

# 春季侧柏树干边材液流的滞后效应分析<sup>\*</sup>

徐军亮, 章异平

(河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 研究林木耗水规律及其影响机制对干旱半干旱地区林业建设战略规划、林种布局、树种选择、林分结构配置及林地水分管理等具有重要的指导意义。利用热扩散式边材液流测定系统和自动气象站对春季侧柏边材液流速率和太阳辐射、空气温湿度等气象因子进行了为期一年的同步测定。结果表明: 侧柏边材液流和太阳辐射的日变化表现出明显的峰型特征, 空气温湿度的峰型特征相对不明显。侧柏边材液流速率相对于太阳辐射、空气温度和空气湿度存在明显的“滞后”效应, 滞后时间分别为 110 min, -70 min, -60 min。在树干液流的数值模拟中, 考虑液流相对于气象因子的滞后效应可以提高模型的拟合精度, 而且仅用太阳辐射一个变量模拟侧柏边材液流就能达到理想的效果。

**关键词:** 侧柏; 边材液流速率; 气象因子; 滞后效应

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)04-0109-04

## Analysis on Sap Flow Time Lag Effect of *Platycladus orientalis* in Spring

XU Jun-liang, ZHANG Yi-ping

(College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

**Abstract:** Studies on forest water consumption and its affected mechanism are of guiding significance to forestry construction program, forest types' layout, tree species selection, stand structure configuration and stand water management in arid-semiarid areas. The sap flow velocity of *Platycladus orientalis* and meteorological factors such as solar radiation, air temperature and air moisture were synchronously measured with thermal dissipation probe systems and an automatic weather station in spring. The results showed that diurnal changes of sap flow velocity of *Platycladus orientalis* and solar radiation demonstrated significant peak characters, whereas peak characters of air temperature and air moisture were not obvious. The sap flow lag effect existed compared to solar radiation, air temperature and air moisture, and the lag time was 110 min, -70 min and -60 min respectively. In conclusion, with time lag effect considered, model fitting precision would be improved and sap flow velocity of *Platycladus orientalis* could be well simulated only with solar radiation.

**Key words:** *Platycladus orientalis*; sap flow velocity; meteorological factors; time lag effect

林木蒸腾耗水是森林生态系统中土壤-植物-大气连续体水分循环中最重要的一个环节。在干旱半干旱地区, 根据林木的耗水特性以及林地的水分承载力进行造林树种的选择、林分结构的优化以及林地水分管理等, 对于保障林区乃至区域的生态安全具有重大意义。林木耗水的多少除与植物生长状况有关外, 还受太阳辐射、空气温湿度、土壤含水量、降雨等环境因子的影响, 环境变化与树干液流的关系是当前植物生理生态的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。

有关学者发现树冠蒸腾和树干液流间存在着几

分钟到几个小时不等的时滞效应<sup>[3-4]</sup>, 但液流相对于微环境因子滞后效应的研究较少涉及<sup>[5]</sup>。在国内迄今所见的报道中, 除个别报道之外<sup>[6-7]</sup>, 环境因子与边材液流的相关性多是同步数据的即时分析, 忽略了这种滞后效应, 很难揭示两者更深层次上的关系, 以致在进行林木耗水影响因素的准确评价时产生了一些影响。运用目前测定林木耗水最稳定的热扩散法<sup>[8]</sup>对春季侧柏(*Platycladus orientalis*) 树干边材液流进行了测定, 在分析边材液流日变化的基础上, 探讨边材液流相对于环境因子的滞后效应, 并对考

\* 收稿日期: 2008-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(30371147); 河南科技大学人才科学研究基金

