

# 荒漠防护林典型树种液流特征及其对环境因子的响应

马建新<sup>1,2,3</sup>, 陈亚宁<sup>1,2,\*</sup>, 李卫红<sup>1,2</sup>, 黄 湘<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 利用基于热补偿理论的 SF300 分体液流仪对干旱荒漠区人工防护林典型树种(俄罗斯杨、胡杨、榆树、沙枣)树干液流全天候监测, 自动气象站同步记录相关环境因子变化。研究表明: ①4 种防护林树种茎干液流日变化除沙枣树外均存在明显昼夜节律, 液流速度在同属种间差异较小, 在不同属种间差异显著, 俄罗斯杨的日平均液流速度可以达到沙枣的 13.8 倍, 耗水量排序为俄罗斯杨 > 胡杨 > 榆树 > 沙枣树。②水分充足条件下, 增加实验地灌溉量使 4 种树木蒸腾受到抑制, 液流流速降低, 水分利用效率降低。③液流流速因所处树干径向位点不同而存在差异, 俄罗斯杨、榆树、沙枣液流速度表现出由形成层到髓心的递减趋势, 胡杨树树干径向位点液流没有表现一定规律。④树干液流流速与环境因子进行相关分析, 通过逐步回归分析建立了 4 个典型树种茎干液流速度与环境因子关系估算模型, 分析认为 4 种树木的环境敏感性排序为俄罗斯杨 > 榆树 > 胡杨 > 沙枣。

**关键词:** 茎干液流; 环境因子; 灌溉量; 防护林; 干旱荒漠区

## Characteristics of sap flow of 4 typical shelter-belt tree species and its relationships with environmental factors in the desert region of Northwest China

MA Jianxin<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yaning<sup>1,2,\*</sup>, LI Weihong<sup>1,2</sup>, HUANG Xiang<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Pulse sensors based on the heat compensation theory were applied to measure the stem sap flow of 4 typical tree species in shelter-belt of the desert region in Northwest China. Wind speed, relative humidity, air temperature, soil temperature and leaf temperature were measured at an automatic weather station. The aim of this study was to investigate the diurnal variations of sap flow of different desert trees, and try to understand the characteristics of their water requirements and ecological significance. The results indicated that sap flow rate in *Populus Russkii* Jabl., *P. euphratica* Oliv. and *Ulmus pumila* L. have distinct diurnal variations and the sap flow rates present single-peaks curves, but *Elaeagnus angustifolia* L. have not been observed clear diurnal pattern in sap flow. The sap flow velocity altered with the probe-inserted depth into the stem. Sap flow velocity had significant diversity among the 4 tree species. Under sufficient soil water content, increase of irrigation can influence on the microhabitat and have an effect to reduce the transpirations. The correlation between the sap flow velocity and the meteorological factors was analyzed. The dynamics of stem sap flows could be fitted well by a regression model based on the meteorological factors. The model could be used to estimate the transpiration of the 4 tree species.

**Key Words:** sap flow; environmental factors; irrigation; shelter-belt; desert region

**基金项目:** 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD26B0901, 2007BAC15B08); 中国科学院新疆生态与地理所知识创新领域前沿资助项目(XBBS200810)

**收稿日期:** 2008-12-06; **修订日期:** 2009-01-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 作为统一的、动态的、互相反馈的连续系统, 水在其中起着至关重要的作用, 而作为这一连续体中间环节的植物, 其水分消耗和运移规律自然就成为生态学和水文学研究的重点领域。尤其干旱区, 由于严酷的自然环境, 水资源变化已经成为影响区域生态水文过程和可持续发展的主要因素, 为了更为合理的管理和利用有限的水资源, 搞清楚干旱区植物水分运移机理、植物耗水特性以及维持生态稳定的生态耗水量等问题具有十分重要的现实意义。

蒸腾作用是植物水分消耗的主要方式, 总量占蒸散耗水量的 80% 以上<sup>[1]</sup>。植物根部吸收的水分 99.8% 消耗在蒸腾作用上<sup>[2]</sup>。因此, 有关植物蒸腾的测定方法以及手段一直是生态水文研究中较为活跃的领域。利用热技术测定树干液流速度进而推算整树蒸腾的方法被认为是目前测定乔木蒸腾最准确的方法<sup>[3]</sup>。这种技术能够在不改变原有环境和树木结构, 不影响树木生长的前提下测量整株树木蒸腾量, 同时具有简单经济, 能够重复监测的特点。Huber 首先将这种方法应用于测定树木液流<sup>[4]</sup>, 后来其他一些学者<sup>[5-7]</sup>相继对其进行了改进和完善。利用热技术测定植物蒸腾量在国内外研究较为普遍, 但相关的干旱区人工防护林不同树种间的蒸腾耗水特性对比研究仍很有限。而干旱区环境脆弱, 防护林能够有效的起到保护、控制、稳定和改善生态环境的作用, 因此, 研究比较防护林主要树种耗水规律, 选择节水树种, 合理进行树种搭配和布局, 对干旱区解决水分供需矛盾有重要指导意义。

