

不同径级马占相思 (*Acacia mangium*) 整树蒸腾的湿、干季变化

刘晓静, 赵 平*, 蔡锡安, 饶兴权, 曾小平

(中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘要: 利用 Granier 树干液流测定系统对广东鹤山丘陵地马占相思 (*Acacia mangium*) 林进行长期监测, 并同步监测环境因子 (空气温度、相对湿度、光合有效辐射、土壤体积含水量), 选择胸径具有代表性的样树, 结合马占相思的形态学参数, 计算马占相思的整树蒸腾。通过对光合有效辐射 (*PAR*) 分级, 建立不同辐射强度等级的湿季 (土壤水分 $\theta \geq 33\%$) 整树蒸腾与水汽压亏缺 (*VPD*) 的相关方程, 以干季 ($\theta \leq 24\%$) 的 *VPD* 代入对应 *PAR* 等级的湿季的拟合方程, 求出干季的潜在蒸腾, 以潜在蒸腾和干季实际蒸腾之差分析不同径级整树蒸腾在不同季节的实际变化。在所有的 *PAR* 分级内, 干季整树蒸腾显著低于湿季, 仅占湿季蒸腾的 10% ~ 20%, 就蒸腾减少的绝对量而言, 优势木 > 中间木 > 劣势木。土壤水分下降缩小了不同径级树木之间液流密度的差异, 土壤水分亏缺限制了树木的蒸腾, 对马占相思的生长造成一定程度的水分胁迫。

关键词: 马占相思; 干季; 湿季; 整树蒸腾; 径级

文章编号: 1000-0933(2009)02-0619-08 中图分类号: Q945, Q948 文献标识码: A

Variations of whole-tree transpiration at different diameter-classes in *Acacia mangium* during dry and wet seasons

LIU Xiao-Jing, ZHAO Ping*, CAI Xi-An, RAO Xing-Quan, ZENG Xiao-Ping

South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0619 ~ 0626.

Abstract: Sap flow in a typical hilly *Acacia mangium* forest stand of the Southern China was measured continuously using the Granier's thermal dissipation probe method over a long period. Environmental factors (including air temperature, relative humidity, photosynthetically active radiation, soil moisture) were measured simultaneously. Sap flux density of sample trees representing the whole stand were selected for calculating the individual tree transpiration combining with morphological characters. Photosynthetically active radiation (*PAR*) was grouped into following six classes: 100 — 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 200 — 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 400 — 600 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 600 — 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 800 — 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $\geq 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and the relationship between whole-tree transpiration (*E*) and *VPD* in the wet season were analyzed for each *PAR* class. Potential transpiration in the dry season was then estimated based on the fitted regressions with *VPD* of the wet period. The results showed that the transpiration in the dry season was significantly lower than and was comprised only 10% — 20% of that in the wet season. Concerning the reduction of transpiration at different diameter-classes, it was ranked as: dominant trees > intermediate trees > suppressed trees. Compared to those in the wet season, the sap flow of different trees was lower as a result of deficit of soil water content in the dry season. Soil water deficit limited transpiration to certain extent, and the growth of *A. mangium* forest was subjected to water stress during dry period.

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KSCX2-SW-133); 国家自然科学基金资助项目 (30428022, 30270239, 30770328); 广东省自然科学基金资助项目 (031265, 07006917)

收稿日期: 2007-09-17; 修订日期: 2008-01-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoping@scib.ac.cn

Key Words: *Acacia mangium*; dry season; wet season; whole-tree transpiration; diameter-class

作为研究树干液流(sap flow)的重要测定系统,Granier 径向型热消散探针(thermal dissipation probe)由于测量准确、稳定以及制作成本较低等特点^[1,2],深受从事树木水分利用研究的科研工作者的欢迎,该系统可以长期连续地测定树木的液流,通过严格和有效的尺度转换,可获得整树和森林蒸腾以及冠层气孔导度,监测森林冠层与大气水分交换的通量,还被应用到森林的碳吸收以及全球变化的研究领域^[3,4]。马占相思(*Acacia mangium*)是于 20 世纪 70 年代后期从澳大利亚和马来西亚引种到华南地区的绿化树种,该树种生长迅速,具有较高的蒸腾和光合速率。在华南地区,雨量充沛,但分布不均匀,有明显的干湿季,每年 10~12 月份降雨较少,近年由于气候变化的缘故,干季的干旱越来越严重。马占相思的原生地是热带湿润地区,根部具有固氮根瘤,因此根系在土层的分布比较浅,不同季节土壤水分供应的变化必然明显影响马占相思的水分利用。利用 Granier 热消散探针,对华南丘陵马占相思人工林的树干液流进行了 3a 多的观测,旨在开展森林生态系统的水分利用和水分循环的研究。本论文的目的主要是验证假设:(1)在湿润季节,只要土壤水分供应充足,马占相思能充分利用土壤上层的水分资源,其蒸腾明显高于干季;(2)在干季,土壤水分的减少将会明显降低树干液流,由于树木的蒸腾受树木的木质部水分活跃部分(边材)、高度、冠层等特征的影响,不同大小的树木,液流减少的程度是有差异的,即整树蒸腾对土壤水分下降的响应受树形特征的影响。