作者简介: 徐军亮(1979-), 男, 山西人, 博士, 讲师, 研究方向: 树木水分生理生态。E-mail: xj\_l\_790626@126.com

考虑滞后效应前后两者间的关系进行了模拟和评价,期望为准确评价侧柏林分群体蒸腾耗水提供一些理论参考。

### 1 试验地概况

在北京西山林场(116°25' E, 39°54' N)的侧柏纯林内开展研究。该地区属温带大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润。年平均气温 12.8℃,年均有效积温 4 500℃以上,年平均降水量在 600 mm 左右,其中 7-9 月三个月降水量占全年的 70% 以上。年平均蒸发量约为 1 800~ 2 000 mm。试验林地 48 a 生的人工林,位于低山,海拔约 170 m,坡度 16°。土壤以砂页岩坡积物上发育而成的山地粗骨褐土和山地淋溶褐土为主,土层厚度在 80 cm 左右,壤土或沙壤土,通气透水性较好。现有林分多为 20 世纪五六十年代营造的人工林,有侧柏、油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、元宝枫(*Acer truncatum*)、黄栌(*Cotinus coggygria* var. *cinerea*)等树种,林相整齐,生长良好。林下灌木阴坡以三娅绣线菊(*Spiraea trilobata*)、大花溲疏(*Deutzia grandiflora*)、胡枝子

(*Lespedeza bicolor*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)和蚂蚱腿子(*Myrica dioica*)等为主,阳坡以荆条(*Vitex* var. *heterophylla*)和酸枣(*Zizyphus spinosus*)为主。

### 2 研究方法

在林分调查的基础上,于 2005 年 2 月在侧柏纯林内选择有代表性的生长良好的林分平均木作为被测单株( $D_{1.3} = 15.6$  cm,  $H = 9.7$  m),在树干基部 1.3 m 左右(要求测定部位 ±50 cm 内无节疤或损伤)插入热扩散式边材液流探针(TDP-30)测定树木的边材液流速率。探针的安装及测定原理详见文献[9-10]。将 TDP 馈线与数据采集器连接,用以自动采集和记录液流数据。另外,利用自动气象站)同步监测林冠上 3 m 处的太阳辐射强度、空气温度和空气湿度等环境因子。数据采集间隔期为 10 min。根据 Delta-T 公司提供的数据处理软件计算树干边材液流速率,由于晴天的数据更有代表性<sup>[8,11]</sup>,因此选择 3 月和 4 月的连续几个晴天的数据分析侧柏树干边材液流的滞后效应。