本研究以位于古尔班通古特沙漠西北缘的人工生态防护林典型树种为研究对象, 通过对不同灌溉量下的其茎干液流以及环境因子的动态监测, 分析液流变化特征及其环境影响因素, 探讨比较典型树种耗水特性, 为研究人工林的水分利用提供理论支持, 同时为区域内防护林树种选育、生态恢复与重建过程中植物物种选择提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区人工生态防护林总面积 515.27hm<sup>2</sup>, 位于准噶尔盆地古尔班通古特沙漠西北缘, 加依尔山南麓, 地处古玛纳斯湖积荒漠平原。该区属于典型温带大陆性干旱荒漠气候, 冬季严寒夏季酷热, 7 月份平均气温 27.6℃, 1 月份平均为 -16.3℃, 年平均气温 8.1℃, 年均日照时数 2743.6h, 日照百分比为 61%, 太阳辐射量为 553.4kJ·cm<sup>-2</sup>, ≥10℃ 年积温 3968℃。年平均降水量 105.3mm, 年平均蒸发力 3545mm, 蒸降比达 34:1, 年平均大风日数 > 100d。土壤以荒漠土为主。防护林主要乔木树种有俄罗斯杨 (*Populus Russkii* Jabl.)、胡杨 (*Populus euphratica* Oliv.)、榆树 (*Ulmus pumila* L.)、沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L.) 等, 均已定植 9a。

### 1.2 监测样地设置

监测样地 (东经 84°54'27.7" 北纬 45°28'51.7" 海拔 286m) 布设在研究区沙漠比邻地带的主干防护林内。选择地势平坦, 树体大小均匀区段, 分别建立 4 种典型树种 3750m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 灌溉定额和 7500m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 灌溉定额的 25m × 30m 实验对比样地 6 块, 其中俄罗斯杨监测样地 2 块、榆树监测样地 2 块、胡杨沙枣混交监测样地 2 块。

### 1.3 液流监测及参数确定

实验采用澳大利亚 GREENSPAN 技术公司生产的 SF300 分体液流仪来测量树干液流。其基本原理是通过向树木导管注入一个很小的脉冲源, 然后测量这个脉冲沿树木导管上升的比率来获得植物木质部内液流速度。从 2008 年 7 月 11 日至 2008 年 7 月 21 日连续 11d 对不同灌溉量水平下的 4 种防护林树种进行 24h 连续监测。选择监测样地内不同灌溉量下长势良好, 树干通直, 冠幅适中, 树皮光滑, 无病虫害的俄罗斯杨、胡杨、沙枣、榆树为实验材料, 样树参数见表 1。

在对茎干液流实时监测时, 热脉冲速率  $V'_h$  每 10min 由仪器自动测定 1 次, 树干液流速度  $V_s$  可以用下式<sup>[8]</sup>计算得出:

$$V_s = (0.505F_m + F_l) \times V'_h \quad (1)$$

式中,  $F_m$  为木质体积因子;  $F_l$  为水体积因子。  $F_m$  与  $F_l$  可以从下式得到:

$$F_l = \frac{W_f - W_d}{W_i} \quad (2)$$

$$F_m = \frac{W_d}{1.53 W_i} \quad (3)$$

式中,  $W_f$  为白木质部鲜重;  $W_d$  为白木质部的干重;  $W_i$  为相同边材浸出纯水质量。树干液流量  $Q$  为:

$$Q = V_s \times A \quad (4)$$

式中,  $A$  为树木胸径处边材截面积;  $V_s$  为树干液流速度。

表 1 4 树种样树基本参数

Table 1 Parameters of sample trees for sap flow measurement of four tree species

| 树种<br>Tree species                  | 胸径/mm<br>Breast diameter | 心材半径/mm<br>Heartwood radius | 木质部半径/mm<br>Xylem radius | 边材面积/cm <sup>2</sup><br>Sapwood area | 木质体积因子<br>Volume fraction of wood | 水体积因子<br>Volume fraction of water |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 俄罗斯杨 <i>P. Russkii</i> Jabl.        | 152                      | 40                          | 73                       | 117.1                                | 0.35                              | 0.45                              |
| 胡杨 <i>P. euphratica</i> Oliv.       | 170                      | 48                          | 82                       | 138.8                                | 0.25                              | 0.45                              |
| 沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i> L. | 126                      | 49                          | 60                       | 37.6                                 | 0.18                              | 0.23                              |
| 榆树 <i>Ulmus pumila</i> L.           | 148                      | 45                          | 71                       | 94.7                                 | 0.26                              | 0.42                              |

