

# 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭东、西方位 树干液流特征及相关性分析

张晓艳<sup>1</sup>, 褚建民<sup>1,①</sup>, 孟平<sup>1</sup>, 姚增旺<sup>1</sup>, 王鹤松<sup>2</sup>, 姜生秀<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 北京林业大学林学院, 北京 100083;  
3. 甘肃省治沙研究所 民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 武威 733000)

**摘要:** 采用 Grainer 热扩散式探针法 (TDP) 连续测定了 6 月份至 11 月份民勤绿洲荒漠过渡带梭梭 [*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge] 东、西方位的树干液流速率, 并同步测定了相关环境因子; 在此基础上, 对晴天、阴天和雨天东、西方位树干液流速率的日变化以及实验期间东、西方位树干液流速率和各环境因子的变化进行了分析, 并对不同天气和时间尺度东、西方位树干液流速率间的相关性及其与部分环境因子的相关性进行了分析。结果表明: 在生长旺盛期 (6 月份至 8 月份), 晴天时梭梭东、西方位树干液流速率的日变化均表现为明显的“宽峰型”曲线; 在整个观测期内, 不同天气的树干液流速率存在一定差异, 东、西方位的树干液流速率也存在一定差异, 并且其差异在夜间较白天更明显; 总体来看, 东方位的树干液流速率高于西方位。相关性分析结果表明: 不同天气和时间尺度东、西方位的树干液流速率间存在极显著正相关性, 其相关系数均在 0.90 以上并略有差异。总体来看, 晴天梭梭东、西方位树干液流速率间的相关性高于阴天和雨天, 并且, 日尺度东、西方位树干液流速率间的相关性最强。晴天东、西方位树干液流速率与各环境因子的相关性高于阴天和雨天, 并且, 小时尺度东、西方位树干液流速率与环境因子间的相关性高于日尺度。西方位树干液流速率与环境因子的相关性略高于东方位, 说明西方位的树干液流速率对环境因子变化的反应更敏感。晴天和阴天东、西方位树干液流速率与参考作物蒸散量 ( $ET_0$ ) 的相关性极显著, 其相关系数均在 0.70 以上, 说明根据梭梭东、西方位树干液流速率计算其耗水量具有一定的可行性。研究结果显示: 梭梭树干液流速率与天气、环境因子、时间尺度和树干方位等均有一定关系。

**关键词:** 梭梭; 树干液流速率; 环境因子; Grainer 热扩散式探针法 (TDP); 相关性分析

中图分类号: Q945.17<sup>+</sup>1; Q948.112; S793.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2016)02-0010-13  
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2016.02.02

**Characteristics of sap flow of east and west trunks of *Haloxylon ammodendron* in Minqin oasis-desert ecotone and correlation analyses** ZHANG Xiaoyan<sup>1</sup>, CHU Jianmin<sup>1,①</sup>, MENG Ping<sup>1</sup>, YAO Zengwang<sup>1</sup>, WANG Hesong<sup>2</sup>, JIANG Shengxiu<sup>3</sup> (1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Gansu Desert Control Research Institute, Wuwei 733000, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2016, 25(2): 10-22

**Abstract:** Sap flow rate of east and west trunks of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert ecotone was continuously determined by Grainer thermal diffusion probe method (TDP) from June to November, and related environmental factors were determined simultaneously. On the basis, diurnal change of sap flow rate of east and west trunks on sunny, cloudy and rainy days and changes of sap flow rate of east and west trunks and environmental factors during experimental period were analyzed, and correlations between sap flow rate of east and west trunks and correlations of them

收稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31370707; 31000322); 国家重点基础研究发展计划项目 (2014CB954204); 中央基本科研业务费专项资金项目 (200714)

作者简介: 张晓艳 (1986—), 女, 山东诸城人, 博士研究生, 主要从事生态系统结构与功能研究。

①通信作者 E-mail: cjmcaf@163.com

with some environmental factors in different weather and time scales were analyzed. The results show that during vigorous growth period (from June to August), diurnal change of sap flow rate of east and west trunks of *H. ammodendron* on sunny day both appears obviously "broad peak type" curve. During whole observation period, there is a certain difference in trunk sap flow rate in different weather, and also a certain difference in sap flow rate between east and west trunks and their difference in the nighttime is more obvious than that in the daytime. On the whole, sap flow rate of east trunk is higher than that of west trunk. The correlation analysis results show that there are extremely significantly positive correlations between sap flow rate of east and west trunks of *H. ammodendron* in different weather and time scales, their correlation coefficients are all above 0.90 with a little difference. On the whole, correlation between sap flow rate of east and west trunks on sunny day is higher than that on cloudy and rainy days, and that in day scale is the strongest. Correlation of sap flow rate of east and west trunks with environmental factors on sunny day is higher than that on cloudy and rainy days, and that in hour scale is higher than that in day scale. Correlation of sap flow rate of west trunk with environmental factors is slightly higher than that of east trunk, meaning that response of sap flow rate of west trunk of *H. ammodendron* to environmental factor change is more sensitive. Correlations of sap flow rate of east and west trunks with reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) on sunny and cloudy days are extremely significant, their correlation coefficients are all above 0.70, meaning that there is certain feasibility in according to sap flow rate of east and west trunks of *H. ammodendron* for calculating its water consumption. It is suggested that there is a certain relationship of trunk sap flow rate of *H. ammodendron* with weather, environmental factor, time scale and trunk position, etc.

**Key words:** *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge; trunk sap flow rate; environmental factor; Grainer thermal diffusion probe method (TDP); correlation analysis

目前,中国西北地区的水资源短缺问题较为严峻,并且该地区生态系统较为敏感和脆弱<sup>[1-2]</sup>、植物群落结构简单,部分植物种类已经面临严重退化的危机。准确计算植被耗水量利于植被合理密植,并能够提高西北干旱区水资源的利用效率,维护该地区生态系统结构与功能的稳定性。

关于单株植被蒸腾耗水量的研究方法较多<sup>[3-7]</sup>,液流测定法以安装简便、操作简单、数据可靠性高、无污染和连续观测等优点深受研究者的青睐。明确不同方位的树干液流特征是液流测定法定量研究植被蒸腾作用的重要环节。虽然目前已经有较多利用液流测定法研究各种荒漠植物蒸腾作用方面的报道<sup>[8-9]</sup>,但关于荒漠植物不同方位树干液流特征的研究报道却较少<sup>[10-16]</sup>。研究发现东、西、南、北各方位的树干液流存在一定的差异,并存在不同程度的相关性<sup>[11-12,14,17]</sup>;同时发现,东、西方位的树干液流受外界环境因子的干扰程度最小,并且利用东、西方位树干液流计算出的耗水量与植物的实际耗水量差异较小<sup>[16,18]</sup>。

民勤地区位于甘肃石羊河流域下游巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间。由于气候变化和人类活动与干扰的加剧,导致该地区的植被严重退化,荒漠化程度不断加剧。民勤绿洲荒漠过渡带是维系绿洲生态

系统稳定的重要区域,也是绿洲生态系统与荒漠生态系统之间能量、物质、信息交换最频繁的区域,具有维护民勤地区生态安全的重要作用。

梭梭 [*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge] 为藜科 (Chenopodiaceae) 梭梭属 (*Haloxylon* Bunge) 落叶灌木或小乔木,在中亚荒漠生境中具有防风、固沙、耐寒、抗旱和耐盐碱等优点,并为  $C_4$  植物<sup>[19]</sup>,是民勤绿洲荒漠过渡带的主要造林植被,占地面积较大<sup>[20]</sup>。然而,受人为因素(土地开垦、地下水超采等)以及自然灾害(沙尘暴、高温、干旱等)等的影响,梭梭林大面积衰减,导致民勤地区的荒漠化现象加剧<sup>[21]</sup>。

