

荷木人工林蒸腾与冠层气孔导度特征 及对环境因子的响应

朱丽薇^{1,2}, 赵平^{1*}, 蔡锡安¹, 曾小平¹, 邹绿柳^{1,2}, 王权³

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. Institute of Silviculture, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan)

摘要: 为了解荷木人工林水分利用特征及与环境因子的关系,利用 Granier 热消散探针于 2007 年 12 月(干季)和 2008 年 9 月(湿季)对荷木(*Schima superba*)人工林的 15 株样树树干液流进行测定并结合环境因子,计算林段总蒸腾(J_d)和冠层气孔导度(g_s)。结果表明:边材面积(A_s)越大的径级对林段总蒸腾量的贡献越大。 J_d 干湿季差异显著,9 月和 12 月平均分别为 $21.1 \text{ g H}_2\text{O s}^{-1}$ 和 $7.03 \text{ g H}_2\text{O s}^{-1}$,显示了明显的季节变化。环境因子与 J_d 呈极显著相关性,相关系数依次为:光合有效辐射(PAR) > 水汽压亏缺(VPD) > 空气相对湿度 > 气温。 g_s 在 9 月和 12 月的最大值分别为 $30.8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $19.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; g_s 与 PAR 呈线性正相关;当 PAR > $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 且 VPD > 2 kPa 时, g_s 与 VPD 呈线性负相关;偏相关分析表明土壤含水量与 g_s 没有显著的相关性,显示所研究时间内土壤水分状况对荷木人工林蒸腾没有显著影响。

关键词: 荷木; 蒸腾; 气孔导度; 光合有效辐射; 土壤含水量

中图分类号: Q945.79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2010)06-0599-08

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.06.002

Characteristics of Transpiration and Canopy Stomatal Conductance of *Schima superba* Plantation and Their Responses to Environmental Factors

ZHU Li-wei^{1,2}, ZHAO Ping^{1*}, CAI Xi-an¹, ZENG Xiao-ping¹, ZOU Lü-liu^{1,2}, WANG Quan³

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Silviculture, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan)

Abstract: In order to understand water use characteristics of *Schima superba* plantation and their relationships with environmental factors, Granier's thermal dissipation probes were applied to measure sap flow density of 15 trees in a typical plantation stand, in which environmental factors including photosynthetically active radiation (PAR), air relative humidity, air temperature and soil moisture were recorded synchronously. Stand transpiration (J_d) and canopy stomatal conductance (g_s) were then calculated based on sap flow density, sapwood area, environmental humidity and temperature from December 2007 (dry season) and September 2008 (wet season). The results showed that trees with larger sapwood areas had greater contribution of stand transpiration. J_d was found to be significantly different during wet and dry seasons, which had an average of $21.1 \text{ g H}_2\text{O s}^{-1}$ in September but only $7.03 \text{ g H}_2\text{O s}^{-1}$ in December, indicating a dramatic seasonal variation of it. In the meantime, J_d was found to be significantly correlated with environmental factors, in which PAR had the largest correlation

收稿日期: 2010-03-15 接受日期: 2010-05-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(30770328, 30871998)资助

作者简介: 朱丽薇(1983~), 女, 博士研究生。主要从事植物生态系统生理学研究, email: zhuliwei1209@scbg.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author, email: zhaoping@scib.ac.cn

coefficient and followed by vapor pressure deficit (VPD), air relative humidity and air temperature in sequence. On the other hand, the maximum g_s were calculated to be $30.8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $19.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in September and December, respectively. It had positive linear relationship with PAR but negative one with VPD when PAR was larger than $1000 \text{ }\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and VPD was over 2 kPa. However, g_s did not present any statistically significant relationship with soil moisture either in July or December, indicating that soil moisture was not the major environmental factor influencing stand transpiration of *S. superba* during our study periods.

Key words: *Schima superba*; Transpiration; Stomatal conductance; Photosynthetically active radiation; Soil moisture

植物生理生态学是研究植物代谢与环境之间的功能联系,揭示植物与环境因素的相互关系^[1]。蒸腾作用是植物重要的代谢活动,不仅受气孔和水力特征调节,也受控于光照、空气相对湿度、温度等^[2]因子,其中温湿度的协同作用可以用水汽压亏缺来表示^[3]。O'Brien 等^[4]的研究表明热带雨林 10 树种的水力特征对环境因子的响应相似,树干液流与辐射、水汽压亏缺等呈正相关;但是 Meinzer 等^[5]观察到巴拿马热带雨林在较高水汽压亏缺下蒸腾会减弱;Loescher 等^[6]用涡度技术研究热带雨林生态系统的碳交换,结果表明较高水汽压亏缺对系统的碳吸收产生负影响;这可能是由于研究的树种和生境不同导致的。Pataki 等^[7]研究了不同树种对环境的响应策略,认为松属(*Pinus*)树种对水汽压亏缺很敏感,高水汽压亏缺下树干液流下降;但如果土壤水分出现亏缺,无论水汽压亏缺如何,亚利桑那冷杉(*Abies lasiocarpa*)的树干液流均降低 50%。马玲等^[8]用 Granier 探针监测马占相思(*Acacia mangium*)液流,结果表明,环境因子的作用依次为:光合有效辐射 > 总辐射 > 水汽压亏缺 > 空气相对湿度 > 空气温度,这些环境因子对蒸腾的影响复杂。气孔是调节树木冠层液相-汽相通量的关键,也是冠层与大气水汽交换的主要通道,气孔导度对环境因子的响应受辐射、水蒸汽压亏缺、空气温度和叶片水势影响^[9]。阔叶森林由于结构复杂、冠层表面粗糙、叶面积较大和空气动力学特征,冠层与大气之间的水汽交换是部分解耦联的^[10],因此,研究影响森林蒸腾的因子时,要同时考虑微气象因子和气孔的协同作用。