#### 1.4 微气象观测

微气象观测采用澳大利亚 ICT 公司生产的自动微气象站,主要观测项目包括空气温度( $T_a$ )、空气相对湿度( $RH$ )、风速( $V_w$ )、地温(10cm)( $T_s$ )、叶温( $T_l$ ),24h 全天候观测,以上观测项目为了与液流同步,自动数据采集器设定为每 10min 记录 1 次。采用饱和水汽压差( $VPD$ )这一指标综合表达温度与空气相对湿度的协同效应,可利用公式(5)得出:

$$VPD = (1 - RH/100) \times ea^* \quad (5)$$

式中,  $RH$  为空气相对湿度;  $ea^*$  为饱和水汽压,利用公式(6)求得。

$$ea^* = a \times EXP(b \times T_a / (T_a + c)) \quad (6)$$

式中,  $T_a$  为气温,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为参数分别取值 0.611kPa、17.502、237.3℃

## 2 结果与分析

### 2.1 树干液流日进程

在晴朗天气条件下,除沙枣以外,俄罗斯杨、胡杨、榆树液流流速日变化均具有明显昼夜节律(图 1),而且 3 种树木液流流速启动、峰值和下降时间基本一致,液流启动在 6:30—7:00 之间,基本与日出同步,启动速度俄罗斯杨较快,胡杨和榆树较缓,11:00—15:00 左右液流速度达到峰值,19:30—20:30 开始下降,最低值出现时间在 0:00—5:30 之间。3 种树木全天液流变化趋势呈单峰型,叠加有较小波动。与对二白杨研究结果一致<sup>[9-10]</sup>。4 种树木液流流速在夜间仍稳定维持在较低水平,说明为了协调植物的需水平衡,夜间植物根系仍保有一定的吸水能力,以补充白天树干水分蒸腾损失<sup>[11]</sup>。沙枣茎干液流没有表现明显昼夜节律,始终维持在一个比较低的水平,其没有表现出明显的昼夜节律可能原因是由于沙枣是一种十分耐旱的植物,蒸腾耗水量很低,加之沙枣枝、叶、茎、果均被银白色鳞片及星状毛包裹,叶片也比较小,从而削弱了外界环境对树木蒸腾的影响,导致液流速度较低且变化不大。

比较 4 树种的液流速度可以看出(表 2),俄罗斯杨和胡杨液流速度差异不大,日平均流速分别为 35.20  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$  和 33.72  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,液流通量密度分别为 0.85  $\text{L} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  和 0.81  $\text{L} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,原因是两树种属同一属种,生理结构特征具有一定相似性,故在相同天气条件下表现出较为一致的特征,不同的是俄罗斯杨液流启动速度较胡杨快,这与俄罗斯杨树形高大,在日出对光照反应迅速有很大关系。俄罗斯杨、胡杨与榆树、沙枣液流速度之间的差异相当大,榆树和沙枣日平均液流速度分别为 9.99  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$  和 2.56  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,液流通量密度分别 0.06  $\text{L} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  和 0.24  $\text{L} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,尤其俄罗斯杨和沙枣之间平均液流速度差异达 13.8 倍、液流通量密度相差 14.3 倍,种间差异十分明显。样树单株耗水量胡杨 112.55  $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ ,俄罗斯杨 98.98  $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ ,榆树 22.72  $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ ,沙枣 2.32  $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