1 材料与方法

1.1 样地与样树

试验地位于中国科学院鹤山丘陵综合试验开放站(北纬 22°40', 东经 112°54'), 该站属于典型的南亚热带丘陵山地,地带性土壤为砖红壤。气候温暖多雨,全年无霜,年平均日照时数 1798.8h, 年均气温 21.7℃, 年均降雨量 1700~2000mm, 但分配不均,有明显的干湿季,降水多集中在 5~9 月份,10 月份到翌年的 3 月份降雨较少,出现短暂的干旱,丘陵坡地的地形特点导致土壤的持水力较差,某种程度上增加了植物生长的干旱胁迫。野外观测样地选择该站一片树龄 22a 的马占相思林,马占相思属于含羞草科金合欢属植物,该林段处于生长衰退期,干季有少许落叶,林窗较大^[5]。

1.2 树干液流的测定

从 2003 年 9 月启动马占相思树干液流的监测,在样地内选择胸径具有代表性的 14 棵样树,长期连续地测定树干液流和环境因子(包括空气温度、相对湿度、光合有效辐射、土壤体积含水量)。树干液流探针和环境因子传感器均与 DELTA-T 数据采集仪相连,数据采集的频率为每 30s 测读 1 次,每 10min 进行平均并储存数据,详细方法见^[6~8],本研究选择胸径有代表性的 4 棵样树(表 1)的监测数据,进行有关分析。

1.3 边材面积的确定

边材面积(sapwood area)是计算整树蒸腾的关键参数,但实际中无法直接测定,前人的研究表明胸径与边材面积间存在相关关系^[2,5,7],通过建立胸径与边材面积的关系计算马占相思样树的边材面积。为避免伤害样树而影响液流的测定,在样树周围随机选取 24 棵马占相思,于树干的胸高位置用生长锥钻取直径为 5mm、深度为树干胸径 1/2 的树芯,由于马占相思的心材和边材分界线明显,用直尺测定木栓边材的厚度,建立边材面积与胸径(去皮)的关系式,计算边材面积(A_s):

$$A_s = m(DBH)^n \quad (1)$$

式中, m 和 n 是通过非线性回归得到的系数,用上述方法所得的值分别是:0.1930 和 0.1844。

1.4 树干液流密度的径向整合

马占相思木质部横切面的导管排列为随机型,材质为散孔材^[5]。Philips 等^[9]通过实验发现散孔材树木的液流密度的径向变化较为均匀,而在环孔材中则变化较大,Lu^[10]、Clearwater 等^[13]认为,应用 Granier 热消散式探针测定散孔材树木的液流密度时,只要探针安装在边材内,液流密度是无显著的径向变化。成熟马占相思的边材较薄,很少超过 3cm^[12],假定马占相思树干液流密度没有径向变化,沿探针方向测定的即为平均液

流密度。分析树形对蒸腾的影响需要将液流密度测定值扩展到整树蒸腾^[13],马占相思整树蒸腾速率 E_t ($\text{gH}_2\text{O} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Tree}^{-1}$) 由如下公式计算:

$$E_t = J_s \times A_s \quad (2)$$

式中, A_s (m^2) 为样树的边材面积。

表 1 马占相思样树的树形特征

Table 1 The morphologic characters of sample trees of *A. mangium*

样树号 Tree No.	树高 Tree height (m)	冠幅 Canopy size (m × m)		胸径 DBH (m)	边材厚度 Sapwood depth (m)	边材面积 Sapwood area (m^2)
1	19.3	6.7	3.3	0.2929	0.0254	0.0201
2	17.9	4.6	3.0	0.2388	0.0217	0.0137
4	19.5	7.5	8.1	0.3751	0.0311	0.0316
13	12.0	3.6	4.7	0.1337	0.0145	0.0047

1.5 不同径级树木的整数蒸腾于不同季节差异的分析方法

分别选择土壤水分充足 ($\theta \geq 33\%$) 且比较稳定的积日 (DOY, day of year) (即 2004 年的第 126、127、131、132、133 天) 和土壤水分亏缺 ($\theta \leq 24\%$) 的 DOY (2004 年的第 277 ~ 282 天) 作为湿季和干季, 进行整树蒸腾季节差异的比较分析。根据赵平和 Granier^[14] 的方法, 按照胸径的大小, 把样地所有树木划分为优势木 (>300m)、中间木 (200 ~ 300m) 和劣势木 (<200m) 3 个等级, 选择胸径有代表性的样树 1、2、4 和 13 进行分析。