鉴于此,作者利用 Grainer 热扩散式探针法 (TDP) 连续测定了6月份至11月份民勤绿洲荒漠过渡带典型固沙植物梭梭东、西方位的树干液流速率,并同步测定了梭梭生长地的相关环境因子,以探究不同天气梭梭东、西方位树干液流的日变化规律以及实验期间梭梭东、西方位树干液流和环境因子的变化规律;同时还对不同天气和时间尺度东、西方位树干液流速率间的相关性及其与部分环境因子间的相关性进行了分析,以期进一步分析不同天气和时间尺度梭梭不同方位树干液流的变化特征,为准确计算梭梭蒸腾耗水量提供重要理论依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

以民勤治沙综合试验站内海拔1365 m处的巴丹吉林沙漠东南缘的绿洲荒漠过渡带为研究区,地理坐标为东经102°56′、北纬38°36′。该区属典型的温带大陆性气候,年均温7.76℃,最高温41.00℃,最低温-30.80℃;年均降水量115.90 mm,其中65%降水量集中在7月份至9月份;年潜在蒸发量2452.70 mm,干燥度约5.30。区内常年盛行西北风,平均风速2.40 m·s<sup>-1</sup>。土壤为典型荒漠土,受风沙强烈侵蚀形成粗结构。区内的灌丛和草本植物多生长在固定和半固定沙丘中,主要有梭梭、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobrov)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)和沙蓬[*Agriophyllum squarrosum* (Linn.) Moq.]。

以东经102°56′55.5″、北纬38°36′38.5″的绿洲荒漠区半固定沙丘为样地,样地面积为300 m×300 m。样地土壤为风堆积性沙土,土壤容重1.50~1.66 g·cm<sup>-3</sup>,最大持水量20.06%~24.41%,毛管孔隙度

30.11%~35.31%,非毛管孔隙度2.47%~3.60%。样地内梭梭植株的地径、株高、东西冠幅和南北冠幅的平均值分别为10.92、246.40、198.20和192.90 cm;梭梭林内还生长有沙拐枣、白刺和沙蓬。

### 1.2 方法

1.2.1 树干液流速率的测定 2014年6月18日至11月30日期间,在样地内选取5株具有代表性的梭梭植株,采用TDP-10热扩散式茎流仪(美国Dynamax公司)连续测定各样株东、西方位的树干液流速率,供试样株的基本特征见表1。分别在样株东、西方位距地面40 cm处树干上安装10 mm探针,并用专用塑料泡沫固定探针尾部,采用防辐射铝箔进行包裹,将探针与CR1000数据采集器(美国Campbell Scientific公司)连接,每2 min采集1次数据,每10 min输出1组温差平均值。按公式“ $F_d = \alpha \cdot K^\beta = (1.1999 \times 10^{-4}) \times [(\Delta T_{max} - \Delta T) / \Delta T]^{1.231}$ ”<sup>[22]</sup>计算树干液流速率,式中, $F_d$ 为树干液流速率; $K$ 为温差系数; $\alpha$ 和 $\beta$ 均为热量系数; $\Delta T_{max}$ 为零通量时2个探针间的最大温差; $\Delta T$ 为具体通量时2个探针间的温差。

表1 民勤绿洲荒漠过渡带供试5株梭梭样株的基本参数

Table 1 Basic parameters of five sample plants tested of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert ecotone

编号 No.	株高/cm Plant height	地径/cm Ground diameter	50 cm 高处直径/cm Diameter at height of 50 cm	冠幅/cm Canopy diameter		枝下高/cm Height under branch
				东西向 East-west	南北向 South-north	
1	291.0	10.9	9.9	183.6	198.3	61.3
2	239.5	10.9	10.9	177.1	230.9	54.3
3	289.3	13.0	11.4	163.4	201.6	59.4
4	264.7	14.1	13.7	212.2	230.6	62.8
5	331.8	15.6	13.1	320.0	360.4	80.9

1.2.2 部分环境因子的测定及计算 在5株梭梭样株之间设置1个面积为25 m×25 m的样方,采用CR1000数据采集器测定该样方内的空气温度、空气相对湿度、太阳净辐射、风速、气压和降水量,每10 min记录1次。由于风速仪和雨量筒的安装时间晚于其他观测仪器,导致风速、降水量及参考作物蒸散量的检测数据采集日期晚于其他环境因子,其中风速、降水量及参考作物蒸散量数据的采集时间为7月19日至11月30日,其余环境因子数据的采集时间均为6月18日至11月30日。2 m高处风速根据公式“ $U_2 = (4.87 \times U_h) / \ln(67.8 \times h - 5.42)$ ”<sup>[23]</sup>计算,式中: $U_2$ 为2 m高处风速; $U_h$ 为风速仪安装高度处的观测风

速。本实验中 $h$ 为5.5 m。参照相关文献<sup>[14,23]</sup>中的方法分别计算水汽压饱和差和参考作物蒸散量。

1.2.3 土壤体积含水量的测定 选取与其他样株间距6~12 m的5号样株的根区土壤进行含水量检测。具体操作如下:采用SEC002-minitraser时域反射仪(TDR,美国Soilmoisture Equipment Corp公司)测定样株东侧距离茎基部20、150和250 cm各水平位点的8、40、90、130和170 cm 5个土层共计15个土样的土壤体积含水量,每个水平位点视为1个重复。每隔30 min测定1次,利用Wintrase软件下载数据,并采用烘干法<sup>[24]</sup>对TDR的测定结果进行验证,确认TDR的测定结果与烘干法检测结果间无显著差异,说明该仪器

无需校正。

### 1.3 数据处理和统计分析

采用 EXCEL 2007 软件对梭梭东、西方位树干液流速率的实测值及各环境因子的实测值进行相关数据处理;采用 SPSS 19.0 软件进行相关性分析;采用 Origin 8.0 软件进行各种数据图的制作。