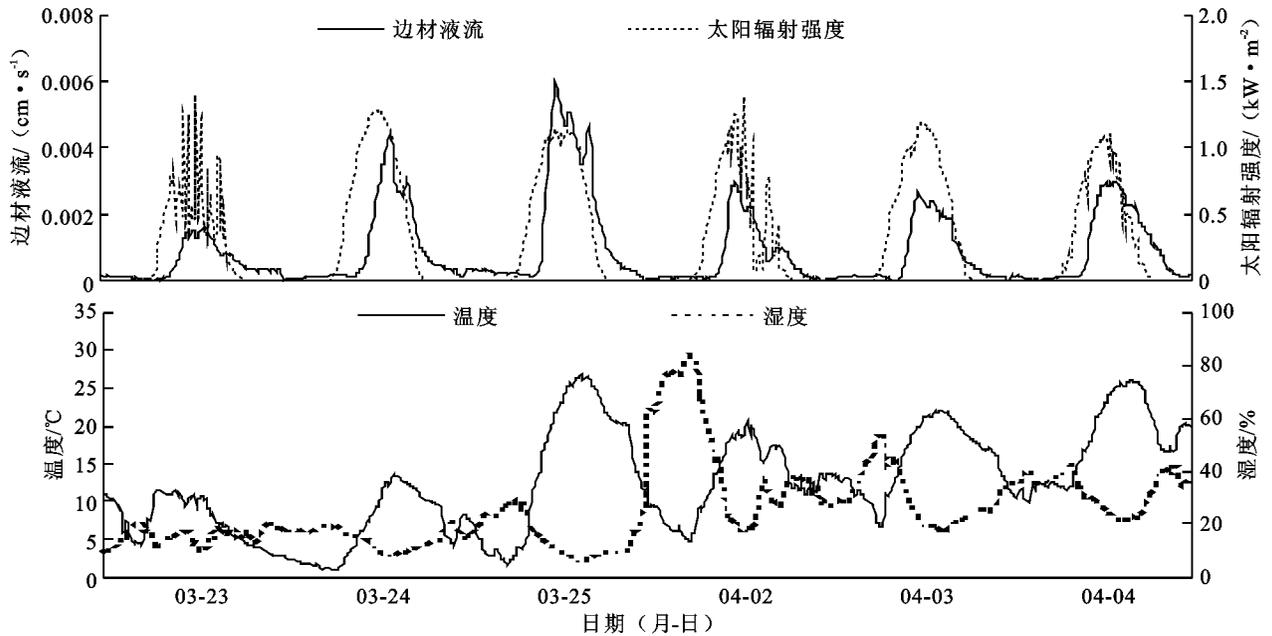


图 1 边材液流和主要环境因子的日变化

### 3 结果与分析

#### 3.1 边材液流速率的日变化

图 1 显示了春季侧柏边材液流与主要气象因子的日变化。可以看出,在天气晴朗的春季,随着太阳的升起,太阳辐射强度多于 6:30 左右开始明显增强,侧柏的边材液流于 9:30 左右开始启动,滞后于太阳辐射 2~3 h;太阳辐射强度于 11:30 左右达到峰值,液流峰值的到达时间在 12:00-13:00 之间,

大约滞后 1~1.5 h;太阳辐射强度从 18:10 左右开始明显减弱,侧柏液流于 20:00-21:00 明显减弱。太阳辐射和边材液流的日变化过程呈现典型的单峰曲线,升降过程平缓,基本无高峰波动,夜间液流活动特征不明显。空气温度和湿度的日变化过程基本同步,由于受到多种环境因素的影响,峰型特征相对不明显,于 7:30 左右开始明显上升(下降),于 14:00-15:00 点达到峰值(谷值),于 21:00-23:00 之间变化速度趋于平缓。

### 3.2 边材液流速率的模拟

通过以上的分析可以看出, 液流速率相对于环境因子的变化存在明显的滞后。因此要准确的模拟液流速率的变化, 必须考虑滞后效应的影响。以 3 月 24 日、3 月 25 日、4 月 3 日、4 月 4 日的数据为基础, 通过对环境因子峰值的位移, 分析环境因子与边材液流速率间的滞后效应(表 1)。可以看出, 太阳辐射与滞后 110 min 的侧柏树干液流间的相关系数达到了最大值 0.881, 比不考虑滞后效应时的相关系数值 0.724 要大很多。同样, 边材液流相对于空气温度和空气湿度的变化分别提前 70 min 和 60 min。从相关系数的绝对值大小也可以看出, 环境因子对树干液流活动的作用大小依次为: 太阳辐射 > 空气温度 > 空气湿度。

以考虑滞后效应前后的边材液流速率( $y$ )为因变量, 太阳辐射强度( $x_1$ )、空气温度( $x_2$ )、空气湿度( $x_3$ )为自变量, 对侧柏边材液流速率进行逐步回归分析(表 2)。结果表明: 虽然拟合方程的决定系数均达到了极显著水平, 但考虑滞后效应的相关性更高, 当自变量个数从 1 增加到 3 时, 决定系数分别提高了 47.9%、21.3% 和 8.9%, 由此说明考虑滞后效应模型的拟合效果更好。同时, 当入选变量由单一的太阳辐射提高到 3 个环境因子时, 不考虑滞后效应的方程的决定系数提高了 39.5%, 而考虑滞后效应的方程的决定系数仅提高了 2.8%, 说明在不考虑滞后效应的情况下, 模拟侧柏边材液流时必须考虑环境因子的综合作用, 而在考虑滞后效应的情

