

黄土高原半干旱区辽东栎的树干液流动态*

张建国^{1,4} 久米朋宣² 大规恭一² 山中典和³ 杜 盛¹

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100; 2. 日本九州大学演习林 福岡 811-2415;
3. 日本鸟取大学干燥地研究中心 鸟取 680-0001; 4. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要: 利用 Granier 树干液流测定系统,长期监测黄土高原半干旱区延安市南郊天然辽东栎林优势木的树干液流,并同步监测环境因子(空气温度、湿度、太阳辐射、土壤含水量)。分析 3 株优势木边材液流在生长季内各月份的日变化特征以及液流通量密度与环境因子的关系。结果显示:辽东栎液流日变化总体上与太阳辐射和空气水汽压亏缺呈相同趋势,但液流峰值出现时间较早,通常为 10:00 左右。随着生长季内物候变化,液流通量密度总体表现为前期(4—6 月)较低、中后期(7—9 月)较高、末期(10 月)迅速下降的变化趋势。采用指数饱和曲线函数对液流通量密度和空气水汽压亏缺进行拟合,有效地反映了各月份液流通量密度对空气水汽压亏缺的响应特征。各月份的曲线特征和拟合参数的差异表明,蒸腾耗水过程也受到土壤水分状况等其他因素的影响。

关键词: 黄土高原; 辽东栎; 边材液流; 季节变化; 热扩散探针

中图分类号: S715 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2011)04-0063-07

Sap Flow Dynamics of Dominant Trees of *Quercus liaotungensis* Forest in the Semiarid Loess Plateau Region

Zhang Jianguo^{1,4} Kume Tomonori² Otsuki Kyoichi² Yamanaka Norikazu³ Du Sheng¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources Yangling 712100;
2. Kyushu University Forest Fukuoka 811-2415, Japan; 3. Arid Land Research Center, Tottori University Tottori 680-0001, Japan;
4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049)

Abstract: Granier-type thermal dissipation probes (TDP) were applied to measure tree sap flow dynamics in a naturally-regenerated *Quercus liaotungensis* forest in semiarid Loess Plateau region near Yan'an, Shaanxi Province. Air temperature, relative air humidity, solar radiation, and soil water content were monitored at the same time. In this paper, we measured diurnal courses of sap flow characteristics and analyzed relationships between sap flux density and environmental factors with three dominant trees during the growing season of 2009. The results showed that sap flux densities in *Q. liaotungensis* reached their daily peaks earlier than solar radiation and vapor pressure deficit, usually around 10:00 am, though the diurnal courses of sap flux density were generally similar to the changes of environmental factors. As the season and leaf phenology progressed, the overall performance of sap flux density was relatively low at early stage (April to June), high in the mid and late stage (July to September), and rapidly declining in the last stage (October). Exponential saturation function was applied to fit the data sets of sap flux density and vapor pressure deficit, and the fitted curves effectively reflected the sap flow characteristics in different months. Differences in the fitted curves and parameters among months suggested that the transpiration process in these trees was also affected by soil moisture conditions or other environmental factors.

Key words: Loess Plateau; *Quercus liaotungensis*; sap flow; seasonal variation; thermal dissipation probe (TDP)

半干旱地区的植被建设是我国生态环境建设的重要内容。深入了解现有植被的生态特征是科学决策植被恢复与重建措施的前提条件。黄土高原中部

的陕西省延安市一带,在生态景观的水平分布上处于森林区与森林草原区过渡地带,有限的森林植被易受环境条件和人为活动的影响。近年来,该地区

收稿日期:2010-04-02; 修回日期:2010-09-30。

基金项目:中国科学院知识创新工程“百人计划”项目(kzcx2-yw-BR-02); 中国科学院知识创新工程“西部行动计划”项目(kzcx2-XB2-05); 中国科学院-日本学术振兴会据点大学群合作项目。

* 杜盛为通讯作者。

实施了较大规模的自然恢复和人工造林等措施,但对于各种植被类型生态特征及功能的研究却大大滞后于生态建设的需求。

具有天然更新能力的辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 是黄土高原地区主要的森林建群种,分布于该地区的天然辽东栎次生林在区域水分循环、能量流动、有机物质累积以及碳增汇等生态功能中具有十分重要的作用。初步研究显示,该地区的辽东栎林分生长状况良好,土壤发育状况和林内小气候环境等特征都优于当地的人工林群落 (Otsuki *et al.* 2005; Tateno *et al.* 2007; Du *et al.* 2007)。但目前缺乏对于该树种在自然状态下蒸腾耗水特性的深入研究。了解该树种及其林分的蒸腾耗水动态,探明其蒸腾耗水过程对气象、土壤等环境因子的响应机制,有助于合理评价其对该环境的适应性,科学指导植被建设规划和造林树种的选择。

