

## 尾巨桉旱雨两季树干液流特征分析

王志超, 竹万宽, 杜阿朋

(国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

**摘要:** 为正确认识桉树的耗水规律, 为桉树栽培及抚育提供指导, 采用热扩散茎流计(德国, SF-G)对尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* 树干液流进行连续监测, 分析其旱雨两季特征差异, 并同步测定林分气象条件, 分析旱雨两季树干液流与气象因子之间的相关性。结果表明: 旱雨两季树干液流日变化均呈典型单峰曲线, 雨季启动时间和达到峰值的时间(7: 15, 11: 30)均早于旱季(7: 45, 13: 00), 雨季峰值是旱季的 1.3 倍, 维持峰值的时间雨季大于旱季; 夜间液流密度及变化幅度旱雨两季均是前半夜大于后半夜, 且雨季夜间液流变化幅度和液流密度均大于旱季; 平均日通量和平均月通量雨季(3.99 kg·d<sup>-1</sup>, 122.40 kg·月<sup>-1</sup>)大于旱季(2.64 kg·d<sup>-1</sup>, 80.00 kg·月<sup>-1</sup>)。旱雨两季影响尾巨桉树干液流密度的主要气象因子相同, 均为水汽压亏缺、光合有效辐射、空气湿度和大气温度, 但雨季树干液流密度与风速呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 与降雨量呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 而旱季与两者之间无显著相关性。图 1 表 3 参 34

**关键词:** 森林生态学; 尾巨桉; 树干液流; 旱雨两季; 热扩散式探针法

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2017)02-0319-07

## Variation in stem sap flow of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* during rainy and dry seasons

WANG Zhichao, ZHU Wankuan, DU Apeng

(China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

**Abstract:** To examine water consumption of eucalypt plantation species and to provide guidance for plantation establishment and tending, sap flow of plantation grown *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* was continuously measured using the thermal diffusion stem flow meter (Germany, SF-G) which allowed analyses of water use characteristics during both dry and rainy seasons. Stand meteorological conditions were determined synchronously to enable a correlation analysis for differences between sap flow and meteorological factors in both dry and rainy seasons. Results showed that diurnal variations of sap flow displayed typical single-peaked curves in both dry and rainy seasons. The start (07:15) and peak (11:30) times for sap flow during the rainy season were earlier than those in the dry season (07:45 and 13:00) with the peak sap flow in the rainy season being 1.3 times more than in the dry season. Time duration for relatively high levels of flow were longer in the rainy season than in the dry. In both dry and rainy seasons, variation and total stem sap flow observed during the first half of the night were significantly greater ( $P < 0.01$ ) than those observed after midnight. Likewise, the variation in total stem sap flow observed during the entire rainy season was significantly greater ( $P < 0.01$ ) than that observed during the dry season. The average daily (3.99 kg·d<sup>-1</sup>) and monthly (122.4 kg·month<sup>-1</sup>) fluxes during rainy season were significantly greater ( $P < 0.05$ ) than fluxes in the dry season (daily-2.64 kg·d<sup>-1</sup> and monthly-

收稿日期: 2016-03-18; 修回日期: 2016-05-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31300383); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2014QB024); 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站运行补助(2016-LYPT-DW-126)

作者简介: 王志超, 助理研究员, 从事生态水文研究。E-mail: wzc2254@163.com。通信作者: 杜阿朋, 副研究员, 博士, 从事森林生态学研究。E-mail: dapzj@163.com

80.00 kg·month<sup>-1</sup>). The main meteorological factors, such as vapor pressure deficit, photosynthetically active radiation (PAR), air humidity, and air temperature, were not correlated to seasonal sap flow of *E. urophylla* × *E. grandis*. However, flow density during the rainy season was highly significant ( $P < 0.01$ ) and positively correlated ( $r = 0.39$ ) with wind velocity and significantly ( $P < 0.05$ ) and negatively correlated ( $r = -0.08$ ) with rainfall. The above results show that the rainy season is a fast growth period of *E. urophylla* × *E. grandis*, with high water consumption, also is the important period for water and fertilizer management. [Ch, 1 fig. 3 tab. 34 ref.]