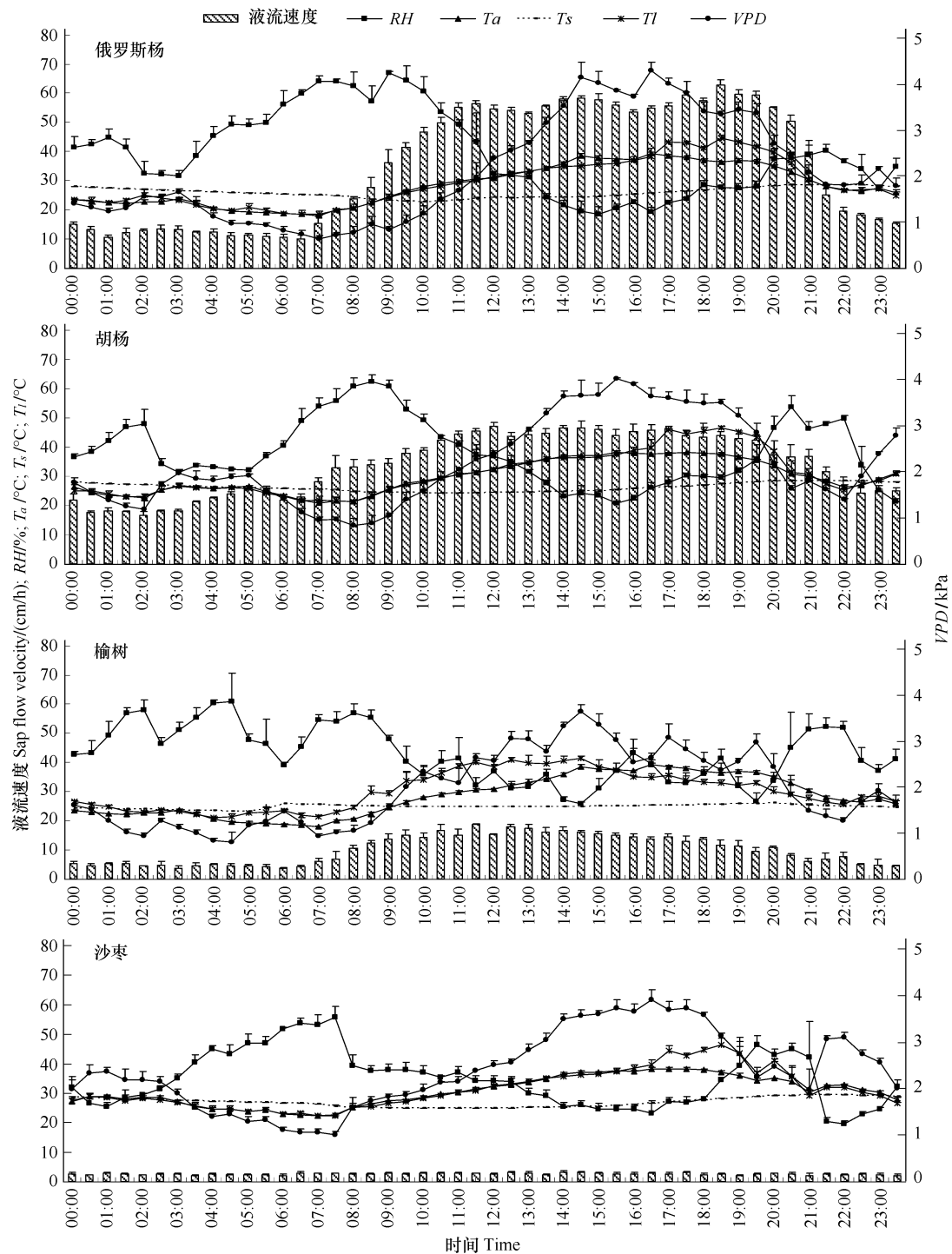


图1 4种树木茎干液流及主要环境因子日变化曲线

Fig.1 Diurnal changes of sap flow and meteorological factors of four tree species

## 2.2 树干径向断面不同位点液流流速特征分析

树干径向不同位点液流速度除沙枣外均表现明显昼夜变化,与整体液流速度变化一致,分为启动、峰值、降低和低流速维持阶段。俄罗斯杨、沙枣、榆树液流流速在树干径向位点均表现由外向内的梯度变化,与对锦鸡儿和马占相思树的研究结果一致<sup>[12-13]</sup>,本研究中胡杨液流没有呈现同样规律,胡杨树干径向不同位点液流速度排序为14mm > 5mm > 10mm > 19mm,呈现从形成层到髓心液流速度先减小后增大再减小的变化(图2)。

表 2 4 树种茎干液流日变化统计结果

| 树种<br>Tree species                  | 平均流速/( $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) | 平均流量/( $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ ) | 日耗水量/L                  | 通量密度/( $\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ) |
|-------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------|
|                                     | Average velocity                       | Average flow                          | Daily water consumption | Unit area Flux                                           |
| 俄罗斯杨 <i>P. Russkii</i> Jabl.        | 35.20                                  | 4.12                                  | 98.98                   | 0.85                                                     |
| 胡杨 <i>P. euphratica</i> Oliv.       | 33.72                                  | 4.69                                  | 112.55                  | 0.81                                                     |
| 沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i> L. | 2.56                                   | 0.10                                  | 2.32                    | 0.06                                                     |
| 榆树 <i>Ulmus pumila</i> L.           | 9.99                                   | 0.95                                  | 22.73                   | 0.24                                                     |

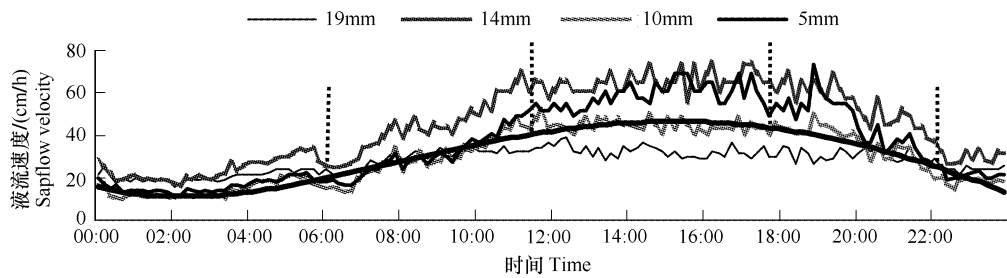


图 2 胡杨树干径向断面不同位点液流日变化曲线

Fig.2 Diurnal change of sap flow at different positions in the sapwood of four tree species

