

白桦树干液流的动态研究

孙慧珍, 周晓峰*, 赵惠勋

(东北林业大学生态室, 哈尔滨 150040)

摘要:应用热扩散原理, 采用 ICT-2000TE(Transpiration-Environment)自动监测系统, 对东北东部山区的先锋树种白桦的树干液流及主要环境因子进行一个生长季的同步测定。结果表明, 在整个生长季的晴天, 白桦树干液流的日变化呈现明显的单峰曲线。液流速率的峰值出现在 8 月中旬, 为 84.72 L/d。在白桦树叶脱落后, 仍有较高的液流速率, 而到 10 月中旬急剧下降, 值为 3.84 L/d。在不同生长时期白桦每小时的液流速率与相应的环境因子逐步回归分析结果表明, 影响白桦液流速率的主要环境因子是空气温度、空气相对湿度和辐射强度, 在不同时期三者的作用是不同的。

关键词:热扩散法; 树干液流; 季节动态; 环境因子; 白桦

A Researches on Stem Sap Flow Dynamics of *Betula platyphylla*

SUN Hui-Zhen, ZHOU Xiao-Feng*, ZHAO Hui-Xun (Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1387~1391.

Abstract: A study of whole-tree sap flow of *Betula platyphylla* was conducted during the 2000-growing season. The study area was located at the Forest Ecosystem Research Station (127°30'~127°34'E Longitude, 45°20'~45°25'N Latitude) in the Maoershan Experimental Forest, Northeast Forestry University, Heilongjiang Province. Within the Maoershan range, the average elevation is 300m and the highest peak is 805m. The undulating slope of the terrain generally ranges from 10° to 15°. The zonal soil is dark-brown forest soil. The climatic conditions of the area are typically continental cold temperate. The mean annual temperature is 2.8°C. The annual cumulative temperature of $\geq 5^{\circ}\text{C}$ is 2897°C. The annual total sunshine amounts to 1850.4h. The mean annual precipitation is 772.9mm, with more than 60% concentrated in two months of the summer. The mean annual evaporation is 884.4mm and wind speed averages 1.5m/s. The frost-free period ranges from the end of May to the end of August.

In the present paper, the thermal dissipation method proposed by Granier was used to measure sap flow rate of *Betula platyphylla*. The thermal dissipation probe (TDP, Dynamax, Houston TX, USA) consisted of two cylindrical probes of 1.32mm in diameter. The probes were inserted horizontally 3 cm into the sapwood of the tree trunk with one probe 40cm above the other. The upper probe contained a constantan-heating element, which was heated at constant power. Each probe contained a copper-constantan thermocouple, connected in opposition for measuring the temperature difference. Sap flow rate was calculated using the following equation: $F_s = 0.0119 \times SA \times K^{1.231}$, where F_s was the sap flow rate (L/h); SA was the sapwood area at the level of the heated probe (cm^2); and K , the dimensionless flow index ($K = [dT_M - dT]/dT$, where dTM was the temperature difference between probes without any sap flow and dT was the temperature difference with sap flow). The precision of estimation of transpiration depends on the accuracy of the differential temperature measurement. The thermocouples must be

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(39899370); 国家林业局重点项目(2001-2)

收稿日期: 2001-06-08; 修订日期: 2001-11-06

* 通讯作者 Author for correspondence

作者简介: 孙慧珍(1973~), 女, 河北定州人, 博士, 讲师。主要从事森林生态系统定位研究和全球变化与陆地生态系统相互作用机理研究。E-mail: ecgroup@public.hr.hl.cn

protected against direct radiation and rain. The environmental sensors installed above the tree crown included an RH1 humidity and temperature probe (Vaisala, UT, U. S. A), an SKP215 PAR Quantum Sensor (Skye, U. K.), an SKS1110 Silicon Cell Pyranometer (Skye, U. K.), an A100R wind sensor (Vector Instruments, U. K.), and a GMP111 CO₂ transmitter (Vaisala, UT, U. S. A). An STC soil temperature sensor (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, U. K.) and an MP406 moisture probe (ICT Ltd. Australia) were used to monitor the root zone soil temperature and soil volumetric water content. Rainfall was measured in an open space nearby with an ARG100 tipping bucket rain gauge (EM LTD., U. S. A.). The TDP and all environmental sensors were sampled every 15min (ZEN03200, Coastal Environmental systems, U. S. A.).

Sap flow rate exhibited mono-peak patterns during clear sky days. During the growing season, the maximum sap flow rate 84.72 L/d, occurred at mid-August. The sap flow persisted after leaf senescence until the mid-October. Results of statistical analysis indicated that air temperature, relative humidity, and solar radiation were the major factors affecting sap flow rate on clear sky days in different growth periods.

