

酸枣树干液流速率与环境因子的关系

王连春^{1,2} 翟明普¹ 刘道平³ 周志峰³

(1 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 2 国家林业局西南山地生物多样性保育重点实验室
3 国家林业局造林司)

摘要:选择华北地区典型灌木酸枣为研究对象,用TDP传感器测定树干液流速率,并对不同气象条件下的液流速率与环境因子进行了相关性分析及模型模拟。结果表明:不同气象条件下,各环境因子都对树干液流速率有影响,但程度不同。晴天、阴天、雨天影响树干液流速率最重要的环境因子分别是空气温度、太阳辐射和降雨量。在不同气象条件下,酸枣树干液流速率与环境因子间回归模型的自变量构成有很大差异,且晴天和阴天模拟效果较好,雨天模拟效果不佳。

关键词:酸枣;树干液流速率;气象条件;环境因子;模型模拟

中图分类号:S718.43 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2009)06-0134-05

WANG Lian-chun^{1,2}; ZHAI Ming-pu¹; LIU Dao-ping³; ZHOU Zhi-feng³. **Relationship between stock sap flow rate of *Zizyphus acidojubua* Hu and environmental factors.** *Journal of Beijing Forestry University* (2009) 31(6) 134-138 [Ch., 18 ref.]

1 Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 Key Laboratory for Biodiversity Conservation and Breeding of Southwest Mountain of State Forestry Administration, Kunming, 650224, P. R. China;

3 Department of Afforestation, State Forestry Administration, Beijing, 100091, P. R. China

Zizyphus acidojubua Hu, which is the typical shrub of northern China, was selected to determine the stock sap flow by TDP. The correlation between sap flow rate and environmental factors was analyzed and the regression models between them in different weather conditions were constructed by SPSS. The results showed that in different weather conditions, the sap flow rate was influenced by each environmental factor with different levels. In sunshine, cloudy and rainy days, the most important environmental factors to stock sap flow rate were air temperature, solar radiation and rainfall, respectively. In different weather conditions, the environmental factors brought into model were very different. The simulation model in sunshine and cloudy was nice but was not so good in rainy day.

Key words *Zizyphus acidojubua* Hu; stock sap flow rate; weather conditions; environmental factors; model simulation

灌木林是森林资源的重要组成部分,具有特殊的生态功能,特别是在乔木不能生长的、年降水量400 mm以下的地区,灌木林发挥着重要的水土保持、调节气候等生态功能。灌木是土壤-植物-大气(SPAC)连续体中的一部分,其水分循环及耗水规律即受环境的影响同时也影响了周边环境,而且,灌木和乔木树种一样,水分也是其生长的第一限制因

子。目前针对灌木耗水的研究多集中西北干旱区^[1-3],同时由于其直径较小,单株耗水的测定方法多采用热平衡法、热脉冲法。

酸枣(*Zizyphus acidojubua* Hu)是分布于黄河及长江流域的野生灌木树种,适应性非常强,具有良好的耐旱耐瘠薄性能,能适应丘陵、石质、河滩等贫瘠的土壤条件;同时它也是植被稀疏、造林难度大的干

收稿日期:2008-03-26

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A11-04)。

第一作者:王连春,博士。主要研究方向:森林培育。电话:010-62391376 Email:kaixianlc@126.com 地址:100083 北京林业大学林学院。

责任作者:翟明普,教授。主要研究方向:植被恢复。电话:010-62336044 Email:zhmp@bjfu.edu.cn 地址:同上。http://www.cnki.net

旱区以及低山丘陵阳坡防风固沙、保持水土的先锋灌木树种。然而，对于酸枣的研究不能满足植被恢复和建设的需求。本文在不同气象条件下采用热扩散技术测定酸枣树干液流速率，结合自动气象站自记录的气象、土壤等环境因子，以揭示华北地区酸枣在不同气象条件下的树干液流速率，及其与环境因子间的关系；以为华北土石山区困难立地节水型植被恢复模式配置，以及不同环境条件下各植被类型中灌木耗水量的确定提供一些依据。

