

天目山柳杉古树的液流特征研究

蒋文伟¹, 汤富彬², 刘志梅¹, 赵明水³

(1. 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 浙江 临安 311300; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400;
3. 浙江天目山国家级自然保护区管理局, 浙江 临安 311311)

摘要:应用热扩散技术法,于2010年4—8月对浙江天目山自然保护区内的2株柳杉古树的树干液流进行连续观测,结合所测定的相关环境因子,分析了柳杉树干液流和耗水量的变化规律,以及液流与各环境因子的关系。结果表明:不同季节柳杉树干液流速率日变化规律基本一致,呈单峰波动曲线,但树干液流启动时间、达到峰值时间及迅速下降时间存在明显差异;树干液流密度与光合有效辐射、空气温度和水汽压差间存在极显著正相关,与空气相对湿度和CO₂浓度呈极显著负相关;液流密度随树干直径的增加,无明显变化差异,但液流速率和日均耗水量均随树干直径的增加而增大;胸径75.6 cm柳杉和胸径62.8 cm柳杉的日均耗水量季节变化过程相同,但2者变化差异较大,6月份日均耗水量最低,分别为(49.356 ± 14.883) kg和(9.531 ± 4.297) kg;4月份日均耗水量最高,分别为(110.022 ± 21.890) kg和(49.352 ± 2.629) kg。

关键词:柳杉古树;树干液流;耗水量

中图分类号:S715

文献标识码:A

Study on the Sap Flow Characters of Two Old Trees of *Cryptomeria fortunei* on Tianmu Mountain

JIANG Wen-wei¹, TANG Fu-bin², LIU Zhi-mei¹, ZHAO Ming-shui³

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China;

2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China;

3. Administration Office, National Nature Reserve of Mount Tianmu, Lin'an 311311, Zhejiang, China)

Abstract: From April to August in 2010, the stem sap flow of two old trees of *Cryptomeria fortunei* which grow in the National Natural Reserve of Mount Tianmu was continuously detected with the thermal dissipation probe (TDP). The aim of this study was to evaluate the diurnal and seasonal variation of stem sap flow velocity and the change of water consumption of *C. fortunei*, as well as to analyze how environmental factors were affecting the stem sap flow of *C. fortunei*. The results showed that, in different season, the diurnal variation of stem sap flow velocity of *C. fortunei* presented a single-peaked curve, but there were some differences in starting time, peak time and rapid-falling time. The stem sap flow density had a positive relation with photosynthetic active radiation (PAR), air temperature, and vapor pressure deficit (VPD) while a negative relation with relative humidity and CO₂ significantly. Both the stem sap flow velocity and average daily water consumption increased with the increase of tree's diameter, but the stem sap flow density had no such trait. The changes of average daily water consumption of two trees with a diameter of 75.6 cm and 62.8 cm had the same ecological process, the lowest water consumptions were (49.356 ± 14.883) kg and (9.531 ± 4.297) kg in June and the highest were (110.022 ± 21.890) kg and (49.352 ± 2.629) kg in April respectively.

Key words: old tree of *Cryptomeria fortunei*; stem sap flow; water consumption

收稿日期: 2011-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于 ENVIS 监测技术系统的柳杉古树茎干液流时空变异性研究”(30972342)

作者简介: 蒋文伟(1963—),男,浙江宁波人,副教授,博士,主要从事植物生理生态学与景观生态学研究。

树干液流是指液体在树木内部的流动,可以用其表征树木的蒸腾耗水量^[1]。目前,常应用热扩散技术测量树木的蒸腾耗水量。马履一等^[2]应用该技术研究了油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)边材木质部液流速率的变化规律;孙慧珍等^[3]进行了白桦(*Betula platyphylla* Suk.)树干液流变化动态的研究;李海涛等^[4]对湿地松(*P. elliottii* Engelman)人工林树干边材液流进行了研究;赵仲辉等^[5]研究了杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)树干液流变化规律及其与主要环境因子的关系;曹恭祥等^[6]利用热扩散技术对华山松(*P. armandii* Franch.)树干液流的动态进行了研究,均取得了较好的成果。