测定树干木质部边材液流 (sap flow) 是研究树木单株及林分蒸腾耗水动态的重要方法,尤其是在下垫面不均一的复杂地形条件下具有显著的优越性 (Granier *et al.*, 1996)。其中热扩散探针法 (thermal dissipation probe, TDP 法,或称作 Granier 探针法) 是目前为止精确度较高且操作最为方便的液流测定方法 (Smith *et al.*, 1996; Lu *et al.*, 2004)。该技术可以长期连续地测定树干边材液流,通过尺度转换可以估测林分的蒸腾耗水量。近年,国内学者也采用该技术对树木耗水特性进行研究,如在北京、广东、黑龙江等地对一些天然林和人工林树种的研究 (王华田等, 2002; 李海涛等, 2006; 赵平等, 2006a; 2006b; 孙龙等, 2007)。但对于黄土高原地区林木耗水特性的研究仅见于刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 等少数几个树种 (于占辉等, 2009a; 2009b; Wang *et al.* 2010; Du *et al.* 2011)。本试验利用 Granier 热扩散探针针对辽东栎优势木边材液流进行了一个生长季的连续监测,并同步监测气象和土壤等环境因子,旨在获得该树种树干液流的日变化和季节变化动态及其与环境因子的相互关系,揭示该树种蒸腾耗水对当地环境条件的响应机制。

1 研究地概况和试验方法

1.1 试验地概况

研究区位于陕西省延安市南郊公路山 (36°25.40' N, 109°31.53' E), 海拔 1 353 m。该地区在生态景观的水平地带性上位于森林区与森林草原区的过渡地带 (吴钦孝等, 1998), 气候为温带半干旱大陆性季风气候。据延安市气象台资料,近 20

年 (1988—2007) 平均年降水量为 498 mm, 平均气温为 10.6 °C, 雨季集中于 7—9 月份, 4—6 月份为干旱季节 (图 1)。

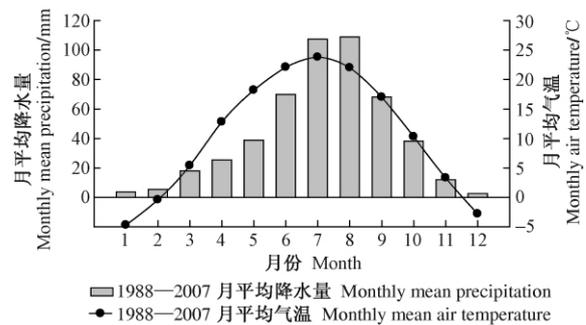


图 1 延安市气候特征 (1988—2007)

Fig. 1 Climate in Yan'an city during 1988—2007

天然辽东栎次生林多分布于阴坡和半阴坡,本试验地内最大树龄为 60~70 年。伴生树种有山杏 (*Armeniaca sibirica*)、细裂槭 (*Acer stenolobum*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*) 等以及一些灌木。林内设有 20 m × 20 m 标准样地,用于对林分生长、土壤水分和小气候环境进行长期综合监测,本试验是综合研究的一部分,于 2009 年生长季 (4—10 月) 进行。

1.2 树干木质部边材液流测定

供试木为生长正常、光照条件良好的辽东栎优势木 3 株。辽东栎木材结构为环孔材,样地内个体的边材厚度在 1.5~3.0 cm 范围,本次选定的优势木边材厚度在 2.3~2.6 cm 范围 (表 1)。由于本试验的主要目的是探讨液流变化特征,分析指标为液流通量密度 (sap flux density, F_d),所以采用了长度为 1 cm 的热扩散探针对外侧边材的液流通量密度进行监测,参考探针与加热探针间相距 15 cm,采用专用电流调节装置连接 12 V 直流电源,供给加热探针恒定电流以达到 0.15 W 的持续加热 (James *et al.* 2002; Wang *et al.* 2010)。为了避免太阳辐射引起的测量误差,将探针安装在树干北侧并用防辐射铝铂覆盖。采用 CR1000 数据采集器 (Campbell), 每 30 s 测读 1 组数据并记录每 30 min 的平均值。本文所涉及的数据为 2009 年 4—9 月的监测值。液流通量密度根据通用的 Granier 经验公式计算 (Granier, 1987; James *et al.*, 2002): $F_d = 119 K^{1.231}$ 。式中: F_d 为边材液流通量密度 ($\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); $K = (\Delta T_m - \Delta T) / \Delta T$, 其中 ΔT_m 为液流通量为零时加热探针与参考探针的温度差,即最大温差值, ΔT 为瞬时温差值 (监测值)。

本试验以考察该树种的液流变化动态为主要目的,所以只采用液流通量密度指标,单木或林分的蒸

腾耗水总量将另题讨论。

表1 被测树木基本参数

Tab.1 Basic parameters of sample trees

样本序号 Sample tree No.	树龄 Tree age/a	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	边材宽度 Sapwood width/cm
1	48	20.4	8.7	2.6
2	43	16.9	8.1	2.3
3	56	19.5	9.4	2.5

