

DOI: 10.5846/stxb201409171846

李广德, 富丰珍, 席本野, 王 烨, 贾黎明. 基于热扩散技术的三倍体毛白杨单木及林分蒸腾耗水研究. 生态学报, 2016, 36(10): - .

Li G D, Fu F Z, Xi B Y, Wang Y, Jia L M. Study of transpiration and water consumption of triploid *Populus tomentosa* at individual tree and stand scales by using thermal dissipation technology. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): - .

基于热扩散技术的三倍体毛白杨单木及林分蒸腾耗水研究

李广德^{1,2}, 富丰珍^{2,3}, 席本野², 王 烨², 贾黎明^{2,*}

1 国家开放大学农林医药教学部, 北京 100039

2 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083

3 黑龙江省大庆市林业局, 大庆 163002

摘要: 定量分析单木及林分的蒸腾耗水特征, 是林木水分管理的关键环节。采用热扩散式边材液流检测技术, 结合自动气象站, 对三倍体毛白杨树干边材液流及环境因子进行了连续 2 年的动态观测。结果表明: 1) 单株尺度上, 三倍体毛白杨边材液流速率日变化在晴天表现为“单峰型”, 关键影响因子为水汽压亏缺 (VPD) 和太阳辐射 (Q_s), 日平均液流速率在 4—10 月分别为 0.65×10^{-3} 、 2.12×10^{-3} 、 2.09×10^{-3} 、 1.78×10^{-3} 、 1.84×10^{-3} 、 1.76×10^{-3} 、 1.04×10^{-3} cm/s; 2) 林分尺度上, 三倍体毛白杨在 2008、2009 年 (栽植第 4 和第 5 年) 的蒸腾耗水量分别为 339.52 和 410.62 mm, 主要影响因素为气孔导度 (G_c)、相对湿度 (RH), 以及 VPD; 3) 多元线性回归模型可以较好的模拟三倍体毛白杨边材液流速率对环境因子的响应特征 ($P < 0.01$, 2008 年), 模型预测值较实测值偏大 6.39% (2009 年), 二者极显著线性相关 ($R^2 = 0.910$, $\text{Sig.} = 0.00054$, $n = 1008$)。

关键词: 三倍体毛白杨; 蒸腾耗水; 边材液流; 热扩散边材液流探针; 环境因子

Study of transpiration and water consumption of triploid *Populus tomentosa* at individual tree and stand scales by using thermal dissipation technology

LI Guangde^{1,2}, FU Fengzhen^{2,3}, XI Benye², WANG Ye², JIA Liming^{2,*}

1 Faculty of Agroforestry & Medicine, the Open University of China, Beijing 100039, China

2 The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Daqing Forestry Bureau, Daqing 163002, China

Abstract: Quantitative analysis of the transpiration and water consumption characteristics at the individual tree and stand scales of forests is critical for forest water management. Developing fast-growing and high-yielding poplar plantations has been identified as a major solution to the shortage of wood fibers in China, because of the strong demand for fibrous products for the large population and limited land resources. The triploid *Populus tomentosa* has been one of the most widely planted species in recent years due to its superior growth vigor and high timber yield. Accurately measuring the transpiration and water consumption of trees is essential for regulating water use in triploid *P. tomentosa* plantations. In this study, thermal dissipation probe (TDP) monitoring technology was combined with an automatic weather station to investigate the transpiration and water consumption of triploid *P. tomentosa* at the individual tree and stand scales over two years. The response of sap flow velocity (V_{sp}) in *P. tomentosa* trees to environmental factors, including solar radiation (Q_s), air temperature (T_a), relative humidity (RH), wind speed (WS), soil water content (SWC), soil temperature (T_s), and

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项经费重大项目 (201004004); 北京林业大学“985”优势学科创新平台开放基金 (000-1108003)

收稿日期: 2014-09-17; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jlm@bjfu.edu.cn

vapor pressure deficit (VPD), were analyzed using a multiple linear regression model. The results showed that (1) the daily variation in sap flow velocity in individual *P. tomentosa* trees was significantly affected by the Q_s and VPD. Diurnal variation in V_{sp} for individual trees had a unimodal pattern on sunny days. The flow rate rose from nearly zero at sunrise to a maximum at around 13:00 local time and decreased gradually to nearly zero by midnight. In the growing season (from April to October), the average V_{sp} for each month was 0.65×10^{-3} , 2.12×10^{-3} , 2.09×10^{-3} , 1.78×10^{-3} , 1.84×10^{-3} , 1.76×10^{-3} , and 1.04×10^{-3} cm/s, respectively. The results of the correlation analysis showed that the V_{sp} correlated significantly ($\alpha = 0.01$) with the Q_s , T_a , WS , RH , SWC , T_s , and VPD. With the exception of RH , all correlations were positive. The VPD and Q_s had stronger effects on V_{sp} than SWC at a daily variation scale. (2) The water consumption of the *P. tomentosa* stand was 339.52 and 410.62 mm during the growing season in the fourth and fifth years after planting (2008 and 2009), respectively. The water consumption at the stand level was significantly affected by stomatal conductance (G_c), RH , and VPD. The variation in average daily water consumption followed a “low-high-low” unimodal pattern in the growing season and high water consumption values were recorded in August 2008 and June 2009. The main factors that drove the seasonal changes in water consumption in the stand were G_s , RH , and VPD. Lastly, (3) the regression model, with the measured environmental factors as independent variables, explained the variation in V_{sp} well during the growing season in 2008 ($P < 0.01$). When the constructed model was used to predict the V_{sp} in the growing season in 2009, the simulated values correlated well with the measured values ($R^2 = 0.910$) but was 6.39% higher than the measured values on average.

