

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

徐先英^{1,2}, 孙保平², 丁国栋², 郭树江¹, 柴成武¹

(1. 甘肃省治沙研究所 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 民勤 733000;

2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:利用澳大利亚 Dynamax 公司生产的热平衡包裹式树干液流仪 (Stem Heat Balance, SHB) 和自动气象站对干旱荒漠区 3 种固沙灌木梭梭、多枝柽柳和唐古特白刺的液流变化及其气象因子进行测定, 研究了 3 种固沙灌木茎干液流日、季变化规律以及对气象因子的响应。结果表明: (1) 在生长季, 不同地茎、不同树种液流启动时间存在差异, 地茎 1.70、3.64cm 和 5.07cm 的梭梭启动时间分别为 5:00~7:00、5:00~7:20 和 6:00~8:00; 地茎 1.57cm 和 3.03cm 的柽柳启动时间 5:20~7:20 和 5:40~7:40; 地茎 1.59cm 白刺启动时间 6:00~8:00。梭梭的日变化表现为双峰型, 最高峰出现在 11:40~13:20; 而柽柳和白刺日变化表现为多峰格型, 最大峰值分别出现在 12:40~13:00 和 12:00~13:00; 3 种灌木液流在中午存在“午休”现象, 但“午休”不明显。(2) 3 种固沙灌木在夜间也保持一定的液流速率, 而且地茎越粗夜间液流持续的时间越长, 越细持续时间越短, 不同地茎灌木在第 2 天液流启动之前, 夜间液流都有一个明显的下降过程, 甚至为 0。(3) 3 种典型固沙灌木茎干液流季节变化表现为单峰型, 梭梭和柽柳茎干液流 8 月份最高, 7 月份次之, 6 月与 9 月基本一致, 而白刺 7 月份最高, 8 月次之; 在整个生长季, 相近地茎 3 种灌木单位面积液流量为: 白刺 > 柽柳 > 梭梭, 梭梭耐旱性较高。(4) 气象因子对不同树种茎干液流的影响有一定的差异, 茎干液流与气象因子的关系比较复杂。相关分析表明, 在整个生长季, 空气水汽压差或气温对梭梭起主导作用, 而太阳辐射对柽柳和白刺起主导作用。

关键词: 干旱荒漠区; 固沙灌木; 热平衡技术; 茎流; 影响因子

文章编号: 1000-0933(2008)03-895-11 中图分类号: Q945.17, Q948 文献标识码: A

Sap flow patterns of three main sand-fixing shrubs and their responses to environmental factors in desert areas

XU Xian-Ying^{1,2}, SUN Bao-Ping², DING Guo-Dong², GUO Shu-Jiang¹, CHAI Cheng-Wu¹

1 Gansu Desert Control Research Institute, Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Minqin Gansu 733000, China

2 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 895~905.

Abstract: *Haloxylon ammodendron*, *Tamarix ramosissima* and *Nitraria tangutorum* are widely used sand-fixing shrubs in sandy desert areas. They are well adapted to sandy conditions. However, the understanding on the patterns of stem sap flow of the three shrubs is poor. The diurnal and seasonal variations of sap flow were measured with Stem Heat Balance (SHB), and the simultaneous weather factors were observed at a nearby automatic weather station from May to October in 2006. The

基金项目: 甘肃省攻关引导资助项目 (2GS042-A41-002-02); 甘肃省自然科学基金资助项目 (ZS011-A25-045-N); 甘肃省沙漠综合治理创新团队资助项目

收稿日期: 2007-07-22; **修订日期:** 2007-12-29

作者简介: 徐先英 (1963 ~), 男, 甘肃民勤人, 研究员, 主要从事荒漠生态和植物水分关系研究. E-mail: xyngxu@163.com

Foundation item: The project was financially supported by the Gansu Key Direction Project (No. 2GS042-A41-002-02), Provincial Natural Science Foundation of Gansu (No. ZS011-A25-045-N), Provincial Innovation Team Project on Desert Integrated Control of Gansu

Received date: 2007-07-22; **Accepted date:** 2007-12-29

Biography: XU Xian-Ying, Professor, mainly engaged in desert ecology and plant and water. E-mail: xyngxu@163.com

results showed that the starting time of sap flow was species-specific and varied with stem diameters within a species. The sap flow of *H. ammodendron* stems with basal diameters of 1.70cm, 3.64cm and 5.07cm started at 5:00–7:00, 5:00–7:20 and 6:00–8:00, respectively. That of *T. ramosissima* stems with 1.57cm and 3.03cm basal diameters started at 5:20–7:20 and 5:40–7:40, and that of *N. tangutorum* stems 1.59cm basal diameters started at 6:00–8:00. The diurnal variations of sap flow showed a bi-peaked curve for *H. ammodendron*, and a multi-peaked curve for *T. ramosissima* and *N. tangutorum*. The maximum velocity of sap flow appeared during 11:40–13:20 for *H. ammodendron*, 12:40–13:00 for *T. ramosissima* and 12:00–13:00 for *N. tangutorum*. All of the three species had an ambiguous noon-depression phenomenon of the sap flow curves. There was sap flow occurred at night for the three shrubs, but the duration of the flow at night varied with stem diameters. The larger the stem diameter, the longer the duration of sap flow at night. The sap flow of the three shrubs at night had an obvious decreasing course and approached zero prior to the sap flow started next day. The seasonal variations of sap flow for the three shrubs showed a unimodal pattern, in which the highest value occurred in August for *H. ammodendron* and *T. ramosissima*, and in July for *N. tangutorum*. During the entire growing season, the unit area sap flow intensity for the three shrubs with similar stem diameters ranked as *N. tangutorum* > *T. ramosissima* > *H. ammodendron* from high to low, which implied that the drought tolerance of *H. ammodendron* was higher than that of *N. tangutorum* and *T. ramosissima*. The results showed that vapor pressure deficit or air temperature was the major weather factor affecting sap flow for *H. ammodendron*, and solar radiation for *T. ramosissima* and *N. tangutorum*, which indicated that the weather factors played different roles in affecting sap flow of the three shrubs.

