

# 荒漠区固沙植物梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 耗水特征

常学向, 赵文智\*, 张智慧

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 寒旱区流域水文及应用生态实验室, 临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000)

**摘要** 利用 SF-300 热脉冲树干液流仪, 连续观测了生长季节荒漠区固沙植物梭梭树干液流速率, 研究了荒漠区固沙植物梭梭林木的耗水量及其与气象因子的关系。结果表明, 在生长季节, 梭梭树干液流速率昼夜变化小, 不同的生长日, 梭梭树干液流速率介于  $(5.9 \pm 0.7) \sim (14.5 \pm 3.6) \text{g cm}^{-2} \text{h}^{-1}$ ; 观测期间, 梭梭平均日耗水量为  $(0.3 \pm 0.2) \text{mm}$ , 生长季节单株木耗水量达 49.4mm。树干液流速率对气象因子均有一定程度的响应, 且在不同时间的影响程度不同。日耗水量与林冠投影面积、基径、基径的平方乘以树高的积、边材厚度和边材面积呈线性关系。

**关键词** 树干液流, 耗水量, 气象因子, 土壤湿度, 梭梭, 荒漠区

文章编号: 1000-0933 (2007) 05-1826-12 中图分类号: Q948, S715 文献标识码: A

## Water consumption characteristic of *Haloxylon ammodendron* for sand binding in desert area

CHANG Xue-Xiang, ZHAO Wen-Zhi\*, ZHANG Zhi-Hui

Cold & Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Laboratory of Basin Hydrology and Applied Ecology, Cold & Arid Regions Linze Inland River Basin Research Station, Lanzhou 730000, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 1826 ~ 1837.

**Abstract** : Owing to the result of adaption to drought, salinity, poor nutrition, strong wind, sand movement and high light intensity, *Haloxylon ammodendron* have traditionally been planted to break wind and fix sand against dust storm menace and sand movement for maintaining oasis ecological environment balance and economic sustainable development in arid region of Northwest China. Especially, *H. ammodendron* have been a significant species to planted wind break and sand fixation forest in Hexi corridor, arid region of Northwest China. Sand-fixation forest is  $4.46 \times 10^4 \text{hm}^2$  in the middle Reaches of Heihe River Basin and *H. ammodendron* forest cover an area of 70%. In arid area where the precipitation is 100 to 200mm, *H. ammodendron* growth depend highly on the precipitation or (and) groundwater. To explore water consumption in artificial *H. ammodendron* forests, individual *H. ammodendron* sap flow was measured by heat pulse technology (SF300, Greenspan technology Pty Ltd, Australian). The result can help to providing scientific basis for arid-forestation and integrating evaluation for management. *H. ammodendron* forest selected as sampling plots was planted at Pinchuan town in Linze county, Gansu province in 1980. The initial planted density is 5000 — 6000 individual  $\text{hm}^{-2}$  and the existing density is 1600 individual  $\text{hm}^{-2}$ . During the experiment, 8 standard samples of *H. ammodendron* were selected according to

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40571026); 甘肃省基金资助项目 (3ZS061-A25-020); 中国科学院“西部之光”人才培养计划资助项目 (0628221001)

收稿日期: 2006-01-12; 修订日期: 2006-08-20

作者简介: 常学向 (1968 ~), 男, 甘肃高台人, 博士, 主要从事干旱区生态水文学研究。

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhx@ns.lzb.ac.cn

**Foundation item** : The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40571026), Gansu National Natural Science Foundation, China (No. 3ZS061-A25-020), Talent Training Program in west China of Chinese Academy of Sciences (No. 0628221001)

**Received date** 2006-01-12; **Accepted date** 2006-08-20

**Biography** : CHANG Xue-Xiang, Ph. D., mainly engaged in eco-hydrology concerning arid area.

different size basal stem class. The measured periods are from May 21 to June 1, June 21 to July 1, July 21 to Aug. 1, and Aug. 21 to Sept. 1. The sap flow was measured by using heat pulses lasting 1.6 seconds every 30 minutes. Soil moisture content was measured every 10 days from 10 May to 1 Sept. Climatic data were measured by EERIL3 (IMKO, German) include short-wave incoming radiation (CM7B, Kipp & Zonen, Delft, Netherlands), air temperature and relative humidity (HMP45D, Vaisala, Vantaa, Finland), and wind-speed (RS2 rotronic AG, Bassersdorf, Switzerland). Short-wave radiation, air temperature, relative humidity and wind-speed were recorded every 5 minutes and stored in a datalogger as mean values of 30min periods, precipitation was recorded an accumulated value everyday.

Daily sap flow of *H. ammodendron* for sand binding was continuously measured by the heat-pulse velocity (HPV) method in desert during growing season to identify its individual water consumption and to determine the relationship between water consumption and environmental factor. The results showed that the sap flow velocity on a sapwood area basis were fluctuated small between day and night and the daily average sap flow velocity on a sapwood area basis varied from  $(5.9 \pm 0.7) \text{ g cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  to  $(14.5 \pm 3.6) \text{ g cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . The mean of daily water consumption was  $(0.3 \pm 0.2) \text{ mm d}^{-1}$  and water consumption was 49.4mm. The response sensitivity of sap flow velocity to climatic variables differs in different growing stages. The multivariate analysis showed association of the sap flow velocity and daily water consumption with climatic variables, respectively. The result also showed daily water consumption and its canopy projective area, basal diameter, product of basal diameter square and height, sapwood and sapwood area were being better linear relationships during growing season.

**Key Words** : sap flow ; water consumption ; weather variable ; *Haloxylon ammodendron* ; desert area

梭梭 (*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bge) 是落叶小乔木或大灌木, 是中亚荒漠中分布最广的荒漠植被类型, 分布于我国新疆、甘肃西部、宁夏西北部、青海北部、内蒙古, 中亚和苏联也有分布<sup>[1]</sup>。由于其分枝多、耐瘠薄、抗旱性极强, 是干旱荒漠区的优良固沙植物<sup>[2]</sup>, 也是干旱区固沙造林面积最大的树种。

对降水量在 100 ~ 200mm 的干旱区, 人工林管理需要了解维持梭梭生长是靠降水, 还是需要消耗掉一部分地下水? 准确地测量梭梭人工林的耗水规律, 有助于认识这一干旱区生态环境建设迫切回答的科学问题。目前, 对梭梭耗水的研究仅见李银芳等利用非称重式蒸渗仪研究了降水量 120mm 地区灌溉条件下梭梭人工林的水分平衡问题, 给出了 1 年生梭梭苗木的蒸散量<sup>[3]</sup>, 但有关成熟梭梭林的耗水问题还未见研究报告, 因此需做进一步的研究。