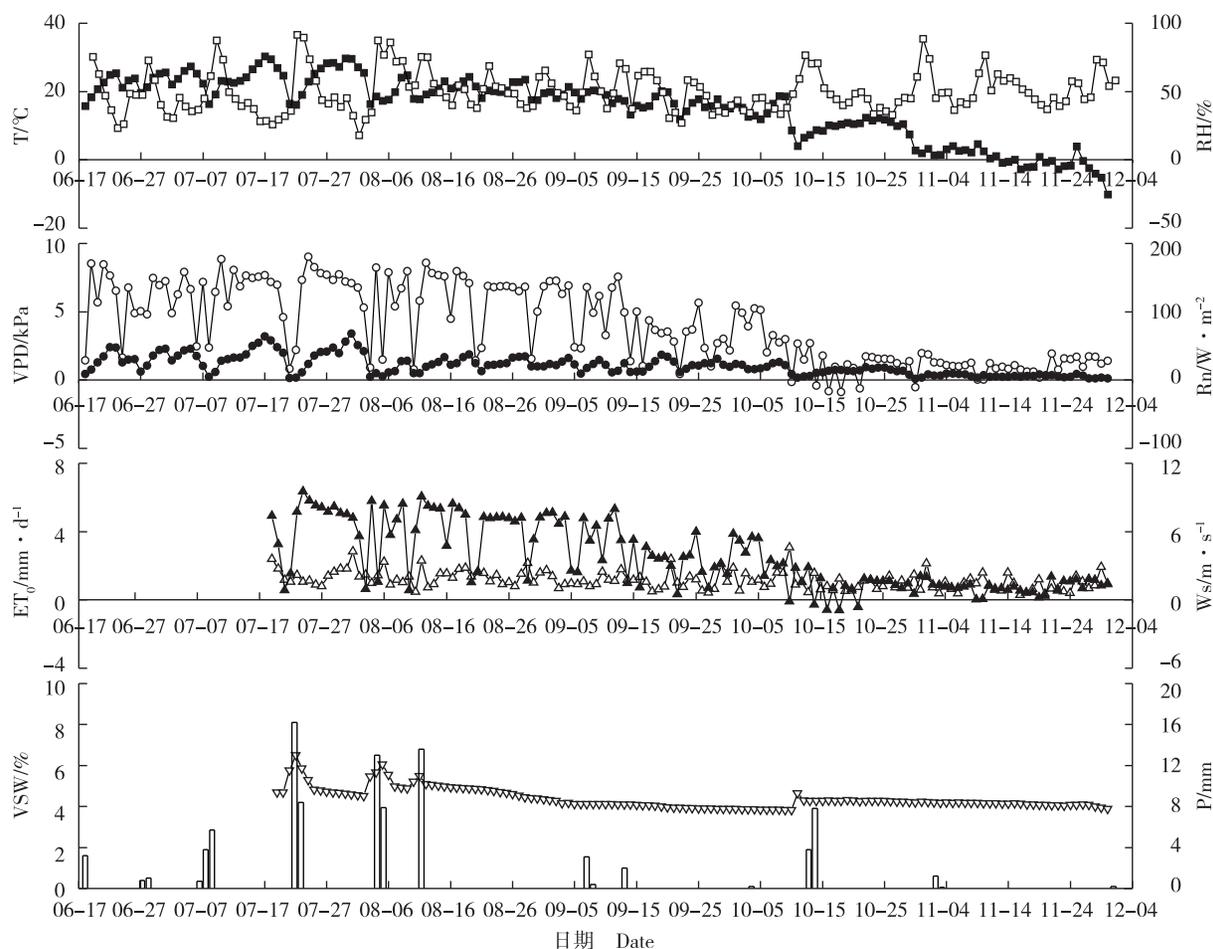
## 2 结果和分析

### 2.1 实验期间民勤绿洲荒漠过渡带各环境因子的变化分析

在整个观测期内(6月18日至11月30日),民勤绿洲荒漠过渡带的空气温度、空气相对湿度、水汽压饱和差、太阳净辐射、参考作物蒸散量、风速、降水量

及土壤体积分含水量的变化见图1。

由图1可以看出:随着时间推移,样地的空气温度呈现先逐渐升高后逐渐降低的变化趋势,且空气温度的高值集中在7月中、下旬;观测期内,样地的空气温度的最高值为30.31℃,最低值为-10.14℃,平均值为15.30℃。随时间推移,空气相对湿度的起伏较大,并且,空气相对湿度较高时空气温度相对较低;观测期内,空气相对湿度的最高值为91.37%,最低值为18.05%,平均值为49.81%。观测期内,样地的气压饱和差整体表现为逐渐降低的趋势,其最高值为3.39kPa,最低值为0.08kPa,平均值为1.06kPa。观测期内,样地的太阳净辐射在6月份至8月份均较高,在9月份明显下降,在10月份和11月份降至较低水平;在整个观测期内,太阳净辐射的最高值为



—■—: 空气温度 Air temperature (T); —□—: 空气相对湿度 Air relative humidity (RH); —●—: 水汽压饱和差 Vapor pressure saturation deficit (VPD); —○—: 太阳净辐射 Net radiation (Rn); —▲—: 参考作物蒸散量 Reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ); —△—: 风速 Wind speed (Ws); —▽—: 土壤体积分含水量 Soil volumetric water content (VSW); □: 降水量 Precipitation (P).

图1 实验期间民勤绿洲荒漠过渡带各环境因子的变化  
Fig. 1 Changes in environmental factors of Minqin oasis-desert ecotone during experimental period

180.88  $W \cdot m^{-2}$ , 最低值为 $-17.59 W \cdot m^{-2}$ , 平均值为 $81.03 W \cdot m^{-2}$ 。观测期内, 样地参考作物蒸散量的变化趋势与太阳净辐射的变化趋势相似, 也表现为在8月份以前较高, 在9月份明显下降, 并在10月份和11月份降至较低水平; 在整个观测期内, 参考作物蒸散量的最高值达到 $6.37 mm \cdot d^{-1}$ , 平均值为 $2.50 mm \cdot d^{-1}$ , 累计值为 $337.48 mm \cdot d^{-1}$ 。在整个观测期内, 样地的风速呈现不规则的波动变化, 最高值为 $4.61 m \cdot s^{-1}$ , 最低值为 $0.43 m \cdot s^{-1}$ , 平均值为 $1.73 m \cdot s^{-1}$ 。在整个观测期内, 样地的降水量共计 $93.1 mm$ ; 其中, 7月21日的降水量最高( $16.2 mm$ ), 并且整个观测期内的降水主要集中在7月份, 此月降水量

高达 $34.8 mm$ ; 9月份和11月份的降水量均较低。在整个观测期内, 样地 $0 \sim 200 cm$  土层土壤的体积含水量均较低, 且波动较小; 土壤体积分含水量的最低值为 $3.84\%$ , 最高值为 $6.50\%$ , 且其较高值主要集中在7月下旬至8月中、上旬。