光合有效辐射 (PAR , photosynthetically active radiation, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和水汽压亏缺 (VPD , vapor pressure deficit, kPa) 是树木冠层蒸腾的主要驱动力^[15,16], 两因子对植物的水分利用同时产生效应, 单因子的独立分析难以准确地反映他们的真实关系。因此把光合有效辐射数据相隔 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 划分为 6 个等级 (即 $100 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $200 \sim 400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $400 \sim 600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $600 \sim 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $800 \sim 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\geq 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 在不同等级内分析 VPD 与蒸腾速率的相关关系。

为了综合反映温度和空气相对湿度对树木蒸腾的的协同效应, 采用水汽压亏缺 (VPD) 这一指标, 通过以下公式计算求出:

$$VPD = ae \left(\frac{bT}{T+c} \right) (1 - RH) \quad (3)$$

式中, 常数 a 、 b 、 c 分别为 0.611kPa 、 17.502 、 240.97°C ^[17]。

湿季与干季整树蒸腾之差的计算: 先建立湿季每个辐射等级整树蒸腾速率 (E_t) 与对应的 VPD (因为华南地区 10 月份 PAR 很少大于 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 而且湿季回归方程的决定系数也不高, 因此不考虑 $PAR > 1000$ 的数据) 方程, 把干季的 VPD 代入湿季相应 PAR 等级的 E_t 与 VPD 的关系式, 计算出干季的潜在蒸腾速率 (E_p), 潜在蒸腾速率和实际蒸腾速率之差即为湿、干季整树蒸腾之差 (E_D):

$$E_D = \frac{E_p - E_t}{E_p} \quad (4)$$

式中, E_D 为样树干湿季蒸腾速率之差, E_p 为干季的潜在蒸腾速率, E_t 为干季的实际蒸腾速率。

2 结果与分析

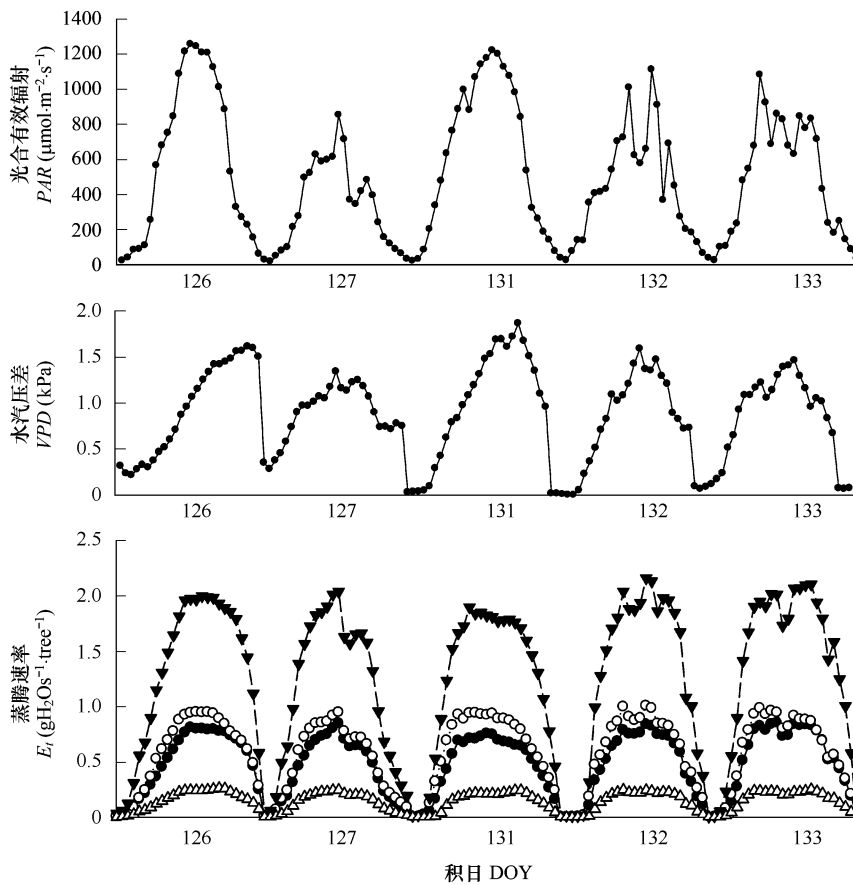
2.1 湿季马占相思整树蒸腾与 VPD 的关系

在所有光辐射等级内, 马占相思整树蒸腾速率与 VPD 的回归方程拟合 (非线性相关) 都比较好, 决定系数一般都大于 0.8, 但是在不同等级内的拟合曲线不同 (表 2), 这表明在土壤含水量充足时, VPD 可以很好的解释蒸腾速率的变化。马占相思不同径级的蒸腾速率差异较大, 胸径大的明显高于胸径小的, 在所有 PAR 等级蒸腾速率呈优势木 > 中间木 > 劣势木的变化趋势, 这可以从树木的树形特征和立地条件来解释, 胸径大的树, 树高和冠幅都较大, 光热水立地条件都较好^[14]。