Key words: thermal dissipation probe; stem sap flow; seasonal dynamics; environmental factors; *Betula platyphylla*

文章编号:1000-0933(2002)09-1387-05 中图分类号:Q948.S718.5 文献标识码:A

林分蒸腾量在森林水分循环中占很大的比例^[1~3]。有关研究人员一直在探索树木活体蒸腾耗水量的可靠的连续实测方法。热技术可以对树木活体的树干液流量连续自动监测,时间分辨率高、一般不会破坏植物的正常生理活动、野外操作方便等优点,在世界范围内广为应用。热技术根据不同的原理可分为热脉冲法、热平衡法和热扩散法。在我国,只有少数人使用热技术进行了树木液流的研究,如刘奉觉、李海涛、孙鹏森等应用热脉冲技术分别研究了杨树、棘皮桦、五角枫和油松等树木的液流,严昌荣等利用热平衡法对胡桃楸的树干液流进行了研究^[4~7]。

本文应用 ICT-2000TE(Transpiration-Environment)自动监测系统对白桦树干的液流和环境因子进行同步测定。该系统将热扩散探头(Thermal Dissipation Probe TDP)与测定主要环境因子的探头通过同一数据采集器控制,达到测定树木活体液流与环境因子的同步连续测定。本文目的是研究白桦在不同生长时期的晴天液流动态变化规律,并与影响白桦树干液流的主要环境因子进行关联分析,为分析树木对气候变化的响应提供本底依据。

1 试验地区概况及研究方法

1.1 试验地概况

试验于 2000 年生长期在东北林业大学帽儿山森林生态系统定位研究站进行。该地区属于长白山系支脉、张广才岭西北部的余脉。平均海拔 300m,一般坡度在 10~15°,呈明显的大陆性温带季风气候,雨量集中在 7、8 月。年平均气温 2.8℃,最高温度可达 32℃,最低温度为-31℃左右。全年大于或等于 5℃的积温为 2897℃,年平均总日照时数 1850.4h,年降雨量 772.9mm,年蒸发量 884.4mm,年均风速 1.5m/s。早霜一般在 8 月末,晚霜一般在 5 月末,无霜日大致为 92~115d。

根据 TDP 探头的长度和被测木具有代表性的原则进行选取样木,样木白桦(*Betula platyphylla*)生长良好,树干通直、无被挤压现象。样木的树高为 13.2m,胸径 13.9cm,平均冠幅 2.3m。白桦为散孔材(隐心材),边材面积是通过 80mm 长的热扩散探头——TDP80 逐渐插入确定,在 TDP80 尖端 10mm 处有 B 端感温点,将 TDP80 逐渐插入白桦木质部,当 B 端昼夜温差无变化时,可确定边材厚度。通过测定白桦的树皮厚、直径及边材厚度,计算得到边材面积为 118.75cm²。在生长初期、中期和末期共测定 8 次,每次至少在晴朗的天气测定 2d。

1.2 TDP 测定液流的基本原理与仪器的安装

1.2.1 基本原理 根据 Granier^[8,9]的热扩散方法。热扩散探头是由两根探针组成,上部针恒定连续加热,

内含有加热元件和热电偶,下部探针为参考端,只有热电偶。通过测定两根探针在边材的温差值计算液流速率。当液流速率等于 0 或很小时,两根探针的温差(dT)最大,当液流增大,温差值减小。通过已知的 dT 与液流密度的关系可以连续测定液流速率的变化。由于边材不同部位的液流速率不同,TDP 测定的值是在边材径向液流速率的整合。

树干液流速率计算 $F_s=0.0119K^{1.231}\times SA\times 3.6$

式中, F_s 为液流速率(L/h); SA 为边材面积(cm^2)。 $K=(dT_M-dT)/dT$ dT_M 为无液流时探针的最大温差值; dT 为当时测定的温差值。

1.2.2 仪器安装 选好样木后,在树干胸径处南向用小刀将树干死树皮刮成 40mm 宽,100mm 长的长方形,刮树皮时不要损坏树干的韧皮部。把两孔距离为 40mm 钻孔模块放在待测的位置上,然后用直径为 1.32mm 钻头,钻两个 30mm 长的孔,两孔尽量保持平行并与树干保持垂直。将 30mm 长、直径为 1.3mm 的探头加热针和参考针分别逐渐插入上部孔和下部孔,注意不要把探头弄弯,以免内部损坏。探针与树皮接触处用硅橡胶封住以免雨水接触探针,造成测量不准。为防止太阳辐射对探针的影响,安装好探针后用铝箔在探头的外部围住,用透明胶布封住,然后封口处涂上硅橡胶,防止水分进入。