在单株树木水平上研究林木耗水量能够反映多数非线性生理过程的平均响应<sup>[4,5]</sup>, 更有利于经验模型的建立<sup>[6]</sup>, 因此已利用单株树木水平上的液流技术研究了许多林木树种的耗水量。目前国外已利用液流技术测定了欧洲云杉 (*Picea abies*) 和欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*)<sup>[7]</sup>、油橄榄 (*Olea europaea*)<sup>[8]</sup>、马占相思 (*Acacia mangium*)<sup>[9]</sup> 等树种的耗水特性, 国内也测定了油松 (*Pinus tabulaeformis*)<sup>[10]</sup>、侧柏 (*Platycladus orientalis*)<sup>[11]</sup>、华北落叶松 (*Larix pincipi-rupprechtii*)<sup>[12]</sup> 等树种的耗水特性。在干旱区, 近年来利用液流技术也对二白杨 (*Populus gansuensis*)<sup>[13]</sup>、沙枣 (*Elaeagnus angustifolia*)<sup>[14]</sup>、胡杨 (*Populus euphratica*) 幼树<sup>[15]</sup> 等树种的耗水特性进行了研究, 但用液流技术对免灌固沙植物梭梭 (梭梭存活后不再灌水, 仍能维持正常生长, 因此称为免灌固沙植物) 耗水特性的研究还未见报道。因此本文在利用澳大利亚 GREENSPAN 技术公司生产的热脉冲仪 SF-300 连续监测了黑河流域荒漠区防风固沙的主要树种梭梭的树干液流的基础上, 估算了梭梭单株耗水量, 分析了梭梭耗水量与林木生长及环境因子的关系, 为干旱区梭梭人工林管理提供基础资料和理论支撑。

## 1 研究区概况

研究区位于黑河流域中游的中国生态系统网络临泽内陆河流域研究站试验区 (100°07'E, 39°21'N), 行政区划上属于临泽县平川镇, 海拔 1420m。研究区多年平均降水量 116.8mm, 年蒸发量 2390mm; 年平均气温 7.6℃, 最高气温 39.1℃, 最低 -27.0℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的年积温为 3088℃, 无霜期约 165d。生长季节 (5 ~ 10 月份)

平均气温 20.4℃, 降水量为 50.5mm。土壤为细沙, 容重 1.56 g cm<sup>-3</sup>, 总孔隙度 39.0%。梭梭防风固沙林于 1980 年定植在荒漠区沙丘坡地, 初植密度 5000 ~ 6000 株 hm<sup>-2</sup>, 现存密度为 1600 株 hm<sup>-2</sup>; 平均树高 (3.5 ± 0.5)m, 平均冠幅 2.0m × 1.8 m。梭梭水平根系主要集中在 50 ~ 100 cm, 土壤深度超过 180cm, 梭梭水平根系分布很少。梭梭林下已形成厚度为 5mm 的结皮, 但无其它植被。周围沙丘坡地有人工种植的灌木树种柽柳 (*Tamarix chinensis*)、花棒 (*Hedysarum scoparium*)、柠条 (*Caragana korshinskii*), 零星分布有芦苇 (*Phragmites communis*) 等植物, 植被盖度为 15%, 地下水位 3.5m。

## 2 研究方法

### 2.1 试验样地及观测样树的确定

在梭梭固沙林地代表性地段, 选择 15m × 40m 的样地, 对样地内梭梭调查其树高、冠幅、基径。按调查结果, 把梭梭基径按 4.9 ~ 6.9、6.9 ~ 8.9、8.9 ~ 10.9、10.9 ~ 12.9、12.9 ~ 14.9、14.9 ~ 16.9、16.9 ~ 18.9、18.9 ~ 20.9、20.9 ~ 22.9、22.9 ~ 24.9 cm 分成不同径阶, 并统计其径阶频率分布 (图 1)。根据径阶分布频率, 分别在 8.9 ~ 10.9 cm 基径范围内选择 3 株, 在 10.9 ~ 12.9 cm 基径范围内选择 2 株, 在 12.9 ~ 14.9 cm、16.9 ~ 18.9 cm、20.9 ~ 22.9 cm 基径范围内分别各选择 1 株作为被测样树 (表 1)。

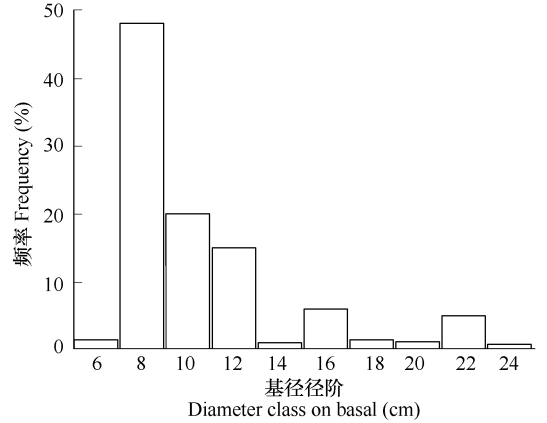


图 1 梭梭基径径阶分布频率

Fig. 1 Frequency distribution of tree diameter class on the basal

表 1 观测样树的基本参数

Table 1 Some parameters of the sample-trees for sap flow measurement

编号 No.	高度 Height (m)	基径 Basal diameter l (cm)	心材半径 Heartwood radius (cm)	边材半径 Sapwood radius (cm)	边材面积 Sapwood area (cm <sup>2</sup> )
1	3.6	8.6	2.8	0.5	9.6
2	2.3	6.5	1.2	1.1	11.8
3	4.0	11.1	3.8	0.8	21.0
4	2.7	8.4	2.2	1.0	17.0
5	3.2	8.2	2.1	1.0	16.4
6	4.0	14.5	5.1	1.1	39.3
7	3.1	7.2	1.3	1.3	15.8
8	5.0	10.5	3.2	1.1	25.6

## 2.2 数据测定

### 2.2.1 树干液流测定

利用澳大利亚 GREENSPAN 技术公司生产 SF-300 树干液流仪 2 套 8 个探头, 从 5 月 21 日 ~ 6 月 1 日、6 月 21 日 ~ 7 月 1 日、7 月 21 日 ~ 8 月 1 日、8 月 21 日 ~ 9 月 1 日, 把探头从基径处插入所选取的 8 株梭梭树树干 2cm (伤口直径 2.2mm), 用持续时间长 1.6s 的热脉冲, 每隔 30min 测定一次热脉冲速率 ( $V'_h$ )。树干液流速率  $V_s$  (kgcm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>) 可以用下式计算<sup>[6]</sup>:

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

式中,  $F_m$  为观测树木的木质体积比,  $F_l$  为观测树木的水体积比。  $F_m$  与  $F_l$  可以从下式计算:

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

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

式中,  $W_f$  为观测树木的边材鲜重,  $W_d$  为观测树木的边材的干重,  $W_i$  为相同边材体积的蒸馏水的重量。

经计算,供测梭梭的木质体积比为 0.41,水体积比为 0.62。

单位时间的树干液流量  $Q_i$  根据下式计算<sup>[7]</sup> :

$$Q_i = V_{si} \times A \quad (4)$$

$A$  为胸径处边材面积,  $i$  为观测次序 ( $i=1, 2, 3, \dots, 48$ )。

梭梭单株日耗水量  $Q$  ( $\text{kgd}^{-1}$ ) 为 :

$$Q = \sum_{i=1}^{48} 0.5 Q_i \quad (5)$$

为了与降水量、土壤贮水量变化比较,把单株梭梭日耗水量用下式转换成标准降水量单位 ( $\text{mm}$ ) :

$$Q_s = \frac{10000Q}{\rho \times S} \quad (6)$$

式中,  $Q_s$  为转换后的梭梭单株日耗水量,  $\rho$  为水的密度 ( $1 \text{gcm}^{-3}$ ),  $S$  为梭梭的林冠投影面积 ( $\text{cm}^2$ )。

## 2.2.2 林地土壤湿度测定

5、6、7 月和 8 月份的 1 日、11 日和 21 日及 9 月 1 日,在所选样地内用直径 5cm 的 Edelman 土钻取土样 1 次,取样剖面深度为 200cm,分别在 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180、180~200cm 分层取样,每层 3 个重复,用烘干法 ( $105^\circ\text{C}$ ) 测定土壤湿度,取其平均值为该层的土壤湿度。

土壤湿度的计算公式为 :

$$R_i = 100\% \times (\text{土壤湿重} - \text{土壤干重}) / \text{土壤干重} \quad (7)$$

梭梭林地土壤贮水量计算公式为 :

$$w_s = \sum_{i=1}^k (R_i \rho_s / \rho_w) H_i \quad (8)$$

式中,  $w_s$  为土壤储水量 ( $\text{mm}$ ),  $R_i$  为第  $i$  层的土壤湿度 ( $\%$ ),  $\rho_s$  和  $\rho_w$  分别为土壤容重与水的比重,  $H_i$  为第  $i$  层取样深度 ( $\text{mm}$ )。

## 2.2.3 气象因子的测定

在监测梭梭树干液流的同时,利用综合环境系统 EERIL3 (IMKO, German) 进行气象因子监测。综合环境系统 EERIL3 的采集仪每隔 5min 对气象因子测定一次,然后把 30min 内采集的数据平均,自动记录平均值为该时段的监测数据。采集的数据包括总辐射和净辐射 ( $R$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), CM7B, Kipp& Zonen, Netherlands)、气温、相对湿度 (HMP45D, Vaisala, Finland) 和风速 (RS2 rotronic AG, Bassersdorf, Switzerland)。

## 2.3 数据分析

采用 SPSS 统计软件分析树干液流速率、每天耗水量与气象因子的相关关系,所有回归关系均用  $F$  检验检验其可靠性。

## 3 研究结果

### 3.1 树干液流速率的变化规律

#### 3.1.1 树干液流速率的日变化

在生长季节的 5、6、7 月和 8 月份,梭梭每天的树干液流速率在 23:30~7:30 最低,峰值在 11:00~15:00 出现,16:00~17:30 开始下降,整个过程呈现单峰或多峰型曲线 (图 2); 经对所观测日的昼 (8:00~20:00) 夜 (20:00~8:00) 的梭梭树干液流速率的方差齐性与平均值的差异显著性检验,得到  $F = 2.05 \sim 2.47 < F_{0.01}(23, 23) = 2.72$ ,  $T = 2.483 \sim 2.657 < t_{0.01}(46) = 2.691$ , 因此昼夜梭梭树干液流速率的方差是齐性的,且平均值差异不显著,这说明梭梭的树干液流速率昼夜差异小。

不同的生长日,梭梭树干液流速率也存在差异 (图 3)。随着季节推移,梭梭枝叶的生长,树干液流速率逐渐增大,5 月 22 日梭梭树干液流速率为  $(5.9 \pm 0.7) \text{gcm}^{-2}\text{h}^{-1}$ , 5 月 29 日达到  $(7.8 \pm 1.9) \text{gcm}^{-2}\text{h}^{-1}$ , 6 月 22 日达到最大,为  $(14.5 \pm 3.6) \text{gcm}^{-2}\text{h}^{-1}$ , 之后由于土壤湿度的降低,梭梭树干液流速率逐渐下降,到 9 月 1 日

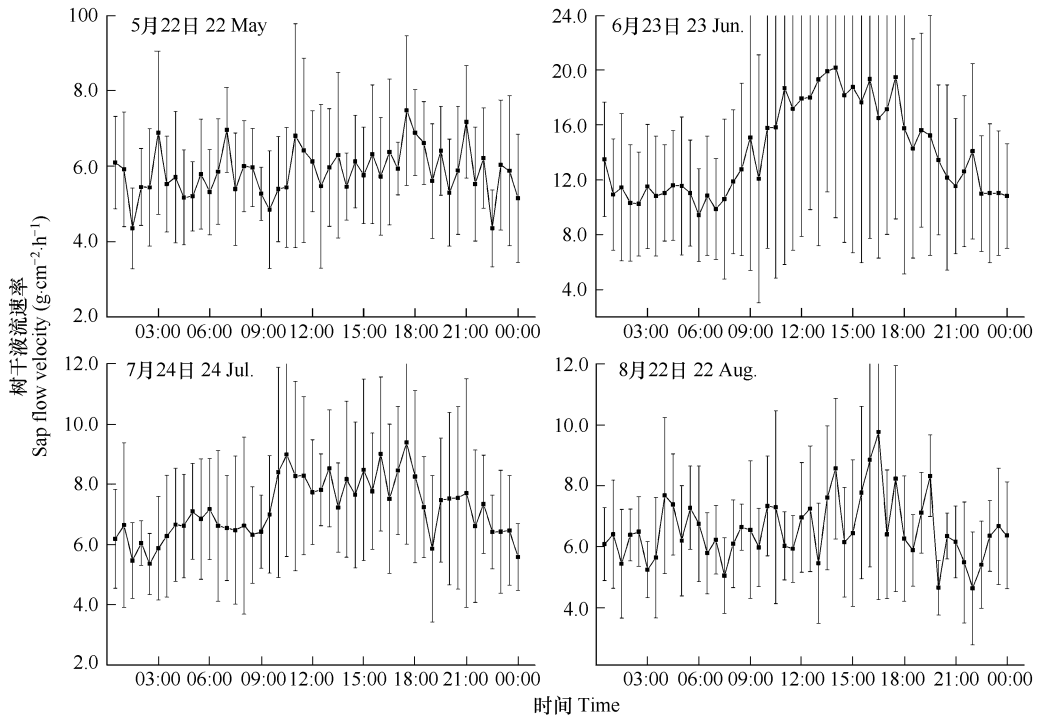


图2 梭梭树干液流速率日变化

Fig. 2 Diurnal course of sap flow velocity of *Haloxylon ammodendron*

时,其树干液流速率降至  $(6.3 \pm 1.1) \text{ gcm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。

