

网络出版时间:2013-07-18 15:59

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130718.1559.005.html>

陕西榆林地区旱柳和小叶杨夜间树干液流 变化特征分析

尹立河, 黄金廷, 王晓勇, 董佳秋, 马洪云, 张俊

(西安地质矿产研究所, 中国地质调查局 干旱-半干旱区地下水重点实验室, 陕西 西安 710054)

[摘要] 【目的】研究陕西榆林地区旱柳和小叶杨夜间树干液流的变化特征, 为毛乌素沙地造林选种提供依据。【方法】利用热消散探针法测量了陕西榆林地区旱柳(2011-04-28—11-07)和小叶杨(2011-06-27—11-07)的夜间树干液流密度, 利用自动气象站测量风速、温湿度、净辐射、降雨量和土壤水分等环境因子, 计算空气水汽压亏缺, 分析夜间树干液流密度与空气水汽压亏缺、风速和白天总蒸腾量的相关关系。【结果】旱柳和小叶杨树干液流密度均呈现明显的昼夜波动, 且白天(07:00—19:00)高, 晚上低。白天旱柳和杨树的平均树干液流密度分别为 6.79 和 6.49 $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$, 而夜间平均树干液流密度分别是 0.82 和 0.63 $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。雨天夜间树干液流比晴天大, 主要是因为强降雨后, 土壤水明显增多, 40 cm 以上土层的土壤水分增加了 10% 左右。夜间树干液流密度与空气水汽压亏缺、风速和白天总蒸腾量呈极显著相关, 旱柳夜间树干液流密度与三者的相关系数分别是 0.62 , 0.42 和 0.44 , 小叶杨与三者的相关系数分别是 0.35 , 0.29 和 0.50 。旱柳和小叶杨夜间树干液流密度对整树总蒸腾量的平均贡献率分别为 11.4% , 7.1% 。【结论】旱柳和小叶杨 2 个树种均存在明显的夜间树干液流, 且雨天的夜间树干液流比晴天高。影响夜间树干液流的因素是空气水汽压亏缺、风速和白天总蒸腾量, 树干液流是由夜间补水和蒸腾共同造成的。旱柳夜间树干液流对总蒸腾量的贡献率较高, 且随季节变化大, 而杨树夜间液流对总耗水量的贡献率小且稳定。

[关键词] 旱柳; 杨树; 夜间树干液流; 环境因子

[中图分类号] S718.45

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2013)08-0085-06

Characteristics of night time sap flow of *Salix matsudana* and *Populus simonii* in Yulin, Shaanxi

YIN Li-he, HUANG Jin-ting, WANG Xiao-yong, DONG Jia-qiu,
MA Hong-yun, ZHANG Jun

(Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Key Laboratory of Groundwater in arid and semi-arid regions of
China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: 【Objective】The characteristics of nighttime sap flow of *Salix matsudana* and *Populus simonii* were studied for improve tree selection in the Maowusu desert. 【Method】The thermal dissipation probes were used to measure the night sap flow of *S. matsudana* and *P. simonii* trees in Yuling, Shaanxi from June 27, 2011 to November 7, 2011. Wind speed, air temperature, humidity, net radiation and soil water contents were measured at an automatic weather station. Correlation analysis was performed to study the relation between night time sap flow and vapor pressure deficit and wind speed. 【Result】The sap flow densities of *S. matsudana* and *P. simonii* showed significant diurnal fluctuation with high values in daytime

* [收稿日期] 2012-10-24

[基金项目] 国土资源大调查项目(1212010634204); 中荷水与生态伙伴计划项目; 国家自然科学基金项目(41002084); 国土资源部地下水与生态野外科学观测研究基地资助项目

[作者简介] 尹立河(1977—), 男, 河北阜城人, 高级工程师, 博士, 主要从事生态水文地质和地下水研究。E-mail: ylihe@cgs.cn

and low values in night time. In daytime, the average sap flow densities of *S. matsudana* and *P. simonii* were 6.79 and 6.49 g/(cm² · h) respectively, while that for nighttime were 0.82 and 0.63 g/(cm² · h), respectively. The night sap flows in rainy days were higher than that in sunny days due to the significant increase of water contents after rainfall (10% increase of soil water contents in the top 40cm layer). The night sap flow correlated well with vapor pressure deficit, wind speed and total daytime transpiration with coefficients of 0.62, 0.42 and 0.44 respectively for *S. matsudana* and 0.35, 0.29 and 0.50 respectively for *P. simonii*. The mean contributions of night recharge to the whole tree transpirations for *S. matsudana* and *P. simonii* were 11.4% and 7.1%, respectively. 【Conclusion】 Both *S. matsudana* and *P. simonii* had significant night sap flow, which correlated with vapor pressure deficit, wind speed and the total daytime transpiration, indicating that the night sap flow resulted from night time recharge and daytime transpiration.

