

橡胶树蒸腾特征及其与环境因子的关系*

赵玮^{1,2} 张一平^{1**} 宋清海¹ 张翔^{1,2} 姬红利¹ Syed Moazzam Nizami¹ 余雷¹

(¹ 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 昆明 650223; ² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 于2013年2—11月, 应用 Granier 热消散探针对西双版纳地区橡胶树蒸腾进行了连续观测, 并同步测定了环境因子(光合有效辐射(PAR)、气温、相对湿度、土壤含水量), 结果表明: 橡胶树蒸腾速率为昼高夜低的单峰曲线, 晴天平均蒸腾速率、蒸腾量是雨天的4倍之多; 雨季蒸腾启动时间较干季提前0.5~1.0 h、峰值时间较干季提前2.0~4.5 h, 观测阶段日平均蒸腾量为27.84 kg d⁻¹; 4月蒸腾量最大, 其值为54.3 mm, 11月蒸腾量最小, 其值为29.6 mm。干季环境因子对蒸腾速率影响的大小顺序为: 气温>相对湿度>PAR>土壤含水量, 雨季为: PAR>相对湿度>气温>土壤含水量。干季橡胶林出现水分亏缺, 但橡胶树通过其发达的根系可以获取深层土壤水, 因此未对其造成严重的水分胁迫。

关键词 橡胶树; 蒸腾速率; 环境因子; 相关性

中图分类号 Q945.17 **文献标识码** A

Characteristics of transpiration of rubber trees (*Hevea brasiliensis*) and its relationship with environmental factors. ZHAO Wei^{1,2}, ZHANG Yi-ping^{1**}, SONG Qing-hai¹, ZHANG Xiang^{1,2}, JI Hong-li¹, Syed Moazzam Nizami¹, YU Lei¹ (¹Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; ² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Transpiration rate of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) was measured continuously from February to November in 2013, using the Granier's thermal dissipation probe method. The main environmental factors (including air temperature, relative humidity, photosynthetic active radiation (PAR) and soil moisture) were also measured simultaneously. The results showed that the transpiration rate of rubber tree exhibited a unimodal pattern, with the value being higher during the daytime and lower at night. The average transpiration rate and daily transpiration of sunny day were 4 times more than those of rainy day. The transpiration started 0.5–1.0 h earlier and the peak time was 2.0–4.5 h earlier during the rainy season than during the dry season. During the study period, the average daily transpiration was 27.84 kg d⁻¹. The largest amount of stand transpiration (54.3 mm) occurred in April and minimum (29.6 mm) in November. Environmental factors in terms of their effects on the transpiration rate were ranked as air temperature effects > air relative humidity > PAR > soil moisture in the dry season, and PAR > air relative humidity > air temperature > soil moisture in the rainy season. Despite water deficit during the dry season, the rubber tree can get deep soil water due to its well-developed root system, and is not affected by

*国家自然科学基金项目(41271056, U1202234, 31290221)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05020303, XDA05050601, XDA05050206)、云南省自然科学基金项目(2011FB110)和中国科学院“一三五”专项(XTBG-T03)资助。

**通讯作者 E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn

收稿日期: 2014-01-06 接受日期: 2014-03-17

severe water stress.

Key words: rubber tree; transpiration rate; environmental factors; correlation.

蒸腾作用是指水分以气体的状态,通过植物体的表面(主要是叶片)从体内散失到体外的现象(潘瑞炽, 2008)。近年来,采用 Granier 热消散技术测定植物蒸腾成为一个主流方法,此方法通过测定木质部边材液流密度计算蒸腾量,具有连续、准确和稳定的特点(王华田和王履一, 2002; 马玲等, 2005),被众多研究者采用。国内外一些学者使用热消散探针对一些树种的蒸腾进行了观测,并对蒸腾产生影响的环境因子进行了分析。如赵平等(2011)应用热消散探针对华南地区马占相思蒸腾耗水的研究表明:光合有效辐射(PAR)和水汽压亏缺(VPD)是影响其蒸腾的主要环境因子,二者共同解释了蒸腾变化的 62.7%~82.7%。涂洁等(2008)研究发现,处在生长旺期的湿地松蒸腾与各环境因子的相关性大小依次为湿度、PAR、温度。黄德卫等(2012)对鼎湖山 4 种优势树种的蒸腾观测表明:气温和 PAR 分别是影响干季和湿季蒸腾速率最主要的环境因子,Granier 等(1996)对南美热带雨林一些树种的观测表明:湿度对蒸腾的影响较 PAR 和温度更显著。Bovard 等(2005)对密歇根州 4 种树木的蒸腾进行了观测,发现 PAR 和 VPD 是影响其蒸腾的主要环境因子,二者共同解释了蒸腾变化的 82%。而在欧洲赤松林的观测则表明:气温和土壤温度是限制林分蒸腾的主要环境因子(Wu *et al.*, 2012)。这些研究表明,气温、光照和湿度等是影响蒸腾的重要环境因子,其对蒸腾的影响大小随着树种、季节和地理位置的不同而发生改变。因此,对蒸腾的研究须要综合多个环境因子进行全面分析。

