

甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化

夏桂敏^{1,2}, 康绍忠^{1,*}, 李王成¹, 王 锋³, 屈艳萍³

(1. 中国农业大学 中国农业水问题研究中心, 北京 100083; 2. 沈阳农业大学水利学院, 辽宁 沈阳 110161;

3. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:采用基于热补偿原理的 SF100 热脉冲茎秆液流自动监测系统, 监测了柠条树干液流的日季变化规律, 利用 Tube-TDR 监测柠条根区 3m 土层深度的含水量变化, 利用自动气象站同步监测太阳辐射、最高与最低气温、相对湿度、风速、风向等气象因子, 同时输出相应的参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 。以上述资料为基础, 对柠条树干液流的昼夜变化、日际动态、木质部径向不同位点液流速率、不同天气条件下的液流变化及液流的季节变化规律进行了分析。利用 SPSS 11.0 统计软件, 分析了液流量与气象因子的相关关系。结果表明: 柠条树干液流昼夜变化显著; 木质部径向液流速率随探针插入深度的增加而减小; 晴天液流变化幅度较大, 雨天液流变化幅度较小; 气象因素对柠条树干液流量影响的大小表现为空气水汽压差 > 太阳辐射 > 气温 > 风速。

关键词:干旱荒漠区; 热脉冲技术; 树干液流; 木质部水分传输; 柠条

文章编号:1000-0933(2006)04-1186-08 **中图分类号:**Q948 **文献标识码:**A

Diurnal and seasonal variation of stem sap flow for *Caragana korshinskii* on the arid desert region in Shiyang river basin of Gansu

XIA Gui-Min^{1,2}, KANG Shao-Zhong^{1,*}, LI Wang-Cheng¹, WANG Feng³, QU Yan-Ping³ (1. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083 China; 2. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Liaoning Shenyang 110161 China; 3. Key Laboratory of Agricultural Water and Soil Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Northwest, Shaanxi Yangling 712100 China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1186 ~ 1193.

Abstract: The SF100 Heat pulse sensors based on the heat compensation theory were applied to study the diurnal and seasonal changes of trunk sap flows for *Caragana korshinskii*. The soil moisture content at 0 ~ 300 cm layer was measured with a tube-type time domain reflectometry (Tube-TDR). The solar radiation, the maximum and minimum air temperature, relative humidity, wind speed, wind direction and precipitation etc. were also measured with an automatic weather station where the reference crop evapotranspiration was provided simultaneously. The diurnal and seasonal variations of sap fluxes, the flow velocity at different positions in the trunk and the sap fluxes under different weather conditions were analyzed. The correlation between the sap flux and the meteorological factors was also analyzed by SPSS 11.0 statistical software. Results showed that the trunk sap flow varied regularly in the diurnal term and the sap flow velocity decreased with the inserted depth into the sapwood. Magnitude of sap flow changed considerably between sunny and rainy days. The order of the main meteorological factors affecting the sap flux of *Caragana korshinskii* trees were: vapor pressure deficit > solar radiation > air temperature > wind speed.

Key words: arid desert region; heat pulse technique; trunk sap flow; xylem water transport; *Caragana korshinskii*

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50339030); 国家自然科学基金“中国西部环境与生态科学重大研究计划”资助项目(90202001)

收稿日期:2005-01-13; **修订日期:**2005-10-14

作者简介:夏桂敏(1973~), 女, 辽宁大连人, 博士生, 主要从事农业与生态节水理论及技术研究。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kangshaozhong@tom.com

Foundation item: The Key Project Was Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50339030); The Key Project of Environment and Ecology Science in West China for Committee of National Natural Science Foundation (No. 90202001)

Received date:2005-01-13; **Accepted date:**2005-10-14

Biography: XIA Gui-Min, Ph.D., mainly engaged in theory and technology on water-saving of agricultural and ecological. E-mail: xiagm1229@tom.com

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)为豆科锦鸡儿属多年生灌木,又称柠条、毛条、大白柠条。高 1.5~5m,根系发达,垂直向入土深 5~6m,最深可达 9m 左右,水平伸展可达 20m。是喜沙的旱生灌木,抗逆性强,能耐低温及酷暑,在 -39℃ 的低温下能安全越冬,夏季沙地表面温度高达 45℃ 时也能正常生长;抗旱性强,在年降水量 150mm 以下地区也能生长。具有耐风蚀、不怕沙埋的特点,是水土保持、防风固沙的优良树种及治理水土流失和退化沙化草场的先锋植物。其适应性也很强,是荒漠、荒漠草原地区的优良灌木饲料。主要分布于我国西北干旱半干旱地区。

