

# 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征

岳广阳<sup>1,2</sup>, 张铜会<sup>1</sup>, 赵哈林<sup>1</sup>, 牛 丽<sup>1,2</sup>, 刘新平<sup>1</sup>, 黄 刚<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 利用 Dynamax 茎流测量系统、Li-6400 光合作用仪和自动气象站分别对科尔沁沙地两种灌木树种黄柳和小叶锦鸡儿的液流变化、蒸腾速率及其周围的环境因子进行检测。研究表明:(1)黄柳、小叶锦鸡儿茎干液流密度日变化趋势基本相同,呈多峰曲线;液流启动时间分别为 4:30、5:30,在 13:00 左右到达各自液流峰值,峰值大小为 81.2~91.7 mg/h、17.3~27.1 mg/h,20:30 降为最低,晚间均具有明显的液流活动现象。(2)灌木的茎流日变化曲线与蒸腾速率日变化曲线并不吻合,实验测得的叶片蒸腾速率不能同步反映茎干液流的动态变化特征;黄柳的叶片蒸腾速率和单枝蒸腾耗水量均大于小叶锦鸡儿,耐旱性相对较低。(3)黄柳、小叶锦鸡儿白天液流密度变化趋势与环境因子变化趋势相吻合。相关性分析表明,影响灌木液流变化的主要因子依次是太阳有效辐射、相对湿度、大气温度、风速、10cm 和 20cm 土壤温度。

**关键词:** 茎流;蒸腾速率;影响因子;黄柳;小叶锦鸡儿;科尔沁沙地

文章编号:1000-0933(2006)10-3205-09 中图分类号:Q945.1, Q948.11, S718 文献标识码:A

## Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, northeast China

YUE Guang-Yang<sup>1,2</sup>, ZHANG Tong-Hui<sup>1</sup>, ZHAO Ha-Lin<sup>1</sup>, NIU Li<sup>1,2</sup>, LIU Xin-Ping<sup>1</sup>, HUANG Gang<sup>1,2</sup> (1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3205~3213.

**Abstract:** Both *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla* are dominant shrub species on moving and semi-moving dunes in Horqin Sandy Land which are well adapted to the arid and infertile condition. There is still poorly understand concerning the differences and dynamics on the sap flow and transpiration of the two shrub species. Dynamax Sap Flow Measuring System, Li-6400 Portable Photosynthesis System and Automatic Weather Station System were used to simultaneously measure and monitor the sap flow velocity, leaf transpiration and related environmental factors of the two shrubs. Based on the analysis of the diurnal variations of stem sap flow and leaf transpiration, the results showed that the diurnal variations of sap flow velocity of the two species were as a multi-peaked curve. The sap flow of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla* started at 4:30 and 5:30 while stopped at 20:30, respectively. The maximum value of the sap flow velocity of *Salix gordejvii* was 81.2~91.7 mg/h, and that of *Caragana microphylla* was 17.3~27.1 mg/h in field situation. The diurnal sap flow of unit cross section area of stem of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla* were 0.88~1.56 g/cm<sup>2</sup> and 0.64~1.34 g/cm<sup>2</sup>, respectively. The diurnal variation curves of the sap flow and the transpiration velocity of the two shrubs were non-synchronous to each other, which implied the dynamic variation of the sap flow could not be substituted by that of their the transpiration velocity. The leaf transpiration and the water assumption of *Salix gordejvii* were more than that of *Caragana microphylla*, which implied that the drought tolerance of the *Salix gordejvii* was lower than that of the *Caragana microphylla*. The sap flow density of the two species was positively correlated with some ambient

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40471004);中国科学院野外台站基金资助项目(1737690200015)

收稿日期:2006-03-07;修订日期:2006-08-29

作者简介:岳广阳(1981~),男,山东临沂人,博士生,主要从事水分生态学研究。E-mail: yuegy@lzb.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40471004), Observation Station Foundation of CAS (No. 1737690200015)

Received date: 2006-03-07; Accepted date: 2006-08-29

Biography: YUE Guang-Yang, Ph. D. candidate, mainly engaged in water ecology. E-mail: yuegy@lzb.ac.cn

environmental factors. The order of their coefficient from correlation analysis was  $PAR$  (photosynthesis available radiation) > air relative humidity > air temperature > wind speed > soil temperature at 10cm depth > soil temperature at 20cm depth. These results are of importance for clarifying the principle of plant's water consumption and for explaining the adaptation processes and mechanisms of plants in arid and sandy environment.

