

北京山区落叶阔叶林中核桃楸在生长中期的树干液流研究

Down., A

5792.132

严昌荣^{1,2}, Alec Downey³, 韩兴国¹, 陈灵芝¹

(1. 中国科学院植物研究所, 北京 100093; 2. 中国农业科学院农业气象研究所, 北京 100081; 3. Irricrop Technologies Pty. Ltd Australia)

摘要:北京山区落叶阔叶林优势种——核桃楸在生长中期没有水分亏缺的条件下, 树干的液流速率在很大程度上为微气候因子所决定, 特别是大气相对湿度、温度和太阳辐射强度等。核桃楸树干液流速率的日进程和大气相对湿度、温度的日进程具有很好的生态学同步性。在一天中树干液流速率会出现数次波动, 有多个峰值, 最高峰一般出现在 15:00 左右, 可达到 1600g/h。在夜晚时核桃楸树干液流速率非常低, 一般在 50g/h 以下, 但总是存在, 据此判断核桃楸存在根压。

关键词:北京山区; 落叶阔叶林; 核桃楸; 树干液流

A study on sap flow of *Juglans mandshurica* of growth season in deciduous broad-leaf forest Beijing Mountain area

YAN Chang-Rong^{1,2}, Alec Downey³, HAN Xing-Guo¹, CHEN Ling-Zhi¹ (1. Institute of Botany, CAS, Beijing 100093, China; 2. Institute of Agrometeorology, CAAS, Beijing 100081, China; 3. ICT Irricrop Technologies Pty. Ltd Australia)

Abstract: Under no water deficit, the sap flow of *Juglans mandshurica* is affected by microclimatic factors, especially the relative humidity, air temperature and solar radiation. The diurnal pattern of sap flow rate of *Juglans mandshurica* is similar with that of air temperature and relative humidity. *Juglans mandshurica* has several sap flow rate peaks with the maximums value of 1600g/h, occurring at 15:00. At the night time, the flow still happens, indicating that the root pressure of *Juglans mandshurica* functions.

Key words: Beijing Mountain area; deciduous broad-leaf forest; *Juglans mandshurica*; sap flow

文章编号: 1000-0933(1999)06-0793-05 中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

土壤-植物-大气连续体是当前植物水分生理生态研究的一个热点问题, 从理论上, 人们已经完全认识到在这个连续体中植物水分运动的特点^[1~4], 植物水分运输和调节系统对水分散失的特点是植物对环境中水分适应的一个重要方面^[7], 如何能直观、精确和连续测定水分在木质部中的流动速率是科学家们一直在探索和渴望解决的问题^[8]。目前, 关于树干液流测定的方法有很多, 最常用的方法是以热脉冲理论为基础发展而来的, 该方法最早是在 1932 由 Hubert 提出。但该方法测定的树干液流存在灵敏度调整和测定精度的问题^[9~11]。树干液流测定的其它方法还有染料法、放射性同位素法、示踪法、磁流体动力学法。目前绝大多数植物茎液流动的测定都是基于热脉冲技术^[12]。根据热平衡原理发展起来的树干液流测定方法, 用于实际测定起步于 60、70 年代, 80 年代后期才日趋成熟, 特别是以 Steinberg^[13]等应用该理论设计的树干液流测定仪具有精度高、无需进行校正等优点^[8]。

植物在长期和环境的相互作用过程中已形成了自身的特点, 特别是对水分的需求特点^[14]。李海涛和陈灵芝^[15]对暖温带一些木本植物叶片的水势、气孔导度和土壤的研究发现植物叶片最低水势的季节变化和

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 39570126)

收稿日期: 1997-10-02; 修订日期: 1998-12-04

土壤水分状况相一致,辽东栎、油松(*Pinus tabulaeformis*)和大叶白蜡(*Fraxinus rhynchophylla*)树干液流也各有特点。

当前,整株植物对水分利用的研究基本上是停留在依赖环境因子进行估测阶段,虽然这能提供一些树木水分利用方面的信息,但对于树木水分利用、水分在其中的流动速率没有大的价值^[16]。在我国,只有极少数人利用热脉冲技术进行过这方面的工作,如刘奉觉^[17]和李海涛等^[15]分别研究了杨树和棘皮桦(*Betula dahurica*)、五角枫(*Acer mono*)等植物的树干液流。而利用热平衡技术进行树干液流测定尚未见报道。作者应用澳大利亚 ICT 公司提供的英国 Dynamax 公司生产的 Dynamax 茎流仪(包括茎流测定探头和与之相配套的数值化记录仪)对北京山区落叶阔叶树种辽东栎和核桃楸在土壤水分饱和状态下的树干液流进行了测定。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