测定树干液流的同时,利用搭制的高空木架同步观测林冠上层的环境因子:空气温湿度($RH1$, Vaisala)、总辐射(SKS1110E Silicon Cell Pyranometer, Skye)、光合有效辐射(SKP215 PAR Quantum Sensor, Skye)、二氧化碳浓度(GMP111, Vaisala)和风速(A100R, Vector);在林冠下层同步观测空气温湿度、光合有效辐射、二氧化碳浓度。在林中空地用翻斗式雨量桶测定降雨量(ARG100, EM LTD.);在白桦根系主要分布深度处测定土壤温度(Delta-T Devices Ltd., Cambrige, U.K.)和土壤湿度(MP406, ICT Ltd. Australia)。以上环境因子探头与 TDP (Dynamax, Houston TX, USA)通过同一数据采集器(ZENO3200, Coastal Environmental systems, USA)控制,数据采集器用 2 节 12v 铅酸电池供电。数据采集器与建立超级终端的笔记本电脑连接,按照探头的技术指标参数分别进行设置,每 15min 采集一次数据,在测定期间共获得数据 32640 个。

2 结果与讨论

2.1 白桦树干液流的日进程

在生长季节晴朗的天气中,除了在 10 月中旬测定白桦液流昼夜动态为无规则波动外,其余所测定的液流日进程与太阳辐射、空气温度和空气相对湿度变化相一致。即在清晨太阳辐射弱,气温低,空气相对湿度高,白桦的液流上升缓慢;随着太阳辐射的逐渐增加,气温逐渐升高,空气相对湿度下降,气孔导度不断升高,液流速度逐渐增强,峰值多数出现在 11:00~13:00 (少数出现在 10:00、15:00 和 16:00),而后,随着光照强度的减弱,温度的降低,空气相对湿度的增高,叶内外水汽压差的减少,液流速度减小;到日落时,液流速度降低为最低值。液流曲线基本为单峰曲线。在 6 月 16~19 日白桦的液流在 0:00~6:00 时和 19:00~23:00 时的液流速率占全天液流速率的 11.47%~39.93%,其它测定的液流日进程晚上基本无液流。现以 8 月 4~8 日说明白桦液流的日进程变化;4 日天气类型为多云,5~8 日为晴天。从图 1 可见,5 日为双峰曲线(峰值分别在 11:00 和 16:00 为 1.59 L/h),其它 4d 都为单峰曲线,4 日的峰值在 13:00(0.79 L/h)出现,其它 3d 峰值在 11:00~12:00 时出现,值分别为 1.82、2.16、2.16 L/h。4~8 日的日蒸腾量分别为 5.99、11.03、11.42、11.77、13.29 L/d。

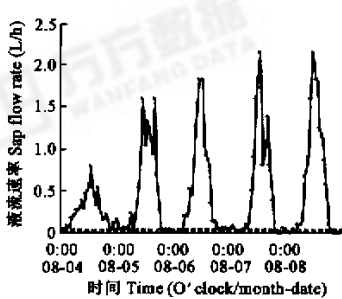


图 1 8 月上旬白桦树干液流速率昼夜动态

Fig. 1 Diurnal sap flow rate of *Betula platyphylla* at early August

其它测定的液流日进程晚上基本无液流。现以 8 月 4~8 日说明白桦液流的日进程变化;4 日天气类型为多云,5~8 日为晴天。从图 1 可见,5 日为双峰曲线(峰值分别在 11:00 和 16:00 为 1.59 L/h),其它 4d 都为单峰曲线,4 日的峰值在 13:00(0.79 L/h)出现,其它 3d 峰值在 11:00~12:00 时出现,值分别为 1.82、2.16、2.16 L/h。4~8 日的日蒸腾量分别为 5.99、11.03、11.42、11.77、13.29 L/d。

在测定期间日照时数(5:00~18:00)相同。从表 1 可见,4 日的最高总辐射和光合有效辐射及平均辐射量最低,致使气孔开度降低,空气温度降低,空气相对湿度升高,使得细胞间隙与空气间的蒸汽压亏缺

