

# 天目山柳杉树干液流动态 及其与环境因子的关系

蒋文伟<sup>1</sup> 郭运雪<sup>1</sup> 杨淑贞<sup>2</sup> 赵明水<sup>2</sup>

(1. 浙江农林大学 园林学院 浙江 临安 311300; 2. 浙江天目山国家级自然保护区管理局 浙江 临安 311311)

**摘要:**以浙江临安天目山森林生态定位观测站 160 年生柳杉古树为研究对象,于 2007 年 12 月—2008 年 11 月,采用热扩散技术对柳杉树干液流进行连续监测,同步测定相关环境因子,研究了树干液流速率的日变化、季节变化及其与各环境因子的关系。结果表明:晴天和阴天,柳杉树干液流速率日变化均呈现为单峰曲线,最大值一般出现在 13:30—15:00,而雨天则无明显的日变化规律;冬、春、夏、秋季柳杉日液流量分别为(44.92 ± 3.76) kg/d、(62.86 ± 3.86) kg/d、(56.59 ± 3.85) kg/d、(53.47 ± 3.55) kg/d;在不同月份,柳杉月液流量存在差异,1 月份最小为 1 064.30 kg,5 月份最大为 2 122.62 kg,全年柳杉树干液流总量为 19 853.19 kg。回归分析表明,树干液流与环境因子的关系随不同的研究尺度而不同,影响瞬时液流速率的环境因子主要是空气温度和 10 cm 深处的土壤温度,影响日液流量的环境因子主要是光合有效辐射,影响月液流量的环境因子主要为空气温度和光合有效辐射。

**关键词:**树干液流;日变化;季节变化;环境因子;柳杉

中图分类号:S791.31 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2011)05-0899-07

## Dynamics of Stem Sap Flow of *Cryptomeria fortunei* and Its Relation to Environmental Factors in Mount Tianmu National Nature Reserve

JIANG Wen-wei<sup>1</sup>, GUO Yun-xue<sup>1</sup>, YANG Shu-zhen<sup>2</sup>, ZHAO Ming-shui<sup>2</sup>

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Lin'an 311300, China; 2. Management Office, National Nature Reserve of Mount Tianmu, Lin'an 311311, China)

**Abstract:** At the Forest Ecosystem Monitoring Station of Mount Tianmu in Lin'an City, Zhejiang Province (30°20'N, 119°23'E), a 160-year-old *Cryptomeria fortunei* tree was selected and its sap flow velocity was measured using thermal dissipation probe (TDP, Hukseflux Ltd., The Netherlands) method from December 31, 2007 to November 30, 2008. During the same time period, several environmental variables were measured. The aim of this study was to evaluate the diurnal and seasonal variability of stem sap flow velocity in *C. fortunei* and its relation to environmental factors. A single peak pattern was observed for the daily changes in sap flow velocity of individual *C. fortunei* tree in fine and overcast days with the peak time occurring at 13:30—15:00, while no significant variation and regular change pattern of sap flow velocity were found in rainy days. The daily sap flow was (44.92 ± 3.76), (62.86 ± 3.86), (56.59 ± 3.85) and (53.47 ± 3.55) kg/d in winter, spring, summer and autumn, respectively. The monthly sap flow volume was the lowest in January,

收稿日期:2011-05-03 修回日期:2011-07-24

基金项目:国家自然科学基金项目(30972342)

作者简介:蒋文伟(1963—),男,副教授,博士,主要从事植物生理生态学与景观生态学的研究, E-mail: wenweijiang@zafu.edu.cn。

1 064.30 kg and the highest in May 2 122.62 kg. The total annual sap flow value was 19 853.19 kg. Regression analysis showed that the relationship between sap flow velocity and environmental factors varied with temporal scales. The major factors that affected stem sap flow at less hour scale were air temperature and soil temperature at depth of 10 cm, but on daily scale solar radiation was the major influencing factor, and on monthly scale air temperature and solar radiation were the major influencing factors.

