

柠条主根液流测定中 $\Delta T_{\max}$ 与气象因子间的关系 及时间步长的确定

党宏忠¹, 周泽福¹, 张劲松¹, 赵雨森²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 东北林业大学, 哈尔滨 150040)

摘要: 上下两探针间温差的最大值 ($\Delta T_{\max}$) 是运用 Granier 方法计算树木液流速率的重要参数, 确定这一参数的关键是选择合适的时间步长。运用 TDP (Thermal Dissipation Probe) 技术在对柠条 (*Caragana korshinskii*) 主根部液流速率 (F_s) 及主要环境要素进行实时、连续监测的基础上, 比较分析了 2008 年 4—10 月间 30d 典型晴天日柠条根部液流的变化特征, 结果表明, 柠条根部液流测定中 $\Delta T_{\max}$ 值的频率分布于夜间 22:00—6:00 的整个时间段, 并主要集中在午夜前后的 4h (占 52.63%), 其中 $\Delta T_{\max}$ 在 0:00 频率最高。 $\Delta T_{\max}$ 分布时刻与环境要素的相关性不明显, 夜间液流的主要驱动力是体内与根系间的水势差而非大气因子。午间柠条主根液流最为旺盛, 上下两探针间最小温差 ($\Delta T_{\min}$) 的频率分布峰值主要集中于 10:00—16:00 时段, 其中以 14:00 的分布频率最高。 $\Delta T_{\min}$ 频率的分布在 13:00 有一低谷, 而此刻又是主要环境变量太阳辐射最高值 ($PY_{\max}$) 与潜在蒸发散最大值 ($ET_{0\max}$) 分布频率最高的时刻, 反映了午间气孔行为对液流的调控。太阳辐射是启动午间气孔行为的主要环境因子。Granier 公式计算液流速率时适宜的时间步长为 1 周。

关键词: 柠条 (*Caragana korshinskii*); 主根液流; $\Delta T_{\max}$; 时间步长

The relationships between $\Delta T_{\max}$ and meteorological factors and determining a suitable time step in calculating taproot sap flow of *Caragana korshinskii*

DANG Hongzhong¹, ZHOU Zefu¹, ZHANG Jinsong¹, ZHAO Yuseng²

1 Research Institute of Forestry, CAF; Key Laboratory of Forest Silviculture of the Forestry Administration, Beijing 100091, China

2 Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: The $\Delta T_{\max}$, defined as the maximum of temperature difference between the two probes which implant adjacently in the upper and lower sap wood of the tree stem or root, is an important parameter for measuring sap flow by the Granier technique. The key for computing $\Delta T_{\max}$ is determining a time step. The sap flow in the taproot of *Caragana korshinskii* from April to October in 2008 was measured continually and the environmental factors were recorded simultaneously in this study, and data from 30 sunny days were chosen for analysis. The results showed that $\Delta T_{\max}$ was observed most frequently in the period from 22:00 to 6:00, and was higher in the 4 hours prior to and after midnight (with a frequency of 52.63%). The highest value occurred at 0:00. The time of occurrence of $\Delta T_{\max}$ was not significantly correlated with environmental factors and the driving force for sap flow was the water potential difference between leaf and root rather than the environmental factors. The $\Delta T_{\min}$, defined as the minimum of temperature difference between the two probes, occurred most frequently between 10:00 and 16:00, with the highest value at 14:00. There was a local minimum in $\Delta T_{\min}$ at 14:00 when the solar radiation and the potential evapotranspiration ($PY_{\max}$ and $ET_{0\max}$, respectively) achieved their peak values. This was attributed to stomata regulation on sap flow at noon. Solar radiation was a key environmental factor triggering stomata regulation at noon. The suitable time step in F_s ' computing by Granier technique is one week.