随着水危机和荒漠化进程的加剧,研究荒漠沙生植被耗水量,确定沙地水分的合理承载能力,对于旱区生态植被建设与管理有着重要的作用。近年来,国内学者开始关注研究在无灌溉条件下沙生植被的耗水问题^[1-4],但这些研究都是采用大型称重式蒸渗仪进行观测,在一定程度上限制了其根系伸展的空间范围,所得结论与天然条件下存在较大差异,且无法将植被的蒸腾量与土壤的蒸发量区别开来。进入 20 世纪 90 年代以来,利用热脉冲技术测定树木蒸腾耗水已经被国内外学者广泛应用^[5-17],热脉冲技术在树木水分传输理论的研究中已经发挥着相当重要的作用。

热脉冲技术(heat pulse technique),依据热补偿性原理,能在树木自然生长状态下,测量树干木质部上升液流流动速度及流量,从而间接确定树冠蒸腾耗水量,同时相对经济可行^[18]。它不受环境条件、树冠结构及根系特性的影响,方法简单,可测定整株树木的蒸腾量,测量可在林地进行,同株树木可重复测定,同时不干扰树木的生长发育。Zimmerman 称之为“最美妙的测量液流速度的方法”^[11]。热脉冲方法首次是由 Rein 于 1928 年提出来的,用于测定动物的血液流速^[19]。Huber 在 1932 年最早将该技术用于测量木质部液流,首开该技术应用于植物水分生理研究的先河^[20],此后由 Schmidt 在 1937 年用此技术测定了木质部液流,随后,Marshall、Closs、Ladefoged、Decker 和 Skau、Morikawa 及 Edwards 等人进行不断改进完善^[21,22]。

在以往应用热脉冲技术测定树木蒸腾耗水的研究中,研究对象大多集中于高大的乔木、常绿树种及果树等,还较少见利用此技术研究柠条蒸腾耗水的相关报道。本文就是应用热脉冲技术定量测定沙生植被柠条在天然生长条件下的树干液流通量,并分析液流量本身的变化规律及其与环境因子之间的相关关系,为生态需水估算和生态植被建设与管理提供理论依据。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省武威市凉州区,地处腾格里沙漠的边缘,北纬 37°50′49″,东经 102°51′01″,海拔高度 1500m,为大陆性温带干旱气候,地下水埋深 25~30m,土壤质地为沙子,其 300cm 沙层内的平均干容重为 1.54g/cm³,年平均气温 8℃,大于 0℃ 积温 3550℃ 以上,多年平均降水量 160mm,多年平均水面蒸发量 2000mm 左右,干旱指数 15~25。日照时数 3000h 以上,无霜期 150d 以上,日照充足,热量丰富,风大沙多,春季最大风速达 38m/s,多为西北风。

试验沙丘由东北向西南倾斜,相对高差 3~6m。试验小区面积为 60m×48m,主要有柠条、梭梭、花棒 3 种沙生植被,林龄分别为 15、23a 和 20a,无地被植物。试验区内设有自动气象站。

1.2 试验方法

试验于 2004 年 5 月 8 日至 10 月 16 日进行,试验期间的降雨量及用 Penman-Monteith 公式估算的参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 变化情况如图 1 所示,降雨总量 134mm。在试验小区内,根据长势、树冠大小等,选择生长良好的柠条试验木,2 次重复,株高分别为 2.05m 和 1.87m,冠幅分别为 7.08m² 和 6.59m²。采用 SF100 热脉冲液流测定仪连续测定茎基部与主根之间部位不同深度的液流速率,并用相应的分析软件处理所测定数据,进行液流速率和液流量的转换分析及伤口损伤校正。根据计算结果分析干旱荒漠区天然生长条件下柠条液流变化规律及与气象因子的关系。

用自动气象站与热脉冲液流测定仪同步连续监测空气相对湿度、风速、风向、最高气温、最低气温、太阳总辐射及参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)。用管式-时域反射仪 Tube-TDR(Tube-time domain reflectometry)连续观测根

