

尾巨桉树干液流特性及其影响因子分析

王文, 朱焯, 诸葛绪霞, 罗智锋

(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)

摘要: 应用热扩散式探针法于 2010 年 7—8 月对广东尾巨桉进行树干液流观测, 并结合小型气象站采集的同步气象数据分析了环境因子与液流的关系。结果表明, 尾巨桉液流的日变化有明显的昼夜节律, 夜间有微弱的液流活动。树干南北两侧液流速率相关性显著 ($R^2 = 0.994$), 数值上北侧高于南侧。尾巨桉液流的变化与光合有效辐射、空气相对湿度及风速 3 个环境因子的变化具显著相关关系, 按相关程度排序为: 光合有效辐射 > 空气相对湿度 > 风速。夜间液流与环境因子相关性不显著, 主要用于植物补水。

关键词: 尾巨桉; 热扩散式探针法; 树干液流; 影响因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0159-06

中图分类号: Q948.1

Stem Sap Flow Characters of *Eucalyptus Urophylla* × *E. Grandis* and Its Influence Factors

WANG Wen, ZHU Ye, ZHUGE Xu-xia, LUO Zhi-feng

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and
Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Sap flow of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* in Guangdong Province was measured from July to August in 2010 using thermal dissipation probe method. The relations of sap flow to ambient environmental factors were analyzed in combination with environmental factors collected from the micro-meteorological station. Daily sap flow had significant circadian variation with weak sap flow activities at night. The velocity in the north was higher than the south and the correlation between them was significant. There were marked correlations between sap flow and ambient environmental factors [photosynthetically active radiation (PAR), relative humidity (RH) and wind speed], and the correlated degree was in the order of PAR > RH > wind speed. The equation set up with stepwise regression shows that it reaches an extremely significant level. Sap flow at night was mainly associated with water storage in the trunk and had no significant correlation with ambient environmental factors.

Keywords: *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*; thermal dissipation probe method; stem sap flow; influence factors

尾巨桉由于其速生性和可观的经济价值, 近年来, 在华南地区被广泛种植, 但同时也存在着一些关于其水分利用状况及生态效益方面的争议, 例如有人认为大面积种植会造成水土流失, 地下水位下降, 长期种植会导致土地表面板结、土地沙化等问题^[1]; 另一观点则认为桉树对水分和养分的利用率很高, 并从生态林的标准、桉树的生物学特性等方面论证了建立桉树生态林的可能性和可行性^[1-3], 因此, 正确认识桉树耗水特性具有现实意义。目前, 国内有个别研究借助实验手段进行其他桉树树种耗水性的研究^[4-5], 而

对尾巨桉耗水问题研究较少。

测定树木个体蒸散耗水的方法有很多, 如整株容器称重法、同位素示踪法、染色法、大型蒸渗仪法、茎流计法等^[6]。基于热量守恒原理设计的茎流计法克服了蒸腾量测定的系统误差, 受外界气象因子的影响小, 近年来逐渐得到推广。茎流计法具体又分为热脉冲法、热平衡法、热扩散式探针法, 其中热扩散式探针法是由 Granier^[7] 在热脉冲法的基础上加以改进研制出的新方法, 该法为线测量且可实现连续放热, 测量结果相对准确^[6-9]。因此, 本试验采用热扩散式探针

收稿日期: 2012-08-26

修回日期: 2012-09-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“西南喀斯特流域水文变异性及生态水文过程耦合模拟研究”(40930635)

作者简介: 王文(1967—), 男(汉族), 江苏省姜堰县人, 教授, 博士, 主要从事环境变化对水文过程的影响及水文遥感研究。E-mail: w. wang@126.com。

法对尾巨桉树干液流进行近 2 个月的观测,旨在研究尾巨桉树干液流的日变化规律及其与周围环境因子的关系,为正确认识桉树人工林的耗水问题提供科学的理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于广东省河源市大湖镇活水村,地理坐标为 114°49'E,24°12'N,地处丘陵区,土壤为砖红土。该地区属南亚热带季风性气候,适宜桉树生长。年平均气温为 21.9℃,7,8 月平均气温为 27.3℃;年降水量为 1 514.3 mm,7,8 月累计降水量为 391.7 mm。试验地桉树种类为尾巨桉,于 2006 年 3 月初种植,观测试验时间为 2010 年 7—8 月。在该桉树人工林内设置一固定样地,面积约 900 m² (30 m×30 m),林分密度为 90 株/hm²,林地内平均树高 18 m,胸径变化范围为 11.49~16.25 cm。