Key Words: sand-fixing; desert shrub; SHB; sap flow; drought tolerance; weather factor

水是干旱荒漠区植被生长的主导影响因子,植物根部吸收的水分99.8%以上消耗在蒸腾作用上^[1]。近50a来,在以水资源开发利用为核心的高强度人类经济、社会活动的作用下,干旱荒漠区,特别是干旱区内陆河下游生态系统受到了严重的影响,河流断流、湖泊干涸、地下水位大幅度下降、生物多样性丧失、人工固沙植被大面积衰退甚至死亡、固定沙丘活化、沙漠化过程加剧。因此,研究和分析干旱荒漠区主要固沙灌木的耗水特征和需水规律,对于选择耐旱节水植物、确定合理的造林密度和配置方式以及持续稳定的发挥固沙灌木生态防护功能具有重要的指导意义。

有关植物蒸腾耗水量的测定方法和手段一直是生态水文研究较为活跃的领域^[2~4],而且测定方法很多,有染料法、放射性同位素法、示踪法、磁流体动力学法^[5]、蒸渗仪法^[6]、整树容器法^[7]、快速称重法^[8]以及热脉冲^[7]、热平衡^[9]、热扩散^[10]等技术,其中热脉冲和热扩散技术可以对树干液流连续自动监测,时间分辨率高,对植物的正常生理活动影响小、野外操作方便^[10],近年在研究林木耗水方面得以广泛应用。Giorio等、Cienciala等利用热脉冲技术分别测定了油橄榄(*Olea europaea*)和马占相思(*Acacia mangium*)的树干液流特征和林地蒸腾规律^[11,12],常学向等、张小由等、孙鹏森等利用热脉冲技术分别测定二白杨(*Populus gansuensis*)、胡杨(*Populus euphratica*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等树种的茎干液流及其变化规律^[13~15],熊伟等利用热脉冲技术测定宁南山区华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)蒸腾耗水规律^[16];马履一等^[17]和Stan等^[18]利用热扩散技术分别对北京地区几个造林树种和美国北达可州几种落叶林的蒸腾耗水特性进行了研究。

对于应用包裹式茎热平衡法(Stem Heat Balance, SHB)测定自然生长条件下荒漠区固沙灌木的液流特征,报道很少^[19,20]。本文利用该方法测定了干旱荒漠区3种典型固沙灌木梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)和白刺(*Nitraria tangutorum*)的日、季液流变化,其目的为绿洲边缘固沙林生态需水的确定和退化荒漠生态系统的恢复与重建提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于巴丹吉林沙漠东南缘的甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站(102°58'E, 38°34'N),属典型大陆性气候,年均气温7.7℃,极端最高气温41.0℃(1999年7月22日),极端最低-30.8℃

(1991年12月27日), $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 3147.8 $^{\circ}\text{C}$, 无霜期 172.59d; 多年平均降水量 115.9mm(1960~2005年), 年潜在蒸发量 2452.7mm, 干燥度 5.3; 多年平均风速 2.4m/s, 年平均大风日数 26.3d, 沙尘暴日数 25.0d; 地下水位 18.4m; 土壤为风沙土, 梭梭林地土壤容重、比重、0~200cm 土壤平均含水率、凋萎含水率分别: 1.43 g/cm³、2.67g/cm³、1.96%~2.01%、0.83%; 白刺沙包土壤容重、比重、0~200cm 土壤平均含水率、凋萎含水率分别: 1.59g/cm³、2.76g/cm³、1.84%~2.03%、1.23%; 怪柳沙包土壤容重、比重、0~200cm 土壤平均含水率、凋萎含水率为: 1.47 g/cm³、2.76g/cm³、2.05%~2.27%、1.36%。

2 研究方法

2.1 茎干液流测定

SHB 的作用原理: 当茎流计的热源以恒定的功率(P_{in})作用于茎干后, 传输给茎干液流的能量在不考虑茎干本身热容量的情况下, 可分解为 3 部分: 一部分用于与垂直方向上的水流进行热交换(Q_v); 一部分以辐射的方式向四周散发(Q_r); 一部分与茎干内水流一起向上传输(Q_t)。这种能量平衡方式表达为:

$$P_{in} = Q_v + Q_r + Q_t$$

根据欧姆定律 $P_{in} = V^2 / R$, Q_v 分为向上热交换 Q_u 和向下热交换 Q_d 两部分, $Q_v = Q_u + Q_d$ 。

根据 Fourier 定理, 茎干木质部内向上的热交换和向下的热交换分别为:

$$Q_u = K_{st} \times A \times dT_u / dx; Q_d = K_{st} \times A \times dT_d / dx。$$

式中, K_{st} 为茎干热传导特性 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 木质茎为 0.42; A 为茎的截面积 (m^2); dT_u/dx , 向上热传导时的温度梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$); dT_d/dx 为向下热传导时的温度梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$); dx 为测定温度梯度时两个热点耦之间的距离 (m); 以辐射形式向四周散发的能量:

$$Q_r = K_{sh} \times CH$$

式中, K_{sh} 为护套的导热系数, 通过求解零流率 ($Q_t = 0$) 时的能量平衡表达式计算:

$$K_{sh} = (P_{in} - Q_v) / CH$$

式中, CH , 辐射热电堆电压 (v)。

将以上计算所得的数值以及测量的温度增量值、水的热容量代入下式, 即可求出茎干中的水流量:

$$F = (P_{in} - Q_v - Q_r) / C_p \times dT$$

式中, C_p 为水的比热 ($\text{J}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$), 为 4.168 $\text{J}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$; dT 为上下两个温度监测点间茎干水流温度的变化值 ($^{\circ}\text{C}$); $dT = (T_a + T_b) / 2$ 。