Key Words: triploid *Populus tomentosa*; water consumption; sap flow; TDP (thermal dissipation probe); environmental factors

叶片是树木蒸腾耗水的主要器官,树干边材液流量的 99.8% 用于叶片蒸腾^[1]。热扩散方法通过测量木质部上升液流从而间接确定树冠蒸腾耗水量,无论是单木还是林分,都可以由液流测定值较准确地计算蒸腾量^[2]。我国杨树林总面积已超过 1000 万 hm^2 ,其中人工林面积已达 700 多万 hm^2 ,占全国人工乔木林总面积近 1/5,栽培面积世界第一^[3]。热扩散技术已被广泛应用于我国杨树人工林蒸腾耗水的研究中。刘文国等研究了‘中林 46 杨’4—10 月单木树干边材液流速率及影响因素,以及通过边材液流速率与边材面积确定的林分蒸腾耗水量^[4]。桑玉强等研究了毛乌素沙地 21 年生新疆杨防护林带 4—9 月的单木蒸腾耗水量及其与环境因子的相关性^[5]。孙迪等分析了欧美 64 杨人工林-烟草复合系统中杨树液流速率与气象因子之间的时滞效应^[6]。李广德等构建了三倍体毛白杨不同方位树干边材液流的回归方程,为准确计算其蒸腾耗水量奠定了基础^[7]。杨爱国等通过对 20 年生不同密度“白城杨-2”蒸腾耗水量的研究得出 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ — $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的合理栽植密度^[8]。李少宁等对沙地 107 欧美杨在不同天气条件、季节,以及夜间树干液流特征进行了研究,并给出了灌溉建议^[9]。党宏忠等对生长季新疆杨冠基部及杆基部的液流密度差异及其与大气蒸发潜力的关系进行了探讨^[10]。张俊等研究了干旱荒漠区银白杨人工林单木夏季树干液流动态及其与环境因子的相关性^[11]。

三倍体毛白杨是一种速生、优质、高效的短轮伐期纸浆材树种,是制浆造纸的极好原料,在我国北方速生纸浆林建设中发挥着重要作用^[12]。本试验采用热扩散式边材液流测定技术,结合全自动气象站,连续 2 年对其人工林边材液流及主要环境因子定位监测,在较大时间尺度上揭示其单木及林分的蒸腾耗水性,结合同期降雨量研究林分水分收支,为合理灌溉制度的建立提供理论及数据支撑。

1 试验地概况

试验地位于山东省高唐县($36^{\circ}58'N$, $116^{\circ}14'E$),海拔平均 27 m。暖温带半干旱季风区域大陆性气候,具有显著的季节变化和季风气候特性,光照充足,热量丰富。春季,降水少,风大,气候干燥,降水量占全年降水量的 13.7%;夏季,温度高,湿度大,降水多,降水量占全年降水量的 66.5%;秋季,气温急降,天气凉爽,降水量少,降水量占全年降水量的 17.1%;冬季,低温寒冷,雨雪稀少,降水量只占全年降水量的 2.7%。年降水量

306.0—975.9 mm,年平均蒸发量 1880 mm,年平均温度 12.0—14.1 ℃,极端最高气温达 41.2 ℃,极端最低气温达-20.8 ℃。年日照总时数 4433.5 h,无霜期 204 d。

试验林地为潮土,土壤容重平均 1.51 g/cm³,平均有机质含量 0.39%,全氮 0.131%,全 P 0.129%,K 0.612%,速效氮 14.486 mg/kg,速效 P 1.752 mg/kg,速效 K 49.914 mg/kg。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为三倍体毛白杨((*P. tomentosa*×*P. bolleana*)×*P. tomentosa*)。1 年生根萌苗于 2005 年春季造林,带状配置,南北行向,密度 1 m×2 m+6 m,试验林约 3.4 hm²。

2.2 树干边材液流测定及液流量计算

2.2.1 边材液流测定

在林地中心位置,选择生长发育良好、无病虫害的三倍体毛白杨 5 株作为样本,于南向(1.30±0.10) m 处安装热扩散式边材液流测定探针(TDP-30, Dynamax Inc., Houston, USA)。每 10 s 采集 1 次数据,每 10 min 计算平均值并记录。样本基本参数见下表(表 1)。