1.3 环境因子测定

在试验地附近一个较为开阔的位置设有自动气象观测站对主要气象要素进行长期连续监测,作为树冠上方的气象因子,测定指标包括太阳辐射(R_s)、空气温度(T)、空气相对湿度(RH)等。太阳辐射采用 LI-200 型传感器(Li-Cor),安装于距地面 2 m 高处;温湿度传感器采用 HMP50 型(Vaisala),安装于 2 m 高处防辐射罩内;采用 CR1000 型数据采集器连接各传感器,数据测读及存储的频度与液流测定相同。为综合反映大气温度与空气相对湿度的协同效应,同时采用了空气水汽压亏缺(vapor pressure deficit, VPD, kPa)这一指标,计算公式(Campbell *et al.*, 1998)如下: $VPD = 0.611 e^{[17.5027/(T+240.97)]} (1 - RH)$ 。式中: T 为空气温度($^{\circ}C$),RH为空气相对湿度(%)。

林地土壤水分的测定采用土钻法。用土钻在样地旁选取坡上、坡中、坡下 3 个部位采样,在 0~1 m 土层内每 10 cm 取样 1 次,1~3 m 土层内每 20 cm 取样 1 次,采用经典的烘干法测定土壤质量含水量。

每月测定 1 次,本研究中统一选择接近月末且前日无降雨的一天。

2 结果与分析

2.1 生长季内各月份气象环境因子及林地土壤水分变化特征

图 2 为 2009 年 4—10 月间研究区每日总太阳辐射(A)和日平均空气水汽压亏缺(B)。从图 2A 中各个时期的最大值可以看出日总太阳辐射的长期变化,这些最大值代表了相应时期晴天的太阳辐射量。研究区日总太阳辐射高值在 4 月初,约为 $25 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,6 月份达到全年的最高值(夏至前后),10 月份下降到 $15 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右。该区域 7—9 月份为雨季,降雨次数较多,辐射量较低的日数明显多于其他时期。随着气温和空气湿度的变化,作为蒸腾作用主要驱动力的空气水汽压亏缺在初夏季节(6 月)出现迅速上升,最高日平均值达到 3 kPa;进入 7 月份有所下降,日均值多数在 1.5 kPa 以下(图 2B)。据简单物候观测,当地辽东栎于 4 月上旬萌动,中旬展叶,10 月下旬进入休眠并逐步落叶,落叶一直持续到翌年 3 月。

图 3 为监测期各月份土壤水分状况。土壤水分测定日接近每月月末,本研究中分析液流日变化动态的日期基本与此相对应。在干旱季节的 4—6 月,土壤含水量较低,并逐月下降,而且上层土壤的含水量低于 0~3 m 土层平均值。7 月份开始逐步回升,降雨首先补充了上层土壤,使 0~1 m 层含水量大于

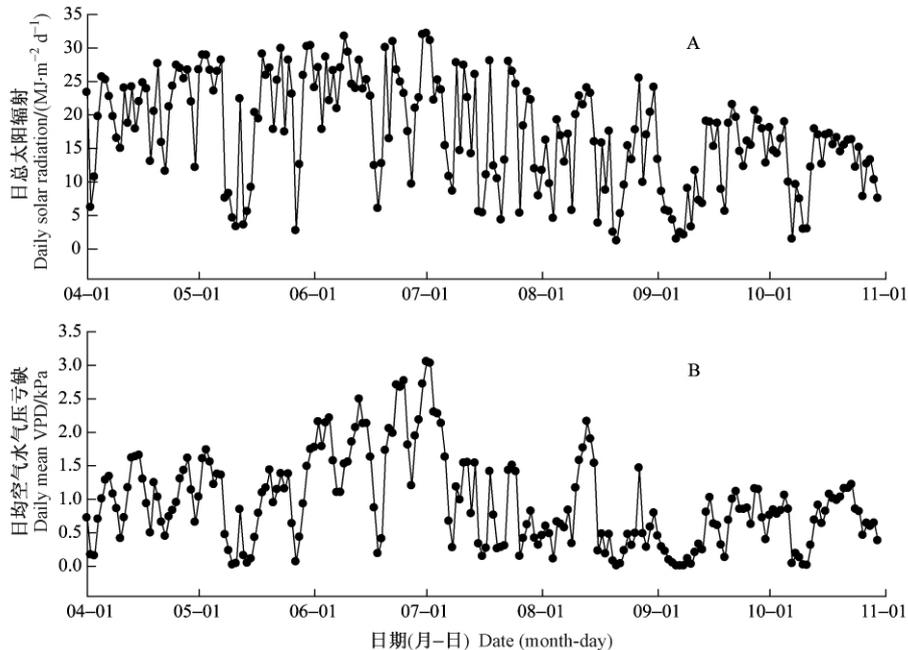


图2 监测期间(2009年4—10月)研究区日总太阳辐射(A)及日均空气水汽压亏缺(B)