值减小,蒸腾拉力降低。所以 4 日的液流较其它 4d 平缓,最高液流速率是其它 4d 的 1/2 弱,总蒸腾耗水量为其它 4d 的一半左右。

白桦在 5 日液流日进程出现了双峰曲线,这与当时的辐射、空气相对湿度瞬间变化有关。在 10:00 光合有效辐射达到一天最大值($1351.0\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),由于云的遮挡光合有效辐射在 12:00 下降到 $364.8\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,在 14:00 达到下午的高峰值 $819.6\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。空气相对湿度随着变动,变动范围在 $(30.8\%\sim33.92\%)$ 。白桦液流速率分别在 11:00 和 16:00 时达到峰值,液流速率峰值较辐射峰值分别滞后 1~2h;而后随着辐射、温度的降低,湿度增加,液流速率逐渐降低。从图 2、图 3 可见,液流速率与空气相对湿度和光合有效辐射具有很好的一致性。

5d 的液流速率与环境因子的逐步回归结果为只有空气相对湿度和光合有效辐射选入方程: $F_s=2.35-0.04RH+0.0005PAR$ ($R^2=0.86$)。RH 和 PAR 的偏决定系数分别为 0.83、0.03。在空气温度适宜时,树干液流速率主要由空气相对湿度决定的。Granier 等^[10,11]研究树木液流与环境因子的相关性发现,液流与蒸汽压欠缺的相关性高于辐射和空气温度;Ham and Heilman^[12]研究结果为灌木的液流进程与辐射变化同步。笔者认为两者基本相同,因为在晴天空气温度、空气相对湿度随着辐射强度的变化而变化。而蒸汽压欠缺是温度和空气相对湿度的函数,随着辐射增高而随之增加。所以在土壤水分供应充分,天气晴朗,空气温度不是主要限制因子时,空气相对湿度是树木蒸腾的驱动力(物理过程),同时光合有效辐射决定气孔的开度(生理过程),共同作用影响树木蒸腾量。

表 1 8 月上旬主要环境因子变化表

Table 1 The main environmental factors at early August

日期 Date	最高总辐射 (W/m^2) Maximum total radiation	最高光合有效辐射 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ Maximum PAR	土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$) Soil temp.	空气温度 ($^{\circ}\text{C}$) Air temp.	空气相对湿度 (%) RH
4	233.1	378.6	19.45~18.1	24.93~14.58	56.57~44.63
5	828.5	1351	20.6~18.48	30.35~17.43	56.14~30.8
6	716	1351	20.4~18.9	28.93~16.25	56.35~33.67
7	532.3	1090.6	20.75~18.7	31.73~15.63	56.45~31.86
8	672	1200.2	21.3~19.3	32.2~17.28	56.29~32.68

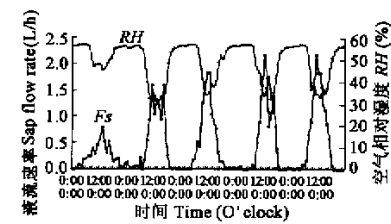


图 2 白桦液流速率与空气相对湿度日进程
Fig. 2 Diurnal dynamics of *Betula platyphylla* sap flow rate and RH

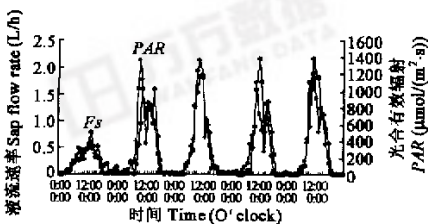


图 3 白桦液流速率与光合有效辐射日进程
Fig. 3 Diurnal dynamics of *Betula platyphylla* sap flow rate and PAR

2.2 液流季节进程及与环境因子的关系

在 6 月中旬,白桦开始全面生长^[13]。由于 5、6 月份持续高温无雨,土壤含水量降到 15%,对于中壤土的田间持水量为 22%~27%,低于田间持水量。由于受到土壤水分的限制,因而这段时间树木的液流速率比较低,为 9.36 L/d。在 8 月初,土壤含水量在 22.83%~23.68%,基本达到田间持水量水平,液流速率上升至 11.87 L/d。液流速率的峰值出现在 8 月 19 日,为 84.72 L/d,此时土壤含水量为生长季的最高值(31.55%)。在 9 月初液流速率维持较高的水平为 49.92 L/d,到 9 月中旬液流速率明显下降(12.08 L/d),可能因为此时白桦生长变缓,叶子变色衰老并且叶面积只及盛期的 1/10,导致液流降低。到 9 月下旬降到与 6 月份相当的水平。到 10 月中旬,液流速率降到最低点(3.84 L/d)。在各个测定阶段白桦液流速率与环境因子的逐步回归分析表明:在生长季不同阶段,白桦树干液流是由空气相对湿度