况下, 仅用太阳辐射一个变量模拟侧柏边材液流就能达到很好的效果。

表 1 边材液流和环境因子间滞后效应的相关分析

滞后时间/min	太阳辐射强度	空气温度	空气湿度
- 90		0.634	-
- 80		0.637	- 0.542
- 70		0.637	- 0.543
- 60		0.637	- 0.544
- 50		0.635	- 0.543
- 40		0.632	- 0.542
- 30		0.627	- 0.540
- 20		0.621	- 0.536
- 10		0.614	- 0.532
0	0.724	0.606	- 0.527
10	0.750		
20	0.775		
30	0.796		
40	0.816		
50	0.833		
60	0.848		
70	0.860		
80	0.870		
90	0.876		
100	0.880		
110	0.881		
120	0.879		

表 2 边材液流和环境因子间的线性拟合

滞后效应	自变量	$R^2$	$n$	Sig.	拟合方程
不考虑	$x_1$	0.524	575	0.000	$y = 0.000279 + 0.002233x_1$
	$x_1, x_2$	0.647	575	0.000	$y = -0.00052 + 0.001773x_1 + 0.00007x_2$
	$x_1, x_2, x_3$	0.732	575	0.000	$y = 0.00048 + 0.00141x_1 + 0.000072x_2 - 0.000039x_3$
考虑	$x_1$	0.775	557	0.000	$y = 0.000116 + 0.002718x_1$
	$x_1, x_2$	0.785	557	0.000	$y = -0.00015 + 0.00246x_1 + 0.000025x_2$
	$x_1, x_2, x_3$	0.797	557	0.000	$y = 0.000236 + 0.002129x_1 + 0.000034x_2 - 0.000017x_3$

注:  $x_1$ ——太阳辐射强度( $\text{kW}/\text{m}^2$ );  $x_2$ ——空气温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $x_3$ ——空气湿度(%)

由太阳辐射与液流速率的回归分析图(图 2)进一步分析可知, 考虑滞后效应的数据点更趋集中, 模型的拟合效果更好, 说明在树干液流的数值模拟中, 考虑液流相对于气象因子的滞后效应可以提高模型的拟合精度。

分别将考虑滞后效应前后的太阳辐射原始数据代入一元回归方程, 计算出液流速率的拟合值, 3 月 24 日和 3 月 25 日的整点时刻观测值与拟合值的相对误差如表 3 所示。由表 3 可知, 液流速率的 18 组

相对误差中, 只有 3 组的相对误差为考虑滞后大于不考虑滞后, 其余 15 组的相对误差值均表现为考虑滞后小于不考虑滞后, 这也进一步证明了考虑液流滞后效应能进一步提高树干液流拟合值的准确性。

## 4 结论

在天气晴朗的春季, 侧柏边材液流和太阳辐射的日变化表现出明显的峰型特征, 空气温湿度峰型特征相对不明显。侧柏边材液流速率相对于太阳辐射、空气温度和空气湿度存在明显的滞后效应,