**Key words:** sap flow; transpiration rate; related factors; *Salix gordejvii*; *Caragana microphylla*; Horqin Sandy Land

黄柳 (*Salix gordejvii* Chang et Skv.) 和小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla* Lam.) 是科尔沁地区流动沙丘和半流动沙丘分布最广的灌木型植物种, 分属于杨柳科和豆科。它们根系庞大, 枝条再生能力强, 具有耐干旱沙埋、耐风蚀、耐贫瘠的生物学特性, 防风固沙作用突出, 是科尔沁沙地营造水土保持林和薪炭林的主要灌木种<sup>[1,2]</sup>。在干旱的沙地生境中, 土壤水分是沙生植物生存的主要限制因子。因此, 研究沙地植物的蒸腾耗水特征, 对于阐述植物耗水规律, 揭示植物对干旱区水分环境的适应过程和机制具有重要意义。李红丽对不同样地土壤水分条件下黄柳的蒸腾速率及其季节变化的研究表明, 黄柳为低蒸腾植物<sup>[3]</sup>; 马成仓也通过对比小叶锦鸡儿和其他几种锦鸡儿属植物的蒸腾速率等水分调节特性, 对它们的抗旱性进行了研究<sup>[4,5]</sup>; 而对于黄柳、小叶锦鸡儿的茎干液流变化规律及其与叶片蒸腾的同步研究却未有报道。

以热平衡为原理的包裹式茎流探头在研究直径较小的植物茎干液流时具有明显优越性, 经 Sakuratani, Baker 和 Steinberg 等人的发展与完善<sup>[6-8]</sup>, 实验证明准确性极高。目前国内应用该方法进行的研究却并不多见, 严昌荣等<sup>[9]</sup>和金红喜等<sup>[10]</sup>曾分别利用热平衡式茎流探头对生长中期的核桃楸 (*Juglans mandshurica*) 和一些荒漠植物的树干液流进行过研究。本文以科尔沁沙地的黄柳和小叶锦鸡儿为研究对象, 采用 Dynamax 茎流测量系统直接测定其灌丛分枝的茎干液流速率, 并根据同步获取的叶片蒸腾和环境因子的测值对两种灌木的蒸腾耗水特性和影响因子关系进行了分析。研究结果对于干旱沙区重要植物资源的有效利用和沙地水分管理具有重要的参考价值, 为研究沙地灌木对气候条件的响应提供本底依据。

## 1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地东南部的中国科学院生态系统研究网络奈曼沙漠化研究站 (120°43' E, 42°55' N, 363 海拔) 的示范试验区。该区属温带大陆性季风气候, 春季干旱多风, 夏季炎热且雨量集中, 秋季凉爽短促, 冬季寒冷漫长。年均气温 6.3℃, 年均日照 2951.2h, 7 月份平均气温 23.6℃, 1 月份平均气温 -13.1℃。

10 月的年积温 3161.2℃, 无霜期 145~151d。年均降水 365mm, 约 70% 集中在 6~8 月份。年均蒸发量 1935.4mm, 地下水位 4~15m。年均风速 3.5m/s, 春季平均风速 4.4m/s。地貌以平缓起伏的沙地为主, 流动沙丘、沙质草甸和大片耕地相间分布。土壤属风沙土, 有机质含量低, 土壤肥力低下。原生植被为疏林草原, 现大部分已退化成为灌木为主的沙生植被。

## 2 研究方法

### 2.1 茎流测量系统的安装

**2.1.1 被测植株的选定及预处理** 按照实验要求选择符合茎流探头直径要求且生长良好的黄柳和小叶锦鸡儿灌丛单枝作为实验对象, 要求茎干通直圆满, 立地条件基本一致。在测定部位将死亡组织、脱落表皮及老叶柄除去, 尽量避免损坏或修剪活树皮, 并用小号砂纸将其打磨光滑, 然后精确测定茎干相应部位的直径。为确保样株茎干与探头接触良好, 防止湿气侵蚀加热条, 需在探头电热条上涂上一薄层 G4 硅胶。

**2.1.2 茎流探头的安装** 将相应探头打开到足够宽度, 紧紧包住处理好的茎杆, 在此过程中需注意不要将探头损坏, 且保证探头缆线在下部, 电热条包裹茎杆至少完整一圈。然后紧贴探头上沿涂一层塑胶来避免雨水沿茎干流入。茎流探头一旦裹上茎杆, 不要再上下移动或抖动。最后, 安装防辐射护罩, 用铝铂纸包裹探头。本实验所用探头的型号、技术指标和被测样株基本特征见表 1。

**2.1.3 数据采集器的安装和参数设置** 将电源线和茎流探头馈线与数采器 (Flow32 Sap flow Monitoring System) 连接, 通过手提电脑搜索工作探头传感器, 并设置数采器执行文件的工作参数, 输入相应的茎干面积

值,数据采集时间间隔设为 30min。定期下载数据资料,间隔时间长短由采集密度和数采器内存大小而定。实践证明,黄柳等植物会在被包裹的损伤部位逐渐形成瘤状组织,并萌生不定根,对探头造成损坏,因此应每半个月重新选择并更换被测单株。

表 1 SGA 探头规格和工作参数及被测样株基本特征

Table 1 SGA specifications and their working parameters and basic properties of the measured samples

探头型号 Model No.	直径 Diameter (cm)		工作电压 Input volts (V)	功率 Power (W)	研究对象 Research object	胸径 DBH(cm)	茎干面积 Sapwood area (cm <sup>2</sup> )	株高 Height (m)
	最大(Max)	最小(Min)						
SGA5-WS	0.5	0.7	4.0	0.08	小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	0.65	0.33	1.73
SGA10-WS	0.9	1.3	4.0	0.10	黄柳 1 <i>Salix gordejvii</i> 1	1.20	1.13	2.79
SCB16-WS	1.5	1.9	4.5	0.20	黄柳 2 <i>Salix gordejvii</i> 2	1.76	2.43	2.96

