

The Research of Desert Plants-Tamarisk Photosynthesis, Transpiration and Water Consumption Regularity in Manas River Basin

Guang Yang, Xinlin He[†], Cui Wang, Junfeng Li

College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University/Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of the Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832000, China

Abstract

This paper adopts the measurement technology of Thermal Dissipation Probe System to study the law of water consumption of typical desert plants tamarix in Manasi River Basin and its correlation of meteorological factors. At the same time, we studied the relationship between photosynthesis and transpiration and environmental factors, and established the relationship between transpiration of tamarix chinensis and the evaporation of the reference crop. The results are as follows: (1) the tamarix sap flow density is greatly affected by solar radiation, temperature and air humidity, so the average density in the sunshine after the rain is more than that in a sunny day; and the density in a sunny day is also more than that in a rainy day. The transpiration of the tamarisk scale had a significantly correlation with that of its canopy scale ($R^2=0.719$). (2) In the test-pit and field experiments, the PAR is the main decision variables of net photosynthetic rate of artificial and native desert tamarisks and the RH is the major limiting variables of native tamarisks. The mean value Tr of this two experiments of tamarisk turns to maximum, and the daily average value WUE of tamarisk is around 1.12 in July. (3) Liquid flow value of tamarix chinensis in 2012 and 2013 respectively is 97mm and 103mm in the test-pit experiment as well as 45mm and 53mm in the field experiment; The fastigium of tamarix water consumption lies in June and July. (4) There is a significant linear relation between the reference crop evapotranspiration (ET_0) and tamarisk transpiration water consumption (SF), which can be illustrated in such a formula: $ET_0 = 1.495 + 0.737 SF$, $R^2 = 0.610$.

Keywords: Sap Flux Density; Tamarisk; Meteorological Factors; Photosynthetic Rate and Transpiration Rate; Manas River Basin

玛纳斯河流域下游荒漠植物-怪柳 光合蒸腾及耗水规律研究*

杨广, 何新林, 王翠, 李俊峰

石河子大学水利建筑工程学院/现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000

摘要: 本文采用热扩散茎流计测定技术, 研究了玛纳斯河流域典型荒漠植物怪柳的蒸腾耗水规律及其与气象因子的相关性, 以及光合蒸腾与环境因子的关系, 并建立了怪柳蒸腾量与参考作物蒸发量之间的关系, 结果如下: (1) 怪柳液流密度受太阳辐射、温度和空气湿度的影响较大, 平均值排序: 雨后晴天>雨前晴天>阴雨天。怪柳的枝条尺度与其冠层尺度的蒸腾作用显著相关 ($R^2=0.719$)。 (2) 测坑试验和野外试验中, PAR 是人工和原生荒漠怪柳净光合速率的主要决策变量,

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51269026) (U1203282) (41361096) (41371052); 兵团科技创新团队((2014CC001); 石河子大学杰出青年项目 (2012ZRKXJQ08)

第一作者: 杨广 (1983-), 男, 副教授, 主要从事水资源高效利用及生态水文学的研究。Email: mikeyork@163.com

通讯作者: 何新林 (1966-), 男, 教授, 主要从事水资源高效利用及生态水文学的研究。

RH 是原生怪柳的主要限制变量。测坑、野外试验怪柳 Tr 的均值 7 月最大。怪柳的 WUE 日均值在 1.12 左右。(3) 2012 年和 2013 年, 测坑试验怪柳的液流量分别是 97mm、103mm; 野外试验怪柳液流量分别为: 45mm、53mm; 怪柳耗水高峰期是 6 月和 7 月。(4)参考作物蒸发量(ET0)与怪柳蒸腾耗水量(SF)之间存在着显著的线性关系: $ET0=1.495+0.737SF$, $R^2=0.610$ 。