2.3 不同灌溉量下树木液流特征分析

通过对不同灌溉量下 4 种树木树干液流的监测,发现  $4500\text{m}^3/\text{hm}^2$  灌溉量处理与  $7500\text{m}^3/\text{hm}^2$  灌溉量处理树木液流特征存差异,4 种树木液流速度和液流通量密度均随灌溉量增加而有所下降(图 3),下降比例俄罗斯杨 4.7%、胡杨 9.9%、沙枣 16.7%、榆树 20.8%。将不同灌溉处理下 4 种树木茎干液流特征进行比较,以胡杨为例,最高液流速度由  $3750\text{m}^3/\text{hm}^2$  灌溉量处理的  $48.93\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$  上升到  $7500\text{m}^3/\text{hm}^2$  灌溉量处理的  $68.60\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ;最低流速由  $15.29\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$  下降  $7.42\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ;流速的日较差由  $33.64\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$  上升为  $61.18\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ;日平均流速由  $33.64\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$  降为  $30.33\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。反映在日变化上,表现为夜间和光照较弱时  $7500\text{m}^3/\text{hm}^2$  灌溉量处理的树木液流速度较  $3750\text{m}^3/\text{hm}^2$  灌溉处理的树木液流速度低,而正午前后  $7500\text{m}^3/\text{hm}^2$  灌溉处理的树木液流速度较  $3750\text{m}^3/\text{hm}^2$  灌溉处理的树木液流速度高。

液流速度变化是多种环境因子共同作用的结果。植株体内液体流动主要由蒸腾拉动,树干液流速度的快慢可以反映植株蒸腾速率的变化。植物蒸腾作用受外界环境因素所影响,随叶表面与周围空气之间水汽压的梯度大小而改变,有证据证明,蒸腾强度随空气干燥度的增加与温度的升高而增加<sup>[14]</sup>,并且气孔导度与饱和水汽压差呈负相关<sup>[15]</sup>。当空气相对湿度变大,饱和水汽压差会随之降低,使得叶片与空气间水势差缩小、叶片表面气孔导度降低、植物蒸腾速度下降。 $7500\text{m}^3/\text{hm}^2$  灌溉量沙枣和胡杨的日变化曲线中有液流停滞现象,这是由于蒸腾拉力下降不能维持树木导管内连续水柱而导致导管的短暂空穴化所引起的。

2.4 树干液流速度与环境因子的关系分析

植物液流不仅受自身特性影响而且还受到气象因子影响。由图 1 可以看出相关气象因子中,气温、叶温和饱和水汽压差均呈现明显昼夜节律,其变化趋势和液流速度表现出的日变化一致。而相对湿度和地温在夜间比较高,相对湿度日出前后达到一天当中的峰值,然后逐渐降低,地温在正午达到最低值,趋势与液流流速日变化大致相反。将树干液流速度与风速、相对湿度、气温、地温、叶温和饱和水汽压 6 个环境因子进行 Pearson 相关分析(表 3),各环境因子与 4 种树木液流速度表现出不同的相关性。风速仅与俄罗斯杨液流速度显著相关,原因是由于俄罗斯杨树形高大,受风面积大,蒸腾易受到风速影响;相对湿度和地温与 4 种树木液流流速均表现为显著负相关;气温、叶温和饱和水汽压差均与 4 种树木液流显著正相关。