## 2.2 茎干液流速率和环境因子的测定

利用上述已安装的茎流测量系统,在 2005 年植物生长比较旺盛的 5、6、7、8 月对黄柳和小叶锦鸡儿的液流速率进行连续监测。并利用试验区内的自动气象站对黄柳、小叶锦鸡儿灌丛附近的太阳辐射、温度、相对湿度、风速和土壤温度等每隔 1h 进行自动检测记录,保证与茎流测量同步。

## 2.3 植物叶片蒸腾速率的测定

蒸腾速率的测定选在茎流测量期间的晴朗无风天气内进行,选择生长良好的黄柳和小叶锦鸡儿标准样株中上部、向阳面的叶片,利用 Li-6400 光合作用仪测定其蒸腾速率。从 6:00 到 20:00 结束,每 1h 测定 1 次。每次测定均在固定枝条上选取 3 个叶片进行,并以 3 个测定值的平均值作为该时刻测定值。

## 3 结果与分析

### 3.1 黄柳和小叶锦鸡儿茎流连日变化规律比较

从图 1 和表 2 中看出,6 月中旬黄柳和小叶锦鸡儿茎干液流通量密度日变化趋势相同,呈多峰曲线。6 月 14、16、18、19 日天气晴朗,由于实验区日出时间较早,黄柳液流启动时间一般为 4:30,5:00~8:00 大幅度上升,并迅速到达液流活动的高峰状态,这个液流高峰可持续 6~8h。12:00~14:00 出现峰值,4d 的单枝液流峰值分别为 81.2mg/h、83.7mg/h、90.9mg/h、91.7mg/h。之后,液流速率呈下降趋势,下降幅度与上升幅度同样迅速,但液流停止的时间没有启动的时间界限明显,到 20:30 时基本下降至极低值,以后进行夜间液流的缓慢传输,整个日周期黄柳的液流活跃阶段历时约 16h。小叶锦鸡儿茎流日变化进程与黄柳相比基本一致,只是在时间上有所差异。液流启动时间相对较晚,一般为 5:30 左右,6:00 才开始迅速提升,上升幅度略小于黄柳,但峰值比黄柳明显,出现于 13:00 左右,分别为 22mg/h、21.3mg/h、24.1mg/h、27.1mg/h,其液流高峰状态约持续 6~7h,液流下降幅度与黄柳一致,也在 20:30 到达最低点,小叶锦鸡儿液流活跃阶段历时约 14h。

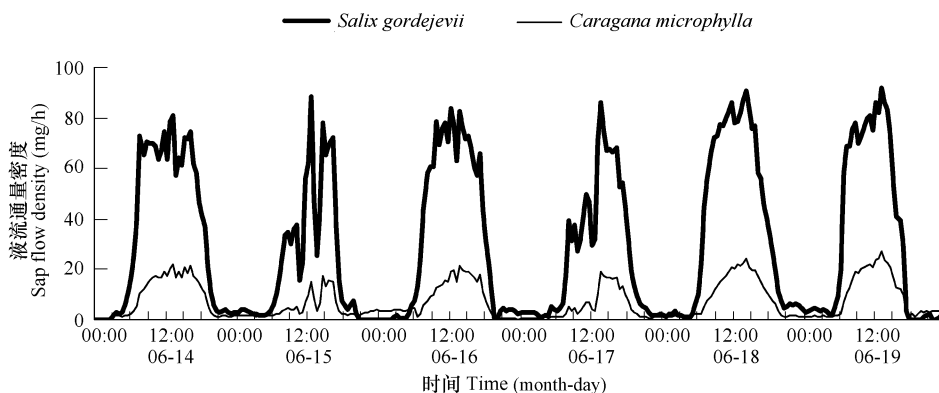


图 1 黄柳、小叶锦鸡儿茎干液流通量密度连日变化进程

Fig.1 Diurnal sap flow density fluctuation of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla*

表2 黄柳、小叶锦鸡儿液流密度连日变化动态

Table 2 Diurnal sap flow density of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla*

灌木种 Shrub species	观测项目 Measured items	观测日期 Measuring date					
		Jun. 14	Jun. 15	Jun. 16	Jun. 17	Jun. 18	Jun. 19
黄柳 <i>Salix gordejvii</i>	液流启动时间 Sap flow starting time	4:30	5:00	4:00	4:30	4:30	4:30
	液流峰值出现时间 Sap flow peak-appearing time	13:00	12:30	12:00	13:30	14:00	13:00
	液流峰值 Sap flow peak height (mg/h)	81.2	88.2	83.7	85.9	90.9	91.7
	液流停止时间 Sap flow stop time	20:30	20:30	19:30	22:00	20:30	17:30
	单位茎干面积日液流量 Diurnal sap flow of unit area ( $g/cm^2$ )	1.47	0.88	1.39	1.05	1.56	1.37
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	液流启动时间 Sap flow starting time	5:30	6:00	6:30	6:00	6:30	6:00
	液流峰值出现时间 Sap flow peak-appearing time	13:00	14:30	13:30	13:30	14:00	13:00
	液流峰值 Sap flow peak height (mg/h)	22	17.3	21.3	18.9	24.1	27.1
	液流停止时间 Sap flow stop time	21:00	20:00	19:30	22:00	21:00	18:30
	单位茎干面积日液流量 Diurnal sap flow of unit area ( $g/cm^2$ )	1.28	0.64	1.18	0.71	1.29	1.34