## 2.2 不同天气梭梭东、西方位树干液流速率的日变化分析

### 2.2.1 晴天日树干液流速率的日变化

在每个月份分别选取10个典型的晴天日, 对5株梭梭东、西方位树干液流速率每30 min的瞬时数值平均值的日变化状况进行分析, 结果见图2。

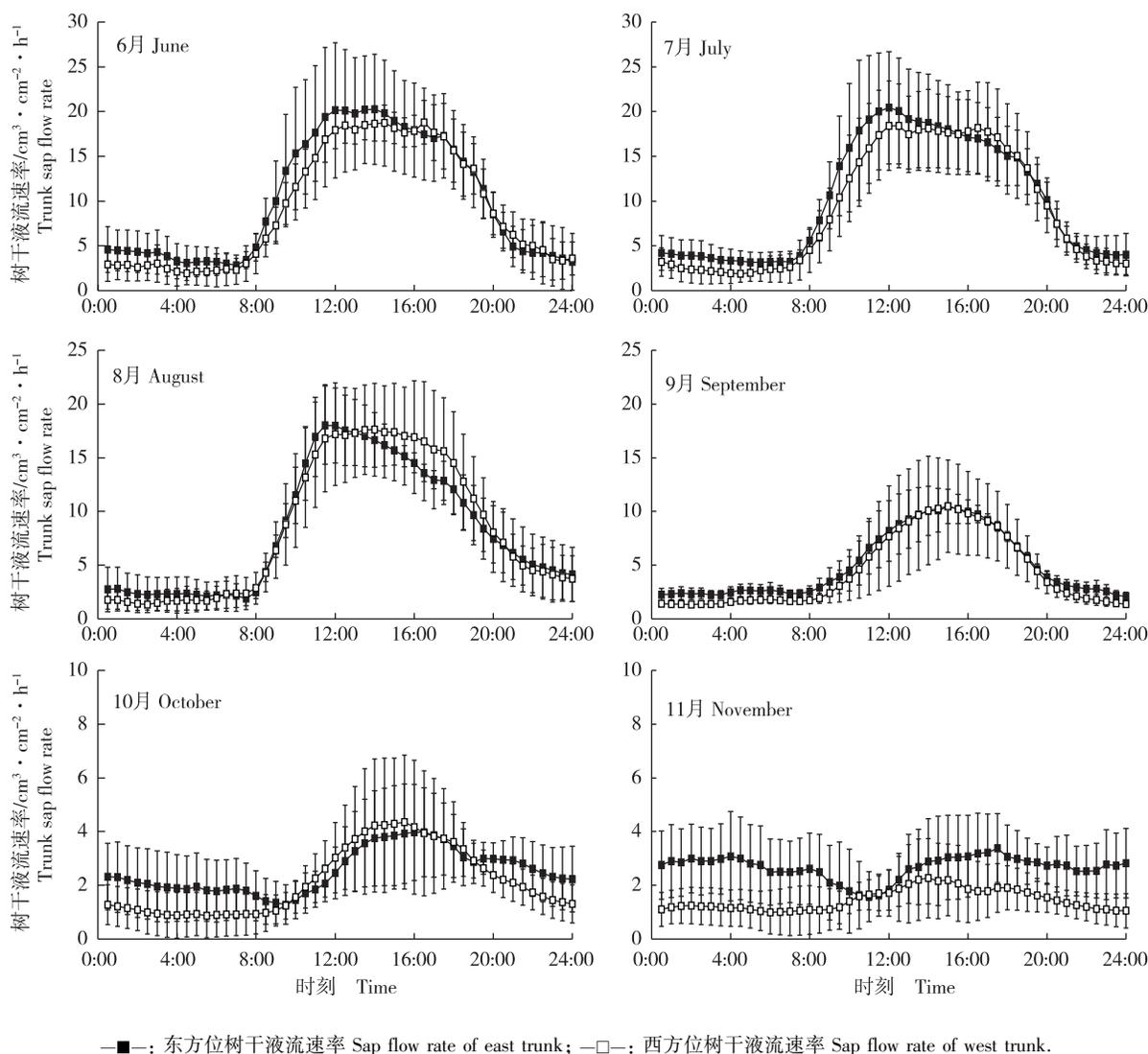


图2 不同月份晴天日民勤绿洲荒漠过渡带梭梭东、西方位树干液流速率的日变化  
Fig. 2 Diurnal change of sap flow rate of east and west trunks of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert ecotone on sunny day in different months

由图 2 可以看出: 在 6 月份至 8 月份(即梭梭的生长旺盛期)的晴天日, 梭梭东、西方位树干液流速率的日变化均呈现明显的“宽峰型”曲线。随着月份的递增, 东、西方位树干液流速率在白天的启动时间逐渐延迟, 由 6 月份的 7:00 延迟到 11 月份的 11:00 至 12:00。在 6 月份和 7 月份, 东、西方位树干液流速率的日变化差异主要集中在 0:00 至 14:00, 并且总体表现为东方位的树干液流速率高于西方位。在 8 月份, 东、西方位树干液流速率的日变化差异主要集中在 14:00 至 20:00, 并且这个时间段内西方位的树干液流速率高于东方位。在 9 月份和 10 月份, 东、西方位的树干液流速率仅在傍晚时略有差异, 二者在白天几乎无差异。在 11 月份, 东、西方位树干液流速率的日变化差异较大, 并且总体上表现为东方位的树干液流速率高于西方位。

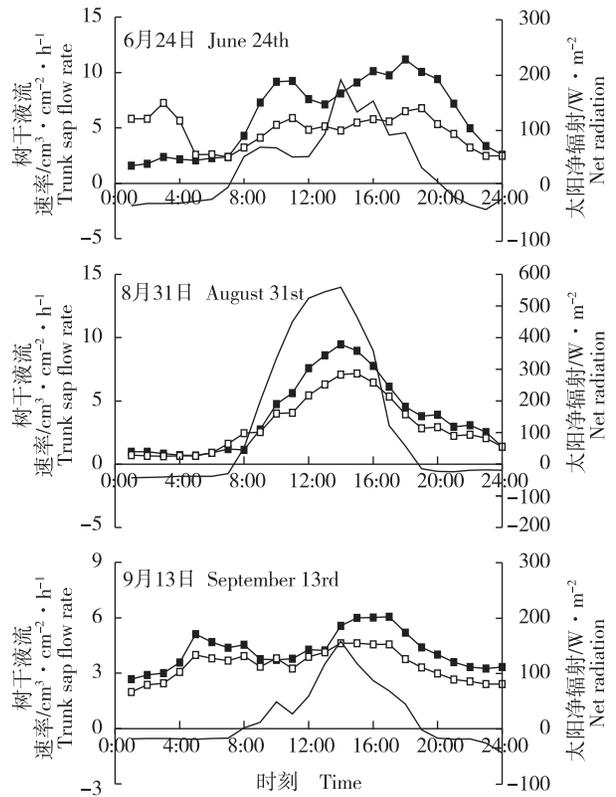
在整个观测期内, 晴天日梭梭东方位树干液流速率的最大值、最小值和平均值分别为 20.47、1.28 和  $6.45 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 而西方位树干液流速率的最大值、最小值和平均值分别为 19.09、0.87 和  $5.79 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。东、西方位树干液流速率的最大值分别出现在 7 月份和 6 月份, 最低值均出现在 10 月份。随着月份增加, 东方位树干液流速率的日均值由  $10.14 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  降至  $2.53 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 西方位树干液流速率的日均值由  $9.20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  降至  $1.46 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 并且东、西方位树干液流速率的日均值降幅均以 9 月份为最大。

2.2.2 阴天日树干液流速率的日变化 选取 3 个典型的阴天日, 对 5 株梭梭东、西方位树干液流速率每 60 min 的瞬时数值平均值的日变化状况进行分析, 结果见图 3。

由图 3 可以看出: 阴天日梭梭树干液流速率的日变化趋势与太阳净辐射变化较一致, 并且东、西方位树干液流速率的日变化趋势基本一致, 二者峰值的同步性也较高。总体来看, 东方位的树干液流速率高于西方位。

在整个观测期内, 阴天日梭梭东方位树干液流速率的最大值、最小值和平均值分别为 11.18、0.68 和  $4.73 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 西方位树干液流速率的最大值、最小值和平均值分别为 7.27、0.63 和  $3.75 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。并且, 阴天东、西方位树干液流速率的日均值显著低于晴天。

2.2.3 雨天日树干液流速率的日变化 选取 7 个典



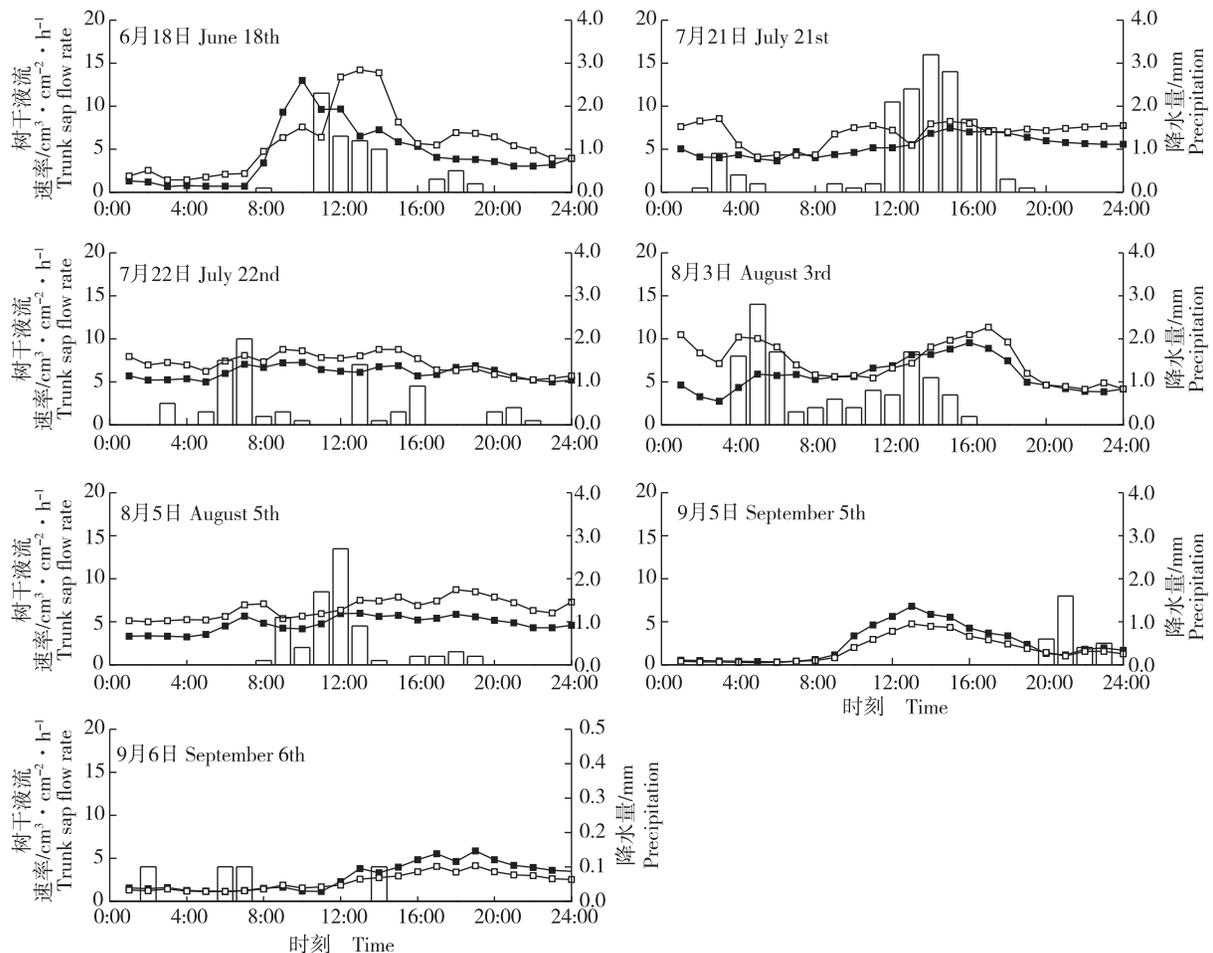
—■—: 东方位树干液流速率 Sap flow rate of east trunk; —□—: 西方位树干液流速率 Sap flow rate of west trunk; —: 太阳净辐射 Net radiation.