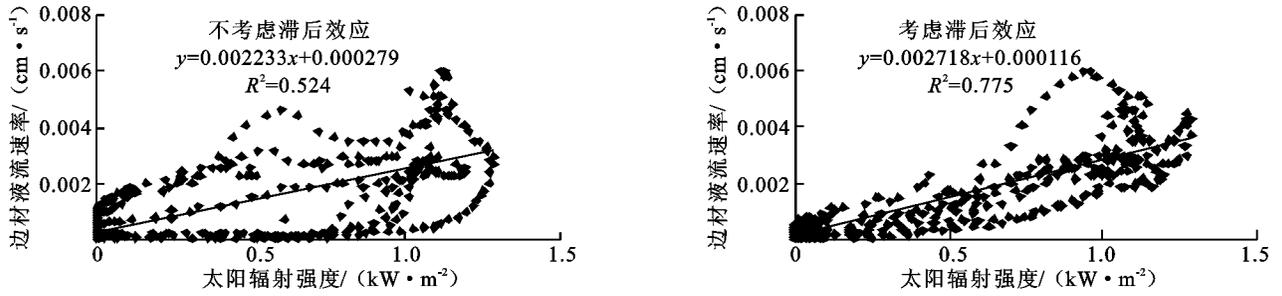


图 2 太阳辐射强度与液流速率的线性拟合

表 3 液流速率拟合精度比较

日期	相对误差	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
3月24日	不考虑滞后	9.09	2.71	0.58	-0.07	-0.37	-0.19	-0.41	-0.56	-0.64
	考虑滞后	0.62	0.04	-0.16	0.19	0.20	0.02	0.55	0.26	-0.53
3月25日	不考虑滞后	2.18	-0.34	-0.54	-0.42	-0.45	-0.32	-0.61	-0.60	-0.74
	考虑滞后	-0.56	-0.38	-0.38	-0.21	-0.18	-0.11	0.15	0.11	-0.57

其中相对于太阳辐射,液流速率的滞后时间为 110 min;相对于空气温度和空气湿度,液流速率的变化分别提前 70 min 和 60 min。液流启动和停止的过程主要受日出和日落时间的影响,由于叶片、树枝和树干之间存在水容调节<sup>[12]</sup>,水分从树干传输到叶片需要一段时间,从而表现为液流启动和停止均滞后于太阳辐射和空气温湿度,而液流活动的过程是否滞后,主要是根据峰型曲线的日周期格局来判断,所以液流速率的变化较空气温湿度有所提前,这与赵文飞等<sup>[7]</sup>对春季麻栎液流滞后效应的研究结果是一致的。在不考虑滞后效应的情况下,模拟侧柏边材液流时必须综合考虑多个环境因子的综合作用,而在考虑滞后效应的情况下,仅用太阳辐射一个变量模拟侧柏边材液流就能达到很好的效果,由此证明太阳辐射是影响树干液流活动的最为重要的因子,太阳辐射通过改变大气中的水热状况(空气温湿度),间接表现为空气温湿度对液流的作用。该文仅仅根据液流数据与气象因子间的相关系数来确定滞后效应,缺乏从植物生理方面的深度探究,有关树干液流滞后效应的机制有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 马玲,赵平,饶兴权,等.马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系[J].生态学报,2005,25(9):2145-2151.  
 [2] 高照全,邹养军,王小伟,等.植物水分运转影响因子的研究进展[J].干旱地区农业研究,2004,22(2):200-204.  
 [3] Schulze E D, Cermak J, Matyssek R, et al. Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of *Larix* and *Picea* trees - a comparison of xy-

lem flow, porometer and cuvette measurements [J]. *Oecologia*, 1985, 66: 475-483.  
 [4] Loustau D, Berbigier P, Roumagnac P, et al. Transpiration of a 64 year old maritime pine stand in Portugal I: Seasonal course of water flux through maritime pine[J]. *Oecologia*, 1996, 107: 33-42.  
 [5] Ford C R, Carol E G, Robert J M, et al. Canopy transpiration using time series analysis: A case study illustrating the effect of soil moisture deficit on *Pinus taeda* [J]. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130: 163-175.  
 [6] 谢恒星,张振华,杨润亚.龙爪槐树干液流相对于气象因子的滞后效应分析[J].林业科学,2007,43(5):106-110.  
 [7] 赵文飞,王华田,亓立云,等.春季麻栎树干边材木质部液流垂直变化及其滞后效应[J].植物生态学报,2007,31(2):320-325.  
 [8] 孟平,张劲松,王鹤松,等.苹果树蒸腾规律及其与冠层微气象要素的关系[J].生态学报,2005,25(5):1075-1081.  
 [9] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiology*, 1987, 3: 309-320.  
 [10] 王华田,马履一.利用热扩散式液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J].植物生态学报,2002,26(6):661-667.  
 [11] 曹文强,韩海荣,马钦彦,等.山西太岳山辽东栎夏季树干液流量研究[J].林业科学,2004,40(2):174-177.  
 [12] Bariac T, Rambal S, Jusserand C, et al. Evaluating water fluxes of field-grown alfalfa from diurnal observations of natural isotope concentrations, energy budget and ecophysiological parameters[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, 48: 263-283.