

黄土高原水蚀风蚀复合区几种树木蒸腾耗水特性

周海光¹, 刘广全^{1,2,*}, 焦 醒¹, 王鸿喆²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 利用 PT 茎流仪、LI-6400 光合测定系统和 LI-1400 气象工作站对黄土高原水蚀风蚀复合区河北杨、小叶杨和山杏 3 种树木生长季节树干液流特征、叶片蒸腾速率及其环境因子进行测定。结果表明: 典型天气 3 种树种树干液流昼夜节律明显, 夜晚有微弱的稳定的树干液流存在, 单双峰规律不明显, 3 树种树干液流启动和停止时刻基本一致, 树干液流速率启动时间为 7:00 左右, 停止时间为 20:40 左右; 3 树种平均树干液流速率分别为 $(3.65 \pm 0.40) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(2.22 \pm 0.21) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(1.63 \pm 0.13) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, 日单株蒸腾耗水量分别为 $(49.29 \pm 5.42) \text{ kg}$ 、 $(30.64 \pm 2.92) \text{ kg}$ 、 $(22.19 \pm 1.73) \text{ kg}$; 阴雨天气对树木蒸腾耗水影响较大; 树干液流与环境因子日变化规律相吻合, 树干液流启动和停止特征时刻滞后于各环境因子对应的特征时刻, 但滞后时间长短不一, 而峰值特征时刻则早于各环境因子对应的特征时刻; 树干液流与光合有效辐射、大气温度、土壤温度及风速呈显著正相关, 与大气相对湿度呈显著负相关, 环境因子与树干液流速率相关性依次排序为: 光合有效辐射 > 大气温度 > 大气相对湿度 > 土壤温度 > 风速。

关键词: 黄土高原; 水蚀风蚀复合区; 人工植被; 树干液流; 影响因子

文章编号: 1000-0933(2008)09-4568-07 中图分类号: Q142, Q945, Q948, S718.43 文献标识码: A

Water consumption by transpiration of several trees species in the Loess Plateau with mixed water and wind erosion

ZHOU Hai-Guang¹, LIU Guang-Quan^{1,2,*}, JIAO Xing¹, WANG Hong-Zhe²

1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China

2 Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Shaanxi, Yangling 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4568 ~ 4576.

Abstract: The paper aimed to study the characteristics of stem sap flow, the transpiration rate and their correlations with the environmental factors for tree species, *Populus hopeiensis*, *P. simonii* and *Armeniaca ansu* in the mixed area with both water and wind erosion on the Loess Plateau of northwestern China. We used PT-stem flow and LI-6400 Photosynthesis systems, and a LI-1400 meteorological station. The stem sap flow was usually weak at nighttime. The regulation of single-peak and multiple-peak was not obvious. The start and ending time of sap flow of the three species were similar, starting at 7:00 am and ended at 8:04 pm. The diurnal stem sap flow rate of *P. hopeiensis*'s, *P. simonii*'s and *A. ansu*'s were (3.65 ± 0.40) , (2.22 ± 0.21) and (1.63 ± 0.13) kilograms per hour, respectively, resulting in daily water use of (49.29 ± 5.42) , (30.64 ± 2.92) and (22.19 ± 1.73) kilograms, respectively. Overcast and rainy weather influenced transpiration sharply. The stem sap flow followed the environmental factors closely. The starting and the ending points of the stem sap

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD09B06); 国家水利部“948”资助项目(20207)

收稿日期: 2008-03-11; 修订日期: 2008-06-17

作者简介: 周海光(1983~), 男, 吉林人, 硕士生, 从事生态水文及植被水分生理研究. E-mail: 02134213@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gqliu@iwhr.com

Foundation item: The project was financially supported by National 11th-five Years Project of China (No. 2006BAD09B06) and Ministry of Water Resources “948” program of China (No. 200207)

Received date: 2008-03-11; **Accepted date:** 2008-06-17

Biography: ZHOU Hai-Guang, Master candidate, mainly engaged in hydro-ecology and vegetation water physiology. E-mail: 02134213@163.com

flow fell behind the corresponding changes of environmental factors with different lags. The peaks of the stem sap flow came earlier than other environmental factors. The stem sap flow had significant positive correlations with photosynthetic active radiation, air temperature, soil temperature and wind speed, but had significant negative correlation with air relative humidity. The rank in influencing sapflow rate among environmental factors in a descending order was: photosynthetic active radiation, air temperature, air relative humidity, soil temperature and wind speed.