Fig.2 Daily solar radiation (A) and mean daily vapor pressure deficit (B) at the study site during the monitoring period (Apr.—Oct., 2009)

0~3 m 层的平均值。9 月份土壤含水量达到整个生长季的最高水平,10 月又有所下降。

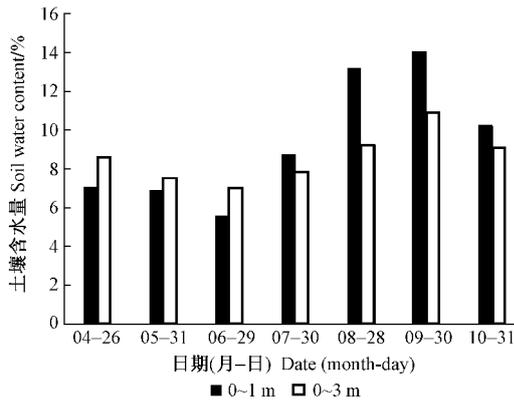


图3 林地 0~1 m 和 0~3 m 土层各月份平均质量含水量

Fig. 3 Average gravimetric soil water contents in depths of 0-1 m and 0-3 m in each month

2.2 辽东栎生长季内各月份边材液流日变化动态

为了解边材液流的日变化特征,在监测期具有明显液流变化的 4—9 月各选择一个较为典型的晴天进行分析。图 4 为影响蒸腾的主要气象因子太阳辐射和空气水汽压亏缺每 0.5 h 的日进程,对应日期的边材液流日变化进程见图 5。从图 4 可以看出,太阳辐射的日变化虽然存在季节差异,但基本呈

现相同变化趋势,日峰值出现于 12:30—13:30。空气水汽压亏缺的变化进程滞后于太阳辐射约 2 h,峰值出现于 14:00—16:00。空气水汽压亏缺一般在傍晚迅速回落,但在干旱季节较为缓慢(5—6 月)夜间仍维持在一定水平。

辽东栎在 4 月 10 日前后开始展叶。从 10 月中旬开始辽东栎叶片渐渐变红,下旬开始出现落叶,树木进入休眠。生长季内液流变化总体趋势为前期(4—6 月)较低、中后期(7—9 月)较高、末期(10 月)迅速下降。末期液流逐日变化明显,进入 11 月份以后趋于停止。供试树木液流通量密度虽然存在个体间差异,但呈现了相同的日变化趋势(图 5)。辽东栎液流通常在日出后迅速启动并快速升高,在 10:00 左右便达到最大值,随后逐渐下降,于次日凌晨达到最低值。液流日变化曲线通常为单峰型,出现峰值的时间早于空气水汽压亏缺和太阳辐射峰值时间。偶尔也在午后出现另一个小高峰,形成双峰型曲线(如 6 月下旬),但属于比较特殊的情形。

尽管 5 月和 6 月的太阳辐射较高(6 月下旬夏至前后为一年中每日太阳辐射量最多的时期),但在 4—6 月的 3 个典型日变化进程中,太阳辐射基本处于同一水平,空气水汽压亏缺呈显著上升趋势,显示空气趋于干燥,6 月 30 日空气水汽压亏缺最大值