1.2 试验研究方法

1.2.1 植物液流测定 树干液流观测采用的设备是美国 Dynamax 公司生产的植物茎流系统,该系统包括热扩散式探针(thermal dissipation probe, TDP) 及一个 DL2e 数据采集器。从数据采集器中获取的液流数据为温差,使用时需根据 Granier^[7] 的经验公式将温差转换成液流速率。考虑到液流速率的径向变化格型在散孔材中较均匀^[9],本试验仅采用 TDP30(TDP 后数字代表探针长度,单位 mm) 探针量测数据,测定时间间隔为每 30 min/次。安装 TDP 30 的样木基本情况如表 1 所示。

表 1 试验林地样木插针情况

探针型号	时间(月日)	胸径/cm		插针高度/cm	朝向
		南北	东西		
TDP30	0719—0731	14.15	12.40	110	南北方向各插 1 根探针
	0817—0830	11.85	11.65	130	

1.2.2 土壤含水量测定 剖面土壤含水量测量采用 PR 2 土壤剖面水分速测仪(定点测量 6 个深度:10, 20, 30, 40, 60 和 100 cm),安装在林地样树附近,与 TDP 同步观测;表层土壤含水量采用 MPKit-B 快速便携式测墒计,其探头长度为 6 cm,每日 7:00 及 17:00 左右在试验林地内随机选点(30 个)观测。

1.2.3 气象要素测定 HOBO U30 气象站可同步测定光合有效辐射(PAR),空气相对湿度(RH),空气温度(T),风速等气象要素,同时配有一个自动记录雨量计(RG 3-M)。该气象站的采样时间间隔设为 5 min。水汽压亏缺(VPD)计算公式为:

$$VPD=0.6112\exp\left(\frac{17.62+T}{T+243.12}\right)\times(1-RH) \quad (1)$$

式中:T——空气温度(℃);RH——空气相对湿度。

2 结果与分析

2.1 桉树树干液流的日变化

以 8 月 22 日(该日前后均为连续晴天,天气状况较稳定)为例,图 1 表示夏季晴天,尾巨桉树干液流速率与光合有效辐射的日变化情况。液流的启动与光照紧密相关^[10],早晨随着光合有效辐射(PAR)增强,气孔张开,液流启动(早晨 8:00—8:30)并不断上升,于中午前后达到数个峰值(约 11:30—15:30)。之后光合有效辐射减弱,到达峰值后的液流速率不断减小,于夜间进入低谷(晚 19:30 左右),均值约为 0.000 143 cm/s,且较为稳定。这种夜间很小的液流现象主要由根压引起^[5,11-12]。

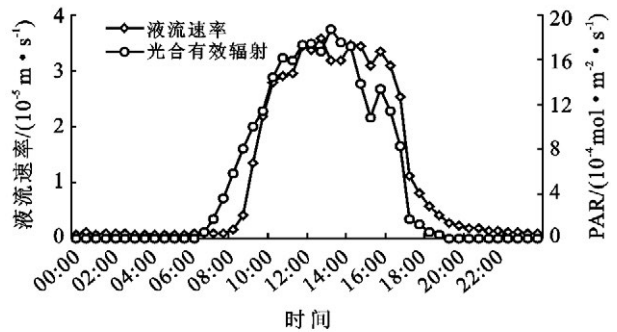


图 1 液流速率的日变化

2.2 桉树南北方位树干液流对比分析

考虑到该次试验所测尾巨桉胸径较小(11.49~14.02 cm),为避免探针间相互干扰,仅在每棵样木南北 2 个方向分别插上 TDP 探针。8 月 17—30 日的测量结果表明,尾巨桉南北两侧液流速率的日进程峰型几乎一致,数值上北侧的树干液流速率大于南侧,且这种差异性主要集中在白天,变化幅度为 10%~60%(图 2);回归分析显示,南北两侧液流速率的相关性极显著,R² 达 0.994。通过量测样地附近 20 株尾巨桉不同方位的半径并计算均值后发现,东西方向的半径差异较大,南侧半径大于北侧。一些学者认为液流速率与测定部位的边材宽度和冠幅关系并不明确^[13],因此,树干南侧半径大于北侧的现象并不能很好地解释液流的方位间差异。本文与张建国等^[14]有类似的研究结果,其研究的辽东栎南侧边材厚度大于其他方位,但液流却小于东、西、北 3 个方向的液流,这可能与木质部导管系统的发达程度有关,还需在今后的研究中加以论证。