**Key words:** forest ecology; *E. urophylla* × *E. grandis*; stem sap flow; rainy and dry season; thermal dissipation probe (TDP)

水分是植物生长的重要影响因子之一。蒸腾作用作为植物吸水的主要动力,耗水占植物根部吸收水分的99%以上,因此,定量研究植物的蒸腾耗水一直是树木生理生态学和生态水文研究的重要方向<sup>[1-3]</sup>。热扩散探针法(thermal dissipation probe, TDP)利用热电转换原理,对自然生长状态下的植物进行连续树干液流测定,继而推算出单株和林分的蒸腾耗水<sup>[4]</sup>,已得到国内外很多学者的认可<sup>[5-8]</sup>。桉树作为四大速生树种之一,具有速生丰产、耐贫瘠、干形通直等特点,是中国南方最主要的造林树种之一<sup>[9]</sup>。对桉树耗水的研究一直存在很多争议<sup>[10-11]</sup>,一种观点认为大面积栽植桉树会造成水土流失,地下水位下降<sup>[12]</sup>;另一观点肯定了桉树对水分和养分的利用率,并论证了建立桉树生态林的可能性和可行性<sup>[13]</sup>,因此,研究桉树的蒸腾耗水具有重大的科学意义。很多学者都对此展开研究,张宁南<sup>[14]</sup>研究了尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 液流密度及其耗水特征, VERTESSY 等<sup>[15]</sup>与 WULLSCHEGER 等<sup>[16]</sup>研究了王桉 *Eucalyptus regnans* 的树干液流动态,孙振伟等<sup>[17]</sup>对柠檬桉 *Corymbia citriodora* 水分利用特征的季节动态进行了研究。其他树种如柳杉 *Cryptomeria fortunei*<sup>[18]</sup>, 杉木 *Cunninghamia lanceolata*<sup>[19]</sup>, 杨树 *Populus*<sup>[20]</sup> 和 马占相思 *Acacia mangium*<sup>[6]</sup> 等的树干液流特征及影响因子的研究也较多。尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* 是桉树属最具有代表性的树种之一,广泛栽植于广东、广西等地,目前对尾巨桉蒸腾耗水的研究停留在阶段性观测上,对树干液流特征的长期连续观测很少,更未有针对中国南方地区旱雨两季尾巨桉的液流差异性的分析研究,仅有王文等<sup>[21]</sup>研究尾巨桉2个月树干液流特性及影响因子。由于桉树的栽植区域大多存在典型的旱季雨季之分,因此,本研究在之前工作的基础上采用 Granier 热扩散探针法对2年生尾巨桉树干液流连续观测,结合自动气象观测站对环境因子作同步测定,以期揭示尾巨桉旱雨两季蒸腾耗水特征的差异,为正确认识桉树的耗水问题提供数据支持,为桉树栽培及抚育提供指导。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广东省湛江市桉树森林生态系统国家定位观测站(21°30'N, 111°38'E),平地,海拔为80 m,属热带海洋性气候,年降水量为1 200.0~1 700.0 mm。全年降雨多集中在5~10月,占全年降水量的77%~85%,具有典型旱雨两季;年平均气温为23.0℃左右,最低气温0℃以上;太阳年辐射总量4 240 MJ·m<sup>-2</sup>左右,多年平均相对湿度在80%以上。试验区土壤类型主要是玄武岩砖红壤,土层厚度2.0 m以上,0~80 cm土层内平均有机质含量16.0 g·kg<sup>-1</sup>以上,pH 4.5~5.3,土壤肥力属中等水平。乔木层主要是尾巨桉 *E. urophylla* × *E. grandis*,少量台湾相思 *Acacia confusa*;灌木层有鹅掌柴 *Schefflera octophylla*,白背叶 *Mallotus apelta*,马缨丹 *Lantana camara*等,草本层较为丰富。试验地造林树种为尾巨桉无性系32-29,造林密度1 666株·hm<sup>-2</sup>,造林时间为2012年7月,造林面积为2.0 hm<sup>2</sup>,造林方式为挖穴造林;其中2年生林分的平均胸径为8.48 cm,平均树高为9.78 m,平均冠幅为3.14 m × 3.60 m(东西 × 南北),叶面积指数平均为4.16。

### 1.2 研究方法

选取20 m × 20 m的试验样地,选择生长状况良好、树干通直无挤压、无病虫害的标准木3株实施树干液流连续监测,监测时间2014年8月-2015年8月。样木各项参数见表1。