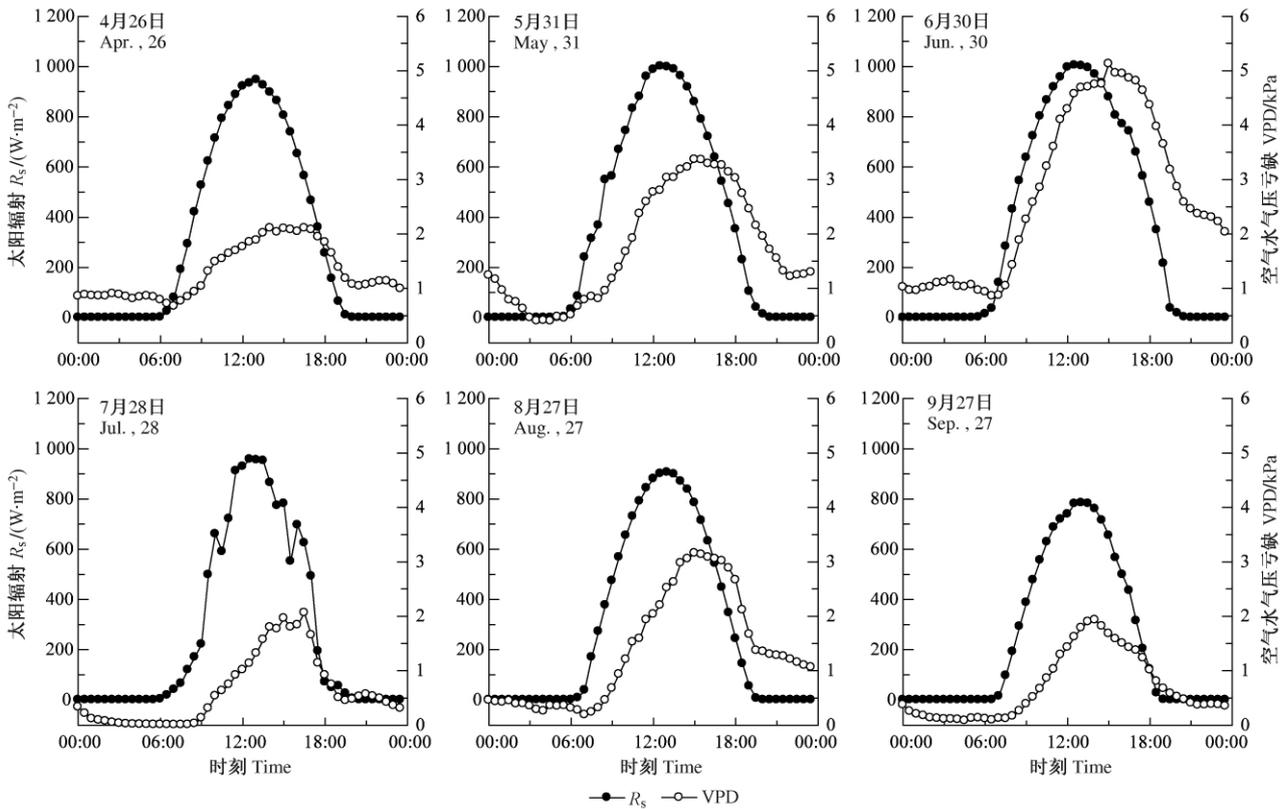


图 4 试验期间各月份典型晴天太阳辐射(R_s)与空气水汽压亏缺(VPD)日变化

Fig. 4 Diurnal courses of solar radiation(R_s) and vapor pressure deficit(VPD) in a typical sunny day each month during the study period

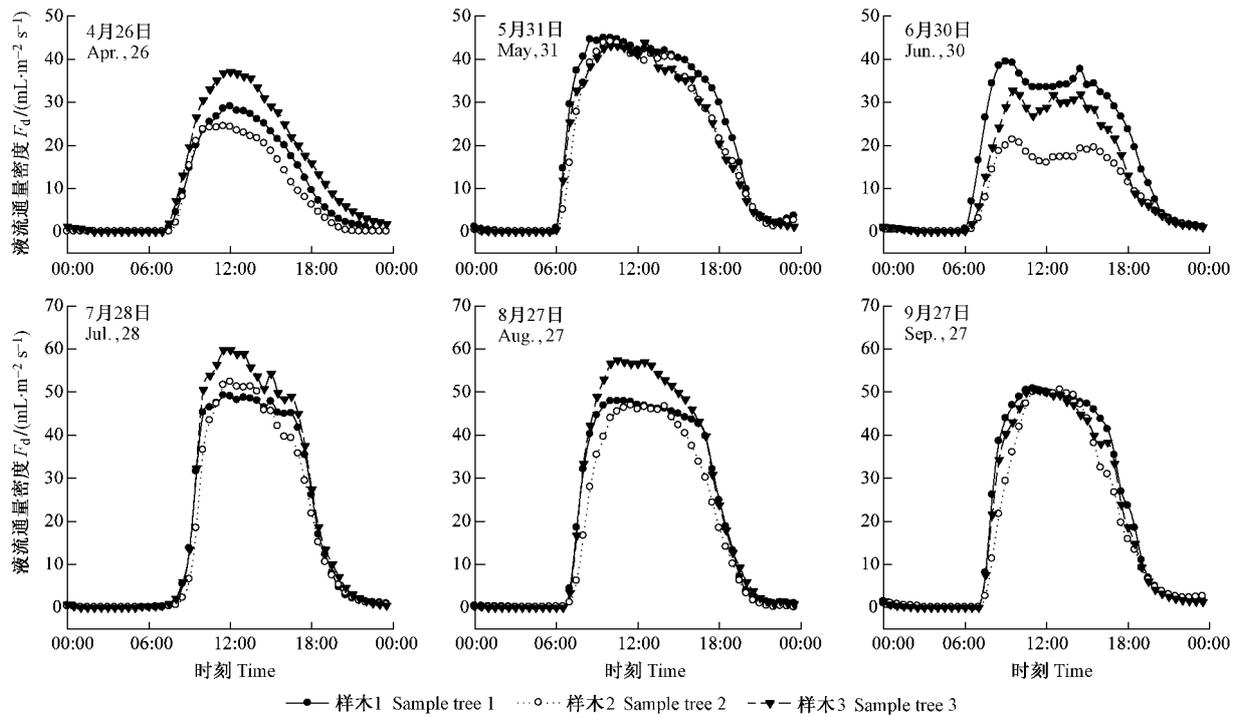


图 5 辽东栎林优势木 4—9 月份典型晴天的液流通量密度日变化

Fig. 5 Diurnal courses of sap flux density (F_d) of the dominant trees in *Q. liaotungensis* forest in a sunny day each month from April to September