表 1 测定样树主要参数
Table 1 Major parameters of sample trees

编号 Number	胸径/cm DBH	树高/m Height	冠幅 Crown diameter/m		活枝下高/m Under-branch height	胸径处边材面积/cm ² Sapwood area at breast height
			东西 EW	南北 NS		
1	10.50	12.20	4.90	2.50	1.80	82.86
2	9.20	11.90	5.50	2.90	2.60	64.20
3	10.30	12.60	4.20	3.40	3.00	79.84
4	9.90	12.80	4.30	2.90	2.10	73.96
5	10.20	13.20	4.50	2.70	2.30	78.35

数据采集后,利用 DYNAMAX 公司提供的分析软件对原始数据处理与计算。液流速率计算公式如下:

$$V_{sp} = 0.0119 \times K^{1.231} \tag{1}$$

$$K = \frac{dT_{TM} - dT}{dT} \tag{2}$$

其中, V_{sp} (Sap flow velocity)为树干边材液流速率(cm/s), dT_{TM} 为 24 h 内上下探针的最大温差值(℃), dT 为某时刻瞬时温差(℃)。

2.2.2 胸径处边材面积

树木边材是树木从根部吸收的水分向叶片运输的通道,边材面积是利用树干液流速率计算单木及林分蒸腾需要解决的关键参数和技术问题^[13]。本研究利用边材面积这一纯量实现蒸腾耗水从单木到林分的尺度扩展。

通过实测 12 棵解析木以及试验期间收集的风倒和砍伐的三倍体毛白杨胸径(DBH, Diameter at Breast Height)及边材面积(A_s , Sapwood Area)共 47 组数据建立回归方程: $A_s = 0.884 \times DBH^{1.931}$ ($R^2 = 0.9944, n = 47$),由此计算样树及林分胸径处边材面积。

2.2.3 林分蒸腾耗水量的计算

林分蒸腾耗水量 E (Stand Evapotranspiration, mm/d)由以下公式计算:

$$E = \frac{3600 \times 24 \times E_s}{A_s \times 10^3} \tag{3}$$

$$E_s = \sum_{i=1}^n E_{S_i} = \sum_{i=1}^5 \bar{V}_{spi} \cdot A_{S_i} \tag{4}$$

其中, A_s 为林分胸径处边材总面积; E_s ($\text{g H}_2\text{O/s}$) 为林分蒸腾耗水速率, 通过不同径阶耗水速率得到; $\bar{V}_{spi}$ 为第 i 径级的东、南、西、北 4 个方位的平均液流速率, 南方位 V_{sp} 由 TDP-30 实测, 东、西、北 3 方位由文献[7]中 4 个方位液流速率间回归方程计算所得; A_{si} 为第 i 径级树木胸径边材面积总和。

2.3 环境因子监测

2.3.1 气象因子

利用距试验地约 250 m 的全自动气象站 (Delta-T, Cambridge, England) 测定, 指标有太阳辐射 (Q_s , Effective Solar Radiation, $\times 10^{-3} \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、空气温度 (T_a , Air Temperature, $^{\circ}\text{C}$)、空气相对湿度 (RH , Air Relative Humidity, %)、风速 (WS , Wind Speed, m/s)、降雨量 (R , Rainfall, mm)、土壤温度 (T_s , Soil Temperature, $^{\circ}\text{C}$) 等, 与树干边材液流同步。

水蒸气压亏缺 (VPD, Vapor Pressure Deficit) 通过下式计算:

$$VPD = ae^{(bT/(T+C))} (1 - RH) \quad (5)$$

其中, T 为空气温度 ($^{\circ}\text{C}$), RH 为大气相对湿度, a, b, c 为常数, 分别为 0.61121 Kpa, 17.502, 240.97 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.3.2 土壤水分含量

土壤含水量 (SWC, Soil Water Content) 采用地理土壤水分传感器 (ATP220, 体积%, 北京时域通科技有限公司, 北京, 中国) 测定, 传感器埋在装有 TDP 探针的样树下, 深度分别为 10 cm、30 cm、45 cm 和 70 cm, 与 TDP 数采器相连, 数据采集间隔为 30 min。

2.4 叶面积指数及冠层气孔导度测定

叶面积指数 (LAI , Leaf Area Index) 由植物冠层图像分析仪 (CI-110, CID, USA) 测定, 于生长季每月上中下旬各选 1—2 天晴朗无风的天气, 在 17:00—18:00, 林分内不同位置取 20 个测定点进行测定后平均。

冠层气孔导度 (G_c) 由叶片气孔导度 ($Cond$) 代替, $Cond$ 由便携式光合仪测定 (Li-6400, USA), 日周期测定从 6:00 开始, 18:00 结束, 时间步长为 2 h, 测定日期分别为 2008 年 5 月 26 日、7 月 12 日、8 月 24 日、10 月 24 日, 以及 2009 年 5 月 17 日、6 月 30 日、8 月 27 日、9 月 26 日、10 月 23 日。