树干液流的测定采用 Granier 热扩散法。由于样树胸径较小,茎流传感器采用2针型探针传感器

表 1 样木基本情况

Table 1 Basic conditions of the sample trees

样木编号	胸径/cm	树高/m	皮厚/cm	边材面积/cm <sup>2</sup>	树干位点高度/m	测定方位
1	9.6	10.8	0.3	32.9	1.3	北
2	8.3	9.8	0.2	26.2	1.3	北
3	8.7	10.1	0.2	28.1	1.3	北

(型号 SF-G, 探针长度 33 mm, Ecomatik 公司, 德国), 在 1.3 m 处安装, 为避免不同方向上的液流差异同时防止日晒的影响, 探针均安装在树干阴面, 且用防辐射铝箔覆盖。采用美国 Campbell 公司的 CR3000 数据采集器采集数据, 采集间隔为 30 min。环境因子通过林外自动气象观测场同步测定, 且所有气象数据均换算成 30 min 内的平均值, 与液流数据一一对应。

### 1.3 数据处理

1.3.1 液流密度 液流密度取 3 株样木平均值分析作图, 其中液流密度根据通用的 GRANIER<sup>[22]</sup>液流公式进行计算。 $J_s = 0.0119K^{1.231} \times 3600$ ;  $K = (\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T$ 。其中:  $J_s$  为液流密度, 是指单位边材面积单位时间内的液流量( $\text{mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ );  $\Delta T_{\max}$  为无液流时加热探针与参考探针的最大温差值,  $\Delta T$  为测定温差值。

1.3.2 边材面积 边材面积无法在树木生长的情况下直接测量, 只能通过生长锥测定胸径处的边材厚度, 然后量取胸径和树皮厚度, 来计算边材面积。为避免生长锥对样树的影响, 在试验地随机选取 30 株树木测定, 建立起边材面积与胸径的关系方程, 来推算样树和整个林分的边材面积。得到方程:  $A_s = 0.438D^2 - 2.701D + 18.48$ 。其中:  $A_s$  为边材面积( $\text{cm}^2$ ),  $D$  为胸径( $\text{cm}$ ), 然后通过样树胸径计算样树边材面积(表 1)。

1.3.3 树木的液流量(单株尺度) 树木的液流量指单位时间树木的蒸腾耗水量, 计算公式为:  $F_i = J_s \times A_s \times 10^{-3}$ 。 $F_i$  为液流量( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 根据相应时间尺度分为日通量( $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ )和月通量( $\text{kg} \cdot \text{月}^{-1}$ )。

### 1.4 统计分析

应用 Excel 和 SPSS 统计软件对所有数据进行分析并作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 尾巨桉旱雨两季树干液流变化分析

对旱雨两季液流密度所有日平均值分析并作图(图 1)。可以看出: 尾巨桉树干液流密度呈现“昼高夜低”的变化规律, 白天变化幅度较大, 出现典型的宽峰形曲线。液流启动时间雨季为 7:15 左右, 比旱季启动时间早 0.5 h; 从到达峰值时间来看, 雨季为 11:30, 比旱季到达峰值早 1.5 h; 从峰值来看, 雨季为  $13.69 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 是旱季的 1.30 倍; 从日平均液流密度看, 雨季全年平均值  $5.75 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 是旱季的 1.43 倍; 液流迅速下降时间雨季为 17:30, 比旱季晚 1.0 h 左右, 即雨季峰形要宽于旱季。

分析夜间液流发现, 旱雨两季夜晚尾巨桉均存在较大的液流现象, 且前半夜的液流密度比后半夜要大, 变化幅度也较大, 后半夜液流密度较小且平稳。推测原因可能是后半夜树干水分接近饱和, 夜晚水分补充的时间主要为前半夜。夜间液流现象主要由根压引起的, 白天蒸腾所引起的水分缺失, 会导致根压增大, 为保持体内水分平衡<sup>[23-24]</sup>, 水分会以主动方式吸收进入植物。图 1 还显示夜间树干液流密度雨季要大于旱季, 变化幅度也明显大于旱季, 推测原因可能是白天蒸腾作用雨季大于旱季, 造成根压也是雨季大于旱季, 从而导致夜间液流密度雨季大于旱季。