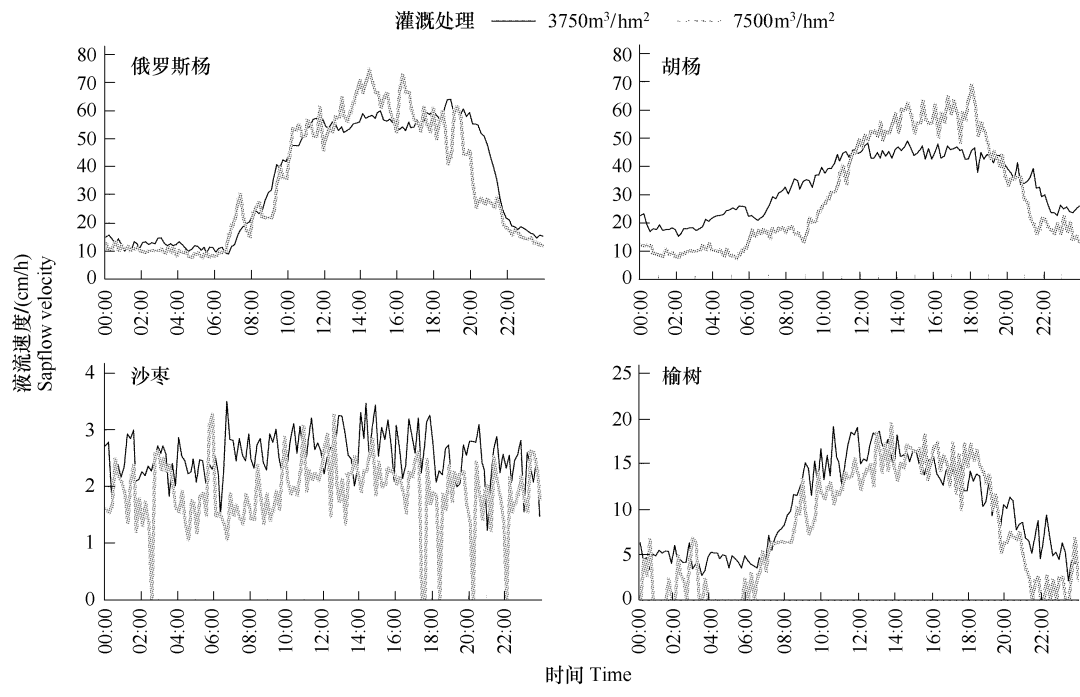


图3 4种树木不同灌溉量下液流日变化曲线  
Fig.3 Diurnal change of sap flow of four tree species in different irrigation

表3 4树种茎干液流速度与主要环境因子相关关系(Pearson 相关)

Table 3 The correlation between daily sap flow rate and each meteorological factor for four tree species

| 树种 Tree species                     | 风速 $V_w$ | 相对湿度 $RH$ | 气温 $T_a$ | 地温 $T_s$  | 叶温 $T_l$ | 饱和水汽压差 $VPD$ |
|-------------------------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|--------------|
| 俄罗斯杨 <i>P. Russkii</i> Jabl.        | 0.685 ** | -0.725 ** | 0.951 ** | -0.301 ** | 0.934 ** | 0.911 **     |
| 胡杨 <i>P. euphratica</i> Oliv.       | 0.088    | -0.257 ** | 0.802 ** | -0.429 ** | 0.740 ** | 0.675 **     |
| 沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i> L. | 0.034    | -0.164    | 0.250 ** | -0.370 ** | 0.180 *  | 0.265 **     |
| 榆树 <i>Ulmus pumila</i> L.           | -0.022   | -0.237 ** | 0.705 ** | -0.593 ** | 0.598 ** | 0.555 **     |

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$

在以上分析的基础上,利用多元线性回归方法对环境因子与液流速率的相关性进行逐步回归,以95%的置信度作为因变量的入选和剔除临界值,可得到液流流速与气象因子的最优回归方程用于预测树木茎干液流流速:

$$SF_1 = -30.175 + 3.083T_a + 0.323RH - 1.801T_l + 1.953V_w - 6.345VPD \quad (R^2 = 0.959 \quad \text{sig. } F = 0.007)$$

$$SF_2 = 22.936 + 2.089T_a - 2.579T_s + 0.440RH \quad (R^2 = 0.918 \quad \text{sig. } F = 0.000)$$

$$SF_3 = 4.828 - 0.096T_s + 0.129VPD \quad (R^2 = 0.206 \quad \text{sig. } F = 0.001)$$

$$SF_4 = 13.964 + 1.147T_a - 0.967T_s - 2.420VPD - 0.236T_l \quad (R^2 = 0.830 \quad \text{sig. } F = 0.009)$$

其中  $SF_1$ 、 $SF_2$ 、 $SF_3$ 、 $SF_4$  分别代表俄罗斯杨、胡杨、沙枣和榆树液流速度估测值。

环境因子对于不同树种表现出不同的相关性,树种不同环境主导因子也有所不同。将回归方程估测值与实测值比较,结果显示除沙枣外,采用逐步回归方法建立的方程能够很好的预测树木液流流速的变化。

### 3 讨论与结论

(1)植物液流特征能够反映植物自身生理特性和环境因子影响。有研究表明干旱胁迫下植物液流流速日变化具有双峰或多峰特性,存在“午休”现象<sup>[2]</sup>。本研究中,3750m³/hm² 和 7500m³/hm² 灌溉量下俄罗斯杨、胡杨和榆树茎干液流流速日变化均表现为单峰型,无午休现象,说明树木的生长未受到水分胁迫,即在

