

天目山柳杉的茎干液流特征

赵丽娟¹, 蒋文伟¹, 杨淑贞², 赵明水², 温国胜³

(1. 浙江林学院 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;
3. 浙江林学院 林业与生物技术学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 利用 Envis 网络生态监测系统, 对天目山柳杉 *Cryptomeria fortunei* 古树的茎干液流特征及环境因子的动态变化进行了监测, 并对柳杉古树茎干液流速率的日变化、月变化进行分析。结果表明: 柳杉古树茎干液流速率的日变化呈单峰或多峰曲线, 并有明显的昼夜变化规律, 茎干液流随环境因子的变化而波动。冬季的平均茎干液流速率在 11 月份最大, 为 $56.7 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 比 2 月份高 $22.9 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。晴天茎干液流变化幅度较大, 雨天茎干液流变化幅度较小。柳杉古树的茎干液流速率与环境因子之间经关联度分析得出: 茎干液流速率与光合有效辐射关系最为密切, 其次为气温和空气相对湿度。图 5 表 1 参 26

关键词: 植物学; 柳杉; 茎干液流; 环境因子

中图分类号: S718.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2009)02-0169-07

Stem sap flow of *Cryptomeria fortunei* in Mount Tianmu National Nature Reserve

ZHAO Li-juan¹, JIANG Wen-wei¹, YANG Shu-zhen², ZHAO Ming-shui², WEN Guo-sheng³

(1. School of Landscape Architecture, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Management office, National Nature Reserve of Mount Tianmu, Lin'an 311311, Zhejiang, China; 3. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: The group of *Cryptomeria fortunei* trees in the Mount Tianmu Nature Reserve of Zhejiang Province fall into a decline. In order to find out their life activities, the diurnal and monthly variations of stem sap flow in old growth *C. fortunei* and environmental factors in the Mount Tianmu Nature Reserve were measured using the Environmental Information System (ENVIS) ecological environment monitoring network. Results showed that the daily change in stem sap flow velocity of declining *Cryptomeria fortunei* displayed single peak or multi-peaked curves with an obvious day and night rhythmic variation that fluctuated with environmental factors. For seasonal variation, the maximum average stem sap flow was $56.7 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ in November, which was $22.9 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ more than in February ($33.8 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$). Also, the range of stem sap flow in the sunshine was greater than for a rainy day. The main environmental factors related to stem sap flow velocity were 1) photosynthetic active radiation(PAR) ($r = 0.913$) and 2) air temperature ($r = 0.903$) and relative humidity ($r = 0.897$). [Ch, 5 fig. 1 tab. 26 ref.]

Key words: botany; *Cryptomeria fortunei*; stem sap flow; environmental factor

柳杉 *Cryptomeria fortunei* 属于杉科 Taxodiaceae 柳杉属 *Gryptomeria* 常绿乔木, 在水土保持, 保护土壤结构, 保持物种多样性等方面发挥着巨大的生态作用, 对二氧化硫、氯气、氟化氢等有良好的抗

收稿日期: 2008-07-11; 修回日期: 2008-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30240033)

作者简介: 赵丽娟, 从事园林植物应用与效益研究。E-mail: zhaolijuanwf@163.com。通信作者: 蒋文伟, 副教授, 博士, 从事植物生态学与景观生态学研究。E-mail: wenweijiang@zjfc.edu.cn