突破 5 kPa。但 6 月份液流通量密度没有呈现同物候变化相同的趋势,反而有所下降,说明供试林木内存在其他蒸腾调控机制以响应复杂的环境条件。7 月份以后出现降雨,空气也趋于湿润,在较长一段时间内液流通量密度维持在较高水平。

2.3 生长季内各月份液流通量密度对主要环境因子的响应特征

植物蒸腾耗水过程受到植物自身特性和环境因子的影响。环境因子包括气象因子和土壤水分状况,在较短的时间尺度上,例如本研究中所记录的每 0.5 h 的液流通量密度,其变动特征主要受空气温度、湿度和太阳辐射的影响。因此,分析液流变化特征对太阳辐射和空气水气压亏缺的响应受到广泛重视(赵平等,2006b)。本研究地处半干旱地区,在普通天气条件下太阳辐射与空气水气压亏缺存在显著的相关关系,经对 5 个连续晴天太阳辐射上升过程中的相关分析,二者相关性达到极显著水平($R^2 = 0.91$)。另有研究表明,空气水气压亏缺在影响植物蒸腾耗水的气象环境因子中占主导地位(Green, 1993; Zhang *et al.*, 1997)。为进一步考察供试木蒸腾耗水对主导环境因子的响应特征以及生长季内不同月份的动态变化,采用指数饱和曲线函数(Ewers *et al.*, 2002; 2007; Wang *et al.*, 2010)对液流通量密度和空气水气压亏缺逐月进行了回归分析。所采用

数据仍然来自各月份土壤水分调查前后,每月选择了 5 个连续的非极端天气,基本为晴天。由于时滞效应会导致在各因子上升和下降过程中呈现不同的函数关系,为避免液流通量密度与气象因子的时滞现象对二者的回归关系产生影响,数据组仅限于从液流启动开始(6:30)到空气水气压亏缺达到最大值之间,午后空气水气压亏缺下降过程中以及夜间的的数据未予采用。生长季各月份的回归曲线及关系式见图 6,在拟合方程 $y = y_0 + a[1 - \exp(-bx)]$ 中, y 为供试木液流通量密度平均值(F_d), x 为空气水气压亏缺(VPD), y_0 , a , b 为拟合系数。

由图 6 可以看出,液流通量密度与空气水气压亏缺拟合效果良好。根据曲线特征及系数 b 值的大小可知,7—9 月份 b 值都在 2 以上,液流通量密度可快速上升至饱和值,饱和值也高于其他月份,说明该时期根系吸水阻力较小,光和蒸腾作用活跃,树木自身通过气孔调节使蒸腾耗水保持适当水平(饱和值)。6 月份曲线显示液流通量密度的理论饱和值难以达到,总体处于较低水平, b 值最小(1.33),说明存在供水不足,蒸腾作用受到吸水阻力的抑制。