橡胶树(*Hevea brasiliensis*)为大戟科植物,原产于南美洲亚马逊河流域的巴西、委内瑞拉和圭亚那等国。作为重要的工业基本原料和战略储备物资,自 20 世纪 60 年代以来,橡胶树在我国西双版纳和海南岛等地引种成功之后,种植面积不断扩大,特别是近年,伴随天然橡胶价格的攀升,种植面积更是飞速扩大,橡胶林的增加,虽然极大地促进了当地经济的发展和民众的收入,但是也对生态环境造成了破坏,如水土流失严重,土壤蓄水能力差,生物多样性较低等,引起了极大关注(Keeling *et al.*, 1996; Qiu, 2009; Ziegler *et al.*, 2009)。橡胶树作为外来物种,拥有发达的木质部导管,在水分良好的环境下具有较强的竞争力(Ayuthaya *et al.*, 2011)。Tan 等(2011)对西双版纳原始雨林及橡胶林的水分平衡进行了对比,结果表明,在年尺度上,橡胶林的蒸散量大于原始雨林,其雨季储存的水分不足以维持旺盛的蒸散,导致干季径流量小于原始雨林。秦钟等(2003)利用水量平衡法,对海南橡胶林水分分配特征的研究,表明橡胶林蒸散占降雨量的 70.4%。刘珉和吴志祥(2012)对海南橡胶林水循环的研究表明,以蒸散损失的水量占到降雨量的 52.65%。蒸腾作为蒸散的一部分(Wang *et al.*, 2010),在森林水循环中占有重要地位。目前,有关橡胶树的研究多集中于蒸散,对于蒸腾的研究还开展较少,致使难以对其耗水进行较为准确地估算,而对蒸腾产生影响的环境因子也因缺少相关研究。本研究使用 Granier 热消散技术对橡胶树蒸腾进行测定,分析橡胶树蒸腾变化特征及其与环境因子的关系,探讨橡胶树种植对区域水文效应的改变,为深入了解橡胶树水分利用特征提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国西南边陲——云南西双版纳地区，属东亚-马来热带雨林区北缘，地理位置为 21°09'N—22°33'N、99°58'E—101°50'E；该地区终年受西南季风控制，属热带季风气候，一年中有雨季(5—10 月)和干季(11 月—翌年 4 月)之分，其中干季又可分为雾凉季(11 月—翌年 2 月)和干热季(3—4 月)(张克映, 1966)。年平均温度 21.0℃，多年平均降雨量 1490 mm，降雨季节分配明显不均，87%以上的降雨集中在 5—10 月的雨季。该地区的典型原生植被为热带季节雨林，平均冠层高度 35 m，典型的人工植被为橡胶林，成熟橡胶林的林冠平均高度 20 m。

1.2 研究方法

1.2.1 树干液流的测定 本实验对象为 1982 年定植的橡胶树，在 20 m×20 m 的样地内选择生长良好，个体差异较小的 6 棵橡胶树作为样树。在离地 1.3 m 高处，将 Granier 热扩散探针平行的插入树干（去皮），2 探针相距 10~15 cm，该探针由一对热电偶组成，位于树干上端的探针加热，下端探针不加热，2 探针间的温差随液流密度的变化而变化，当液流密度增大时温差变小，减小时温差变大。利用探针间的温差来推算木质部液流密度，使用数据采集器(CR10X, Campbell, USA)采集数据，采集频率为 30 s 次⁻¹，每 30 min 进行平均并存储。Granier 液流密度的经验公式为(Granier, 1987):

$$J_s = 119 \times K^{1.231} \quad (1)$$

式中， J_s 为瞬时液流密度($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)， $K=(\Delta T_m - \Delta T)/\Delta T$ 。其中， ΔT_m 为昼夜最大温差， ΔT 为瞬时温差。

表 1 橡胶树样树的树形特征

Table 1 Tree characteristics of *Hevea brasiliensis*

树号	树高(m)	胸径(cm)	边材面积(m ²)
树 1	21.5	31.5	0.0428
树 2	21.5	30.1	0.0401
树 3	21.7	27.3	0.0349
树 4	22.0	30.8	0.0415
树 5	22.5	28.6	0.0373
树 6	22.0	35.0	0.0493

1.2.2 环境因子的测定 利用设置在橡胶林的通量观测塔上的小气候观测系统，在测定树干液流的同时对光合有效辐射(SQ-311, Apogee, USA)、空气温湿度(HMP45C, Campbell, USA)、土壤含水量(CS161, Campbell, USA)进行同步观测，观测频度与树干液流相同。其中光合有

效辐射、空气温湿度传感器安装于距地面 28 m 的冠层上方，土壤含水量传感器安装在距地表 20 cm 深处。

1.2.3 边材面积的测定 边材面积是计算整树蒸腾和林分蒸腾量的关键参数，因此对边材面积的准确测定至关重要，为了得到较准确的结果同时不损伤样树，在样地外选择 47 棵橡胶树作为测定对象。由于橡胶树心材和边材之间没有明显界限，采用生长锥钻取树洞并加注染料的方法量取边材厚度(Granier et al.,1994; Cermák et al., 2002; Horna et al., 2011)，建立边材面积和胸径之间的回归方程：