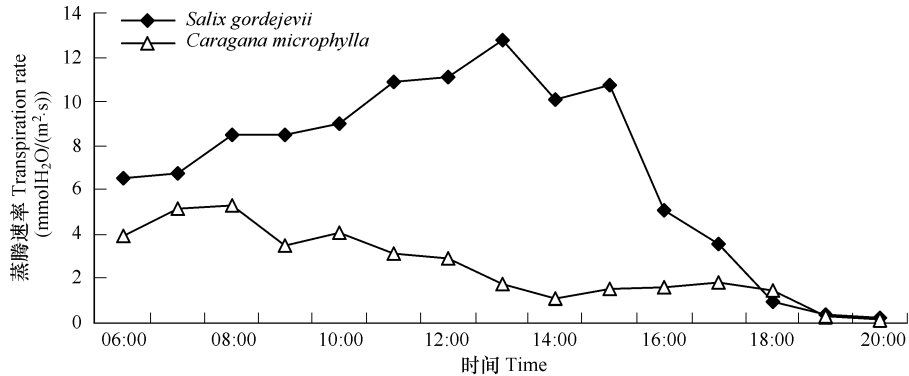
与晴天茎干液流速率波动情况比较,阴天或多云天气液流启动推迟,峰值减小。6月15、17日上午为阴天,液流启动时间推迟大约半个小时,上午液流波峰始终保持较小值,黄柳峰值为37.4mg/h、49.6mg/h,小叶锦鸡儿为5mg/h、7.2mg/h,显著低于晴天时的水平,二者相差2~5倍。从气象因子连日变化曲线看,阴天或多云天气由于太阳辐射强度小,空气温度低、空气相对湿度大,相应的茎干液流速率曲线峰值低,而晴朗干燥天气的曲线峰值高,说明这一季节每日液流的最大值与当日的气象因子变化关系密切。灌木日液流最大值还可能与土壤水分状况及树木自身蒸腾耗水的生物学、生理学特性有关<sup>[11]</sup>。6月份降雨相对比较充分,土壤水分含量高,因此黄柳、小叶锦鸡儿都有较高的液流峰值。

夜间气孔关闭,叶片蒸腾速率为0(图2),而测得的灌木液流速率尽管数值很低,却不为0(图1)。说明夜间根系可以继续保持吸水的能力,以此来协调植物的需水平衡<sup>[12]</sup>。由图1分析可以看出,黄柳、小叶锦鸡儿夜间虽都有液流活动,但活动强度有其各自的特点。黄柳只在14、16日和18日的夜间出现了比较明显的液流活动,这是由于白天灌丛蒸腾作用过于强烈,根系吸水一定程度上不能满足蒸腾失水,造成植物体内水分供需平衡失调,水势下降<sup>[12]</sup>。于是夜间蒸腾停止后,在根压的作用下根系吸水方式由被动变为主动,持续保持吸水能力,以此补充白天蒸腾引起的水分亏缺<sup>[13]</sup>。而15、17日白天黄柳的耗水量相对较少,植物体失水并不严重,因此夜间基本无液流活动。与黄柳不同,小叶锦鸡儿几乎每晚都有液流活动,尤其在15、17日,虽然白天没有大量的蒸腾耗水,夜间根系却继续保持较高的吸水活性。这可能是由于白天小叶锦鸡儿一直保持较低的蒸腾耗水状态,根系吸水能力有限,夜间仍需要不断吸水来满足其正常的生理需水。14~19日晚间液流活动随空气温度和风速的增加而逐日增强,这说明小叶锦鸡儿的液流变化受气温和风速的影响比较明显,夜间高温和适度的大风可能会引发气孔的部分开放,从而加速其吸水过程(图4、图5)。

### 3.2 植物叶片蒸腾速率日变化及其与茎干液流的对应关系

由图2可见,黄柳蒸腾速率日变化基本呈现为双峰曲线。上午蒸腾速率上升比较缓慢,在13:00达到最大值,为 $12.8\mu mol H_2O/(m^2 \cdot s)$ ,随即出现了轻微的蒸腾午休现象,15:00以后开始减弱,呈快速下降趋势,并在20:00降到最低点。小叶锦鸡儿蒸腾速率日变化曲线则比较特殊,在8:00即出现了蒸腾速率的最大值,为 $5.32\mu mol H_2O/(m^2 \cdot s)$ ,随后开始持续下降,到14:00以后蒸腾速率虽稍微有所回升,但仍以很低的值一直维持到傍晚。小叶锦鸡儿这种在高温强光下保持极低蒸腾速率的蒸腾特性,保证了较少的水分损失,更加有利于适应干旱缺水的环境。