表 1 3 种植物样本基本参数

Table 1 Parameters of the sample shrubs for sap flow measurement

探头规格 SP	梭梭样本地径 (cm) Basal diameter of <i>H. ammodendron</i>				怪柳样本地径 (cm) Basal diameter of <i>T. ramosissima</i>				白刺样本地径 (cm) Basal diameter of <i>N. tangutorum</i>	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
SGA-13	1.65	1.67	1.74	1.73	1.41	1.52	1.77	1.58	1.61	1.57
SGA-25	2.94	2.96	3.00	3.03	3.23	2.90	2.99	3.00		
SGB-50	4.99	5.10	5.09	5.16						

Dynamax 茎流仪的安装与数据采集: 被测样木在测定前, 用砂纸轻轻将茎干打磨光滑, 然后用游标卡尺精确测定树干直径, 之后在打磨好的安装区抹上 G4 油脂, 仔细将包埋式探头安装于被测区, 用铝箔包裹, 以防止太阳辐射, 最后用胶带密封, 防止雨水进入。将探头进行数据传输的电缆线与数采器 (Delta-T Logger) 相应的接口进行连接, 数采器的电源线与 12V 电池接通。通过计算机与数采器连接, 将测定样木的茎干类型、面积、探头电压、起始时间、数据记录的间隔等参数输入到数采器, 然后定期用电脑采集数据, 用 SPSS-12 软件进行处理。本研究数据采集间隔为 60s, 每 20min 进行平均值计算并储存。

从 2006 年 5~10 月, 利用 Dynamax 公司生产的热平衡 (SHB) 包裹式树干液流仪, 对梭梭、怪柳和白刺 (表 1) 的液流进行测定, 每月每个树种连续观测 7~10d。

2.2 环境因子测定

太阳辐射、气温、空气湿度、风向等环境因子用 Monitor 自动气象站测定,数据采集时间与茎流仪同步。

3 结果分析

3.1 茎干液流日变化规律

植物茎干液流在一天内具有明显的节律性。图 1、2 和图 3 表明,梭梭的日变化表现为双峰格型,而柽柳和白刺的则表现为多峰格型。生长季 5 - 10 月,梭梭树干液流启动时间在 5:00 ~ 8:00 之间,地茎 1.70、3.64cm 和 5.07cm 启动时间分别为 5:00 ~ 7:00、5:00 ~ 7:20 和 6:00 ~ 8:00;柽柳启动时间在 5:20 ~ 7:40 之间,地茎 1.57cm 和 3.03cm 的启动时间 5:20 ~ 7:20 和 5:40 ~ 7:40。一般情况下,梭梭、柽柳在 7 月液流启动时间最早,10 月最晚。梭梭茎干液流启动后,液流速率快速上升,在 11:00 ~ 13:20 之间达到第一个峰值,13:40 ~ 16:20 出现第二个峰值,第二峰值一般比第一峰值低。地茎 1.7cm 的梭梭第一峰值出现时间在 11:00 ~ 12:00,第二峰值在 13:40 ~ 16:00 之间;地茎 3.64cm 和 5.07cm 梭梭第一、二峰值出现的时间分别为 11:00 ~ 12:40、14:00 ~ 16:00 和 11:40 ~ 13:20、14:40 ~ 16:20。说明地茎越细,峰值出现时间越早,地茎越粗,峰值出现越晚。9 月 6 ~ 13 日 1.7、3.64cm 和 5.07cm 地茎梭梭的平均液流速率分别为 200.31、94.36g/h 和 40.05g/h。