Key words: *Salix matsudana*; *Populus simonii*; night time sap flow; environmental factors

蒸腾是树木生长必需的生理代谢过程, 对植物的生命活动意义重大^[1]。确定植物蒸腾的方法众多, 包括涡度相关法^[2-4]、波文比能量平衡法^[5-7]和树干液流法等。树干液流法所用仪器安装简单, 费用相对较低, 因此自 20 世纪 90 年代以来, 广泛应用于蒸腾研究^[8]。树干液流可以利用热脉冲法、热平衡法和热消散探针法测量。其中热消散探针法成本相对较低, 测定结果比较可靠, 被越来越多地应用于研究树木的耗水特征^[8-9]。在测定树干液流时, 国内外学者发现, 夜间液流很低, 但不为 0^[10-11]。夜间液流对树木生长和蒸腾量评价具有重要意义, 如夜间液流可以补充树木白天蒸腾造成的水分损失^[12], 有助于驱动根系与植物向上运输物质^[13], 为植物器官夜间呼吸提供氧传递机制^[14]。目前, 对植物耗水的研究大多假定夜间蒸腾为 0, 因此研究树木的夜间液流对准确评价树木的蒸腾耗水量具有重要意义。

国内对夜间树干液流的特征已有较多研究, 如胡兴波等^[1]分析了白榆和侧柏夜间液流的动态特征, 王华等^[12]研究了马占相思树夜间树干液流的分配及对蒸腾估算的影响, 陈立欣等^[15]总结了雪松、大叶樟、丝棉木和水杉夜间液流活动的特征, 周翠鸣等^[10]研究了荷木夜间树干液流补水的影响因素。从以上研究可以看出, 不同地区、不同季节和不同物种间夜间液流的动态特征及对蒸腾的贡献量差异较大。通过文献检索可知, 有关陕西榆林毛乌素沙地旱柳和小叶杨夜间液流特征的研究鲜有报道。为此, 本试验利用 Granier 热消散探针法, 研究了陕西榆林旱柳和小叶杨夜间树干液流的日变化和季节变化特征, 探讨了夜间水分补充的影响因素, 并计算了夜间液流对总蒸腾量的贡献, 以期提高树木总蒸腾量的估算精度, 为毛乌素沙地造林选种提供依据。

1 试验地概况

试验地位于陕西省榆林市榆阳区补浪河乡的国土资源部地下水与生态野外试验站, 地理坐标为 E 109°11'42", N 38°23'27", 平均海拔高度 1 250 m。由于试验场的气象数据时间序列较短, 因此利用试验场附近乌审旗气象站最近 30 多年的气象数据分析了试验区的气候特点。试验区属半干旱区大陆季风气候, 年平均气温为 8.1℃, 1 月平均气温 -8.6℃, 7 月平均气温 23.9℃; 年平均降雨量 340 mm, 降雨多集中在 7—9 月份, 此期降雨量占全年降雨量的 70% 以上; 年蒸发量 2 800 mm; 试验场包气带为风积沙; 地下水水位埋深约 1.5 m; 地貌以固定、半固定沙丘和农田为主。

2 材料与方法

2.1 材 料

研究的旱柳 (*Salix matsudana*) 为 1980 年种植, 树高 2.6 m, 胸径 22.3 cm, 冠幅 10.2 m²。研究的小叶杨 (*Populus simonii*) 为同年种植, 树高 6.0 m, 胸径 20.1 cm, 冠幅 8.6 m²。试验结束后, 将供试旱柳和小叶杨伐倒, 截取 1.3 m 处的树干, 一侧浸泡到用蓝色墨水配制的溶液中 24 h, 通过测量另一侧蓝色部分的面积确定边材面积。经测算旱柳边材面积为 274.6 cm², 杨树边材面积为 152.4 cm²。