关键词: 液流密度; 怪柳; 气象因子; 光合蒸腾作用; 玛纳斯河流域

引言

水资源不足是干旱半干旱区面临的巨大挑战, 随着人口增加, 玛纳斯河流域水资源供需矛盾严重, 自然植被严重衰退, 生态环境恶化, 因而, 对水资源合理利用与科学管理尤为必要。荒漠植被蒸腾耗水是生态需水的重要组成部分, 也是生态恢复与重建的重要水分参数, 因此, 测定树木蒸腾耗水过程, 对于生态需水定量研究具有重要意义。有关植物蒸腾耗水量的测定方法和手段国内外学者进行了大量研究, 主要包括: 微气象学法、水量平衡法、植物生理学法等, 此外, 针对个体植物茎流测量方法包括热脉冲、树干热平衡、茎热平衡和热扩散法等, 20 世纪 90 年代以来, 随着热脉冲技术的日益完善, 逐渐被应用于树木的蒸腾耗水测量上, 且能够确定树冠蒸腾耗水量, 该技术由 Huber^[1]首先提出, 以后由 Marshall^[2]、Swanson 和 Whitfield^[3]、Edwards^[4]等改进完善。热扩散法由 Granier^[5-6]提出, 此法是在热脉冲法的基础上, 改用双热电偶热耗散原理, 利用树干液流流动, 通过检测电偶间的温度差, 进而运用经验公式计算液流的密度; 热扩散法适用于绝大多数植物, 监测结果较为精准; Oliveras^[7]、Steppe^[8]、Coelho^[9]对樟子松(Pinus sylvestris)、水青冈(Fagus grandifolia trees)和橙子的液流速率变化, 我国诸多学者^[10-13]也应用热扩散技术, 对白桦(Betula platyphylla)、马占相思(Acacia mangium)、香蕉(Bananas)、苹果(Apple)等的蒸腾过程进行了研究, 取得了较好的效果。

怪柳广泛分布于玛河流域, 抗旱、抗寒、耐盐, 深根系, 是干旱区防风固沙的优良树种和薪碳材, 近年来, 有些学者^[14]对怪柳液流规律做过研究, 但对同一流域人工种植和荒漠原始生长条件下怪柳的液流规律及其液流密度与环境因子的关系研究较少, 本文通过两种不同环境条件下怪柳的液流规律、光合蒸腾特性的对比分析, 找出其耗水机理, 研究成果可以为流域植物的生态需水和荒漠植物恢复提供指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山北麓、古尔班通古特沙漠南缘, 梭梭、怪柳是其主要建群种, 人工移植梭梭和怪柳(测坑试验)实验点(44°19'30" N, 85°59'45" E, 海拔 413m)位于石河子大学西郊农试场二连现代节水灌溉试验站, 干旱少雨, 年均降雨量为 117mm, 年均蒸发量为 1945mm, 潜水位埋深 11m 以上; 原生梭梭(野外试验)实验点(45°05'51" N, 86°00'1" E, 海拔 320m), 位于石河子莫索湾灌区下方沙漠, 实验区夏季炎热干燥, 年均降雨量为 93mm, 年均蒸发量大于 2000mm, 冬季寒冷, 极端最低气温-42.8℃, 极端最高气温 42.1℃, 潜水位埋深 15m 以上。

1.2 研究方法

1.2.1 样树选择与数据测定

样树选择: 选择长势良好, 冠幅适中, 无病虫害的怪柳。树干液流测定: 选用国产 ESTDP 茎流计, 该仪器是基于热扩散原理的测定系统, 采用改进型探针, 取样间隔为 10min, 测定时间从 2012 年 5 月到 2012 年 11 月、2013 年 5 月到 2013 年 11 月。光合蒸腾速率测定: 采用美国 CID 公司生产的 CI-340 便携式光合测定仪, 于 2013 年 5、6、7 月, 对测坑和野外的怪柳进行全天监测, 每小时测定一次, 为反映自然状况下怪柳光合蒸腾特征与环境因子的关系, 测定过程未进行温湿度和 CO₂ 的控制。气象参数测定: 应用气象场测

定植物周围气象数据，每 1h 记录一次数据，监测光合有效辐射、空气温度、空气相对湿度、风速等气象因子。

1.2.2 液流密度计算方法

液流密度 F_d (g/(cm²·s))的方程:
$$F_d = 118.99 \times 10^{-6} \cdot K^{1.231} \quad (1)$$

蒸腾量 F_s (g/h)的计算方程:
$$F_s = F_d \times A_s \times 3600 \quad (2)$$

式中, K 为无量参数, $K = (\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T$, A_s (cm²) 是边材面积。

参考作物蒸发量计算公式:
$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{700}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.263 u_2)} \quad (3)$$