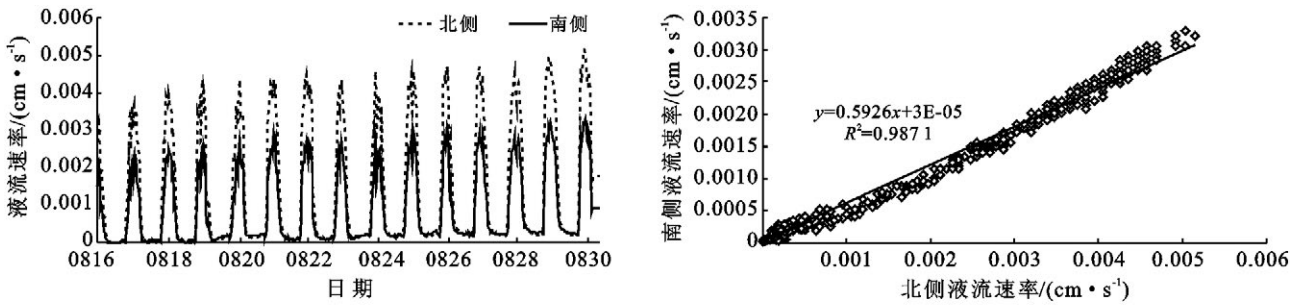


图 2 南北方向液流速率的连续日变化及散点图

2.3 环境因子对树干液流的影响

树木液流的变化除了受到树木本身的冠层结构、气孔开度、树干水力结构和根系水力传导特性等生物学结构的影响,也受土壤水分状况、气象因子等外界环境因子的制约^[14]。根据对液流日变化的分析可知,液流速率在白天的变化规律不同于夜间,因此,有必要分别对白天与夜间的液流变化进行讨论。选用 8 月 17 日 00:00 至 8 月 30 日 22:30(期间无降雨,为连续晴天)植物茎流系统记录的数据,白天与夜间数据的筛选标准可结合同步气象站记录的 PAR 值,当 PAR=1.2 μmol/(m²·s)(每日 PAR 最小值)时,即认为夜间数据。

2.3.1 白天环境因子对树干液流的影响 图 3 显示了树干液流速率、光合有效辐射、空气温度、空气相对湿度、风速的连续日变化以及不同深度日平均土壤含水量(由 DL2e 数据采集器每日采集到的 48 个数据取平均后得到)的连续变化情况。为揭示环境因子对液流速率的综合影响,建立树干液流速率与上述环境因子的多元线性模型,采用逐步法进行回归分析,并以 5%和 10%的可靠性作为因变量入选和剔除临界值,最终的回归结果为空气温度以及不同深度土壤含水量被剔除。模型如下:

$$V_s = 0.002 + 1.221 \times 10^{-6} x_1 + 2.890 \times 10^{-5} x_2 + 3.905 \times 10^{-6} x_3 \quad (2)$$

式中: V_s ——树干液流速率(cm/s); x_1 ——光合有效辐射[μmol/(m²·s)]; x_2 ——空气相对湿度(%); x_3 ——风速(cm/s)。

对回归系数进行检验,各个自变量系数及常数项的显著性概率均为 $p=0.000, R^2=0.884$,可见回归方程能较好地揭示液流变化与各环境因子变化的相关规律。

表 2 为逐步回归分析时被选入回归方程的 3 个变量与液流的相关系数,由表 2 可以看出,影响液流速率最主要的因素是光合有效辐射,其次是空气相对湿度和风速。辐射强度是影响液流的最为直接的环境因子,它可调节气孔运动,并使树干液流呈现出明显的昼夜变化^[10,15]。空气相对湿度与液流速率呈负