2.5 数据处理与分析

数据分析和处理利用 Dynamax 公司提供的数据分析及 SPSS13.0 统计软件。

树干边材液流速率的差异利用单因素方差分析进行比较。Spearman 分析评价树干边材液流、蒸腾耗水量与环境因子的相关性。边材液流与环境因子的多元线性模型利用 SPSS 软件回归分析中“Enter”法建立。

通径分析是研究变量间相互关系、自变量对因变量作用方式、程度的多元统计分析技术。通径系数是介于回归系数与相关系数之间的一个统计量, 可表示相关变量间的因果关系, 是变量标准化、没有单位的偏回归系数, 是自变量与因变量之间带有方向的相关系数^[14]。直接通径系数在对因变量正态性检验后通过 SPSS “Analyze-Regression-Linear” 中 Coefficients 获得。

3 结果与分析

3.1 三倍体毛白杨单木树干边材液流特性

3.1.1 生长季三倍体毛白杨树干边材液流速率日变化

生长季晴天三倍体毛白杨树干边材液流速率 (V_{sp}) 日变化呈典型的“单峰型” (图 1, a), 表 2 为其特征值。液流启动时间随着季节推移呈“晚-早-晚”变化, 6 月启动最早, 生长季末启动最晚; 到达峰值时刻随季节变化呈“早-晚-早”的格局。就峰值而言, 4 月显著小于其他各月, 可能与其在 4 月叶片未完全发育成熟有关, 但其在高位运行时间相对较长, 表明此时的水分及环境条件整体来说有利于三倍体毛白杨的蒸腾。生长季末的 10 月峰值提前, 值较小, 高位运行时间最短, 除了与此时较低的太阳辐射有关外 (图 1, b), 还与叶片大量衰落有关: 低的太阳辐射导致能量减少, 温度降低, 叶片蒸腾速率减小; 叶片衰落使整树叶面积减小, 群体蒸腾速率降低, 由此导致 V_{sp} 的降低。

三倍体毛白杨日平均 V_{sp} 随季节变化呈现出“低-高-低”的单峰型趋势(表 2),5、6 月最大,秋季次之,早春最小。

表 2 不同季节三倍体毛白杨树干边材液流日变化特征值/ (cm/s)
Table 2 Sap flow velocity (V_{sp}) characteristics of triploid *P. tomentosa* at different months in 2009

月份 Month	启动时间/h Start time	到达峰值时间/h Peak time	峰值 Peak V_{sp} value	日平均液流速率 Average daily V_{sp} value
4	06:40	12:40	0.00151±0.00013b	0.00065±0.00007b
5	06:00	12:50	0.00562±0.00056a	0.00212±0.00032a
6	05:50	13:40	0.00530±0.00043a	0.00209±0.00007a
7	06:00	13:40	0.00460±0.00066a	0.00178±0.00016a
8	06:20	13:30	0.00510±0.00055a	0.00184±0.00024a
9	07:20	13:10	0.00522±0.00092a	0.00176±0.00055a
10	08:30	12:00	0.00403±0.00046a	0.00104±0.00018ab

不同字母表示在 0.05 水平上差异显著(2-tailed)

3.1.2 树干边材液流速率日变化与环境因子的相关性

从主要环境因子日变化图(图 1b—g)及 V_{sp} 与主要环境因子相关性分析表(表 3)可以看出, V_{sp} 日变化与 Q_s 、 T_a 、 WS 、 SWC 、 T_s 、 VPD 等环境因子呈极显著正相关;与 RH 极显著负相关。通过直接通径系数可以发现, VPD 和 Q_s 对单木树干边材液流的影响最大, SWC 最小。可见,在整个生长季,影响三倍体毛白杨单木 V_{sp} 日变化的关键因子是 VPD 和 Q_s ,土壤水分状况在以天为单元的时间尺度上对 V_{sp} 的影响微乎其微。

表 3 三倍体毛白杨单木树干边材液流速率与环境因子的相关系数(r)及直接通径系数(DPC)
Table 3 The correlation and direct path coefficients between V_{sp} and main environmental factors in 2009

系数类型 Coefficients types	太阳辐射 Solar radiation	空气温度 Air temperature	空气相对湿度 Relative humidity	风速 Wind speed	土壤含水量 Soil water content	土壤温度 Soil temperature	水蒸气压亏缺 Vapor pressure deficit
相关系数 Correlation coefficients	0.876 **	0.675 **	-0.584 **	0.472 **	0.104 **	0.418 **	0.801 **
直接通径系数 Direct path coefficients	0.548	0.147	0.186	-0.186	—	-0.306	0.976

* 表示在 0.05 水平上相关关系显著, ** 表示在 0.01 水平上相关关系显著(2-tailed)

3.2 三倍体毛白杨林分蒸腾耗水性

3.2.1 林分蒸腾耗水量随季节变化

生长季三倍体毛白杨林分蒸腾耗水量如图 2 所示。结合降雨量,得到生长季三倍体毛白杨林分水分收支状况(表 4)。与日均液流速率类似,三倍体毛白杨林分蒸腾耗水量随季节推移也呈“低-高-低”的单峰型变化。