柳杉(*Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr.)系杉科(Taxodiaceae)柳杉属(*Cryptomeria* D. Don)常绿针叶乔木,为我国特有树种,主要分布于长江以南,是南方优良的速生用材树种^[7]。浙江天目山柳杉种群以“大树华盖闻九州”而驰名,是天目山最著名的自然生态奇观之一,在天目山自然保护区内具有非常重要的地位。国内许多学者从群落竞争和病虫害控制等方面对天目山柳杉进行了大量研究^[8-10];然而,从树干液流方面探索柳杉古树水分生理机制的研究甚少,仅见赵丽娟等^[11]从单株水平上探讨了柳杉古树茎干液流速率的日变化,以及柳杉的树干液流与主要气象因子的关系。本文以天目山自然保护区内2株柳杉古树为研究对象,应用热扩散技术深入研究了不同季节柳杉古树树干液流特征和蒸腾耗水特性,以及柳杉树干液流与环境因子的内在关系,旨在揭示柳杉古树目前的水分利用动态和生命活动状况,同时为天目山自然保护区森林生态系统的经营与管理提供基础资料和科学依据。

1 研究区概况

研究地位于浙江省临安市天目山国家级自然保护区内老殿景点附近(30°20'32"N,119°23'01"E),海拔1 067 m。天目山自然保护区受海洋暖湿气候的影响,形成了季风强盛,四季分明,气候温和,雨水充沛,光照适宜且复杂多变的森林生态气候。该区年均气温为8.8~14.8℃,最冷月平均气温-2.6~3.4℃,最热月平均气温19.9~28.1℃,全年≥10℃积温2 500~5 100℃,无霜期209~235 d,年均相对湿度76%~81%,年降水量1 390~1 870 mm,年太阳辐射3 270~4 460 MJ·m⁻²。成土母岩主要

为流纹质凝灰岩。海拔600 m以下为红壤,海拔600 m以上为黄壤。

由于样地内柳杉数量有限,且树龄集中在120~160 a,基于保护古树名木的原则选取2株长势良好、树形高大的柳杉作为研究对象,其基本情况见表1。

表1 柳杉古树的基本情况

编号	树龄/a	胸径/cm	心材厚度/cm	边材厚度/cm	边材面积/cm ²
柳杉1#	160	75.6	8.7	28.1	4 016.683
柳杉2#	120	62.8	7.5	23.4	2 822.909

2 材料与方法

2.1 树干液流的测定

根据A. Granier^[12-13]的热扩散技术法进行树干液流的测定。热扩散探头(Thermal sensors, Hukseflux Ltd., the Netherlands)由2根探针组成,上部探针恒定连续加热,内有加热线和热电偶;下部探针为参考端。通过测定2根探针在边材区的温差值,可由经验公式UP Sap Flow-System User Manual Version 2.6(UP Umweltanalytische Produkte GmbH, Germany)求出树干边材液流密度的连续变化:

$$u = 0.714 \times ((\Delta T_m - \Delta T) / \Delta T)^{1.231}$$

式中: u 为液流密度(mL·cm⁻²·min⁻¹); ΔT_m 为无液流时2根探针最大温差(℃); ΔT 为2根探针测定的温差(℃)。

2.2 环境因子的测定

利用观测铁塔测定林内空气温度(℃)和相对湿度(%)(HMP45D Humidity and Temperature Sensor, Vaisala Oyj, Finland)、CO₂浓度(mg·kg⁻¹)(GMM222, IMKO, Germany)以及光合有效辐射(PAR)(μmol·m⁻²·s⁻¹)(QS₂ PAR Quantum Sensor, Delta-T Devices Ltd., U.K.)。同时为了反映空气温度和相对湿度的协同作用,本试验采用了水汽压差(VPD)这一个指标。水汽压差(VPD)由以下公式计算得出^[14]:

$$e_s(T) = 0.611 \times \exp(17.502 / (T + 240.97))$$

$$VPD = e_s(T) - e_a = e_s(T)(1 - hr)$$

式中:VPD为水汽压差(kPa); $e_s(T)$ 为 T 空气温度下的饱和水汽压(kPa); T 为空气温度(℃); e_a 为周围气体水汽压(kPa); hr 为空气相对湿度(%)。

以上环境因子的传感器模块及树干液流探针测定模块,通过电源线、树干液流观测馈线与TRIME-Logger(Envis System, IMKO Micromodultechnik GmbH, Germany)数据采集器连接。从2010年4—8月