**Key words:** stem sap flow; daily change; seasonal change; environmental factors; *Cryptomeria fortunei*

森林个体和群体耗水特性对区域水量平衡的影响是评价森林生态效应的重要依据<sup>[1]</sup>,定量研究树木的蒸腾耗水特性一直是树木生理生态学和生态水文研究的热点问题<sup>[2]</sup>。几十年来,国内外研究者陆续提出了各种不同的树木耗水量测定方法<sup>[3]</sup>。其中,利用热电转换原理测定树干液流密度进而推算整树的蒸腾的方法被认为是目前测定乔木蒸腾作用最准确的方法<sup>[4-5]</sup>。热扩散探针法(TDP)由于在自然条件下活体测定树木的液流量,能够准确反映出树木日及其季节尺度上的变化,具有操作简单、测量精度高的优点<sup>[6-10]</sup>。如果与大气和土壤因子传感器相结合,并与数据采集器相连接,可实现多种气象因子和土壤要素与树木边材液流速率的同步测定,从而掌握树干液流量的动态变化规律<sup>[11]</sup>。至今已有学者研究了樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)<sup>[12]</sup>、油松(*Pinus tabulaeformis*)<sup>[13]</sup>、马尾松(*Pinus massoniana*)<sup>[14]</sup>、欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)<sup>[15]</sup>等针叶树种和麻栎(*Quercus acutissima*)<sup>[16]</sup>、山杨(*Populus davidiana*)<sup>[17]</sup>、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)<sup>[18]</sup>等阔叶树种的树干液流特征。国内外的相关研究结果表明:树干液流量与树干胸径、叶面积和边材面积等因子之间呈良好的线性关系<sup>[19]</sup>。树木边材液流速率与环境因子<sup>[20]</sup>及土壤水分密切相关<sup>[21]</sup>,通过研究树干液流的变化规律及其与环境因子的关系,可以很好地定量分析树木生长与蒸腾耗水的相互关系<sup>[22-23]</sup>。

柳杉(*Cryptomeria fortunei*)系杉科(Taxodiaceae)柳杉属植物,为我国特有种,常绿乔木<sup>[24]</sup>,是第三纪子遗植物,其天然林仅见于中国东南的天目山、武夷山和日本本州岛、九州岛等地<sup>[25]</sup>,在水土保持、生物多样性维护等方面发挥着巨大的作用。浙江省天目山自然保护区拥有世界罕见的柳杉古树群,50 cm以上柳杉古树有2 032株,占自然保护区100种古树名木总数的36.9%,为天目山最具特色的森林植被之一<sup>[26]</sup>。长期以来,对柳杉的生物学特性、生态学特性等方面均做了相关研究<sup>[24-27]</sup>,但对柳杉古树的整树水分利用特征的深入研究至今还未见报道。本文利用荷兰Hukseflux公司生产的热扩散探针(TDP),全年连续监测柳杉(*C. fortunei*)液流速率及其主要影响因子,分析柳杉液流的水分生理及其随时间变化的特征,揭示树木水分需求与周围环境因子的关系,为准确评价柳杉耗水特性和林地经营管理提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样地与样树

试验地位于浙江临安天目山龙峰尖生态定位观测站(30°20'N,119°23'E),地处中亚热带北缘向北亚热带过渡的丘陵山地,海拔1 067 m,土壤厚度50 cm,土壤为黄壤土、棕黄壤土。研究区属亚热带湿润季风气候,四季分明,气候温和,雨水充沛,光照适宜且复杂多变。年均气温8.8~14.8℃,年太阳辐射3 270~4 460 MJ/m<sup>2</sup>,年均降雨量1 390~1 870 mm,最热月平均气温19.9~28.1℃,最冷月平均气温-2.6~3.4℃,无霜期209~235 d,年雨日159.2~183.1 d,年雾日64.1~255.3 d。天目山森林类型属于亚热带常绿阔叶林,植物区系古老,有蕨类植物171种,种子植物1 641种<sup>[28]</sup>,是华东地区植被保存完好的地区之一。观测样地位于该站一片树龄古老的柳杉林,对样地内柳杉进行每木调查,本着古树保护的原则,根据试验要求选择干形通直、冠形良好、具有代表性的1株160 a生柳杉(*C. fortunei*)为测定样木,树高为21.6 m,胸径为75.6 cm。样树周围有玉兰(*Magnolia denudata*)、交让木(*Daphniphyllum macropodum*)、灯台树(*Bothrocaryum controversum*)等乔灌木,林下有阔叶山麦冬(*Liriope platyphyllo*)、吉祥草(*Reineckia carnea*)、翠云草(*Selaginella uncinata*)等地被植物。