性。柳杉是第三纪孑遗植物,为中国特有树种,也是南方优良的速生用材树种,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^[1]。天目山是国家级森林和野生动物类型的自然保护区和典型的森林生态系统,植物分布丰富,其中柳杉的数量最多,成为天目山独特的森林景观,是天目山“大树王国”的主体^[2],在天目山自然保护区具有极高的保护地位。自 20 世纪 90 年代初期以来,天目山的柳杉呈现衰退现象,数以百计的柳杉古树枯死,浓密的柳杉林变得稀疏,郁闭度降低。柳杉林的衰退不但影响了自然保护区的景观,同时也对保护区中的生物多样性造成了严重威胁。因此,探讨柳杉古树的生理机制对揭示目前柳杉的生命活动状况有重要意义。茎干液流是指通过茎干的水分养分的流动。液流的主要成分是水,具有特定的时空变化规律,并且受到空气温湿度、光合有效辐射、二氧化碳等多种因素的影响。但在不同的时空条件下,其影响的主导因子也会发生变化^[3-4]。近年来,对树木茎干液流方面,国内外许多学者进行了大量卓有成效的研究^[5-7]。空间上,对树木边材液流随树干高度不同、边材深度不同等变化规律进行了探索^[8-10];时间上,就不同树种茎干液流的日季变化规律等进行阐述^[6-7,11-12]。根据植物树干液流推测树木的蒸腾耗水量^[13-18];通过研究了不同环境胁迫条件下植物茎干液流的变化与植物茎直径的关系^[19-23],分析在茎干液流的变化中不同环境因子的影响情况。目前,对柳杉古树生理的研究较少,主要是寻找柳杉林衰退的原因^[1,24],而从茎干液流方面,揭示柳杉古树生理机制的研究还属于空白。笔者对柳杉古树的实时监测,探讨其茎干液流变化与环境因子之间的动态响应关系,为揭示目前的生命活动状况和衰退趋势下的柳杉生理活动提供理论支持。

1 自然概况

试验地在天目山老殿景点北 20 m 的平地,地处 30°20'32"N, 119°26'01"E,坡向南,海拔 1 067 m,土壤厚度约为 50 cm,多为黄壤土、棕黄壤土,位于天目山国家级自然保护区境内,属中亚热带北缘向北亚热带的过渡地带,气候温暖湿润,雨水充沛。保护区年平均气温为 8.8 ~ 14.8 °C,最冷月平均气温-2.6 ~ 3.4 °C,最热月平均气温 19.9 ~ 28.1 °C,≥10 °C 积温 2 500 ~ 5 100 °C,无霜期 209 ~ 235 d,年均降水量 1 390 ~ 1 870 mm。保护区内植物区系古老,有蕨类植物 171 种,种子植物 1 641 种(包括亚种、变型)^[25],是当今华东地区植被保存较完好的地区之一。试验地属于亚热带常绿针叶林,植物的构成比重较简单,10 m 以上乔木主要有柳杉和玉兰 *Magnolia denudata*, 5 m 以上树木主要有交让木 *Daphniphyllum macropodum*, 玉兰,灯台树 *Bothrocaryum controversum* 等乔木,林下有阔叶山麦冬 *Liriope muscari*,吉祥草 *Reineckia camea*,翠云草 *Selaginella uncinata* 等地被植物和落叶覆盖。

2 材料与方法

2.2 仪器安装

选取约有 200 a 树龄、无虫害的柳杉古树作为测试样株。选取测试样株距地面 1.5 m 的部位(胸径 74 cm),用铼刀将柳杉树皮除去,至露出木质部,按照 Envis 网络生态监测系统说明书的步骤安装茎流探针,自动连续记录两探针间的温度差。同时安装监测其他环境因子(气温、空气相对湿度、二氧化碳质量分数、光合有效辐射等)的传感器模块,将电源线、茎干液流探针馈线和各传感器模块与数采器(TRIME-Logger)连接。从 2007 年 10 月起持续不断测量,数据采集时间间隔设为 30 min。将电脑与数采器连接,定期下载数据资料,间隔时间长短由采集密度和数采器内存大小而定。根据仪器生产厂家提供的使用手册的计算程序,计算柳杉茎干液流速率。使用 Excel 对数据进行分析 and 作图。