试验于 1996 年 7 月 15~25 日在北京森林生态系统定位研究站进行,该站位于北京市门头沟区的东灵山,地理位置为北纬 40°00'~40°02',东经 115°26'~115°30'。距北京市 114km,是北京市和河北的交界地,海拔在 1100 多 m。该区属暖温带半湿润季风气候,年平均气温 4.8℃,>10℃的年积温为 2157.6℃,年降雨量 611.9mm,其中 6、7、8 三个月份的降水量占全年降水量的 78%,年蒸发量 1077.3mm;空气的年平均相对湿度 66%土壤属山地棕壤,pH 值在 6.5~7.0 之间。

试验在落叶阔叶混交林中进行,落叶阔叶林的植物构成比较复杂,乔木层包括两个亚层,第 1 亚层高在 10m 以上,主要有辽东栎、棘皮桦(*Betula dahurica*)、糖槭(*Tilia mongolica*)和核桃楸,第 2 亚层在 5m 左右,以五角枫、大叶白蜡和北京丁香(*Syringa pekinensis*)为主,此外还有辽东栎、棘皮桦的幼树。灌木层主要由六道木(*Abelia biflora*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)、大花溲疏(*Deutzia grandiflora*)、小花溲疏(*D. parviflora*)、胡枝子(*Lespedeza* spp.)、迎红杜鹃(*Rhododendron mucronulatum*)和一些乔木树种的幼苗等组成。草本层植物种丰富,主要有藜芦(*Veratrum nigrum*)、歪头菜(*Vicia umjuga*)、矮丛苔草(*Carex humilis* var. *nana*)、宽叶苔草(*Carex siderosticta*)、糙苏(*Phlomis umbrosa*)、银背凤毛菊(*Saussurea nivea*)、华北凤毛菊(*S. mongolica*)、展枝沙参(*Adenophora divaricata*)、大叶盘果菊(*Prenanthe macrophylla*)等。根据树干液流探头的大小和被测树木具有代表性的原则进行样本的选取。本研究所用的树干液流探头的内径为 65mm,故样本的直径也在 65mm,且样本生长良好,没有被挤被压的现象。

1.2 Dynamax 茎流仪测定植物茎流的基本原理和仪器的安装

1.2.1 Dynamax 茎流仪基本原理 茎流计热源以恒定的功率(P_{in})作用于茎干后,在不考虑茎干本身热容量的情况下可被分解为 3 个部分:①一部分与垂直方向上的水流进行热交换(Q_v),②一部分以辐射的形式向四周散发(Q_r);③一部分则与树干内的水流一起向上传输(Q_f)。这一能量平衡方程可表示为:

$$P_{in} = Q_v + Q_r + Q_f, \text{ 其中 } P_{in} = V^2/R \text{ (欧姆定律)}.$$

$$Q_v = Q_u + Q_d, \text{ 其中 } Q_u \text{ 为向上热交换, } Q_d \text{ 向下热交换}.$$

根据 Fourier 定律^[13] Q_u 和 Q_d 又可表示为:

$Q_u = K_{st} \cdot A \cdot dT_u/dx$ 和 $Q_d = K_{st} \cdot A \cdot dT_d/dx$ 式中, K_{st} 为茎干的热传导特性($W/m \cdot K$); A 为茎的截面积(m^2); dT_u/dx 为向上热传导时的温度梯度($^\circ C/m$); dT_d/dx 为向下热传导时的温度梯度($^\circ C/m$); dx 为测定温度梯度时的两个热电偶之间的距离(m)。

以辐射形式向四周散发的能量部分可表示为:

$$Q_r = K_{sh} \cdot CH, \text{ 式中 } K \text{ 为护套的热导电常数}(W/mV); CH \text{ 为辐射源的电源电压}(mV).$$

因而,茎干中水流通量公式为:

$$F = (P_{in} - Q_r - Q_d) / (C_p \cdot dT) = (P_{in} - Q_u - Q_d - K_{sh} \cdot CH) / (C_p \cdot dT) \\ = [P_{in} - K_{st} \cdot A(dT_u + DT_d)/dx - K_{sh} \cdot CH] / (C_p \cdot dT)$$