### 3.1.2 树干液流速率的月变化

梭梭树干液流速率的月变化呈现为6月份最高 ( $(11.30 \pm 4.39) \text{ gcm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ),其次是7月份 ( $(6.93 \pm 1.29) \text{ gcm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ),再次为5月份,8月份最小 ( $(6.29 \pm 1.19) \text{ gcm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) (表2)。但对单株梭梭,样树1~4的树干液流速率月均值为6月份最高8月份次之5月份最小;样树5、6树干液流月均值为6月份最高5月份次之8月份最小;样树7树干液流速率最高为6月,7月份次之8月最小;样树8则为7月份最高5月次之8月最小,树干液流速率月均值表现出较大差异。这种差异可能与梭梭个体的大小和梭梭同化枝的数量有关,需在今后做进一步的探讨研究。

## 3.2 林木耗水量与环境因子的关系

### 3.2.1 林木耗水量与气象因子

#### (1) 树干液流速率与气象因子

经回归分析,建立各生长月梭梭树干液流速率 ( $V_s$ )与总辐射 ( $R_t$ )、净辐射 ( $R_n$ )、气温 ( $T$ )、风速 ( $W$ )和水汽压差 ( $VPD$ )的单因子相关关系 (表3)。各生长月6月与7月份的树干液流与气象因子存在较好的单相关关系,5月与8月份的树干液流与气象因子存在较弱的相关关系。

树干液流速率与气象因子的单相关分析表明,树干液流速率与气象因子之间具有一定的统计关系,有些关系显著性好,有些关系显著性差。这说明,树干液流速率受所有或部分气象因子的综合因素的影响。为了探讨树干液流速率与气象因子的响应,经梭梭树干液流速率与总辐射、净辐射、温度、水汽压差和风速模拟建

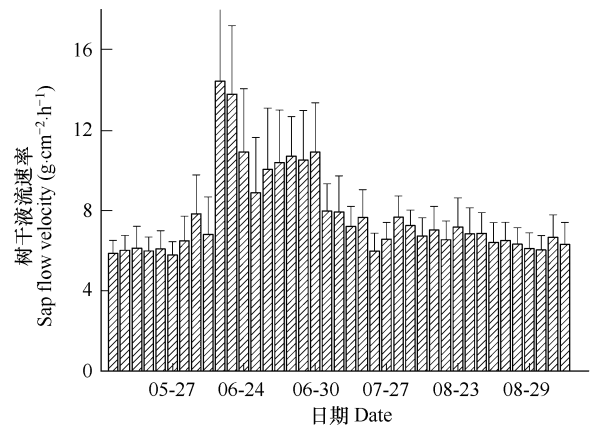


图3 梭梭树干液流速率日均值

Fig. 3 The diurnal average of sap flow velocity of *Haloxylon ammodendron*

立的关系式见表 4, 其模拟效果见图 4。模拟和实测值对比结果在 6 月和 7 月份较好, 5 月和 8 月份相对稍差, 但均好于单相关关系。

表 2 梭梭树干液流速率 ( $\text{gcm}^{-2}\text{h}^{-1}$ ) 的月变化

Table 2 The month variety of sap flow velocity

月份 Month	样树号 No. of sample								平均 Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	
5	5.18 ± 1.47	5.31 ± 1.69	5.39 ± 1.61	4.63 ± 1.72	7.07 ± 3.51	8.02 ± 2.92	7.88 ± 2.94	8.05 ± 3.26	6.44 ± 1.36
6	8.37 ± 2.61	16.28 ± 7.64	6.61 ± 1.77	19.18 ± 9.12	7.75 ± 2.67	14.46 ± 6.19	9.96 ± 3.55	7.79 ± 2.42	11.30 ± 4.39
7	5.48 ± 1.78	5.50 ± 1.07	5.68 ± 1.34	6.10 ± 1.32	6.72 ± 1.54	7.07 ± 1.98	9.33 ± 3.27	8.12 ± 1.83	6.93 ± 1.29
8	6.56 ± 2.02	7.77 ± 2.07	7.81 ± 0.70	7.15 ± 2.55	4.91 ± 1.20	4.64 ± 0.67	6.41 ± 0.64	5.09 ± 1.25	6.29 ± 1.19

表 3 梭梭树干液流与气象因子的相关性

Table 3 Relationship between sap flow velocity and meteorological factors

气象因子 Meteorological factors	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 Aug.
总辐 Global radiation	$V_s = 7.82 \times R_t^{-0.03}$ $R^2 = 0.11$	$V_s = 11.99 - 0.004R_t + 2.59R_t^2 - 2.11R_t^3$ $R^2 = 0.36$	$V_s = e^{1.94 + \frac{0.37}{R_t}}$ $R^2 = 0.37$	$V_s = 5.79 \times R_t^{0.03}$ $R^2 = 0.17$
净辐射 Net radiation	$V_s = 7.14 - 0.003R_n$ $R^2 = 0.13$	$V_s = 7.32R_n^{0.13}$ $R^2 = 0.42$	$V_s = 6.92 \times e^{0.0011R_n}$ $R^2 = 0.42$	$V_s = 6.72 + 0.002R_n$ $R^2 = 0.12$
气温 Temperature	$V_s = 5.29 + 0.07T$ $R^2 = 0.21$	$V_s = e^{3.62 - \frac{24.16}{T}}$ $R^2 = 0.84$	$V_s = 3.66 + 0.17T$ $R^2 = 0.55$	$V_s = 3.64 + 0.13T$ $R^2 = 0.51$
风速 Wind speed	$V_s = 0.24 + 6.28W$ $R^2 = 0.19$	$V_s = 12.26 \times 1.03^W$ $R^2 = 0.12$	$V_s = 7.01 \times 1.06^W$ $R^2 = 0.22$	$V_s = 6.39 + 0.43W$ $R^2 = 0.26$
水汽压差 Vapour pressure deficit	$V_s = 32.10 - 7.33VPD + 0.52VPL$ $R^2 = 0.17$	$V_s = 1.02VPD^{0.34}$ $R^2 = 0.85$	$V_s = 6.20 + 0.0008VPD$ $R^2 = 0.60$	$V_s = 5.84 + 0.0006VPD$ $R^2 = 0.22$
样本数 No. of sample	228	194	251	236

表 4 梭梭树干液流与气象因子模拟关系

Table 4 Simulated relations between sap flow velocity of *Haloxylon ammodendron* and meteorological factors

月份 Month	样本数 No. of sample	经验方程 Equation	$R^2$	F 值 F value	显著性 Significance
5	228	$V_{s5} = 1.05 + 0.157W + 0.012R_t - 0.054R_n + 0.309T - 2.1VPD$	0.228	13.08	**
6	194	$V_{s6} = -2.94 + 0.183W - 0.008R_t + 0.038R_n + 0.77T - 0.001VPD$	0.676	78.57	**
7	251	$V_{s7} = 7.359 + 0.127W - 0.006R_t + 0.003R_n - 0.068T + 0.001VPD$	0.409	33.93	**
8	236	$V_{s8} = 2.24 + 0.18W + 0.004R_t - 0.021R_n + 0.216T + 0.0001VPD$	0.300	19.70	**