式中: Δ --饱和水汽压与温度曲线的斜率(kPa ·℃); R_n --为作物表面的净辐射量(MJ m⁻² d⁻¹); G --土壤热通量(MJ m⁻² d⁻¹); γ --干湿表常数(kPa ·℃); T --平均温度 (℃); u_2 -- 2m 高处的日平均风速(m s⁻¹); e_s --饱和水汽压(kPa); e_a --实际水汽压(kPa)。

1.2.3 数据分析

利用 Matlab 软件对参考作物需水量的计算公式进行编程, 计算参考作物需水量的日变化, 应用 Microsoft Excel 2007, SPSS17.0 统计软件, 以 5%的可靠性作为因变量的入选和剔除临界值, 将桉柳液流速率与气象因子进行多元线性回归及相关分析, 采用 Origin 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 晴天、阴雨天桉柳基径液流密度日变化规律

如图 1 是桉柳雨前晴天 (6 月 21 日)、阴雨天 (6 月 25 日) 和雨后晴天 (6 月 27 日) 三种类型天气的液流密度日变化图, 雨前晴天液流的峰值分别为: 6.24、6.17 g/(cm²·h), 雨后晴天的液流的峰值分别为: 7.88、6.83 g/(cm²·h), 阴雨天峰值分别为: 4.10、4.42 g/(cm²·h)。三种类型天气下, 桉柳液流密度平均值: 雨后晴天>雨前晴天>阴雨天。

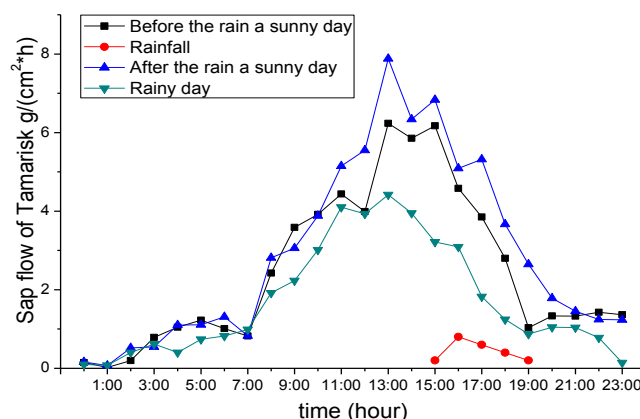


Fig. 1 Three kinds of weather Tamarisk basal diameter flow diurnal variation measured in test pit

2.2 桉柳枝条、基径液流密度变化规律及其与气象因子的关系

2.2.1 枝条与其基径液流密度变化规律

植物基径液流量表征植物蒸腾量, 所有枝条的液流都是基径液流的分流。桉柳的枝条与其基径的液流密度都存在明显日变化 (图 2), 枝条与基径液流密度日变化规律相似。将桉柳枝条液流密度与其基径液流密度 (图 3), 做回归模型得以下关系: $Y = 0.924X + 0.226$, $R^2 = 0.719$, 由模型可知, 桉柳枝条液流密度与