$$A_s=18.776 \times DBH-163.8 \quad (R^2=0.89, n=47) \quad (2)$$

式中， A_s 为边材面积(cm^2)， DBH 为树木胸径(cm)。

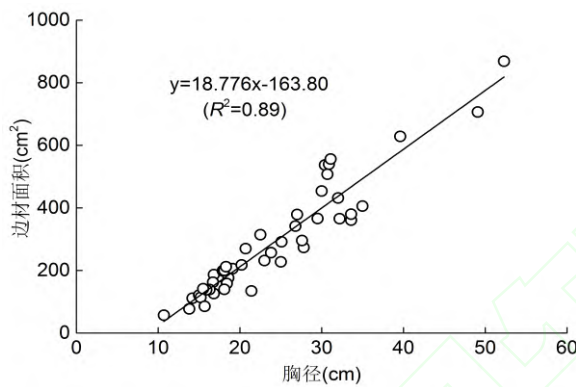


图 1 边材面积与胸径相关关系

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

1.2.4 蒸腾速率及蒸腾量的计算 蒸腾速率是单位时间内单棵树木的蒸腾量，小时蒸腾速率的计算公式为：

$$E_t=J_s \times A_s \times 3600 \quad (3)$$

式中， A_s 为边材面积(m^2)， E_t 为蒸腾速率(kg h^{-1})。

橡胶树日蒸腾量为：

$$E = \sum_{i=1}^{n=24} E_{ti} \quad (4)$$

式中， E 为橡胶树日蒸腾量(kg d^{-1})， E_{ti} 为第 i 小时的蒸腾速率(kg h^{-1})。

橡胶林的月蒸腾量为：

$$E_{林} = \bar{E} \times 495 \times N / 10000 \quad (5)$$

式中， $E_{林}$ 为橡胶林月蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{月}^{-1}$)， \bar{E} 为样树日平均蒸腾量(kg d^{-1})， N 为当月天数。495为标准种植模式下每公顷株数(株 hm^{-2})。

1.3 数据处理

观测期间为 2013 年 2 月—11 月；使用 Excel 2010、SPSS 20.0 对数据进行分析处理。使用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 蒸腾速率日变化

图2显示了干季(3月24—26日)和雨季(8月14—16日)晴好天气条件下橡胶树蒸腾速率和环境因子的日变化,可见,晴好天气条件下橡胶树蒸腾速率为昼高夜低的单峰曲线,橡胶树蒸腾速率随日出而启动,随着辐射的增强,温度开始上升,湿度下降,蒸腾速率迅速上升,至午后达到峰值。

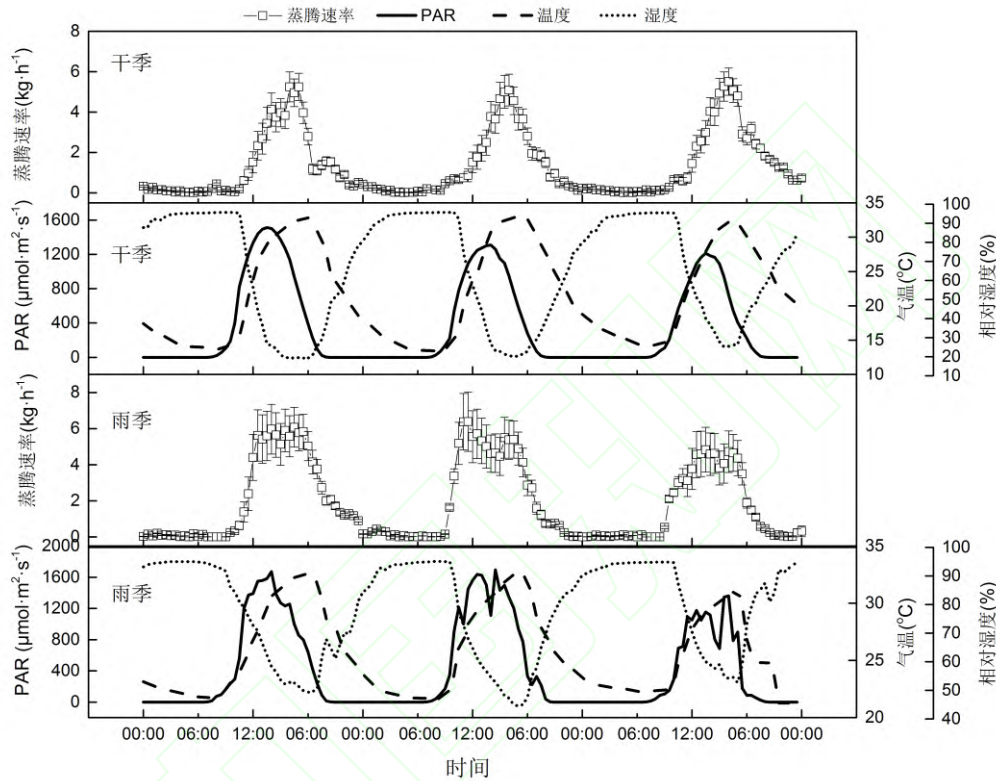


图2 橡胶树蒸腾速率及环境因子日变化

Fig. 2 Daily variation of environmental factors and transpiration rate

从图2还可看出,干季3月24日、25日和26日蒸腾的启动时刻分别为10:00、9:00和9:30,出现峰值的时刻为16:00、16:00和16:00;而雨季8月14日、15日和16日蒸腾的启动时刻分别为9:00、8:30和8:30,达到峰值的时刻分别为14:00、11:30和13:30。雨季蒸腾启动时间早于干季0.5~1.0 h,出现峰值的时刻较干季提前2.0~4.5 h。从图2还可看出,干季蒸腾日变化呈“尖峰”型曲线,雨季则为“宽峰”型曲线,雨季蒸腾速率高峰持续时间明显大于干季。