## (2) 日耗水量与气象因子

8 株梭梭单株木日耗水量分别与总辐射 ( $R_t$ )、净辐射 ( $R_n$ )、气温 ( $T$ ) 和水汽压 ( $VPD$ ) 模拟关系, 经  $F$  检验, 各方程均在 0.05 水平上显著 (表 5), 但决定系数较低, 模拟效果一般 (图 5), 经逐步回归分析, 水汽压差

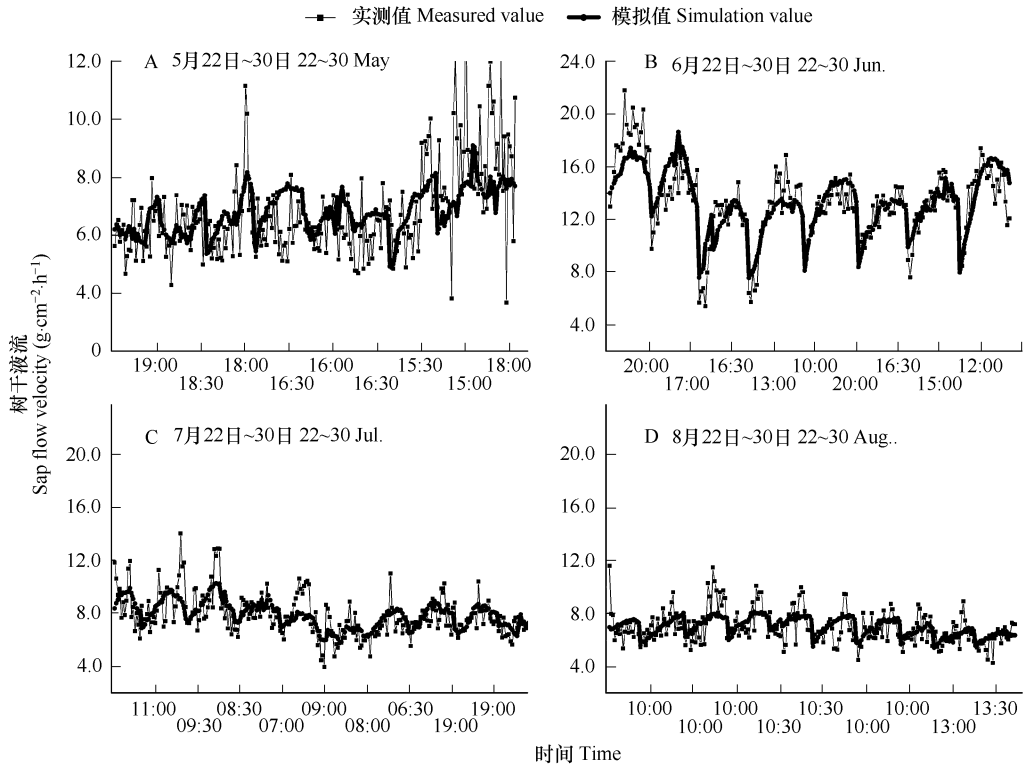


图4 梭梭树干液流实测值与模拟值比较

Fig.4 Comparison between measured value and simulation value

表5 梭梭单株木日耗水量与气象因子的关系

Table 5 Relation between daily water consumption of *Haloxylon ammodendron* individual and meteorological factors

样树号 Sample tree	样本数 Sample No.	经验方程 Equation	$R^2$	F 值 F value	显著性 Significance
1	38	$Q_1 = 0.547 + 0.102W + 0.003R_t - 0.013R_n + 0.016T + 0.00000VPD$	0.419	4.62	*
2		$Q_2 = -3.349 + 0.0893W + 0.006R_t - 0.018R_n + 0.186T + 0.00002VPD$	0.527	7.13	*
3		$Q_3 = 2.904 - 0.466W - 0.002R_t + 0.001R_n - 0.069T + 0.000001VPD$	0.536	7.39	*
4		$Q_4 = -6.461 + 0.749W + 0.032R_t - 0.12R_n + 0.27T + 0.000001VPD$	0.513	6.74	*
5		$Q_5 = 0.627 + 0.383W + 0.01R_t - 0.042R_n + 0.037T + 0.000001VPD$	0.640	11.38	**
6		$Q_6 = -0.03 + 2.239W + 0.057R_t - 0.222R_n - 0.045T + 0.003VPD$	0.573	8.59	*
7		$Q_7 = -0.778 + 0.612W + 0.016R_t - 0.069R_n + 0.012T + 0.001VPD$	0.670	12.99	**
8		$Q_8 = 1.612 + 0.729W + 0.014R_t - 0.059R_n + 0.012T + 0.001VPD$	0.577	8.73	*

\*\* 表示在  $F_{0.05}(\xi, \beta_2) = 4.49$  的显著性 (The correlation is significance at  $F_{0.05}(\xi, \beta_2) = 4.49$ ), \*\* 表示在  $F_{0.01}(\xi, \beta_2) = 9.36$  的显著性 (The correlation is significance at  $F_{0.01}(\xi, \beta_2) = 9.36$ )