其基径液流密度的日变化差异较小。

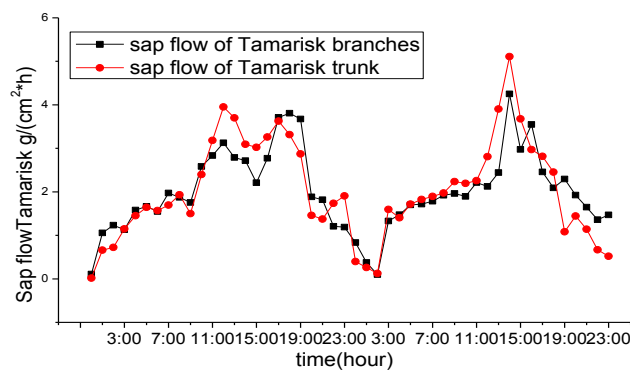


Fig. 2 Branch and basal diameter flow density diurnal variation of Tamarisk

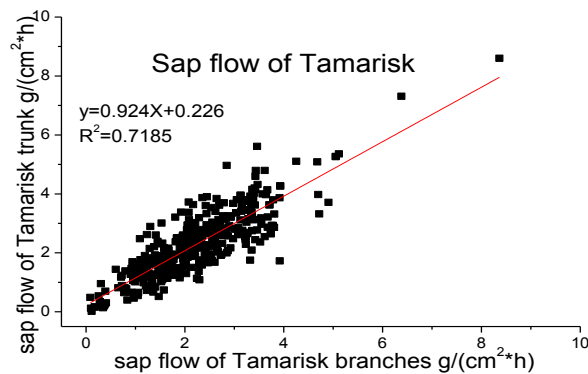


Fig. 3 Branch and basal diameter flow density diurnal variation of desert plants

2.2.2 枝条、基径液流密度变化规律与气象因子的关系

植物蒸腾作用不仅取决于自身形态特征，而且还受太阳辐射(*PAR*), 饱和水汽压(*VPD*), 温度(*T_a*), 空气相对湿度(*RH*), 风速等外界各种环境因子的影响，现将各气象要素与两种植物不同尺度的液流密度的相关系数列表（表 1）。

Tab.1Branches and basal diameter sap flow density variation and correlation between meteorological factors

液流 气象因子	桉柳枝条液流		桉柳基径液流	
	晴天	阴天	晴天	阴天
总辐射	0.242**	0.289**	0.539**	0.170*
光合有效辐射	0.130**	0.143	0.469**	0.129
温度	0.185**	-0.119	0.398**	0.295**
湿度	-0.282**	-0.186**	-0.398**	-0.303**
水汽压亏缺	0.222**	0.039	0.384**	0.188**
风速	0.052	-0.003	-0.281**	-0.291**

**, 在0.01水平（双侧）上显著相关。

*, 在0.05水平（双侧）上显著相关。

由表 1 可知，桉柳不同尺度液流密度与各气象要素的相关关系，总辐射应是相关性最高的，其次是光合有效辐射，然后是温度和 *VPD*。

把总辐射、温度、湿度和 *VPD* 作为自变量，利用 *Spss* 逐步剔除法进行多元逐步回归分析，建立回归模型。枝条液流密度： $Y = 3.645 \cdot P + 0.22 \cdot T + 6.724 \cdot V - 18.939, R^2 = 0.765$,

基径液流密度： $Y = 742.426 \cdot P - 0.463 \cdot T - 10.232 \cdot V + 9.292, R^2 = 0.756$,

模型中 *PAR* 是最主要的因子，温度和 *VPD* 对桉柳的液流影响相对较小。

2.3 柽柳光合特性的变化规律及其与环境因子的关系

影响植物净光合速率日变化因素主要包括植物种类、生长年限等内在因子，还包括光合有效辐射、温度、空气中 CO₂ 浓度和湿度等外界影响因子。图 4 是柽柳 5~8 月净光合速率(P_n)日变化（2013 年），只有 5 月份，测坑和野外的柽柳 P_n 日变化为单峰型。

由表 2 可知，对柽柳 P_n 影响最大的是 PAR 。 PAR 对 P_n 的间接作用较小，可能原因为 PAR 对 T_a 的影响。 T_a 对 P_n 的间接作用主要通过 PAR 实现，测坑试验和野外试验 T_a 的间接通径系数为 0.326、0.575，增加了 T_a 对 P_n 的直接促进作用。

测坑试验和野外试验 RH 对 P_n 的直接通径系数均为负值，野外试验的直接通径系数(-0.793)，在数值上远大于测坑试验 RH 对 P_n 的直接通径系数(-0.097)。