确定叶片蒸腾与茎干液流之间的时滞关系,可以进一步了解茎干液流对环境因子的响应规律,Granier

图2 黄柳和小叶锦鸡儿蒸腾速率( $E$ )的日变化Fig. 2 Diurnal variations of transpiration of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla*

等<sup>[14]</sup>和 Peramak 等<sup>[15]</sup>曾分别对此做过一些研究。从图 1、2 可以看出,黄柳的茎流与叶片蒸腾速率日变化曲线并不吻合,上午蒸腾速率的变化幅度小于茎流的变化,峰值提前约 1h 出现;小叶锦鸡儿茎流与蒸腾日变化曲线的这种差异则更加显著,其茎流峰值出现时间滞后叶片蒸腾多达 5h。上述现象说明,由光合作用仪测定的蒸腾速率,反映的是由叶片生理机能的改变引发气孔开闭而产生的叶片散失水分的变化,受周围瞬时环境因子变化的影响显著,因叶片所处灌丛分枝的上下位置、内外层次的通透性,及其生理学特性和向光性不同而有所差异;而利用茎流计测得的茎流速率,反映的是被测单枝的液流特征,不考虑灌丛自身代谢所消耗的水分,是冠层所有叶片蒸腾作用的结果。而且由于茎内水容和水流阻力的作用,导致液流传输到叶片蒸腾过程中产生严重的滞后效应,茎流速率的测值也只能间接地反映树冠蒸腾<sup>[16,17]</sup>。因此实验测得的灌木中、上部的叶片蒸腾速率日变化不足以代表整个树冠层的叶片蒸腾,也即不能反映茎干液流的动态变化特征。

### 3.3 黄柳、小叶锦鸡儿茎流变化与环境因子的关系

根据与茎流同步检测的太阳辐射强度、灌丛周围空气温湿度、风速、土壤温度等因子连日变化的测定结果比较发现,黄柳、小叶锦鸡儿茎干液流速率连日变化曲线与各日峰形变化趋势基本相同,其表现特征波动规律完全与同步检测的气象因子如太阳辐射、气温、空气相对湿度、土壤温度(图 1、图 3、图 4、图 6)等相吻合,这说明两种植物的液流速率受环境因子影响明显。

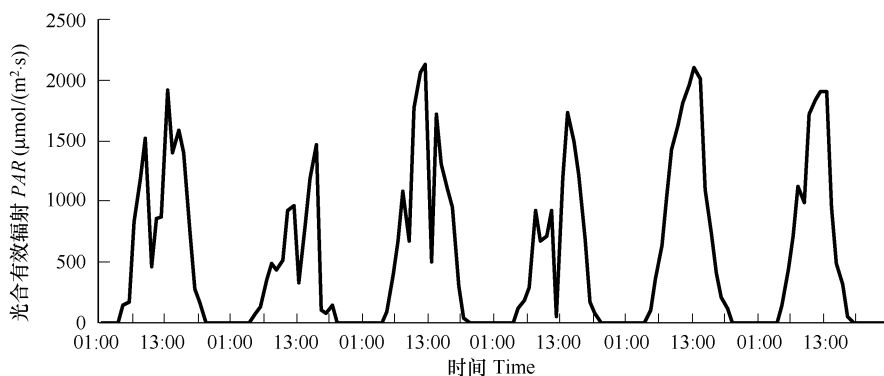


图3 黄柳、小叶锦鸡儿灌丛周围太阳辐射连日变化

Fig. 3 Diurnal solar radiation around the shrub of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla*

太阳辐射强度既能诱导气孔启闭,又决定空气温度、相对湿度和叶片温度的变化,是影响灌木液流变化的最主要因子,液流启动和峰值出现的时间与光照紧密相关。马玲等<sup>[18]</sup>研究认为树干液流与光合有效辐射等环境因子之间存在时滞效应,而Ham和 Heilman<sup>[19]</sup>及本研究结果则表明灌木的液流进程与辐射变化同步。晴

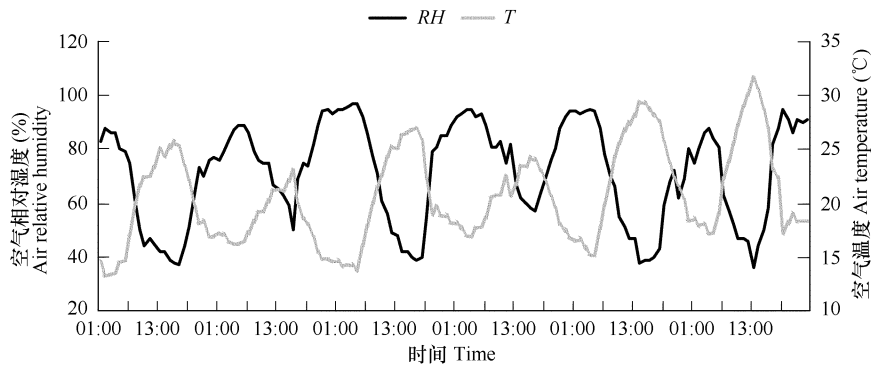


图4 黄柳、小叶锦鸡儿灌丛周围空气温度和相对湿度连日变化

Fig. 4 Diurnal air temperature and relative humidity around the shrub of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla*