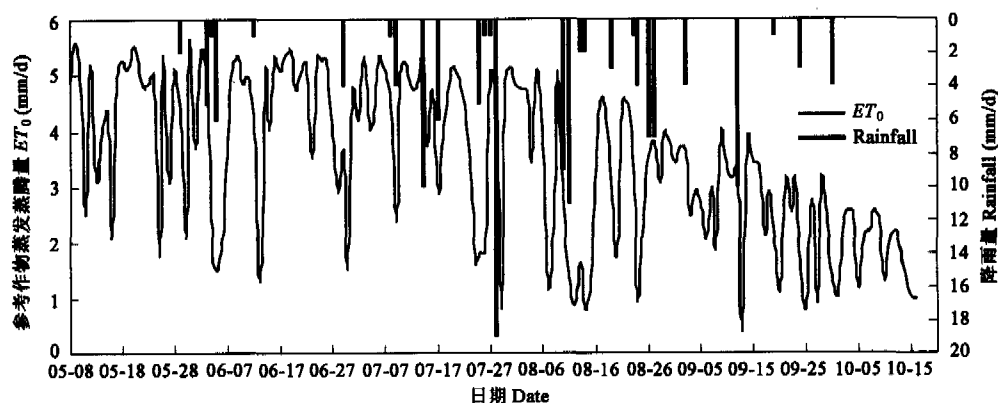


图1 试验期间日平均参考作物蒸发蒸腾量及降雨变化(2004-05-08 ~ 10-16)

Fig.1 The diurnal variation of ET_0 and rainfall during experiment(2004-05-08 ~ 10-16)

区 300cm 深沙层的含水量,在土壤垂直剖面上的测点以 10cm 为间距,每 5d 测定 1 次,如遇降雨天气,另外加测。

1.3 仪器安装

由于柠条为灌木,无法象高大的乔木那样,将 SF100 茎流测定仪安装在树干的胸径位置,为了准确测定柠条的蒸腾耗水,首先确定其主根的南北两个方向,挖开主根,将热脉冲探针插入茎基部与主根之间部位的形成层以下 5、10、13mm 及 18mm 四个不同深度,以确定茎液流沿径向的垂直分布,并用铝箔纸将安装部位的探针遮盖,以免温度变化对其产生影响。然后将沙子填回探针周围,以最大限度减少对根系的伤害,每 30min 记录 1 次热脉冲值,热脉冲持续时间为 2.0s。每棵树安装一套 SF100 茎流测定仪,由 2 个传感器组成,每个传感器包括 1 个发射热脉冲的热源探针,长 9cm,1 对不锈钢的热敏电偶,长 8cm,最大插入深度 75mm,距热源上、下游分别为 5mm 和 10mm,直径 2mm,伤口直径 2.2mm。

2 结果与分析

2.1 柠条树干木质部不同位点液流的变化规律

树木生长水分的输送主要在木质部进行^[20]。图 2 表明:在试验期间的晴天里,柠条径向不同位点液流速率的昼夜变化随着探针插入木质部深度的不同有明显的差异,但也具有一致的变化趋势。液流速率在形成层以下 5mm 处最大,且随着探针插入深度的增加液流速率减小,形成层以下 10mm 处的液流速率次之,形成层以下 13mm 和 18mm 处液流速率比较接近,峰值大约是形成层以下 5mm 处的 1/2。以 5 月 16 日为例,形成层以下 5mm 处液流速率峰值为 14.093cm/h,10mm 处液流速率峰值为 11.147cm/h,13mm 和 18mm 处液流速率峰值分别为 7.003cm/h 和 6.625cm/h。这表明柠条木质部不同深度处水分传导率有一定的差异。

2.2 柠条树干液流的生长季变化规律

依据 2004 年 5 月至 10 月的连续液流监测数据分析表明,柠条树干液流的生长季变化规律如图 3 所示。在整个生长季节里,日均液流量变化幅度较小,数值相对平稳,5 ~ 10 月柠条日平均液流量分别为 3.83、3.73、3.58、3.65、3.67L/d 和 3.32L/d,总液流量为 596.88L,各月液流量占总液流量百分比分别为 15.8%、18.7%、18.6%、18.9%、18.8%及 9.1%,其中 5 月份 24d,10 月份 16d。图 3 及图 4 表明,柠条树干日液流量受降雨、空气相对湿度影响较大,液流量与相对湿度的变化趋势相反。土壤含水量的大小直接影响到土层内可利用水贮

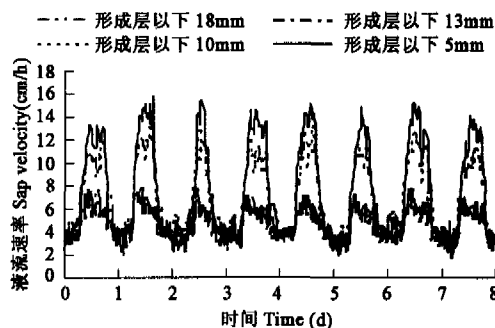


图2 柠条形成层以下不同深度液流速率变化(2004-05-09 ~ 05-16)