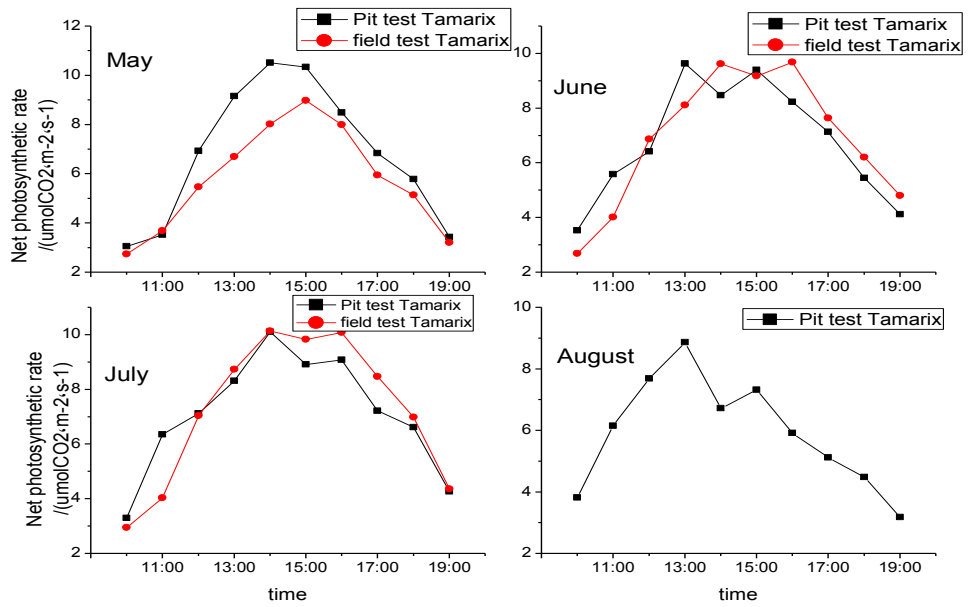


Fig.4 Tamarisk net photosynthetic rate variation during different periods

Tab.2 Path analysis of environmental factors on net photosynthetic rate of Tamarisk

test poi nts	变量Variables	Direc t effect	Indirect effect				
			Σ	PAR/(μ mol · m-2 · s-1) 1) Photosynthetically active radiation	Ta/°C Air temperatu re	Ca/(μ mol /mol)Air CO2 concentration	RH/% Air relative humidity
测 坑 试 验	PAR/(μ mol · m-2 · s-1) Photosynthetically active radiation	.814	.001	—	.099	-.089	-.009
	Ta/°C Air temperature	.557	.310	.326	—	-.029	.013
	Ca/(μ mol /mol)Air CO2 concentration	-.095	-.353	-.282	-.028	—	-.043
	RH/% Air relative humidity	-.097	.084	.039	-.017	.062	—
野 外 试 验	PAR/(μ mol · m-2 · s-1) Photosynthetically active radiation	.753	0.458	—	-.176	-.556	.274
	Ta/°C Air temperature	.740	1.110	.575	—	.052	.483
	Ca/(μ mol /mol)Air CO2 concentration	-.242	-.983	-.908	-.026	—	-.049
	RH/% Air relative humidity	-.793	-.194	-.553	.299	.060	—

**, 在0.01水平上显著相关。

*, 在0.05水平上显著相关。

决策系数: $R_i^2 = 2P_i r_{iy} - P_i^2$ ，公式中： P_i 是自变量 i 对因变量的直接通径系数； r_{iy} 是自变量 i 与因变量的 Pearson 相关系数； R_i 是通径分析中的决策指标。用 R_i 值的大小，把各个自变量对因变量的综合影响进行排

序，最终确定主要决策变量以及限制变量。决策系数值最大的是主要决策变量，决策系数值小且为负值的是主要限制变量。根据计算结果，不同试验点影响柽柳 P_n 的环境因子决策系数排序，测坑试验： $R^2(\text{PAR}) > R^2(\text{Ta}) > R^2(\text{RH}) > R^2(\text{Ca})$ ，野外试验： $R^2(\text{PAR}) > R^2(\text{Ta}) > R^2(\text{Ca}) > R^2(\text{RH})$ 。由此可知 PAR 是测坑试验和野外试验影响柽柳 P_n 的主要决策变量， RH 是野外试验柽柳 P_n 的主要限制变量。

2.4 柽柳蒸腾特性的变化规律及水分利用效率变化规律

2.4.1 柽柳蒸腾速率日变化规律

由图 5 可知，柽柳 T_r 的日变化有明显上升和下降过程。柽柳 T_r 主要呈现双峰曲线，有明显“午休”现象，只有 5 月野外试验是单峰型，峰值出现在 15:00，为 $6.8 \text{ mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，测坑试验所得柽柳的 T_r 5、6、7、8 月的日均值分别是 5.77 、 6.04 、 6.26 和 $5.42 \mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \text{ s})$ ，野外的柽柳 5、6、7 月分别是 4.84 、 6.08 和 $6.30 \mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \text{ s})$ ，柽柳 T_r 日均值 7 月最大。