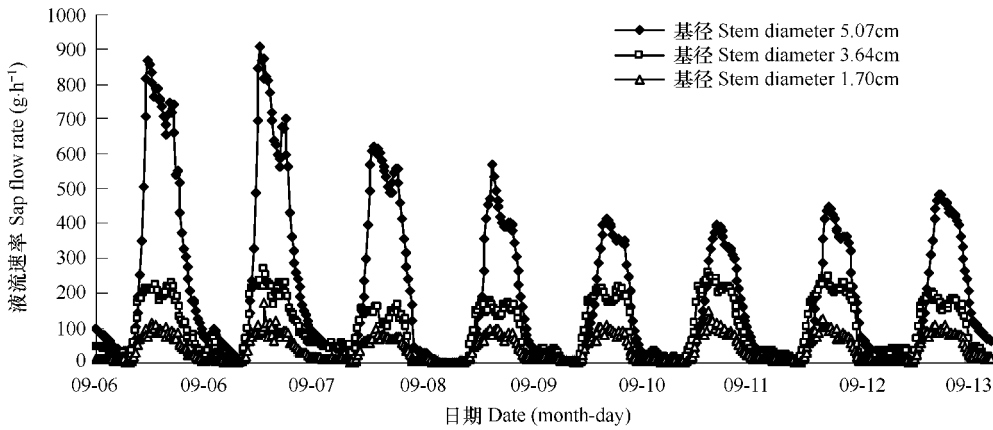


图 1 梭梭不同茎干液流连日变化

Fig. 1 Diurnal changes of sap flow of *H. ammodendron*

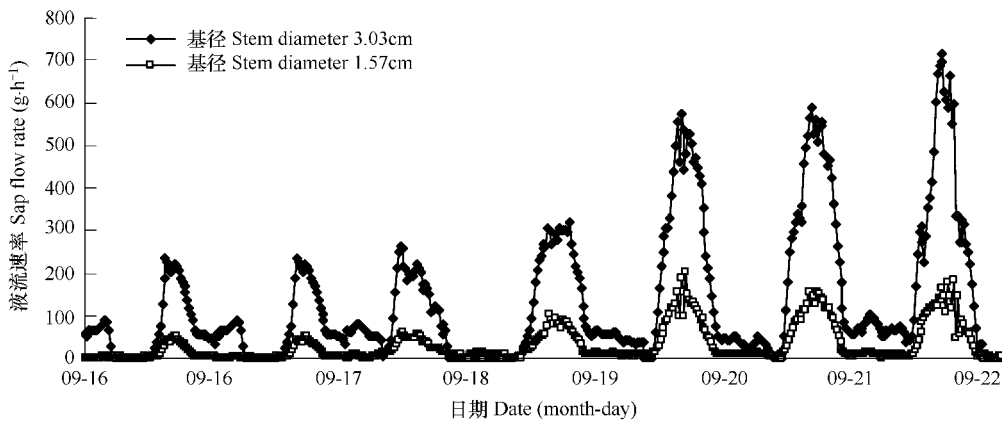


图 2 柽柳不同茎干液流连日变化

Fig. 2 Diurnal changes of sap flow of *T. ramosissima*

地茎 1.57cm 和 3.03cm 柽柳的最大峰值出现在 12:00 ~ 13:00,第二大峰值出现在 14:00 ~ 15:00。9 月 16 ~ 22 日 1.57cm 和 3.03cm 地茎柽柳的平均液流速率分别为 138.97g/h 和 38.09g/h。柽柳在最大峰值之前和次大峰值之后,仍有许多较小的峰值,直到 20:00 后。梭梭和柽柳茎干在夜间仍维持相对稳定的液流,说明

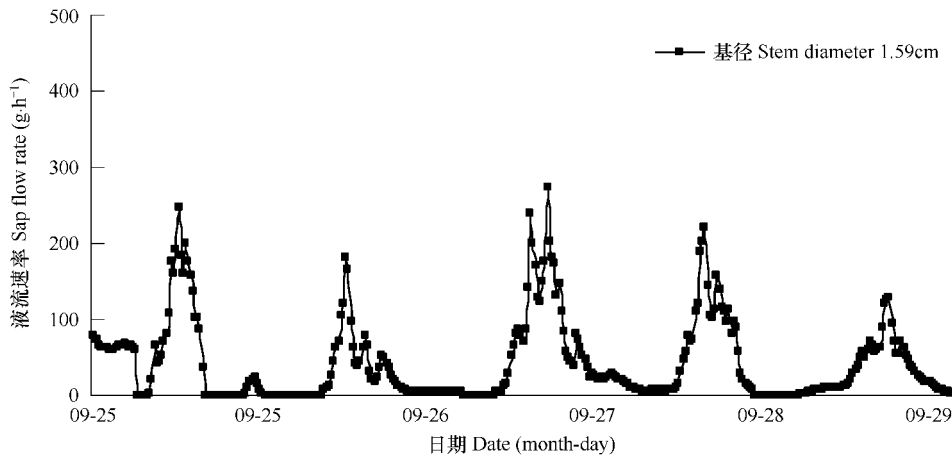


图3 白刺不同茎干液流连日变化

Fig.3 Diurnal changes of sap flow of *N. tangutorum*

夜间根系可以继续保持吸水能力,以协调植物的需水平衡^[21]。尽管梭梭和柽柳在夜间保持一定的液流量,但不同地茎的梭梭和柽柳在第二天液流启动之前都有一个迅速下降的过程,然后再启动并迅速上升,持续时间因地茎大小而异,地茎 3.03 ~ 3.64cm 的植物持续 2h 左右;地茎 1.57 ~ 1.70cm 的植物持续 3h 左右。

在整个生长季梭梭液流变化呈双峰形的日变化格型,第一峰值达到后,有短暂的液流减少现象,而柽柳则表现为多峰格型,但中午前后的两峰之间也有短暂的液流减少现象,液流下降的幅度比其它小峰之间的大,说明荒漠植物为了适应严酷的沙漠环境,保持体内水分而出现特有的“午休”现象,但“午休”现象并不明显。蒸腾速率的“午休”主要是由于干旱区植物为了保存体内水分,短暂关闭或减少叶片气孔开张度,降低植物体内水分蒸腾所致^[22]。

白刺茎干液流的启动时间比梭梭和柽柳晚,在整个生长季,液流启动时间在 6:00 ~ 8:00 之间,启动后,随着太阳辐射的增强,液流迅速上升,12:00 ~ 13:00 达到最高峰,之后开始下降,出现“午休”现象,“午休”现象与梭梭和柽柳相似,20:20 以后液流迅速下降。白刺在夜间也有一定的液流,但在 3:40 左右达到最低,甚至为 0,最低值一直持续到第二天液流开始启动,持续的时间比相近地茎梭梭和柽柳长。

3.2 树干液流对不同天气条件的响应

在干旱风沙区,天气条件对 3 种固沙灌木的茎干液流速率影响不同(图 4 ~ 图 6)。由图 4 ~ 图 6 可以看

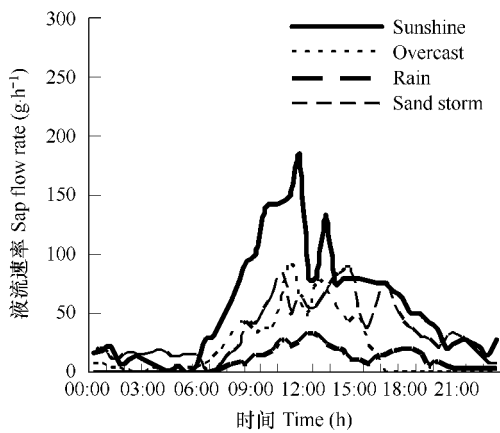


图4 不同天气条件下梭梭茎干液流日变化

Fig.4 Diurnal changes of sap flow of *H. ammodendron* under different weather conditions

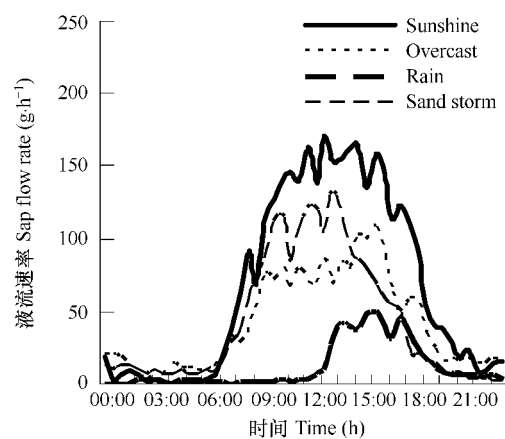


图5 不同天气条件下柽柳茎干液流日变化

Fig.5 Diurnal changes of sap flow of *T. ramosissima* under different weather conditions