2.2 树干液流密度测量与计算

采用 Granier^[16]的热消散探针法测量树干液流密度。在树干 1.3 m 处, 用砂纸打磨树干, 然后将直径 2 mm、长 20 mm 的 2 个 Granier 热消散探针 (FLGS-TDP XM1000, Dynamax Inc., Houston, TX, USA) 相隔 10 cm 插入到边材中, 用硅胶密封。为防止太阳辐射和雨水入渗, 在探针安装部位用铝

箔包裹树干。利用 CR1000 自动数据采集仪 (CR1000,Campbell Scientific, Logan, UT, USA) 采集数据,自动记录时间间隔为 1 h。旱柳树干液流的监测时期为 2011-04-28—11-07,小叶杨树树干液的监测时期为 2011-06-27—11-07。

根据 Granier^[16] 建立的经验公式,将上、下探针的温度差转换为液流密度:

$$J_s = 3\,600 \times 0.011\,9 \times \left(\frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

式中: J_s 为液流密度 ($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$), ΔT_m 为昼夜最大温度差, ΔT 为瞬时温度差。在旱柳和小叶杨不同方位各安装 5 个探针,取算术平均值用于分析。

2.3 环境因子的测量

试验场地设有自动气象站,环境因子的监测仪器包括风速传感器 (R. M. Young Co., Michigan, USA)、温湿度传感器 (HMP45C, Vaisala Co., Helsinki, Finland)、净辐射传感器 (Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands) 和雨量桶 (type 52203 RM Young rain gauge, R. M. Young Co., Michigan, USA)。所有传感器均与数据采集仪 (CR3000, Campbell Scientific Inc., Utah, USA) 连接,每分钟测读 1 次,每小时对数据平均后进行存储,监测时期为 2011-04-15—11-10。空气水汽压亏缺 (D , kPa) 由下式计算^[10]:

$$D = a \times \exp\left(\frac{bT_a}{T_a + c}\right) \times (1 - RH) \quad (2)$$

式中: T_a 为气温 ($^{\circ}\text{C}$); RH 为空气相对湿度 (%); a 、

b 、 c 为常数,取值分别为 0.611 kPa、17.502 kPa 和 240.97 $^{\circ}\text{C}$ 。利用基于时域反射原理的 miniTrace (miniTrase, Soilmoisture equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA) 测定 10, 20, 40, 70 和 100 cm 深处的土壤水分含量。土壤水分监测时期为 2011-05-01—11-10,每 4 h 记录 1 次。

2.4 夜间水分补充量的计算

夜间所测的树干液流主要用于水分补充,旱柳和小叶杨夜间水分补充量利用下式计算^[10]:

$$W = \sum (J_s A_s t) \quad (3)$$

式中: W 为夜间水分补充量 (g); J_s 是夜间净辐射为负值时的液流密度值 ($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$); A_s 为边材面积 (cm^2); t 为时间,根据采样间隔, $t = 1 \text{ h}$ 。本研究计算夜间液流的时间是在晚间净辐射为负值的时间段,根据净辐射的监测数据,计算时间段确定为晚 20:00 至次日 06:00。而总蒸腾量则是计算一天 24 h 的树干液流总量。