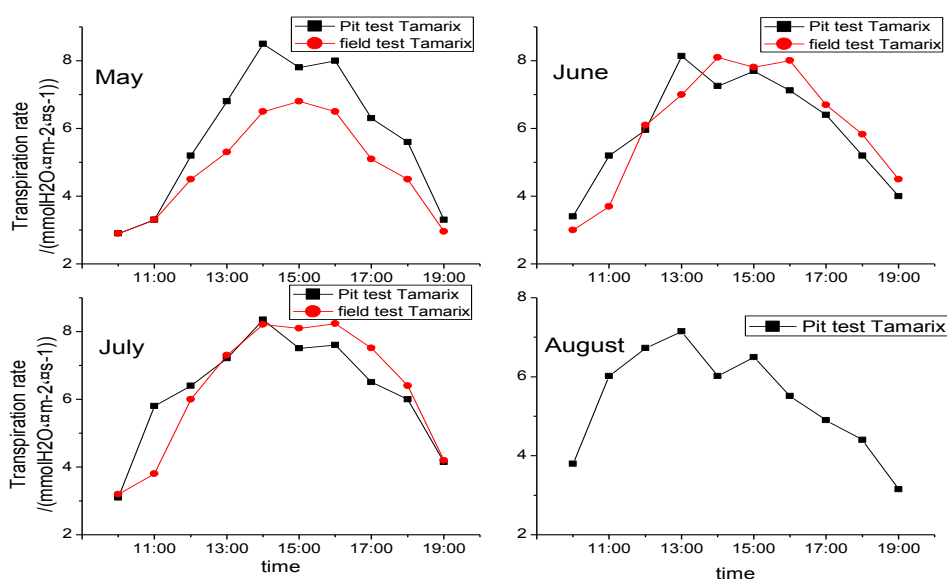


Fig.5 Tamarisk transpiration rate variation during different periods

2.4.2 柽柳水分利用效率变化规律

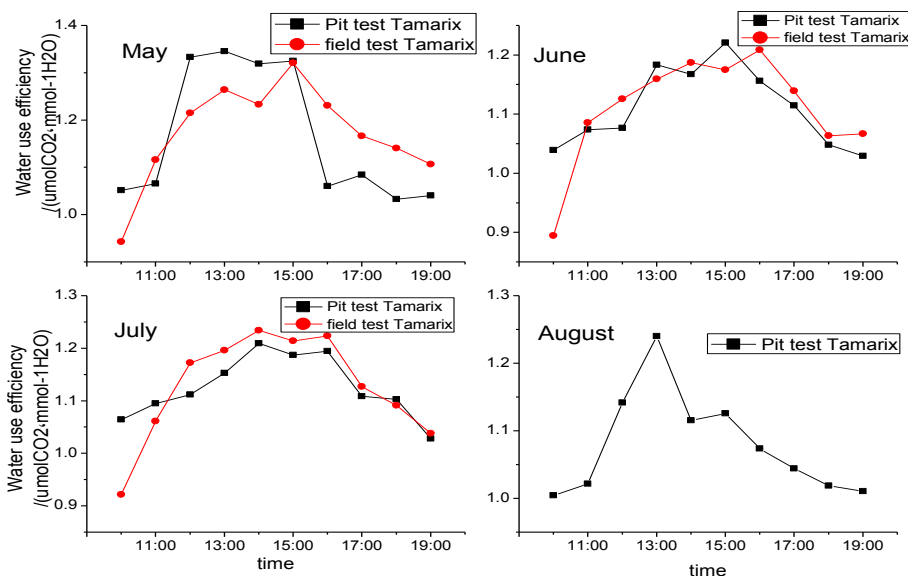


Fig.6 Tamarisk water use efficiency variation during different periods

由图 6 是 5~8 月桤柳 WUE 日变化 (2013 年), 测坑和野外试验桤柳 WUE 呈现抛物线型, 有明显“午休”现象, 测坑试验所得桤柳的 WUE 5、6、7、8 月的日均值分别是 1.166 、 1.111 、 1.125 和 $1.080\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$, 野外的桤柳 WUE 5、6、7 月的日均值分别是 1.171 、 1.111 和 $1.128\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ 。

2.5 模拟桤柳气孔导度的变化规律

Jarvis 模型假定各环境变量对气孔导度的影响函数各自独立, 则多变量综合作用条件下的气孔导度(g_s)可用这些函数的乘合方式表示: $g_s = G_i(Q_p) \cdot g_j(D_e) \cdot g_q(T_l) \cdot g_k(C_a)$

式中, $G_i(Q_p)$ 、 $g_j(D_e)$ 、 $g_q(T_l)$ 和 $g_k(C_a)$ 分别为气孔导度(G_s)对光合有效辐射(Q_p)、饱和水汽压差(D)、叶片温度(T_l)和空气 CO_2 浓度(C_a)表达函数。