对梭梭日耗水量起主要作用,但决定系数在 0.22 ~ 0.46 之间,因此,梭梭单株木日耗水量与气象因子的关系不能用简单的数学关系式进行描述。

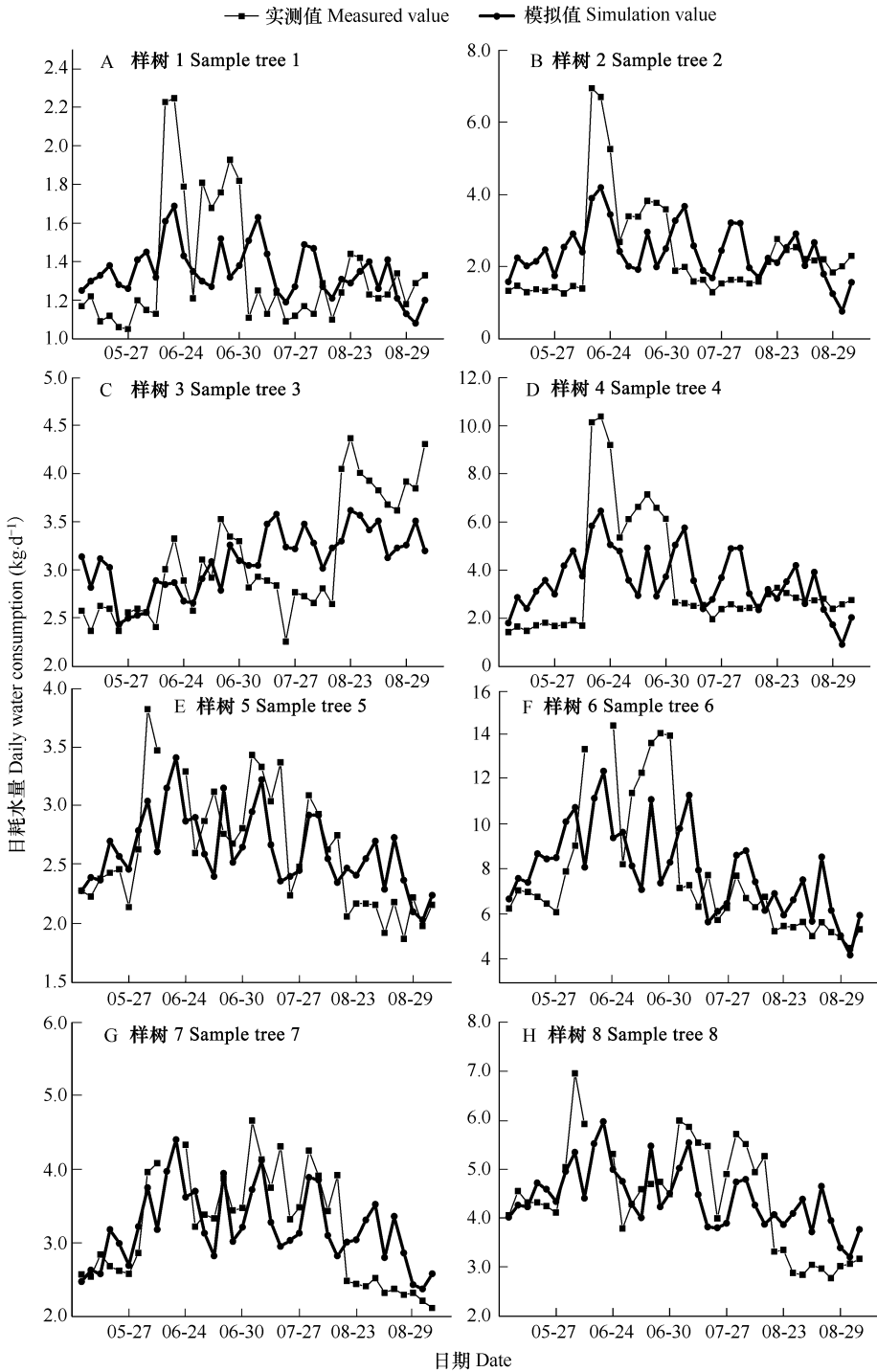


图5 梭梭林木日耗水量实测值与模拟值比较

Fig. 5 Comparison daily water consumption of *Haloxylon ammodendron* individual

### 3.2.2 日耗水量与土壤湿度的关系

梭梭林地土壤湿度介于 0.9% ~ 2.0% 之间时 梭梭单株样树日耗水量随着林地土壤湿度的降低而升高。经模拟, 梭梭单株样树日耗水量与土壤湿度呈现线性函数关系 (图 6)。



### 3.3 耗水量与林木生长的关系

观测的 8 株梭梭的日均耗水量与梭梭的林冠投影面积 ( $S_{\text{canopy}}$ )、基径 ( $D$ )、 $D^2H$  (树高,  $H$ )、边材厚度 ( $R_{\text{sapwood}}$ )和边材面积 ( $S_{\text{sapwood}}$ )的决定系数分别为 0.46、0.68、0.69、0.43 和 0.94,经检验梭梭树干液流与林冠投影面积、边材厚度在  $p < 0.10$  相关性显著,与基径在  $p < 0.02$  时相关性显著,与边材面积在  $p < 0.001$  时相关性显著,经拟合梭梭日均耗水量与林冠投影面积、基径、 $D^2H$ 、边材厚度和边材面积呈线性关系 (图 7),但梭梭边材面积与梭梭日均耗水量模拟关系的决定系数达到 0.94,可以用来梭梭单木耗水向林分耗水尺度的转换。

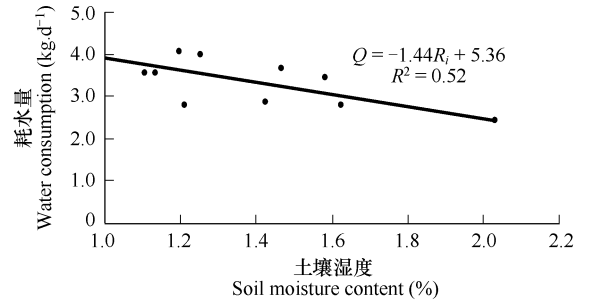


图 6 梭梭日耗水量与土壤湿度的关系

Fig. 6 Relationship between daily water consumption of *Haloxylon ammodendron* and soil moisture content

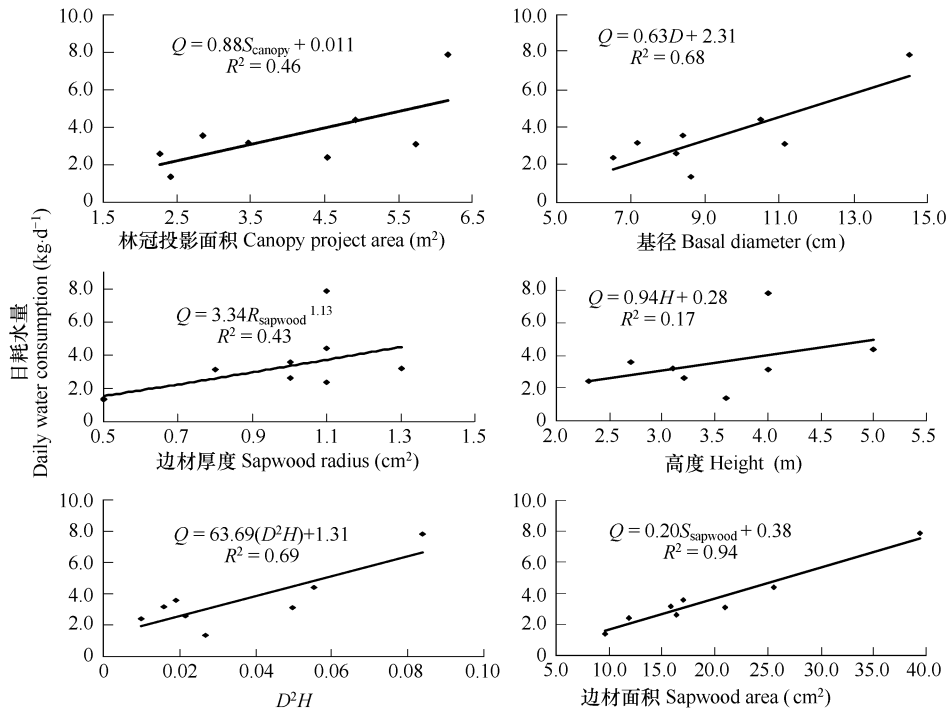


图 7 梭梭个体耗水量与林木形态特征的关系

Fig. 7 Relationship between water consumption and morphological trait of *Haloxylon ammodendron* individual