3750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌溉量下已能满足3种树木现阶段生长的需要,无需增加灌溉量。植物在水分胁迫和非胁迫状态下表现出这种不同液流流速变化特征可用于精确确定树木最适灌溉量。本研究中4种树木液流速度的种间差异十分明显,不同树种间耗水量差异显著,说明在同种生境下,相同生活型的不同种植物的液流速率也存在相当大的差异,俄罗斯杨日平均液流速度是沙枣的13.8倍,但在相同属种的俄罗斯杨和胡杨间所表现出的差异较小,俄罗斯杨日平均液流速度仅是胡杨的1.04倍,这能够反映出4种树木种源差异上的特点。从蒸腾耗水量上比较,俄罗斯杨最高,其次是胡杨,榆树和沙枣。树木这种在耗水特性上的差异,对于干旱区防护林树种选育,以及生态恢复与重建过程中植物物种选择具有重要意义,但具体树种的选育选择过程中还要综合考虑树木的防护效果和经济效益,抗病虫害特性等因素。

(2) 4种树木液流速度沿径向位点的变化没有呈现一致的规律,俄罗斯杨、沙枣、榆树径向位点液流速率从形成层到髓心呈梯度递减,胡杨径向位点液流速率从形成层到髓心表现出先减小后增加再次减小的变化,这是不同树木木质部导管径向分布和导管径级大小差异造成的。水分在植物体内形成蒸腾流,其最大速度主要依赖于植物疏导系统的解剖学特征<sup>[14]</sup>。液流传导通道是木质部导管,导管数量、径级和分布影响液流速度径向变化规律。West、Brown和Enquist提出树木水分传导分形网络模型虽然认为树木径向导管会按照一定比例均匀变细<sup>[16]</sup>,但一些树木木质部的解剖特征并不支持这一模型<sup>[17]</sup>,因此胡杨径向位点液流速度的不规则变化可能是树干内木质部导管直径大小以及数量沿径向分布的不规律所决定。

(3) 4种树木在7500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌溉处理下的日均液流速度低于3750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌溉处理下的日均液流速度,这一现象与干旱胁迫下沙拐枣<sup>[10]</sup>、梭梭<sup>[18]</sup>液流速度随土壤水分条件变化的趋势相反。由俄罗斯杨、胡杨、榆树的液流流速日变化曲线具有的单峰特征判断,3种树木没有受到水分胁迫。对7500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌溉处理和3750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌溉处理监测样地进行微气象比较分析,在日均气温差异较小的条件下(30.2℃和30.26℃),7500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>灌溉处理日平均空气相对湿度偏大(45.47%和34.48%),叶温与气温之间差值偏低(0.09℃和0.68℃),饱和水汽压差较小(1.958 kPa和2.372 kPa),各种因子协同作用,尤其是能够反映气温和相对湿度协同作用的饱和水汽压差变小,降低了叶片和空气间的水势差,使得叶片气孔导度降低,一定程度的影响4种植物的蒸腾,反映到液流上表现为流速下降。加之水分含量大造成土壤通气不良,导致土壤含氧量和土壤温度下降,树木的根系这种条件下呼吸作用下降,根系代谢减弱,根系吸水能力降低,导致树干液流速度减小。中午出现较高流速是由于随着气温的升高,正午后相对湿度降低到了最低点,此时环境因子的协同限制降低或消失,土壤水分条件较好条件下,就会呈现较高流速。综合分析认为,在水分条件良好的条件下,灌溉量的增加会抑制植物的蒸腾,水分利用效率会降低,更多的水消耗于地表蒸发或下渗,因此确定最佳的灌溉水量有利于提高水分利用效率。

(4) 树干液流流速受环境因子的综合影响,主导环境因子因树种不同而有所不同。由4树种回归方程可以看出,影响4种树木液流流速的环境因子中,俄罗斯杨液流流速主导因子是气温、相对湿度、叶温和饱和水汽压差;胡杨液流流速主导因子为气温、地温和相对湿度;沙枣液流流速的主导因子为地温和饱和水汽压差;榆树液流流速主导因子是气温、地温、饱和水汽压差和叶温。可以看出4树种中影响俄罗斯杨液流流速的主导因子较多,表明其对各环境因子反应最为敏感,榆树次之,胡杨和沙枣环境敏感性最低,反映出4种树木的环境抗逆性,顺序为:沙枣>胡杨>榆树>俄罗斯杨。

#### Reference:

- [1] Frederick C M, Jose L A, Guillermo G, Holbrook N M, Jaime Cavalier S, Joseph wright. Partitioning of soil water among canopy trees in a seasonally dry tropical forest. *Oecologia*, 1999, 121(3): 293-301.
- [2] Xu X Y, Sun B P, Ding G D, Guo S J, Chai C W. Sap flow patterns of three main sands-fixing shrubs and their responses to environmental factors in desert areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 895-905.
- [3] Wullschlegel S D, Meinzer F C, Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiology*, 1998, 18(8/9): 499-512.
- [4] Yan C R, Alec Downey, Han X G, Chen L Z. A study on sap flow of *Juglans mandshurica* of growth season in deciduous broadleaf forest Beijing