模型采用非线性最小二乘法拟合。得到桤柳叶片气孔导度最优模型是: $g_s^* = G_1^*(Q_p) \cdot g_1^*(D_e) \cdot g^*(T_l) \cdot g^*(C_a)$, $R^2=0.7110$;

Table 3 Jarvis model parameters fitting of Tamarisk

模型	a1	a2	a3	b1	b2	b3	c1	c2	c3	d
G1g1g	-0.5039	0.0001	0.1000	0.0935	0.1000	0.1000	0.6004	-0.0399	0.0007	1.2808
G1g3g	-0.0549	-0.0001	0.1000	0.1410	-0.1396	0.1000	-0.0879	0.0082	-0.0002	2.8127
G1g4g	-0.0025	0.0001	0.1000	0.1088	12.3726	-2.0106	0.0472	-0.0028	0.0004	1.5842
G3g4g	-0.0166	0.0129	0.0494	0.1431	0.1022	0.1026	-0.0443	-0.0493	-0.0337	0.0686

桤柳叶片气孔导度对环境因子响应模型的具体形式可表达为:

$$g_s^* = (-0.5039 + 0.001 \cdot Q_p)(1 - 0.0935 \cdot D_e)(0.6004 - 0.0399 \cdot T_l + 0.0007 \cdot T_l)(1 - 1.2808 \cdot C_a)$$

对桤柳叶片气孔导度模型所模拟的值和参与模型的实测值比较可见图 7, 其显著性达到 $P = 0.01$ 水平, 模型可用来估算梭梭和桤柳的叶片气孔导度。

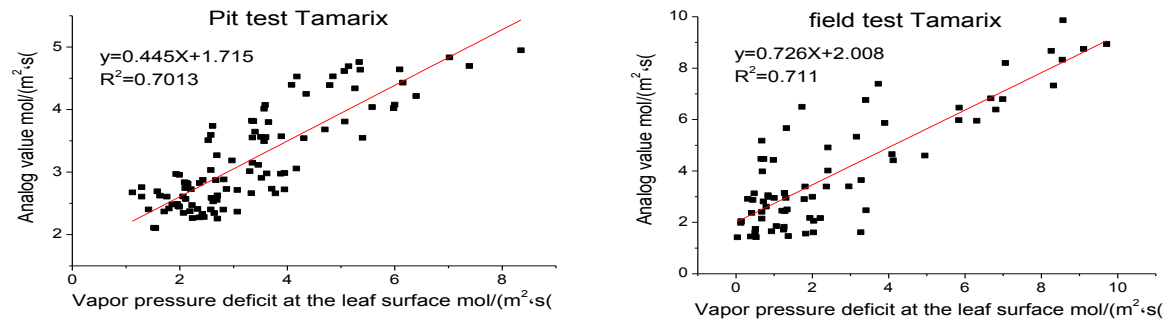


Fig.7The simulations compared with measured values

2.6 参考作物蒸发量与桤柳蒸腾量的关系

将彭曼蒙特斯公式运用 Matlab 软件编程, 得出参考作物需水量的月变化情况。如图 11, 2013 年参考作物需水量总体趋势表现为先升高后降低。

4~5 月作物处于发芽生长阶段, 到 6 月份基本达到蒸发量的最大值, 作物叶片形成蒸腾耗散达到稳定值, 地面温度逐渐稳定, 地表蒸发也处于稳定状态; 7、8 月份, 虽然 6 月份温度相对较高, 但是所表现的蒸发量的值较小, 尤其是 7 月下旬和 8 月中旬, 期间降雨较多水, 空气湿度相对较高, 气候一直处于高温高湿的状态, 在这种情况下, 植物的蒸散会有所减低; 进入 9 月份, 温度比 8 月低, 植物的叶片开始变黄, 参考作物蒸发量就有所降低。2.6.2 梭梭、桤柳树体蒸腾耗水量与参考作物蒸发量的关系通过对参考作物蒸发量

(ET_0)与梭梭蒸腾耗水量(SF)进行分析得出, 两者之间存在着显著的线性关系, $ET_0=1.495+0.737 \cdot SF$
 $R^2=0.610$ 。