表 4 生长季各月三倍体毛白杨平均蒸腾耗水量、降雨量及其占生长季总量比例

Table 4 Monthly average water consumption (E) of triploid *P. tomentosa* and rainfall(R) and their ratio in growth seasons in 2008 and 2009

年份 Year	月份 Month	4	5	6	7	8	9	10	合计 Total
2008	耗水量 E /mm	—	57.92	63.83	61.10	65.99	56.22	34.46	339.52
	比例 /%	—	/17.34	/19.11	/18.29	/19.76	/16.83	/10.32	
	降雨量 R /mm	—	24.70/6.93	40.40/11.33	145.30/40.75	81.20/22.77	43.00/12.06	22.00/6.17	356.60
2009	耗水量 E /mm	21.83/5.32	57.06/13.90	73.18/17.82	70.92/17.27	72.04/17.54	67.78/16.51	47.82/11.65	410.62
	降雨量 R /mm	48.20/7.53	79.20/12.37	135.42/21.14	168.28/26.27	121.60/18.99	87.80/13.71	0.00	640.51

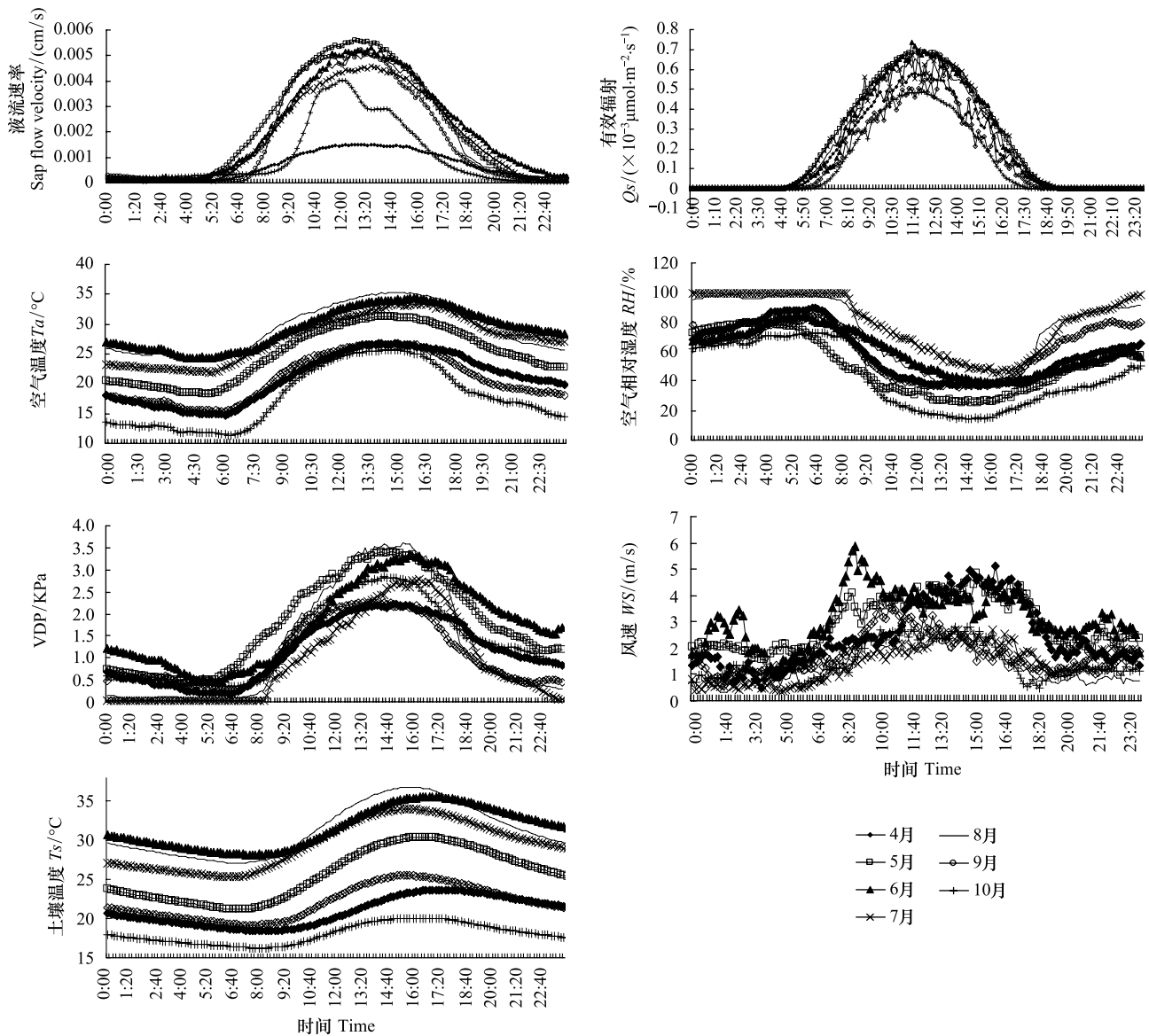


图1 生长季晴天三倍体毛白杨树干边材液流及主要环境因子日变化图

Fig.1 Diurnal variation of triploid *P. tomentosa* V_{sp} and main environmental factors in sunny days from April to October, 2009