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (200708); 国家“十一五”科技支撑资助项目 (2006BAD03A0501, 2006BAD26B0601)

收稿日期: 2008-11-04; 修订日期: 2009-02-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hzdang@caf.ac.cn

Key Words: *Caragana korshinskii*; sap flow in taproot; $\Delta T_{\max}$; time step

Granier 发明的 TDP (Thermal Dissipation Probe) 技术以构成简易、测量精度高、相对低成本的优势,正越来越多地应用于林木单株水分的测定^[1-6]。该技术通过安装在树体上的两根探针(上、下分别为加热和不加热探针)上的热电藕,实时记录探针间的温差,并依据 Granier 公式(式①)计算液流通量(F_d)。按照 Granier 的定义,式①中 ΔT 为上下两根探针间的实时温差, $\Delta T_{\max}$ 为零液流时上下两根探针间的温差,由于 TDP 自身并不能确定零液流的时刻,因此除非夜间 ΔT 的最大值能够在一段时间内保持连续这种理想状况的出现,否则一般情况下均是以一天中近日出前^[7]或大气水分亏缺(VPD)近于零^[8]时的 ΔT 来代替 $\Delta T_{\max}$ 值,如果能以数天作为 ΔT 比较的时间步长,所得的最大值要比 1d 的更接近于液流为零时的 $\Delta T_{\max}$ 。如何确定合理的时间步长目前尚没有统一的标准,这必然影响到对不同区域、不同树种间研究结果的比较,也影响到液流通量计算结果的可靠性。运用 TDP 在树木根部测定单株液流方法的可靠性已被许多研究所证实^[9-10],特别是对于非单一主干性树种(大多数灌木如柠条等),在主根近地面部位安装 TDP 可以有效地避开分枝多、枝条细的不利条件,是这类树种单株液流量的监测比较理想的方法。本文将以半干旱区分布广泛的柠条(*Caragana korshinskii*)树种为例,通过比较分析典型晴天日下液流测定中 ΔT 的昼夜变化规律及其主要影响因子,揭示 $\Delta T_{\max}$ 与液流速率间的响应关系,比较不同时间步长对液流通量计算的影响并提出适宜的时间步长。

1 材料与方法

1.1 材料的选择

试验地位于半干旱区黄土丘陵沟壑第 V 副区的甘肃省定西市石家岔流域,地理位置 N35°43'17.6"、E104°39'14.0",海拔 2218m,年均降水量 427mm,年平均气温 7℃,土壤为黄绵土,流域植被以 20a 生人工带状灌木篱柠条林为主,选取 3 株生长旺盛的柠条单株为试验材料,本文将以根径(主根上安装探针部位的根径)相对最大、冠幅较圆满的 2#样株的测定数据为例,开展相关统计分析,该样株冠幅南北向为 3.10m,东西向为 2.40m 平均高 2.15m,主根直径 3.25cm,叶面积 4.43m²。

为了在不间断数据观测的同时求得样株边材面积,在以样株为中心半径为 10m 的临时样地内选择 6 株根生长状态良好、冠幅相近的柠条单株,挖取主根样段,立即用锋利的侧刀切出光滑、平整的截面,用游标卡尺量取各样段相互垂直方向的皮厚、韧皮部、边材、心材宽度并求平均,计算出各样段的边材宽度、边材面积。统计显示边材面积(S , cm²)与根径(D , cm)间的回归关系为 $S = 4.6814 \times D - 8.0447$, $R^2 = 0.97$,并据此计算出 2#样株根段的边材面积为 7.17cm²。