Key Words: the Loess Plateau; wind-water erosion region; artificial vegetations; stem sap flow; impact factor

黄土高原的强烈侵蚀中心出现在水蚀风蚀复合区,该区为黄河粗泥沙的主要来源区,生态环境脆弱,自然灾害频繁。强化水蚀风蚀交错区综合治理,对治黄及西部地区开发具有重大意义^[1],植被建设和保护是该区水土流失防治、风沙治理的关键。树木蒸腾耗水特性的研究是树木水分生理生态学研究的核心,也是贯穿整个森林生态和森林培育的理论基础之一,涉及到造林树种选择与林分结构配置的理论 and 实践^[2]。本文旨在通过对该区主要造林树种蒸腾耗水特性的研究,进一步掌握造林树种的耗水特性,为该区造林树种的选择及配置提供科学依据。

由于树木蒸腾耗水量的 99.8% 以上来自树干液流,所以通常用液流量直接反映树木的蒸腾耗水能力^[3]。应用热平衡原理测定树干液流由 Huber^[4] 首先提出,之后热平衡、热脉冲和热扩散等热技术广泛应用于树木蒸腾耗水特性的研究。在我国,诸多学者应用热脉冲技术对杨树(*Populus* spp.)^[5]、棘皮桦(*Betula davurica*)^[6]、五角枫(*Acer truncatum*)^[6]、桃树(*Prunus persica*)^[7]、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)^[8]、胡杨(*P. euphratica*)^[9]、柽柳(*Tamarix chinensis*)^[10]、花棒(*Hedysarum scoparium*)^[11]、尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)^[12]等进行了研究;应用热平衡技术对核桃楸(*Juglans mandshurica*)^[13]、黄柳(*Salix gordejivii*)^[14]、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)^[14]、龙爪槐(*Sophora japonica* f. *pendula*)^[15]等进行了研究;应用热扩散技术对油松(*Pinus tabulaeformis*)^[16]、侧柏(*Platycladus orientalis*)^[16]、火炬松(*P. taeda*)^[17]、苹果(*Malus pumila*)^[18]、樟子松(*P. sylvestris* var. *mongolica*)^[19]等进行了研究,针对这些树种分别在不同地区就单株耗水量、耗水节律、蒸腾耗水及其影响因子进行了广泛的研究,取得了一定的研究进展。然而在黄土高原水蚀风蚀复合区,应用热技术对该区主要造林树种河北杨(*P. hopeiensis*)、小叶杨(*P. simonii*)和山杏(*Armeniaca ansu*)蒸腾耗水的研究较少。

1 材料与方法

1.1 调查区自然概况

研究区位于陕西吴起的西北部,地理坐标为东经 108°23'09"~108°23'20"、北纬 37°21'09"~37°21'20",海拔 1500~1600m。地处毛乌素沙地南缘,地貌为中山丘陵沟壑区,属无定河流域。该区属半干旱温带大陆性季风气候,年平均气温 7.8℃,极端最低气温 -25.1℃,极端最高气温 37.1℃,≥10℃ 积温 3086℃,年无霜期 130d 左右。年平均降水量 395.4mm,分布不均,主要集中在 7~9 月月份,年平均蒸发量为 1595.2 mm;土壤类型为黄绵土,土壤质地为轻砂壤,凋萎湿度为 3.5%,田间持水量为 15.3%。

该区处于森林草原向典型草原过渡地带,由于气候、地质地貌、土壤肥力等的制约,以及人为活动的影响,天然植被已破坏殆尽,现存植被均系人工营造,主要造林树种有河北杨、小叶杨、白榆(*Ulmus pumila*)、山杏、山桃(*P. davidiana*)、柠条(*C. korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、沙柳(*S. psammophila*)等,以灌木为主,小乔木林比例低呈片断零星分布。

1.2 研究材料

研究地点为缓坡地,坡度 11°,海拔 1520m。研究材料为河北杨、小叶杨、山杏。调查树种均为人工林,河北杨位于西南坡,原为单行行道树,现今发展成为零星分布的孤立木,长势良好;小叶杨及山杏位于西北坡,小叶杨为纯林,造林密度为 800 株·hm⁻²,由于自然条件恶劣,长势较差,小叶杨均成为“小老头树”;山杏为乔