式中, C_p 为水的比热($J/g \cdot ^\circ C$); dT 为上下两个温度监测点间茎干水流温度的变化值($^\circ C$),且 $dT = (AH - BH)/2(^\circ C)$ 。

1.2.2 Dynamax 茎流仪的安装 树干的选择和前处理 选择适合树干液流探头的测定直径范围的树木,在光滑无疤痕的茎段上用小刀将树干外的死树皮刮去,在刮树皮时需小心,不要损伤树干的韧皮部,再用砂纸将其擦光滑。然后用游标卡尺精确测定准备安装探头中部的树干直径。将探头安装上初步调试探头直径和树干直径的适合程度,使探头能够紧紧同树干接触。为了增强探头和树干接触,在安装探头之前用 G4 混合油涂抹树干,这同时有利于防止水分顺树干进入测定部分或者水汽的液化,保护探头不受损伤和与树干粘连等。

探头的安装 将探头紧紧与树干接触,用探头上、中、下的 Velcro 带(velcro straps)将其扎紧,保证探头上的几个温差电偶接头和树干能直接接触(本研究用的探头型号为 SGB50-WS)。然后用 O 形环将探头的上下两头密封严实。

防辐射罩的安装 为了防止太阳辐射对探头的影响,在安装好探头后再在探头的外层包上 3 层铝箔。

数据采集器(data-logger)的安装 将探头的进行数据传输的电缆线与数据采集器相应的接口进行连接,将探头和数据采集器的电源线与电源(12V 的铅酸电池)接通。

1.2.3 Dynamax 茎流仪的参数设置 将数据采集器和装有 SAP-FLOW 软件的计算机(486 或 586note-book 计算机)连接好,然后将测定树木的横断面积、起始时间、数据记录的间隔等参数通过计算机输入到数据采集器(本研究数据采集间隔为 15s,每 5min 进行平均值计算并记录下来)。

2 结果及讨论

2.1 核桃楸树干液流的特点和分析

在整个测定期共获得核桃楸树干液流的数据 4300 多个。图 1 显示 3 个昼夜树干液流的进程情况,从图上可明显看出核桃楸树干液流的日变化很大,在 8 月 3 日,树干液流从 9:15~15:00 之间出现数次较大幅度的波动或者振荡,出现数个波峰和波谷,最高峰值出现在 11:00 左右,树干液流速度达到 1222g/h 以上,随后数次振荡,在 15:00 出现第 2 个高峰值,其树干液流速度也达到 1102g/h,这也是该天出现的最后一个峰值。从 15:00 以后,树干液流速度急剧下降,在 20:00 就降到相当低的水平,约 50g/h 左右,随着时间的推移,树干液流呈现比较缓慢下降,在 23:00 左右达到最低值,约 10g/h 且一直维持到第 2 天的 8:00 才缓慢增加,从 12:30 核桃楸的树干液流速度急剧增加,在 15:00 出现当天的第 1 个峰值,为 1561g/h,随后有一个在高水平基础上的下降,20min 后即停止,经过 25min,液流速度从 1342g/h 上升到 1562g/h。尔后树干液流速度持续下降,经过 4.5h 后,即 20:00 速率达到 50g/h 左右。21:00 以后树干液流速度就保持在速度低且稳定的状态。