表 2 湿季马占相思整树蒸腾速率与 VPD 的回归方程及决定系数

Table 2 Determination coefficients for equations based on the whole-tree transpiration rate of *A. mangium* and VPD

光合有效辐射等级 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Ranks of PAR	树号 Tree No	方程 Equation	决定系数 R^2
100 ~ 200		1	$y = 0.348 \times x^{0.874}$	0.9262
		2	$y = 0.405 \times x^{0.747}$	0.9341
		4	$y = 1.039 \times x^{0.82}$	0.951
		13	$y = 0.112 \times x^{1.050}$	0.8833
200 ~ 400		1	$y = -0.263x^3 + 0.489x^2 + 0.287x + 0.034$	0.944
		2	$y = 0.057 + 0.49x + 0.224x^2 - 0.168x^3$	0.951
		4	$y = 0.085 + 1.622x + 0.062x^2 - 0.276x^3$	0.957
		13	$y = -0.001 + 0.194x + 0.011x^2 - 0.03x^3$	0.952
400 ~ 600		1	$y = 0.667x^{0.548}$	0.9338
		2	$y = 0.767x^{0.369}$	0.9079
		4	$y = 1.737x^{0.470}$	0.9118
		13	$y = 0.214x^{0.997}$	0.827
600 ~ 800		1	$y = 0.044x^3 - 0.145x^2 + 1.081x + 0.038$	0.8092
		2	$y = 0.239x^3 - 1.022x^2 + 1.501x + 0.161$	0.6869
		4	$y = 0.458x^3 - 2.040x^2 + 3.356x + 0.108$	0.8328
		13	$y = -0.042x^3 + 0.016x^2 + 0.02x + 0.047$	0.8744
800 ~ 1000		1	$y = 0.042x^3 - 1.035x^2 + 2.314x - 0.492$	0.8092
		2	$y = 0.906x^3 - 3.609x^2 + 4.564x - 0.887$	0.6869
		4	$y = -0.553x^3 + 0.565x^2 + 1.332x + 0.5971$	0.8328
		13	$y = -0.042x^3 + 0.016x^2 + 0.02x + 0.047$	0.8744

图 1 湿季马占相思 E_t 与 PAR、VPDFig. 1 Whole-tree transpiration of *A. mangium* and PAR, VPD in the wet season

● 样树 1 Tree 1; ○ 样树 2 Tree 2; ▼ 样树 4 Tree 4; △ 样树 13 Tree 13

曲线的斜率可以反映蒸腾速率对 VPD 的敏感性,从图 2 可以看出,大树对 VPD 的响应的敏感性较高,如在 $PAR_{100\sim 200}$ 等级,优势木 4 的敏感度是劣势木的 9 倍,是中间木的 2 倍之多。蒸腾速率在 $VPD_{1.7\text{kPa}}$ 时达到最大值,最大蒸腾速率不是出现在 $PAR_{800\sim 1000}$ 的高 VPD 下,而是在 $PAR_{600\sim 800}$ 时的较高 VPD 下,过高的 VPD 和 PAR 可能协同抑制蒸腾。