利用 Excel 2003 的分析数据库分析夜间液流密度与主要环境因子间的关系,该库是专门进行数据分析的模块,可以实现数据的分析、回归与拟合等。

3 结果与分析

3.1 树干液流密度的日变化规律

7 月是旱柳和小叶杨蒸腾量比较大的月份,夜间液流显著,便于分析。2011-07 旱柳和小叶杨树树干液流密度日均值的变化见图 1。

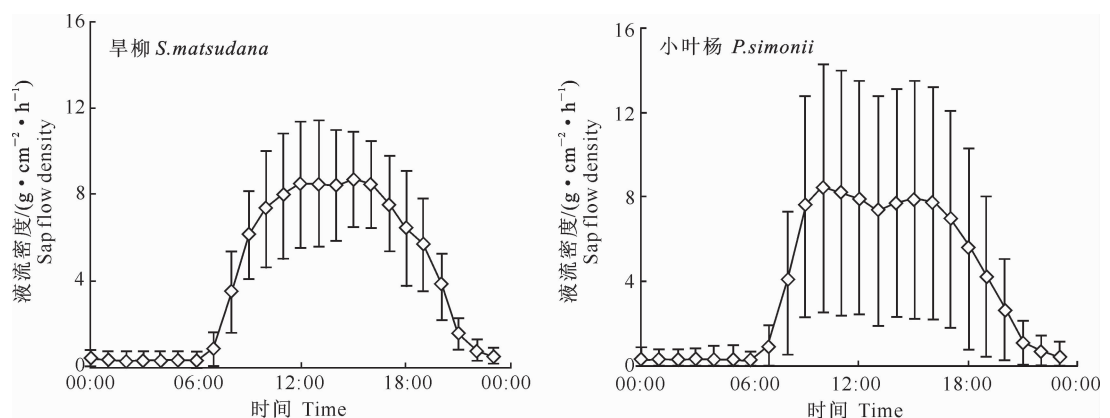


图 1 2011-07 旱柳和小叶杨树树干液流密度日均值的变化

Fig. 1 Diurnal variations of the average sap flux densities of *S. matsudana* and *P. simonii* in July, 2011

由图 1 可以看出:1) 2 个树种液流密度均出现了明显的昼夜变化,白天的峰值相差不大,但小叶杨液流密度的变化更剧烈;2) 旱柳和小叶杨树树干液流密度均呈现出白天高、晚上低的特点。以 2011-07 为例,白天 (07:00—19:00) 旱柳和小叶杨的平均树

干液流密度为 6.79 和 6.49 $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,而夜间分别是 0.82 和 0.63 $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。与白天相比,夜间树干液流密度的变异较小。树干液流监测结果表明,所测旱柳和小叶杨均存在明显的夜间液流。出现夜间液流是由 2 种原因造成的:一种是由于白天

蒸腾强烈,因此晚间需补充树干内缺失的水^[17];另一种原因是树木夜间也存在蒸腾^[18]。同时期的气象数据表明,白天的平均气温为 24.42℃,比夜间的平均气温(19.04℃)高;白天的平均风速为 2.10 m/s,也比夜间的平均风速(1.23 m/s)高。因此在气象条件的驱动下,白天蒸腾作用比晚上强烈。

3.2 夜间树干液流密度的变化特征

旱柳和小叶杨树干液流密度在夜间的变化见图 2。

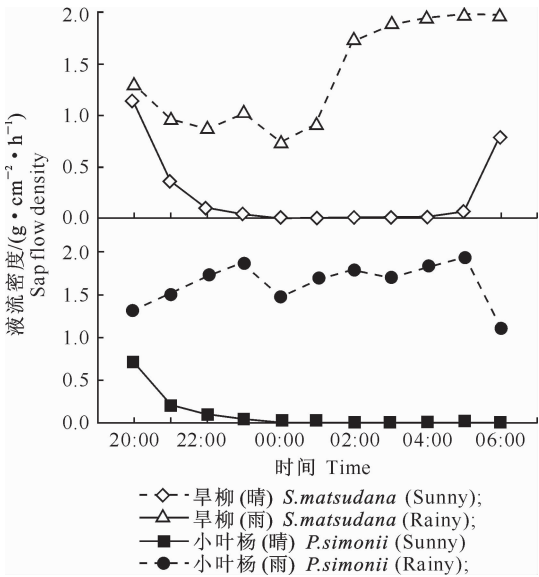


图 2 旱柳和小叶杨树干液流密度在夜间的变化
Fig.2 Variations of the sap flux densities of *S. matsudana* and *P. simonii* during night

表 1 旱柳和小叶杨夜间树干液流密度与空气水汽压亏缺、风速和白天总蒸腾量的相关关系

树种 Species	空气水汽压亏缺 Vapor pressure deficit	风速 Wind speed	白天总蒸腾量 Total daytime transpiration
旱柳 <i>Salix matsudana</i>	0.62**	0.42**	0.44**
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	0.35**	0.29**	0.50**

注:“**”表示在 $P\leq 0.01$ 水平上极显著相关。表 2 同。
Note:“**” indicates extreme correlation at the level of $P\leq 0.01$. The same below.