### 1.2 研究方法

从2007年10月启动柳杉树干液流的自动监测,试验时间为2007年12月至2008年11月。2008

年12月,利用生长锥钻取木芯,测量柳杉样树边材面积为4 016.683 cm<sup>2</sup>。

1.2.1 树干液流的测定 树干液流用热扩散方法进行测定<sup>[29-30]</sup>。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) 求出树干边材的液流密度的连续变化:

$$\mu = 0.714 \times ((\Delta T_m - \Delta T) \div \Delta T)^{1.231} \quad (1)$$

式中: $\mu$ 为液流密度(mL·cm<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>); $\Delta T_m$ 为无液流时两探针最大温差(°C); $\Delta T$ 为两探针测定的温差(°C)。

1.2.2 环境因子的测定 利用观测铁塔测定林内的空气温度(°C)和相对湿度(%) (HMP45D Humidity and Temperature Sensor, Vaisala Oyj, Finland),林冠下空隙中的光合有效辐射( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (QS2 PAR Quantum Sensor, Delta-T Devices Ltd., U. K.),空气压强(hPa) (PTB100A Air pressure sensor, Vaisala Oyj, Finland),同步测定地面土壤温度(°C) (PT100, IMKO, Germany),土壤水分含量(%) (Soil Moisture Sensor, IMKO Micromodultechnik GmbH, Germany)。以上林内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2007年10月开始不间断测量,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。以上观测过程是通过太阳能电板(KC60 Multicrystal Photovoltaic Module, Kyocera, Germany)采集光能并通过蓄电池(12 V Lead Acid Batteries, IMKO, Germany)蓄电后,并直接供应 ENVIS 网络生态监测系统标准电压电量,持续每天进行观测。

1.2.3 数据处理 假定树干边材中液流密度处处相等,则单木液流速率 $F_s$ (g·min<sup>-1</sup>)可由下式计算:

$$F_s = \mu \times SA \times \rho \quad (2)$$

式中 $SA$ 为树干边材面积(cm<sup>2</sup>), $\rho$ 为水的密度(g·cm<sup>-3</sup>)。

单木日液流量 $F_d$ (kg·d<sup>-1</sup>)由下式计算:

$$F_d = 0.001 \times \sum_{i=1}^{48} F_{s_i} \times \Delta T \quad (3)$$

式中: $\Delta T$ 为采样时间间隔(min),在本研究中为30 min; $F_{s_i}$ 为第 $i$ 时刻的单木液流速率(g·min<sup>-1</sup>)。

单木月液流量 $F_m$ (kg)为:

$$F_m = \sum_{j=1}^n F_{d_j} \quad (4)$$

式中: $n$ 为每月的天数; $F_{d_j}$ 为该月第 $j$ 天的单木日液流量(kg·d<sup>-1</sup>)。

试验数据均采用 DPS V7.0 统计软件进行数据分析,采用 SigmaPlot 10 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同季节不同天气单木液流速率的平均日变化