由图3可见,晴天橡胶树蒸腾速率变化较大,蒸腾随日出迅速上升,在14:30达到高峰后一直持续到16:30才开始下降。而雨天天气下,橡胶树蒸腾速率日变化差异较小,自蒸腾启动开始一直维持较低的蒸腾速率,全天无明显高峰时段。晴天平均蒸腾速率、最大蒸腾速率、日蒸腾量依次为 $1.33 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $4.93 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $31.83 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$,而阴天则为 $0.31 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1.11 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、

7.55 kg d⁻¹，晴天平均蒸腾速率、最大蒸腾速率和日蒸腾量均是雨天的4倍之多，显示了不同天气下蒸腾的巨大差异。

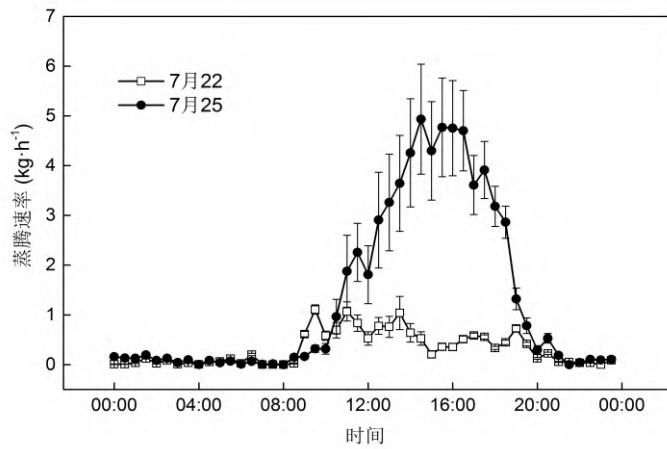


图3 雨季晴天、雨天橡胶树蒸腾速率日变化

Fig. 3 Daily variation of transpiration rate in sunny and rainy days during the rainy season

2.2 整树日蒸腾量

图4可见，2013年2月25日—11月31日橡胶树日蒸腾量变化，在观测期间，橡胶树日蒸腾量的变化趋势为：2月末至雨季初期波动上升，进入雨季后期由于降雨增多，蒸腾量开始下降，尤其是7月雨日较多，对蒸腾造成较大影响。观测期间最大日蒸腾量为55.74 kg d⁻¹，最小日蒸腾量为1.22 kg d⁻¹，其值相差45倍之多，且二者均出现在雨季，表明雨季日蒸腾差异大于干季，而蒸腾日均值为27.84 kg d⁻¹。从图4可见，4和5月日蒸腾量均大于平均值，而7和11月则相反。

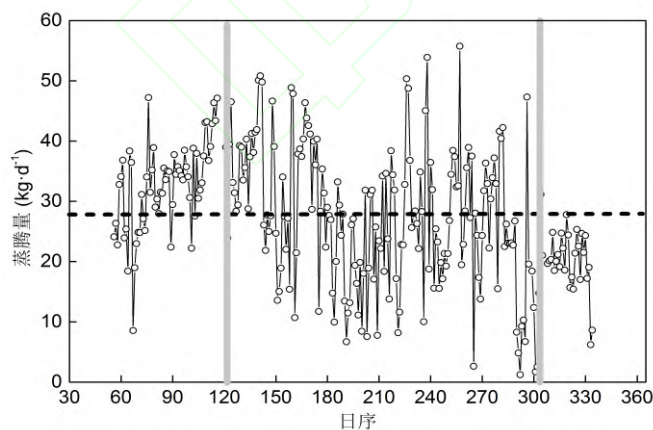


图4 2月25日至11月31日(日序 DOY 56~334)橡胶树日蒸腾量动态

Fig. 4 Variation of daily transpiration in *Hevea brasiliensis* from February 25th to November 31st (DOY 56-334)

----表示蒸腾日均值。

2.3 橡胶林蒸腾量

从图 4 可以看出,干季蒸腾量呈上升趋势,雨季初期开始下降,观测阶段最大值出现在 4 月,达到 54.3 mm,最小值出现在 11 月,其值为 29.6 mm,7 月由于雨天较多导致蒸腾出现较大幅度下降,其值为 31.1 mm,观测期间月平均蒸腾量为 41.9 mm。月降雨量呈先增加后降低的趋势,11 月降雨量最小,仅为 14.4 mm,8 月降雨量最大,达到 308.8 mm。干季末期土壤含水量呈降低趋势,4 月土壤含水量仅为 23.0%,随着雨季的到来,土壤含水量迅速上升,8 月达到最高值 28.7%,雨季后期土壤含水量下降,11 月土壤含水量最低,其值为 22.9%。月蒸腾量与月降雨量比值呈先下降后上升的趋势,最大值出现在 11 月,比值为 205.56%,最小值出现在 7 月,比值为 13.31%。2 和 11 月蒸腾量超过降雨量,表明橡胶林出现水分亏缺。