不间断测量,每10 min测定1次,30 min取1次液流平均值,同步读取以上环境因子数值。此观测过程是通过太阳能板(KC60 Multicrystal Photovoltaic Module, Kyocera, Germany)采集光能,并通过蓄电池(12V Lead Acid Batteries, IMKO, Germany)蓄电后直接供应 Envis 系统标准电压电量,以保证 TRI-ME-Logger 持续每天进行自动观测数据。

2.3 数据处理

采用 Excel 2003 软件进行数据处理, Sigma Plot 10 软件绘图,并运用 SPSS 11.5 统计软件对柳杉树干液流密度与环境因子进行相关以及回归分析。

3 结果与分析

3.1 柳杉树干液流速率的日变化

以柳杉 2#为研究对象,夏季(8月)选择3个连续晴天进行测定,所选各日柳杉树干液流速率测定结果见图1。可以看到,柳杉树干液流的日变化呈单峰波动曲线,液流速率从7:00左右开始启动,随着光合有效辐射的增强,空气温度升高,相对湿度下降,液流速率逐渐加快,且在14:00左右达到液流峰值,液流速率峰值为 $46.27 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$;而后随着光合有效辐射的减弱,空气温度降低,相对湿度逐渐升高,液流速率开始下降,在20:00左右迅速下降至低谷;之后,液流速率趋于稳定,没有明显的液流停止界限,基本维持在 $0 \sim 9 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$,这主要是由于白天柳杉蒸腾作用过于强烈,损失了大量的水分而无法及时补充,于是在夜间仍然有一定的液流以补充白天所损失的水分。

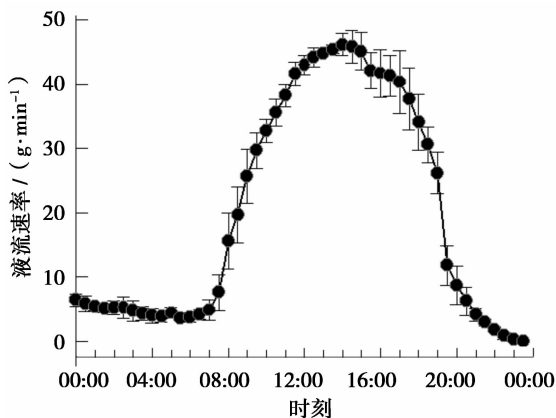


图1 柳杉树干液流速率的日变化

3.2 柳杉树干液流速率的季节变化

以柳杉 2#为研究对象,选择春季(5月)和夏季(7月)3个连续晴天的液流速率测定结果,分析和

比较柳杉树干液流的季节变化动态(图2、表2)。从液流启动时间看,春季柳杉启动时间在7:20左右;夏季柳杉启动时间较晚,在7:50左右,比春季大约晚30 min左右。从柳杉树干液流达到峰值的时间看,春季较早,大约出现在13:10;夏季较晚,大约出现14:50,即夏季晚于春季100 min左右。从柳杉液流速率峰值和日平均液流速率看,春季较大,3个观测日的平均液流速率峰值和日平均液流速率分别为 95.3 、 $34.1 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$;夏季较小,3个观测日的平均液流速率峰值和日平均液流速率分别为 41.5 、 $16.9 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ 。显然,夏季柳杉液流速率峰值和日平均液流速率均小于春季,且分别为春季的43.5%和49.6%。从液流开始迅速下降的时间看,春季柳杉树干液流开始迅速下降时间为17:20左右,夏季为18:10左右,总趋势是春季早于夏季50 min左右。总体上看,春季柳杉树干液流启动时间、达到峰值时间和迅速下降时间均早于夏季,夏季液流维持时间稍长于春季,但是夏季柳杉液流速率峰值和日平均液流速率小于春季。这是因为虽然夏季的光合有效辐射、空气温度都较高,但是降水量较大,空气相对湿度也较大,风速又较小,这些因素制约了液流速率的上升;而且,降水可以使植物叶片气孔关闭,蒸腾减弱,导致液流速率下降^[15]。