灌混交林,与山桃、柠条混交,造林密度为 $900 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。用样方法确定样树,选择能够代表当地生产力水平的林分,设置 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 的样方,每木检尺,确定标准木,作为待测样树,并考虑干形,以便仪器安装。样树的基本特征如表 1。

表 1 被测树木生长状况
Table 1 Characteristics of the trees measured

树种 Trees	年龄 Age (a)	密度 Density (trees $\cdot \text{hm}^{-2}$)	树高 Height (m)	胸径 Diameter (cm)	冠幅 Crown (m $\times$ m)	树皮厚度 Bark thickness (cm)
河北杨 <i>P. hopeiensis</i>	48	240	15.5	23.5	6.2 $\times$ 5.8	1.3
小叶杨 <i>P. simonii</i>	48	800	3.6	13.2	3.3 $\times$ 3.5	1.4
山杏 <i>A. ansu</i>	48	900	3.2	13.6	4.1 $\times$ 3.8	1.4

1.3 研究方法

1.3.1 树干液流测定

在样木树干胸高处,选择向阳一面安装树干液流传感器。测量树干胸高处周长和树皮与韧皮部厚度,确定仪器参数;然后用锤子、刮刀等工具平整树干表面;将安装支架固定在平整的位置,安装电极,每一套电极包含 4 块电极板,上面 3 个使用带白色绝缘部分的电极,下面 1 个使用普通电极。将传感器悬挂在电极上,将探针插入到电极中间的窄槽中,为防止阳光照射等环境影响需要安装防辐射罩,再将传感器与数据采集器用数据线连接。设置仪器参数,数据测量间隔为 2min,数据存储间隔为 10min,并对各通道命名,进行仪器调试,待仪器读数稳定,开始连日观测。观测日期为 2007 年 8~9 月份。

1.3.2 叶片蒸腾速率测定

使用 LI-6400 光合测定系统测定叶片蒸腾速率。在样树向阳面选择长势良好的叶片 3 个做好标记,作为待测样叶。日测定时段为 8:00 至 18:00,测定时间步长为 2h,每个样叶测定 5 个值,将测定的 15 个值进行平均作为该时刻测定值。测定日期同树干液流。

1.3.3 环境因子测定

使用 LI-1400 气象工作站测定环境因子。所测环境因子有光合有效辐射 (PAR)、大气温度 (T_a)、土壤温度 (T_s)、大气相对湿度 (RH_a)、风速 (S_w)。将气象工作站设置在临近样树的林间空地,将微型百叶箱置于 1.0m 高处安装固定,将数据采集器及电源盒置于其中固定;将光合有效辐射传感器水平固定在百叶箱顶部操作平台上;将大气温度和相对湿度传感器置于百叶箱底部孔道内,以避免太阳直接照射及雨淋;将土壤温度传感器埋设于空地内平缓处,埋深为 20cm;风速传感器利用支架固定在 2.5m 高处,以测定林间风速。根据各通道设定各因子参数,数据记录步长均为 30min。测定时间与树干液流同步。

1.4 数据分析

应用 Office Excel 2003 及 SPSS13.0 统计软件对数据进行处理、图表制作及相关性分析。

2 结果分析

2.1 树干液流速率日变化

2.1.1 晴天树干液流速率日变化

对河北杨、小叶杨和山杏 3 树种在典型晴朗天气下,分别进行连续 4d 树干液流观测。3 树种树干液流昼夜节律基本一致,即早晨树干液流速率迅速升高,在中午达到峰值,单、双峰规律不明显,之后树干液流速率又迅速降低,在傍晚基本稳定在相对较低速率值(图 1)。3 树种树干液流启动时间分别为 7:10、7:00、6:50,

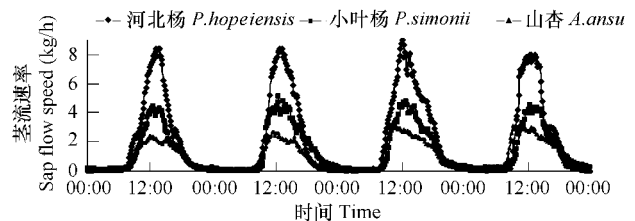


图 1 晴天树干液流速率日变化

Fig. 1 Diurnal variations of stem sap flow speed in sunshine
小叶杨和山杏的观测日期为 2007 年 8 月 13~16 日,河北杨的观测日期为 2007 年 9 月 2~5 日 The observing dates of *P. simonii* And *A. ansu* are between 13 to 16 in August 2007, but the observing dates of *P. hopeiensis* is between 2 to 5 in September 2007