Fig.2 The variation of sap velocity at different depths in stem sapwood for *Caragana korshinskii* (2004-05-09 ~ 05-16)

量的多少,从而影响了柠条的树干液流,但二者间的关系比较复杂。主要因为在整个生长季节,土壤含水量较低,而在其生长的前、中期土壤含水量更低,但 ET_0 较大(如图 1 所示),后期,随着降雨量的增加,降雨后土壤含水量升高,但 ET_0 较小(如图 1 所示),致使各生长阶段耗水差异不显著。液流量最大值和最小值分别为 4.492L/d 和 2.266L/d,分别产生在 8 月 29 日和 7 月 28 日,平均值 3.801L/d,标准偏差 0.463L/d。

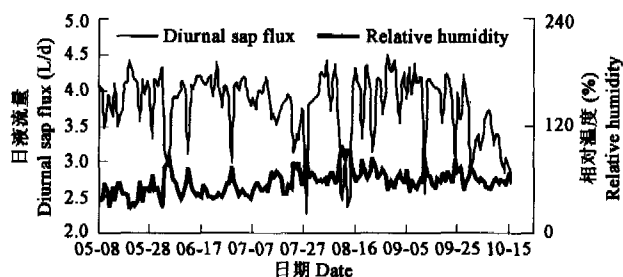


图 3 柠条树干液流量和相对湿度季节变化(2004-05-08 ~ 10-16)

Fig. 3 The seasonal variation of sap flux and relative humidity for *Caragana korshinskii* (2004-05-08 ~ 10-16)

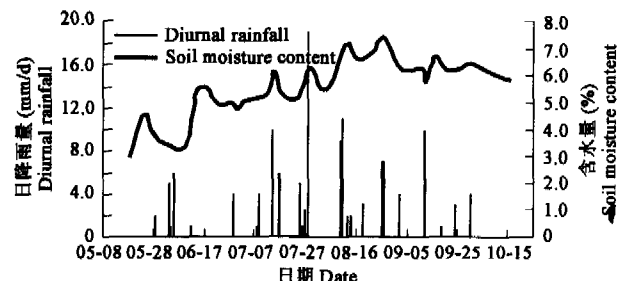


图 4 试验期间降雨量和土壤含水量变化(2004-05-08 ~ 10-16)

Fig. 4 The variation of rainfall and volumetric soil moisture content during experiment period (2004-05-08 ~ 10-16)

2.3 柠条树干液流的昼夜、日际变化规律及不同天气条件下的液流变化状况

2.3.1 柠条树干液流的昼夜及日际变化规律 在整个生长季节里,柠条树干液流的昼夜变化都具有相似的一致性,如图 5 所示。从图中可以看出柠条树干液流量昼夜变化显著且有一定的波动性,在夜间至凌晨液流量较小,液流量相对稳定,变化幅度较小。以 5 月 26 日为例,柠条树干液流量在 7:30 左右开始稳步上升,大约 11:30 左右达到最大值,为 0.288L/h,13:00 左右开始逐步下降,但下降趋势并不十分显著,18:00 左右开始急剧下降,20:30 左右基本趋于稳定。说明柠条树干液流量并无明显的“午休”现象,虽然这一阶段气孔开度可能处于变小状态,但由于午间空气水汽压差(VPD)增大,促进了柠条的蒸腾作用,这足够抵消了由于气孔关闭而引起的蒸腾作用减弱现象^[23]。

图 6 表明:柠条树干液流量的日际变化呈明显的波动状态,产生波动的主要原因可能是:沙漠干旱区水分亏缺严重,空气相对湿度低,太阳辐射强,叶片气孔开度要不断调节以维持根系吸水速率和蒸腾速率之间的平衡。图 6 中还表明 7 月 28 日全天下雨,降雨量 19mm,气温较低,空气相对湿度大,其液流量显著降低,且值较小;而在随后的晴朗天气里,其液流量明显增大,主要原因可能是空气相对湿度减小,VPD 增大,太阳辐射增加,气温升高,其蒸腾耗水随之增加。