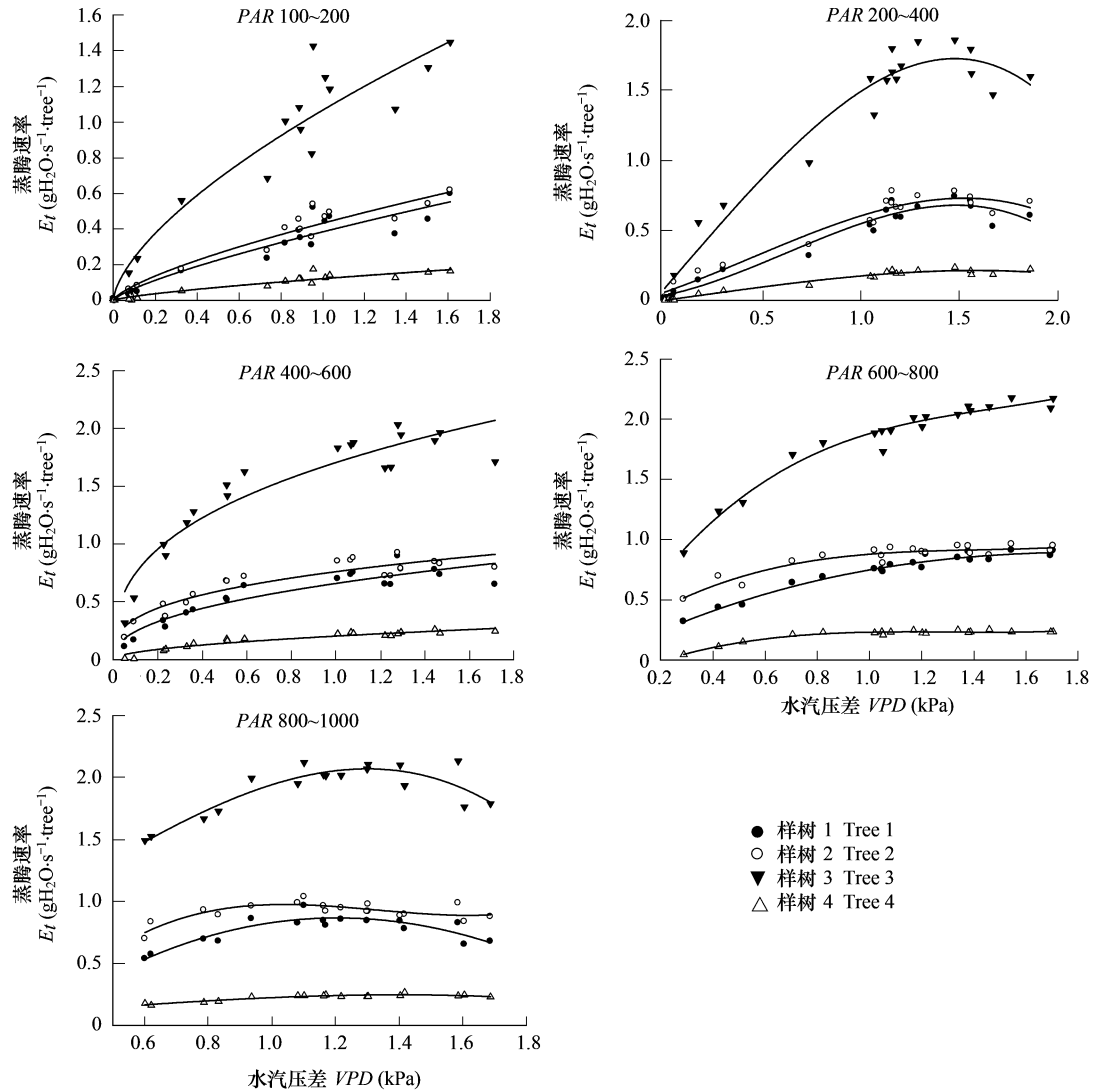


图 2 湿季不同辐射等级下不同径级马占相思的蒸腾速率

Fig. 2 Transpiration variation of *A. mangium* among different diameter-classes at different light levels

2.2 干季马占相思整树蒸腾与潜在蒸腾

土壤水分供应水平决定液流的总体水平,即每日液流的绝对值。虽然华南地区 10 月份有高的蒸散需求和 VPD ,但是蒸腾速率明显低于湿季,降低最明显的是样树 1 和样树 13(图 3),其蒸腾活动非常低,土壤水分下降缩小了不同树木之间液流密度的差异^[18],从而显著缩小了不同胸径大小的树木之间蒸腾速率的差异。但陆平等^[21]研究挪威云杉指出,随着土壤水分亏缺加剧,挪威云杉不同径级之间的整树蒸腾差异增大,这和本文的研究结果有所不同,这可能是由于挪威云杉的种植密度较大,整树蒸腾与冠幅等形态学特征关系不密切。干旱时,植物降低蒸腾是耐旱性的一种表现。马占相思蒸腾速率干季显著降低,是应对干旱的生态策略。

将干季各 PAR 等级内的 VPD 代入湿季对应 PAR 等级的 E_t - PAR 拟合方程,即为特定 VPD 下的潜在蒸腾。在计算潜在蒸腾时,首先要考虑干湿季有生态学意义的 VPD 的范畴,湿季 $VPD \leq 2.0\text{kPa}$ (高的温度和高的湿