2.1.1 晴天和阴天液流速率日变化 不同季节晴天和阴天单木液流速率的平均日变化见图1。在晴天,冬、春、夏、秋季液流速率开始升高的时间分别出现在06:00、06:00、03:00和04:00前后,峰值分别出现在午后15:00(111.26 g/min)、14:00(186.59 g/min)、13:30(135.57 g/min)、14:00(114.20 g/min)前后,液流速率无明显地停止时间。阴天与晴天相比,冬春两季液流速率开始升高的时间相对提前,而夏秋两季相对延迟。除冬季晴天、阴天液流速率峰值基本相等外,其它季节阴天峰值与晴天相比降低幅度明显,冬、春、夏、秋季液流速率开始升高的时间分别出现在05:30、03:30、05:30和06:30前后,峰值分别出现在午后14:00(108.83 g/min)、14:00(74.62 g/min)、14:30(80.89 g/min)、15:00(64.75 g/min)前后,回到低值的时间较晴天液流速率降幅显著,也没有明显的液流速率停止时间。

晴天,由冬季至夏季,液流速率开始升高的时刻逐渐提前,由夏季至冬季,液流速率开始升高的时刻逐渐延后,冬季平均液流速率启动时间与夏季相比表现为滞后3 h,而液流速率回到低值时间不明显,说明液流速率的持续时间与当地气候及昼长变化规律相对一致。夏季液流速率峰值出现的时间最早(13:30),冬季最晚(15:00),时间相差1.5 h,冬季气温对液流速率峰值出现时间起主要作用,而夏季温度升高、光辐射增强可能使液流峰值时间提前。

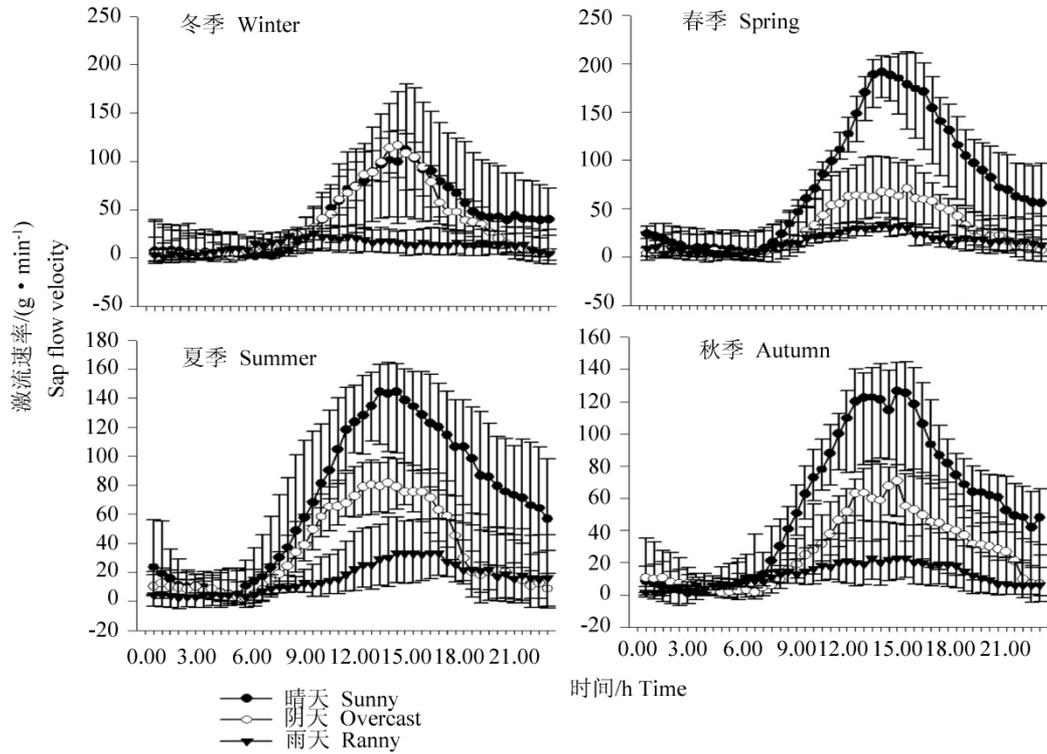


图1 四季晴天、阴天和雨天平均液流速率的日变化

Fig.1 Daily variations of mean sap flow velocity in sunny , overcast and rainy day in four seasons