出,3种植物在6月的雨天和沙尘天气条件下,茎干液流的启动时间与晴天比较,推迟大约1~1.5h,阴天启动时间提前0.5~1h。地茎1.7cm梭梭在晴天、阴天、雨天和沙尘暴天气条件下的最大峰值分别为183.9、91.8、33.3g/h和88.6g/h,最大峰值出现的时间为12:00、11:30、12:30和15:00;地茎1.57cm柽柳最大峰值分别为170.9、108.4、49.6g/h和121.3g/h,最大峰值出现时间是13:00、16:00、16:00和12:00;地茎1.59cm白刺最大峰值分别是309.9、183.9、33.4g/h和300.7g/h,最大峰值出现的时间是12:00、21:00、10:00和12:00。

在阴天或雨天的晚上,由于白天太阳辐射强度小、空气温度低、相对湿度大,植物蒸腾小,植物体水分亏缺不明显,因此夜间树干液流很小或为零;而在沙尘暴条件下,弥漫的沙尘减少了太阳辐射、降低了空气湿度,白天的液流速率相对晴天来说小,但夜间由于风速大,空气流动快,夜间的平均液流速率与晴天相比差异不明显。在晴天和沙尘暴天气条件下,梭梭的夜间平均液流速率分别为15.37g/h和14.97g/h;柽柳为8.10、7.54g/h;白刺是17.71g/h和19.2g/h。从图4~图6可以看出,在沙尘暴天气条件下,茎干液流呈多峰现象,而阴雨天茎干液流曲线趋于平缓。说明茎干液流与环境因子的剧烈变动有关。

从表2可以看出,不同树种在不同天气条件下的日平均液流速率和日液流量存在差异,3种植物茎干液流的平均速率和日液流量在各种天气条件下排序依次为:晴天>沙尘暴>阴天>雨天。说明液流的变化不仅与树木的生物、生理学特性有关,而且与当日的气象因子关系密切。

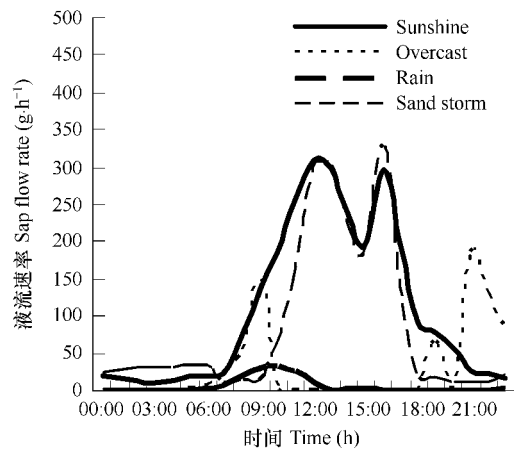


图6 不同天气条件下白刺茎干液流日变化
Fig. 6 Diurnal changes of sap flow of *N. tangutorum* under different weather conditions

表2 不同天气条件下3种灌木日平均液流速率和日液流量

Table 2 Daily mean sap flow rate and daily cumulative sap flow of three shrubs under different weather conditions

树种 Species	基茎 (cm) Stem diameter	晴天 Sunshine		阴天 Overcast		雨天 Rain		沙尘暴 Sand storm	
		平均液流 速率(g/h) Mean sap flow rate	日液流量 (g) Daily cumulative sap flow	平均液流 速率(g/h) Mean sap flow rate	日液流量 (g) Daily cumulative sap flow	平均液流 速率(g/h) Mean sap flow rate	日液流量 (g) Daily cumulative sap flow	平均液流 速率(g/h) Mean sap flow rate	日液流量 (g) Daily cumulative sap flow
<i>H. ammodendron</i>	1.70	54.97	1319.52	19.75	474.00	9.48	227.52	34.47	827.28
<i>T. ramosissima</i>	1.57	67.59	1622.16	40.86	980.64	11.45	274.80	41.92	1006.08
<i>N. tangutorum</i>	1.59	108.46	2603.04	29.12	698.88	5.88	141.12	79.94	1918.56

3.3 茎干液流的季节变化规律

在生长季,不同地茎灌木的日均液流量、月液流量以及地茎相近的不同树种之间液流量存在明显差异(表3)。从表3可以看出,不同地茎梭梭日均液流量和月液流量5月份最低,6~8月份依次升高,8月份达到最高,8月份以后开始下降直至10月份生长结束。3.03cm和1.59cm地茎柽柳在6~10月份的液流量与梭梭的相似,生长季最高峰也在8月份。由于没有5月份的测定结果,柽柳月液流量最低在10月份。地茎1.59cm白刺6~10月份的液流量最高峰出现在7月,可能与白刺的物候特征有关。白刺在7月中、下旬到8月上旬进入果熟期,8月中、下旬叶开始变色,部分叶片脱落,总叶面积减少,因此8月份液流逐渐下降,直至10月结束。

从梭梭或柽柳不同地茎的相同月份平均液流速率和生长季总液流量比较,月均液流速率、日均液流总量

和生长季总液流量都随地茎的增大而增加,茎干液流量与茎干直径为正相关关系,这与其它研究得出的结果类似^[23,24]。地茎 5.07cm 的梭梭 8 月份平均液流速率和生长季总液流量分别为 305.6g/h 和 760.88kg,分别是 3.64cm 地茎的 2.65 倍和 2.09 倍,是地茎 1.70cm 的 6.11 倍和 5.41 倍;3.64cm 地茎梭梭是 1.70cm 的 2 倍和 2.59 倍。地茎 3.03cm 的柽柳 8 月份的平均液流速率和生长季液流总量是基茎 1.57cm 的 5.63 倍和 4.61 倍。