荷木(*Schima superba*)为山茶科(Theaceae)荷木属,是我国亚热带常见的常绿乔木,为阳生性先锋树种,生态位较宽^[11],能充分利用有效资源,也是南亚热带生态恢复的良好树种,了解它的水分利用特征对植被恢复及管理有重要意义。目前,有关树木

个体水分利用的研究多采用 Granier 树干液流测定系统,多以树干木质部最外侧 20 mm 的液流平均值代表整个边材的有效液流,但实际上木质部液流会随深度发生改变,计算整树蒸腾时必需考虑这种径向变化。在林分水平上,树干液流主要是由什么树形特征决定的,以及环境因子如何影响林段总蒸腾及冠层气孔导度等问题目前还不是很清楚。我们用 Granier 树干液流测定系统对华南地区荷木人工林进行监测,结合同步监测的环境因子,通过尺度扩展将整树蒸腾扩展到林段总蒸腾,以探讨荷木的水分利用特征,为人工林的管理提供理论依据。

1 研究样地和野外观测实验

1.1 研究样地

试验样地位于广州市中国科学院华南植物园小青山生态观测场的荷木人工林(23°10'N, 113°21'E),该林种植于 20 世纪 80 年代中期,林下植被稀疏,样地面积 2885.6 m²,海拔 41 m。年均太阳辐射 4367.2~4597.3 MJ m⁻²,年均温 21.4~21.9℃,年降水量 1612~1909 mm;11 月至翌年 1 月为旱季,4~9 月为湿季,降水量占全年的 80% 以上。土壤为中壤土,表土有机质含量 1.52%~2.82%。

1.2 野外观测和林段总蒸腾的估测

分别于 2007 年 12 月和 2008 年 9 月进行树干液流和环境监测。

边材面积和树形特征 为了避免对林内树木的伤害,于样地外围附近选取 15 株荷木,在树干胸高处(1.3 m)用生长锥钻取木栓,测量边材厚度,建立边材面积(A_s)与胸径(DBH)的关系式(图 1): $A_s = 0.6841 DBH^{2.0226}$ ($R^2 = 0.9942$),据此确定样地内用于树干液流密度测定的 15 株样树的边材面积,并测定其它树形特征(表 1)。

树干液流密度 J_s (g H₂O m⁻² s⁻¹) 在 15 株样树的树干北面胸高处安装 Granier 探针^[12],安装

表 1 用于树干液流测定的样树树形特征

Table 1 Characteristics of sample trees for sap flow measurement				
序号 No.	胸径 DBH (m)	树高 Height (m)	冠幅 Crown area (m ²)	边材面积 Sapwood area (m ²)
1	0.151	10.6	20.10	0.015
2	0.194	8.5	15.99	0.025
3	0.133	9.5	15.81	0.012
4	0.22	11.4	25.20	0.032
5	0.224	10.1	27.56	0.033
6	0.095	12.3	10.59	0.006
7	0.175	8.8	18.72	0.020
8	0.088	7.8	6.46	0.005
9	0.088	7.7	7.34	0.005
10	0.24	12.1	32.40	0.038
11	0.135	6.6	12.31	0.012
12	0.065	8.0	5.31	0.003
13	0.084	12.9	3.21	0.005
14	0.144	9.5	8.91	0.014
15	0.073	7.2	4.18	0.003

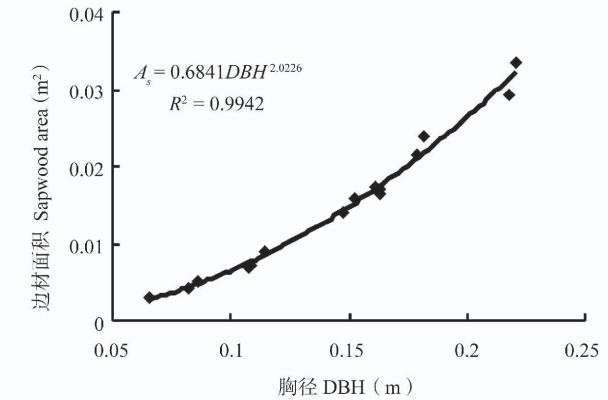


图 1 荷木胸径与边材面积的相关关系

Fig. 1 Correlation between diameter at breast height (DBH) and sapwood area (A_s)