3 结论与讨论

随着生长季内物候变化,辽东栎优势木边材液

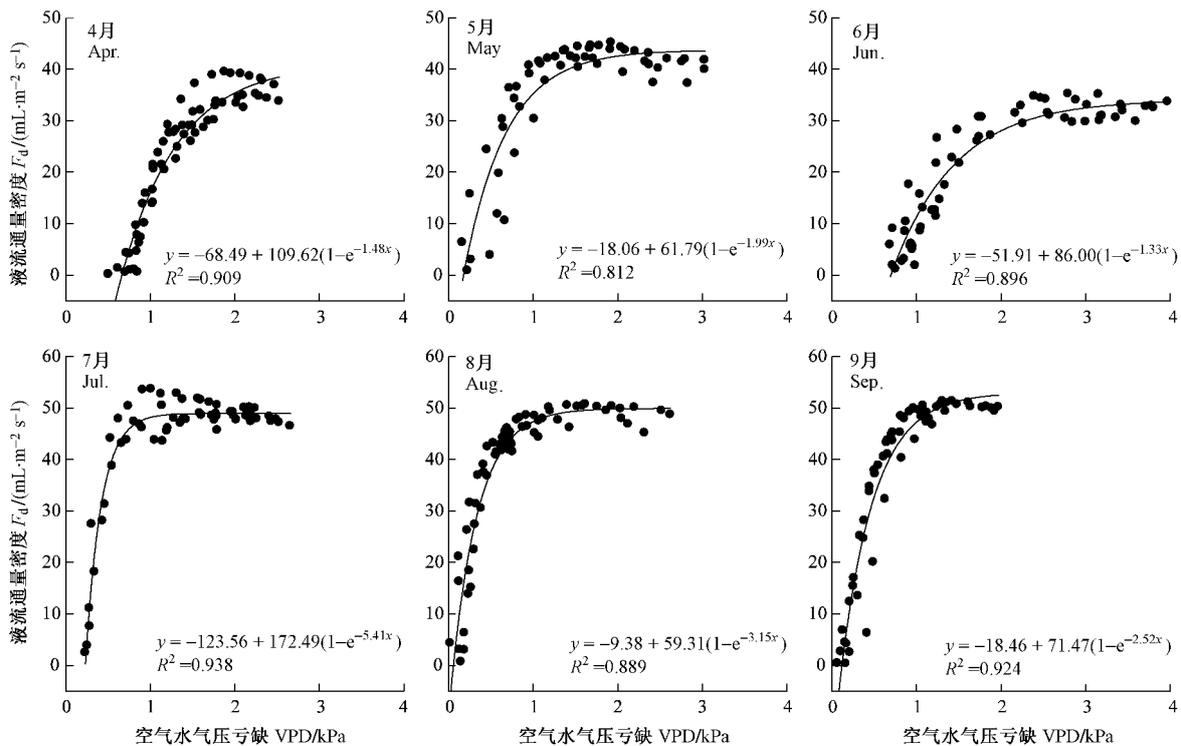


图6 各月份液流通量密度(F_d)对空气水气压亏缺(VPD)的响应特征

Fig. 6 Response patterns of sap flux density (F_d) to vapor pressure deficit (VPD) each month throughout the growing season

流通量总体表现为前期(4—6月)较低、中后期(7—9月)较高、末期(10月)迅速下降的变化趋势。本试验为同一树种,个体间液流通量密度虽然有一定差异,3株供试木的液流变化趋势基本相同。辽东栎液流日变化曲线通常为单峰型,峰值出现在10:00左右。据同一林分内进行的研究显示,即使在土壤水分状况较好的时期,通常的晴朗天气情况下该树种气孔导度在8:00以后即出现明显下降,说明该树种迅速启动气孔调节功能,实现对水分的保守型利用(Du *et al.* 2011)。与本试验位于同一地区的刺槐人工林液流日变化峰值通常出现于12:00左右(Wang *et al.* 2010),晚于辽东栎约2 h,可见不同树种间蒸腾耗水调节机制的差异显著。在干旱季节,土壤水分亏缺也势必会影响蒸腾耗水和液流动态,本试验中6月份的液流通量密度总体处于较低水平,中午前后空气极为干燥,空气水气压亏缺达到5.0 kPa,日变化曲线甚至表现出双峰型特征,说明在空气水气压亏缺远未达到峰值之前蒸腾已受到制约,午后又对气孔进行了适度的开放,以维持一定的光合作用水平。有些树种的液流日变化高峰出现在太阳辐射高峰之后(申李华等,2007;王华等,2008),而本研究中辽东栎液流峰值出现较早,也说明空气水气压亏缺可能是诱导该供试木调节蒸腾耗水和液流开始下降的主要环境因子,不存在光照不

足的因素。

因土壤环境因子、气象环境因子和水分传输组织、根系等树体本身特性都会对树干水力导度(hydraulic conductance)产生影响,从而在液流与主要气象因子之间普遍存在着时滞现象。国内学者对日变化进程中液流通量密度与太阳辐射、空气水气压亏缺的时滞效应进行了专题分析,发现在干湿季节之间存在显著差异(赵平等,2006a;王华等,2008)。本文不以讨论时滞效应为重点,在分析液流通量密度对空气水气压亏缺的响应特征时将数据源限定于峰值之前,从而回避了可能由时滞效应对回归模型产生的影响。

影响林木蒸腾耗水过程的诸多环境因子中,大多具有连带效应。例如,太阳辐射会影响气孔开闭和环境温度,空气水气压亏缺又是大气温度和湿度的综合体现。在气孔处于同一状态下的蒸腾作用,以及夜间等情况下的角质层蒸腾,通常只与空气水气压亏缺呈简单相关关系。但如果某个环境因子(温度、湿度、土壤水分或光照)影响了气孔的开闭状态,那么蒸腾作用也会发生相应变化。有的学者通过多元回归建立液流通量密度与太阳辐射、空气水气压亏缺,甚至包括空气温、湿度的多元一次方程,这种方法欠妥当,因为这些环境因子同液流通量密度的关系并不是线性的。赵平等(2006b)通过对

太阳辐射和空气水汽压亏缺进行等级划分,分别分析不同太阳辐射范围内蒸腾变量(冠层导度)对空气水汽压亏缺的响应特征,以及不同空气水汽压亏缺范围内蒸腾变量对太阳辐射的响应特征,较好地揭示了各变量间的相互关系。本研究区位于黄土高原半干旱地区,在普通天气条件下(晴天和多云天气)太阳辐射与空气水汽压亏缺存在显著的相关关系,特别是在上午2个因子呈现迅速的同步上升,因此,采用指数饱和和曲线函数基本反映了液流通量密度对空气水汽压亏缺的响应特征,并根据方程中的拟合系数可以看出不同时期的特点。