表 3 生长季 3 种固沙灌木液流量变化

Table 3 Seasonal variation of sap flow in stems of three shrubs

月份 Month	项目 Item	梭梭 <i>H. ammodendron</i>			柽柳 <i>T. ramosissima</i>		白刺 <i>N. tangutorum</i>
		地茎	地茎	地茎	地茎	地茎	地茎
		Stem diameter 5.07cm	Stem diameter 3.64cm	Stem diameter 1.70cm	Stem diameter 3.03cm	Stem diameter 1.57cm	Stem diameter 1.59cm
5	日均 Daily cumulative (g)	787.20	815.52	39.36			
	月合计 Monthly cumulation (g)	24403.20	25281.12	1220.16			
6	日均 Daily cumulative (g)	4371.36	2318.88	836.64	3617.28	959.52	1165.20
	月合计 Monthly cumulation (g)	131140.8	69566.40	25099.20	108518.4	28785.6	34956.00
7	日均 Daily cumulative (g)	5217.6	2452.01	1092.00	7491.6	1596.00	2292.48
	月合计 Monthly cumulation (g)	161745.6	76012.31	33852.00	232239.6	49476.00	71066.88
8	日均 Daily cumulative (g)	7334.40	2763.60	1377.60	9610.80	1706.40	1565.52
	月合计 Monthly cumulation (g)	227366.40	85671.6	42705.60	297934.80	52898.40	48531.12
9	日均 Daily cumulative (g)	4395.12	2230.56	954.24	3612.00	1026.00	991.68
	月合计 Monthly cumulation (g)	131853.60	66916.80	28627.20	108360.00	30780.00	29750.2
10	日均 Daily cumulative (g)	2721.60	1298.40	291.60	692.88	152.88	537.12
	月合 Monthly cumulation (g)	84369.60	40250.40	9039.60	21479.28	4739.28	16650.72
5(6)~10月合计 Cumulation from May(June) to October (g)		760879.20	363698.63	140543.80	768532.10	166679.30	200954.92

在整个生长季,梭梭、柽柳和白刺相近地茎(1.5~1.70cm)的茎干单位面积液流速率分别为:14.05、23.49g/(h·cm²)和 27.31g/(h·cm²),单位面积液流总量分别为:6190.41、86141.40g/cm²和 101259.18g/cm²。单位面积液流总量的大小依次为:白刺>柽柳>梭梭。

3.4 3 种灌木茎干液流与气象因子的相关分析

植物液流除受植物自身特性影响以外,还受气象因子的影响。为了进一步探求 3 种典型固沙灌木液流速率对气象因子的响应,本研究对生长季 6~10 月份测定的液流速率与太阳总辐射、空气水汽压差等 5 个气象因子进行了偏相关分析,结果见表 4。从表 4 可以看出,在生长季除 3.03cm 地茎柽柳的液流速率与太阳总辐射、空气水汽压差、相对湿度、气温和风速等 5 个因子之间呈显著相关外,其它地茎 3 个树种的液流速率同 5 个气象因子呈极显著相关, $p < 0.01$,说明 3 个树种的茎干液流速率是 5 个气象因子共同作用的结果。随树木种类和生长期的不同,气象因子对不同树种、不同茎干液流的影响有一定的差异。相关分析表明,影响 1.70、3.64cm 梭梭茎干液流的气象因子分别是:空气水汽压差>气温>太阳总辐射>相对湿度>风速、气温

> 空气水汽压差 > 太阳总辐射 > 相对湿度 > 风速; 影响 1.57cm 和 3.03cm 柽柳茎干液流的是: 太阳总辐射 > 空气水汽压差 > 相对湿度 > 气温 > 风速、太阳总辐射 > 相对湿度 > 空气水汽压差 > 气温 > 风速; 影响 1.59cm 白刺茎干液流的是: 太阳总辐射 > 空气水汽压差 > 气温 > 相对湿度 > 风速。空气水汽压差或气温对生长季的梭梭起主导作用, 而太阳辐射对生长季的柽柳和白刺起主导作用, 说明树木的蒸腾过程受各种因子的综合影响, 差别在于不同阶段不同树种对同一因子的响应不同, 而同一阶段不同树种对同一因子的响应也不一致^[25]。

4 结论与讨论

由于植物自身生理生态特性的差异和对环境因子响应的不同, 梭梭、柽柳和白刺茎干液流日变化趋势各不相同。张小由^[26]指出在生长正常状况下, 梭梭液流的日变化具有单峰特征, 而本研究结果梭梭日变化呈双峰曲线, 两个峰值分别出现在 11:40 ~ 13:20 和 14:00 ~ 16:20, 而且两个峰值之间由于植物的“午休”现象而出现一个低谷。植物存在“午休”现象是由植物生理活动受到胁迫造成的, 很可能是土壤水分不足影响植物根系的吸水能力。冯起等^[27]、张武文等^[28]的研究表明, 当地下水位 < 5m、土壤含水率 > 3.5%, 大部分灌木、半灌木生长良好, 说明植物不存在水分胁迫或水分胁迫很小; 而当地下水位 > 5m、土壤含水率在 1.6% ~ 2.2% 时, 梭梭生长一般, 出现水分胁迫。张小由是在无水分胁迫的条件下(地下水水位 2.7 ~ 3.5m, 土壤含水率 8% ~ 12%) 研究梭梭液流特征的。本研究是在地下水水位 18.78m、生长季土壤含水率 1.9% ~ 2.05% 条件下测定梭梭液流变化的。植物出现“午休”现象也可能还有其它环境条件所致, 需进一步研究。梭梭的“午休”现象不很明显, 液流下降幅度不大。柽柳和白刺在中午前后两个较大峰值之间也存在“午休”现象, 与梭梭一样“午休”现象不明显, 可能是午间空气水汽压差的增大, 促进了梭梭、柽柳和白刺的蒸腾作用, 抵消了一部分由于气孔关闭引起的蒸腾作用急剧减少所致。柽柳和白刺的日茎流在中午前后两个较高峰值之后仍有许多小峰出现, 出现这种情况可能是非规律性波动, 也可能是电信号误差所致, 需进一步验证。