深度 20 mm,数据采集仪(Delta-T Devices)自动记录探针信号,每隔 30 s 测读 1 次,每 10 min 进行平均。用 Granier 经验公式计算液流密度: $J_s=119 \times \left(\frac{T_m-\Delta T}{\Delta T}\right)^{1.231}$,式中 T_m 是在液流为 0 时的上下探针温度差; ΔT 是两探针的瞬时温差。

环境因子 林内建有 18 m 高的铁塔,利用 E20 和 LI-COR 传感器监测冠层上方光合有效辐射,RHT2 与 AT2 传感器监测空气相对湿度、温度;3 套土壤水分传感器(SM200,Delta-T Devices)监测林内土壤(30 cm 处)含水量。测定的频度与树干液流相同。

水汽压亏缺 VPD (kPa) $VPD = a \times e^{\frac{bv}{t+c}} \times$

$(1-RH)$,式中 RH 为相对湿度; t 是温度($^{\circ}\text{C}$);常数 a 、 b 和 c 分别是 0.611 kPa、17.502 和 240.97 $^{\circ}\text{C}$ [3]。

林段总蒸腾 $J_d(\text{g H}_2\text{O s}^{-1})$ 在样地调查的基础上,将树木胸径划为 5 个等级:4.1 ~ 8.0 cm、8.1 ~ 12.0 cm、12.1 ~ 16.0 cm、16.1 ~ 20.0 cm、>20.1 cm。根据监测的木质部不同深度(0 ~ 20 mm、20 ~ 40 mm、40 ~ 60 mm)的液流密度(J_s)表明,0 ~ 20 mm 和 20 ~ 40 mm 的 J_s 差异不显著,而 40 ~ 60 mm 与它们差异显著,约为前者的 85%。由于探针长度有限,且荷木的材质为散孔材,可以认为 60 mm 后的液流密度没有显著差异,以便计算整树蒸腾[13]。林段总蒸腾按下式计算: $J_d = \sum_{i=1}^5 (J_{si} \times 85\% \times A_{s\neq 0} + J_{si} \times A_{s10 \sim 40})$ 式中 J_{si} 是第 i 径级的平均液流密度, $A_{s\neq 0}$ 是第 i 径级的边材深度 40 mm 后的边材面积, $A_{s10 \sim 40}$ 是第 i 径级的边材深度为 0 ~ 40 mm 的边材面积。

叶面积指数(LAI) 用 LAI-2000 冠层分析仪于每月下旬测定 1 次,林下随机选取 11 个观测点,重复 3 次。

单位叶面积的林段总蒸腾 $E_L(\text{g H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1})$ [14] 由下式计算: $E_L = J_d/(A \times LAI)$,式中 A 为样地面积。

冠层气孔导度 $g_s(\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1})$ [15-16] 由下式计算: $g_s = (G_v \times T_k \times E_L)/VPD \times V_m$, 式中 V_m 是气体摩尔常数 22.4 L mol⁻¹; T_k 是华氏温度(K); G_v 是气体常数 0.462 m³ kPa kg⁻¹ K⁻¹。

2 结果和分析

2.1 不同径级树木的蒸腾量

2007 年 12 月晴朗的一天对各径级树木的蒸腾量及液流密度进行测定(图 2)。不同径级荷木的液流密度和蒸腾量均差异显著,且前者比后者大。液流密度随胸径的增加而增加,相关性分析表明,液流密度与树高和冠幅间不显著相关,而与胸径显著相关($P<0.05$)。但是,16.1~20.0 cm 径级的液流密度大于径级 >20.1 cm 的,这可能与树木所处微环境不同(如冠层是否郁闭)有关^[17]。Cienciala 等^[18]报道,种植密度小的马占相思林分液流密度高于密

度大的,即密度小的林分冠层比较开阔,树木个体能从环境中获得较多的资源,保证了较高的液流密度。

各径级蒸腾量(图 2b)与边材总面积的变化(图 3)—致,即边材面积越大的径级蒸腾量越大,最大径级的日最大蒸腾量约是最小径级的 4.3 倍,这与 Wullschlegler 等^[19]的研究结果相似,红槭(*Acer rubrum*)的树干基面积比板栗橡树(*Quercus prinus*)小,但边材面积较大,对总蒸腾的贡献仍大于板栗橡树;Cienciala 等^[18]也报道马占相思人工林日均蒸腾量随边材面积的增加呈线性增加。因此,边材面积决定了树木蒸腾量的大小。