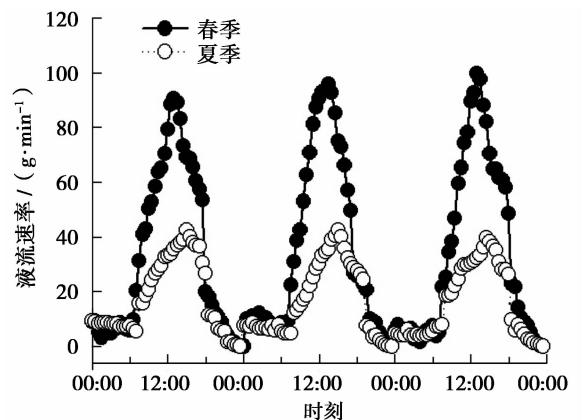


图2 柳杉树干液流速率的季节变化

表2 不同季节柳杉树干液流速率变化动态

季节	日期 (月-日)	液流启动 时间	到达峰 值时间	液流峰值/ ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	平均液流速率/ ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	迅速下 降时间
春季	05-01	7:00	13:00	90.5	33.4	17:30
	05-02	7:30	13:30	95.7	35.0	17:00
	05-03	7:30	13:00	99.7	33.9	17:30
夏季	07-18	7:30	15:00	42.6	18.2	18:00
	07-19	8:00	15:00	42.4	16.7	18:30
	07-20	8:00	14:30	39.6	15.7	18:00

3.3 不同直径柳杉树干液流的比较

图3为2株胸径分别为75.6、62.8 cm的柳杉树干液流日变化动态。可以看出,不同直径柳杉的树干液流日变化动态基本一致,呈单峰曲线,7:00左右液流开始启动,而后逐步上升,13:30左右达到液流峰值,之后开始呈下降趋势,在17:30左右液流迅速下降,20:00左右基本趋于稳定;但直径不同,树干液流速率有较大差异(图3),胸径75.6 cm的柳杉液流速率最大值为 $150.2 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$,平均液流速率最大可达 $56.9 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$;胸径62.8 cm的柳杉液流速率最大值为 $102.7 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$,平均液流速率最大为 $38.2 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$,分别是胸径75.6 cm柳杉

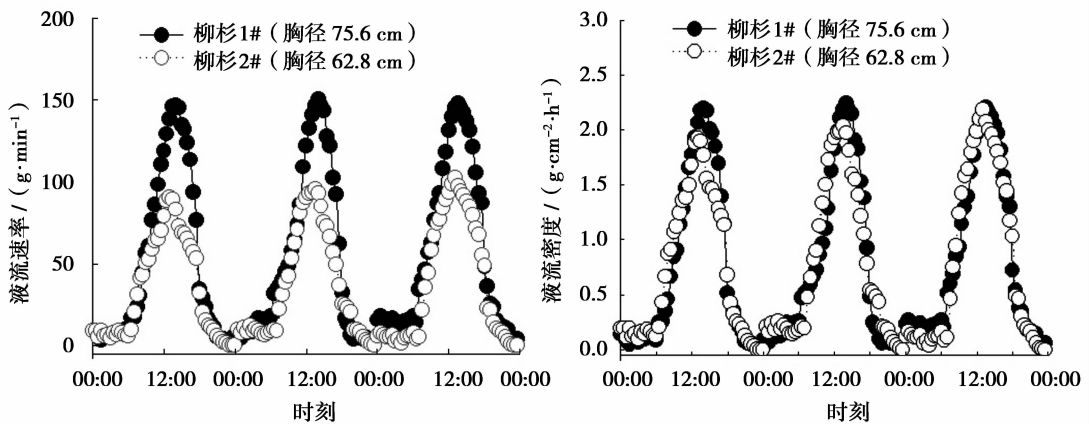


图3 不同直径柳杉树干液流速率、液流密度的日变化

3.4 柳杉树干液流速率与环境因子的关系

单株植物茎干液流受多种环境因子的影响。从图4可以看出:柳杉树干液流速率的波动过程与光合有效辐射、空气温度和水汽压差的变化同步,与空气相对湿度的变化相反,然而与 CO_2 浓度的变化关系很难直观地看出,这表明柳杉树干液流的波动主要受光合有效辐射、空气温度、空气相对湿度和水汽压差的影响。太阳辐射强烈、温度高时,空气相对湿度减小,水汽压差变大,水势梯度增加,植物蒸腾加快,水分损失加快。

从表3看出:柳杉树干液流密度与各环境因子的相关系数相差较大。树干液流密度与光合有效辐射、空气温度和水汽压差间存在极显著正相关关系($P < 0.01$),其中,与空气温度的相关性最高, Pearson 相关系数为0.875;树干液流密度与空气相对湿度和 CO_2 浓度呈极显著负相关关系($P < 0.01$),其