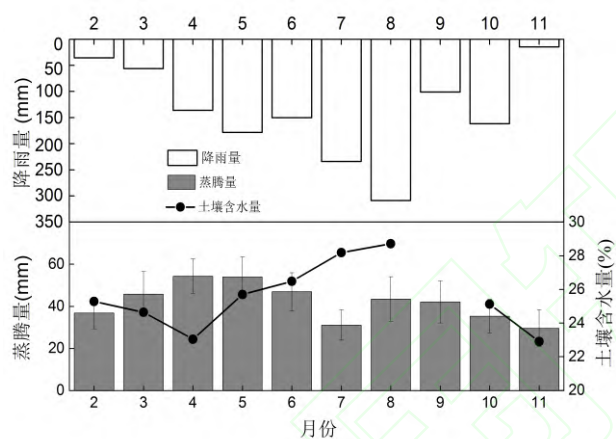


图 5 橡胶林月降雨量、土壤含水量和蒸腾量

Fig. 5 Monthly rainfall, soil moisture and transpiration in rubber plantation

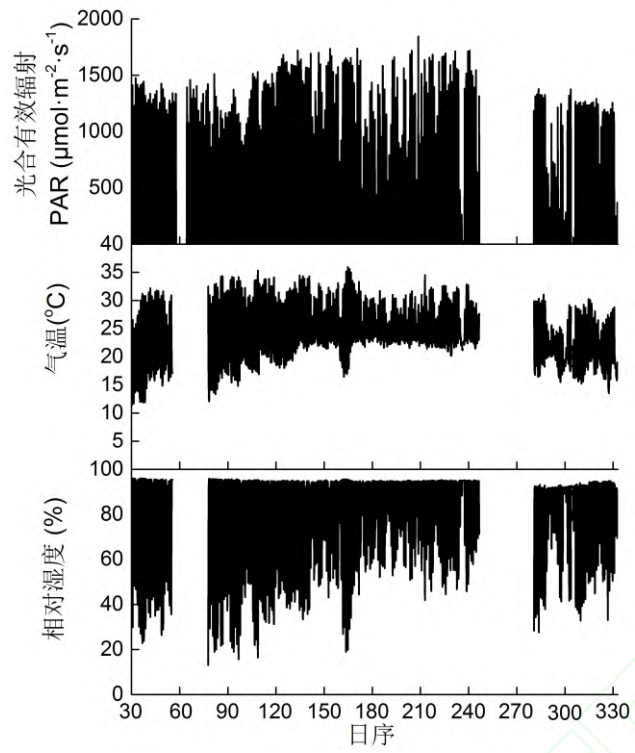


图 6 橡胶林环境因子变化

Fig. 6 Variation of environmental factors in rubber plantation

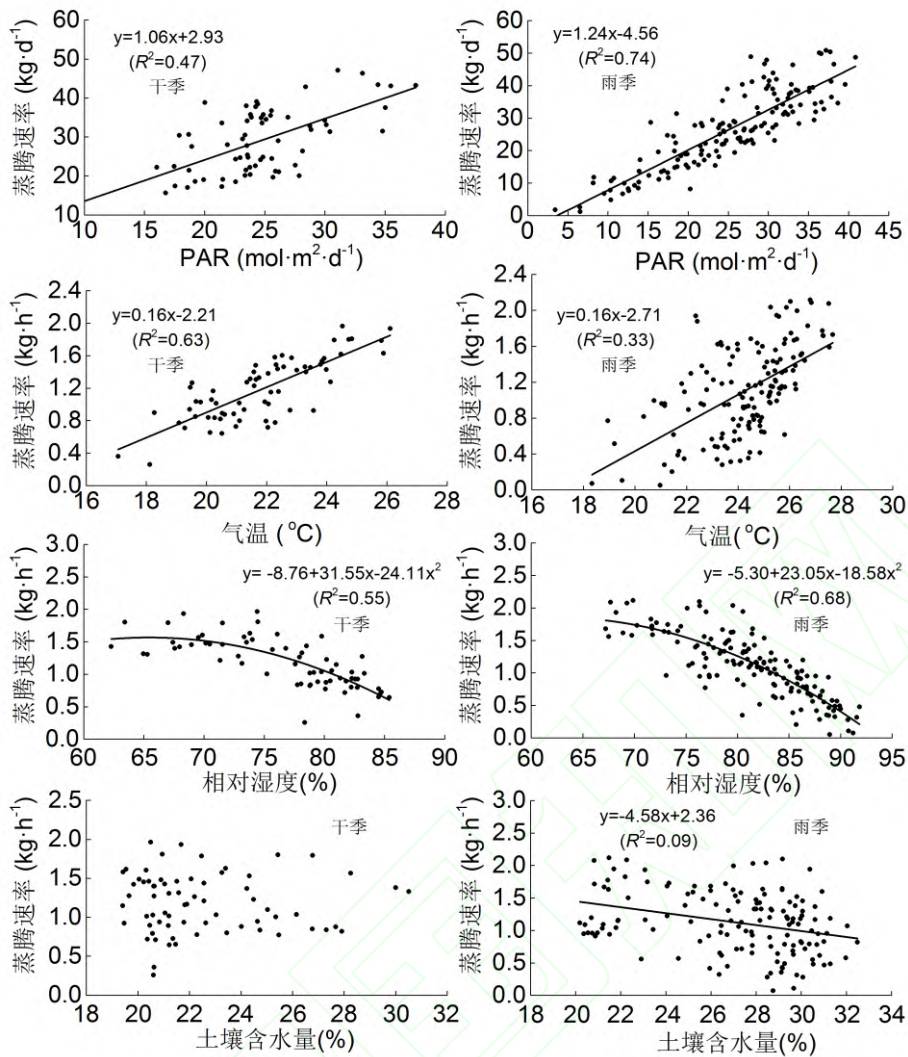


图 7 日尺度上蒸腾速率与环境因子的关系

Fig. 7 Relationship between transpiration rate and environmental factors at daily scales