停止时间分别为 20:40、20:50、20:30,各树种树干液流启动和停止时间基本一致。3 树种树干液流速率峰值分别为 8.18 、 4.43 、 $2.67 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,出现时刻分别为 13:10、12:30、12:20。将树干液流启动至停止的时段定义为日树干液流时段,在日树干液流时段内,3 树种平均树干液流速率分别为 $(3.65 \pm 0.40) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(2.22 \pm 0.21) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(1.63 \pm 0.13) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ (置信度为 99%);则日单株耗水量分别为 $(49.29 \pm 5.42) \text{ kg}$ 、 $(30.64 \pm 2.92) \text{ kg}$ 、 $(22.19 \pm 1.73) \text{ kg}$,依次排序为:河北杨 > 小叶杨 > 山杏。河北杨日单株耗水量明显高于其他两树种(表 2)。

为满足自身水分平衡,在根压作用下,树干液流在夜间以较小的、稳定的速率持续至第二日清晨,此阶段吸收的水分基本储存在树木体内,维持自身水分平衡。在夜间非树干液流时段内,河北杨、小叶杨和山杏 3 树种平均树干液流速率分别为 $(0.11 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(0.18 \pm 0.04) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(0.15 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ (置信度为 99%);则夜间非树干液流时段内吸收水分总量分别为 $(1.11 \pm 0.20) \text{ kg}$ 、 $(1.83 \pm 0.43) \text{ kg}$ 、 $(1.55 \pm 0.17) \text{ kg}$,依次排序为:河北杨 > 小叶杨 > 山杏。河北杨日单株耗水量明显高于其他两树种(表 2)。

表 2 3 树种日树干液流特征
Table 2 Characteristics of daily stem sap flow of 3 trees

树种 Trees	启动时间 Start-up time	波峰时间 Peak time	停止时间 Stop time	日树干液流时段数 Daily stem sap flow hours (h)	平均树干液流速率 Average stem sap flow speed ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	标准差 Standard deviation	日耗水量 Daily water consumption (kg)
河北杨 <i>P. hopeiensis</i>	7:10	13:10	20:40	13.5	3.65 ± 0.40	2.82	49.29 ± 5.42
小叶杨 <i>P. simonii</i>	7:00	12:30	20:50	13.8	2.22 ± 0.21	1.50	30.64 ± 2.92
山杏 <i>A. ansu</i>	6:50	12:20	20:30	13.6	1.63 ± 0.13	0.89	22.19 ± 1.73

2.1.2 阴雨天气树干液流速率日变化

在 2007 年 8 月 6~8 日连续阴雨天气下,对河北杨和小叶杨树干液流速率日变化进行观测。6、7 日天气多云,光合有效辐射强度较弱,2 树种树干液流速率较低,尤其对小叶杨影响较明显;8 日天气阴沉,下午有短时雷阵雨,空气湿度较大,2 树种树干液流速率相对前两日均较低,且降雨时段树干液流速率明显降低,雨后又有所升高,形成双峰现象,树干液流时段内 2 树种平均树干液流速率分别为 $(0.69 \pm 0.14) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(0.22 \pm 0.05) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,明显低于典型晴天时平均树干液流速率(图 2)。

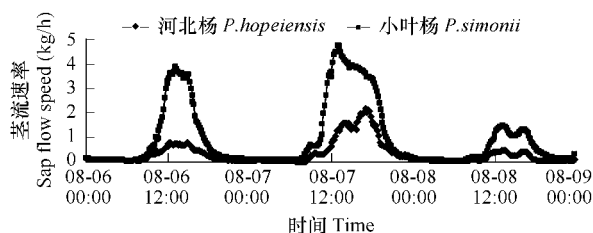


图 2 阴雨天气河北杨和小叶杨树干液流速率日变化

Fig. 2 Diurnal variations of stem sap flow speed of *P. hopeiensis* and *P. simonii* in overcast and rainy day