1 试验区概况

试验地位于河北省平山县太行山低山丘陵区，海拔 220 m，气候属暖温带半干旱半湿润季风型大陆性气候，多年平均降雨量为 625.7 mm。土壤为褐土，土层厚度 5~40 cm；pH 值为 6.5~7.5，成土母岩为片麻岩。试验地为君迁子 (*Diospyros lotus*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、黄连木 (*Pistacia chinensis*)、柿树 (*Diospyros kaki*)、山杏 (*Armeniaca vulgaris var. ansu*) 的混交林，主要灌木为酸枣 (*Ziziphus acidojuba*)、荆条 (*Vitex negundo var. heterophylla*)。

2 研究方法

于试验区选择直径(地上 30 cm 处)大于 2.5 cm 的酸枣 3 株，在树干南面 30 cm 处刮去外层树皮，露出内层活树皮，刮皮面积视树干的粗细而定，长度一般为 5 cm。去皮直径按刮开树皮的厚度和直径来推算，心材的推算则按照钻孔时钻头深入的程度和带出木削的颜色来确定。选用国产 TDP 传感器对试验样株进行测定，该传感器长度为 10 mm，内径为

1.25 mm，与进口的最短 30 mm 相比较，能应用到直径较小的灌木液流测定上。安装该 TDP 传感器与进口传感器方法相同，用与传感器直径相同的钻头打孔，记录边材和心材长度，将预先已经固定的传感器小心插入树干木质部，加热传感器置于上方，然后用泡沫块夹住传感器，并用胶带固定后于外面包裹绝缘、防辐射材料，最后用胶带密封，防止雨水进入。将传感器与数采器 (Grant SQ2020) 连接，每 2 s 采集 1 次，10 min 输出 1 组温差平均值。并同步安装 watchdog 自动气象站，监测土壤水势、土壤温度、土壤含水量、太阳辐射、空气温度、空气湿度、风速、降雨量，10 min 采集 1 次数据。

对所得温差值处理，并用公式 $F_d = 0.0119 (dT/dT-1)^{1.231}$ 计算液流速率^[4]。式中： TM 为全天最大温差值， T 为 10 min 输出温差值。对计算结果结合气象站观测数据用 spss14.0 计算各相关系数，并用多元线性逐步回归法建模，回归基本模型为： $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n$ 。

3 结果与分析

3.1 晴天树干液流与环境因子的相关性及其模型

选择 2008 年 7 月 21—28 日太阳辐射呈明显单峰且完全没有降雨过程的连续 8 d，树干液流与太阳辐射、空气温度、相对湿度、土壤含水量的变化趋势比较见图 1，计算液流速率并与环境因子进行偏相关分析，结果见表 1。