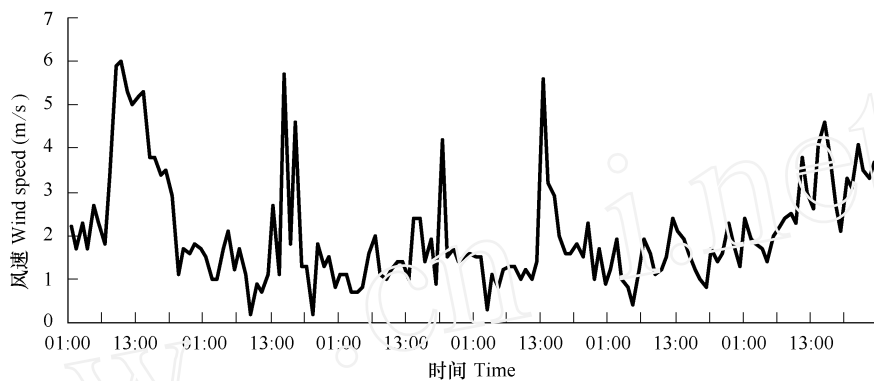


图5 黄柳、小叶锦鸡儿灌丛周围风速连日变化

Fig. 5 Diurnal wind speed around the shrub of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla*

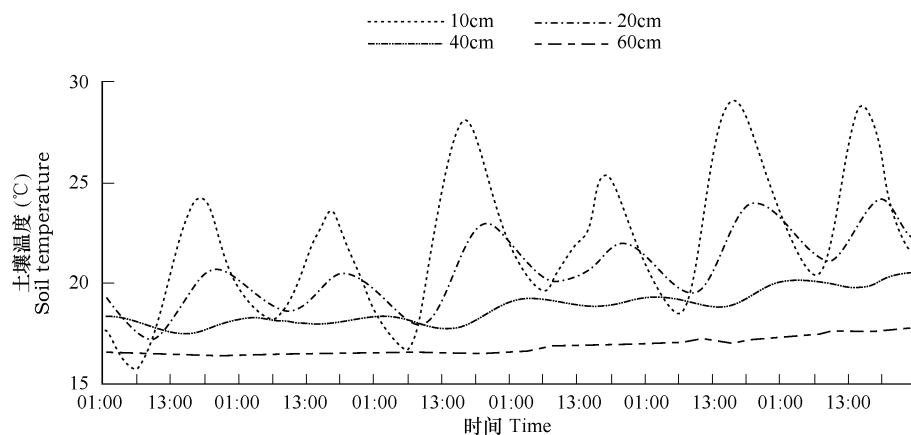


图6 黄柳、小叶锦鸡儿灌丛土壤温度连日变化

Fig. 6 Diurnal temperature at different soil depth in the shrub of *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla*

天清晨4:00起太阳辐射强度开始逐渐增大,诱导气孔开放,黄柳和小叶锦鸡儿液流随后分别启动,启动时间分别滞后太阳辐射开始时间0.5h和1.5h。随着太阳辐射的增加,空气温度逐渐升高而空气相对湿度下降,叶片内外蒸汽压差增大,植物冠层水分蒸发增强,茎干液流相应加快。当空气温度和相对湿度还没有达到最大和最小时,太阳辐射和黄柳、小叶锦鸡儿的茎干液流同步达到最大值。液流在高峰阶段呈现多峰变化,则是由于

太阳辐射瞬间变化或强度过高引发蒸腾速率的瞬时变化所致。当根系吸水不能满足蒸腾失水时,植物便会启动自保护机制,叶片部分气孔自动关闭或减小开合程度,树液流动下降。午后随着辐射强度与气温的下降,空气相对湿度的增大,叶内外蒸汽压差减小,液流速率持续下降,直至 20:00 太阳辐射为 0 时,液流速率也基本降至最低值。夜间空气的相对湿度达 90% 以上,叶片气孔关闭,几乎无蒸发,液流保持极低值。

风是影响灌丛叶片蒸腾的直接因素,其作用机理比较复杂。微风可以将气孔外围相对湿度较高的空气吹走,使蒸气扩散层变薄或消失,外部阻力减小,从而促进蒸腾;而风的强度太大则可能会引起气孔关闭,使蒸腾速率变慢<sup>[20]</sup>,由此又引起液流速率的相应变化。