表 4 固沙灌木生长季茎干液流速率与各环境因子相关性分析

Table 4 Correlation analysis between sap flow rate of the examined shrubs and meteorological factors in growing season

种名 Species	茎粗度 (cm) Stem diameter	名称 Item	太阳总辐射 (W/m ²) Solar radiation	空气水汽 压差 (hPa) VPD	气温 (°C) Air temperature	相对湿度 (%) Air relative humidity	风速 (m/s) Wind velocity
梭梭 <i>H. ammodendron</i>	1.70	相关系数 Correlation coefficient	0.580 **	0.651 **	0.638 **	-0.565 **	0.187 **
		显著性水平 Significant level	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
	3.64	相关系数 Correlation coefficient	0.728 **	0.741 **	0.756 **	-0.659 **	0.385 **
		显著性水平 Significant level	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
柽柳 <i>T. ramosissima</i>	1.57	相关系数 Correlation coefficient	0.601 **	0.568 **	0.236 **	-0.426 **	0.234 **
		显著性水平 Significant level	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
	3.03	相关系数 Correlation coefficient	0.442 *	0.333 *	0.236 *	-0.416 *	0.189 *
		显著性水平 Significant level	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
白刺 <i>N. tangutorum</i>	1.59	相关系数 Correlation coefficient	0.833 **	0.734 **	0.669 **	-0.447 **	0.323 **
		显著性水平 Significant level	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002

* * 0.01 水平显著相关 represents significant at 0.01 level

岳广阳^[20]对科尔沁沙地 2 种沙生灌木液流研究表明, 黄柳 (*Salix gordejvii*) 和小叶锦鸡儿 (*Caragana*

microphylla) 在夜间均出现明显的液流活动现象,以此来协调植物体需水平衡;许浩^[29]指出乔木状沙拐枣 (*Calligonum arborescens*) 在夜间仍能保持较高的液流速率。本研究的 3 种固沙灌木在夜间也保持一定的液流速率。在干旱沙漠地区,植物白天蒸腾量大,所以夜间蒸腾停止后,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,以补充白天蒸腾引起的水分亏缺^[30],同时干旱沙区夜间空气干燥,加上夜间高温和适度的大风可能会引起气孔的部分开放,从而加速其吸水过程,也是植物夜间仍保持一定液流的一个原因。严昌荣^[5]研究表明,核桃楸 (*Juglans mandshurica*) 晚上液流速率很小,而且比较稳定。不同地茎 3 种固沙灌木在夜间虽然保持一定液流,但所持续的时间不同,地茎越粗夜间液流持续的时间越长,地茎越细持续时间越短,不同地茎灌木在第二天液流启动之前,都有一个明显的下降过程,可能与白天造成的水分亏缺多少有关。

梭梭、柽柳和白刺 3 种典型固沙灌木在雨天和阴天条件下,由于空气相对湿度较高,温度、太阳辐射和水汽压差等环境因子相对较低,导致液流速率降低,液流量减少;夜间由于空气相对湿度达到 90% 以上,叶片气孔关闭,几乎无蒸发,液流保持极低值^[20],甚至为 0。在沙尘暴条件下,尽管空气流动快,相对湿度低,有利于树木蒸腾,但是空气中弥漫的沙尘影响太阳辐射,快速流动的空气降低了气温,同时大风天气引起部分气孔关闭,对液流速率影响较大,造成液流速率和液流量比晴天小。有研究结果表明,风速达到一定值时,由于引起植物气孔关闭,抑制了蒸腾^[31]。

3 种典型固沙灌木茎干液流季节变化表现为单峰曲线,这与他人对二白杨、沙拐枣研究结论一致^[13,29]。由于植物自身生物学特性的差异,梭梭和柽柳茎干液流量 8 月份最高,7 月份次之,6 月与 9 月基本一致,而白刺 7 月份最高,8 月次之;在整个生长季,相近地茎 3 种灌木单位面积液流总量大小依次为:白刺 > 柽柳 > 梭梭,说明梭梭耐旱性较高。

曹文强^[32]研究结果表明,影响辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 晴天和阴天液流变化的主要因子为太阳辐射、空气温度、空气湿度,这些环境因子之间存在相互制约和相互协调;夏桂敏^[33]考虑气象因子对柠条 (*C. korshinskii*) 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树干液流的主要因子;虞沐奎^[34]研究则认为,气温是影响液流的主要因子。气象因子对不同树种茎干液流的影响有一定的差异,树干液流与气象因子的关系比较复杂。在整个生长季,影响 3 种典型固沙灌木茎干液流的主要气象因子:空气水汽压差或气温对生长季的梭梭起主导作用,而太阳辐射对生长季的柽柳和白刺起主导作用。

References:

- [1] Luo Z L. The development and application of thermal methods for measuring sap flow. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1997, 18(3): 52—57.
- [2] Loustau D, Berbigier P. Transpiration of a 64-year-old maritime pine. *Oecologia*, 1996, 107: 33—42.
- [3] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurement. *Tree Physiol.*, 1987, 3: 309—319.
- [4] Meinzer F C, Goldstein G. Environmental and physiological regulation of transpiration tropical forest gap species: the influence of boundary layer and hydraulic properties. *Oecologia*, 1995, 101: 514—522.
- [5] Yan Ch 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.
- [6] Xu X Y, Zhang R D, Xue X Z, *et al.* Determination of evapotranspiration in the desert area using lysimeters. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 1&2: 1—15.
- [7] 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): 119—125.
- [8] Liu F J. A study on the measurement of transpiration rate in a poplar by means of quick-weighing method. *Forest Research*, 1990, 3(2): 162—165.
- [9] Yue G Y, Zhang T H, Liu X P, *et al.* Development and application of thermal methods in measuring stem sap flow. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(8): 102—108.
- [10] Sun H Z, Zhou X W, Zhao H X. A research on stem sap flow dynamics of *Betula platyphylla*. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1387—1391.