的68.4%和67.1%。树干液流密度的变化差异较小(图3),胸径75.6 cm的柳杉液流密度最大值为 $2.24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均液流密度为 $0.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;胸径62.8 cm的柳杉液流密度最大值为 $2.18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,平均液流密度为 $0.76 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。总体上看,直径较大的柳杉的树干液流密度大于直径较小的柳杉,但无明显的变化,而直径较大的柳杉的树干液流速率明显大于直径较小的柳杉,究其原因,主要是因为边材面积的介入,边材面积随树木直径的增加而增大,同一树种,直径较大者一般都具有较大的边材面积^[16]。

中,与空气相对湿度的 Pearson 相关系数为 -0.721 ,与 CO_2 浓度的 Pearson 相关系数为 -0.364 。在上述相关分析的基础上,以柳杉树干液流密度为因变量,以光合有效辐射、空气温度、相对湿度、水汽压差和 CO_2 浓度为自变量进行逐步线性回归筛选,确定了柳杉树干液流密度与空气温度、光合有效辐射和相对湿度之间的回归方程:

$$Y = -1.456 + 0.104X_1 + 0.001X_2 + 0.004X_3 \quad (R^2 = 0.830) \quad (1)$$

式中: Y 为树干液流密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), X_1 为空气温度($^{\circ}\text{C}$), X_2 为光合有效辐射($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), X_3 为相对湿度(%)。