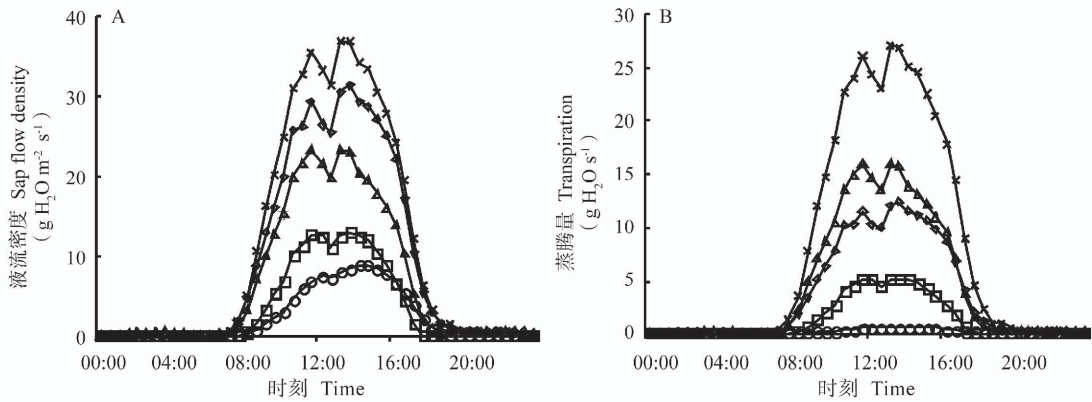


图 2 各径级液流密度(A)和蒸腾量(B)日变化曲线

Fig. 2 Diurnal variations of sap flow density (A) and transpiration (B) at different DBH class

○: DBH 4.1~8.0 cm; □: DBH 8.1~12.0 cm; △: DBH 12.1~16.0 cm; ×: DBH 16.1~20.0 cm; ◇: DBH >20.1 cm

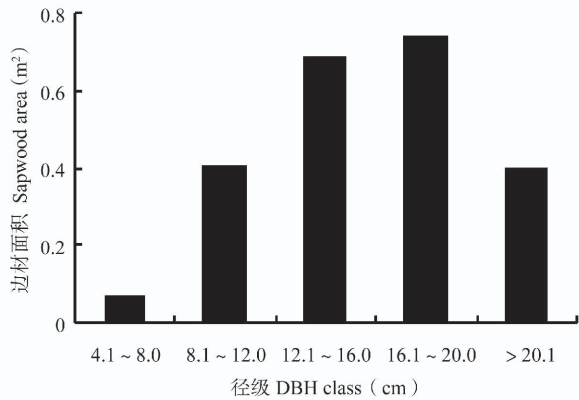


图 3 荷木各径级边材总面积

Fig. 3 Sum of sapwood area of all trees at different DBH class

2.2 林段总蒸腾与环境因子的关系

VPD 约从早上 8:00 开始升高(图 4C),PAR 在 7:00 左右就开始明显升高(图 4B), J_a 开始上升的时间要晚于 PAR 而早于 VPD(图 4A)。VPD 的日变化格局与空气温度一致(图 4C,F),8:00 开始上升,14:00 达到峰值后迅速下降。干湿两季的 J_a 均呈单

峰曲线,干季 J_a 开始上升的时间明显晚于湿季,但两个季节 PAR 开始升高的时间基本相同,这可能是干季温度较低,最低只有 10℃,限制了气孔的张开^[2]。干湿两季的平均 J_a 差别较大,2008 年 9 月为 21.1 g H₂O s⁻¹,而 2007 年 12 月只有 7.03 g H₂O s⁻¹。

解耦系数(Ω)是描述冠层与大气耦联程度的参数,其大小取决于冠层气孔导度与空气动力学导度的比值, Ω 越小蒸腾越受周围环境因子的影响^[17]。荷木人工林密度为 600 ind. hm⁻²,比较开阔,利用风速计算的空气动力学导度高于气孔导度 50 多倍, Ω 约为 0.02,说明冠层与大气之间存在很好的耦联关系。Granier 等^[20]报道岩生栎(*Quercus petraea*)林的 Ω 为 0~0.1,MacFayden 等^[21]认为森林的 Ω 为 0.1~0.3, Ω 值都比较低,说明森林冠层受周围大气因子的影响强烈。由于土壤含水量的日变化不明显(图 4D),对蒸腾的影响有限,因此在较小时间尺度上分析环境因子与林段总蒸腾的关

系时,可以忽略土壤含水量的影响。

将 9 月和 12 月其中几天的 J_d 、PAR、VPD、温度和相对湿度进行偏相关分析(表 2)。结果表明:各环境因子与 J_d 之间均呈极显著相关($P < 0.01$),相关系数为:PAR > VPD > 相对湿度 > 温度(干湿季的相对湿度和温度的相关系数略有不同)。 J_d 与 PAR、VPD 的多元线性回归关系为 $J_d = 0.22 \text{ PAR} + 9.878 \text{ VPD} - 6.12$,方差分析表明显著性概率均小于 0.001,方程拟合度很好。12 月是土壤含水量最低的月份,只有 $0.19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$,约为湿季最大土壤含水量的 54%,但 J_d 与各环境因子之间仍然有较高的相关性,说明该林土壤含水量充足,对蒸腾的影响不明显。2008 年 9 月中 10 d 的 J_d 和土壤含水量数据的相关性不显著($P > 0.05$)。

2.3 冠层气孔导度与环境因子间的关系

树种、年龄和计算方法的不同会导致 g_s 的结果差异很大^[15,22]。我们用树干液流测定值计算,干湿季的 g_s 最大值分别为 $19.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和