### 3.4 生长季节耗水量

所观测期间梭梭单株日耗水量均值在  $(0.3 \pm 0.2)$  mm。利用各月观测的梭梭单株耗水量的日均值作为当月梭梭单株木的日耗水量,计算了整个生长季节梭梭单株木的耗水量 (因 9 月的气象因子的观测值与 5 月的接近,因此用 5 月的耗水量平均值计算 9 月的耗水量)。在生长季节 (5 月 1 日至 9 月 31 日),梭梭单株木的耗水量达 49.4mm。

### 4 讨论

梭梭树干液流日变化过程呈现单峰或多峰型曲线,这与孙鹏森等对油松、王华田等对油松和侧柏、熊伟等对华北落叶松<sup>[10-12]</sup>的研究结论相类似,但梭梭树干液流速率表现为昼夜变化小,这可能与梭梭的生理习性有很大的关系。据侯天侦等对分布在新疆甘家湖区的梭梭生理生态的研究发现<sup>[8]</sup>,梭梭同化枝的气孔密度仅有  $131.5 \text{ mm}^{-2}$ ,相当于白梭梭的 61.8%,而且气孔清晨时微开,中午最热时关闭,傍晚时又全部开放。另

外梭梭在干旱季节,由于叶肉细胞光合活性降低,导致光合午休现象<sup>[9]</sup>,因此梭梭树干液流速率昼夜变化小可能是梭梭的气孔因素和非气孔因素综合作用的结果。

梭梭是较耐旱的树种之一<sup>[8,20]</sup>。据赵兴梁<sup>[21]</sup>对沙坡头固沙植物沙层水分研究指出,当沙层湿度 $\geq 2\%$ 时,固沙植物能正常生长;当沙层湿度在 $1\% \sim 2\%$ 时,固沙植物生长衰退萎缩; $\leq 1\%$ 时则趋于枯死。而在黑河荒漠绿洲区,梭梭林地土壤湿度一直低于 $2.0\%$ ,且在土壤湿度为 $0.9\%$ 时,梭梭树干液流速率仍能保持在 $(8.0 \pm 1.4) \text{ g cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。这与梭梭的器官结构有很大关系。梭梭发达的泌盐显微结构和薄壁贮存组织内的高含盐量的细胞液,可导致梭梭体内的水势始终低于土壤水势<sup>[22]</sup>;结晶盐的存在,维持了细胞间较低的水势,对向空气中蒸腾失去的水分也会产生较强的拉力,从而减弱了水分子由细胞间隙逸出的数量,起到了抗旱作用<sup>[23]</sup>。但梭梭仅靠降水仍无法生存。在观察梭梭单株木耗水量初始(5月21日)至观察结束(9月1日),梭梭单株木耗水量达 $36.0 \text{ mm}$ ,而梭梭林地 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 深度土壤贮水量仅减少了 $6.2 \text{ mm}$ ,而观察期间 $> 8 \text{ mm}$ 的有效降水<sup>[24]</sup>就有 $33.9 \text{ mm}$ ,因降水后1周时间,沙地 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 的土壤湿度就达到正常水平,因此按 $1 \text{ d } 1 \text{ mm}$ 的土壤蒸发量计算<sup>[25]</sup>,土壤蒸发量达 $21.0 \text{ mm}$ ,而从水量平衡的角度梭梭耗水中仍有 $16.9 \text{ mm}$ 的水来自于地下水的供给。

树木蒸腾是林木耗水的主要途径,但其大小受控于土壤湿度和气象条件<sup>[6]</sup>。Cermak等<sup>[5]</sup>对*Pinus silvestris*的研究发现降水导致*Pinus silvestris*的蒸腾量增加了;Stewart<sup>[26]</sup>、Ewers等<sup>[27]</sup>、Irvine等<sup>[28]</sup>和Granier等<sup>[29]</sup>研究发现土壤湿度对树干液流速率影响很大,常学向等<sup>[4]</sup>观测表明灌溉增加了树干液流速率。但在本研究中却发现梭梭日耗水量与土壤湿度呈负相关关系,这很可能与有效降水仅涌入到土层 $0 \sim 60 \text{ cm}$ 有关。因 $0 \sim 60 \text{ cm}$ 的土壤湿度增加,提高了 $0 \sim 200 \text{ cm}$ 的土壤湿度。也可能与梭梭长期生长在荒漠区形成的旱生形态和旱生结构有很大关系。据蒋瑾等<sup>[30]</sup>在荒漠区土壤湿度对多年生木本植物形态解剖构造的影响试验发现,随着土壤湿度变低,所有供试植物的形态构造均趋于旱生形态和旱生结构的方向发展。梭梭一直生长在土壤湿度低于 $2.0\%$ 的土壤环境,有时土壤湿度甚至低于 $1.0\%$ ,因此梭梭的旱生结构可能是导致这种情况的原因,但这需要进一步研究。

Cienciala等对*Acacia mangium*树干液流与辐射、气温和相对湿度的关系研究发现,*Acacia mangium*树干液流速率与辐射和相对湿度关系建立的函数关系比树干液流速率与辐射与气温建立的函数关系更好<sup>[9]</sup>,Penman认为高温对蒸散量的影响很小<sup>[31]</sup>。本研究中发现梭梭树干液流速率与气象因子之间具有一定的统计关系,树干液流速率的变化是气象因子的综合作用影响的结果,且在不同时间气象因子对树干液流速率的影响程度不同。

据Hatton的研究,边材面积、胸径与树干液流之间均为线性关系<sup>[32]</sup>,据Cienciala等对*Acacia mangium*的研究,树干液流量与边材面积呈线性关系<sup>[9]</sup>。在黑河中游荒漠区,梭梭树干日均耗水量与林冠投影面积、基径、 $D^2H$ 、边材厚度和边材面积呈现线性关系,这与Hatton、Cienciala等的研究相一致。

## 5 结论

在生长季节,梭梭每天的树干液流速率昼夜差异小,在 $23:30 \sim 7:30$ 最低,在 $11:00 \sim 15:00$ 最高,整个过程仍呈现单峰或多峰型曲线。不同的生长日,梭梭树干液流速率介于 $(5.9 \pm 0.7) \sim (14.5 \pm 3.6) \text{ g cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。生长季节梭梭树干液流速率在6月份最高,7月份次之,8月份最小。观测期间,梭梭平均日耗水量在 $(0.3 \pm 0.2) \text{ mm}$ ,生长季节单株木耗水量达 $49.4 \text{ mm}$ 。

气象因子的综合作用影响树干液流速率的变化。在不同时间,气象因子对树干液流速率的影响程度不同。

梭梭日均耗水量与林冠投影面积、基径、 $D^2H$ 、边材厚度和边材面积呈现线性关系。

## References :

- [1] Institute of desert research, Lanzhou, CAS edited. Flora in desertis reipublicae populorum sinarum (tomus1). Beijing: Science Press, 1995. 343.
- [2] Ma Q L, WANG J H, Ji Y F et al. Photosynthesis — physiological characteristics of *Haloxylon ammodendron* under different soil moisture grades.

Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin. ,2003 2 (12) 2120—2126.