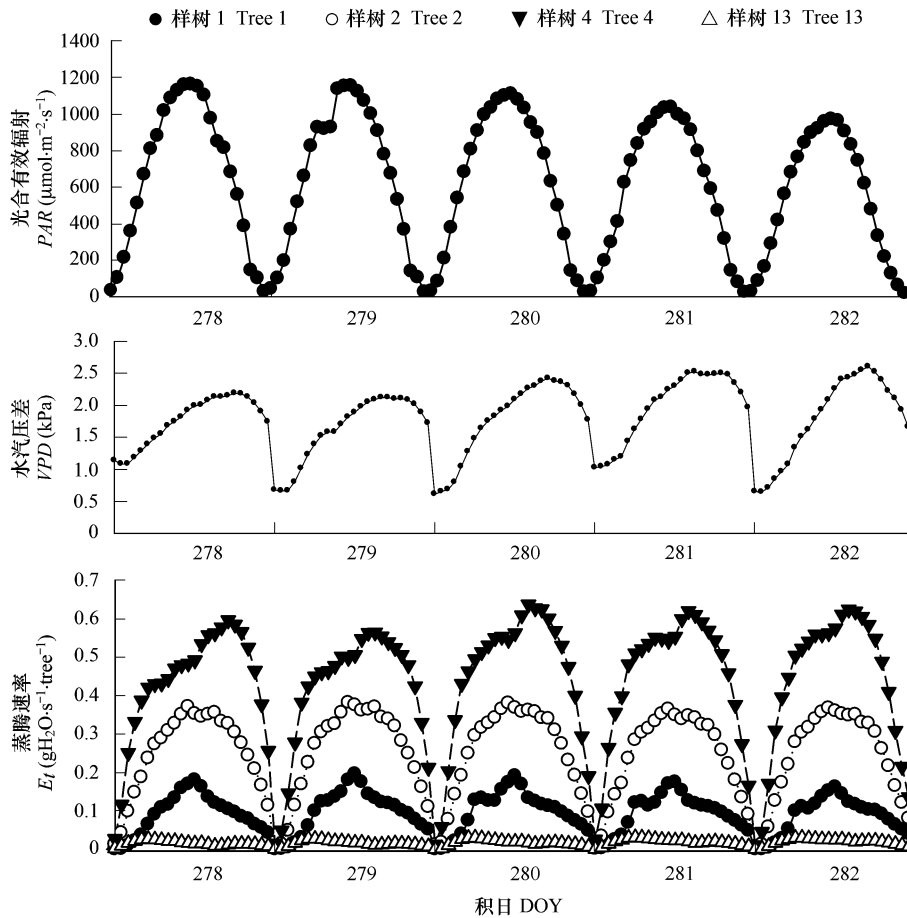


图3 干季马占相思不同径级的 E_t 和对应的 VPD 、 PAR

Fig. 3 E_t of *A. mangium* across different diameter-classes and VPD , PAR in the dry season

度),考虑拟合方程是否有意义,要剔除干季 $VPD > 2\text{kPa}$ 的数据。因为劣势木(样树 13)在 PAR 800 ~ 1000 辐射等级内,潜在蒸腾均为负值(原因未知),该树在该辐射等级内的潜在蒸腾速率用湿季的蒸腾速率代替。

2.3 马占相思蒸腾速率干湿季之差

潜在蒸腾减去干季实际测定的蒸腾,即为干湿季之差,这种方法综合考虑了温度、相对湿度、光合有效辐射的影响,因此计算结果更加合理。

从图 4 可以看出,不同径级蒸腾降低量排序为:优势木 > 中间木 > 劣势木,结论与假设相一致,即大树干季蒸腾下降比小树明显。Peter^[19] 研究生长在砖红壤上的龙脑香林和生长在漂白红砂土上的石南树林时,发现不同径级的龙脑香林在干季和湿季的蒸腾速率没有明显变化,而石南树林小树的蒸腾速率在干季保持稳定,大树则有很大程度的下降。本研究的马占相思整树蒸腾降低率大部分都在 80% 以上,计算的结果显示干季整树蒸腾仅占潜在蒸腾的 10% ~ 20%,这与曾小平等在 2000 年利用气孔气体交换法(LI-1600 气孔计)测定的同一马占相思林段蒸腾速率干季占湿季的 27.6%^[20]

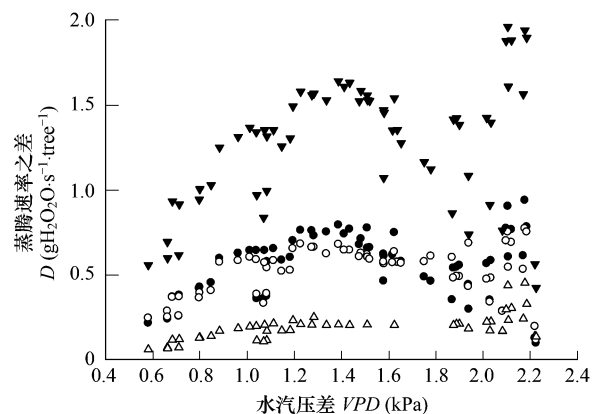


图4 马占相思不同径级干湿季蒸腾之差

Fig. 4 Whole-tree transpiration difference of *A. mangium* across different diameter-classes between the wet and the dry seasons