从图 1 中的空气温度与液流速率的变化趋势比较图中可以看出液流速率与空气几乎完全同步，都

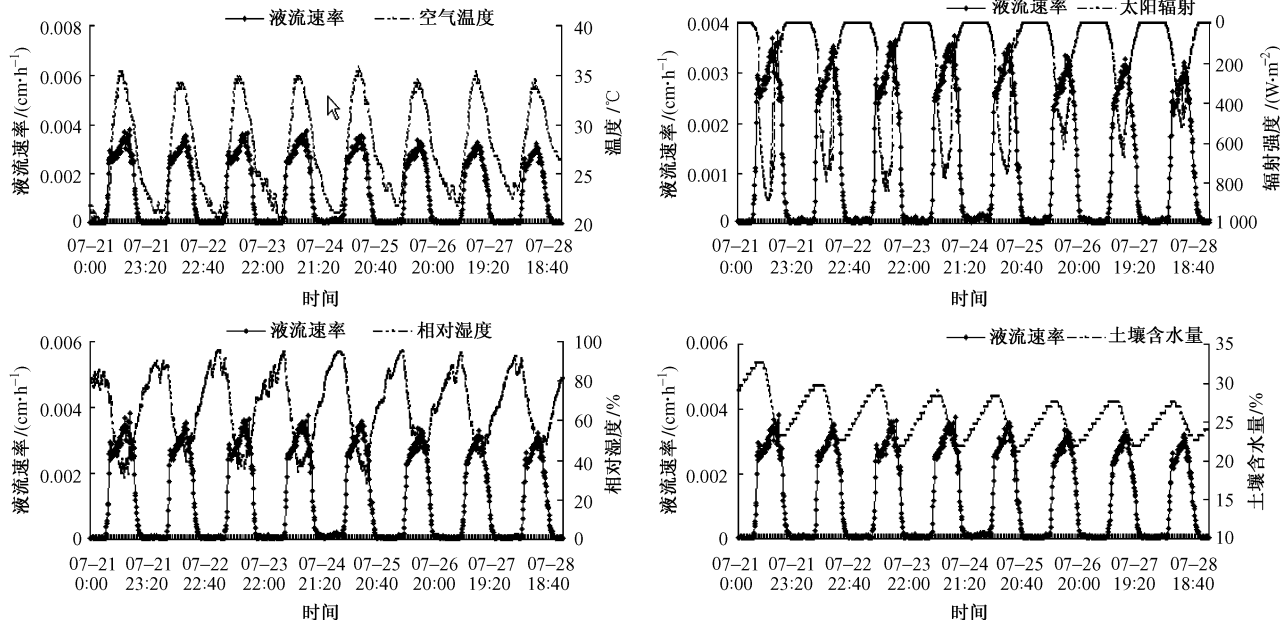


图 1 晴天液流速率与环境因子的关系

FIGURE 1 Relationship between stock sap flow rate and environmental factors in sunshine

表1 晴天酸枣树干液流速率与环境因子间的相关系数

TABLE 1 Correlation coefficients between stock sap flow rate and environmental factors in sunshine for *Z. acidujuba*

液流速率	土壤水势	土壤温度	土壤含水量	太阳辐射	空气温度	空气湿度	风速
液流速率与环境因子的相关系数	0.028	-0.065*	0.121**	0.820**	0.871**	-0.845**	-0.027
显著水平	0.351	0.028	0	0	0	0	0.365
样本数量	1 152	1 152	1 152	1 152	1 152	1 152	1 152

注:** $P < 0.01$, * $P < 0.05$ 。表2,3同此。

呈现出单峰曲线,且达到峰值和谷底的时间基本一致;与太阳辐射的趋势比较,液流速率与其变化也基本一致,但太阳辐射达到峰值的时间早于液流速率,也就反映出液流的启动受太阳辐射的影响较大。从与空气湿度的趋势比较图中可以看出,空气湿度与液流速率的变化完全相反,空气湿度最高时,液流速率在波谷,而空气湿度很低时,液流速率则达到最高。酸枣树干液流速率与土壤含水量变化趋势基本一致,但土壤含水量波峰的时间早于液流速率。这是因为树干液流的水分主要来源于土壤,在吸收土壤中的水分后用于蒸腾,而随着白天蒸腾的进行且没有土壤之外的水分补充,土壤水分含量逐渐降低;而在晚间,液流速率减小后,土壤含水量会从地下水或相邻系统得到补给而增加。

从表1可以看出,在晴天,树干液流速率与空气温度、太阳辐射、土壤含水量呈极显著的正相关。表明随空气温度的升高、太阳辐射的加强、土壤含水量的增加,酸枣树干液流速率会显著加快,而土壤水势的增加虽然也能增加树干液流速率,但效果不显著。当空气湿度增加后,树干液流速率却极显著下降。

当土壤温度升高时,树干液流速率呈明显下降趋势。风速加大后,树干液流速率却呈下降趋势,但效果不明显。从相关系数绝对值来看,晴天影响树干液流速率最重要的环境因子是空气温度。

将酸枣树干液流速率与各气象因子用多元线性逐步回归,除土壤水势之外,其余6个环境因子均被纳入模型中:

$$y = -0.017 + 0.000\ 25x_1 + 0.000\ 19x_2 - 0.000\ 000\ 171x_3 + 0.000\ 15x_4 - 0.000\ 014x_5 + 0.000\ 039x_6$$

式中: y 为液流速率, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 分别为空气温度、土壤含水量、太阳辐射、风速、空气湿度、土壤温度。

回归模型达到了极显著水平。模型偏相关系数 R 为 0.933, $R=0.871$, 校正后的 $R^2=0.871$;从图2也可以看出,残差频率是标准的正态分布,标准差为 0.998;而且标准残差正态 P-P 图中观测值与预测值间几乎成一条直线,由此可见,模型模拟效果很好。