1.2 TDP 的安装与测定

采用按 Granier 原理设计的 TDP-10mm 热电藕探针,探针直径 1.2mm,宽 40mm,电阻 48Ω,加热电压 1.5V。10mm 针用于林木液流测定的可靠性已经得到研究证实^[11-12]。安装时间为 2008 年 3 月 21 日,安装前先从地面近根茎处沿根向下挖开宽约 30cm 的土槽,在距地面约 20cm 处挖开一空穴,使约 20cm 的根段完全露出(尚没有侧根分化,以保证单株液流测定的完整性),刷掉表面土,用游标卡尺量取直径后用专用电钻在根表面垂直于根的走向钻孔(钻头直径与深度均与探针匹配)并插入探针,用泡沫塑料纸紧紧包裹,在上端包裹接口缝隙处用黄油密封,避免水分渗入(图 1)。安装完后加固空穴以免坍塌,并以水平放置的直径 5cm 的 PVC 细管与外界相通,以排湿与防积水。空穴大小以 TDP 及包裹不与周围土壤直接接触为原则。采用 220V 交流转接 12V 铅酸蓄电池连续供电,采用英国 SQ2020 数采器采集数据,每 5min 记录 1 次数据。液流通量(F_d , m³·m²·s⁻¹)、液流速率(F_s , g·h⁻¹)的计算采用 Granier^[13] 公式:

$$F_d = 119 \times 10^{-6} [(\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T]^{1.231} \quad (1)$$

$$F_s = F_d \times A_s \times 3600 \quad (2)$$

式中, A_s 为木质部的横截面积(m²)

1.3 环境要素的测定与记录

测定的环境要素类目及传感器见表 1,均与 SQ2020 数采器相连接,每 5min 记录 1 次数据。



图1 TDP 安装示意图

Fig. 1 Installation schematic of thermal dissipation probe

表1 环境要素类目及传感器类型

Table 1 Schedule of environmental elements and sensors in trial

传感器类型 Sensor types	环境要素类目 Items of environmental elements
AV-20P	太阳辐射 Solar radiation($PY, W \cdot m^{-2}$)
AV-S3TH	大气温度 Air temperature($T_a, ^\circ C$); 大气相对湿度 Air relative humidity($RH, \%$)
AV-30WS	风速 Wind speed at 2m above land ($Ws, m \cdot s^{-1}$)
AV-3665	雨量 Rainfall(R, mm)
AV-10T	土壤温度 Soil temperature of the depth at 5cm、10cm、15cm($T_s, ^\circ C$)

1.4 潜在蒸发散(ET_0)计算

根据 FAO Penman-Monteith 方法在以天为步长计算 ET_0 时, $C_n = 900$, $C_d = 0.34$ ^[14], 在以小时为步长的计算时, $C_n = 37$, C_d 的取值进行了修正, 其中白天(6:00—20:00) $C_d = 0.24$, 晚间(21:00—5:00) $C_d = 0.96$ ^[15]。土壤热通量 G 的计算根据以小时为时间尺度计算时的精度要求, 以固定系数乘以净辐射计算而得, 该系数在白天、晚间分别为 0.5 和 0.1^[14]。

2 结果与分析

选择 2008 年 4—10 月期间的 30d 典型晴天日观测数据在 Origin8.0 程序下进行分析, 主要结果如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{G_n}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + D_a \times U_2)} \quad (3)$$

2.1 $\Delta T_{\max}$ 频率分布及其与环境要素间的关系

树木夜间液流是树木补充因白天蒸腾带来的组织缺水的一种重要方式^[16]。从图 2a 中对典型晴天日 $\Delta T_{\max}$ 在不同时刻出现频率的分布可以看出, 一日中(0:00—23:59:59) $\Delta T_{\max}$ 的频率分布占据 22:00—6:00 的整个时间段, 并主要集中在午夜前后的 4h(占 52.63%), 其中 $\Delta T_{\max}$ 在 0:00 的频率最高, 其次为 1:00, 4:00 和 22:00 时频率相等排第 3, $\Delta T_{\max}$ 频率较低的时刻在黎明前的 6:00。从对同期环境要素的分析可知(夜间忽略辐射因子), 气温最低值($T_{\min}$, 图 2b)、 ET_0 最低值($ET_{0\min}$, 图 2c)和大气水分亏缺最低值($VPD_{\min}$, 图 2d)均主要分布在 0—6:00 时间段, 其分布频率最高的时刻分别在 6:00、5:00 和 6:00。 $T_{\min}$ 、 $ET_{0\min}$ 和 $VPD_{\min}$ 主要在黎明前而 $\Delta T_{\max}$ 主要在午夜前后, 这种分布特征表明夜间液流活动与环境驱动的关系并不明显, 进一步说明夜间