$30.8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,这可能是由边材渗透性和液流水柱重力势不同,使土壤到叶片的水力导度不同所致^[23]。 g_s 日间到达峰值的时间早于 J_d ,之后下降(图 5),而 J_d 达到峰值后下降速度较慢,此时 VPD 仍处于上升阶段。赵平等^[14]报道在光照充足、水热条件均匀的季节马占相思冠层气孔导度超过 $200 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,而土壤水分下降的月份则低于 $40 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$;Köstner 等^[15]用液流密度计算的假山毛榉(*Nothofagus fusca*)阔叶林的冠层气孔导度为 $112 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$;Hubbard 等^[22]报道 12 m 和 36 m 高的美国黄松(*Pinus ponderosa*)最大冠层气孔导度相似($200 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。

当液流很小时, g_s 的计算会不准确, g_s 与 PAR 和 VPD 日间观测数据间均呈极显著相关($P < 0.01$)。VPD < 1 kPa 时, g_s 的计算也会不准确^[24],我们只对 VPD > 1 kPa 的数据进行分析(图 6)。无论 VPD > 2 kPa 或 < 2 kPa, g_s 均随 PAR 的增加而增加(图 6C,D),只是当 VPD < 2 kPa 时, g_s 与 PAR 的回

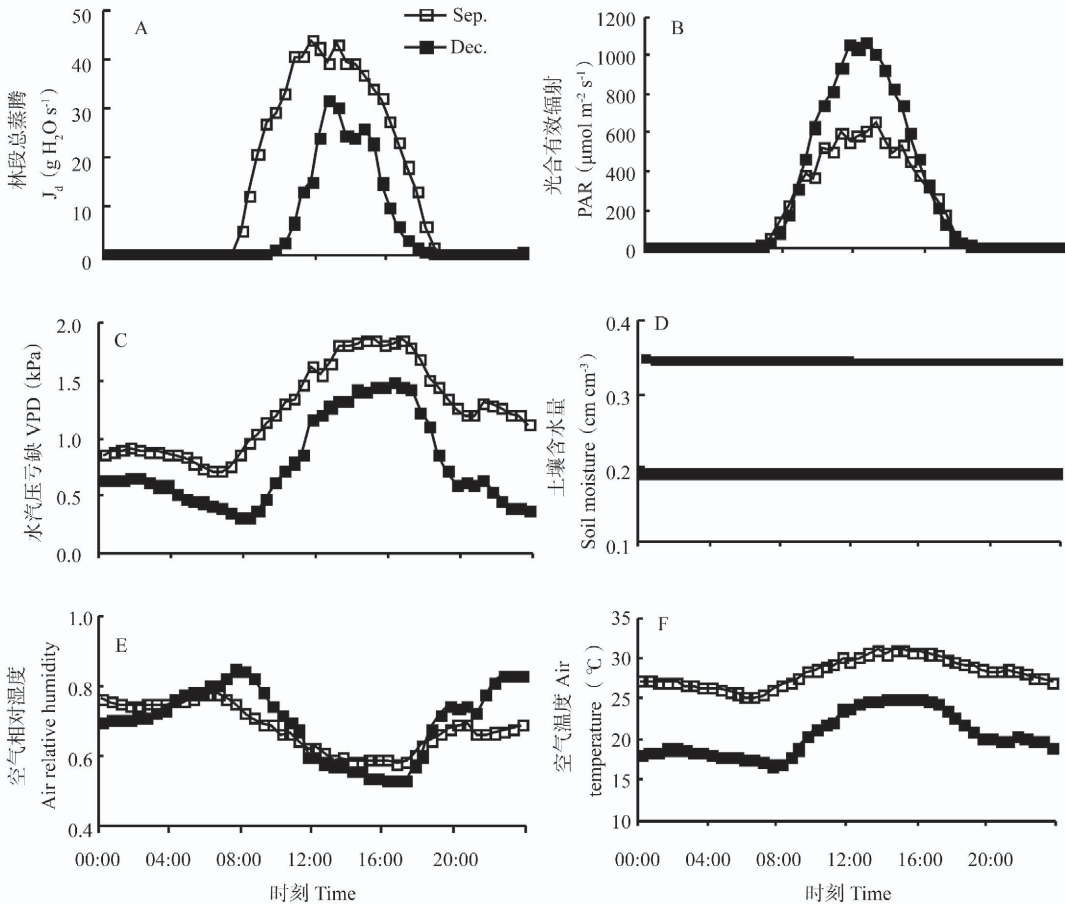


图 4 林段总蒸腾及环境因子干湿两季日变化
Fig. 4 Diurnal variations in stand transpiration and environmental factors in dry and wet seasons

表 2 林段总蒸腾与环境因子间的偏相关关系

Table 2 Partial correlations between stand transpiration and environmental factors

变量 Variance	偏相关系数 Partial correlation coefficient		P	
	Dec.	Sep.	Dec.	Sep.
光合有效辐射 PAR	0.802	0.818	0.000	0.000
水汽压亏缺 VPD	0.408	0.282	0.000	0.000
空气相对湿度 RH	0.332	0.227	0.000	0.000
空气温度 Air temperature	-0.264	-0.229	0.000	0.000