图 3 不同月份阴天日民勤绿洲荒漠过渡带梭梭东、西方位树干液流速率的日变化  
Fig. 3 Diurnal change of sap flow rate of east and west trunks of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert ecotone on cloudy day in different months

型的雨天日, 对 5 株梭梭东、西方位树干液流速率每 60 min 的瞬时数值平均值的日变化状况进行分析, 结果见图 4。

由图 4 可以看出: 雨天日梭梭树干液流速率的日变化趋势不明显, 多呈双峰或多峰现象; 并且, 树干液流速率的日变化与降水量的日变化趋势基本相似。雨天日东、西方位树干液流速率的日变化差异明显。在 6 月份至 8 月份, 东、西方位树干液流速率的差异最大; 在 9 月份, 东、西方位树干液流速率日变化趋势的一致性较高。总体来看, 西方位的树干液流速率高于东方位。

在整个观测期内, 雨天日梭梭东方位树干液流速率的最大值、最小值和平均值分别为 12.99、0.33 和  $4.54 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 西方位树干液流速率的最大值、最小值和平均值分别为 14.23、0.25 和  $5.42 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。并且, 与相同月份阴天日树干液流



—■—: 东方位树干液流速率 Sap flow rate of east trunk; -□-: 西方位树干液流速率 Sap flow rate of west trunk; □: 降水量 Precipitation.

图4 不同月份雨天日民勤绿洲荒漠过渡带梭梭东、西方位树干液流速率的日变化  
Fig. 4 Diurnal change of sap flow rate of east and west trunks of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert ecotone on rainy day in different months

速率相比,雨天日梭梭树干液流速率的日变化幅度较大。

### 2.3 实验期间梭梭东、西方位树干液流速率的变化分析

在整个观测期内(6月18日至11月30日),民勤绿洲荒漠过渡带梭梭东、西方位树干液流速率的变化见图5。

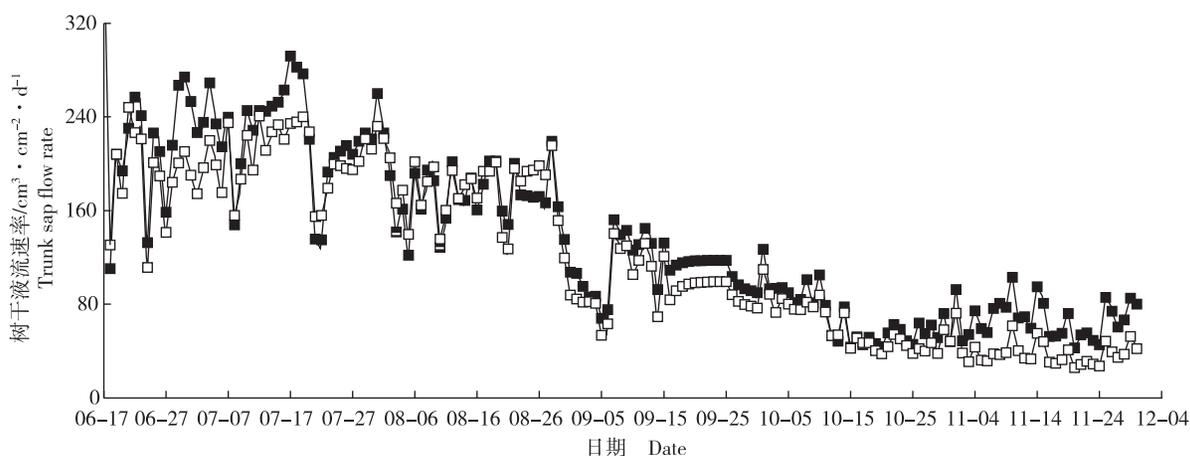
由图5可见:实验期间,梭梭东、西方位的树干液流速率总体表现为先升高后降低的变化趋势。在6月下旬至7月中旬以及11月份,西方位树干液流速率显著低于东方位,且2个方位树干液流速率的日变化趋势相似;而在8月份和9月份,东、西方位的树干液流速率差异较小,且西方位树干液流速率总体上低于东方位。

在整个观测期内,梭梭东方位树干液流速率的最大值、最小值和平均值分别为 291.89、42.82 和  $138.36 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;西方位树干液流速率的最大值、最小值和平均值分别为 248.28、25.95 和  $123.72 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。并且,在雨天日及阴天日,梭梭东、西方位的树干液流速率均显著低于邻近的晴天日。

### 2.4 不同天气和时间尺度梭梭东、西方位树干液流速率的相关性分析

对不同天气和时间尺度梭梭东、西方位树干液流速率间的相关性进行分析,结果见表2。

由表2可以看出:实验期间,不同天气和时间尺度梭梭东、西方位的树干液流速率的相关性基本上均达到极显著水平( $P < 0.01$ ),仅6月份晴天日东、西方位树干液流速率的相关性在日尺度上不显著。不论



—■—: 东方位树干液流速率 Sap flow rate of east trunk; —□—: 西方位树干液流速率 Sap flow rate of west trunk.

图 5 实验期间民勤绿洲荒漠过渡带梭梭东、西方位树干液流速率的变化  
Fig. 5 Change in sap flow rate of east and west trunks of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert ecotone during experimental period

表 2 不同天气和时间尺度民勤绿洲荒漠过渡带梭梭东、西方位树干液流速率的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation analysis on sap flow rate between east and west trunks of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert ecotone in different weather and time scales<sup>1)</sup>

天气和时间 Weather and time	东、西方位树干液流速率的相关系数 Correlation coefficient of sap flow rate between east and west trunks						总计 Total
	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	
晴天 Sunny day							
10 min	0.952**	0.965**	0.964**	0.988**	0.920**	0.688**	0.966**
1 h	0.954**	0.967**	0.966**	0.989**	0.923**	0.694**	0.968**
1 d	0.429	0.721**	0.803**	0.971**	0.952**	0.854**	0.972**
阴天 Cloudy day							
10 min	0.741**	—	0.973**	0.952**	0.878**	0.878**	0.928**
1 h	0.742**	—	0.975**	0.955**	0.880**	0.884**	0.931**
1 d	—	—	—	—	—	—	0.926**
雨天 Rainy day							
10 min	0.909**	0.903**	0.687**	0.982**	0.936**	0.684**	0.915**
1 h	0.914**	0.910**	0.700**	0.985**	0.943**	0.713**	0.920**
1 d	—	—	—	—	—	—	0.937**

<sup>1)</sup> \*\*:  $P < 0.01$ .