整体来看,两年的降雨量都大于同期的林木蒸腾耗水量。但就降雨分布而言,主要集中在6、7、8这3个月,占70%以上,而这几个月的蒸腾耗水量占55%左右,因此,林分季节性供水不足问题依然存在。

3.2.2 林分蒸腾耗水季节变化调控机制

表5是根据2008年和2009年2个生长季三倍体毛白杨各月晴天日平均耗水量 E 与其对应的冠层气孔导度、叶面积指数、以及有效辐射等环境因子的相关系数及直接通径系数。可以看出,与 V_{sp} 相关性不同,其 E 季节变化与 G_c 、 LAI 、 Q_s 、 T_a 、 RH 、 SWC 及 T_s 、 VPD 等都呈现出正相关性,而与 WS 负相关。从直接通径系数来看,影响和决定三倍体毛白杨林分蒸腾耗水量季节变化的主要因素为 G_c 、 RH 、 VPD 。

3.3 三倍体毛白杨蒸腾耗水模型的构建与检验

选择2008年4月的3天,5—10月每月6天晴天 V_{sp} 及相应环境因子数据建立多元线性模型(表6),统计学意义显著($P < 0.01$),且判定系数都大于0.9。将2009年同期或相邻日期的环境因子数据代入,得到树干边材液流预测值(表7)。

表 5 三倍体毛白杨林分蒸腾耗水量与 G_c 、 LAI 及主要环境因子的相关系数 (r) 及直接通径系数 (DPC)

Table 5 The correlation and direct path coefficients between E of triploid *P. tomentosa* and G_c , LAI , and main environmental factors in 2008 and 2009

系数类型 Coefficients types	气孔导度 Stomatal conductance	叶面积 指数 Leaf area index	太阳辐射 Solar radiation	空气温度 Air temperature	空气相 对湿度 Relative humidity	风速 Wind speed	土壤 含水量 Soil water content	土壤温度 Soil temperature	水蒸气 压亏缺 Vapor pressure deficit
相关系数 Correlation coefficients	0.897 **	0.518 *	0.392	0.658 *	0.472	-0.167	0.620 *	0.714 *	0.111
直接通径系数 Direct path coefficients	1.682	0.154	—	—	-1.239	-0.203	0.045	—	-0.726

表 6 2008 年生长季各月份边材液流速率与主要环境因子回归模型

Table 6 Multi-regression equations between V_{sp} and climatic factors during growth months in 2008

月份 Month	回归模型 Multi-regression equations	判定系数 Determination coefficients	Sig.	n
4	$V_{sp} = -0.001 + 0.001Q_s - 1.3 \times 10^{-5}Ta - 6.5 \times 10^{-6}RH + 2.99 \times 10^{-5}WS + 0.004SWC + 6.04 \times 10^{-5}Ts - 1.0 \times 10^{-10}VPD$	0.969	0.000	432
5	$V_{sp} = -0.007 + 0.005Q_s - 2.597 \times 10^{-5}Ta + 2.07 \times 10^{-5}RH - 9.99 \times 10^{-5}WS + 0.019SWC - 4.24 \times 10^{-6}Ts + 0.001VPD$	0.988	0.000	864
6	$V_{sp} = -0.005 + 0.005Q_s + 4.57 \times 10^{-6}Ta + 5.56 \times 10^{-5}RH - 4.30 \times 10^{-5}WS - 0.001SWC + 5.97 \times 10^{-6}Ts + 0.002VPD$	0.984	0.000	864
7	$V_{sp} = -0.002 + 0.005Q_s - 1.05 \times 10^{-5}Ta + 4.25 \times 10^{-5}RH - 3.48 \times 10^{-5}WS - 0.005SWC - 1.01 \times 10^{-5}Ts + 0.001VPD$	0.982	0.000	864
8	$V_{sp} = 0.001 + 0.004Q_s + 2.27 \times 10^{-5}Ta + 1.46 \times 10^{-5}RH - 6.89 \times 10^{-5}WS - 0.007SWC - 1.33 \times 10^{-5}Ts + 0.001VPD$	0.999	0.000	864
9	$V_{sp} = 0.004Q_s + 7.08 \times 10^{-6}Ta + 2.00 \times 10^{-5}RH - 5.46 \times 10^{-5}WS - 0.003SWC - 1.46 \times 10^{-5}Ts + 0.001VPD$	0.999	0.000	864
10	$V_{sp} = -0.003 + 0.006Q_s - 3.05 \times 10^{-5}Ta + 2.76 \times 10^{-5}RH + 2.80 \times 10^{-6}WS + 0.002SWC + 2.21 \times 10^{-5}Ts + 0.001VPD$	0.976	0.000	864