表 2 前、后半夜旱柳和小叶杨夜间树干液流与空气水汽压亏缺、风速的相关关系

树种 Species	前半夜 Before midnight		后半夜 After midnight	
	空气水汽压亏缺 Vapor pressure deficit	风速 Wind speed	空气水汽压亏缺 Vapor pressure deficit	风速 Wind speed
旱柳 <i>Salix matsudana</i>	0.36**	0.19**	0.24**	0.27**
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	0.31**	0.13**	0.02	0.42**

尽管旱柳和小叶杨的夜间树干液流密度与空气水汽压亏缺、风速显著相关,但并不能完全解释夜间树干液流密度的变化。由于树木有可能利用夜间液流进行自身水分补充,白天耗水越强烈,则夜间补水

从图 2 可以看出,晴天时,旱柳和小叶杨前半夜(20:00—00:00)的液流密度要比后半夜(00:00—06:00)大很多,且变幅较大。前半夜树干液流密度呈逐渐下降趋势,下降幅度开始较大(20:00—22:00),随后逐渐变小;后半夜,树干液流密度非常微弱,且变化不明显。雨天时,旱柳和小叶杨夜间液流密度比晴天时大,且前半夜和后半夜都比较大。

降雨后,空气湿度大,不利于植物蒸腾。因此,雨天比较显著的夜间液流主要是树木补水造成的。一场强降雨后,土壤水分明显增多,40 cm 以上土层的土壤水分约增加 10%。随着土壤水势的增强,树干吸收水分,使木质部栓塞和空穴化导管得以恢复,导水性增加,所以树干液流密度增大。

3.3 影响夜间树干液流密度变化的因素分析

夜间树干液流是由补水和蒸腾造成的^[12]。相关分析表明,整个监测期间,旱柳和小叶杨的夜间树干液流密度与空气水汽压亏缺、风速和白天总蒸腾量均呈极显著相关(表 1),表明有一部分夜间树干液流用于蒸腾。通过分析前、后半夜夜间树干液流密度与空气水汽压亏缺和风速的关系,发现在前半夜,树干液流密度主要受空气水汽压亏缺影响,而后半夜则主要受风速影响(表 2)。总体而言,旱柳夜间树干液流密度与空气水汽压亏缺和风速的相关性比小叶杨高(表 1 和表 2)。

量可能越大。表 1 表明,小叶杨夜间树干液流密度与白天总蒸腾量的相关系数为 0.50,旱柳夜间树干液流密度与白天总蒸腾量的相关系数为 0.44,说明夜间树干液流有一部分用于补充水分亏缺。

3.4 夜间树干液流对整树总蒸腾量的贡献

夜间水分补充对林木的蒸腾调控具有重要意义^[19],对树木总蒸腾量的贡献较大^[20]。从图 3 可以看出,旱柳同期的夜间树干液流密度和对总蒸腾量的贡献均大于小叶杨,且变化幅度比小叶杨大。4—9 月,旱柳的夜间树干液流密度总体呈先增加后降低的趋势,8 月达到最大值(10.6 g/(cm²·h))。旱柳夜间树干液流密度对总蒸腾量的贡献率从 4 月的 13.8% 降至 6 月的 7.6%,然后又逐步上升至 9 月的 13.6%,平均值为 11.4%。与旱柳相比,小叶杨的夜

间树干液流密度及其对总蒸腾量的贡献率较小,平均贡献率为 7.1%,且变化不大,变幅均小于 20%。前人研究表明,杨树的木质部栓塞脆弱性小^[21],树干的水势不会因为蒸腾作用而大量消耗,因此夜间水分补充对蒸腾量的贡献不高。尽管夜间树干液流量占全天流量的比例较低,但是当估算大尺度树木耗水时,其消耗量也是相当巨大的,所以在干旱地区,植被夜间液流量应作为生态恢复建设中树种选择的依据之一。