方差分析检验表明:式(1)回归显著,说明用空气温度、光合有效辐射和相对湿度可以预测柳杉树干液流密度。

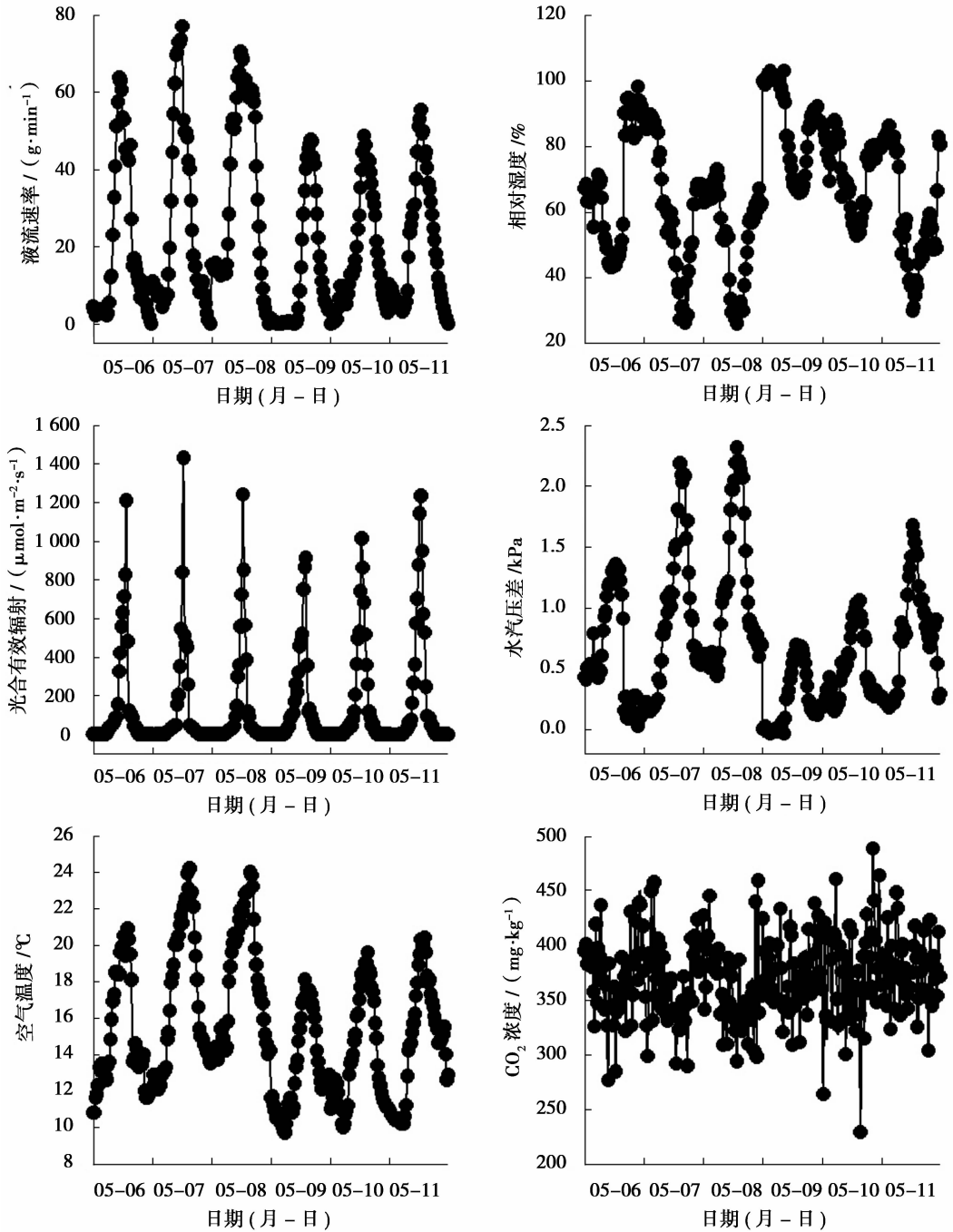


图4 柳杉树干液流速率和环境因子的变化过程

表3 柳杉树干液流密度与环境因子间的 Pearson 相关系数

相关分析	光合有效辐射	空气温度	相对湿度	水汽压差	CO ₂ 浓度
相关系数	0.687 **	0.875 **	-0.721 **	0.782 **	-0.364 **
显著性水平	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
样本数	288	288	288	288	288

注: **表示在0.01水平上极显著相关。

3.5 柳杉树干日耗水量的变化

图5和图6分别是2株不同胸径(75.6、62.8 cm)柳杉在春季、夏季各月的日均耗水量和日累积耗水量。从中可以看出,不同直径柳杉的日均耗水量和树干日累积耗水量差异较大,直径越大,日均耗水量也越大,且日累积耗水量也越大;同时可以看出,日累积耗水量过程曲线呈现“S”型,这与其蒸腾过程相吻合。在0:00—8:00和20:00—24:00,柳杉

蒸腾很小,所以其水分消耗量也很少,日累积耗水量曲线上升缓慢,在10:00—0:00这段时间随着太阳

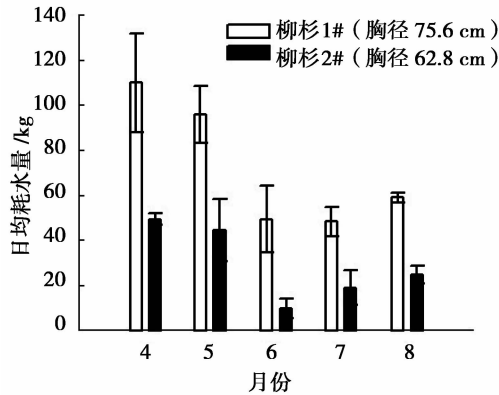


图5 不同直径柳杉的日均耗水量

从图5还可以看出:在4、5、6、7、8月5个月份中,不同直径柳杉的日均耗水量变化过程相同,但不同季节柳杉耗水量大小差异较大,4、5月份柳杉耗水量较大,6、7、8月份柳杉耗水量较少。4月份柳杉日均耗水量最高,胸径75.6 cm柳杉和胸径62.8 cm柳杉的日均耗水量分别为(110.022 ± 21.890) kg和(49.352 ± 2.629) kg;6月份柳杉日均耗水量最低,胸径75.6 cm柳杉和胸径62.8 cm柳杉的日均耗水量分别为(49.356 ± 4.883) kg和(9.531 ± 4.297) kg,说明春季柳杉蒸腾耗水量大于夏季。这是由于春季天目山风速大,降水量少、空气干燥,而夏季天目山雨水充沛,降水截留能够极大地降低植物蒸腾^[17],而且较高的空气相对湿度可导致水汽压差降低,使得水分不容易从植物体散失,植物蒸腾耗水量减少。

4 结论与讨论

植物蒸腾过程具有明显的变化规律。研究发现,树木边材液流速率日变化呈单峰曲线、双峰曲线或多峰曲线^[18-20]。在浙江天目山自然保护区,不同季节柳杉古树树干液流日变化规律基本一致,呈单峰波动曲线,有明显的昼夜变化特征,与赵丽娟^[11]的研究结果相同,但是树干液流在启动时间、达到峰值时间以及液流迅速下降时间上存在明显的差异。试验中发现,夏季柳杉树干液流启动时间晚于春季,与樊敏^[21]对刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)春夏季树干液流变化的研究结果相反。一般来讲,清晨随着光合有效辐射的增强,水汽压差增大,叶片气孔逐渐打开,蒸腾作用增强,产生蒸腾拉力带动树木液流