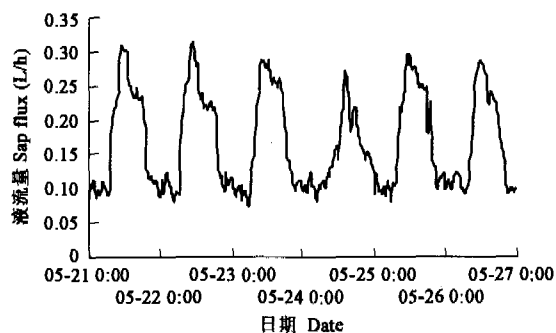


图 5 柠条树干液流昼夜变化

Fig. 5 The day and night variation of stem sap flux for *Caragana korshinskii*

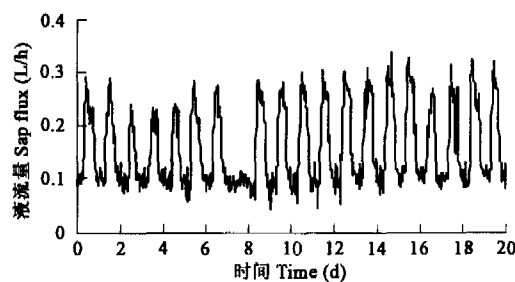


图 6 柠条树干液流量日际变化(2004-07-21 ~ 08-09)

Fig. 6 The day-to-day variation of stem sap flux for *Caragana korshinskii* (2004-07-21 ~ 08-09)

2.3.2 不同天气条件下的柠条树干液流变化状况 在柠条整个的生长季节中,选取几种典型的天气进行液流量比较。从图 7 可以看出,在 8 月 30 日的晴天里,液流量最大,变化幅度也最大,阴天和雨天的液流量相差,且雨天液流量变化幅度最小,液流量相对稳定。值得注意的是,8 月 11 日的雨天里,液流量在 18:30 开

始回升,主要原因是 17:00 雨停,天气转晴,随着相对湿度变小、VPD 增加、太阳辐射增强等,液流量开始回升。这说明同一种植物,在土壤水分相同的条件下,气象因素是影响其蒸腾耗水的主要因子。

2.4 柠条树干液流与气象因素关系的分析

柠条树干液流的变化主要受其本身的生物学特性和外界环境因子的影响,外界环境因子包括土壤水分和气象因素。建立气象因素与树干液流之间的相关关系,不仅可以揭示气象因子对树木水分平衡状况的影响,而且还可以根据气象因素估算树木蒸腾耗水,为区域水资源的合理配置提供科学依据。

柠条生长季节内逐日树干液流量的平均值与风速(V_w)、太阳总辐射(S_t)、空气温度(T_a)及空气水汽压差(VPD)的单因子相关分析结果见表 1,结果表明,液流与 VPD 和 S_t 相关性较大,且为正相关, T_a 对液流的影响相对较小,而 V_w 对液流无明显的影响。

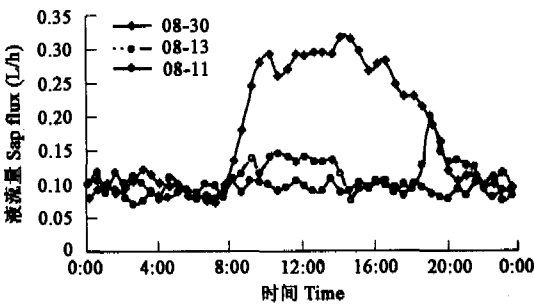


图 7 不同天气条件下柠条树干液流量昼夜变化

Fig. 7 The day and night changes of sap flux for *Caragana korshinskii* under different weather condition

表 1 柠条树干液流量与主要气象因素之间相关关系

气象因素 Meteorological factors	VPD 空气水汽压差 (KPa)	T_a 空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)	S_t 太阳总辐射 (w/m^2)	V_w 风速 (m/s)
相关系数 R^2	0.521	0.311	0.530	0.009
回归系数	0.805	5.519×10^{-2}	3.906×10^{-3}	0.225
F 值	173.838 **	73.710 **	180.732 **	1.415

** $\alpha = 0.05$ 水平极显著

利用 SPSS 11.0,采用逐步回归方法,以 5% 的可靠性作为因变量的人选和剔除临界值,对 2004 年 5~10 月不同生长阶段所测定的液流与上述气象因素进行了多元线性回归分析。结果表明:在生长季节的不同阶段,柠条树干液流是由空气水汽压差、太阳辐射和空气温度共同作用的结果,但其在不同生长阶段的作用是不同的。除了 8 月份柠条树干液流是由上述三者共同决定的,其中空气水汽压差起主导作用外,其它生长阶段主要是由空气水汽压差和太阳辐射决定的,其中 5 月份、6 月份和 10 月份,空气水汽压差起主导作用;7 月份和 9 月份太阳辐射起主导作用。