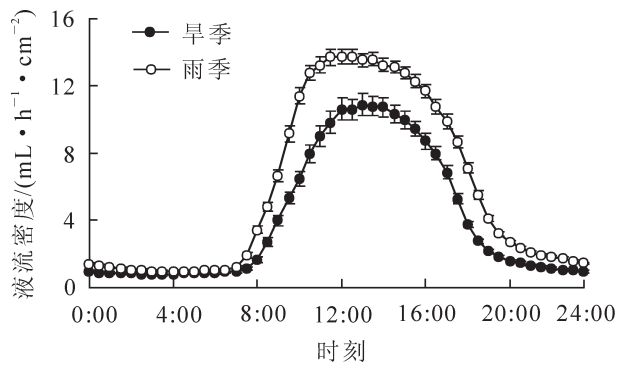


图 1 尾巨桉树干液流旱雨两季液流变化特征及差异  
Figure 1 Features and differences of sap flow in daytime during both rainy and dry seasons of *E. urophylla* × *E. grandis*

## 2.2 尾巨桉旱雨两季日通量与月通量差异分析

对尾巨桉旱雨两季日通量的分析可以看出(表2), 雨季最大日通量  $5.93 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ , 为旱季的 1.30 倍; 雨季最小日通量为  $0.66 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ , 是旱季的 6.00 倍。对旱雨两季平均日通量计算得知, 雨季平均日通量为  $3.99 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ , 是旱季的 1.50 倍; 平均月通量差异较大, 雨季达到  $122.4 \text{ kg}\cdot\text{月}^{-1}$ , 为旱季的 1.53 倍。

表2 尾巨桉旱雨两季日通量与月通量特征

Table 2 Daily and month sap flow volume of *E. urophylla* × *E. grandis* in both rainy and dry seasons

季节	最大日通量/( $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ )	最小日通量/( $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ )	平均日通量/( $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ )	平均月通量/( $\text{kg}\cdot\text{月}^{-1}$ )
雨季	5.93	0.66	$3.99 \pm 0.17$	$122.40 \pm 3.79$
旱季	4.65	0.11	$2.64 \pm 0.26$	$80.00 \pm 7.45$

## 2.3 尾巨桉旱雨两季树干液流影响因子分析

树干液流密度变化除了受到树木生物学结构影响外, 还受到周围气象因子的制约<sup>[25-26]</sup>。对雨季和旱季各月份树干液流密度与各气象因子指标作 Pearson 相关分析, 结果如表3。雨季树干液流密度与大气温度、风速、光合有效辐射以及水汽压亏缺呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.79, 0.39, 0.91, 0.79; 与降雨量呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 相关系数为 0.08, 而与空气湿度呈极显著负相关( $P < 0.01$ ), 相关系数为 0.66, 影响因子相关系数大小排序为光合有效辐射 > 水汽压亏缺、大气温度 > 空气湿度 > 风速 > 降水; 旱季树干液流密度与大气温度、光合有效辐射和水汽压亏缺呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.43, 0.91, 0.81, 与空气湿度呈极显著负相关( $P < 0.01$ ), 相关系数为 0.61, 各影响因子的相关系数大小排序为光合有效辐射 > 水汽压亏缺 > 空气湿度 > 大气温度, 而与风速和降水无显著相关性, 造成差异的原因推测是旱季由于土壤水分供给能力的降低, 干扰了部分环境因子对树干液流的影响。

表3 尾巨桉旱雨两季液流密度与各气象因子的相关分析

Table 3 The analysis of correlation between sap flow density in rainy and dry seasons and meteorological factors of *E. urophylla* × *E. grandis*

季节	大气温度	空气湿度	风速	光合有效辐射	降水	水汽压亏缺
雨季	0.79**	-0.66**	0.39**	0.91**	-0.08*	0.79**
旱季	0.43**	-0.61**	-0.06	0.91**	-0.03	0.81**

说明: \*\*为 0.01 水平上极显著相关, \*为 0.05 水平上显著相关。

由此可知: 影响尾巨桉旱雨两季树干液流密度的主要气象因子基本相同, 分别是水汽压亏缺、光合有效辐射、空气湿度和大气温度, 其中空气湿度极显著负相关, 其余为极显著正相关; 旱雨两季树干液流与气象因子间的相关性也有些许差异, 雨季树干液流密度与风速极显著正相关, 与降水量显著负相关, 但旱季液流密度与两者之间的相关性不显著。