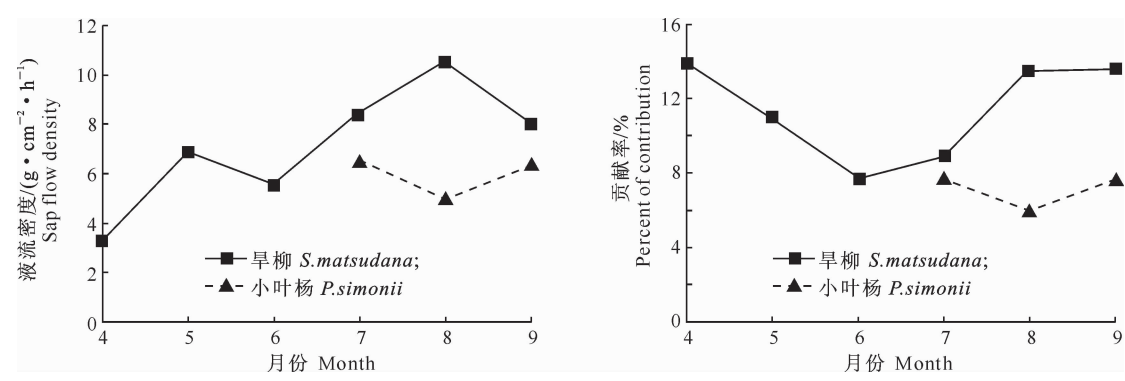


图 3 旱柳和小叶杨夜间树干液流密度的月度化及其对总蒸腾量的贡献率
Fig. 3 Monthly night sap flow densities and the contributions to the total transpirations of *S. matsudana* and *P. simonii*

4 讨论

国内外很多学者发现,树木在夜间存在液流^[1,10,12],通常情况下,前半夜的液流要远大于后半夜^[1],雨天大于晴天^[1,15]。对于树干液流产生的原因,一部分学者认为是由于树干夜间补水造成的^[22],还有一部分学者认为是夜间蒸腾造成的。前者认为由于白天蒸腾作用强烈,导致树木水分亏缺,因此出现晚上补水现象;后者则认为很多植物在夜间部分气孔仍保持张开状态,如有足够的外部环境因子,夜间就会有明显的蒸腾,如国内学者观测到旱区的胡杨就存在夜间蒸腾现象^[23-25]。本研究结果表明,旱柳和小叶杨均存在夜间蒸腾。近年来的研究表明,夜间液流是由夜间补水和蒸腾作用共同造成的^[14]。王华等^[12]指出,可以通过分析夜间液流与空气水汽压亏缺和风速的关系来确定是否存在夜间蒸腾,如果它们之间显著相关,且决定系数比较大,则夜间液流是由蒸腾作用造成的;反之,是由夜间补水造成的。但当 2 种作用同时存在时,对于哪一种为主导作用尚没有统一的认识。胡兴波等^[1]认为,夜间补水主要发生在前半夜,蒸腾主要发生在后半夜;陈立欣等^[15]认为,夜间蒸腾发生在前半夜,夜间补

水发生在后半夜。本研究结果表明,在半干旱区的毛乌素沙地生长的旱柳和小叶杨存在夜间液流,夜间液流是由夜间补水和蒸腾作用共同造成的。

5 结论

- 1) 陕西榆林地区的旱柳和小叶杨夜间树干液流密度比白天低,但存在明显的夜间液流;夜间树干液流密度在雨天高,晴天低;晴天时,树干液流密度在前半夜变化大,后半夜非常微弱,且变化不明显。
- 2) 旱柳和小叶杨夜间树干液流密度与空气水汽压亏缺、风速和白天总蒸腾量具有极显著的相关性,旱柳和小叶杨夜间树干液流是由补水和蒸腾作用共同造成的。
- 3) 监测期间,旱柳夜间树干液流密度对总蒸腾量的贡献率高,且变化较大;而小叶杨夜间树干液流密度对总蒸腾量的贡献率小,且比较稳定。

[参考文献]

[1] 胡兴波,韩磊,张冬,等.黄土半干旱区白榆和侧柏夜间液流动态分析[J].中国水土保持科学,2010,8(4):51-56.
Hu X B, Han L, Zhang D, et al. Analysis on the dynamics of nighttime sap flow of *Ulmus pumila* and *Platycladus orientalis* in semi-arid of Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water