- mountain area. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 793-797
- [ 5 ] Cohen Y, Fuchs M, Falkenflug V, Moreshet S. Calibrated heat pulse method for determined water uptake in cotton. *Agronomy Journal*, 1988, 80: 398-402.
- [ 6 ] Edwards W R N, Becker P, Cermak J. A unified nomenclature for sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1997, 17(1): 65-67.
- [ 7 ] Gerard J Kluitenberg, Jay M Ham. Improved theory for calculating sap flow with the heat pulse method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126(1/2): 169-173.
- [ 8 ] Edwards W R N, Warwick N W M. Transpiration from a kiwi fruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1984, 27: 537-543.
- [ 9 ] Chang X X, Zhao W Z. Sap flow of Gansu poplar in farmland shelter forest during the growing season in desert oasis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1436-1441.
- [ 10 ] Xu H, Zhang X M, Wang Y D, Wei J, Liang S M. Study on water consumption of *Calligonum arborescens* Litv. in shelterbelts along the Tarim Desert highway. *Arid Zone Research*, 2006, 23(2): 216-222.
- [ 11 ] Wang H T, Ma L Y, Sun P S. Sap flow fluctuations of *Pinus Tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* in late autumn. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(5): 31-37.
- [ 12 ] Xia G M, Kang S Z, Li F S, Zhang J H, Zhou Q Y. Diurnal and seasonal variations of sap flow of *Caragana korshinskii* in the arid desert region of North West China. *Hydrological Processes*, 2008, 22(8): 1197-1205.
- [ 13 ] Ma L, Rao X Q, Zhao P, Lu P, Cai X A, Zeng X P. Diurnal and seasonal changes in whole-tree transpiration of *Acacia mangium*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(1): 67-73.
- [ 14 ] Jiang G M. *Plant Physiological Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2004. 93-99.
- [ 15 ] Hans Lambers, F Stuart Chapin III, Thijs L. *Plant Physiological Ecology*. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005. 134-135
- [ 16 ] Enquist B J, West G B, Charnov E L, Brown J H. Allometric scaling of prucuection and life-history variation in vascular plants. *Nature*, 1999, 401: 907-911.
- [ 17 ] Fan Z X, Cao K F, Zou S Q. Axial and radial changes in xylem anatomical characteristics in six evergreen broadleaved tree species in AiLao Mountain, YunNan. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(2): 968-975.
- [ 18 ] Xie T T, Zhang X M, Liang S M, Shan L S, Yang X L, Hua Y H. Effects of different irrigations on the water physiological characteristics of *Haloxylon ammodendron* in Taklimakan Desert hinterland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4): 711-716.

#### 参考文献:

- [ 2 ] 徐先英, 孙保平, 丁国栋, 郭树江, 柴成武. 干旱荒漠区典型固沙灌木液流动态变化及其对环境因子的响应. *生态学报*, 2008, 28(3): 895-905.
- [ 4 ] 严昌荣, Alec Downey, 韩兴国, 陈灵芝. 北京山区落叶阔叶林中核桃楸在生长中期的树干液流研究. *生态学报*, 1999, 19(6): 793-797.
- [ 9 ] 常学向, 赵文智. 荒漠绿洲农田防护树种二白杨生长季节树干液流的变化. *生态学报*, 2004, 24(7): 1436-1441.
- [ 10 ] 许浩, 张希明, 王永东, 魏江, 梁少民. 塔里木沙漠公路防护林乔木状沙拐枣耗水特性. *干旱区研究*, 2006, 23(2): 216-222.
- [ 11 ] 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. *林业科学*, 2002, 38(5): 31-37
- [ 13 ] 马玲, 饶兴权, 赵平, 陆平, 蔡锡安, 曾小平. 马占相思整树蒸腾的日变化和季节变化特征. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 67-73.
- [ 14 ] 蒋高明. *植物生理生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2004: 93-99.
- [ 15 ] Hans Lambers, F. Stuart Chapin III, Thijs L. *植物生理生态学*. 杭州: 浙江大学出版社, 2005. 134-135.
- [ 17 ] 范泽鑫, 曹坤芳, 邹寿青. 云南哀牢山 6 种常绿阔叶树木木质部解剖特征的轴向和径向变化. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 968-975.
- [ 18 ] 解婷婷, 张希明, 梁少民, 单立山, 杨小林, 花永辉. 不同灌溉量对塔克拉玛干沙漠腹地梭梭水分生理特性的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(4): 711-716.