相关,随着空气相对湿度的升高,空气中水汽分压增大,使得边界层水汽压与叶片气孔内腔水汽梯度减小,水的汽化过程变慢^[15-16]。风速与液流呈正相关,风速较大时,可将叶面气孔外水蒸气扩散层吹散,而代之以相对湿度较低的空气,既减少了扩散阻力,又增大了叶内外蒸气压差,进而加速蒸腾^[15]。空气温度也可以通过调节叶内外蒸气压差来影响蒸腾^[15-16],虽然其与液流在日进程上有较好的生态学同步性(图 3),但在构建多元线性回归模型过程中因偏相关系数过小而被剔除。

表 2 液流速率与气象因子的相关系数

气象因子	Pearson 相关系数	偏相关系数
风速	0.717	0.283
光合有效辐射	0.875	0.797
空气相对湿度	-0.793	-0.555

不同深度的土壤含水量在构建回归模型时也被剔除。张宁南等^[5]的研究也表明尾叶桉的液流速率与 50 cm 深土壤含水量的相关性不明显。根据 Irvine 等^[17]的研究,只有当表层 20 cm 土壤湿度低于 12%时,干旱才会对植物产生生理胁迫。由图 3 可看出,各深度日均土壤含水量在数值上均高于 0.2 cm³/cm³,并未达到对植物产生生理胁迫的阈值,因此,图 3 所示液流的趋势性变化是气象因子共同作用的结果,与土壤含水量无关,表层土壤水分主要作为限制因子控制水分供应。

2.3.2 夜间液流活动 夜间液流对于树木有重要的生理学意义,其主要利用途径概括起来有 2 个方面^[12,17]:一是夜间蒸腾,二是用于自身水分补充。区分这 2 种利用途径的标准主要借助于环境因子(主要为水汽压亏缺和风速)与夜间液流的相关关系^[12],若这种相关性强,则说明液流主要用于夜间蒸腾;反之,则认为液流主要用于自身水分补充。

选用 8 月 17 日 00:00 至 8 月 30 日 22:30 植物茎流系统记录的夜间数据进行统计分析,结果表明,液流速率与风速无显著相关性;与水汽压亏缺呈显著正相关,但确定性系数仅为 0.249。由此说明液流对