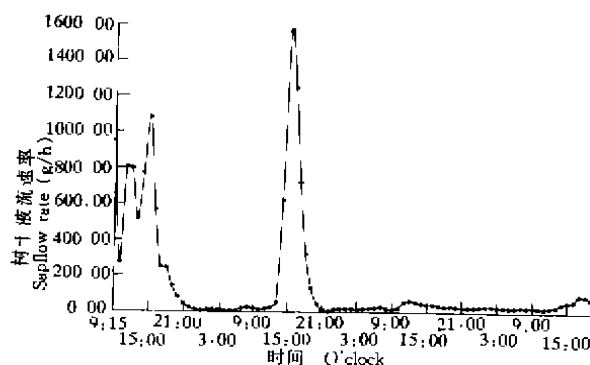


图 1 核桃楸树干液流的日进程

Fig. 1 Diurnal sap flow rate of *Juglans mandshurica* over 4 d

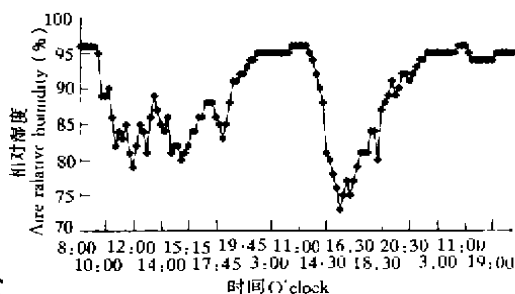


图 2 核桃楸树干液流测定期大气湿度的日进程

Fig. 2 Diurnal variation of air relative humidity during the measuring period

比较核桃楸和辽东栎树干液流速率(辽东栎树干液流数据未发表)可以发现,在生境基本一致的情况下,种的特点对树干液流的影响很大。辽东栎最大树干液流速率在晴朗天气状态下也只有核桃楸树干液流

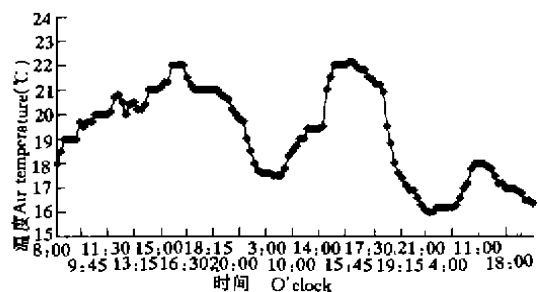


图3 核桃楸树干液流测定期温度的日进程

Fig. 3 Diurnal variation of air temperature during measuring period

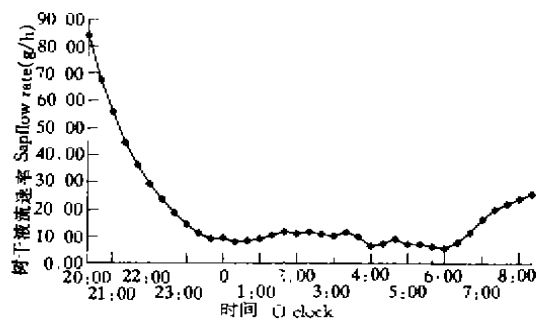


图4 核桃楸在夜晚树干液流

Fig. 4 The stem sap flow of *Juglans mandshurica* occurring at night

的三分之一左右,这和对核桃楸和辽东栎蒸腾速率的测定结果是一致的,即辽东栎的蒸腾速率一般总是要低于核桃楸(前者一般是后者蒸腾速率的2~3倍)。

对8月3日20:00到第2天8:00的核桃楸树干液流速度(图4)的分析可知,核桃楸树干液流速度在晚上时很低,但总是存在而且稳定。通过用Li-cor1600稳态气孔仪和AP4气孔计对核桃楸叶片的气孔导度测定可知,18:30以后气孔基本上完全关闭,没有蒸腾作用。根据爱尔兰的狄克逊(Henry H. Dixon,)和德国的伦纳(Otto Renner)^[12]提出的关于植物体水分运动的内聚力学说,蒸腾作用的停止意味着水分上升的拉力消失。这样,核桃楸在夜晚仍有一定速度的液流就只能说明根压的存在。对于植物根压的研究已经有非常悠久的历史,Clark在19世纪后期就对美洲多种木本植物的根压进行了研究^[16],Renner^[20]在本世纪初从理论和实践提出了植物根压和水分吸收问题。通过对核桃楸夜晚树干液流速度的分析,可以推断其根压的存在。

3.2 生境和核桃楸树干液流

从图1可见核桃楸树干液流的速度在监测的第3天一直保持在非常低的水平,最高液流速度也不超过100g/h,且变化平稳。

核桃楸树干液流速度3个昼夜的变化说明,即使是同一株植物在不同的时间,其液流速度的变化也是非常悬殊。不少研究已经发现树干液流速度受多种因子的影响,特别是土壤水分,如Gavloski等^[18]对生长在不同水分条件下的玉米茎流研究发现不供水分的玉米茎流速度比正常供水状态玉米的茎流速度降低50%以上。由于用于试验的核桃楸生长在水沟旁,土壤中可见明显的积水,因而在本试验中土壤水分不是影响核桃楸树干液流速度的因子。比较核桃楸在8月3日至8月5日这几天树干液流速率和微气候因子的日变化过程,8月3日至4日属阴有小雨的天气,而8月5日有>40mm的降水量,天气状态明显不同(表1),8月5日的树干液流速率低是因为当天没有直接的太阳辐射,而且温度相对较低,空气相对湿度大,特别是降水造成气孔关闭,没有蒸腾作用。从图1、图2和图3可以看出核桃楸树干液流速度的日进程和温度及大气相对湿度日进程有很好的生态学同步性。