2.1.2 雨天液流速率日变化 不同季节雨天单木液流速率的平均日变化见图1。雨天与晴、阴天相比较 树干液流变化幅度较小,液流速率相对稳定,峰值降低,无明显的日变化规律。冬季(2007-12—2008-02)、春季(2007-03—2008-05)、夏季(2007-06—2008-08)和秋季(2007-09—2008-11)雨天单木液流速率均值分别为(8.41 ± 0.71) g/min、(16.64 ± 1.01) g/min、(18.73 ± 1.06) g/min、(18.96 ± 1.29) g/min。

### 2.2 单木日液流量的年变化

根据2007-12—2008-11柳杉树干液流连续监测的数据,计算出柳杉单木日液流量的年变化动态

(图2)。由图2可知,2007年12月1日至2008年2月29日,是柳杉的非生长季节,日液流量数值小,在(44.92 ± 3.76) kg/d的低值水平上波动,12月30日最大(166.15 kg/d),1月16日最小(2.89 kg/d),变异系数0.80,该时期平均温度-0.5℃,低温可能是这一时期液流量小的主要限制因子;3月1日至5月31日,日液流量在(62.86 ± 3.86) kg/d变化,3月10日最大(160 kg/d),4月13日最小(5.89 kg/d),变化幅度为(154.11 kg/d),变异系数0.59,该时期太阳平均辐射强度高(67.4 μmol/(m² · s))、大气平均温度显著升高(11.4℃),土壤水分含量日际变幅增大;6月1日至8月31日,日液流量呈逐波下降的趋势,平均为(56.59 ± 3.85) kg/d,7月25日最大(180.86 kg/d),6月10日最小(1.73 kg/d),变化幅度为(179.13 kg/d),变异系数0.65,该时期为一年中温度最高(20.2℃)、

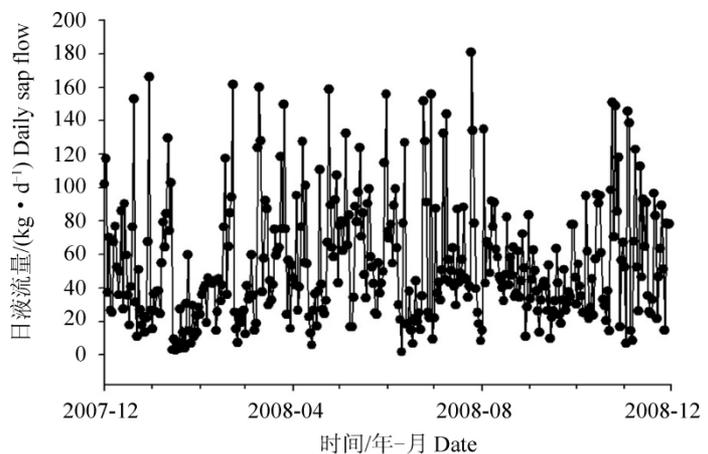


图2 2007-12—2008-11日液流量年变化

Fig.2 Annual variation of daily sap flow value from 2007-12 to 2008-11

该时期为一年中温度最高(20.2℃)、

太阳辐射强度为次高(41.7  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )的季节,土壤水分含量逐月降低,大气湿度相对较高;9月1日至11月30日,日液流量维持在(53.47  $\pm$  3.55) kg/d的水平,10月24日最大(151.03 kg/d),11月2日最小(6.81 kg/d),变化幅度为(144.22 kg/d),变异系数0.63,该时期大气温度逐渐降低,太阳辐射强度为全年最低(26.1  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )的季节,土壤水分含量继续下降,是液流速率降低的主要原因。

### 2.3 单木月液流量的年变化

单木月液流量(图3)表现为1月份最小,只有1064.30 kg,5月最大,达2122.62 kg。冬季(2007-12—2008-02)、春季(2007-03—2008-05)、夏季(2007-06—2008-08)和秋季(2007-09—2008-11)单木季液流量分别为4088.10 kg、5782.94 kg、5116.19 kg、4865.97 kg。