考虑气象因子间的自相关性,将柠条生长季节的逐日树干液流量与风速、太阳辐射、空气温度、空气水汽压差等主要气象因素的 162 组试验数据进行多元线性回归分析,得到日平均液流量与气象因素的最优回归模型:

$$SF = 2.888 + 0.445 VPD + 2.287 \times 10^{-3} S_t, \quad R^2 = 0.598 \tag{1}$$

式中, SF 为液流量(L/d); S_t 为太阳总辐射(w/m^2); VPD 为空气水汽压差(KPa)。 F 值为 118.491,远远大于 $\alpha = 0.05$ 显著水平下,查表所得临界值 3.05,达到了极显著水平。

从上式中还可以看出,在整个生长季节里,日液流量与 VPD 相关性最强,其次是与 S_t 极显著相关,而 T_a 、 V_w 与液流的相关性不强。

3 讨论

由于树干木质部边材面积上水力传导的异质性,柠条树干径向不同位点的液流速率差异较大。臧道群^[24]对桉树径向液流速率研究表明,在靠近树干轴线处的液流速率最低,而在形成层的外围部分液流速率较高;Fernández^[7]指出在灌溉条件下,橄榄树的树干液流随着形成层深度的加大而减小,在水分亏缺条件下,液流速率在形成层的径向呈现“低-高-低”的变化趋势;Pasquale^[25]在研究中发现,无论在灌溉还是自然条件下,在树干的髓心处和形成层的外围液流速率都较小,既也呈现“低-高-低”的变化趋势;但对棘皮桦和五角枫、小

美旱杨、尾叶桉、胡杨、松树等的径向不同位点液流速率研究表明,树干液流速率随着探针插入木质部深度的增加而减小^[11,12,26-28]。本文的研究结果是随着探针插入木质部深度的增加,液流速率减小。这主要是因为靠近柠条树干的髓心处导管老化,密度小,导管阻塞,导水能力较差,而在边材外围部分的导管是新生的,密度大,导管通畅,导水能力强所致。

Pasquale^[25]对橄榄树树干液流的研究表明,晴天的液流变化幅度大,多云天气条件下的夜流变化幅度小;熊伟^[29]指出在晴天和阴天两种典型天气条件下,华北落叶松树干液流的变化趋势一致,但晴天的液流明显高于阴天的液流,且夜间的液流量非常微弱;严昌荣^[9]对核桃楸的研究也表明,树干液流的日变化很大,在晚上其液流速率很小,而且比较稳定;孙慧珍^[30]研究表明,白桦夜间的液流速率只占全天液流速率的 11.47%~39.93%,且晴天的液流变化幅度远远高于多云时的液流变化幅度;尹光彩^[14]指出按树人工林的液流变化具有一定的季节性变化规律,雨季液流通量较高,旱季液流通量明显减少,且变化幅度较大。本研究中发现,柠条树干液流的昼夜变化规律、不同天气条件下的液流变化规律及季节变化规律与上述研究结果相一致。

Nadezhda^[31]对苹果树的液流研究中发现,空气水汽压差和太阳辐射对苹果树的液流有较大的影响,在晴天里,随着空气水汽压差和太阳辐射的增大,液流也随之增大;熊伟^[29]认为太阳辐射、空气温度和空气相对湿度是影响单木蒸腾量的主要气象因子;尹光彩^[14]认为影响纪家和河头桉树人工林液流通量的主要环境因子是空气水汽压差和土壤水分。而在甘肃石羊河流域干旱荒漠区天然生长条件下,柠条树干液流量与不同气象因子的相关性差异较大,考虑气象因子对柠条树干液流影响的综合作用,认为空气水汽压差、太阳辐射和空气温度是影响柠条树干液流的主要气象因子,且这 3 个因子在柠条不同的生长阶段对其液流的影响程度也不尽相同。

4 结论

(1)柠条径向不同位点液流速率随探针插入木质部深度的不同有着明显的差异。液流速率在形成层以下 5mm 处最大,10mm 的次之,而 13mm 和 18mm 的液流速率基本接近,且二者峰值约是形成层以下 5mm 处的 1/2。

(2)柠条树干液流的昼夜变化规律显著且有一定的波动性,在夜间至凌晨液流量较小,液流量相对稳定,变化幅度较小。在整个生长季节里,液流出现峰值的时间随季节的变化稍有不同。

(3)柠条树干液流昼夜变化在不同的天气条件下也有一定的差异。晴天的树干液流变化幅度最大,其次是阴天和雨天,但雨天变化幅度最小。

(4)柠条树干液流具有一定的季节变化规律,在整个生长季节里,液流量变化幅度较小,数值相对平稳。液流量最大值和最小值分别为 4.492L/d 和 2.266L/d,平均值 3.801L/d。