2.4 蒸腾速率及其影响因素

蒸腾速率随环境因子发生季节性变化,不同季节影响蒸腾速率的环境因子不同,通过对橡胶树蒸腾速率及其环境因子的分析,初步了解不同季节影响其蒸腾速率的环境因子,对于掌握橡胶林水分利用动态及林分管理具有重要意义。

由图 6 可知,在观测期间光合有效辐射无明显季节变化特征。气温的变化趋势为干季逐渐上升,雨季后期开始降低,与干季相比,雨季气温较为稳定。湿度的变化趋势为雨季大于干季,干热季湿度最小,雨季由于降雨增多导致湿度较高。

从图7可见,除土壤含水量外,蒸腾速率与PAR、温度、相对湿度的拟合效果较好,蒸腾速率与PAR和温度线性正相关。而采用多项式对蒸腾速率与相对湿度的拟合效果最好,拟合结果显示二者负相关。不同季节影响橡胶树蒸腾速率的环境因子不同,在干季影响橡胶树

蒸腾速率的环境依次为气温($R^2=0.63$)>相对湿度($R^2=0.55$)> PAR ($R^2=0.47$)>土壤含水量, 雨季为 PAR ($R^2=0.74$)>相对湿度($R^2=0.68$)>气温($R^2=0.33$)>土壤含水量($R^2=0.09$)。

本研究采用逐步回归法, 分别以5%和10%的可靠性入选和剔除临界值, 对蒸腾速率和环境因子进行分析, 得到以下方程:

$$\text{干季: } TR = -0.088 + 0.1T_a - 1.709RH + 0.017PAR \quad (R^2=0.787, P<0.001)$$

$$\text{雨季: } TR = 0.702 + 0.032PAR - 2.306RH + 0.061T_a \quad (R^2=0.826, P<0.001)$$

式中, TR 为蒸腾速率, T_a 为气温, PAR 为光合有效辐射, RH 为相对湿度。可以看到, 无论是干季还是雨季, PAR 、气温和相对湿度均进入回归方程, 而土壤含水量在干季和雨季均未进入方程。在干季, 各因子的进入次序为气温、相对湿度、 PAR 。其中气温解释蒸腾速率变化的 63.5%, 气温和相对湿度解释蒸腾速率变化的 74.9%, 3 个环境因子共同解释了蒸腾速率变化的 78.7%。在雨季, 各因子的进入次序为 PAR 、相对湿度、气温。其中 PAR 解释蒸腾速率变化的 63.0%, PAR 和相对湿度解释蒸腾速率变化的 79.0%, 3 个环境因子共同解释了蒸腾速率变化的 82.6%。研究表明, 采用逐步回归法与对单个环境因子的拟合结果相同, 即干季对蒸腾速影响最大的环境因子是气温、雨季对蒸腾速率影响最大的环境因子是 PAR 。

3 讨 论

橡胶树蒸腾具有明显的昼夜变化特征, 呈现昼高夜低的变化趋势, 在较小的尺度上光辐射是调节气孔活动的主要环境因子(赵平等, 2006), 光辐射的变化引起其他环境因子的变化, 在日出后不久蒸腾开始启动。不同季节蒸腾启动时间不同, 雨季启动时间早于干季 0.5~1.0 h, 峰值时间早于干季 2.0~4.5 h, 其原因, 除了雨季日出时间略早于干季外, 气温是影响蒸腾启动的主要原因, 较低的气温会影响根系吸水和气孔的开闭程度(苏文华和张光飞, 2002)。不同天气下, 蒸腾速率差异较大, 雨天和晴天表现出完全不同的蒸腾特征, 晴天蒸腾速率是雨天的 4 倍, 晴天有明显的蒸腾高峰时段, 而雨天蒸腾变化平缓, 这是因为雨天光合有效辐射较弱, 湿度较大所致。

橡胶树日蒸腾量差异巨大(图 4), 这是环境因子变化较大所致, 干季由于降雨较少, 各环境因子较稳定, 随着雨季的到来, 降雨开始增多, 日降雨量与降雨时段差异较大, 对环境因子造成不同强度的干扰, 频繁的降雨会在一定程度上削弱蒸腾作用(赵平等, 2011), 而附着在叶片表面的雨水也会影响气孔开闭(马玲等, 2007), 进而影响蒸腾量。

从图 5 可知, 橡胶林最大月蒸腾量出现在 4 月, 此时降雨量并未达到最大值, 7 月蒸腾量较小, 但该月降雨量达到 233.8 mm, 表明蒸腾量并不会随降雨量的增加而增加。而在一些降雨较少、受水分胁迫较严重的地区, 降雨对蒸腾的影响较为显著, 如生长在半干旱地区的刺槐, 其蒸腾作用受降雨的影响较大, 在降雨没有使土壤含水量得到明显补充的情况下, 蒸腾却显著增加, 这表明, 该地区水分是限制蒸腾的主要环境因子之一(吴芳等, 2010), 在降雨充沛的地区, 水分对蒸腾的影响较小。O'Brien 等(2004)对哥斯达黎加 10 个树种的蒸腾进行了监测, 结果表明: 降水及土壤含水量对蒸腾的影响微弱, 辐射等环境因子才是决定其