表1 核桃楸树干液流测定时主要环境因子

Table 1 The main environmental factors during the measuring period

日期 Date	日降水量 Precipitation(mm)	温度(°C) Temperature	日照时间(h) Sunshine time	相对湿度(%) Relative humidity	风速(m/s) Wind velocity	土壤水分 Soil water
8月3日	10.2	18.1	1.4	95(76)	1.3	土壤中可
8月4日	9.3	17.1	0.0	98(92)	1.3	见明显的
8月5日	42.9	17.3	0.0	98(98)	1.0	积水

* 括号中为当日最低大气相对湿度

参考文献

- [1] 龚元石. 土壤-植物-大气连续体水分传输研究现状与展望. 见: 张福锁主编. 土壤与植物营养研究新动态. 1995. 1~16.
- [2] 龚元石, 陆锦文, Huwe B. 华北平原主要农作物灌溉需水量的估算. 北京农业大学学报, 1993, 19(增刊), 82~91.
- [3] 黄明斌, 邵明安. 土壤-植物系统中非稳态流研究进展. 土壤学进展, 1994, 22(3), 20~26.
- [4] 康绍忠, 刘晓明, 高新科, 等. 土壤-植物-大气连续体水分传输的计算机模拟. 1992, 3, 1~12.
- [5] Blackman P G and Devis WJ. Root to shoot communication in Maize plants of the effects of soil drying. *J. Exp. Bot.* 1985. 36: 39~48.
- [6] Camillo P R, Guerney and Schmugge T J. Soil and atmosphere boundary layer model for evapotranspiration and soil moisture studies. *Water Res. Res.* 1983. 19: 371~380.
- [7] Camacho S E, Hall A E and Kaufman M R. Efficiency and regulation of water transport in some woody and herbaceous species. *Plant Physiology*, 1974, 54: 169~172.
- [8] Baker J M & Van Bavel H M. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant, Cell and Environment*. 1987, 10: 777~782.
- [9] Cohen Y M, Fuchs & Green G C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment*, 1981, 4: 391~397.
- [10] Marshall D C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 1958, 33: 385~396.
- [11] Swanson R N & Whitfield D W A. Numerical analysis of heat pulse velocity theory. *Journal of Experimental Botany*, 1981, 32: 221~239.
- [12] Dixon H H and Renner O. *Transpiration and the Ascent of Sap in Plants*. Macmillan. & Co. Ltd. London. 1914. 139~141.
- [13] Steinberg S L, Van Bavel C H M and MaFarland M J. A gauge to measure mass flow of sap flow in stems and trunks of woody plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1989, 114: 466~472.
- [14] 马克平, 陈灵芝, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落的基本类型. 见: 陈灵芝主编. 暖温带森林生态系统结构与功能的研究. 北京: 科学出版社, 1997. 56~75.
- [15] 李海涛, 陈灵芝. 暖温带山地森林生态系统主要树种树干液流量及树冠蒸腾的研究. 见: 陈灵芝主编. 暖温带森林生态系统结构与功能的研究. 北京: 科学出版社, 1997. 240~264.
- [16] Susan L, Steiberg J, Marshall. Comparison of trunk and branch sap flow with canopy transpiration in Pecan. *Journal of Experimental Botany*, 1990, 41(227): 653~659.
- [17] 刘奉觉, Edwards W R N. 用热脉冲测定速度记录仪(HPVR)测定树干液流. 植物生理学通讯, 1993. 29(2): 110~115.
- [18] Gavloski J E, Whitefield G H, Ellis C R. Effect of restricted watering on sap flow and growth in corn (*Zea mays* L.). *Canada Journal Plant Society*, 1992. 72: 361~368.
- [19] Clark J and Gibbs R D. Studies in tree physiology. IV. Further investigations of seasonal changes in moisture content of certain Canada forest trees. *Can. J. Bot.* 1957. 35: 219~253.
- [20] Renner O. Theroetisches und experimentelles zur kohasinsteorie der Wasserbewegung. *Jahrbuch fur Wissenschaftliche Botanik*. 1915. 556: 617~667.