可见,预测值与实测值相差基本在 $\pm 20\%$ 之内,二者之间极显著线性相关($R^2 = 0.910$, Sig. = 0.00054, $n = 1008$)。生长季预测值较实测值偏大 6.39%。

表 7 2009 年生长季三倍体毛白杨树干边材液流速率预测值与实测值对比 (日平均值)

Table 7 Comparison of triploid *P. tomentosa* V_{sp} by TDP and multi-regression equations in 2009

月份 Month	4	5	6	7	8	9	10	生长季平均 Average
预测值 Predictive value/(cm/s)	0.000747	0.00218	0.00256	0.00144	0.00203	0.00200	0.00103	0.00171
实测值 Measured value/(cm/s)	0.000646	0.00212	0.00209	0.00178	0.00184	0.00176	0.00104	0.00161
误差 Error/%	15.63	2.83	22.49	-19.10	10.33	13.64	-0.96	6.39

为了更直观地呈现预测值与实测值的相互关系,以 2009 年 6 月二者的日变化作图(图 3)。可以发现,二者变化趋势相同但不同步,表明树干边材液流对环境条件变化反馈的时间差,也反映出树体自身水力及水容特性等对蒸腾耗水的调节。当环境条件变化时,树木水分状况不是马上随之发生变化,而是通过自身水力结构、水容等的调节,尽量减少水分的蒸腾和散失,维持水分平衡。

4 结论与讨论

与‘中林 46 杨’^[4]、新疆杨^[5]、欧美 107 杨^[6]、银白杨^[11]等杨树类似,晴天三倍体毛白杨 V_{sp} 日变化呈“单峰型”。就季节变化来看,日平均值 5、6 月份最大,秋季次之,早春最小。就单木日蒸腾耗水而言,三倍体毛白

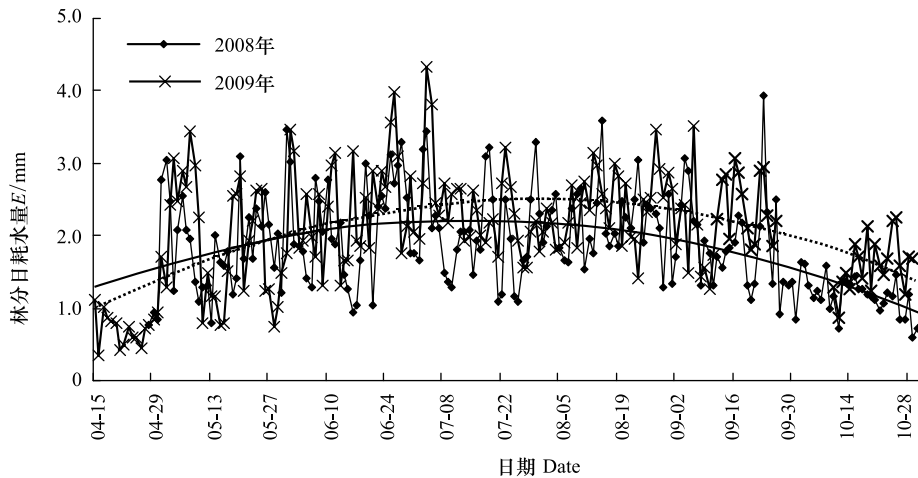


图2 生长季三倍体毛白杨日蒸腾耗水量变化图

Fig.2 Daily variations of water consumption of triploid *P. tomentosa* in growth seasons in 2008 and 2009

杨与主要环境因子具有极显著的相关性,关键因子为综合反映 T_a 和 RH 的 VPD 和表征能量水平的 Q_s 。而对于林分,从大的时间尺度来看(两个生长季),主要影响因子为 G_c 、 RH 和 VPD 。这与赵平等对于马占相思的研究结果相同,即马占相思个体液流密度和整树蒸腾的日变化主要受 Q_s 和 VPD 的控制;而对于林段蒸腾, G_c 的下降是导致其蒸腾下降的主要原因^[15]。因此,对于不同的时间和空间尺度,影响树木蒸腾耗水的主导因素不同,也表明树木蒸腾耗水影响和调控机制的复杂性和相对性,如何构建一套普遍适用的比较系统和科学的树木蒸腾耗水调控机制也是植物水分生理研究的难点之一,还需要更多的理论和试验支撑。

树木蒸腾耗水研究的目的之一是时空尺度扩展,即通过有限时段单木树干边材液流的研究来确定林分和生态系统的蒸腾耗水性,评价和比较不同树种、不同立地条件、不同林分结构和林分不同阶段的蒸腾耗水量,并指导干旱、半干旱地区造林及绿化树种选择、林分结构的合理配置以及合理灌溉制度的建立。在准确测定单株蒸腾耗水量的基础上,通过胸径处边材面积这一纯量进行了三倍体毛白杨蒸腾耗水由单木向林分的尺度扩展。栽植第4年和第5年三倍体毛白杨林分蒸腾耗水量分别为340和410 mm。整体来看,降水可以满足其蒸腾耗水之需,但降雨的季节分配不均也导致季节性供水不足。2008年5月、6月、9月和10月,以及2009年10月的降雨量相对于其蒸腾耗水量来说明显不足(表4)。而植物体在旱季形成的水力结构特性会在雨季时影响和制约其水分运输,从而可能影响其生长潜力的发挥^[16]。因此,在春、秋两季,降雨不能有效补充土壤水分以供给三倍体毛白杨蒸腾耗水之需,需适时灌溉。