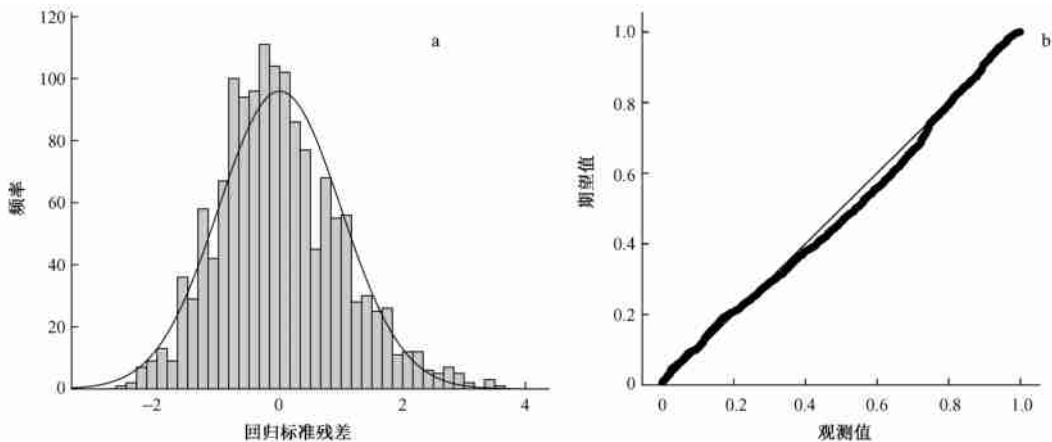


图2 晴天液流速率与环境因子回归模型的残差频率(a)及回归标准残差正态 P-P 图(b)

FIGURE 2 Regression residual frequency and standardized residual normal P-P plot of model between stock sap flow rate and environmental factors in sunshine

3.2 阴天树干液流与环境因子的相关性及其模型

选择 2008 年 6 月 15 日、7 月 11 日、8 月 9 日、9 月 8 日等太阳辐射较弱、没有降雨过程的 4 d, 计算液流速率并与环境因子进行偏相关分析, 结果见表 2。

从表 2 可知, 阴天的太阳辐射、空气温度、空气

湿度能极显著影响树干液流速率, 表明树干液流速率会随着太阳辐射的加强、空气温度的升高而加快, 但随空气湿度的增加, 树干液流速率会逐步减缓。其他环境因子对树干液流速率的影响不显著。从相关系数分析, 阴天影响树干液流速率的最重要的环境因子是太阳辐射。

表 2 阴天酸枣树干液流速率与环境因子间的相关系数

TABLE 2 Correlation coefficients between stock sap flow rate and environmental factors in cloudy day for *Z. acidujuba*

	土壤水势	土壤温度	土壤含水量	太阳辐射	空气温度	空气湿度	风速
液流速率与环境因子的相关系数	0.070	0.045	-0.024	0.877**	0.674**	-0.807**	0.059
显著水平	0.094	0.280	0.561	0	0	0	0.160
样本数量	576	576	576	576	576	576	576

将酸枣树干液流速率与各气象因子用多元线性逐步回归，除土壤温度之外，其余 6 个环境因子均被纳入模型中：

$$y = -0.006 + 0.000\ 003\ 31x_1 - 0.000\ 025x_2 + 0.000\ 075\ 8x_3 + 0.000\ 097\ 3x_4 + 0.000\ 004\ 89x_5 + 0.000\ 084\ 2x_6$$

式中： y 为液流速率， x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 分别为太

阳辐射、空气湿度、空气温度、土壤含水量、土壤水势、风速。

回归模型达到了极显著水平。模型偏相关系数 R 为 0.930， $R^2=0.866$ ，校正后的 $R^2=0.864$ 。从图 3 也可以看出，残差频率是标准的正态分布，标准差为 0.995；而且标准残差正态 P-P 图中观测值与预测值间几乎成一条直线，由此可见，模型模拟效果很好。