在连续阴雨天气下,对山杏树干液流速率日变化进行观测。3d 内降雨量分别为 32.3、1.3、3.3mm。29 日白天持续降雨,且降雨量较大,对山杏树干液流速率影响明显,山杏树干液流速率处于较低值状态下波动,树干液流时段内平均树干液流速率为 $(0.81 \pm 0.14) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$;30 日为晴天,加之前期土壤水分得到降水补充,所以该日树干液流速率明显较高,其树干液流时段内平均树干液流速率为 $(2.96 \pm 0.55) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$;在 31 日,10:00 以后,天气晴转阴,致使该日树干液流波峰不明显,树干液流速率处于波动状态;阴雨天气对夜间树干液流影响不大(图 3)。

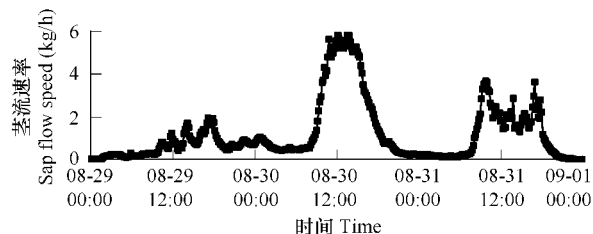


图 3 阴雨天气山杏树干液流速率日变化

Fig. 3 Diurnal variations of stem sap flow speed of *A. ansu* in overcast and rainy day

2.2 树干液流速率与环境因子关系

树木蒸腾耗水主要受光合有效辐射、大气温度、大

气相对湿度、土壤温度及风速等环境因子的影响较为显著。其中,光合有效辐射是根本的影响因子,它不仅影响树木自身的生理活动,同时也是大气温度、大气相对湿度、土壤温度等环境因子的直接控制因子。通过对典型天气日的连续观测,光合有效辐射与树干液流速率日变化规律一致,光合有效辐射强度在早晨 6:30 左右从零开始迅速升高,而树干液流速率启动时间相对滞后 30min 左右。随着光合有效辐射强度的不断升高,直接导致大气温度不断升高,大气相对湿度逐渐降低,叶片内外蒸汽压差增大,诱导气孔打开,叶片蒸腾速率不断增大,树木体内水分不断散失,在水力梯度的作用下,根部则不断吸收水分通过树干木质部向上运移,用来补充耗散的水分,进而树干液流速率不断增大。在 4 个观测日内光合有效辐射强度峰值达到 $1763 \mu\text{mol}/(\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$,出现在 13:30 左右,较树干液流速率峰值出现时间滞后 20~60min(图 4),0:00 时最低。在光合有效辐射强度达到一定值时,其诱导叶表气孔关闭,蒸腾作用受到限制,从而导致树干液流速率达到一定值时,不再继续升高,处于波动状态;下午随着光合有效辐射强度和大气温度逐渐降低,大气相对湿度逐渐升高,叶内外蒸汽压差减小,叶片蒸腾速率随之降低,树干液流速率也随之降低,在傍晚 20:00 左右,光合有效辐射降为 $0 \mu\text{mol}/(\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$,大气相对湿度升高到 80% 以上,再经 30~50min 后各树种树干液流速率降到较低值,并稳定存在。

大气温度、土壤温度的连日变化规律比较稳定,观测日内日平均温度分别为 16.3 、 18.6°C ,日峰值分别为 24.3 、 26.8°C ,峰值出现时间分别为 14:30、15:00(图 5)。