### 2.4 单木液流与环境因子的关系

2.4.1 单木液流速率与环境因子的关系 以单木液流速率为因变量,以林内光合有效辐射、气温、相对湿度、冠上水汽压、土壤温度、土壤水分含量为自变量,通过逐步线性回归分析,得如下回归方程:

$$\mu = 29.62828 + 0.01865 PAR + 11.21148 T_a - 0.60978 R_h - 8.62493 T_{S10} + 1.84008 C_s \quad (5)$$

( $F = 13.3476$ ,  $D_f = (5, 126)$ ,  $P < 0.01$ )

式中:  $PAR$  为林冠下空隙中的光合有效辐射( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $T_a$  为空气温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $R_h$  为空气相对湿度(%);  $T_{S10}$  为10 cm深处的土壤温度;  $C_s$  为土壤水分含量。

回归分析表明:液流速率与林冠下空隙中的光合有效辐射、空气温度和土壤水分含量为正相关,与空气相对湿度和10 cm深处的土壤温度为负相关,与冠上水汽压相关性不显著。其中,液流速率与空气温度、10 cm深处的土壤温度呈极显著性相关( $P < 0.01$ )。

2.4.2 单木日液流量与环境因子的关系 以单木日液流量为因变量,以林内光合有效辐射日总量、及气温、相对湿度、冠上水汽压、土壤温度、土壤水分含量等日均值为自变量,通过逐步线性回归分析,得如下回归方程:

$$\mu_d = -3.81372 + 0.00922 PAR + 3.40982 T_a - 0.91910 R_h - 3.89484 T_{S10} \quad (6)$$

( $F = 4.0622$ ,  $D_f = (4, 30)$ ,  $P < 0.01$ )

回归分析表明:日液流量与林冠下空隙中的光合有效辐射和空气温度为正相关,与空气湿度和10 cm深处的土壤温度为负相关,与冠上水汽压及土壤水分含量相关性不显著。其中,日液流量与林冠下空隙中的光合有效辐射呈显著性相关( $P < 0.05$ )。

2.4.3 单木月液流量与环境因子的关系 以单木月液流量为因变量,以林内光合有效辐射月总量、及气温、相对湿度、冠上水汽压、土壤温度、土壤水分含量等月均值为自变量,通过逐步线性回归分析,得如下回归方程:

$$\mu_m = -62278.33766 + 0.00036 PAR + 38.18519 T_a + 70.39811 P \quad (7)$$

( $F = 4.9722$ ,  $D_f = (3, 8)$ ,  $P < 0.05$ )

回归分析表明:单木月液流量与林冠下空隙中的光合有效辐射、空气温度、冠上水汽压为正相关,与相对湿度、土壤温度及土壤水分含量相关性不显著。其中,月液流量与林冠下空隙中的光合有效辐射呈极显著性相关( $P < 0.01$ ),与空气温度呈显著性相关( $P < 0.05$ )。