蒸腾的关键因子。对于一个地区的干旱程度,可以使用干旱指数 r 来反映,其表达式为 $r=E_0/P$,式中 E_0 为蒸散量, P 为降雨量。本研究虽未测得橡胶林蒸散量,但使用蒸腾量与降雨量的比值同样可以反映林分所受干旱程度,从图5可知,2、3和11月蒸腾量与降雨量之比分别为1.03、0.81和2.06。其中,2月和11月蒸腾量超过降雨量,表明,此时林分出现较严重的水分亏缺。3月蒸腾量虽小于降雨量,但通过蒸腾量与蒸散量的比值可知(Wang *et al.*, 2010; 魏焕奇等, 2012),该月仍然出现了水分亏缺。西双版纳地区位于热带北缘,降雨量虽不及典型热带地区,但这种集中降雨导致雨季蒸腾受到一定限制,蒸腾量与降雨量的比值偏低,而干季又可利用雨季储存在土壤中的水分来维持其正常的生理活动,从而削弱了水分对蒸腾作用的限制。

从蒸腾速率与环境因子的拟合结果可知,干季影响橡胶树蒸腾速率的主要环境因子依次为气温、相对湿度、 PAR 。其中气温是最主要的影响因子,较低的气温会影响根系吸水和气孔的开闭程度(苏文华和张光飞, 2002)。同时气温上升也会加速水气的垂直输送(马玲等, 2005)。雨季影响橡胶树蒸腾速率的环境因子依次为 PAR 、相对湿度、气温。雨季降雨多且频度高,这对其它环境因子造成较大影响,特别是 PAR 受其影响最大,研究表明, PAR 对气孔导度具有直接或间接地正效应,树木的蒸腾随 PAR 的上升而上升(Oren & Pataki, 2001)。雨季阴天较多,导致 PAR 值相对较低,对蒸腾造成较大影响,当天气转晴后, PAR 值迅速上升,蒸腾也开始回升。与干季相比,雨季蒸腾速率与气温的相关性较低,这可能和雨季气温较高,蒸腾速率对气温的敏感度下降有关。Horna 等(2011)对印尼热带雨林7个树种的蒸腾观测表明:湿度是决定树木蒸腾量的最主要环境因子,其与蒸腾的相关性大于辐射和气温。与西双版纳地区相比,该地区降雨更多(多年平均降雨量达3300 mm),气温年较差小,干季持续时间短,各环境因子较稳定,较高的湿度是限制蒸腾最主要的环境因子。黄德卫等(2012)对鼎湖山针阔混交林优势种树的蒸腾研究表明,气温和 PAR 分别是影响干季和湿季蒸腾的主导因子。这与本研究结果相同,其原因可能是华南地区在纬度及气候方面与西双版纳地区较为相近,因此影响树木蒸腾的环境因子也较为相似。西双版纳地区由于其特殊的地理位置导致干季和雨季环境因子差异较大,因而控制其蒸腾的环境因子随季节而发生改变。对蒸腾速率与土壤含水量的拟合结果表明,二者没有显著相关性,表明土壤含水量对蒸腾速率的影响较小,即使在干季末期(3—4月)土壤含水量出现明显下降的情况下仍然保持较高的蒸腾量(图5),本实验所测土壤含水量距地表20 cm,而橡胶树侧根也主要分布在(0~20 cm)的土层(房秋兰和沙丽清, 2005; 华元刚等, 2012),二者没有显著相关性的原因可能是:干季表层土壤含水量下降,橡胶树通过主根获取深层水,随着雨季的来临,表层土壤水分得到补充,水分充足,橡胶树转而利用其侧根获取浅层土壤水分。Liu 等(2013)使用稳定同位素法对橡胶树水分摄取方式的研究表明,雨季橡胶树对(0~30 cm)的浅层土壤水分吸收最多,而在干季,橡胶树水分获取多来自(30~70 cm)甚至更深的土壤,在水分最亏缺的干季后期(3—4月)也未遭受严重的水分胁迫,这与本研究结果类似。而在亚马逊和泰国热带雨林的研究也表明,植

物通过深根系统获取深层水以抵抗干旱(Hodnett *et al.*, 1995; Jipp *et al.*, 1998; Giambelluca *et al.*, 2000)。

综上所述, 由于西双版纳地区特殊的地理位置及气候条件, 导致干季和雨季影响蒸腾的主导因子不同。干季较低的气温降低了橡胶树的蒸腾速率, 使林分蒸腾总量下降。而在雨季, 由于降雨偏多导致 *PAR* 值偏低, 限制了林分的蒸腾。干季由于降雨较少导致林分出现水分亏缺, 但橡胶树利用其强大的根系可以获取雨季储存在土壤中的深层水(Tan *et al.*, 2011), 维持其正常的水分需求, 未对其造成严重的水分胁迫。但这种水分获取方式导致地下水位降低, 造成当地干季用水出现短缺。此外, 由于橡胶林结构单一, 林下植被较少, 造成土壤蓄水能力差, 水土流失严重, 造成区域水文效应的改变, 加之热带雨林的破坏和橡胶林面积的不断扩大, 加快了这种改变。虽然橡胶树给西双版纳地区带来了巨大的经济财富, 但由此带来的环境问题也不容忽视, 如不采取有效措施加以防范, 在不久的将来该地区可能会面临更加严峻的生态危机。

致 谢 观测中得到版纳生态站邓云、陈辉、黄继梅等工作人员的帮助, 在此表示感谢!