液流主要是因白天过度蒸腾造成水分亏缺而驱动的夜间组织补充水分。在一定时期内, $\Delta T_{\max}$ 频率出现时刻的差异反映了白天蒸腾引起的水分亏缺程度, 亏缺程度越严重, $\Delta T_{\max}$ 频率出现时刻越靠后。

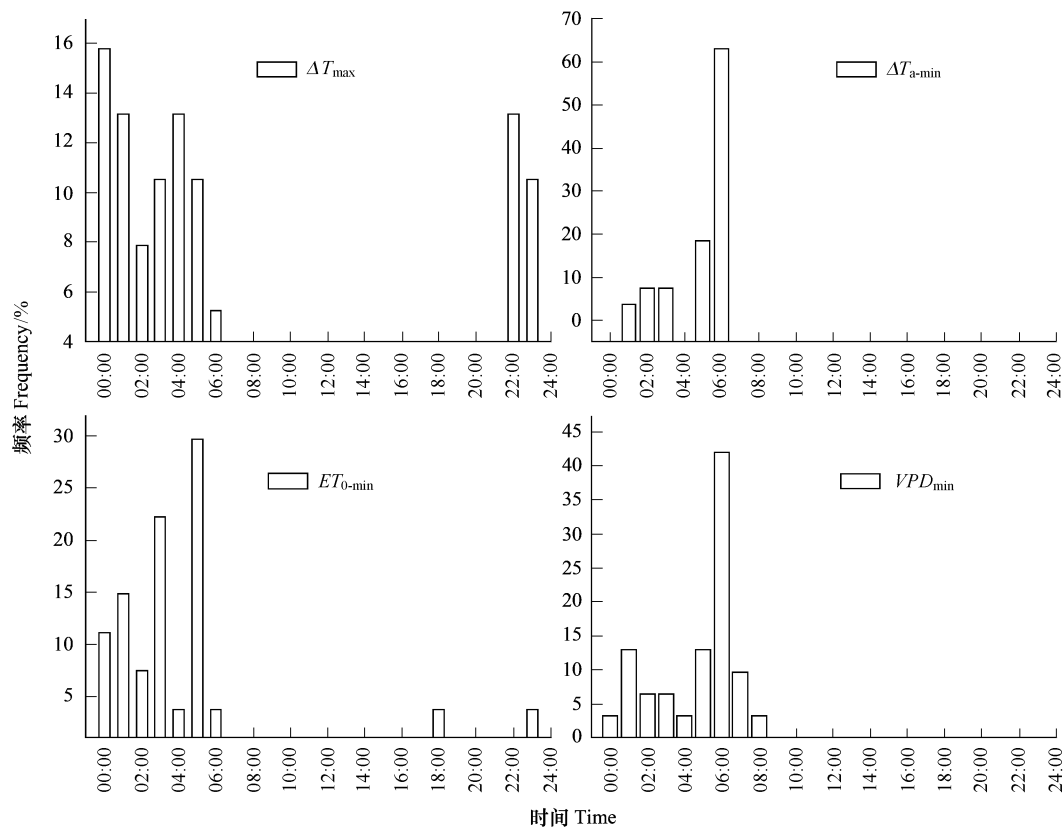


图2 典型晴天日 $\Delta T_{\max}$ 与环境要素的时间-频率分布图

Fig. 2 The frequency distribution of $\Delta T_{\max}$ and environmental factors in sunny days