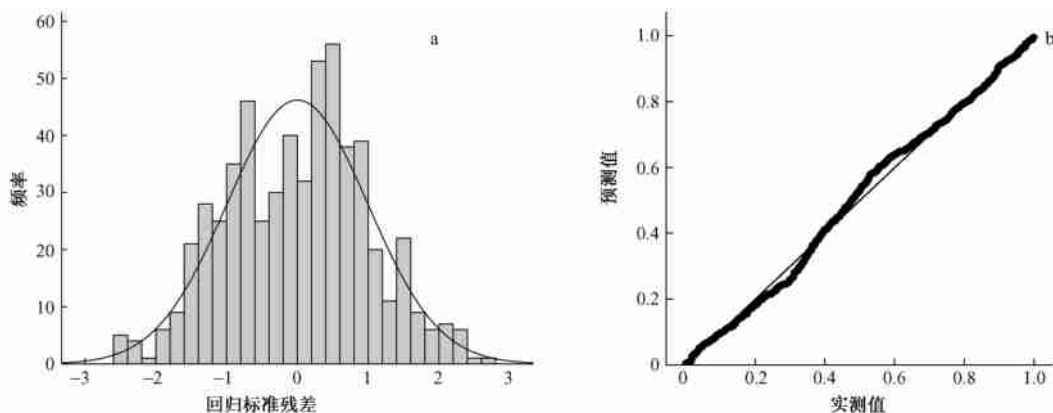


图 3 阴天液流速率与环境因子回归模型的残差频率(a)及回归标准残差正态 P-P 图(b)

FIGURE 3 Regression residual frequency and standardized residual normal P-P plot of model between stock sap flow rate and environmental factors in cloudy days

3.3 雨天树干液流与环境因子的相关性及模型

选择 2008 年 6 月 14 日、8 月 20 日、8 月 21 日、9 月 9 日、9 月 21 日等太阳辐射值较弱且有连续降雨

过程的 5 d，计算液流速率并与环境因子进行偏相关分析，结果见表 3。

表 3 雨天酸枣树干液流速率与环境因子间的相关系数

TABLE 3 Correlation coefficients between stock sap flow rate and environmental factors in rainy day for *Z. acidujuba*

	土壤水势	土壤温度	土壤含水量	太阳辐射	空气温度	空气湿度	风速	土壤水势
液流速率与环境因子的相关系数	-0.141**	-0.077**	0.129**	0.195**	0.198**	-0.113**	0.007	0.346**
显著水平	0	0.038	0.001	0	0	0.002	0.853	0
样本数量	720	720	720	720	720	720	720	720

从表 3 可以反映，雨天各环境因子与树干液流速率的关系较晴天和阴天的复杂，虽然能反映出树干液流速率与土壤水势、土壤含水量、太阳辐射、空气温度、相对湿度和降雨量之间极显著相关，但相关系数均较低，因此不能准确反映出雨天树干液流速率与那种环境因子同步，从系数大小能初步确定降雨量是影响树干液流速率最重要的环境因子，这与 M Zeppel 等^[5]的研究结果基本一致。同时，表 3 还反映出树干液流速率与土壤水势、土壤温度、相对湿度呈极显著的负相关关系，意味着土壤水势、温度的提高不能加快树干液流速率，这与晴天和阴天的结

果不尽相同，而相对湿度的极显著的负相关关系则与上述两种天气下的结果一致。

将酸枣树干液流速率与各气象因子用多元线性逐步回归，太阳辐射与风速被模型排除，其余 6 个环境因子均被纳入模型中：

$$y = -0.013 + 0.001x_1 + 0.000\ 067\ 1x_2 + 0.000\ 135x_3 - 0.000\ 025x_4 - 0.000\ 006\ 8x_5 + 0.000\ 11x_6$$

式中： y 为液流速率， x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 分别为降水量、空气温度、土壤含水量、空气湿度、土壤水势、土壤温度。

回归模型虽然也达到了极显著水平，但模型偏

相关系数 R 仅为 0.594, $R^2=0.352$, 校正后的 $R^2=0.347$ 。从图 4 也可知, 残差频率分布为偏态, 标准

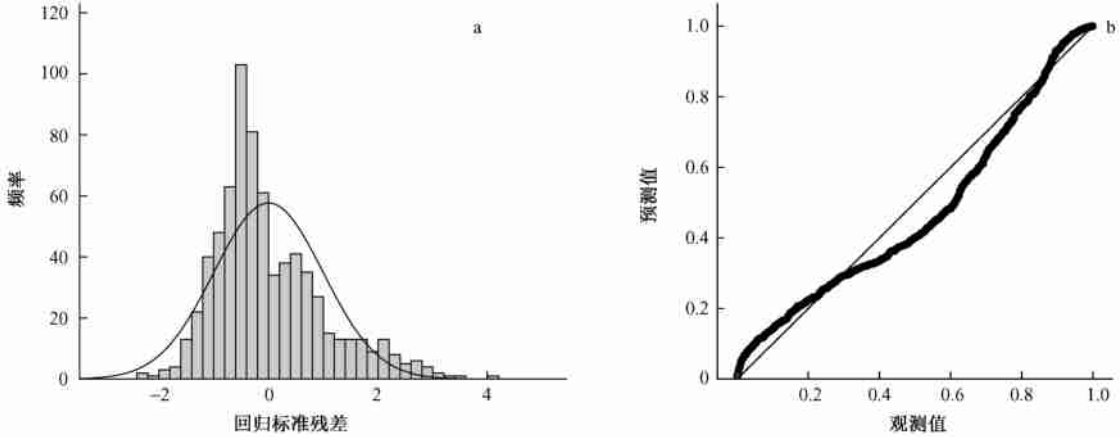


图 4 雨天液流速率与环境因子回归模型的残差频率(a)及回归标准残差正态 P-P 图(b)