夜间蒸腾虽有一定贡献,但更主要的则是用于自身水分的补充。8月份试验地正值雨热同期,尾巨桉在白天的蒸腾强度较大,植物自身出现水分亏缺的程度相

对较大,在土壤水分充足的情况下,较大的补水需求带动较大的夜间液流活动^[17],因而8月17日至30日夜间液流有略微增大的趋势(图3)。

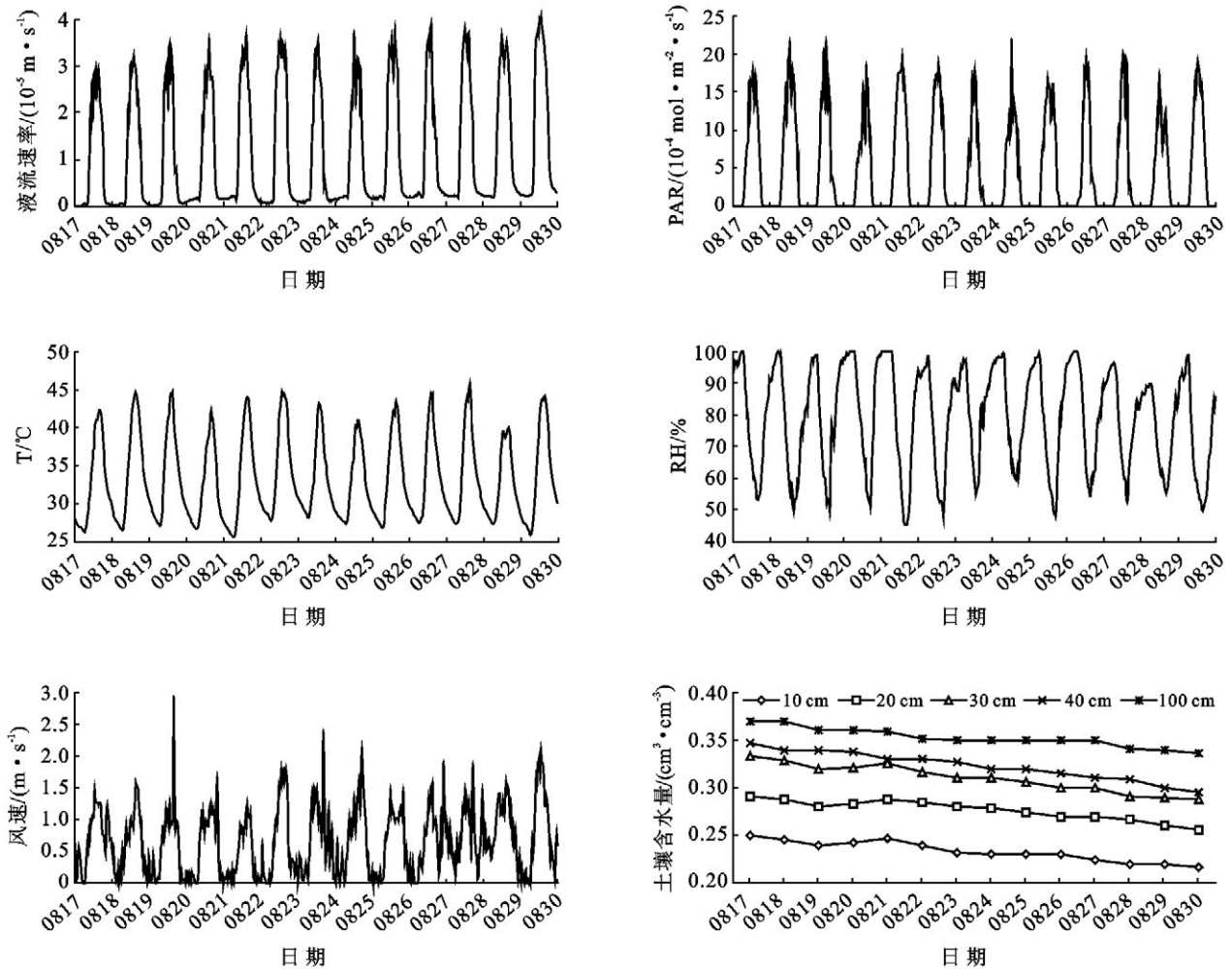


图3 液流与各个气象因子及不同深度土壤含水量的连续日变化

2.4 降雨对树干液流的影响

雨天时,液流明显受到抑制。如图4所示,在7月22,23,26,29日相应的降雨时段内,尾巨桉一直维持着较微弱的液流活动。以典型雨天7月22日(该日降雨时段为14—17时)为例(如图5所示),随着降

雨开始,液流速降,但之后液流的变化与降雨量并无关系,而与光合有效辐射、空气相对湿度有较好的生态学同步性,即雨天被抑制的液流主要是由该时间段内光合有效辐射以及空气相对湿度这2个气象因子的变化引起,与降雨量无关。

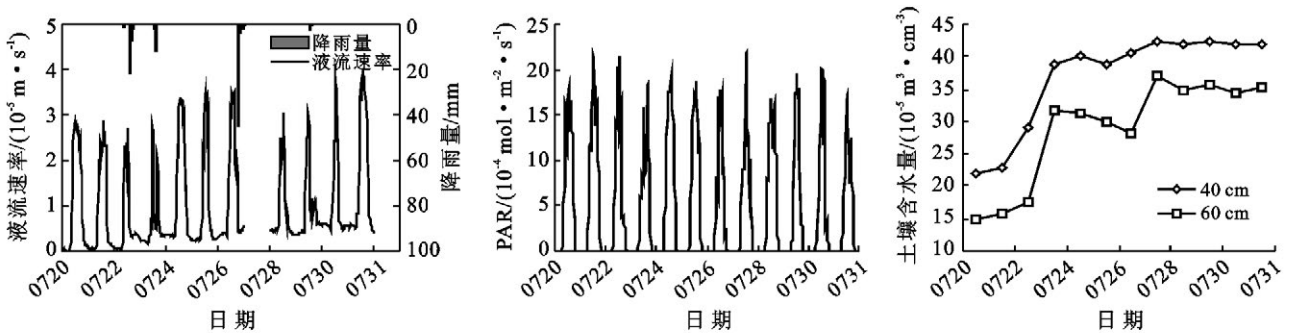


图4 7月下旬液流速率、光合有效辐射(PAR)、土壤含水量的连续日变化

雨后夜间液流速率显著增大(图 4)。由于这几日连续降雨,夜间水汽压亏缺接近 0,因此夜间蒸腾几乎停止。结合以上的分析,此时夜间液流活动主要用于树干水分补充。夜间补充的水分是树干贮水量的重要组成部分,它很大程度上取决于水容的大小^[18]。 树木组织水容量指由单位水势变化而引起树木组织含水量的变化值,是植物组织的储水和放水能力的体现。根据奚如春等^[18]的研究,在雨季土壤水势增大的条件下,植物的水容作用可使树木组织储存更多的水分。因此,造成雨后夜间液流增大的原因主要是树木水容的调节作用。