2.2 $\Delta T_{\min}$ 频率分布及其与环境要素间的关系

在晴天日, 午间树木液流活动最旺盛(除非有气孔调节行为发生), 此时上下两探针间的温差最小, 把两探针间温差的最小值记为 $\Delta T_{\min}$, 根据 Granier 公式, $\Delta T_{\min}$ 应该与一日中液流最大值相对应。从图 3a 中可以看出, 一日中 $\Delta T_{\min}$ 分布频率主要在 10:00—16:00, 其中在 14:00 的分布频率最高, 其次为 12:00。 $\Delta T_{\min}$ 分布频率在 13:00 出现谷值, 这表明液流活动在该时段受到阻碍的概率较高, 同时, 太阳辐射最大值 ($PY_{\max}$)、潜在蒸散发最大值 ($ET_{0\max}$) 的频率分布时刻均主要集中在 13:00 (图 3c、3d), 说明在部分光照强烈的晴天日, 柠条液流活动会因气孔调节而减弱。从与图 3b、图 3e 中气温最高值 ($T_{\max}$)、大气水分亏缺最大值 ($VPD_{\max}$) 分布频率时间的比较中, 进一步表明太阳辐射是启动气孔调节的主要环境因子。

2.3 不同时间步长时液流速率计算的比较

从以上分析中已经知道 $\Delta T_{\max}$ 在 22:00—6:00 (翌日) 的整个时间段内都有分布, 这使得在较短时间步长时(如 1d, 0:00—23:59:59)将可能产生 $\Delta T_{\max}$ 时刻液流不为零的情况。为了把液流为零的时刻置于计算的时间段内, 就需要增加时间步长, 为此在前面所述 30 个典型晴天日中选出 05-03—06、05-10—12、07-23—25、09-03—05 等 4 个各连续 3d 的时间段, 分别以 1、3、7d (时间段中心日前后各 3d)、15d (时间段中心日前后各 7d) 为时间步长, 根据式(1)、式(2)计算 F_s 及不同时间步长下液流速率差值 ΔF_s (图 4), 可以看出, 在大部分时间段内, ΔF_s (15—1d)、 ΔF_s (7d—1d) 均呈钟形分布而 ΔF_s (3—1d) 为一直线, 说明时间步长只有在 7d 以上时才能有效避免对液流速率的低估。统计分析表明, 如果以 1d 为步长, 将使 09-03 的日液流量低估 16%, 05-04、05-10、07-23—25 的日液流量低估 12% 以上, 如果以 3d 为步长, 将使 07-23—25 时段内每日液流量低估 12%