晴天日、阴天日还是雨天日,同一月份不同时间尺度东、西方位树干液流速率的相关系数基本上均表现为在小时尺度上最高。总体而言,晴天日和雨天日东、西方位树干液流速率的相关系数表现为在日尺度上最高,而阴天日二者的相关系数则表现为在小时尺度上最高。

由表 2 可见:在相同时间尺度,晴天日和阴天日东、西方位树干液流速率的相关系数总体上均表现为在 8 月份和 9 月份较高,而雨天日的相关系数则表现为在 9 月份和 10 月份较高;晴天日和雨天日东、西方位树干液流速率的相关系数总体上表现为在 11 月份

最低,而阴天日的相关系数则表现为在 6 月份最低。

由表 2 还可见:在同一时间尺度上,6 月份、7 月份和 9 月份晴天日东、西方位树干液流速率的相关系数最高;8 月份和 11 月份阴天日的相关系数最高;10 月份雨天日的相关系数最高。总体而言,晴天日东、西方位树干液流速率的相关系数明显高于阴天日和雨天日。

### 2.5 不同天气和时间尺度梭梭东、西方位树干液流速率与部分环境因子间的相关性分析

2.5.1 日尺度树干液流速率与部分环境因子的相关性分析 选取梭梭东、西方位树干液流速率相关性最

高的8月份和9月份、相关性最低的6月份和11月份以及整个观测期的梭梭东、西方位树干液流速率,在日尺度上对其与部分环境因子的相关性进行分析,结果见表3。

由表3可见:在8月份的晴天日,梭梭东、西方位的树干液流速率与空气温度(T)、太阳净辐射(Rn)、水汽压饱和差(VPD)、风速(Ws)和参考作物蒸散量(ET<sub>0</sub>)大多存在显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)的相关性,仅西方位树干液流速率与Ws的相关性不显著;在9月份的晴天日,东、西方位的树干液流速率与各环境因子均无显著相关性。在6月份的晴天日,东方位的树干液流速率与T、空气相对湿度(RH)和

VPD呈显著或极显著相关性,而西方位的树干液流速率仅与Rn呈极显著正相关性,并且东方位的树干液流速率与各环境因子的相关系数基本上高于西方位;在11月份的晴天日,东、西方位的树干液流速率均与Ws呈极显著正相关性,但与其余5个环境因子的相关性均不显著。值得注意的是,在8月份和6月份的晴天日,东、西方位的树干液流速率与RH均呈负相关性,而在9月份和11月份的晴天日呈正相关性。

由表3还可见:就整个观测期而言,晴天日梭梭东、西方位的树干液流速率与T、Rn、VPD、Ws和ET<sub>0</sub>均呈极显著正相关性,且其与T、Rn、VPD和ET<sub>0</sub>的相关系数较高,均在0.80以上;东、西方位的树干液流

表3 不同天气日尺度上民勤绿洲荒漠过渡带梭梭树干液流速率与环境因子的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation analysis on trunk sap flow rate of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge with environmental factors in Minqin oasis-desert ecotone in day scale in different weather<sup>1)</sup>

时间和方位 Time and position	晴天日树干液流速率与环境因子的相关系数 Correlation coefficient between trunk sap flow rate and environmental factors on sunny day					
	T	RH	Rn	VPD	Ws	ET <sub>0</sub>
8月 August						
东 East	0.626**	-0.589**	0.493*	0.664**	0.717**	0.497*
西 West	0.535**	-0.553**	0.719**	0.593**	0.408	0.722**
9月 September						
东 East	-0.181	0.543	-0.251	-0.509	0.044	-0.253
西 West	-0.129	0.547	-0.179	-0.482	-0.169	-0.181
6月 June						
东 East	0.737**	-0.690**	0.317	0.748*	—	—
西 West	0.282	-0.505	0.708**	0.461	—	—
11月 November						
东 East	0.188	0.138	0.193	0.106	0.897**	0.200
西 West	0.243	0.019	0.287	0.200	0.926**	0.296
整个观测期 Whole period						
东 East	0.855**	-0.273**	0.848**	0.830**	0.631**	0.850**
西 West	0.892**	-0.213**	0.890**	0.804**	0.580**	0.875**
时间和方位 Time and position	阴天日树干液流速率与环境因子的相关系数 Correlation coefficient between trunk sap flow rate and environmental factors on cloudy day					
	T	RH	Rn	VPD	Ws	ET <sub>0</sub>
整个观测期 Whole period						
东 East	0.587	-0.281	0.682*	0.690*	-0.270	0.749**
西 West	0.697*	-0.480	0.734*	0.837*	-0.425	0.770**
时间和方位 Time and position	雨天日树干液流速率与环境因子的相关系数 Correlation coefficient between trunk sap flow rate and environmental factors on rainy day					
	T	RH	Rn	VPD	Ws	ET <sub>0</sub>
整个观测期 Whole period						
东 East	0.746**	-0.303	0.548*	0.607**	0.362	0.081
西 West	0.745**	-0.045	0.435	0.395	0.245	-0.005

<sup>1)</sup> T: 空气温度 Air temperature; RH: 空气相对湿度 Air relative humidity; Rn: 太阳净辐射 Net radiation; VPD: 水汽压饱和差 Vapor pressure saturation deficit; Ws: 风速 Wind speed; ET<sub>0</sub>: 参考作物蒸散量 Reference crop evapotranspiration. \*\*: P<0.01; \*: P<0.05.

速率与RH也存在极显著相关性,但相关系数却较低;阴天日东、西方位的树干液流速率则与Rn、VPD和ET<sub>0</sub>均呈显著或极显著正相关性;雨天日东、西方位的树干液流速率仅与T均呈极显著正相关性。总体来看,阴天日和雨天日梭梭东、西方位的树干液流速率与各环境因子的相关系数低于晴天日;不同月份间梭梭东、西方位的树干液流速率与各环境因子的相关性差异较大,但在整个观测期间差异并不明显。

2.5.2 小时尺度树干液流速率与部分环境因子的相关性分析 选取梭梭东、西方位树干液流速率相关性最高的8月份和9月份,相关性最低的6月份和11月份以及整个观测期的梭梭东、西方位树干液流速率,在小时尺度上对其与部分环境因子的相关性进行分析,结果见表4。

由表4可见:在8月份和9月份的晴天日,梭梭东、西方位的树干液流速率与T、RH、Rn、VPD、Ws和

表4 不同天气小时尺度上民勤绿洲荒漠过渡带梭梭树干液流速率与环境因子的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation analysis on trunk sap flow rate of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge with environmental factors in Minqin oasis-desert ecotone in hour scale in different weather<sup>1)</sup>

时间和方位 Time and position	晴天日树干液流速率与环境因子的相关系数 Correlation coefficient between trunk sap flow rate and environmental factors on sunny day					
	T	RH	Rn	VPD	Ws	ET <sub>0</sub>
8月 August						
东 East	0.790**	-0.696**	0.864**	0.767**	0.538**	0.847**
西 West	0.811**	-0.717**	0.837**	0.801**	0.486**	0.812**
9月 September						
东 East	0.759**	-0.552**	0.772**	0.677**	0.354**	0.731**
西 West	0.779**	-0.555**	0.765**	0.700**	0.277**	0.717**
6月 June						
东 East	0.779**	-0.638**	0.909**	0.762**	—	—
西 West	0.770**	-0.643**	0.873**	0.763**	—	—
11月 November						
东 East	0.205**	-0.093**	-0.032	0.191**	0.808**	-0.022
西 West	0.562**	-0.468**	0.454**	0.570**	0.794**	-0.050
整个观测期 Whole period						
东 East	0.687**	-0.479**	0.763**	0.788**	0.770**	0.790**
西 West	0.722**	-0.495**	0.773**	0.809**	0.805**	0.772**
时间和方位 Time and position	阴天日树干液流速率与环境因子的相关系数 Correlation coefficient between trunk sap flow rate and environmental factors on cloudy day					
	T	RH	Rn	VPD	Ws	ET <sub>0</sub>
8月 August						
东 East	0.869**	-0.756**	0.807**	0.860**	0.085	0.784**
西 West	0.840**	-0.728**	0.739**	0.862**	-0.028	0.712**
9月 September						
东 East	0.706**	-0.224	0.610**	0.447**	0.632**	0.643**
西 West	0.791**	-0.341**	0.687**	0.584**	0.454**	0.699**
6月 June						
东 East	0.430*	0.203	0.734**	-0.084	—	—
西 West	0.690**	-0.156	0.495*	0.274	—	—
11月 November						
东 East	0.090	-0.572*	0.059	0.596**	0.777**	0.073
西 West	-0.034	-0.769**	0.289*	0.693**	0.896**	0.236*
整个观测期 Whole period						
东 East	0.516**	-0.463**	0.712**	0.685**	0.253**	0.738**
西 West	0.599**	-0.546**	0.733**	0.792**	0.105	0.743**