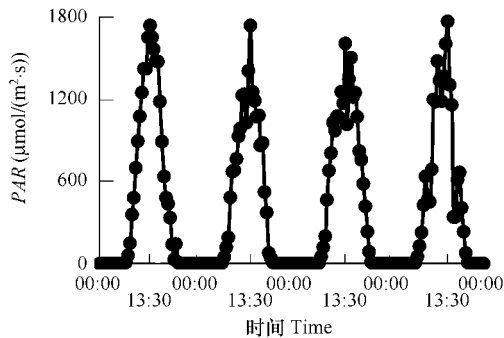


图 4 光合有效辐射日变化

Fig. 4 Diurnal variation of photosynthetically active radiation

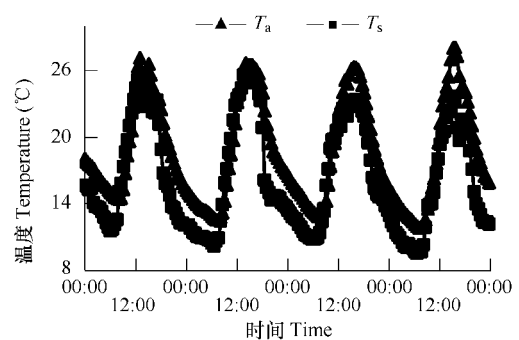


图 5 大气和土壤温度日变化

Fig. 5 Diurnal variation of temperature of air and soil

大气相对湿度日变化幅度为 $65.25\% \pm 30.75\%$,变化幅度较大(图 6)。大气温度、土壤温度和大气相对湿度与树干液流速率日变化规律一致,但是这 3 种环境因子峰值出现时间均滞后于树干液流速率峰值出现时间,滞后时间大约为 1~2h。风速日变化也呈现昼夜的波动性,但规律不明显,该区日平均风速 $13.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,风速较大,对树木蒸腾有一定的促进作用(图 7)。

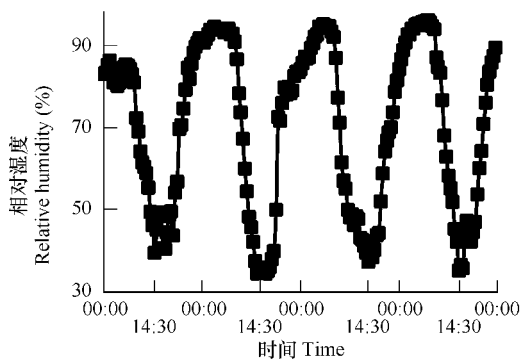


图 6 大气相对湿度日变化

Fig. 6 Diurnal variation of air relative humidity

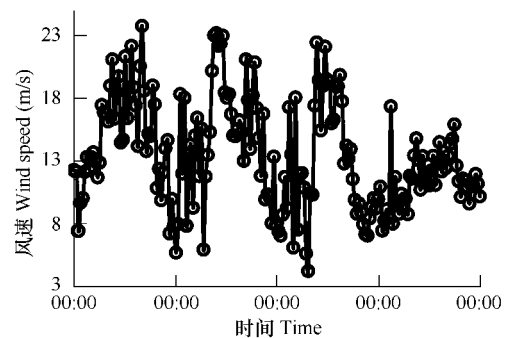


图 7 风速日变化

Fig. 7 Diurnal variation of wind speed

树干液流速率变化规律受各种环境因子综合影响。对 3 树种树干液流速率与光合有效辐射、大气温度、大气相对湿度、土壤温度及风速进行相关性分析。3 树种树干液流速率与光合有效辐射、大气温度呈显著正相关,与大气相对湿度呈显著负相关。树干液流速率与土壤温度和风速的相关性相对较低。各环境因子与树干液流速率相关性依次排序为:光合有效辐射 > 大气温度 > 大气相对湿度 > 土壤温度 > 风速(表 3)。

表 3 树干液流速率与环境因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis of stem sap flow speed and environmental factors

树种 Trees	树干液流速率 Sap flow velocity	相关系数 Correlation coefficient				
		光合有效辐射 PAR	大气温度 T_a	大气相对湿度 RH_a	土壤温度 T_s	风速 S_w
河北杨 <i>P. hopeiensis</i>	Q_{Tree}	0.976 **	0.887 **	-0.842 **	0.775 **	0.726 **
小叶杨 <i>P. simonii</i>	Q_{Tree}	0.942 **	0.938 **	-0.910 **	0.864 **	0.685 **
山杏 <i>A. ansu</i>	Q_{Tree}	0.955 **	0.908 **	-0.865 **	0.752 **	0.848 **

** : P 为 0.01 的水平上相关性显著 Correlation is significant at the 0.01 level

将河北杨、小叶杨和山杏 3 树种树干液流速率与光合有效辐射、大气温度、大气相对湿度、土壤温度和风速进行偏相关分析,得到 3 树种树干液流速率对应的各环境因子偏相关系数分别为 0.903、0.255、-0.124、0.269、0.172;0.869、0.314、-0.262、0.336、0.229;0.638、0.357、-0.291、0.569、0.119。可见,在树木生长旺盛期内,影响蒸腾速率的最主要环境因子为光合有效辐射。

对河北杨、小叶杨和山杏的树干液流速率与光合有效辐射、大气温度、大气相对湿度、土壤温度和风速进行回归分析,得到环境因子与树干液流速率之间的回归模型,3 树种复相关系数均在 0.98 以上(表 4)。