度、空气温度和辐射共同作用的结果。但这 3 个因子在不同生长阶段的作用是不同的。在 10 月中旬树干液流主要是由空气温度决定的;而其余的阶段是由空气相对湿度与辐射决定,其中空气相对湿度占主导地位。

3 结论

3.1 在生长季的晴天,白桦树干液流速率的昼夜动态呈现单峰型曲线。在 6 月中旬由于土壤水分亏缺,白桦液流速率在晚上和凌晨上升量较高(11.47%~39.93%)。在树叶全部脱落后,液流速率急剧下降,液流的昼夜动态由单峰曲线逐渐过渡到无规律的波动状态。

3.2 在生长季中,白桦树干液流速率最高达 84.77 L/d,出现在生长盛期(8 月中旬)。此时辐射、空气温度和土壤温湿度都处于较高的水平。

3.3 在 9 月下旬,白桦树叶全部脱落之后,树干液流并没有停止,而在 10 月上旬略有升高,而后树干液流在 10 月中旬下降到最低点,这可能因为树木进入休眠前,尽量减少体内水分,增强抗寒性。

3.4 白桦树干液流与环境因子在各测定阶段的逐步回归分析表明:在 10 月中旬树干液流主要是由空气温度决定的;而其余的阶段是由空气相对湿度与辐射决定,其中空气相对湿度占主导地位。

参考文献

[1] Zhou X F(周晓峰). *China's forest and ecological environment*(in Chinese). Beijing: China Forestry Press, 1999. 95~99.

[2] Zhou X F(周晓峰), Li Q X(李庆夏), Jin Y Y(金永岩). Studies on forest water cycling. In: Zhou X F(周晓峰) ed. *Long-term research on China's forest ecosystems*(in Chinese). Harbin: Northeast Forestry University Press, 213~222.

[3] Zeng Q B(曾庆波). Hydrologic cycling of tropical forest ecosystem in Jianfengling Hainan Island. In Zhou X F(周晓峰) ed. *Long-term research on China's forest ecosystems*(in Chinese). Harbin: Northeast Forestry University Press, 413~429.

[4] Liu F J(刘奉觉), Edwards W R N, Zheng SH K(郑世锴), et al. A Study on the Dynamics of Sap Flow in Space and Time in Poplar Stems. *Forest Research* (in Chinese)(林业科学研究), 1993, 6(4): 368~372.

[5] Li H T(李海涛), Chen L ZH(陈灵芝). A study on the volume and velocity of stem-sapflow of *Betula dahurica* and *Acer mono* forestry by the heat-pulse technique. *J. of Beijing Forestry University*(in Chinese)(北京林业大学学报), 1998, 20(1): 1~6.

[6] Yan CH R(严昌荣), Alec Downey, Han X G(韩兴国), et al. A study on sap flow of *Juglans mandshurica* of growth season in the deciduous broad-leaf forest Beijing Mountain area. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报), 1999, 19(6): 793~797.

[7] Sun P S(孙鹏森), Ma L Y(马履一), Wang X P(王小平), et al. Temporal and spatial variation of sap flow of Chinese pine(*Pinus tabulaeformis*). *J. of Beijing Forestry University*(in Chinese)(北京林业大学学报), 2000, 22(5): 1~6.

[8] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems. *Ann. Sci. For.*, 1985, 42(2): 193~200.

[9] Granier A. Sap flow measurements in Douglas-fir tree trunks by means of a new thermal method. *Ann. Sci. For.*, 1987, 44(1): 1~14.

[10] Granier A, Claustres JP. Water relations of a Norway spruce(*Picea abies*) tree growing in natural condition: variation within the tree. *Acta Oecologica*, 1989, 10(3): 295~310.

[11] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agric. For. Meteorol.*, 1996, 78: 19~29.

[12] Ham J M, Heilman J L. Measurement of mass flow rate of sap in *Ligustrum japonicum*. *HortScience*, 1990, 25: 465~467.

[13] Zhou X F(周晓峰), Wang Y H(王义弘), Zhao H X(赵惠勋). Growth rhythm of several main timber tree species (一). *J. of Northeast Forestry College*(in Chinese)(东北林学院学报), 1981, 2: 49~58.

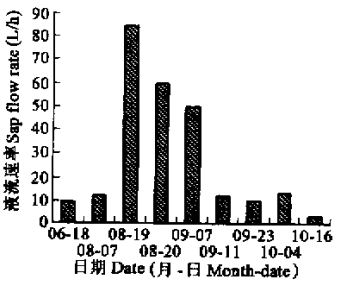


图 4 白桦树干液流季节变化

Fig. 4 Seasonal stem sap flow dynamics of *Betula platyphylla*