续表4 Table 4 (Continued)

时间和方位 Time and position	雨天日树干液流速率与环境因子的相关系数 Correlation coefficient between trunk sap flow rate and environmental factors on rainy day					
	T	RH	Rn	VPD	Ws	ET <sub>0</sub>
8月 August						
东 East	-0.488**	0.580**	0.696**	-0.540**	0.721**	0.770**
西 West	-0.524**	0.527**	0.523**	-0.530**	0.728**	0.606**
9月 September						
东 East	0.542**	-0.332**	0.682**	0.431**	0.124	0.637**
西 West	0.558**	-0.361**	0.665**	0.449**	0.105	0.615**
6月 June						
东 East	0.781**	-0.727**	0.838**	0.790**	—	—
西 West	0.647**	-0.657**	0.726**	0.709**	—	—
11月 November						
东 East	0.636**	-0.068	0.643**	0.316	0.839**	0.662**
西 West	0.663**	-0.009	0.691**	0.200	0.591**	0.700**
整个观测期 Whole period						
东 East	0.543**	-0.338**	0.607**	0.596**	0.358**	0.422**
西 West	0.568**	-0.248**	0.543**	0.508**	0.258**	0.317**

<sup>1)</sup> T: 空气温度 Air temperature; RH: 空气相对湿度 Air relative humidity; Rn: 太阳净辐射 Net radiation; VPD: 水汽压饱和差 Vapor pressure saturation deficit; Ws: 风速 Wind speed; ET<sub>0</sub>: 参考作物蒸散量 Reference crop evapotranspiration. \*\*: P<0.01; \*: P<0.05.

ET<sub>0</sub>均呈极显著相关性,并且,东方位树干液流速率与T、RH和VPD的相关系数低于西方位树干液流速率与它们的相关系数,而东方位树干液流速率与Rn、Ws和ET<sub>0</sub>的相关系数则高于西方位树干液流速率与它们的相关系数。在6月份的晴天日,东、西方位树干液流速率与T、RH、Rn和VPD均呈极显著相关性,且东、西方位树干液流速率与这4个环境因子的相关系数差异较小;在11月份的晴天日,东、西方位树干液流速率与T、RH、VPD和Ws均呈极显著相关性,且东方位树干液流速率与各环境因子的相关系数明显低于西方位,仅东方位树干液流速率与Ws的相关系数略高于西方位,且2个方位树干液流速率与Ws的相关系数均在0.80左右。在8月份和9月份的阴天日和雨天日,梭梭东、西方位树干液流速率与各环境因子基本上呈极显著相关性;在6月份和11月份的阴天日和雨天日,梭梭东、西方位树干液流速率仅与个别环境因子呈显著或极显著相关性。总体来看,8月份和9月份阴天日和雨天日东、西方位树干液流速率与各环境因子的相关系数明显高于6月份和11月份,并且,8月份和9月份的阴天日和雨天日2个方位树干液流速率与各环境因子的相关系数差异相对较小,而6月份和11月份2个方位树干液流速率与各环境因子的相关系数差异较大。

由表4还可见:就整个观测期而言,晴天日梭梭东、西方位的树干液流速率与各环境因子均存在极显著相关性,除与RH的相关系数低于0.50外,其与其他环境因子的相关系数均为0.687~0.809;除阴天日西方位树干液流速率与Ws的相关性不显著外,阴天日和雨天日东、西方位树干液流速率与各环境因子的相关性均达到极显著水平。总体来看,阴天日东、西方位树干液流速率与各环境因子的相关系数低于晴天日,但明显高于雨天日,雨天日东、西方位树干液流速率仅与T、Rn和VPD的相关性较高,相关系数介于0.543~0.607之间。

### 3 讨论

研究结果显示:总体来看,在整个观测期内梭梭东方位树干液流速率的日均值略高于西方位,推测其可能与梭梭东、西方位的枝干结构、根系分布以及树干内部输水组织不同等有关<sup>[15]</sup>。不同天气条件下,西方位树干液流速率对环境因子的响应程度略高于东方位,说明西方位树干液流速率的日变化对环境因子变化的反应较为敏感。晴天日,太阳净辐射(Rn)和空气温度(T)均较大,东方位的树干液流速率随着空气相对湿度(RH)和T的升高而大幅度提高;阴天

日和雨天日,  $R_n$  和  $T$  均较低,  $RH$  较高, 这将对梭梭枝叶产生较弱的蒸腾拉力, 最终导致东、西方位的树干液流速率明显低于晴天日。在9月份和10月份的晴天日, 梭梭东、西方位的树干液流速率在白天的同步性较高, 而在夜间则表现为东方位树干液流速率高于西方位。说明处于生长末期时, 梭梭自身的代谢能力下降, 枝叶枯黄, 导致梭梭对土壤水分的吸收较低, 夜间各环境因子对树干液流速率的影响减弱, 且东、西方位树干液流速率主要受自身内部特征的影响。在整个观测期内, 梭梭东、西方位的树干液流速率在夜间均表现出明显差异, 这可能是由于夜间补水时, 东、西方位的枝叶数量和冠幅差异造成树干内水分运输速率不同所致。在6月份至11月份, 梭梭东、西方位的树干液流速率均表现出先升后降的趋势, 并且7月份的树干液流速率高于其他月份, 这与张利刚等<sup>[25]</sup>和曹晓明等<sup>[26]</sup>的研究结果一致, 说明梭梭在7月份达到生长旺季, 植株的蒸腾耗水量达到最高值。在生长旺季, 梭梭东、西方位树干液流速率的日变化均呈现明显的“宽峰型”曲线, 该结果与吴芳等<sup>[27]</sup>和冯起等<sup>[28]</sup>的相关研究结果一致, 但却与汪滢等<sup>[29]</sup>的研究结果略有差异, 这可能是因为6月份至8月份西北干旱地区日照时间长, 光照强烈, 太阳辐射启动早、结束晚以及正午高强度的光照辐射造成梭梭同化枝气孔关闭, 从而抑制枝叶较高水平的蒸腾作用。

总体来看, 实验期间不同时间尺度和天气梭梭东、西方位树干液流速率间均存在极显著相关性, 这可能与梭梭的树体结构、根系分布、冠幅形状及光照等存在一定关系<sup>[14,17]</sup>。但是, 不同时间尺度梭梭东、西方位树干液流速率的相关系数存在明显差异, 但均达到极显著水平, 其中, 日尺度梭梭东、西方位树干液流速率间的相关系数最高, 说明梭梭东、西方位的树干液流速率不存在明显的时滞效应, 有利于梭梭平均液流的准确计算, 该结果与 Lu 等<sup>[30]</sup>和王华等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。不同天气梭梭东、西方位的树干液流速率间的相关系数存在明显差异, 阴天日和雨天日东、西方位树干液流速率间的相关系数明显低于晴天日。推测其主要原因如下: 1) 梭梭根系不能迅速对降水作出反应<sup>[31-32]</sup>, 但降水时, 雨水能够迅速将梭梭枝条湿润, 促进其表皮细胞对水分的迅速吸收, 从而干扰梭梭体内的输水组织对土壤中水分的运输<sup>[33]</sup>; 2) 受常年盛行西北风的影响, 单株梭梭的树冠整体表现为东南树冠面积大于西北树冠, 导致东、西方位树冠对雨