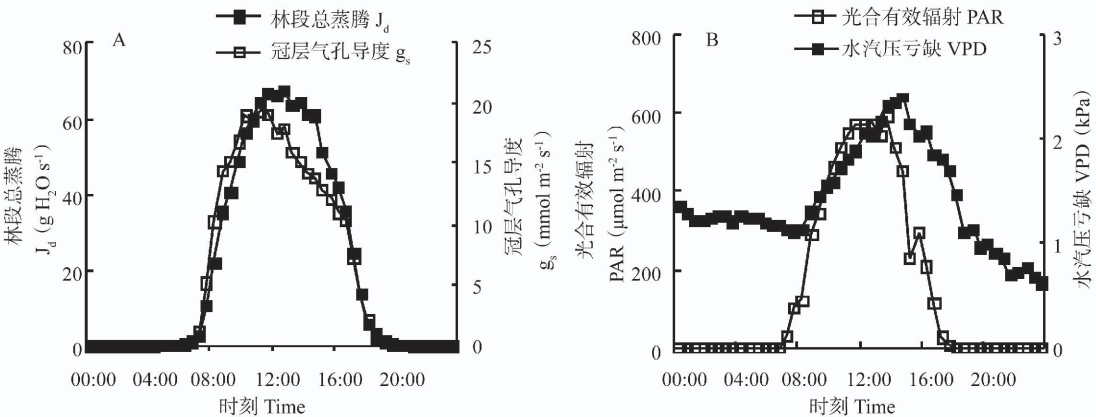


图 5 林段总蒸腾与冠层气孔导度、光合有效辐射和水汽压亏缺的日变化

Fig. 5 Diurnal changes in stand transpiration, canopy stomatal conductance, PAR and VPD

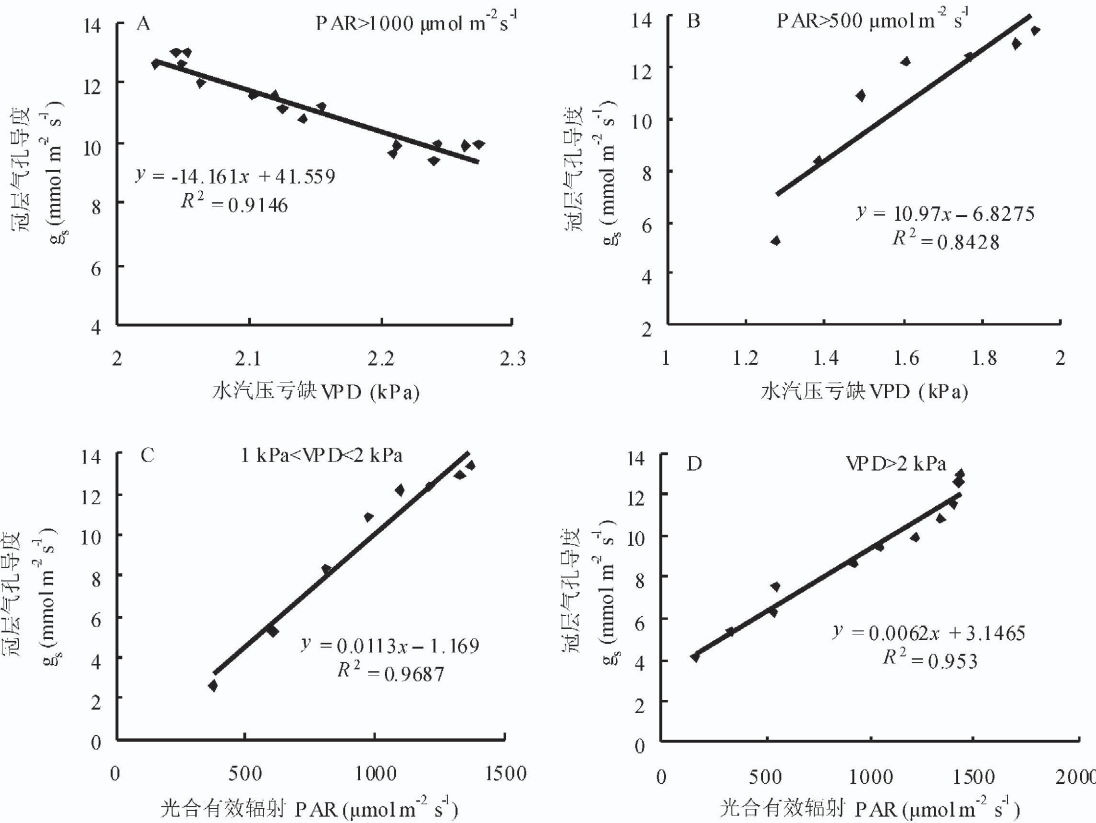


图 6 冠层气孔导度与水汽压亏缺(A, B)和光合有效辐射(C, D)之间的关系

Fig. 6 Relationship between canopy stomatal conductance with VPD (A, B) and PAR (C, D)

归系数更高一些,PAR 导致 g_s 变化更明显。只有当 $VPD > 2 \text{ kPa}$ 、 $PAR > 1000 \text{ }\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时, g_s 与 VPD 呈负相关(图 6A),同时 J_d 也随 VPD 的增加而下降(图 7),气孔趋向于关闭,以免过多的水分损失;当 $VPD < 2 \text{ kPa}$ 时,即使 PAR 较高, g_s 仍随 VPD 的增加而增加(图 6B)。