- [3] Li Y F , Yang G . Studies on the water balance in *Haloxylon Ammodendron* and *Populus Nigra* var. *Thevestina*. *Arid Zone Research* ,1995 ,12 (1) 32—36.
- [4] Jarvis P G. Scaling processes and problems. *Plant Cell Environ.* ,1995 18 1079—1089.
- [5] Cermak J , Cienciala E , Kucera J. Individual variation of sap-flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration : a pilot study at the central. *Journal of Hydrol.* ,1995 168 109—120.
- [6] Fredrik L , Anders L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2002 112 : 67—85.
- [7] Cermak J , Cienciala E , Kucera J , *et al.* Individual variation of sap-flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration : a pilot study at the central NOPEX site. *Journal of Hydrology* ,1995 168 17—27.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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] Wang H T , Ma L Y , Sun P S. Sap flow fluctuations of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orietalis* in late autumn , *Scientia Silvae Sinicae* 2002 , 38 (5) :31—37.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Chang X X , Zhao W Z. Sap flow of *Elaeagnus angustifolia* and the relation to its sap flow with individual growth regime during growing season in the middle of Heihe basin . *Journal of Desert Research* ,2004 24 (4) 473—478.
- [15] Si J H , Feng Q , Zhang X Y. Application of Heat-pulse Technique to Determine the Stem Sap Flow of *Populus Euphratica*. *Journal of Geocryology and Geocryology* ,2004 26 (4) 503—508.
- [16] 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. *N. Z. J. Agri. Res* ,1984 27 537—543.
- [17] Closs R L. The heat pulse method for measuring rate sap flow in a plant stem. *N. Z. J. Science* ,1958 1 281—288.
- [18] Hou T Z , Liang Y Q. Research on physiological ecology of photosynthesis and water relation of saxoul forests in Guojiahua area , Xinjiang. *Acta Phytocologica Geobotanica Sinica* ,1991 15 (2) 141—150.
- [19] Jiang T R , Zhang L X , Bi Y R , *et al.* Effects of water stress on gas exchange characteristics of *Haloxylon Ammodendron* Leaves. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* ,2001 37 (6) 57—62.
- [20] Chen C D. Sandland plant community , flora and its basis of distribution characteristics in Gurbantünggüt Desert , Xinjiang. *Acta Phytocologica ET Geobotanica Sinica* ,1983 7 (2) 89—98.
- [21] Shapotou station of institute of desert research , Lanchow , CAS edited. Studies on sand dunes controlled in Tengger desert. Yingchuan : Ningxia People Press ,1991 27—57.
- [22] Dong Z Y. Study about causal eco-physiology of *Haloxylon Ammodendron* degradation , death at Jilantai . *J. Arid Land Resource and Environment* , 1997. 11 (supp. ) 66—74.
- [23] Dong Z Y , Yao Y F , Zhao J R , *et al.* Anatomical observations on the photosynthetic branch of *Haloxylon ammodendron* (*C. A. Mey* ) Bunge and its character of drought and salt. *J. Arid Land Resources and Environment. Journal of Arid Land Resource and Environment* ,2000 , 14 (supp. ) 78—83.
- [24] Huang Z C , Shen W S. Plant water relation and drought hardness. Beijing : Chinese Environment Press ,2000. 2.
- [25] Li P F , Li B G. Study on some characteristics of evaporation of sand dune and evapo-transpiration of grassland in Mu Us desert . *Shuili Xuebao* , 2000 , 3 :24—28.
- [26] Stewart J B. Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* ,1988 ,43 :19—35.
- [27] Ewers B E , Oren R , Phillips N , Strömgren M , Linder S. Mean canopy stomatal conductance responses to water and nutrient availabilities in *Picea abies* and *Pinus taeda*. *Tree Physiol* ,2001 ,21 ,841—850.
- [28] Irvine J , Perks M P , Magnani F , Grace J. The response of *Pinus sylvestris* to drought : stomatal control of transpiration and hydraulic conductance.

Tree Physiol. ,1998 ,18 ,393 —402.

- [29] Granier A ,Loustau D ,Breda N. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate , soil water availability and leaf area index. Ann. For. Sci. ,2000 ,57 ,755 —765.
- [30] Shapotou station of institute of desert research ,Lanchow ,CAS edited. Studies on sand dunes controlled in Tengger desert. In : Jiang J , Dai F N. Effect of soil moisture on the morphological and physiological properties of plants. Yingchuan : Ningxia People Press ,1991. 251 —263.
- [31] Penman H L. The physical basis of irrigation control. In : Syngé P M. Report of the Thirteenth International Horticultural Congress. The Royal Horticultural Society , London ,1953. 913 —924.
- [32] Hatton T J , Wu H I. Scaling theory to extrapolate individual tree water use to stand water use. Hydrol. Proc. ,1995 ,9 :527 —540.

#### 参考文献：

- [1] 中国科学院兰州沙漠研究所编. 中国沙漠植物志 (第一卷). 北京 科学出版社 ,1985. 343.
- [2] 马全林,王继和,纪永福,等. 固沙树种梭梭在不同水分梯度下的光合生理特征. 西北植物学报,2003 2 (12) 2120 ~2126.
- [3] 李银芳,杨戈. 箭杆杨和梭梭柴水量平衡的研究. 干旱区研究,1995 ,12 (1) 32 ~36.
- [10] 孙鹏森,马履一,王光平,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.
- [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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [18] 候天侦,梁远强. 新疆甘家湖梭梭林的光合、水分生理生态研究. 植物生态学与地植物学学报,1991 ,15 (2) :141 ~150.
- [19] 江天然,张立新,毕玉蓉,等. 水分胁迫对梭梭叶片气体交换特征的影响. 兰州大学学报 (自然科学版),2001 ,37 (6) 57 ~62.
- [20] 陈昌笃. 古尔班通古特沙漠的沙地植物群落、区系及其分布的基本特征. 植物生态学与地植物学丛刊,1983 7 (2) 89 ~98.
- [21] 中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所编著. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究. 银川 :宁夏人民出版社 ,1991. 27 ~57.
- [22] 董占元. 吉兰泰地区梭梭林退化、死亡原因的生态生理学研究. 干旱区资源与环境,1997. 11 (增刊) 66 ~74.
- [23] 董占元,姚云峰,赵金仁,等. 梭梭 (*Haloxylon ammodendron* (*C. A. Mey*) *Bunge*) 光合枝细胞组织学观察及其抗逆性特征. 干旱区资源与环境,2000 ,14 (增刊) 78 ~83.
- [24] 黄子琛,沈渭寿. 干旱区植物的水分关系与耐旱性. 北京 :中国环境出版社,2000. 2.
- [25] 李品芳,李保国. 毛乌素沙地水分蒸发和草地蒸散特征的比较研究. 水利学报,2000 ,3 :24 ~28.
- [30] 中国科学院沙坡头沙漠科学研究所. 流沙治理研究. 土壤湿度对植物形态结构和生理特性的影响. 银川 :宁夏人民出版社 ,1988. 251 ~263.