## 3 结论与讨论

对 2~3 年生尾巨桉旱雨两季树干液流的研究表明: 旱雨两季树干液流均呈昼高夜低的变化趋势, 其中日变化呈明显的单峰曲线, 这与王文等<sup>[21]</sup>和任世奇等<sup>[27]</sup>对尾巨桉的研究结果一致。旱雨两季树干液流特征差异明显, 主要表现在雨季白天启动时间和到达峰值的时间均早于旱季, 液流峰值和维持液流高峰的时间雨季明显大于旱季。王小菲等<sup>[28]</sup>对大叶相思 *Acacia auriculaeformis* 干湿季树干液流研究认为, 湿季光照强, 气温高, 相对湿度高, 代谢旺盛且有充分的水分供给, 是湿季液流速率平均值和峰值均大于旱季的原因; 其液流启动时间、到达峰值时间、液流变慢至低谷的时间表现出的差异性与本研究结果均一致, 分析原因可能是雨季太阳辐射增强时间较早, 下降时间晚, 且日平均气温及日平均辐射强度较大, 使得雨季白天蒸腾速率大于旱季。

尾巨桉夜间也存在较大的液流现象, 依据 GOLDSTEIN 等<sup>[29]</sup>的理论, 此时的液流活动是树体在存储水分, 以弥补日间蒸腾引起的水分亏缺, 研究发现旱雨两季夜间液流密度及变化幅度前半夜均大于后半夜, 说明前半夜是水分补充的主要时期, 这与王艳兵等<sup>[30]</sup>对华北落叶松夜间液流特征的研究结果一致; 雨季夜晚液流密度、变化幅度均大于旱季, 这与王华等<sup>[31]</sup>对马占相思 *Acacia mangium* 夜间液流变化幅

度干季大于湿季的研究结果不同,原因可能是土壤供水情况和树木本身的生物学结构不同。

旱雨两季液流最大日通量、最小日通量、平均日通量雨季均大于旱季,且雨季平均月通量( $122.4 \text{ kg} \cdot \text{月}^{-1}$ )达到旱季的 1.53 倍,推测原因是雨季雨热同期,树木蒸腾速率较大;这与肖以华等<sup>[32]</sup>对马占相思树旱雨两季液流特征的研究结果一致。以上结果也可以确定雨季尾巨桉生长活跃,耗水量大,是水肥管理的重要时期。

旱雨两季影响尾巨桉树干液流密度的影响因子不完全相同,但主要气象因子相同。王瑞辉等<sup>[33]</sup>通过对元宝枫 *Acer truncatum* 生长旺季树干液流影响因素的分析发现,边材液流在不同的观测时段影响因子不完全相同,但在任何情况下气温都是影响液流的主导因子;黄德卫等<sup>[34]</sup>对鼎湖山针阔叶树种的研究中则有不同观点,他发现湿季影响各树种液流速率的主导环境因子为光合有效辐射,而干季影响各树种液流速率的主导环境因子则是气温。由此可见,随着时空位移的变化,影响树干液流的环境因子也会随季节变化而变化。