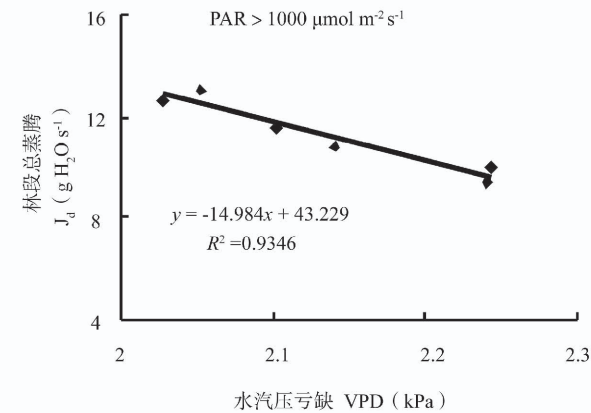


图 7 在 $VPD > 2 \text{ kPa}$ 和 $PAR > 1000 \text{ }\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 下水汽压亏缺和林段总蒸腾间的关系

Fig. 7 Relationship between stand transpiration and vapor pressure deficit under $VPD > 2 \text{ kPa}$ and $PAR > 1000 \text{ }\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

不同季节日间正午 g_s 与土壤含水量的偏相关分析表明,两者的相关性不显著($P = 0.1$),即此时的土壤含水量对荷木林的蒸腾没有显著影响。Oren 等^[25]报道美国东南部 Duke 森林的冠层气孔导度的日均值与土壤水分没有显著相关性($P > 0.05$),而正午的冠层气孔导度与土壤水分呈极显著相关;当土壤水分下降到 $0.22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 时,冠层气孔导度与土壤水分显著相关。本研究的荷木林土壤含水量在某些月份会下降到 $0.19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$,但对荷木林来说土壤水分是充足的,因此并没有影响气孔的开闭及林段总蒸腾。

3 讨论

本研究结果表明土壤水分状况对荷木人工林蒸腾的影响不明显,Caylor 等^[26]指出在水分供应良好的地区,利用边材面积进行蒸腾的尺度扩展是可行的,本文利用边材面积求算林段总蒸腾是合理的。

不同径级液流密度的日变化与赵平等^[12]对马占相思林的研究结果相似,胸径较小的个体液流启动的时间晚,下午出现明显下降的时间早,这反映了与树木形态相关的生理活动变化。Meinzer 等^[27]

指出具有不同形态学特征的树种的边材面积和水分传输间具有固定的关系;Wullschlegler 等^[10]研究红槭的整树蒸腾时指出,树干液流较高主要是因为其边材组织较多,因此蒸腾受树种及树形大小的影响并不明显,而更多地受边材面积的影响;我们的研究也表明边材面积大的荷木对林段总蒸腾的贡献显著大于边材面积小的。

Oren 等^[28]研究了环境因子对淹水的落羽杉林 (*Taxodium distichum*) 蒸腾的影响,认为水汽压亏缺可以解释林段总蒸腾变化的 94%;Granier 等^[29]研究天然热带雨林对环境因子的响应时,指出林分的蒸腾主要依赖水汽压亏缺,与辐射的相关性不高。而我们的研究结果表明,林段总蒸腾主要受光合有效辐射影响,其次为水汽压亏缺,与马玲等^[8]对鹤山马占相思林的研究结果一致。

赵平等^[24]研究了马占相思冠层气孔导度对环境因子的响应,认为当水汽压亏缺较低时,两者存在正相关关系,当水汽压亏缺上升到一定阈值时(很多研究认为是 1 kPa),两者存在负相关关系。O'Brien 等^[4]研究了热带雨林树干液流对环境因子的响应,指出冠层气孔导度与水汽压亏缺正相关,这可能是因为他们的研究中水汽压亏缺均小于 2 kPa 。我们的研究结果表明,当水汽压亏缺大于 2 kPa ,同时光合有效辐射大于 $1000 \text{ }\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,冠层气孔导度与水汽压亏缺呈显著负相关,说明此时光合有效辐射与水汽压亏缺共同决定气孔开闭,显示荷木对环境条件有较强的适应性。荷木冠层气孔导度与环境因子间存在强烈的相关性,说明环境因子通过气孔活动对冠层蒸腾有较强的调控作用。

由于液流的径向变化,如果仅利用木质部最外侧 20 mm 处的液流密度计算树木的蒸腾,结果会高估树木实际的蒸腾。虽然我们在原来基础上做了改进,但是还需要测量液流密度随径向的定量变化,使整树蒸腾的估测更加准确。由于没有考虑树干液流与环境因子之间的时滞效应,会导致所分析的林段总蒸腾与环境因子的相关性比实际偏低,今后的研究需要对此作进一步改进。

参考文献

[1] Lange O L, Kappen L, Schulze E D. Water and Plant Life [M]. New York: Springer-Verlag, 1976: 34–40.