2.2 关联分析方法描述

运用灰色系统理论中的关联分析方法,通过数据、时间序列的映射进行处理分析变量及其变化规律。用关联度来表示 2 个事物发展过程中的关联程度。设有参考数列{ $X_0(t)$ },比较数列{ $X_i(t)$ },其中 $i = 1, 2, 3, \dots, m$; $t = 1, 2, 3, \dots, n$,即:

$$\{X_0(t)\} = \{X_0(1), X_0(2), X_0(3), \dots, X_0(n)\}$$

$$\{X_i(t)\} = \{X_i(1), X_i(2), X_i(3), \dots, X_i(n)\}$$

$$\{X_2(t)\} = \{X_2(1), X_2(2), X_2(3), \dots, X_2(n)\}$$

...

$$\{X_m(t)\} = \{X_m(1), X_m(2), X_m(3), \dots, X_m(n)\}。$$

记 t 时刻的 $X_i(t)$ 与 $X_0(t)$ 的关联系数为 $R_i(t)$ 。则:

$$R(t) = \min \min \Delta_i(t) + K \max \max \Delta_i(t) / \{\Delta_i(t) + K \max \max \Delta_i(t)\}。 \quad (1)$$

式(1)中 K 为分辨系数, K 的区间为 $[0, 1]$, 文中取 $K = 0.5$ 。 $\min \min \Delta_i(t)$ 表示 $\{X_0(t)\}$ 与 $\{X_i(t)\}$ 各因素间的 2 级最小差的绝对值, 即:

$$\min \min \Delta_i(t) = \min \min |X_0(t) - X_i(t)|。 \quad (2)$$

$\max \max \Delta_i(t)$ 表示 $\{X_0(t)\}$ 与 $\{X_i(t)\}$ 各因素间的 2 级最大差的绝对值, 即:

$$\max \max \Delta_i(t) = \max \max |X_i(t) - X_0(t)|。 \quad (3)$$

$\Delta_i(t)$ 表示 $\{X_0(t)\}$ 与 $\{X_i(t)\}$ 各因素间的差的绝对值, 即:

$$\Delta_i(t) = |X_i(t) - X_0(t)|。 \quad (4)$$

记第 t 时刻 $X_i(t)$ 与 $X_0(t)$ 的关联度为 r_i 。则:

$$r_i = 1/n \sum_{i=1}^n R_i(t) \quad (5)$$

r_i 值越大, 表示 $\{X_i(t)\}$ 与 $\{X_0(t)\}$ 之间的关系越紧密, 也就是说, $\{X_i(t)\}$ 对 $\{X_0(t)\}$ 的影响越大。

3 结果与分析

3.1 茎干液流速率的日变化

柳杉茎干液流速率的日变化测定时间为 2008 年 5 月 20 日, 其他时间茎干液流速率的变化规律基本一致。受环境因子的影响, 柳杉茎干液流的日变化呈单峰或多峰波动曲线(图 1), 22:00 到 6:00 茎流速率为 0 或相对较低, 波动比较缓慢; 从 7:00 开始, 柳杉茎干液流速率呈明显的上升趋势, 在 11:30 - 14:30 出现茎干液流的高峰值, 一般 15:00 前, 柳杉茎干液流速率维持在较高水平, 且白天茎干液流速率大; 18:00 以后, 柳杉茎干液流明显下降, 在夜间出现最小值。

3.2 不同天气下的柳杉茎流速率变化状况

选取晴天和雨天的柳杉古树茎干液流进行比较。在 10 月 20 日, 晴天, 液流速率大, 变化幅度也最大; 10 月 29 日, 雨天, 茎干液流的变化幅度小, 液流速率相对稳定, 峰值降低, 液流启动时间比晴天晚 1 h, 10:30 时到达白天茎干液流速率的最小值, 停止时间比晴天时提前 2 h(图 2)。雨天时, 柳杉的茎干液流速率维持在较低水平, 可能由于光辐射强度小, 气温低, 空气相对湿度大, 柳杉的蒸腾作用比晴天减弱, 所以相应的茎干液流曲线峰值低, 而晴朗天气的曲线峰值高。