●样树 1 Tree 1; ○样树 2 Tree 2; ▼样树 4 Tree 4; △样树 13 Tree 13

有一定的差异,这是因为他们是基于叶片测定值进行外推林段的蒸腾,而本文是以整树为研究方法的,此外,现时的马占相思林衰退比较明显,在干季的水分生理活动下降也可能是其中的重要原因之一。从结果来看,华南地区干季土壤水分亏缺严重限制了植物的蒸腾,干旱对马占相思的生长造成一定的水分胁迫。

3 讨论

Granier 树干液流测定技术经历近 20a 的不断发展与完善,为准确测定森林的水分关系提供了有力的技术支持,是研究树木水分生理生态的有效观测方法。土壤水分是植物蒸腾的水源,和植物蒸腾耗水关系密切。当土壤含水量减少,土壤保水能力增强,增加水分流向根部的阻力;另外土壤含水量减少,土壤水势降低,在相同的气象条件下,会降低土壤-植物-大气水势梯度,即降低了水分流动的驱动力^[21]。在特定 VPD 下,土壤含水量的下降引起蒸腾速率的下降。干季蒸腾速率的降低有多种表现形式:气孔关闭,根系对水分吸收能力的降低^[22],叶面积的下降^[23],水力导度降低^[24]和导水木质部变小^[19]。

马占相思属浅根系的高大乔木,无明显主根,因为须根含有大量的固氮根瘤,而深层土壤的供氧状况不利于根瘤的生存而影响固氮作用,故侧根大部分集中分布在土壤上层(30cm)^[25],根部吸收的水分主要来自土壤表层,因此马占相思对土壤水分的反应比较敏感。马占相思原生于温暖湿润地区,蒸腾耗水量较大,与浅根系的生物特性构成了一对矛盾,而上层土壤的水分相对不稳定,因此,土壤水分的变化容易影响马占相思的水分利用。前人的研究显示,马占相思对干旱的响应方式主要是提高水势、气孔导度近似关闭^[26]。随着土壤水分的减少,马占相思的冠层气孔导度急剧下降^[12],从抗旱性方面考虑,马占相思的抗旱能力较差。树木蒸腾是由边界层导度和气孔导度共同控制,由于人工种植的马占相思林树木之间的距离较大,加上已有个别树木枯死,马占相思林段的叶面积指数较小,林内个体间的空间较宽,相互干扰较少,树冠彼此产生重叠或者遮荫的影响弱,即马占相思的蒸腾更多地受气孔的控制。马占相思气孔导度的变化是引起蒸腾的相应变化的主要因素。

越来越多的证据表明,干旱下植物蒸腾的下降是由于水力导度的下降引起的^[24]。干季土壤水分下降,伴随着水势的降低,马占相思却保持着较高的叶片水势^[26],从而加大了马占相思叶片从根部获取水分的难度,不利于水分从根部向叶片的运输。根据力学原理,树木越高,边材面积越大,传输水分所需要的驱动力越大。与小树相比,干季高大树木对水分吸收和传输的阻力变得更大,水力导度下降得更加剧烈,蒸腾下降更明显。也就是说,大树蒸腾下降的幅度明显大于小树,大树受土壤水分供应和季节分配的制约大于小树^[18]。

观测和分析结果表明,湿季土壤水分供应充足,马占相思能充分利用土壤上层的水分资源,蒸腾明显高于干季;在干季,土壤水分的减少明显降低树干液流和整树蒸腾,由于整树蒸腾受树木形态学特征(如边材面积、高度、冠幅等)的影响,干季不同大小的树木整树蒸腾减少的程度差异明显,大树比小树减少得多,大树受土壤水分亏缺的影响较严重。华南地区马占相思成熟林抗旱性较弱,对土壤水分变化的响应敏感,特别是干季土壤水分亏缺对马占相思的生长造成了胁迫,尤其是占优势地位的大树,这样势必影响群落的功能特征。

References:

- [1] Granier A. Evaluation of transpiration in a *Douglas fir* stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3: 309–320.
- [2] Zhao P, Rao X Q, Ma L, *et al.* The variations of sap flux density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium*. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4050–4058.
- [3] Morén A S, Lindroth A, Grelle A. Water-use efficiency as a means of modeling net assimilation. *Trees*, 2001, 15: 67–74.
- [4] Catovsky S, Holbrook N M, Bazzaz F A. Coupling whole-tree transpiration and canopy photosynthesis in coniferous and broad-leaved tree species. *Can J Forest Res*, 2002, 32: 295–309.
- [5] Ma L, Rao X Q, Zhao P, *et al.* Diurnal and seasonal changes in whole-tree transpiration of *Acacia mangium*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(1): 67–73.
- [6] Granier A. Measure du flux de serve brute dans le tronc du *Douglas* par une nouvelle method thermique. *Annales des Sciences Forestieres*, 1987, 44: 1–14.
- [7] Zhao P, Rao X Q, Ma L, *et al.* Application of Granier's sap flow system in water use of *Acacia mangium* forest. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2005, 13(6): 457–468.