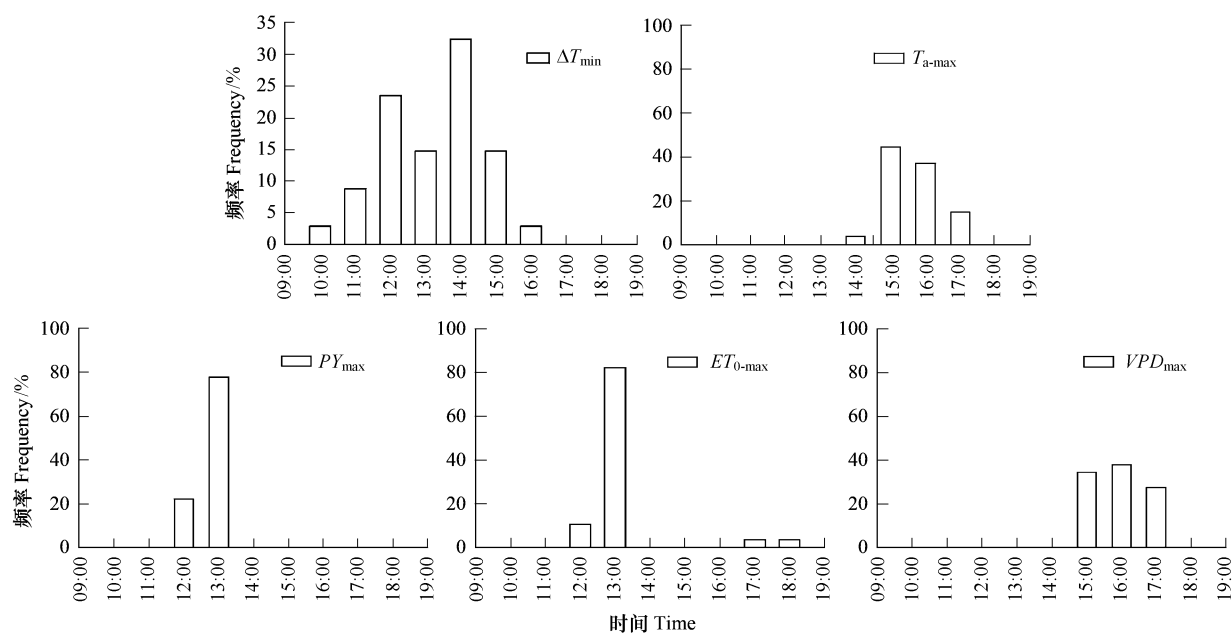
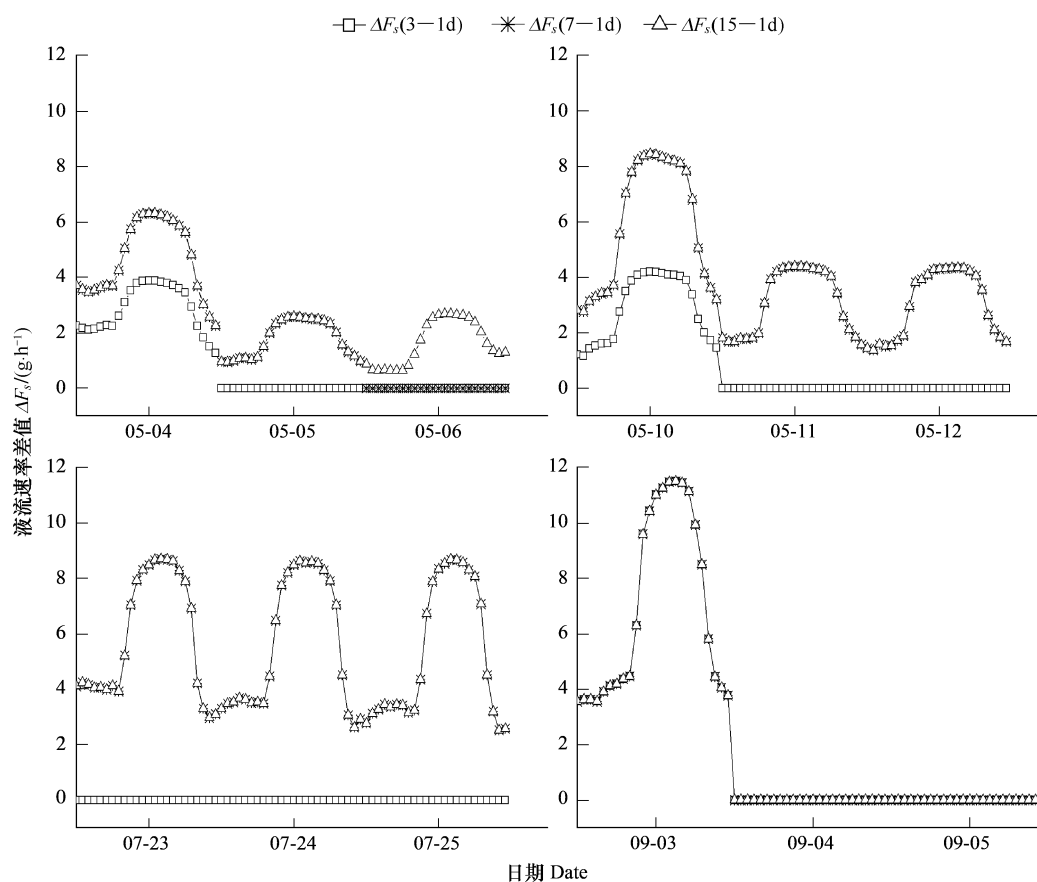
图3 典型晴天日 $\Delta T_{\min}$ 与环境要素的时间-频率分布图Fig. 3 The frequency distribution of $\Delta T_{\min}$ and environmental factors in sunny days