(5)柠条树干液流与气象因素在生长季节的不同阶段及整个生长季节的多元线性逐步回归表明:在生长季节的不同阶段,柠条树干液流是由空气水汽压差、太阳辐射和空气温度共同作用的结果,但其在不同生长阶段的作用是不同的。除了 8 月份柠条树干液流是由上述三者共同决定的,其中空气水汽压差起主导作用外,其它生长阶段主要是由空气水汽压差和太阳辐射决定的,其中 5 月份、6 月份和 10 月份,空气水汽压差起主导作用;7 月份和 9 月份太阳辐射起主导作用。从整个生长季节看,液流与空气水汽压差的相关性最强,其次是太阳辐射。

References:

- [1] Wang X P, Li X R, Kang E S, et al. Experiment on evapotranspiration of *Xerophyte Communities* in a revegetated desert zone. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(4): 363~367.
- [2] Feng J C, Chen K S, Kang Y H, et al. Study on water balance and evapotranspiration of artificial vegetation in Shapotou area, Tenger desert. *Acta Botanica Sinica*, 1995, 37(10): 815~821.
- [3] Zhao M, Li A D, Wang Y L, et al. A study on relations between transpiration of *Psammophyte* and the meteorological components. *Journal of Arid and Resources and Environment*, 2003, 17(6): 131~137.

- [4] Wang X P, Kang E S, Zhang J G, *et al.* Soil moisture dynamics in an artificially re-vegetated desert area. *Advance in Water Science*, 2004, 15(2):216 ~ 222.
- [5] Schiller G, Cohen Y. Water regime of a pine forest under a Mediterranean climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 74:181 ~ 193.
- [6] Gerard J Kluitenberg, Jay M Ham. Improved theory for calculating sap flow with the heat pulse method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126: 169 ~ 173.
- [7] Fernández J E, Palomo M J, *et al.* Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management*, 2001, 51:99 ~ 123.
- [8] Liu F J, Zheng S K, Ju G S, *et al.* A study on comparison of measuring water-consumption for transpiration in *Poplar*. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, 33 (2):117 ~ 125.
- [9] Yan C R, A lec Dow ney, 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, 37(6):793 ~ 797.
- [10] Sun P S, Ma L Y, Wang X P, *et al.* Temporal and special variation of sap flow of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*). *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(5):1 ~ 6.
- [11] Li H T, Cheng L Z. A study on the 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.
- [12] Gao Y, Zhang N M, Liu J. A study on volume and velocity of stem sap flow of *Populus popular's* by heat-pulse technique. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2001, 21(4):644 ~ 649.
- [13] Gong D Z, Wang J P, Kang S Z, *et al.* Variations of stem and root sap flow of Peach tree under different water status. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(4):34 ~ 38.
- [14] Yin G C, Zhou G Y, Wang X, *et al.* A study on sap flux density of two eucalyptus (*Eucalyptus rophylla*) plantations in southeastern China by heat-pulse method. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10):1984 ~ 1990.
- [15] Wu L P, Wang X D, Wei Q E, *et al.* Study on spatial and temporal variability for stem sap flow of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(4):66 ~ 68.
- [16] Zhang X Y, Gong J D, Zhou M X, *et al.* A study on the stem sap flow of *Populus euphratica* and *Tamaris* spp. by heat pulse technique. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(5):585 ~ 590.
- [17] Chang X X, Zhao W Z. Sap flow of *Elaeagnus angustifolia* and its relation with growth regime in middle reaches of Heihe River basin. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(4):473 ~ 478.
- [18] Edwards W R N, Warwick N W M. Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat-pulse technique and the Penman-Monteith equation. *N Z J Agri Res*, 1984, 27:537 ~ 543.
- [19] Cohen Y, Fuchs M, Falkenflug V, *et al.* Calibrated heat pulse method for determined water uptake in cotton. *Agronomy Journal*, 1988, 80:398 ~ 402.
- [20] Edwards W R N, Becker P, JøERMAK. A unified nomenclature for sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1996, 17:65 ~ 67.
- [21] Cohen Y, Fuchs M, GREEN G C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment*, 1981, 4:391 ~ 397.
- [22] Li H T, Chen L Z. A introduction to the heat pulse technique and its application to measuring the stem sap flow in trees. *Chinese Bulletin of Botany*, 1997, 14(4):24 ~ 29.
- [23] Zhang L P, Wang X P, Liu L C, *et al.* Study on gas exchange characteristics of main constructive plants *A. ordosica* and *C. korshinskii* in Shapotou region. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2):133 ~ 137.
- [24] Zang D Q, Beadle C L and White D A. Variation of sapflow velocity in *Eucalyptus globulus* with position in sapwood and use of a correction coefficient. *Tree Physiology*, 1996, 16:697 ~ 703.
- [25] Pasquale Giorio, Giovanni Giorio. Sap flow of several olive trees estimated with heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49:9 ~ 20.
- [26] Zhang L 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.
- [27] Si J H, Feng Q, Zhang X Y. Application of heat-pulse technique to determine the stem sap flow of *Populus euphratica*. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(4):503 ~ 508.
- [28] Liu F M. Determining sap flow in trunk of *Aleppo pine* by improved heat pulse method. *Journal of Gansu Agricultural University*, 1996, 31(2):167 ~ 170.
- [29] Xiong W, Wang Y H, Xu D Y. Regulations of water use for transpiration of *Larix principis Rupprechtii* plantation and its response on environmental factors in southern Ningxia hilly area. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 9(2):1 ~ 7.
- [30] Sun H Z, Zhou X F, Zhao H X. A researches on stem sap flow dynamics of *Betula platyphylla*. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9):1387 ~ 1391.