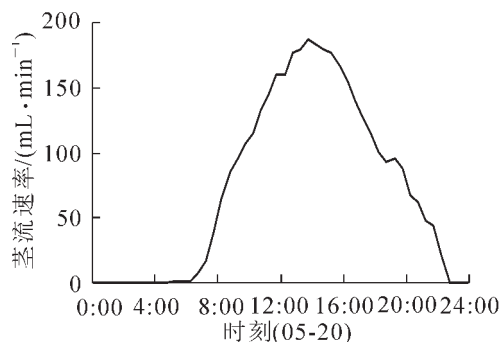


图 1 柳杉茎干液流速率日变化 (05-20)

Figure 1 Diurnal fluctuation on stem sap flow velocity of *Cryptomeria fortunei* (May 20)

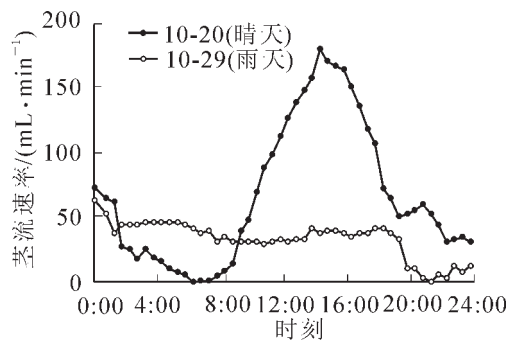


图 2 不同天气条件下柳杉茎干液流速率的日变化

Figure 2 Diurnal fluctuation on stem sap flow of *Cryptomeria fortunei* when sunny or rainy

3.3 柳杉茎干液流冬季变化规律

自 2007 年 11 月到 2008 年 2 月对柳杉古树的茎干液流速率进行实时监测。据观测得出: 11 月份

的平均茎干液流速率最高, 为 $56.7 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 2 月份平均茎干液流速率最低, 为 $33.8 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (图 3)。分析原因可能由于 11 月气温较高, 蒸腾耗水时间较长, 进入冬季后, 每日蒸腾耗水时间缩短, 耗水量显著减少^[6]。

3.4 柳杉茎干液流与影响因子的关联分析

柳杉茎干液流的变化主要受其本身的生物学特性和多种环境因子的影响。在本文中, 环境因子主要指气象因子。建立气象因子与茎干液流之间的相关关系, 可以揭示气象因子对柳杉古树水分平衡的影响, 以探索树木的水分生理规律。茎干液流速率的波动过程与主要环境因子的变化基本一致 (图 1 和图 4), 尤其与光合有效辐射的变化同步, 表明茎干液流的波动主要受光合有效辐射的影响。但是, 柳杉茎干液流峰值与环境因子峰值存在时间差异, 柳杉茎流与光合有效辐射变化的延迟时间约为 50 min。表 1 是 5 月 20 - 22 日连续 3 d 柳杉古树茎干液流速率和几个主要环境因子的关联分析表。

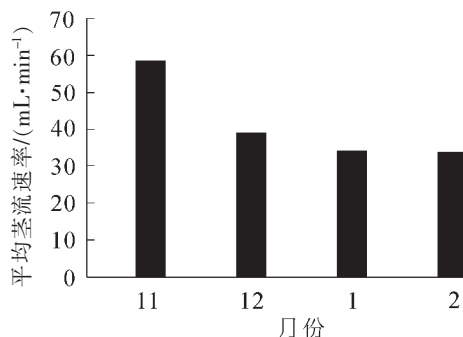


图 3 冬季柳杉平均茎干液流速率的月变化图

Figure 3 Monthly variation of average stem sap flow velocity of *Cryptomeria fortunei* in winter