#### 4 参考文献

- [1] 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.  
HU Wei, DU Feng, XU Xuexuan, et al. Dynamic changes of *Robinia pseudoacacia* sap flow in hilly-gully region of Loess Plateau [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21(6): 1367 - 1373.
- [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.  
WANG Huatian. Review of tree species water consumption [J]. *World For Res*, 2003, 16(2): 23 - 27.
- [3] 凡超,邱燕萍,李志强,等.荔枝树干液流速率与气象因子的关系[J].生态学报,2014,34(9):2401-2410.  
FAN Chao, QIU Yanping, LI Zhiqiang, et al. Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(9): 2401 - 2410.
- [4] OGUNTUNDE P G. Whole-plant water use and canopy conductance of cassava under limited available soil water and varying evaporative demand [J]. *Plant Soil*, 2005, 278(1): 371 - 383.
- [5] NICOLAS E, TORRECILLAS A, ALARCON J J. Using sap flow measurements to quantify water consumption in apricot trees [J]. *Acta Hort*, 2006, 717: 37 - 40
- [6] 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.  
MA Ling, ZHAO Ping, RAO Xingquan, et al. Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 25(9): 2145 - 2151.
- [7] FIORA A, CESCATTI A. Diurnal and seasonal variability in radial distribution of sap flux density: implications for estimating stand transpiration [J]. *Tree Physiol*, 2006, 26(9): 1217 - 1225.
- [8] KUMAGAI T, SAITOH T M, SATO Y, et al. Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effects [J]. *J Hydrol*, 2004, 287(1/4): 237 - 251.
- [9] 王志超.不同整地措施对桉树幼林生长及林地环境变化的影响[D].北京:中国林业科学研究院,2014.  
WANG Zhichao. *The Impact of Different Soil Preparation Measures on the Growth and Environment Change of Young Eucalypt Plantation* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [10] CALDER I R. Water use of eucalypts: a review [G] //CALDER I R, HALL R L, ADLARD P G, et al. *Growth and Water Use of Forest Plantation*. New York: John Wiley and Sons, 1992: 167 - 179.
- [11] 时忠杰,徐大平,张宁南,等.桉树人工林水文影响研究进展[J].林业科学,2009,45(11):135-140.  
SHI Zhongjie, XU Daping, ZHANG Ningnan, et al. Progress in researches on hydrological effects of *Eucalyptus* plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, 45(11): 135-140.
- [12] 于福科,黄新会,王克勤,等.桉树人工林生态退化与恢复研究进展[J].中国生态农业学报,2009,17(2):393-398.  
YU Fuke, HUANG Xinhui, WANG Keqin, et al. An overview of ecological degradation and restoration of *Eucalyptus* plantation [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2009, 17(2): 393 - 398.
- [13] FORRESTER D I, THEIVEYANATHAN S, COLLOPY J J, et al. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation [J]. *For Ecol Manage*, 2010, 259(9): 1761 - 1770.

- [14] 张宁南. 广东桉树人工林耗水量研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.  
ZHANG Ningnan. *Studies on Water Use of Eucalyptus Plantations in Guangdong* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [15] VERTESSY R A, HATTON T J, REECE P, *et al.* Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique [J]. *Tree Physiol*, 1997, **17**(12): 747 – 756.
- [16] WULLSCHEGER S D, HANSON P J, TODD D E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow technique [J]. *For Ecol Manage*, 2001, **143**(1/3): 205 – 213.
- [17] 孙振伟, 赵平, 牛俊峰, 等. 外来引种树种大叶相思和柠檬桉树干液流和蒸腾耗水的季节变异[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(10): 2588 – 2595.  
SUN Zhenwei, ZHAO Ping, NIU Junfeng, *et al.* Seasonal variations of sap flow and transpiration water consumption of introduced tree species *Acacia auriculaeformis* and *Eucalyptus citriodora* [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33**(10): 2588 – 2595.
- [18] 蒋文伟, 郭运雪, 杨淑贞, 等. 天目山柳杉古树的树干液流速率时空变化[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(6): 859 – 866.  
JIANG Wenwei, GUO Yunxue, YANG Shuzhen, *et al.* Temporal and spatial changes for sap flow velocity of *Cryptomeria fortunei* stems in National Nature Reserve of Mount Tianmu [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2012, **29**(6): 859 – 866.
- [19] 涂洁, 胡良, 刘琪璟, 等. 江西千烟洲杉木生长季树干液流特征及影响因子[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(2): 257 – 263.  
TU Jie, HU Liang, LIU Qijing, *et al.* Sap flow characteristics during the growing season for *Cunninghamia lanceolata* in red soil areas of Jiangxi Province [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2015, **32**(2): 257 – 263.
- [20] 刘文国, 刘玲, 张旭东, 等. 杨树人工林树干液流特征及其与影响因子关系的研究[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(2): 95 – 101.  
LIU Wenguo, LIU Ling, ZHANG Xudong, *et al.* Characteristics of sap flow and its relation to influencing factors in poplar plantation [J]. *J Soil & Water Conserv*, 2010, **24**(2): 95 – 101.
- [21] 王文, 朱焯, 诸葛绪霞, 等. 尾巨桉树干液流特性及其影响因子分析[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(3): 159 – 164.  
WANG Wen, ZHU Ye, ZHUGE Xuxia, *et al.* Stem sap flow characters of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* and its influence factors [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2013, **33**(3): 159 – 164.
- [22] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiol*, 1987, **3**(4): 309 – 320.
- [23] 蒋文伟, 杨广远, 赵明水, 等. 天目山柳杉树干液流的昼夜及季节变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, **36**(5): 77 – 80.  
JIANG Wenwei, YANG Guangyuan, ZHAO Mingshui, *et al.* Diurnal and seasonal variation of stem sap flow for *Cryptomeria fortunei* in Mount Tianmu [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2012, **36**(5): 77 – 80.
- [24] 尹立河, 黄金廷, 王晓勇, 等. 陕西榆林地区旱柳和小叶杨夜间树干液流变化特征分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, **41**(8): 85 – 90.  
YIN Lihe, HUANG Jinting, WANG Xiaoyong, *et al.* Characteristics of night time sap flow of *Salix matsudana* and *Populus simonii* in Yulin, Shaanxi [J]. *J Northwest A & F Univ Nat Sci Ed*, 2013, **41**(8): 85 – 90.
- [25] 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.  
SUN Pengsen, MA Lüyi, WANG Xiaoping, *et al.* Temporal and spacial variation of sap flow of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) [J]. *J Beijing For Univ*, 2000, **22**(5): 1 – 6.
- [26] 夏永秋, 邵明安. 黄土高原半干旱区柠条(*Caragana korshinskii*)树干液流动态及其影响因子[J]. 生态学报, 2008, **28**(4): 1376 – 1382.  
XIA Yongqiu, SHAO Ming'an. The sap flow dynamics of *Caragana korshinskii* and the influence of environmental factors in semi-arid region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(4): 1376 – 1382.
- [27] 任世奇, 邓紫宇, 郭东强, 等. 尾巨桉液流密度动态及其影响因子分析[J]. 森林与环境学报, 2016, **36**(1): 1 – 7.