FIGURE 4 Regression residual frequency and standardized residual normal P-P plot of model between stock sap flow rate and environmental factors in rainy day

4 结论与讨论

1) 不论晴天、阴天还是雨天, 各环境因子都对树干液流速率有影响, 但程度不同。晴天、阴天、雨天影响树干液流速率最重要的环境因子分别是空气温度、太阳辐射和降雨量。酸枣树干液流在不同气象条件下的模型纳入的环境因子有很大差异, 且晴天和阴天模拟效果较好, 雨天模拟效果不佳。

2) 针对不同气象条件^[6]、不同单项环境因子^[7-8]以及综合各项环境因子与树干液流速率建模的研究^[9-16]也表明, 影响树干液流速率的环境因子不尽相同, 但相互间关联很大。

3) 环境因子间是相互作用相互影响的, 因此虽然影响树干液流速率的因子有差别, 但综合作用的效果更明显, 特别是除开下垫面(土壤相关因子)的各因子如空气温度、空气湿度、太阳辐射等对液流速率的影响比较大。由于树干液流速率与气象因子的关系可以推导出树木单株耗水量与气象因子的关系, 同时从计算^[17]有植被覆盖陆面的蒸散量的另一方法 Penman-Monteith 得到启示, 能否从简单的各气象因子中提炼一个相对稳定的纯量来实现某种植被从单株到群体的扩展, 将复杂过程简单化, 需要进一步研究。

参 考 文 献

[1] 夏桂敏, 康绍忠, 杜大生, 等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区花棒蒸腾耗水量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 194-202.
 [2] 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): 186-193.
 [3] 常学向, 赵文智, 张智慧. 荒漠区固沙植物梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 耗水特征[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1826-1837.

差为 0.996。而且标准残差正态 P-P 图中观测值与预测值间差异很大, 由此可见, 模型模拟效果不好。

[4] 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.
 [5] ZEPPEL M, MACINNIS-NG C M O, FORD C R, et al. The response of sap flow to pulses of rain in a temperate[J]. *Australian Woodland Plant Soil*, 2008, 305: 121-130.
 [6] 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.
 [7] MARVIN J W, GREENE M T. Temperature-induced sap flow in excised stems of acer[J]. *Plant Physiology*, 1951, 26(3): 565-580.
 [8] DAY T A, DELUCIA E H, SMITH W K. Effect of soil temperature on stem sap flow, shoot gas exchange and water potential of *Picea engelmannii* (Parry) during snowmelt[J]. *Oecologia*, 1990, 84(4): 474-481.
 [9] GRANIER A, CLAUSTRES J P. Water relations of a Norway spruce (*Picea abies*) tree growing in natural condition; Variation within the tree[J]. *Acta Oecologica*, 1989, 10(3): 295-310.
 [10] GRANIER A, HUC R, BARIGAHS T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors [J]. *Agric For Meteorol*, 1996, 78: 19-29.
 [11] HAM J M, HEILMAN J L. Measurement of mass flow rate of sap in *Ligustrum japonicum*[J]. *HortScience*, 1990, 25: 465-467.
 [12] 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): 1-5.
 [13] 刘文国, 袁玉欣, 王志刚, 等. 中林 46 杨 林分耗水特性及其与环境因子的关系[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(4): 40-45.
 [14] 马达, 李吉跃, 聂立水, 等. 不同坡向对栓皮栎耗水规律的影响[J]. 河北林果研究, 2005, 20(4): 323-327.
 [15] 虞沐奎, 姜志林, 鲁小珍, 等. 火炬松树干液流的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(3): 7-10.
 [16] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 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[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 655-665.
 [17] 王安志, 裴铁璠. 森林蒸散测算方法研究进展与展望[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 933-937.

(责任编辑 赵 勃)