- [11] Giorio P, Giorio G. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. *Envi. Exp. Bot.*, 2003, 49: 9–20.
- [12] Cienciala E, Kucera J, Malmer A. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. *Journal of Hydrology*, 2000, 236: 109–120.
- [13] Chang X X, Zhao W Z. Sap flow of Gansu poplar in farm land shelter forest during the growing season in desert oasis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1436–1441.
- [14] Zhang X Y, Gong J D, Zhou M X, *et al.* Spatial and temporal characteristics of stem sap flow of *Populus euphratica*. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(4): 489–492.
- [15] Sun P S, Ma L Y, Wang X P, *et al.* Temporal and spatial variation of sap flow of Chinese pines (*Pinus tabulaeformis*). *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(5): 1–6.
- [16] 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, 39(2): 1–7.
- [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] Stan D, Wullschlegel P J, Hanson D E, *et al.* Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143: 205–213.
- [19] Jin H X, Xu X Y, Tang J N, *et al.* Sap-flow pattern and its responses of *Hedysarum scoparium* Fisch. Et Mey. to environmental factors. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(2): 0354–0361.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Zhang X Y, Gong J D, Zhou M X, *et al.* A study on the stem sap flow of *Populus euphratica* and *Tamarix* spp. by heat pulse technique. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(5): 585–590.
- [23] Peter B. Sap flow in Bornean heath and *dipterocarp* forest trees during wet and dry period. *Tree Physiology*, 1995, 16: 295–299.
- [24] Wullschlegel S D, Hanson P J, Todd D E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143: 205–213.
- [25] Chen R S, Kang E S, Zhao W Z, *et al.* Trees transpiration response to meteorological variables in arid regions of northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 477–486.
- [26] 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, 24(12): 2250–2254.
- [27] Feng Q, Cheng G D, Tan Z G. Studies on the groundwater table limiting the desert plant growth in oasis. *Journal of Desert Research*, 1998, 18 (supp): 106–109.
- [28] Zhang W W, Shi S S. Study on the relation between groundwater dynamics and vegetation degeneration in Erjina Oasis. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(4): 421–425.
- [29] Xu H, Zhang X M, Wang Y D, *et al.* Study on water consumption of *Calligonum arborescens* Litv. in shelterbelts along the Tarim desert highway. *Arid Zone Research*, 2006, 23(2): 216–222.
- [30] Clark J, Gibbs R D. Studies in tree physiology IV. Further investigations of seasonal changes in moisture content of certain Canada forest trees. *Can. J. Bot.*, 1957, 35: 219–253.
- [31] Feng J Z, Liu X M. Relationship between the natural environment and plant's moisture in arid area. Beijing: Chinese Environmental Scientific Press, 1998. 45–46.
- [32] Cao W Q, Han H R, Ma Q Y, *et al.* Sap flow flux of *Quercus liaotungensis* in summer in deciduous broad-leaf forest of Taiyue Mountain in Shanxi Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(2): 174–177.
- [33] Xia G M, Kang S Zh, Li Y C, *et al.* Diurnal and seasonal variation of stem sap flow for *Caragana korshinskii* on the arid desert region in Shiyang river basin of Gansu. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1186–1193.
- [34] Yu M K, Jiang M L, Lu X Z. Study on the stem sap flow of *Pinus taeda*. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2003, 27(3): 7–10.

参考文献:

- [1] 罗中岭. 热量法径流测定技术的发展与应用. *中国农业气象*, 1997, 18(3): 52–57.

- [5] 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.
- [7] 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): 119~125.
- [8] 刘奉觉. 用快速称重法测定杨树蒸腾速率的技术研究. 林业科学研究, 1990, 3(2): 162~165.
- [9] 岳光阳, 张铜会, 刘新平, 等. 热技术方法测算树木茎流的发展及应用. 林业科学, 2006, 42(8): 102~108.
- [10] 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.
- [13] 常学向, 赵文智. 荒漠绿洲农田防护林树种二白杨生长季节树干液流变化. 生态学报, 2004, 24(7): 1436~1441.
- [14] 张小由, 龚家栋, 周茅先, 等. 胡杨树树干液流的时空变异性研究. 中国沙漠, 2004, 24(4): 489~492.
- [15] 孙鹏森, 马履一, 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): 1~6.
- [16] 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.
- [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.
- [19] 金红喜, 徐先英, 唐进年, 等. 花棒液流变化规律及其对环境因子的响应. 西北植物学报, 2006, 26(2): 0354~0341.
- [20] 岳广阳, 张铜会, 赵哈林, 等. 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.
- [21] 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.
- [22] 张小由, 龚家栋, 周茂先, 等. 应用热脉冲技术对胡杨和柽柳树干液流的研究. 冰川冻土, 2003, 25(5): 585~590.
- [25] 陈仁升, 康尔泗, 赵文智, 等. 中国西北干旱区树木蒸腾对气象因子的响应. 生态学报, 2004, 24(3): 477~486.
- [26] 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, 24(12):2250~2254.
- [27] 冯起, 程国栋, 谭志刚. 荒漠绿洲植被生长与生态地下水位的. 中国沙漠, 1998, 18(supp):106~109.
- [28] 张武文, 史生胜. 额济纳绿洲地下水动态与植被退化关系的研究. 冰川冻土, 2002, 24(4): 421~425.
- [29] 许浩, 张希明, 王永东, 等. 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.
- [31] 冯金朝, 刘新民. 干旱环境与植物的水分关系. 北京: 中国环境科学出版社, 1998. 45~46.
- [32] 曹文强, 韩海荣, 马钦彦, 等. 山西太岳山辽东栎夏季树干液流通量研究. 林业科学, 2004, 40(2): 174~177.
- [33] 夏桂敏, 康绍忠, 李玉成, 等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日变化. 生态学报, 2006, 26(4): 1186~1193.
- [34] 虞沐奎, 姜志林, 鲁小珍, 等. 火炬松树干液流的研究. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(3):7~10.