回归曲线显示,随着空气水汽压亏缺的升高,辽东栎液流通量密度通常会迅速达到饱和水平(VPD约为1.5~2.0),显示该树种快速启动了气孔调节机能。同时,不同月份的拟合参数也存在明显差异。以典型干旱期的6月为例,液流通量密度随着空气水汽压亏缺的升高上升极其缓慢,说明树干水力导度较低,蒸腾受到抑制,气孔处于不完全开放状态。该时期液流通量已受到土壤水分的影响。

本试验只分析生长季内各月的液流通量动态特征,因此只选取了有代表性的晴天进行分析。然而要探明该树种单木和群体的耗水量与耗水动态,还需根据边材面积等因素进行尺度扩展,并涵盖包括阴天在内的生长季全部日数。由于影响林分蒸腾耗水动态的因素很多而且具有时空差异,本文仅就优势木在不同时期的液流通量特征做了初步的探索,为深入了解该地区天然辽东栎林与当地环境因子的相互关系奠定了理论基础。

参 考 文 献

- 李海涛,向乐,夏军,等. 2006. 应用热扩散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, 42(10): 31-38.
- 申李华,张志强,刘晨峰,等. 2007. 沙地杨树人工林树干液流特征. 中国水土保持科学, 5(1): 88-92.
- 孙龙,王传宽,杨国亭,等. 2007. 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, 43(11): 8-14.
- 王华,赵平,蔡锡安,等. 2008. 马占相思树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺间的时滞效应. 应用生态学报, 19(2): 225-230.
- 王华田,马履一,孙鹏森. 2002. 油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律的研究. 林业科学, 38(5): 31-37.
- 吴钦孝,杨文治. 1998. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社.
- 于占辉,陈云明,杜盛. 2009a. 黄土高原半干旱区人工林刺槐展叶期树干液流动态分析. 林业科学, 45(4): 53-59.
- 于占辉,陈云明,杜盛. 2009b. 黄土高原半干旱区侧柏树干液流动态. 生态学报, 29(7): 3970-3976.
- 赵平,饶兴权,马玲,等. 2006a. 马占相思树干液流密度和整树蒸腾的个体差异. 生态学报, 26(12): 4050-4058.
- 赵平,饶兴权,马玲,等. 2006b. 马占相思林冠层气孔导度对环境驱动因子的响应. 应用生态学报, 17(7): 1149-1156.
- Campbell G S, Norman J M. 1998. An introduction to environmental biophysics. New York: Springer.
- Du Sheng, Wang Yilong, Kume T, et al. 2011. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. Agricultural and Forest Meteorology, 151(1): 1-10.
- Du Sheng, Yamanaka N, Yamamoto F, et al. 2007. The effect of climate on radial growth of *Quercus liaotungensis* forest trees in Loess Plateau, China. Dendrochronologia, 25(1): 29-36.
- Ewers B E, Mackay D S, Gower S T, et al. 2002. Tree species effects on stand transpiration in northern Wisconsin. Water Resources Research, 38(7): 1103.
- Ewers B E, Mackay D S, Samanta S. 2007. Interannual consistency in canopy stomatal conductance control of leaf water potential across seven tree species. Tree Physiology, 27(1): 11-24.
- Granier A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology, 3(4): 309-319.
- Granier A, Biron P, Breda N, et al. 1996. Transpiration of trees and forest stands: Short and long-term monitoring using sapflow methods. Global Chang Biology, 2(3): 265-274.
- Green S R. 1993. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. Agricultural and Forest Meteorology, 64(3/4): 201-221.
- James S A, Clearwater M J, Meinzer F C, et al. 2002. Heat dissipation sensors of variable length for the measurement of sap flow in trees with deep sapwood. Tree Physiology, 22(4): 277-283.
- Lu Ping, Urban L, Zhao Ping. 2004. Granier's Thermal Dissipation Probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. Acta Botanica Sinica, 46(6): 631-646.
- Otsuki K, Yamanaka N, Du Sheng, et al. 2005. Seasonal changes of forest ecosystem in an artificial forest of *Robinia pseudoacacia* in the loess plateau in China. Journal of Agricultural Meteorology, 60(5): 613-616.
- Smith D M, Allen S J. 1996. Measurement of sap flow in plant stems. Journal of Experimental Botany, 47(12): 1833-1844.
- Tateno R, Tokuchi N, Yamanaka N, et al. 2007. Comparison of litterfall production and leaf litter decomposition between an exotic black plantation and an indigenous oak forest near Yan'an on the Loess Plateau, China. Forest Ecology and Management, 241(1-3): 84-90.
- Wang Yilong, Liu Guobin, Kume T, et al. 2010. Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semiarid region of Loess Plateau, China. Journal of Forest Research, 15(4): 241-251.
- Zhang Heping, Simmonds L P, Morison J I L, et al. 1997. Estimation of transpiration by single trees: comparison of sap flow measurements with a combination equation. Agricultural and Forest Meteorology, 87(2/3): 155-169.

(责任编辑 徐红)