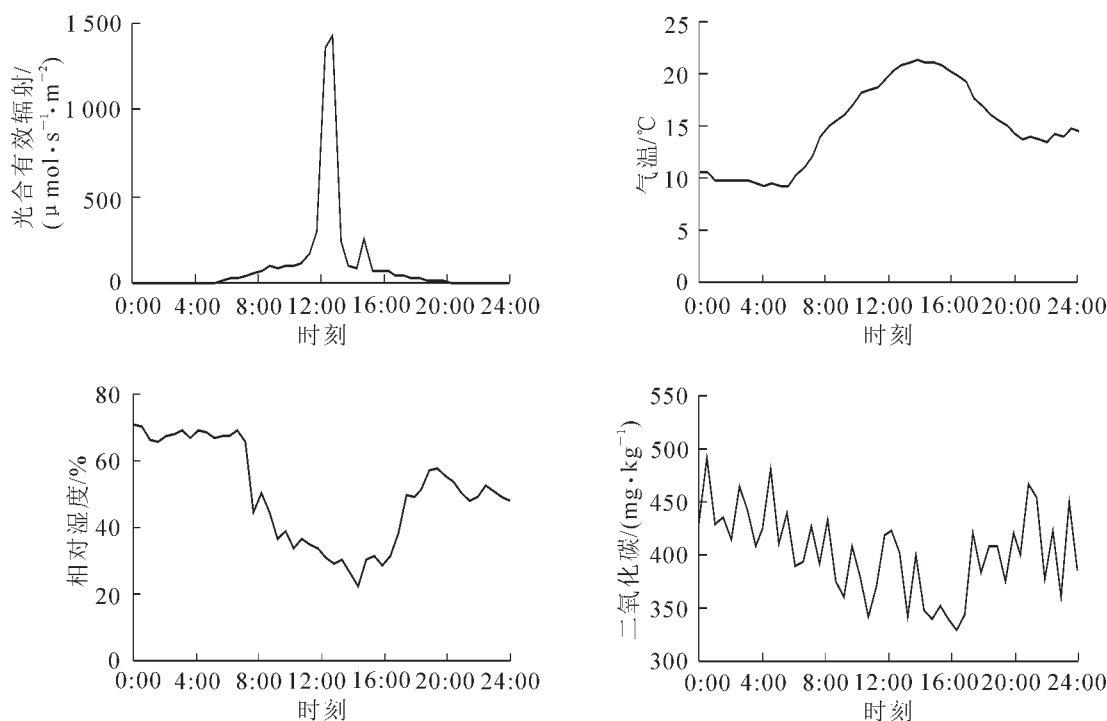


图 4 茎干液流和主要环境因子的日变化(5月20日)

Figure 4 Diurnal fluctuation of stem sap flow velocity and main environmental factors in *Cryptomeria fortunei* plantation (May 20)

以柳杉古树茎干液流和环境因子的日变化测定数据构成原始数据数列 (表 1)。时间序列 T_d 由 2008 年 5 月 20 - 22 日, 每天 0:00 - 23:30 的 48 次测定的日变化数据组成, 全部 3 d 的测定数据就构成 144 行的数列。 X_i 表示测定项目, 构成比较数列 $\{X_i(dt)\}$ 。 $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 分别表示气温、空气相对湿度、二氧化碳质量分数、光合有效辐射、气压和水汽压亏缺。以茎干液流速率为参考数列 $\{X_0(dt)\}$, 即构成 7 列 144 行的原始数据数列 (表 1)。

表 1 数据中, 由于 $\{X_0(dt)\}$ 与 $\{X_i(dt)\}$ 的单位不同, 为了便于比较, 首先要对原始数据进行无

表 1 茎干液流速率与环境因子的原始数据数列 $X_i(dt)$ Table 1 Firsthand data X_{ih} of stem sap flow and environment factors

时间序列	测定日期	测定时刻	X_0 茎干液流速率/($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	X_1 气温/ $^{\circ}\text{C}$	X_2 空气相对湿度/%	X_3 二氧化碳/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_4 光合有效辐射/($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)	X_5 气压/hPa	X_6 水汽压亏缺/kPa
1	05-20	0:00	0	10.8	70.9	428	0	891.4	783.0
2	05-20	0:30	0	10.7	70.2	492	0	891.6	781.5
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24	05-20	11:30	145	18.9	34.9	371	173	891.2	731.6
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
48	05-20	23:30	0	12.8	48.2	449	0	894.2	758.2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
95	05-21	23:30	0	16.1	73.8	373	0	889.1	765.6
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
144	05-22	23:30	0	15.7	74.1	385	0	888.9	794.6