在研究树木边材液流及其与环境因子相互关系的文献中,很多都建立了相应的回归模型,但鲜见有验证和评价的报道。本研究通过将2009年监测的环境因子数据代入2008年数据建立的多元线性回归模型,并比较实测值与预测值的差异。2009年生长季实测值平均为0.00161 cm/s,预测值为0.00171 cm/s,误差6.39%。可见,通过环境因子与树干边材液流速率建立的多元回归模型可用来预测和估算不同时段三倍体毛白杨的蒸腾耗水性,实现蒸腾耗水的时间尺度扩展,节约研究成本。

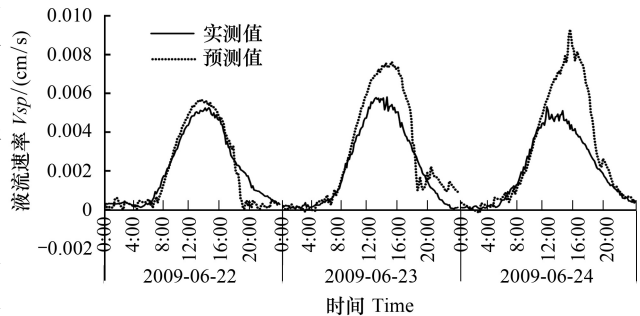


图3 三倍体毛白杨树干边材液流速率实测值与预测值日变化图

Fig.3 Comparison of triploid *P. tomentosa* V_{sp} by TDP and the multi-regression equations in growth season, 2009

参考文献 (References):

- [1] 王沙生, 高孚荣, 吴贾明. 植物生理学(第2版). 北京: 中国林业出版社, 1991.
- [2] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. 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, 2006, 17(7): 1149-1156.
- [3] 贾黎明, 刘诗琦, 祝令辉, 胡建军, 王小平. 我国杨树林的碳储量和碳密度. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2013, 37(2): 1-7.
- [4] 刘文国, 袁玉欣, 王志刚, 刘四围, 王颖, 刘玲, 王彦超, 侯军铭. ‘中林46杨’林分耗水特性及其与环境因子的关系. 河北农业大学学报, 2007, 30(4): 40-45.
- [5] 桑玉强, 刘全军, 吴文良, 张劲松, 孟平, 周择福. 毛乌素沙地新疆杨生长季节蒸腾耗水规律. 东北林业大学学报, 2008, 36(9): 28-30, 47-47.
- [6] 孙迪, 关德新, 袁凤辉, 王安志, 吴家兵. 辽西农林复合系统中杨树液流速率与气象因子的时滞效应. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2742-2748.
- [7] 李广德, 贾黎明, 富丰珍, 席奔野, 王烨. 三倍体毛白杨不同方位树干边材液流特性研究. 西北植物学报, 2010, 30(6): 1209-1218.
- [8] 杨爱国, 张建秋, 毕庆玲, 张玉玲, 王凤林, 范鹏辉. 吉林省西部不同造林密度杨树耗水特性的研究. 北京林业大学学报, 2011, 33(6): 142-145.
- [9] 李少宁, 陈波, 鲁绍伟, 张玉平, 潘青华, 王华. 不同时间尺度下杨树人工林液流密度特征. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 121-125.
- [10] 党宏忠, 李卫, 李永华, 莫保儒. 新疆杨树杆液流密度轴向差异的初步研究. 林业科学研究, 2012, 25(6): 739-744.
- [11] 张俊, 李晓飞, 李建贵, 王华, 黄春堂, 闵首军, 李刚, 张福海, 田旭, 孔军. 干旱荒漠区银白杨树树干液流动态. 生态学报, 2013, 33(18): 5655-5660.
- [12] 康向阳, 朱之悌. 三倍体毛白杨在我国纸浆生产中的地位与作用. 北京林业大学学报, 2002, 24(增刊): 51-56.
- [13] Philips N, Oren R, Zimmermann R. Radial patterns of xylem sap flow in non-, diffuse- and ring-porous tree species. Plant, Cell & Environment, 1996, 19(8): 983-990.
- [14] 蔡甲冰, 刘钰, 许迪, 史宝成. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析. 水利学报, 2008, 39(1): 83-90.
- [15] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. 基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度. 植物生态学报, 2006, 30(4): 655-665.
- [16] Guang Y H, Hoffmann W A, Scholz F G, Bucci S J, Meinzer F C, Franco A C, Cao K F, Goldstein G. Stem and leaf hydraulics of congeneric tree species from adjacent tropical savanna and forest ecosystems. Oecologia, 2008, 155(3): 405-415.