表 4 树干液流速率与环境因子回归模型

Table 4 Regression models of stem sap flow speed and environmental factors

树种 Trees	回归方程 Regression equations	复相关系数 Multiple correlation coefficient	F 值 F value	显著性 Significance
河北杨 <i>P. hopeiensis</i>	$Q_{Tree} = 4.219 + 0.005PAR + 0.275T_a - 3.173RH_a + 0.178T_s + 0.018S_w$	0.987	306.49 **	0.000
小叶杨 <i>P. simonii</i>	$Q_{Tree} = 4.484 + 0.002PAR + 0.193T_a - 3.852RH_a + 0.128T_s + 0.013S_w$	0.987	317.66 **	0.000
山杏 <i>A. ansu</i>	$Q_{Tree} = 2.983 + 0.001PAR + 0.152T_a - 2.706RH_a + 0.164T_s + 0.004S_w$	0.988	331.33 **	0.000

** : P 为 0.01 的水平上相关性显著 Correlation is significant at the 0.01 level

3 结论与讨论

(1) 河北杨、小叶杨和山杏 3 树种树干液流呈昼夜波动性变化,白天树干液流速率随着光合有效辐射的增强而不断增大,但是当树干液流速率达到一定值时,就不再随其升高,达到峰值,之后则波动性变化并随下午辐射强度的减弱而降低,可能是土壤水分供应与植物需求之间制约;树干液流速率单、双峰规律不明显,受天气状况影响较大;夜晚树干液流明显存在,并以较小速率稳定进行;3 树种树干液流启动时间均在 7:00 左右,停止时间均在 20:40 左右;3 树种在晴朗天气下,平均树干液流速率分别为 $(3.65 \pm 0.40) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(2.22 \pm 0.21) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $(1.63 \pm 0.13) \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,日单株耗水量分别为 $(49.29 \pm 5.42) \text{ kg}$ 、 $(30.64 \pm 2.92) \text{ kg}$ 、 $(22.19 \pm 1.73) \text{ kg}$;阴雨天气对树干液流影响较大。

(2) 树干液流速率和各环境因子日变化规律相吻合,但树干液流时段滞后于日太阳辐射存在时段,滞后时间大约为 30~60min,树干液流与光合有效辐射、大气温度、土壤温度及风速呈显著性正相关,与大气相对湿度呈显著负相关,各环境因子与树干液流速率相关性依次排序为:光合有效辐射 > 大气温度 > 大气相对湿度 > 土壤温度 > 风速,其中光合有效辐射是最主要的影响因素。

(3) 在该区水资源匮乏的状况下,确定造林树种的蒸腾耗水量以及土壤蒸发量,核算其生态用水量,对合理进行植被配置,土壤水资源合理利用具有重要作用。

References:

- [1] Tang K L. Importance and Urgency of Harnessing the Interlocked Area with Both Water and Wind Erosion in the Loess Plateau. *Soil and Water Conservation in China*, 2000, (11): 7—11, 17.
- [2] Wang H T, Zhang G C, Liu X. Principles of Silvicultural Tree Species Selection for Loess Hilly Areas. *World Forestry Research*, 2001, 14(5): 74—78.
- [3] Granier A, Bobay V, Gash J H C, *et al.* Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* An.) in Les Landed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 51(3-4): 309—319.
- [4] Huber B, Beobachtung und Messung pflanzlicher Safrstroene. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 1935, 50: 89—109.
- [5] Liu F J, Edwards W R N. A Study on temporal and special dynamic change of sapflow of *Populus deltoids*. *Forest Research*, 1993, 6(4): 368—372.
- [6] Li H T, Chen L Z. A study on volume and velocity of stem sap flow of *Betula dahurica* and *Acer mono* Forests by the heat-pulse technique. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(1): 1—6.
- [7] Gong D Z, Hu X T, Zhang F C, *et al.* Variations of Stem and Root Sap Flow of Peach Tree Under Different Water Status. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(4): 34—38.
- [8] Zhang X Y, Gong J D. Study on volume and velocity of stem sap flow of *Haloxylon ammodendron* by heat-pulse technique. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, (12): 2250—2254.
- [9] He B, Li W H, Chen Y J, *et al.* Variation of Sap Flow and Stem Diameter of *Populus euphratica* under Drought Stress-A Case Study along Yingsu Section. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(2): 315—320.
- [10] Zhang X Y, Kang E X, Si J H, *et al.* Studies on the Water Consumption Rhythm of *Tamarix* spp in Ejina Oasis. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(3): 159—162.
- [11] Xia G M, Kang S Z, Du T S, *et al.* Transpiration of *Hedysarum scoparium* in arid desert region of Shiyang River basin, Gansu Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1194—1202.
- [12] Zhang N N, Xu D P, Jim Morris, *et al.* Characteristics of Sap Flow in *Eucalyptus urophylla* Plantations on the Leizhou Peninsula. *Forest Research*, 2003, 16(6): 661—667.
- [13] Yan C R, Alec Downey, Han X G, *et al.* A study on sap flow of *Juglans mandshurica* of growth season in deciduous broad-leaf forest Beijing Mountain area. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 793—797.
- [14] Yue G Y, Zhang T H, Zhao H L, *et al.* Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejewii* and *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3205—3213.
- [15] Zhang Y J, Long H M, Xie H X, *et al.* Experimental in *Sophora japonica f. pendula* Hort Sap Flow with Heat Balance Technique. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, 34(17): 4229—4230, 4232.
- [16] Ma L Y, Wang H T, Li P. Comparison of water consumption of some afforestation species in Beijing area. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(2): 1—7.
- [17] Yu M K, Jiang Z L, Lu X Z, *et al.* A Study on the Stem Sap Flow of *Pinus taeda*. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2003, 27(3): 55—60.
- [18] Meng P, Zhang J S, Wang H S, *et al.* Rule of apple trees transpiration and its relation to the micrometeorology on the canopy. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1075—1081.
- [19] Zhang Y Y, Zhou Z F, Dang H Z, *et al.* A Study on the Sap Flow of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* with Thermal Dissipation Probe. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(4): 78—80.

参考文献:

- [1] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性. *中国水土保持*, 2000, (11): 11~16.
- [2] 王华田, 张光灿, 刘霞. 论黄土丘陵区造林树种选择的原则. *世界林业研究*, 2001, 14(5): 74~78.
- [3] 刘奉觉, Edwards W R N. 杨树树干液流时空动态研究. *林业科学研究*, 1993, 6(4): 368~372.
- [4] 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. *北京林业大学学报*, 1998, 20(1): 1~6.
- [5] 龚道枝, 胡笑涛, 张富仓, 等. 不同水分状况下桃树根茎液流变化规律研究. *农业工程学报*, 2001, 17(4): 34~38.
- [6] 张小由, 龚家栋. 利用热脉冲技术对梭梭液流的研究. *西北植物学报*, 2004, (12): 2250~2254.
- [7] 何斌, 李卫红, 陈永金, 等. 干旱胁迫下胡杨茎流日变化分析——以塔里木河下游英苏断面为例. *西北植物学报*, 2007, 27(2): 315~320.
- [8] 张小由, 康尔泗, 司建华, 等. 额济纳绿洲中柽柳耗水规律的研究. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(3): 159~162.
- [9] 夏桂敏, 康绍忠, 杜太生, 等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区花棒蒸腾耗水量. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1194~1202.
- [10] 张宁南, 徐大平, Jim Morris, 等. 雷州半岛尾叶桉人工林树干液流特征的研究. *林业科学研究*, 2003, 16(6): 661~667.
- [11] 严昌荣, Alec Downey, 韩兴国, 等. 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.
- [12] 岳广阳, 张铜会, 赵哈林. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征. *生态学报*, 2006, 26(10): 3205~3213.
- [13] 张云吉, 隆惠敏, 谢恒星, 等. 应用热平衡技术测量龙爪槐液流的试验研究. *安徽农业科学*, 2006, 34(17): 4229~4230, 4232.
- [14] 马履一, 王华田, 林平. 北京地区几个造林树种耗水性比较研究. *北京林业大学学报*, 2003, 25(2): 1~7.
- [15] 虞沐奎, 姜志林, 鲁小珍. 火炬松树干液流的研究. *南京林业大学学报*, 2003, 27(3): 55~60.
- [16] 孟平, 张劲松, 王鹤松, 等. 苹果树蒸腾规律及其与冠层微气象要素的关系. *生态学报*, 2005, 25(5): 1075~1081.
- [17] 张友炎, 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. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 78~80.