图4 不同时间步长下的液流速率差值比较

Fig. 4 The difference value of sap flow in taproot by some time steps

以上。另外, $\Delta F_s(15-1d)$ 与 $\Delta F_s(7-1d)$ 在大部分时间段内(05-06 例外)重合,也说明了以 7d 为时间步长能够满足对液流速率计算准确性的要求。

2.3 结论与讨论

林木夜间液流活动常常是指示林木生存环境的水分状况和林木水分利用策略的重要指标,液流为零常用来表达叶-土水势之间的一种平衡态,此时刻的叶水势常作为土壤平均水势的代理^[17]。本研究中柠条夜间液流最低的时刻分布比较宽,表现为 $\Delta T_{\max}$ 频率分布可占据夜间 22:00—6:00 的整个时间段,且主要集中在午夜前后的 4h(占 52.63%),其中 0:00 时 $\Delta T_{\max}$ 频率最高,但柠条夜间最小液流值出现的时刻与各环境要素的相关性均不明显,这说明柠条夜间液流的主要驱动力可能是体内与根系间的水势差而非大气环境因子。柠条午间旺盛的液流活动表现为 $\Delta T_{\min}$ 频率主要分布在 10:00—16:00 时段且以 14:00 的分布频率最高。本次研究中发现 $\Delta T_{\min}$ 分布频率在 13:00 有一低谷,此时恰是主要环境变量 $PY_{\max}$ 与 $ET_{0\max}$ 分布频率最高的时刻,灌木树种由于树高相对较低,因此这可能与午间气孔调节行为的存在有关而非时滞现象,气孔的这种调节行为的主要诱导环境因子应该是太阳辐射而非大气水分亏缺。

按照 Granier^[13] 的研究,确定 $\Delta T_{\max}$ 的前提是某时刻的液流降为零,否则该方法的可信度将受到怀疑,特别是对于液流速率较低的树种。试验期间曾观察到 3 株柠条样株主根夜间一直存在液流不为零的情况,由于土壤水分变化的缓慢以及柠条属于主根明显的深根性树种,因此夜间液流所表示的水分补充活动可能是柠条在半干旱区的一种水分利用策略。通过增大计算时间步长,在更大范围找寻液流为零(经常的情况是更加趋近于零)时的 $\Delta T_{\max}$ 值,是 Granier 公式计算中避免低估液流的有效方法,为了与一般数据采集周期相结合,本研究选择了 1d、3d、1 周(7d)、半月(15d)4 个时间步长来比较计算结果差异的显著性,发现合理的时间步长为一周,这与 Grainer 所建议的经验值基本吻合。

References:

- [1] Zhang J S, Meng P, Liu W, Shi S J, Wang H S, Gao J and Ren Q F. Performance Analysis for the Domestic TDP Sensor for Measuring Sap Flow in Trees. *Forest Researcher*, 2007,20(3):370-374.
- [2] Song L, Wang C K, Yang G T, Zhang Q Z, Zhou X F. Sapflow Flux of *Pinus koraiensis* Plantation Measured by Thermal Dissipation Probes. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007,43(11):8-14.
- [3] Ju H B, Li J Y, Wei X X, Xu C L. Study on Specific Conductivity of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus variabilis* Using Thermal Dissipation Technology. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006,42(8):14-18.
- [4] Sun H Z, Song L, Wang C K, Zhou X F. Sapflow of the Major Tree Species in the Eastern Mountainous Region in Northeast China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005,41(3):36-42.
- [5] Nie L S, Li J Y, Ju H B. Study of the rate of stem sap flow in *Pinus tabulaeformis* and *Quercus variabilis* by using the TDP method. *Acta Ecologica Sinica*, 2005,25(8):1934-1940.
- [6] Lu P, URBAN L, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe(TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Botanica Sinica*, 2004,46(6):631-646.
- [7] Motzer T, Munz N, Kupperts M, Schmitt D and Anhuf D. Stomatal conductance, transpiration and sap flow of tropical montane rain forest trees in the southern Ecuadorian Andes. *Tree Physiology*, 2005(25):1283-1293.
- [8] Kubota M, Tenhunen J, Zimmermann R, Schmid M, Adiku S, Kakubari Y. Influences of environmental factors on the radial profile of sap flux density in *Fagus crenata* growing at different elevations in the Naeba Mountains, Japan. *Tree Physiology*, 2005(25):545-556.
- [9] Brooks J R, Meinzer F C, Coulombe R, Gregg J. Hydraulic redistribution of soil water during summer drought in two contrasting Pacific Northwest coniferous forests. *Tree Physiology*, 2002(22):1107-1117.
- [10] Scholz F G, Bucci S J, Goldstein G, Meinzer F C and Franco A C. Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees. *Tree Physiology*, 2002(22):603-612.
- [11] McCulloh K A, Winter K, Meinzer F C, Garcia M, Aranda J and Lachenbruch B. A comparison of daily water use estimates derived from constant-heat sap flow probe values and gravimetric measurements in pot-grown saplings. *Tree Physiology*, 2007(27):1355-1360.
- [12] Poyatos R, Cermak J, Llorens P. Variation in the radial patterns of sap flux density in pubescent oak(*Quercus pubescens*) and its implications for tree and stand transpiration measurements. *Tree Physiology*, 2007(27):537-548.

- [13] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987 (3):309-320.
- [14] Allen R G, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, vol. 56, Rome, Italy, 1998, 56:301.
- [15] Allen R G, Pruitt W O, Wright J L, Howell T A, Ventura F, Snyder R, Itenfisu D, Steduto P, Berengena J, Yrisarry J B, Smith M, Pereira L S, Raes D, Perrier A, Alves I, Walter I and Elliott R. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO 56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 2006(81):1-22.
- [16] Li H T, Xiang L, Xia J, Lin Y M, Liang T. Applying the Heat Dissipation Technique to Study the Sap Flow of *Pinus elliottii* in the Red Earth Area of Subtropical China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(10):31-38.
- [17] Bucci S J, Scholz F G, Goldstein G, Meinzer F C, Hinojosa J A, Hoffmann W A and Franco A C. Processes preventing nocturnal equilibration between leaf and soil water potential in tropical savanna woody species. *Tree Physiol*, 2004 (24):1119-1127.

参考文献:

- [1] 张劲松, 孟平, 刘尉, 施生锦, 王鹤松, 高峻, 任庆福. 热扩散式树木液流国产化传感器性能分析. *林业科学研究*, 2007, 20(3):370-374.
- [2] 孙龙, 王传宽, 杨国亭, 张全智, 周晓峰. 应用热扩散技术对红松人工林树干液流通量的研究. *林业科学*, 2007, 43(11):8-14.
- [3] 翟洪波, 李吉跃, 魏晓霞, 徐成立. 应用热扩散技术对油松栓皮栎比导率的研究. *林业科学*, 2006, 42(8):14-18.
- [4] 孙慧珍, 孙龙, 王传宽, 周晓峰. 东北东部山区主要树种树干液流研究. *林业科学*, 2005, 41(3):36-42.
- [5] 聂立水, 李吉跃, 翟洪波. 油松、栓皮栎树干液流速率比较. *生态学报*, 2005, 25(8):1934-1940.
- [16] 李海涛, 向乐, 夏军, 林耀明, 梁涛. 应用热扩散技术对亚热带红壤区湿地松人工林树干边材液流的研究. *林业科学*, 2006, 42(10):31-38.