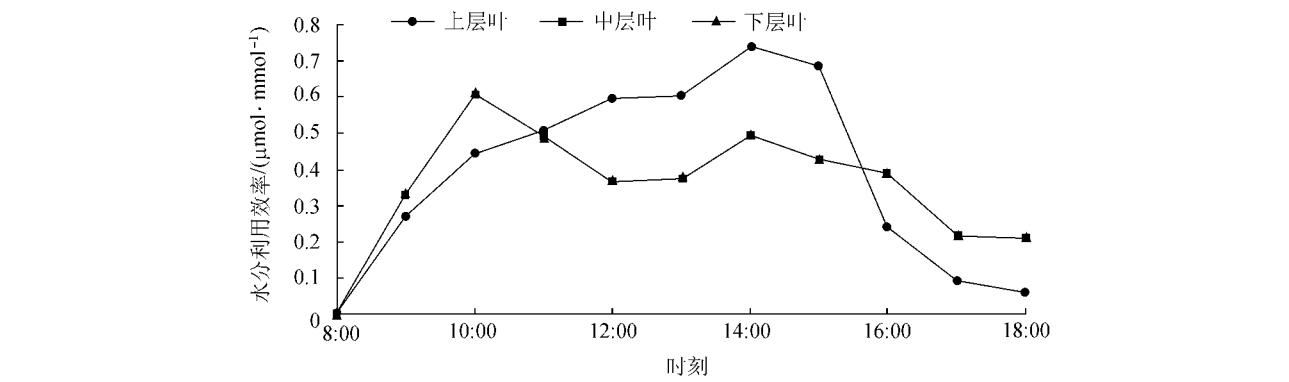


图 2 黄檀叶片水分利用效率日变化

Fig. 2 Diurnal variations of water use efficiency of leaves of *Dalbergia hupeana* Hance

3.4 黄檀水分利用效率与生理生态因子相关分析

对黄檀不同部位叶片水分利用效率与光合有效辐射、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、水汽压亏缺、气温、叶温和相对湿度进行相关分析(表 2).从表 2 可以看出黄檀叶片水分利用效率与气温、叶温和胞间 CO₂ 浓度相关程度较高,不同部位有所不同.

表 2 黄檀水分利用效率与生理生态因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between water use efficiency and physio-ecological factors of <i>Dalbergia hupeana</i> Hance							
叶片部位	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
上层叶	0.109	-0.942 **	-0.291	-0.591	-0.482 *	-0.196	0.401
中层叶	-0.106	-0.738	-0.081	-0.995 **	-0.957 **	-0.462 *	0.846 **
下层叶	-0.798 **	-0.991 **	-0.620 *	-0.927 **	-0.937 **	-0.330	-0.171

注 : * 表示显著相关 ; ** 表示极显著相关 .

4 结 论

a. 6 月下旬晴天,黄檀上、中、下层叶片蒸腾速率日变化均表现为单峰型曲线,最高峰值出现在 11 ∞ 左右,上层叶片蒸腾速率变幅较大,中、下层叶片变幅较小.黄檀上层叶片位于林冠上层受到的光照强度最大,

同时受到水分胁迫以及其他环境因子的影响也较强,因而蒸腾速率变幅较大。

b. 对黄檀在6月下旬晴天时不同部位叶片的蒸腾速率与生理生态因子进行多元回归分析,得出了相应的模型。这些模型表明,光合有效辐射、叶温、气孔导度、水汽压亏缺对蒸腾速率贡献较大,而且黄檀蒸腾速率与气温、叶温、气孔导度、水汽压亏缺和光合有效辐射呈正相关关系,与胞间 CO_2 浓度和相对湿度呈负相关关系。

c. 6月下旬晴天,黄檀上层叶片水分利用效率日变化呈现单峰曲线,中、下层叶片水分利用效率日变化都呈现双峰曲线,上层叶片最大水分利用效率出现在14:00左右以及中、下层叶片最大水分利用效率都出现在11:00左右,叶片是植物主要的光合器官并对外界环境条件的改变最为敏感,水分亏缺对叶片的生理特性的影响尤为显著,主要表现在叶片的水分利用效率的改变上。水分利用效率反映了一定环境条件下植物碳和水分的平衡关系^[8-9],叶片因所处的生长微环境不同,水分利用效率也有一定的差别^[10-11]。

d. 对黄檀在6月下旬晴天时不同部位叶片的水分利用效率与生理生态因子进行的相关分析表明:各个生理生态因子对黄檀不同部位叶片的水分利用效率的影响各不相同,其中气温、叶温和胞间 CO_2 浓度与黄檀叶片水分利用效率相关程度较高,而且多个生理生态因子对黄檀水分利用效率的影响是有交互作用的^[12-13]。

参考文献:

- [1] 韩蕊莲,梁宗锁,侯庆春,等.黄土高原适生树种的耗水特性[J].应用生态学报,1994,5(2):210-215. (HAN Rui-lian, LIANG Zong-suo, HOU Qing-chun, et al. Water consumption properties of adaptable nursery stocks on loess plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994, 5(2): 210-213. (in Chinese))
- [2] 刘茜.樟树叶片蒸腾特性及其与生理生态因子关系分析[J].中南林业科技大学学报,2009,29(1):1-5. (LIU Qian. Leaf transpiration characteristics of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl and its physio-ecological factors[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2009, 29(1): 1-5. (in Chinese))
- [3] 黄志宏,周光益,邱治军.南岭森林3种常见树种光合-蒸腾作用特性[J].中南林业科技大学学报,2009,29(2):19-24. (HUANG Zhi-hong, ZHOU Guang-yi, QIU Zhi-jun. Photosynthesis and transpiration characteristics of three typical tree species in the forests of Nanling Mountains, Northern Guangdong[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2009, 29(2): 19-24. (in Chinese))
- [4] 于占辉,陈云明,杜盛.乔木蒸腾耗水量研究方法述评与展望[J].水土保持研究,2009,16(3):281-285. (YU Zhan-hui, CHEN Yun-ming, DU Sheng. Review and prospect on research methods of tree water consumption by transpiration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(3): 281-285. (in Chinese))
- [5] 田晶会,贺康宁,王百田,等.黄土半干旱区侧柏蒸腾作用及其与环境因子的关系[J].北京林业大学学报,2005,27(3):53-56. (TIAN Jing-hui, HE Kang-ning, WANG Bai-tian, et al. Relationship between transpiration of *Platycladus orientalis* and environmental factors in semi-arid region on loess plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(3): 53-56. (in Chinese))
- [6] 周小玲,田大伦,张旭东,等.桉木不同品系蒸腾特性与水分利用效率的研究[J].中南林业科技大学学报,2008,28(1):1-7. (ZHOU Xiao-ling, TIAN Da-lun, ZHANG Xu-dong. Transpiration characteristics and water use efficiency of four varieties of *Alnus cremastogyne* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2008, 28(1): 1-7. (in Chinese))
- [7] 胡实,谢小立,王凯荣,等.红壤坡地生态系统恢复过程植被群落的演变[J].生态环境,2008,17(1):327-333. (HU Shi, XIE Xiao-li, WANG Kai-rong, et al. Observation on plant succession in the process of ecosystem recuperating on the slop lands of red soil[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(1): 327-333. (in Chinese))
- [8] 孙鹏森,马履一.水源保护树种耗水特性研究与应用[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [9] JACKSON R B, JOBBAGY E G, AVISSAR R, et al. Trading water for carbon with biological carbon sequestration[J]. Science, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [10] CHEN Ren-sheng, KANG Er-si, ZHANG Zhi-hui, et al. Estimation of tree transpiration and response of tree conductance to meteorological variables in desert-oasis system of Northwest China[J]. Science in China Series D, 2004, 47(Sup1): 9-20.
- [11] 曹生奎,冯起,司建华,等.植物叶片水分利用效率研究综述[J].生态学报,2009,29(7):3882-3892. (CAO Sheng-kui, FENG Qi, SI Jian-hua, et al. Summary on the plant water use efficiency at leaf level[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3882-3892. (in Chinese))
- [12] 岳广阳,赵哈林,张铜会,等.科尔沁沙地杨树苗木生长过程中蒸腾耗水规律研究[J].中国沙漠,2009,29(4):674-679. (YUE Guang-yang, ZHAO Ha-lin, ZHANG Tong-hui, et al. Sap flow characteristics of growing poplar seedlings in Horqin Sand Land[J].

Journal of Desert research,2009,29(4) 674-679. (in Chinese))

[13] 赵鸿,杨启国,邓振镛,等. 半干旱雨养区小麦光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(1):125-130. (ZHAO Hong, YANG Qi-guo, DENG Zhen-yong, et al. Characteristics of photosynthesis, transpiration and water use efficiency of wheat leaf in semi-arid rain feed region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2007,25(1):125-130. (in Chinese))

Diurnal variation of leaf transpiration characteristics of *Dalbergia hupeana Hance* and its physio-ecological factors in natural restoration ecosystem on slope lands of red soil regions

CHEN Xin-fang¹, CHEN Xi¹, REN Li-liang¹, ZHANG Dan-rong¹, GUAN Bao-hua², ZHENG Jian-wei³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China ;

3. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract : In order to study the physio-ecological mechanism of carbon-water coupling cycle in the natural restoration ecosystem on the slope lands of red soil regions, the transpiration rates in different parts of leaves of *Dalbergia hupeana Hance*, an important species, and the main physio-ecological factors in the natural restoration ecosystem at Taoyuan Station of Agro-ecology Research of Chinese Academy of Sciences were determined by use of a portable photosynthesis measurement system LI-COR 6400 (LI-COR Lincoln USA). The diurnal variation rules of the transpiration rates of leaves of *Dalbergia hupeana Hance* were analyzed. The water use efficiency was estimated. The correlation and regression analyses were carried out for the transpiration rate, water use efficiency and physio-ecological factors. Some conclusions are drawn as follows : (a) The curve of the diurnal variation of the transpiration rate is unimodal, and the magnitude of the transpiration rates in different parts of the leaves during the same growth season is different. On sunny days in late June, the transpiration rate of leaves has the following descending order : the upper leaves, the middle leaves and the lower leaves. (b) The relationship between the transpiration rates and the physio-ecological factors changes with different parts of the leaves, and the transpiration rates of *Dalbergia hupeana Hance* are positively correlated with the air temperature, leaf temperature, stomatal conductance, photosynthetic active radiation and vapor pressure deficit and are negatively correlated with the intercellular CO₂ concentration and relative humidity. (c) The curve of the diurnal variation of the water use efficiency at the upper leaves is unimodal, and the maximum water use efficiency appears at about 2 00 pm, while the curve of the diurnal variation of the water use efficiency at the middle and lower leaf is bimodal, and the maximum water use efficiency appears at about 10 00 am.

Key words : *Dalbergia hupeana Hance* ; transpiration rate ; water use efficiency ; physio-ecological factor