辐射增加,温度升高,柳杉蒸腾作用加强,其水分消耗速度增加,曲线上升的速度较快。

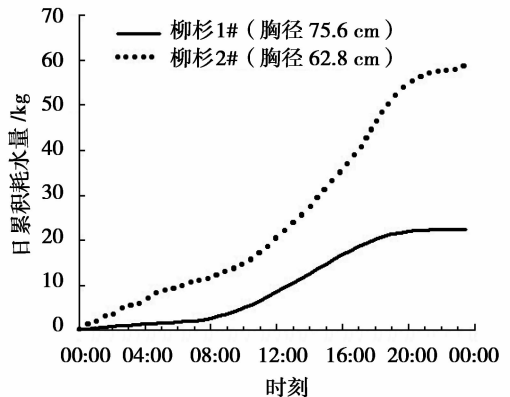


图6 不同直径柳杉的日累积耗水量

的启动。夏季太阳升起时间早于春季,落日时间晚于春季,因此夏季的树干液流启动时间应早于春季,然而本试验中柳杉树干液流变化规律与光合有效辐射的变化规律不相符合,究其原因,这可能是由于江浙地区夏季阴雨天比春季多,树木接受的太阳辐射强度受天气影响较大,从而导致本试验的研究结果与其他学者的研究结果不一致。当然,夏季较大的空气湿度也是导致该种现象的一个主要因素。

树木边材液流具有特定的时空变化规律,环境因子对边材液流有很大的影响^[2, 22]。研究发现,柳杉树干液流密度与空气相对湿度和CO₂浓度呈极显著负相关,与光合有效辐射、空气温度和水汽压差间存在极显著正相关,其中柳杉树干液流密度与空气温度的相关性最高,说明在本研究地区影响柳杉树干液流的主导因子是空气温度;但这与其他学者的研究结果有所不同,Oguntunde^[23]和熊伟等^[24]研究发现,光合有效辐射与液流变化规律相一致,且具有显著的正相关关系,是影响液流的主要因子;严昌荣等^[15]和孙迪等^[25]认为液流主要是由空气温度和相对湿度决定的;然而R. Oren^[26]和张宁南等^[27]的研究表明,水汽压差(VPD)是影响液流的重要环境因子。综合这些研究结果发现,光合有效辐射、空气湿度和水汽压差等环境因子对边材液流均有显著的影响,但由于研究对象、研究地点、研究方法和监测时间的差异,其影响树木液流的主导环境因子不一定相同,所以还需要在可控试验条件下进一步研究探讨。

树干液流受环境因子影响的同时还受到树木自身生物学结构的影响。张宁南等^[27]研究发现,不同

胸径尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla* S. T. Blake) 的液流具有很大的差异,胸径大时液流速率大,胸径小时液流速率小;白云岗等^[28]在对胡杨 (*Populus euphratica* Oliv.) 树干液流的研究中发现,胸径大的树干液流流量明显大于胸径小的树干;刘德良等^[29]对侧柏 (*Biota orientalis* (L.) Endl.) 林内不同直径的单株树干液流的研究表明,液流速率和连日耗水量均随直径的增加而增大。本试验通过2株不同胸径柳杉古树液流的测定比较发现,液流密度随直径的增加而无明显的变化,但直径较大者,其树干液流速率和日均耗水量都较大;直径较小者,其树干液流速率和日均耗水量都较小。这种随树干直径的增加其液流速率和耗水量都增大的现象是因为决定树干液流速率的关键因素之一是边材面积,而边材面积又随树木直径增加而增大。本次试验 TDP 探针有限,基于保护古树名木的原则仅对2株柳杉古树进行了树干液流测定。作者将在后续的研究中,根据实际情况增加柳杉古树样木以及 TDP 探针的数量,测定多个不同直径柳杉古树的树干液流,求出单株耗水量、边材面积随直径的变化规律,以此估算柳杉古树群体的耗水量,从而为合理地制订柳杉古树的水管理措施提供科学依据,进一步做好柳杉古树保育策略,防止因干旱而造成柳杉枝叶枯死现象的发生。

参考文献:

[1] 张雷,孙鹏森,刘世荣. 树干液流对环境变化响应研究进展[J]. 生态学报,2009,29(10):5600-5610

[2] 马履一,王华田. 油松边材液流时空变化及其影响因子研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(3):23-27

[3] 孙慧珍,周晓峰,赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究[J]. 生态学报,2002,22(9):1387-1391

[4] 李海涛,向乐,夏军,等. 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[J]. 林业科学,2006,42(10):31-38

[5] 赵仲辉,康文星,田大伦,等. 湖南会同杉木液流变化及其与环境因子的关系[J]. 林业科学,2009,45(7):127-132

[6] 曹恭祥,熊伟,王彦辉,等. 宁夏六盘山华山松树干液流的动态研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2010,31(2):41-47

[7] 俞飞,侯平,陈全明,等. 天目山老龄柳杉林土壤种子库状态与更新[J]. 浙江林学院学报,2008,25(4):464-468

[8] 杨淑贞,李国会,杜晴洲,等. 输营养液对天目山柳杉的影响[J]. 浙江林学院学报,2009,26(6):810-814

[9] 张欣,杨淑贞,赵明水,等. 天目山自然保护区柳杉种群内和种间竞争[J]. 农村生态环境,2004,20(4):1-5

[10] 李国会,温国胜,田海涛,等. 天目山不同海拔高度柳杉瘿瘤病对柳杉健康的影响[J]. 浙江林学院学报,2010,27(4):483-488

[11] 赵丽娟,蒋文伟,杨淑贞,等. 天目山柳杉的茎干液流特征[J]. 浙江林学院学报,2009,26(2):169-175

[12] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems[J]. Annals of Forest Science,1985,42(2):193-200

[13] Granier A. Sap flow measurement in Douglas-fir tree trunks by means of a new thermal method[J]. Annals of Forest Science,1987,44(1):1-14

[14] 吴芳,陈云明,于占辉. 黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态[J]. 植物生态学报,2010,34(4):469-476

[15] 严昌荣, Alec Downey, 韩兴国, 等. 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[J]. 生态学报,1999,19(6):193-197

[16] 马长明,翟明普. 干季核桃树干液流特征及其气象因子的关系[J]. 林业科学研究,2007,20(6):883-886

[17] Herzog K M, Thum R, Kronfub R, et al. Pattern and mechanisms of transpiration in a large sub alpine Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) [J]. Ecological Research, 1998, 13(2):105-116

[18] 岳广阳,张铜会,赵哈林,等. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征[J]. 生态学报,2006,26(10):3205-3213

[19] 郭成久,王莉,苏芳莉,等. 辽西樟子松树干液流运动规律[J]. 东北林业大学学报,2008,36(7):3-5

[20] 胡伟,闫美杰,杜峰,等. 黄土丘陵区山杨展叶期树干液流分析[J]. 水土保持学报,2010,24(4):50-58

[21] 樊敏,马履一,王瑞辉. 刺槐春夏季树干液流变化规律[J]. 林业科学,2008,44(1):41-45

[22] 孙鹏森,马履一,王小平,等. 油松树干液流的时空变异性研究[J]. 北京林业大学学报,2000,22(5):1-6

[23] Oguntunde P G. Whole-plant water use and canopy conductance of cassava under limited available soil water and varying evaporative demand[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1-2):371-383

[24] 熊伟,王彦辉,徐德应. 宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应[J]. 林业科学,2003,29(2):1-7

[25] 孙迪,关德新,袁凤辉,等. 辽西农林复合系统中杨树水分耗散规律[J]. 北京林业大学学报,2010,32(4):114-120

[26] Oren R, Sperry J S, Ewers B E, et al. Sensitivity of mean canopy stomatal conductance to vapor pressure deficit in a flooded *Taxodium distichum* L. forest: hydraulic and non hydraulic effects[J]. Oecologia, 2001, 126(1):21-29

[27] 张宁南,徐大平,Jim Morris,等. 雷州半岛尾叶桉人工林液流茎流特征的研究[J]. 林业科学研究,2003,16(6):661-667

[28] 白云岗,宋郁东,周宏飞,等. 热脉冲法对胡杨树干液流的检测与蒸腾过程模拟[J]. 水土保持学报,2007,21(3):188-192

[29] 刘德良,李吉跃,马达. 侧柏树干边材液流空间变化规律[J]. 生态学杂志,2008,27(8):1262-1268