水的截留和吸收均有明显差异, 从而造成东、西方位根系的吸水速率不同, 最终导致东、西方位树干液流速率出现差异; 3) 晴天日东、西方位树干液流速率对外界环境因子的响应程度存在略微差异, 但各环境因子对东、西方位树干液流速率的作用程度却近似。外界环境因子共同作用于梭梭东、西方位树干液流速率, 降低了梭梭因不同方位自身差异对树干液流速率相关性的影响。

梭梭树干液流速率与环境因子的相关程度不仅受到生境差异<sup>[26,34]</sup>和土壤水分胁迫状况<sup>[35]</sup>的影响, 同时还在不同时间尺度表现出差异。随着时间尺度的增大, 阴天日和雨天日梭梭树干液流速率与各环境因子的相关性降低, 与王文杰等<sup>[36]</sup>的研究结果相似。这可能是因为随着时间尺度的增大, 阴天日和雨天日的土壤水分含量与树干液流速率的相关程度高于其他环境因子与树干液流速率的相关程度。受自身代谢水平、土壤水分含量及地上部枝干分布不均的影响, 不同月份东、西方位树干液流速率与各环境因子相关程度的差异性较大, 但整个观测期内晴天日小时尺度梭梭东、西方位的树干液流速率与水汽压饱和差的相关系数较高, 而日尺度则与空气温度的相关系数最高。在日尺度和小时尺度, 晴天日和阴天日西方位树干液流速率与参考作物蒸散量( $ET_0$ )的相关程度总体高于东方位, 且东、西方位树干液流速率均与 $ET_0$ 呈现极显著的相关性, 相关系数均在0.70以上。说明利用TDP探针测定梭梭东、西方位树干液流速率具有一定的可行性。然而, 由于本实验未利用蒸渗仪法或水量平衡法测定梭梭的实际耗水量, 因此无法对东、西方位耗水量的具体情况进行分析, 相关研究有待后续实验。

#### 参考文献:

- [1] LIU H Z, TU G, FU C B, et al. Three-year variations of water, energy and  $CO_2$  fluxes of cropland and degraded grassland surfaces in a semi-arid area of Northeastern China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25: 1009-1020.
- [2] 周连童, 黄荣辉. 中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征及其与中国夏季降水的关系[J]. *大气科学*, 2008, 32(6): 1276-1288.
- [3] 张劲松, 孟平, 尹昌君. 植物蒸散耗水量计算方法综述[J]. *世界林业研究*, 2001, 14(2): 23-28.
- [4] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 乔木蒸腾作用的主要测定方法[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(1): 88-96.
- [5] 邓东周, 范志平, 王红, 等. 林木蒸腾作用测定和估算方法

- [J]. 生态学报, 2008, 27(6): 1051-1058.
- [6] 袁国富, 张娜, 孙晓敏, 等. 利用原位连续测定水汽  $\delta^{18}\text{O}$  值和 Keeling Plot 方法区分麦田蒸散组分[J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 170-178.
- [7] SMITH D M, ALLEN S J. Measurement of sap flow in plant stems [J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47: 1833-1844.
- [8] LIU B, ZHAO W Z, JIN B W. The response of sap flow in desert shrubs to environmental variables in an arid region of China [J]. Ecohydrology, 2011, 4: 448-457.
- [9] ZHENG C L, WANG Q. Water-use response to climate factors at whole tree and branch scale for a dominant desert species in central Asia; *Haloxylon ammodendron* [J]. Ecohydrology, 2014, 7: 56-63.
- [10] 王华, 欧阳志云, 郑华, 等. 北京绿化树种油松、雪松和刺槐树干液流的空间变异特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(8): 924-937.
- [11] 王华田, 赵文飞, 马履一. 侧柏树干边材液流的空间变化规律及其相关因子[J]. 林业科学, 2006, 42(7): 21-27.
- [12] 孙守家, 古润泽, 丛日晨, 等. 银杏树干茎流变化及其对抑制蒸腾措施响应[J]. 林业科学, 2006, 42(5): 22-28.
- [13] 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[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(1): 1-6.
- [14] 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[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2145-2151.
- [15] 李广德, 贾黎明, 富丰珍, 等. 三倍体毛白杨不同方位树干边材液流特性研究[J]. 西北植物学报, 2010, 30(6): 1209-1218.
- [16] 孟秦倩, 王健, 张青峰, 等. 黄土山地苹果树树体不同方位液流速率分析[J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3555-3561.
- [17] 张小由, 龚家栋, 周茅先, 等. 胡杨树干液流的时空变异性研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 489-492.
- [18] 李少宁, 陈波, 鲁绍伟, 等. 月尺度下杨树树干液流对环境因子的响应[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 40-45, 52.
- [19] SU P X. Photosynthesis of  $\text{C}_4$  desert plants [M] // RAMAWAT K G. Desert Plants: Biology and Biotechnology. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 243-259.
- [20] 常兆丰, 赵明. 民勤荒漠生态研究 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2006: 1-8.
- [21] 常兆丰. 民勤人工绿洲的形成、演变及其可持续性探讨[J]. 干旱区研究, 2008, 25(1): 1-9.
- [22] GRANIER A. Sap flow measurements in Douglas-fir tree trunks by means of a new thermal method [J]. Annals of Forest Science, 1987, 44: 1-14.
- [23] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration; guidelines for computing crop water requirements [M] // FAO. Irrigation and Drainage. Rome: FAO, 1998.
- [24] 张晓艳, 褚建民, 孟平, 等. 民勤绿洲荒漠梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 土壤水分特征 [J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1206-1216.
- [25] 张利刚, 曾凡江, 刘镇, 等. 极端干旱区 3 种植物液流特征及其对环境因子的响应 [J]. 干旱区研究, 2013, 30(1): 115-121.
- [26] 曹晓明, 陈曦, 王卷乐, 等. 古尔班通古特沙漠南缘非灌溉条件下梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 蒸腾耗水特征 [J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 292-302.
- [27] 吴芳, 陈云明, 于占辉. 黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(4): 469-476.
- [28] 冯起, 司建华, 席海洋, 等. 极端干旱区天然植被耗水规律试验研究 [J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1095-1103.
- [29] 汪滢, 王健, 郑怀舟, 等. 不同光照条件下观光木茎干液流密度季节变化及其相关因素分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(4): 67-75.
- [30] LU P, MÜLLER W J, CHACKO E K. Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions [J]. Tree Physiology, 2000, 20: 683-692.
- [31] REYNOLDS J F, KEMP P R, OGLE K, et al. Modifying the 'pulse-reserve' paradigm for deserts of North America: precipitation pulses, soil water, and plant responses [J]. Oecologia, 2004, 141: 194-210.
- [32] ROBERTSON T R, BELL C W, ZAK J C, et al. Precipitation timing and magnitude differentially affect aboveground annual net primary productivity in three perennial species in a Chihuahuan Desert grassland [J]. New Phytologist, 2009, 181: 230-242.
- [33] ZHAO W Z, LIU B. The response of sap flow in shrubs to rainfall pulses in the desert region of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150: 1297-1306.
- [34] 徐先英, 孙保平, 丁国栋, 等. 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 [J]. 生态学报, 2008, 28(3): 895-905.
- [35] 孙鹏飞, 周宏飞, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量 [J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6901-6909.
- [36] 王文杰, 孙伟, 邱岭, 等. 不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系 [J]. 林业科学, 2012, 48(1): 77-85.

(责任编辑: 佟金凤)