参考文献

- 房秋兰, 沙丽清. 2005. 西双版纳橡胶林细根生物量及其周转. 中南林学院学报, **25**(5): 40-44.
- 华元刚, 罗 微, 林钊沐, 等. 2012. 水肥耦合对橡胶树根系垂直分布的影响. 热带作物学报, **33**(8): 1342-1347.
- 黄德卫, 张德强, 周国逸, 等. 2012. 鼎湖山针阔叶混交林优势种树干液流特征及其与环境因子的关系. 应用生态学报, **23**(5): 1159-1166.
- 刘 珉, 吴志祥. 2012. 森林生态系统水循环研究概述. 热带农业工程, **36**(1): 13-20.
- 马 玲, 饶兴权, 赵 平, 等. 2007. 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, **29**(1): 67-73.
- 马 玲, 赵 平, 饶兴权, 等. 2005. 乔木蒸腾作用的主要测定方法. 生态学杂志, **24**(1): 88-96.
- 潘瑞炽. 2008. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社.
- 秦 钟, 周兆德, 陶忠良. 2003. 橡胶林水分的分配特征. 热带作物学报, **24**(2): 6-10.
- 苏文华, 张光飞. 2002. 土壤温度与气温对紫花雪山报春光合作用和蒸腾作用的影响. 西北植物学报, **22**(4): 824-830.
- 涂 洁, 刘琪璟, 李海涛, 等. 2008. 江西千烟洲湿地松生长旺季树干液流动态及影响因素分析. 林业科学, **44**(1): 46-51.
- 王华田, 王履一. 2002. 利用热扩式边材液流探针(TDP) 测定树木整株蒸腾耗水量的研究. 植物生态学报, **26**(6): 661-667.
- 魏焕奇, 何洪林, 刘 敏, 等. 2012. 基于遥感的千烟洲人工林蒸散及其组分模拟研究. 自然资源学报, **27**(5): 778-789.

- 吴 芳, 陈云明, 于占辉. 2010. 黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态. 植物生态学报, **34**(4): 469-476.
- 张克映. 1966. 淇南气候的特征及其形成因子的初步分析. 气象学报, **33**(2): 210-230.
- 赵 平, 饶兴权, 马 玲, 等. 2006. 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, **30**(4): 655-665.
- 赵 平, 邹绿柳, 饶兴权, 等. 2011. 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化. 生态学报, **31**(20): 6038-6048.
- Ayuthaya SIN, Do FC, Pannangpetch K, *et al.* 2011. Water loss regulation in mature *Hevea brasiliensis*: Effects of intermittent drought in the rainy season and hydraulic regulation. *Tree Physiology*, **31**: 751-762.
- Bovard BD, Curtis PS, Vogel CS, *et al.* 2005. Environmental controls on sap flow in a northern hardwood forest. *Tree Physiology*, **25**: 31-38.
- Cermák J, Jiménez SM, González-Rodríguez AM, *et al.* 2002. Laurel forests in Tenerife, Canary islands. *Trees*, **16**: 538-546.
- Giambelluca TW, Nullet MA, Ziegler AD, *et al.* 2000. Latent and sensible energy flux over deforested land surfaces in the eastern Amazon and northern Thailand. *Singapore Journal of Tropical Geography*, **21**: 107-130.
- Granier A, Anfodillo T, Sabatti M, *et al.* 1994. Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: a quantitative and qualitative analysis. *Tree Physiology*, **14**: 1383-1396.
- Granier A, Huc R, Barigah ST. 1996. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, **78**: 19-29.
- Granier A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, **3**: 309-320.
- Hodnett MG, da Silva LP, Da Rocha HR, *et al.* 1995. Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. *Journal of Hydrology*, **170**: 233-254.
- Horna V, Schuldt B, Brix S, *et al.* 2011. Environment and tree size controlling stem sap flux in a perhumid tropical forest of Central Sulawesi, Indonesia. *Annals of Forest Science*, **68**: 1027-1038.
- Jipp PH, Nepstad DC, Cassel DK, *et al.* 1998. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally-dry Amazonia. *Climatic Change*, **39**: 395-412.
- Keeling CD, Chin JFS, Whorf TP. 1996. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, **382**: 146-149.
- Liu WJ, Li JT, Lu HJ, *et al.* 2013. Vertical patterns of soil water acquisition by non-native rubber trees (*Hevea brasiliensis*) in Xishuangbanna, southwest China [EB/OL]. [2014-1-3].

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eco.1456/abstract>

- O'Brien JJ, Oberbauer SF, Clark DB. 2004. Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical forest. *Plant, Cell & Environment*, **27**: 551-567.
- Oren R, Pataki DE. 2001. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests. *Oecologia*, **127**: 549-559.
- Qiu J. 2009. Where the rubber meets the garden. *Nature*, **457**: 246-247.
- Tan ZH, Zhang YP, Song QH, *et al.* 2011. Rubber plantations act as water pumps in tropical China. *Geophysical Research Letters*, **38**: L24406.
- Wang L, Caylor KK, Villegas JC, *et al.* 2010. Partitioning evapotranspiration across gradients of woody plant cover: Assessment of a stable isotope technique. *Geophysical Research Letters*, **37**: L09401.
- Wu SH, Jansson PE, Kolari P. 2012. The role of air and soil temperature in the seasonality of photosynthesis and transpiration in a boreal Scots pine ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, **156**: 85-103.
- Ziegler AD, Fox JM, Xu JC. 2009. The Rubber Juggernaut. *Science*, **324**: 1024-1025.

作者简介 赵 玮, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要从事热带森林碳水循环方面的研究。E-mail: zhaowei@xtbg.org.cn
责任编辑 王 伟