根据研究,黄柳和小叶锦鸡儿的吸收根系主要分布在 0~80cm 的沙层中<sup>[2, 21, 22]</sup>。这些不同深度土壤温度的变化,会影响根系的吸水能力,从而间接影响液流速率的变化。土壤温度的升高可以增强根部细胞的呼吸作用,提高酶活性,使根压增大;同时减小土壤水分黏性,使其更容易通过细胞质,提高了根系吸水能力。但温度过高则会引起酶的钝化,使根系主动吸水减弱。由图 6 可以看出,10cm、20cm 处的土壤温度变化波动大,对液流变化影响显著,40cm、60cm 处土壤温度波动较小,对液流变化影响不明显。

太阳辐射强度、风速、空气相对湿度变动快,对茎流的影响比较直接快速;而空气和土壤温度相对稳定,对茎流的影响慢。液流速率的变化实际是受到环境因子综合影响的结果。相关分析表明,灌木液流变化主要影响因子基本相同,依次是太阳辐射强度、相对湿度、大气温度的。黄柳和小叶锦鸡儿茎干液流与上述因子的相关系数分别为 0.927、-0.833、0.816 和 0.880、-0.862、0.842,均达到极显著水平;其次是风速、10cm 和 20cm 处的土壤温度,也达到了显著水平。

表 3 液流速率与各环境因子相关系数

Table 3 Coefficient of correlation between sap flow velocity and environmental factors of correlation analysis

		辐射强度 PAR	温度 Air temp.	相对湿度 RH	风速 Wind speed	10cm 处土温 Soil temp of 10cm depth	20cm 处土温 Soil temp of 20cm depth	40cm 处土温 Soil temp of 40cm depth	60cm 处土温 Soil temp of 60cm depth
黄柳 <i>Salix gordejewii</i>	相关系数 Correlation coefficient	0.927 **	0.816 **	-0.833 **	0.376 **	0.300 **	-0.249 **	-0.204 *	0.085
	显著性水平 Significant level	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.014	0.311
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	相关系数 Correlation coefficient	0.880 **	0.842 **	-0.862 **	0.440 **	0.409 **	-0.139 **	-0.162	0.138
	显著性水平 Significant level	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.097	0.052	0.098

\* \* 相关性在 0.01 的水平显著(双尾) represents significant at 0.01 level (double tailed)

#### 4 讨论

利用包裹式茎流探头测定灌木液流具有许多优点:第一,包裹式茎流探头应用方便而准确,而且有不同的型号可供选择,在测定茎干较细的灌木等植株时具有很高的优越性。第二,利用所得被测单枝的蒸腾耗水量,可以推求整个灌木丛的耗水量。

黄柳和小叶锦鸡儿茎干液流日变化趋势基本相同,呈现为多峰曲线,但与叶片蒸腾速率日变化曲线并不吻合,实验测得的叶片蒸腾速率不能代表整个树冠层的叶片蒸腾。因此,茎干液流和叶片蒸腾难以同步反映彼此的动态变化特征。而以往利用快速称重法、叶室法测得的叶片蒸腾速率与树冠叶面积和质量换算树冠蒸腾耗水量的尺度扩展方法,应用于沙地灌木会因为存在很大的取样误差,而导致最终结果不可靠。树木蒸腾耗水 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<sup>[23]</sup>,对于沙区灌木的茎流特征进行研究不但可以为选择耐旱树种提供依据,还可根据当地的水分条件,结合地表蒸散量,计算出合理的造林密度和人工补水量。小叶锦鸡儿的单枝蒸腾耗水量远小于黄柳,中午的液流峰值比黄柳明显,加上其特殊

的叶片蒸腾特性,所以在干旱沙区相对不容易受到土壤水分的制约。因此,建议有关部门在选择防风固沙的灌木树种时,可以优先考虑小叶锦鸡儿。

两种灌木在夜间均出现了明显的茎干液流活动现象,以此来协调植物体需水平衡。植物的这种吸水特性对干旱沙区的植被生长存活有着更加重要的生理意义。沙区植被蒸腾强烈,植物体往往处于过度失水状态,所以在夜间保持较大的液流活动,可以弥补植物体内的水分匮乏,及时恢复白天过度蒸腾受损细胞的生理机能,增强了耐旱能力。

黄柳和小叶锦鸡儿茎干液流速率连日变化曲线与各自峰形变化趋势基本相同,其表观特征波动规律完全与同步检测的气象因子相吻合,这说明两种植物的液流速率受环境因子影响明显。影响沙区灌木液流变化的主要因子依次是:太阳辐射、相对湿度、大气温度、风速、10cm和20cm处土壤温度。