- REN Shiqi, DENG Ziyu, GUO Dongqiang, *et al.* Dynamics of sap flow density of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and relationship with environmental factors [J]. *J For Environ*, 2016, **36**(1): 1 – 7.
- [28] 王小菲, 孙永玉, 李昆, 等. 干热河谷大叶相思树干液流季节动态及其与气象因子的关系[J]. 林业科学研究, 2013, **26**(2): 145 – 150.
- WANG Xiaofei, SUN Yongyu, LI Kun, *et al.* Stem sap flow characteristics of *Acacia auriculaeformis* in Dry-hot Valley and their relations to meteorological factors [J]. *For Res*, 2013, **26**(2): 145 – 150.
- [29] GOLDSTEIN G, ANDRADE J L, MEINZER F C, *et al.* Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees [J]. *Plant Cell Environ*, 1998, **21**(4): 397 – 406.
- [30] 王艳兵, 德永军, 熊伟, 等. 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局[J]. 生态学报, 2013, **33**(5): 1375 – 1385.
- WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, *et al.* The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(5): 1375 – 1385.
- [31] 王华, 赵平, 王权, 等. 马占相思夜间树干液流特征和水分补充现象的分析[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(4): 476 – 482.
- WANG Hua, ZHAO Ping, WANG Quan, *et al.* Characteristics of nighttime sap flow and water recharge in *Acacia mangium* trunk [J]. *Chin J Ecol*, 2007, **26**(4): 476 – 482.
- [32] 肖以华, 陈步峰, 陈嘉杰, 等. 马占相思树干液流的研究[J]. 林业科学研究, 2005, **18**(3): 331 – 335.
- XIAO Yihua, CHEN Bufeng, CHEN Jiajie, *et al.* A study on the stem sap flow of *Acacia mangium* [J]. *For Res*, 2005, **18**(3): 331 – 335.
- [33] 王瑞辉, 马履一, 奚如春, 等. 元宝枫生长旺季树干液流动态及影响因素[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(3): 231 – 237.
- WANG Ruihui, MA Lüyi, XI Ruchun, *et al.* Fluctuation of *Acer truncatum* sap flow in rapid growth season and relevant variables [J]. *Chin J Ecol*, 2006, **25**(3): 231 – 237.
- [34] 黄德卫, 张德强, 周国逸, 等. 鼎湖山针阔叶混交林优势种树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(5): 1159 – 1166.
- HUANG Deiwei, ZHANG Deqiang, ZHOU Guoyi, *et al.* Characteristics of dominant tree species stem sap flow and their relationships with environmental factors in a mixed conifer-broadleaf forest in Dinghushan, Guangdong Province of South China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(5): 1159 – 1166.