量纲化处理。文中的原始数据经均值化处理, 利用公式(1)~(5)计算 R_i 。

各环境因子的平均关联度 r_i 表示时, $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 分别表示气温、空气相对湿度、二氧化碳质量分数、光合有效辐射、气压、水汽压亏缺与茎流速率关联度的平均值, 计算结果如图 5, 关联度序为 $r_4 > r_1 > r_2 > r_3 > r_6 > r_5$, 即环境因子对茎流速率的影响程度从大到小依次为光合有效辐射、气温、空气相对湿度、二氧化碳质量分数、水汽压亏缺、气压。其中与光合有效辐射的关联度系数最大, 为 0.913。

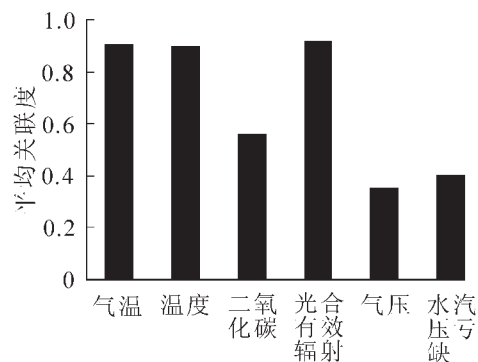


图 5 茎干液流速率与各环境因子的关联分析

Figure 5 Grey sequence between stem sap flow and the main environmental factors

经关联度分析, 光合有效辐射、气温、空气相对湿度与茎干液流变化的相关性最为密切。光合有效辐射强、温度高时, 植物代谢活动强烈, 蒸腾加强, 茎干液流速率加快。空气流动使更多干燥空气充满植物周围, 水汽压亏缺加剧, 植物的水分损失加快。空气相对湿度和植物的蒸腾是相互作用的过程, 空气干燥时, 空气相对湿度减小, 水汽压亏缺变大, 植物蒸腾加快, 使得空气相对湿度加大。

4 讨论

4.1 柳杉茎干液流的变化规律

植物水分代谢具有明显的变化规律。天目山柳杉古树茎干液流日变化呈单峰或多峰曲线, 有明显的昼夜变化特征, 液流受环境因子变化有所波动。茎干液流的高峰一般出现在 11:30–14:30, 液流速率最小值一般出现在 22:00–6:00。但是在不同天气条件下, 液流速率有所不同。雨天由于光照减弱, 温度降低, 湿度相对较大, 柳杉的蒸腾活动弱, 水分运输相对较少并且缓慢, 所以液流速率相对较低。冬季的茎干液流速率持续低水平, 这与各环境因子变化和柳杉本身的生长生理有关。

4.2 主要气象因子与茎干液流的相关性

气温、空气相对湿度、二氧化碳质量分数、光合有效辐射等因子都与茎干液流相关, 其中茎干液流与光合有效辐射的相关性最为显著, 平均关联度达到 0.913, 其次为气温和空气相对湿度, 平均关

联度分别为 0.903 和 0.897。茎干液流变化的总体趋势主要受光合有效辐射的影响,同时,在其他因子的共同作用下,茎干液流速率在大变化趋势下出现异常波动,不同环境下的植物在不同时段的主导因子亦有不同。不同学者对不同地区植物的研究结果有所差异,张昉明等^[26]和夏桂敏等^[6]研究得出,植物茎流变化受气温和水汽压亏缺的影响显著。

参考文献:

- [1] 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.
WANG Jiang, LIU Jun, HUANG Yongqiang, *et al.* The origin and natual distribution of *Cryptomeria fortunei* [J]. *J Sichuan For Sci Techonol*, 2007, **28** (4): 92 - 94.
- [2] 张欣, 杨淑贞, 赵明水, 等. 天目山自然保护区柳杉种群种内和种间竞争[J]. 农业生态环境, 2004, **20** (4): 10 - 14.
ZHANG Xin, YANG Shuzhen, ZHAO Mingshui, *et al.* Intra and inter-specific competition with in *Cryptomeria fortunei* populations in the Mountain Tianmu national nature reserve[J]. *Rural Eco-Environ*, 2004, **20** (4): 10 - 14.
- [3] 马履一, 王华田. 油松边材液流时空变化及其影响因子的研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, **24** (3): 72 - 76.
MA Luyi, WANG Huatian. Spatial and chronic fluctuation of sapwood flow and its relevant variables of *Pinus tabulaeformis* [J]. *J Beijing For Univ*, 2002, **24** (3): 72 - 76.
- [4] 马履一, 王华田, 林平. 北京地区几个树种耗水性比较的研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, **25** (2): 1 - 7.
MA Luyi, WANG Huatian, LIN Ping. Comparison of water consumption of some afforestation species in Beijing area[J]. *J Beijing For Univ*, 2003, **25** (2): 1 - 7.
- [5] IRVINE J, GRACE J. Continuous measurements of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood[J]. *Planta*, 1997, **202**: 455 - 461.
- [6] 夏桂敏, 康绍忠, 李王成, 等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化[J]. 生态学报, 2006, **26** (4): 1186 - 1193.
XIA Guimin, KANG Shaozhong, LI Wangcheng, *et al.* Diurnal and seasonal variation of stem sap flow for *Caragana korshinski* in the arid desert region in Shiyang river basin of Gansu[J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (4): 1186 - 1193.
- [7] 张小由, 龚家栋, 周茂先, 等. 应用热脉冲技术对胡杨和柽柳树干液流的研究[J]. 冰川冻土, 2003, **25** (5): 586 - 590.
ZHANG Xiaoyou, GONG Jiadong, ZHOU Maoxian, *et al.* A study on the stem sap flow of *Populus euphratica* and *Tamaris* spp. by heat pulse technique[J]. *J Glaciol Geocryol*, 2003, **25** (5): 586 - 590.
- [8] 王华田, 马履一, 孙鹏森. 油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律的研究[J]. 林业科学, 2002, **38** (5): 31 - 37.
WANG Huatian, MA Luyi, SUN Pengsen. Sap flow fluctuations of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* in late autumn[J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38** (5): 31 - 37.
- [9] 王瑞辉, 马履一, 李丽萍, 等. 元宝枫树干液流的时空变异性研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28** (增刊 2): 12 - 18.
WANG Ruihui, MA Luyi, LI Liping, *et al.* Temporal and spacial variations of stem sap flow of *Acer truncatum* Bunge [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28** (supp 2): 12 - 18.
- [10] 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.
ZHAO Wenfei, WANG Huatian, QI Liyun, *et al.* Spatial variation of sap flow of *Quercus acutissima* and its lag effect during spring[J]. *J Plant Ecol*, 2007, **31** (2): 320 - 325.
- [11] 刘健, 魏娜娜, 赵炳祥, 等. 银杏树体茎流变化及其对环境因子的响应[J]. 中国农学通报, 2007, **23** (6): 232 - 237.
LIU Jian, WEI Nana, ZHAO Bingxiang, *et al.* Change of trunk sap flow of ginkgo (*Ginkgo biloba* L.) and its response to environmental factors[J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2007, **23** (6): 232 - 237.
- [12] 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.
SUN Huizhen, ZHOU Xiaofeng, ZHAO Huixun. A researches on stem sap flow dynamics of *Betula platyphylla* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, **22** (9): 1387 - 1391.
- [13] 孙鹏森, 马李一, 马履一. 油松、刺槐林潜在耗水量的预测及其与造林密度的关系[J]. 北京林业大学学报, 2001, **23**