## References:

- [ 1 ] Gao Y B, Ren A Z, Wang W, *et al.* A comparative study on photosynthesis and morphological characteristics of *Salix gordejvii* between regenerated shoots and standing shoots. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1758 ~ 1764.
- [ 2 ] Cao C Y, Jiang D M, Luo Y M, *et al.* Stability of *Caragana microphylla* plantation for wind protection and sand fixation. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1178 ~ 1186.
- [ 3 ] Li H L, Dong Z, Ding G D, *et al.* Research on plant transpiration characteristics of Hunshandake Sand. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2003, 17(5): 135 ~ 140.
- [ 4 ] Ma C C, Gao Y B, Jiang F Q, *et al.* The comparison studies of ecological and water regulation characteristics of *Caragana microphylla* and *Caragana stenophylla*. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1442 ~ 1451.
- [ 5 ] Ma C C, Gao Y B, Guo H Y, *et al.* Interspecific transition among *Caragana microphylla*, *C. davazancii* and *C. kosinskii* along geographic gradient. Characteristics of photosynthesis and water metabolism. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1128 ~ 1237.
- [ 6 ] Sakuratani T. Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method. *J Agric Meteorol*, 1984, 40: 273 ~ 277.
- [ 7 ] Baker J M, van Bavel C H M. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant, Cell and Environment*, 1987, 10: 777 ~ 782.
- [ 8 ] Steinberg S L, van Bavel C H M, McFarland M J. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. *J Am Soc Hort Sci*, 1989, 114: 466 ~ 472.
- [ 9 ] Yan C R, Alec D, 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.
- [ 10 ] Jin H X, Liu Z J, Wang J H, *et al.* Measurement of shrub 's water consumption with stem heat balance (SHB) in the desert and arid area. *Protection Forest Science and Technology*, 2004, 6: 9 ~ 13.
- [ 11 ] Gullo M A, Salleo S, LoGullo M A. Water storage in the wood and xylem cavitation in 1-year-old twigs of *Populus deltoids* Bartr. *Plant, Cell and Environment*, 1992, 15: 431 ~ 438.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Clark J, Gibbs R D. Studies in tree physiology. Further investigations of seasonal changes in moisture content of certain Canada forest trees. *Can. J. Bot*, 1957, 35: 219 ~ 253.
- [ 14 ] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100: 291 ~ 308.
- [ 15 ] Perämäk M, Nikinmaa E, Sevanto S, *et al.* Tree stem diameter variations and transpiration in *Scots Pine*: an analysis using a dynamic sap flow model. *Tree Physiology*, 2001, 21(12-13): 889 ~ 897.
- [ 16 ] Wang H T, Ma L Y. Measurement of whole tree 's water consumption with thermal dissipation sap flow probe (TDP). *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(6): 661 ~ 667.
- [ 17 ] Ma L Y, Wang H T, Lin P. Comparison of water consumption of some afforestation species in Beijing area. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(2): 1 ~ 7.
- [ 18 ] Ma L, Zhao P, Rao X Q, *et al.* Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium*. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2145 ~ 2151.
- [ 19 ] Heilman J L, Ham J M. Measurement of mass flow rate of sap in *Ligustrum japonicum*. *Hort Science*, 1990, 25(4): 465 ~ 467.
- [ 20 ] Pan R Z. Water Metabolism in Plants. In: Pan R Z ed. *Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2001. 16 ~ 20.



- [21] Ren A Z, Gao Y B, Wang J L. Root distribution and canopy structure of *Salix gordejvii* in different sandy land habitats. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (3): 399 ~ 404.
- [22] Alamusa, Jiang D M, Pei T F. Relationship between root system distribution and soil moisture of artificial *Caragana microphylla* vegetation in sandy land. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17 (3): 78 ~ 811.
- [23] 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* Anj.) in Les Landed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 51(3-4): 309 ~ 319.

#### 参考文献:

- [1] 高玉葆, 任安芝, 王巍, 等. 科尔沁沙地黄柳再生枝与现存枝形态和光合特征的比较. *生态学报*, 2002, 22(10): 1758 ~ 1764.
- [2] 曹成有, 蒋德明, 骆永明, 等. 小叶锦鸡儿防风固沙稳定性研究. *生态学报*, 2004, 24(6): 1178 ~ 1186.
- [3] 李红丽, 董智, 丁国栋, 等. 浑善达克沙地植物蒸腾特征的研究. *干旱区资源与环境*, 2003, 17(5): 135 ~ 140.
- [4] 马成仓, 高玉葆, 蒋福全, 等. 小叶锦鸡儿和狭叶锦鸡儿的生态和水分调节特性比较研究. *生态学报*, 2004, 24(7): 1442 ~ 1451.
- [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树干液流研究. *生态学报*, 1999, 19(6): 793 ~ 797.
- [10] 金红喜, 刘左军, 王继和, 等. 热平衡茎流计在荒漠灌木植物耗水研究中的应用. *防护林科技*, 2004, 6: 9 ~ 13.
- [12] 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.
- [16] 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. *植物生态学报*, 2002, 26(6): 661 ~ 667.
- [17] 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.
- [18] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2005, 25(9): 2145 ~ 2151.
- [20] 潘瑞炽. 植物的水分代谢. 见: 潘瑞炽主编. *植物生理学*. 北京: 高等教育出版社, 2001. 16 ~ 20.
- [21] 任安芝, 高玉葆, 王金龙. 不同沙地生境下黄柳(*Salix gordejvii*)的根系分布和冠层结构特征. *生态学报*, 2001, 21(3): 399 ~ 404.
- [22] 阿拉木萨, 蒋德明, 裴铁璠. 沙地人工小叶锦鸡儿植被根系分布与土壤水分关系研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 78 ~ 811.