- [31] Nadezhda Nadezhkina. Sap flow index as an indicator of plant water status. *Tree Physiology*, 1999, 19:885 ~ 891.

参考文献:

- [1] 王新平,李新荣,康尔泗,等.沙坡头地区固沙植物油蒿、柠条蒸散状况的研究. *中国沙漠*,2002,22(4):363 ~ 367.
- [2] 冯金朝,陈荷生,康跃虎,等.腾格里沙漠沙坡头地区人工植被蒸散耗水与水量平衡的研究. *植物学报*,1995,37(10):815 ~ 821.
- [3] 赵明,李爱德,王耀琳,等.沙生植被的蒸腾耗水与气象因素的关系研究. *干旱区资源与环境*,2003,17(6):131 ~ 137.
- [4] 王新平,康尔泗,张景光,等.草原化荒漠带人工固沙植丛区土壤水分动态. *水科学进展*,2004,15(2):216 ~ 222.
- [8] 刘奉觉,郑世锴,巨关升,等.树木蒸腾耗水测算技术的比较研究. *林业科学*,1997, 33(2):117 ~ 125.
- [9] 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*,1999,37(6):793 ~ 797.
- [10] 孙鹏森,马雁一,王小平,等.油松树干液流的时空变异性研究. *北京林业大学学报*,2000,22(5):1 ~ 5.
- [11] 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.
- [12] 高岩,张汝民,刘静.应用热脉冲技术对小美早杨树树干液流的研究. *西北植物学报*,2001,21(4):644 ~ 649.
- [13] 龚道枝,王金平,康绍忠,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.
- [14] 尹光彩,周国逸,王旭,等.应用热脉冲系统对桉树人工林树液流通量的研究. *生态学报*,2003,23(10):1984 ~ 1990.
- [15] 吴丽萍,王学东,尉全恩,等.樟子松树干液流的时空变异性研究. *水土保持研究*,2003,10(4):66 ~ 68.
- [16] 张小由,龚家栋,周茂先,等.应用热脉冲技术对胡杨和桤柳树干液流的研究. *冰川冻土*,2003,25(5):585 ~ 589.
- [17] 常学向,赵文智.黑河中游沙枣树干液流的动态变化及其与林木个体生长的关系. *中国沙漠*,2004,24(4):473 ~ 478.
- [22] 李海涛,陈灵芝.用于测定树干木质部蒸腾液流的热脉冲技术研究概况. *植物学通报*,1997,14(4):24 ~ 29.
- [23] 张利平,王新平,刘立超,等.沙坡头主要建群植物油蒿和柠条的气体交换特征研究. *生态学报*,1998,18(2):133 ~ 137.
- [26] 张宁南,徐大平, Jim Morris 等.雷州半岛尾叶桉人工林树液茎流特征的研究. *林业科学研究*,2003,16(6):661 ~ 667.
- [27] 司建华,冯起,张小由.热脉冲技术在确定胡杨幼树干液流中的应用. *冰川冻土*,2004,26(4):503 ~ 508.
- [28] 刘发民.利用校准的热脉冲方法测定松树树干液流. *甘肃农业大学学报*,1996,31(2):167 ~ 170.
- [29] 熊伟,王彦辉,徐德应.宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应. *林业科学*,2003,39(2):1 ~ 7.
- [30] 孙慧珍,周晓峰,赵惠勋.白桦树干液流的动态研究. *生态学报*,2002,22(9):1387 ~ 1391.