- (2): 1 – 6.
- SUN Pengsen, MA Liyi, MA Luyi. Potential water use extrapolation and planting density calculation of Chinese pine and black locust stands in north Beijing mountain area[J]. *J Beijing For Univ*, 2001, **23** (2): 1 – 6.
- [14] 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.
- WANG Huatian, MA Luyi. Measurement of whole tree's water consumption with thermal dissipation sap flow probe (TDP)[J]. *Acta Phytocol Sin*, 2002, **26** (6): 661 – 667.
- [15] 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.
- YUE Guangyang, ZHANG Tonghui, ZHAO Halin, *et al.* Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejewii* and *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, northeast China[J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (10): 3205 – 3213.
- [16] 金红喜, 徐先英, 唐进年, 等. 花棒液流变化规律及其对环境因子的响应[J]. 西北植物学报, 2006, **26** (2): 354 – 361.
- JIN Hongxi, XU Xianying, TANG Jinnian, *et al.* Sap-flow pattern and its responses of *Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey. to environmental factors[J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2006, **26** (2): 354 – 361.
- [17] HAMLYN G, JONES P J C, HAMER K H. Evaluation of various heat-pulse methods for estimation of sap flow in orchard trees: comparison with micrometeorological estimates of evaporation[J]. *Trees*, 1988, **2** (4): 250 – 260.
- [18] VINCENT M, MARK R. Application of the deuterium tracing method for the estimation of tree sap flow and stand transpiration of a beech forest(*Fagus sylvatica* L.) in a mountainous Mediterranean region[J]. *J Hydrol*, 2004, **285**: 248 – 259.
- [19] 何斌, 李卫红, 陈永金, 等. 干旱胁迫条件下胡杨茎流与茎直径变化分析——以塔里木河下游英苏断面为例[J]. 干旱区地理, 2007, **30** (2): 223 – 230.
- HE Bin, LI Weihong, CHEN Yongjin, *et al.* Variation of sap flow and stem diameter under drought stress—a case study Yingsu Section[J]. *Arid Land Geogr*, 2007, **30** (2): 223 – 230.
- [20] 马福生, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 不同阶段亏水处理对温室栽培梨树茎液流变化影响的研究[J]. 农业工程学报, 2006, **22** (4): 6 – 14.
- MA Fusheng, KANG Shaozhong, HU Xiaotao, *et al.* Effects of water deficit at different growth stages on stem sap flux of Pear-jujube trees in greenhouse[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2006, **22** (4): 6 – 14.
- [21] 康绍忠, 胡笑涛, IAN G, 等. 地下水位较高条件下不同根区湿润方式对梨树根与茎液流及其水分平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2001, **17** (3): 15 – 22.
- KANG Shaozhong, HU Xiaotao, IAN G, *et al.* Effects of partial root zone drying on sap flow and water balance of pear trees under a shallow ground water table condition[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2001, **17** (3): 15 – 22.
- [22] 孟兆江, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 辣椒植株茎直径微变化与作物体内水分状况的关系[J]. 中国农村水利水电, 2004 (2): 28 – 30.
- MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, LIU Zugui, *et al.* Relation between minute changes in stem diameter and moisture content of hot pepper[J]. *China Rural Water Hydrol*, 2004 (2): 28 – 30.
- [23] 张友焱, 周泽福, 党宏忠, 等. 利用 TDP 茎流计研究沙地樟子松的树干液流[J]. 水土保持研究, 2006, **13** (4): 78 – 80.
- ZHANG Youyan, ZHOU Zefu, DANG Hongzhong, *et al.* A study on the sap flow of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* with thermal dissipation probe[J]. *Res Soil Water Conserv*, 2006, **13** (4): 78 – 80.
- [24] 马原. 模拟酸雨对天目山柳杉的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- MA Yuan. *Effects of Simulated Acid Rain on Cryptomeria fortunei of Tianmu Mountain*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007.
- [25] 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.
- [26] 张吨明, 徐先英, 唐进年, 等. 药用植物黄芪的茎流速率研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, **21** (4): 146 – 149.
- ZHANG Dunming, XU Xianying, TANG Jinnian, *et al.* Stem flow rate research of medicinal plant-astragalus[J]. *J Arid Land Res Environ*, 2007, **21** (4): 146 – 149.