[2] Pan R C(潘瑞炽). Plant Physiology [M]. 4 ed. Beijing: Higher Education Press, 2001: 19–20.(in Chinese)

- [3] Campbell G S, Norman J M. An Introduction to Environmental Biophysics [M]. New York: Springer-Verlag, 1998: 36–51.
- [4] O'Brien J J, Oberbauer S F, Glark D B. Whole tree xylem sap flow response to multiple environmental variables in a wet tropical forest [J]. Plant Cell Environ, 2004, 27: 551–567.
- [5] Meinzer F C, Goldstein G, Jackson P, et al. Environmental and physiological regulation of transpiration in tropical forest gap species: The influence of boundary layer and hydraulic properties [J]. Oecologia, 1995, 101: 514–522.
- [6] Loescher H W, Oberbauer S F, Gholz H L, et al. Environmental control on net ecosystem-level carbon exchange and productivity in a central American tropical wet forest [J]. Glob Change Biol, 2003, 9: 396–412.
- [7] Pataki D E, Oren R, Smith A W. Sap flow of co-occurring species in a western subalpine forest during seasonal soil drought [J]. Ecology, 2000, 81: 2557–2566.
- [8] Ma L(马玲), Zhao P(赵平), Rao X Q(饶兴权), et al. Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium* [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2005, 25(9): 2145–2151.(in Chinese)
- [9] Jarvis P G. Interpretation of variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in field [J]. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 1976, 273(927): 593–610.
- [10] Wullschlegel S D, Wilson K B, Hanson P J. Environmental control of whole-plant transpiration, canopy conductance and estimates of the decoupling coefficient for large red maple trees [J]. Agri For Meteorol, 2000, 104: 157–168.
- [11] Lin S Z(林思祖), Huang S G(黄世国), Hong W(洪伟), et al. The characteristics of multi-dimension niche of dominant populations in Chinese fir and broad-leaved mixed forest [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2002, 22(6): 926–928.(in Chinese)
- [12] Zhao P(赵平), Rao X Q(饶兴权), Ma L(马玲), et al. Application of Granier's sap flow system in water use of *Acacia mangium* forest [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2005, 13(6): 457–468.(in Chinese)
- [13] Zhao P(赵平), Rao X Q(饶兴权), Ma L(马玲), et al. The variations of sap flow density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium* [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2006, 26(12): 4050–4058.(in Chinese)
- [14] Zhao P(赵平), Rao X Q(饶兴权), Ma L(马玲), et al. Sap flow-scaled transpiration and canopy stomatal conductance in an *Acacia mangium* forest [J]. J Plant Ecol(植物生态学报), 2006, 30(4): 655–665.(in Chinese)
- [15] Köstner B M M, Schulze E D, Kelliher F M, et al. Transpiration and canopy conductance in a pristine broad-leaved forest of *Nothofagus*: An analysis of xylem sap flow and eddy correlation measurements [J]. Oecologia, 1992, 91: 350–359.
- [16] Schafer K V R, Oren R, Tenhunen J D. The effect of tree height on crown level stomatal conductance [J]. Plant Cell Environ, 2000, 23: 365–375.
- [17] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands [J]. Agri For Meteorol, 2000, 100: 291–308.
- [18] Cienciala E, Kučera J, Malmer A. Tree sap flow and transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo [J]. J Hydrol, 2000, 236: 109–120.
- [19] Wullschlegel S D, Hanson P J, Todd D E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques [J]. For Ecol Manag, 2001, 143(1–3)(Sp SI): 205–213.
- [20] Granier A, Breda N. Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements [J]. Ann Sci For, 1996, 53: 537–546.
- [21] MacFayden A, Ford E D. Advances in Ecological Research [M]. London: Academic Press, 1986: 1–49.
- [22] Hubbard R M, Bond B J, Ryan M G. Evidence that hydraulic conductance limits photosynthesis in old *Pinus ponderosa* trees [J]. Tree Physiol, 1999, 19: 165–172.
- [23] Ryan M G, Bond B J, Law B E, et al. Transpiration and whole-tree conductance in ponderosa pine trees of different heights [J]. Oecologia, 2000, 124: 553–560.
- [24] Zhao P(赵平), Rao X Q(饶兴权), Ma L(马玲), et al. Responses of canopy stomatal conductance of *Acacia mangium* forest to environmental driving factors [J]. Chin J Appl Ecol(应用生态学报), 2006, 17(7): 1149–1156.(in Chinese)
- [25] Oren R, Ewers B E, Todd P, et al. Water balance delineates the soil layer in which moisture affects canopy conductance [J]. Ecol Appl, 1998, 8: 990–1002.
- [26] Caylor K K, Dragoni D. Decoupling structural and environmental determinants of sap velocity: Part I. Methodological development [J]. Agri For Meteorol, 2009, 149: 559–569.
- [27] Meinzer F C, Goldstein G, Andrade J L. Regulation of water flux through tropical forest canopy trees: Do universal rules apply? [J]. Tree Physiol, 2001, 21: 19–26.
- [28] Oren R, Phillips N, Ewers B E, et al. Sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest [J]. Tree Physiol, 1999, 19: 337–347.
- [29] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors [J]. Agri For Meteorol, 1996, 78: 19–29.