- [8] Ma L, Zhao P, Rao X Q, *et al.* Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium*. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2145–2551.
- [9] Phillips N, Oren R, Zimmermann R. Radial patterns of xylem sap flow in non-, diffuse- and ring porous tree species. *Plant, Cell and Environment*, 1996, 19: 983–990.
- [10] Lu P. A direct method for estimating the average sap flux density using a modified Granier measuring system. *Aust J Plant Physiol*, 1997, 24(5): 701–705.
- [11] Clearwater M J, Meinzer F C, Andrade J L. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, 1999, 19(10): 681–687.
- [12] Zhao P, Rao X Q, Ma L, *et al.* Responses of canopy stomatal conductance of *Acacia mangium* forest to environmental driving factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1149–1156.
- [13] Zhao P, Rao X Q, Ma L, *et al.* Sap flow-scaled stand transpiration and canopy stomatal conductance in an *Acacia mangium* forest. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(4): 655–665.
- [14] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100: 291–308.
- [15] Zhao P, Ma L, Rao X Q, *et al.* The variations of sap flux density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium*. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4050–4058.
- [17] Sun H Z, Sun L, Wang C K, *et al.* Sap flow of the major tree species in the eastern mountainous region in northeast China. *Frontiers of Forestry in China*, 2006, 4: 387–393.
- [18] Campbell G S, Norman J M. *An Introduction to Environmental Biophysics*. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998: 36–51.
- [19] Lu P, Biron P, Breda N. Water relations of adult Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst) under drought in the Vosges mountains: water potential, stomatal conductance and transpiration. *Annual Science Forest*, 1995, 52: 117–129.
- [20] Peter B. Sap flow in Bornean *health* and *dipterocarp* forest trees during wet and dry periods. *Tree Physiology*, 1996, 16: 295–299.
- [21] Zeng X P, Zhao P, Peng S L. Study of the water ecology of artificial forest of *Acacia mangium* in the Heshan hill region, Guangzhou Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(1): 69–73.
- [22] Shen L H, Zhang Z Q, Liu C F, *et al.* Sap flow of *P. × euramericanav* plantation trees in sandy soil. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(1): 88–92.
- [23] Čermák J, Cienciala E, Kučera J, Lindroth A. Individual variation of sap-flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration: a pilot study at the central NOPEX site. *Journal of Hydrology*, 1995, 168: 17–27.
- [24] Teskey R O, Sheriff D W. Water use by *Pinus radiata* trees in a plantation. *Tree Physiology*, 1996, 16: 273–279.
- [25] Lu P, Biron P, Breda N. Water relations of adult Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst) under drought in the Vosges mountains: whole tree hydraulic conductance, xylem embolism and water loss regulation. *Annual Science Forest*, 1996, 53: 113–121.
- [26] Gao J, Cao K F, Wang H X. Water relations and stomatal conductance in nine tree species during a dry period grown in a hot and dry valley. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(2): 186–190.

参考文献:

- [2] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 马占相思树干液流密度和整树蒸腾的个体差异. *生态学报*, 2006, 26(12): 4050~4058.
- [5] 马玲, 饶兴权, 赵平, 等. 马占相思整树蒸腾的日变化和季节变化特征. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 67~73.
- [7] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. Granier 树干液流测定系统在马占相思的水分利用研究中的应用. *热带亚热带植物学报*, 2005, 13(6): 457~468.
- [8] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2005, 25(9): 2145~2551.
- [12] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 马占相思林冠气孔导度对环境驱动因子的响应. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1149~1156.
- [13] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 655~665.
- [15] 赵平, 马玲, 饶兴权, 等. 马占相思(*Acacia mangium*)树干液流密度和整树蒸腾的个体差异. *生态学报*, 2006, 26(12): 4050~4058.
- [21] 曾小平, 赵平, 彭少麟. 鹤山人工林马占相思水分生态研究. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 69~73.
- [22] 申李华, 张志强, 刘晨峰, 等. 沙地杨树人工林树干液流特征. *中国水土保持科学*, 2007, 5(1): 88~92.
- [26] 高洁, 曹坤芳, 王焕校, 等. 干热河谷 9 种造林树种在干季的水分关系和气孔导度. *植物生态学报*, 2004, 28(2): 186~190.