- Conservation, 2010, 8(4): 51-56. (in Chinese)
- [2] Saugier B, Granier A, Pontailier J Y, et al. Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and micrometeorological methods [J]. *Tree physiology*, 1997, 17 (8/9): 511-519.
 - [3] Sun G, Noormets A, Chen J, et al. Evapotranspiration estimates from eddy covariance towers and hydrologic modeling in managed forests in Northern Wisconsin, USA [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 257-267.
 - [4] Ding R S, Kang S Z, Li F S, et al. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1): 87-95.
 - [5] Malek E, Bingham G. Comparison of the Bowen ratio-energy balance and the water balance methods for the measurement of evapotranspiration [J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 146: 209-220.
 - [6] Zhang B Z, Kang S Z, Zhang L, et al. Estimation of seasonal crop water consumption in vineyard using Bowen ratio-energy balance method [J]. *Hydrological Process*, 2007, 21(26): 3635-3641.
 - [7] Zeggaf A T, Takuechi S, Dehghanisanij H, et al. A Bowen ratio technique for partitioning energy fluxes between maize transpiration and soil surface evaporation [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(4): 988-996.
 - [8] Jonard F, Andre F, Ponette Q, et al. Sap flux density and stomatal conductance of European beech and common oak trees in pure and mixed stands during the summer drought of 2003 [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409: 371-381.
 - [9] Guan D X, Zhang X J, Yuan F H, et al. The relation between sap flow of intercropped young poplar trees (*Populus × euramericana* cv. N3016) and environmental factors in a semiarid region of northeastern China [J]. *Hydrological Processes*, 2011, DOI: 10. 1002/hyp. 8250.
 - [10] 周翠鸣, 赵平, 倪广艳, 等. 广州地区荷木夜间树干液流补水的影响因子及其对蒸腾的贡献 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1751-1757.
Zhou C M, Zhao P, Ni G X, et al. Water recharge through nighttime stem sap flow of *Schima superba* in Guangzhou region of Guangdong Province, South China: Affecting factors and contribution to transpiration [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1751-1757. (in Chinese)
 - [11] Fisher J B, Baldocchi D D, Misson L, et al. What the towers don't see at night: Nocturnal sap flow in trees and shrubs at two AmeriFlux sites in California [J]. *Tree Physiology*, 2007, 27: 597-610.
 - [12] 王华, 赵平, 蔡锡安, 等. 马占相思夜间树干液流的分配及其对整树蒸腾估算的影响 [J]. *植被生态学报*, 2007, 31(7): 777-786.
Wang H, Zhang P, Cai X A, et al. Partitioning of night sap flow of *Acacia Mangium* and its implication for estimating whole-tree transpiration [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(7): 777-786. (in Chinese)
 - [13] McDonald E P, Erickson J E, Kruger E L. Can decreased transpiration limit plant nitrogen acquisition in elevated CO₂? [J]. *Functional Plant Biology*, 2002, 29: 1115-1120.
 - [14] Daley M, Phillips N G. Interspecific variation in night time transpiration and stomatal conductance in a mixed new England deciduous forest [J]. *Tree Physiology*, 2006, 26: 411-419.
 - [15] 陈立欣, 张志强, 李湛东, 等. 大连 4 种城市绿化乔木树种夜间液流活动特征 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 535-546.
Chen L X, Zhang Z Q, Li Z D, et al. Nocturnal sap flow of four urban greening tree species in Dalian, Liaoning Province, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 535-546. (in Chinese)
 - [16] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurement [J]. *Tree Physiology*, 1987, 3: 309-320.
 - [17] Benyon R G. Nighttime water use in an irrigated *Eucalyptus grandis* plantation [J]. *Tree physiology*, 1999, 19: 853-859.
 - [18] Snyder K A, Richards J H, Donovan L A. Nighttime conductance in C3 and C4 species: do plants lose water at night? [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54: 861-865.
 - [19] 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 Cells and Environment*, 1998, 21(4): 397-406.
 - [20] Kobayashi Y, Tanaka T. Water flow and hydraulic characteristics of Japanese red pine and oak trees [J]. *Hydrological processes*, 2001, 15(10): 1731-1750.
 - [21] 张硕新, 申卫军, 张远迎. 六种木本植物木质部栓塞化生理生态效应的研究 [J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 788-794.
Zhang S X, Shen W J, Zhang Y Y. Ecophysiological effect of xylem embolism in six tree species [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 788-794. (in Chinese)
 - [22] Lopushinsky W. Seasonal and diurnal trends of heat pulse velocity in Douglas-fir and ponderosa pine [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1986, 16: 814-821
 - [23] Zhang X Y, Gong J D, Zhou M X. Study on volume and velocity of stem sap flow of *Haloxylon ammodendron* by heat pulse technique [J]. *Acta Botanica Borealis Occident Sinica*, 2004, 24(12): 2250-2254.
 - [24] Si J H, Feng Q, Zhang X Y. Application of heat-pulse technique to determine the stem sap flow of *Populus euphratica* [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(4): 503-508.
 - [25] Bai Y G, Song Y D, Zhou H F, et al. Study on the change of sap flow in the stems of *Populus euphratica* using thermal pulse measurement [J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(3): 373-376.