分增多(植物的水容作用),因而在白天有更多的水分用于蒸腾。

3 结论

(1) 尾巨桉白天的液流活动主要受光合有效辐射、空气相对湿度以及风速这 3 个气象因子的影响,其中光合有效辐射是影响液流最为直接的环境因子,与液流的关系最密切,并且由于光合有效辐射的显著昼夜变化,导致尾巨桉的液流速率呈现明显的昼夜节律。有降雨时,光合有效辐射随着降雨开始迅速降至较低值,空气相对湿度接近饱和,植物蒸腾受到抑制并维持微弱的液流活动。

(2) 2 个试验时段内,由于降水的影响,土壤含水量分别呈现出上升与下降趋势,而尾巨桉液流总体基本稳定,略呈逐日增加趋势,也就是说,土壤含水量对液流活动不产生影响。这说明土壤含水量在大于对植物构成干旱胁迫的阈值时,不影响液流速率。

(3) 尾巨桉南北两侧的液流在峰型上几乎一致,且二者之间存在较好的相关关系。数值上南侧小于北侧,可能的原因有土壤水分状况、木质部导管系统的发达程度以及树冠结构分布特征等,但造成这种方位性差异的原因目前尚未形成统一认识,今后有待研究。

(4) 晴天夜间,液流与水汽压亏缺呈正相关,但二者间的确定性系数较小,说明夜间液流仅有一小部分用于夜间蒸腾,而更主要的则用于夜间植物补水。观测发现,雨后夜间液流呈逐日增大的趋势,原因可能为雨后土壤水势增大,植物的水容作用致使植物在夜间吸收水分增加。在今后研究中可以加入对树木组织水容量的测定,以更深入了解尾巨桉和环境水分状况及蒸腾耗水的关系。

[参 考 文 献]

[1] 于福科,黄新会,王克勤,等. 桉树人工林生态退化与恢复研究进展[J]. 中国生态农业学报,2009,17(2):393-398.

[2] 杨民胜,吴志华,陈少雄. 桉树的生态效益及其生态林经营[J]. 桉树科技,2006,23(1):32-39.

[3] Forrester D I, Theiveyanathan S, Collopy J J, et al. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009,259(9):1761-1770.

[4] Zhou Guoyi, Huang Zhihong, Morris J, et al. Radial variation in sap flux density as a function of sapwood thickness in two *Eucalyptus (Eucalyptus urophylla)* plantations[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(12): 1418-1424.