## 3 结论与讨论

(1) 由于乔木体形较大,要准确测定整树的蒸腾作用具有一定困难。因此,赵文飞等<sup>[1,16]</sup>、郭成久

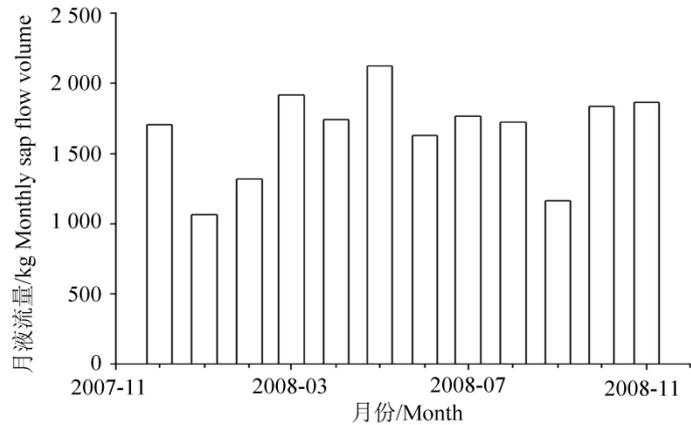


图3 月液流量的年变化

Fig. 3 Annual variation of monthly sap flow value

等<sup>[12]</sup>、聂立水等<sup>[13]</sup>、胡伟等<sup>[17]</sup>、曹文强等<sup>[18]</sup>都选择了具有代表性的单株样木进行树木液流的相关研究。而天目山拥有世界上规模最大的柳杉群落,古柳杉达2 000多株,树龄多集中在100~160 a,选择具有代表性的单木柳杉,研究其树木液流动态规律对古树保护具有重要价值。

(2) 柳杉树干液流日动态因季节及天气状况而异。全年不同季节中,晴、阴天气柳杉液流速率日变化均呈现为单峰型。晴天,由冬季至夏季,液流速率开始升高的时刻逐渐提前,由夏季至冬季,液流速率开始升高的时刻逐渐延后,而液流速率回到低值时间均不明显;阴天,冬春两季液流速率开始升高的时间比晴天提前,而夏秋两季比晴天相对延迟。除冬季晴、阴天气液流速率峰值接近外,其它季节阴天峰值与晴天相比降低幅度明显。雨天与晴天、阴天相比较,树干液流变化幅度较小,液流速率相对稳定,峰值降低,无明显的日变化规律,与孙龙等<sup>[31]</sup>研究42年生红松林雨天液流变化特征相似。本文中的分析结果表明:柳杉树干液流速率夜间存在但数值较低且依晴、阴及雨天递减,根压可能是柳杉液流夜间存在的原因<sup>[22,32]</sup>。

(3) 树干液流的日变化及其季节变化规律受到各种环境因子的影响。其中,太阳辐射以及由辐射影响的空气温度和大气湿度强弱,影响着植物的耗水量大小<sup>[33]</sup>。本研究结果发现,2007年12月—2008年11月观测期间春季日照时间最长,光合有效辐射季总量最大( $8\,935\,290\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ),其次为夏季( $5\,526\,510\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、冬季( $4\,200\,750\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )、秋季最低( $3\,422\,670\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ),从而使得树木液流速率在春季维持在较高的水平( $48.57\ \text{g}/\text{min}$ )。

(4) 由于树木液流的大小决定于生物学结构、土壤供水状况和气象因子,同一树种不同个体之间以及不同树种之间的边材和心材面积比率差异很大,即使具有相同或相似胸径,其液流密度差异也很大<sup>[34]</sup>。在冬、春、夏、秋季,柳杉日液流量分别为( $44.92 \pm 3.76$ ) kg/d、( $62.86 \pm 3.86$ ) kg/d、( $56.59 \pm 3.85$ ) kg/d、( $53.47 \pm 3.55$ ) kg/d,而柳杉季液流量分别为4 088.10 kg、5 782.94 kg、5 116.19 kg、4 865.97 kg。

(5) 回归分析表明,树木液流与环境因子的关系随研究尺度的不同而不同,影响瞬时液流速率的环境因子主要是空气温度、10 cm深处的土壤温度,影响日液流量的主要环境因子是林冠下空隙中的光合有效辐射,影响月液流量的主要环境因子为空气温度、林冠下空隙中的光合有效辐射。