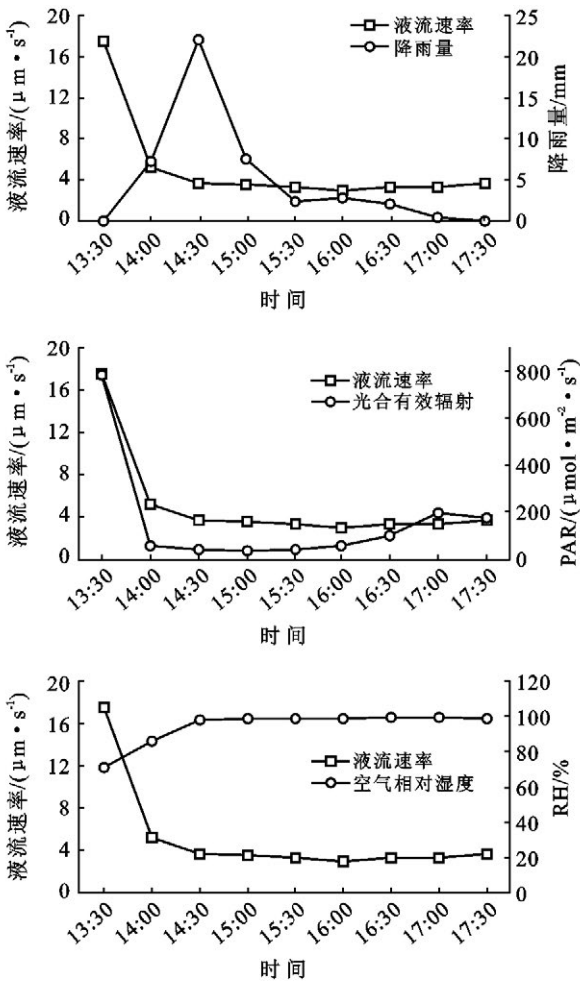


图 5 7 月 22 日降雨时刻液流速率与主要气象因子的变化

图 4 表明,雨后土壤含水量显著增大,虽与图 3 所示土壤含水量的连日变化呈现出相反的趋势,但 2 种情形下液流的趋势变化却是一致的,由此也佐证了关于土壤含水量未达到影响植物生理胁迫的阈值便不影响液流的观点。造成雨后液流峰值增大的原因主要有以下 2 个:一是受光合有效辐射的影响,从图 4 可以看出,液流速率值较大的几日,相应的光合有效辐射值也大;二是降雨之后植物组织储存的水

- [5] 张宁南,徐大平, Morris J. 雷州半岛尾叶桉人工林树液茎流特征的研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(6): 661-667.
- [6] 马玲,赵平,饶兴权,等. 乔木蒸腾作用的主要测定方法[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 88-96.
- [7] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- [8] Steppe K, De Pauw D J W, Doody T M, et al. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(7/8): 1046-1056.
- [9] Lu Ping, Urban L, Zhao Ping. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(6): 631-646.
- [10] 徐军亮,马履一,阎海平. 油松树干液流进程与太阳辐射的关系[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 103-107.
- [11] 周翠鸣,赵平,倪广艳,等. 广州地区荷木夜间树干液流补水的影响因子及其对蒸腾的贡献[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1751-1757.
- [12] 王华,赵平,蔡锡安,等. 马占相思夜间树干液流的分配及其对整树蒸腾估算的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 777-786.
- [13] 王华田,赵文飞,马履一. 侧柏树干边材液流的空间变化规律及其相关因子[J]. 林业科学, 2006, 42(7): 21-27.
- [14] 张建国,闫美杰,时伟宇,等. 辽东栎不同方位边材液流季节动态及其对蒸腾耗水测算的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 193-197.
- [15] 潘瑞焯. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 17-22.
- [16] 王瑞辉,马履一,奚如春,等. 元宝枫生长旺季树干液流动态及影响因素[J]. 生态学杂志, 2006, 25(3): 231-237.
- [17] 陈立欣,李湛东,张志强,等. 北方 4 种城市树木蒸腾耗水的环境响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2861-2870.
- [18] 奚如春,马履一,王瑞辉,等. 3 个树种枝干水容特征[J]. 中南林学院学报, 2006, 26(4): 22-26.
- (上接第 57 页)
- [9] 崔晓勇,刘世荣,赵广东,等. 甘肃民勤绿洲—流沙过渡带植物群落光合和呼吸特征的比较研究[J]. 林业科学, 2003, 39(3): 6-13.
- [10] 魏怀东,徐先英,丁峰,等. 民勤绿洲土地荒漠化动态监测[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(20): 12-17.
- [11] 石玉林,任阵海,雷志栋,等. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究: 土地荒漠化卷[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 442-444.
- [12] 吴蔚东,张桃林. 红壤地区杉木人工林土壤肥力质量性状的演变[J]. 土壤学报, 2001, 3(38): 285-293.
- [13] 邓利. 杉木、马尾松人工林土壤肥力质量指标与评价[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
- [14] Lal R. Soil erosion and land degradation: the global risks[J]. Advance in Soil Science. 1990, 11: 169-172.
- [15] 张春霞,郝明德,王旭刚,等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分分布特征[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 78-80.
- [16] 张树清,孙小凤. 甘肃农田土壤氮磷钾养分变化特征[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 13-18.
- [17] 布雷迪. 土壤的本质与性状[M]. 南京农学院土化系译. 北京: 科学出版社, 1982.
- [18] 唐克丽,张仲子,孔晓玲,等. 黄土高原水土流失与土壤退化的研究[J]. 水土保持通报, 1987, 7(6): 12-17.