#### 参考文献:

- [1] 赵文飞,王迎,王华田,等. 不同季节麻栎树干贮水量的动态变化[J]. 林业科学, 2007, 43(4): 115-120.
- [2] 王华田. 林木耗水性研究述评[J]. 世界林业研究, 2003, 16(2): 23-27.
- [3] 刘奉觉,郑世锴,巨关升,等. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究[J]. 林业科学, 1997, 33(2): 117-126.
- [4] Wullschlegel S D, Meinzer F C, Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in trees[J]. Tree Physiology, 1998, 18: 499-512.
- [5] Cohen Y, Fuchs M, Green G C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees[J]. Plant Cell Environ, 1981, 4: 391-397.
- [6] 马履一,王华田,林平. 北京地区几个造林树种耗水性比较研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 1-7.
- [7] 王华田,马履一. 利用热扩式边材液流探针(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.
- [8] Lambs L, Muller E. Sap flow and water transfer in the Garonne River riparian woodland, France: first results on poplar and willow[J]. Annual of Forest Science, 2002, 59: 301-315.
- [9] Grime V L, Morison J I L, Simmonds L P. Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1995, 74: 1-25.
- [10] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stands by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3: 309-320.
- [11] 胡伟,杜峰,徐学选,等. 黄土丘陵区刺槐树干液流动态分析[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1367-1373.
- [12] 郭成久,王莉,苏芳莉,等. 辽西樟子松树液流运动规律[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(7): 3-5.
- [13] 聂立水,李吉跃. 应用TDP技术研究油松树液流流速[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 49-56.
- [14] 郑怀舟,朱锦懋,李守中,等. 福建长汀土壤严重侵蚀马尾松树液流对台风天气的响应[J]. 亚热带植物科学, 2011, 40(1): 13-17.
- [15] Moren A S, Lindroth A, Flower Ellis J, et al. Branch transpiration of pine and spruce to tree and canopy using needle bio-

- mass distributions [J]. *Tree* 2000, 14: 384-397.
- [16] 赵文飞, 王华田, 卮立云, 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.
- [17] 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): 48-52.
- [18] 曹文强, 韩海荣, 马钦彦, 等. 山西太岳辽东栎夏季树干液流通量研究 [J]. *林业科学* 2004, 40(2): 174-177.
- [19] Braun P, Schmid J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.): 1. Stem morphology and use of the heat balance method [J]. *Plant and Soil*, 1999, 215: 39-45.
- [20] 于占辉, 陈云明, 杜盛. 黄土高原半干旱区侧柏 (*Platycladus orientalis*) 树干液流动态 [J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3970-3976.
- [21] 杜太生, 康绍忠, 张宝忠, 等. 石羊河流域干旱荒漠绿洲区不同滴灌模式下葡萄茎液流变化与环境因子的关系 [J]. *应用生态学报* 2008, 19(2): 299-305.
- [22] 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, 39(2): 1-7.
- [23] 刘文国, 刘玲, 张旭东, 等. 杨树人工林树干液流特性及其与影响因子关系的研究 [J]. *水土保持学报* 2010, 24(2): 96-101.
- [24] 夏爱梅, 达良俊, 朱虹霞, 等. 天目山柳杉群落结构及其更新类型 [J]. *浙江林学院学报*, 2004, 21(1): 44-50.
- [25] 王江, 刘军, 黄永强, 等. 柳杉起源及天然分布 [J]. *四川林业科技*, 2007, 28(4): 92-94.
- [26] 楼涛, 赵明水, 杨淑贞, 等. 天目山国家级自然保护区古树名木资源 [J]. *浙江林学院学报*, 2004, 21(3): 269-274.
- [27] 段文霞, 朱波, 卢静惠, 等. 川西山地人工柳杉-杉木混交林碳聚积效应研究 [J]. *四川环境*, 2008, 27(5): 57-63.
- [28] 丁炳扬, 潘承文. 天目山植物学实习手册 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
- [29] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems [J]. *Annals of Forest Science*, 1985, 42(2): 193-200.
- [30] 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.
- [31] 孙龙, 王传宽, 杨国亭, 等. 应用热扩散技术对红松人工林树干液流通量的研究 [J]. *林业科学*, 2007, 43(11): 8-14.
- [32] 李海涛, 陈灵芝. 应用热脉冲技术对棘皮桦和五角枫树干液流的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 1998, 20(1): 1-6.
- [33] 曹云, 黄志刚, 欧阳志云, 等. 南方红壤区杜仲 (*Eucommia ulmoides*) 树干液流动态 [J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 2888-2895.
- [34] 孙慧珍, 李夷平, 王翠, 等. 不同木材结构树干液流对比研究 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1434-1439.