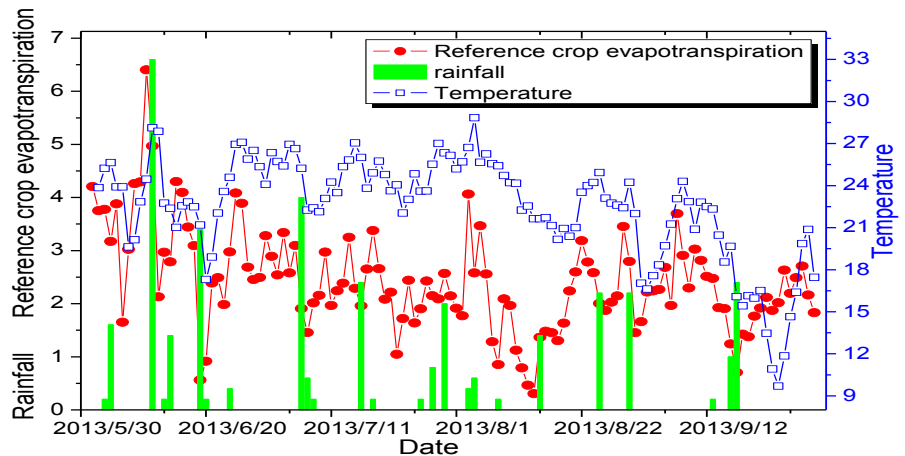


Fig.8 Reference crop evapotranspiration and rainfall, temperature variation in June 2013 to September

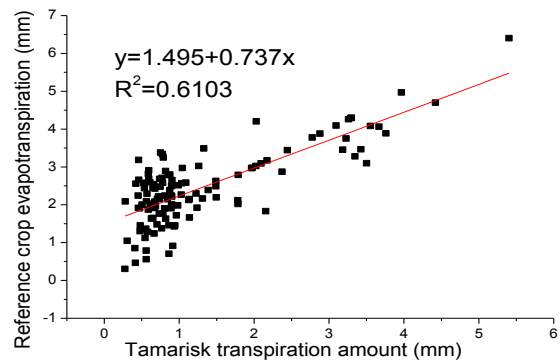


Fig.9 Relationship Tamarisk and reference crop evapotranspiration in June 2013 to September

3 结论与讨论

3.1 不同天气下的液流变化规律研究

本试验在石河子大学试验站和农八师 150 团下方沙漠进行, 实验结果与徐先英^[15]、夏桂敏和康绍忠等^[16]对沙漠植物液流密度规律研究结果一致。

3.2 液流密度变化规律及其与气象因子的关系

由表 1 给出了不同植物类型液流日变化主导影响因子, 梭梭、怪柳基径液流密度与太阳辐射、温度和 VPD 均达到显著相关水平, 且相关性大小顺序都是: 总辐射>光合有效辐射>温度> VPD >湿度, 该结果与许浩等^[17]、屈艳萍和康绍忠等^[18]等对怪柳的研究结果一致, 马玲等^[19]认为与马占相思树干液流相关的环境因子排序为: 光合有效辐射>总辐射> VPD >空气相对湿度>大气温度, 这可能是不同植物间自身特性差异较大, 从而对外界环境因子的响应也不同。Hoyaux 等^[20]认为热带雨林的液流与 VPD 关系密切, 与太阳辐射的关系次之, 这是由于研究环境及其研究对象不同而导致的。

3.3 环境因子对 P_n 影响

太阳光为植物提供碳同化的能量, 是光合作用的基础。清晨 PAR 较低时, P_n 随 PAR 的增强而增大, 但当光强过大时, P_n 随 PAR 变化较为缓慢。本研究中, PAR 对 P_n 的直接通径系数均为较大正值, 说明强光环境未对怪柳造成胁迫, PAR 对 P_n 的直接通径系数达到 0.75 以上, 远大于其它环境因子, 是影响 P_n 的主要环境因子。

“光合午休”现象在干旱区普遍存在，高温、高光强、干旱胁迫等不利环境条件下，主要有植物叶片气孔关闭、光合酶活性下降、光合产物积累、光呼吸增高等因素是引起午休。根据起因不同， P_n 降低的因素可分两类：气孔限制和非气孔限制。根据 Dias^[21]给出的气孔限制值判断方法，当光合速率降低的同时，胞间 CO_2 (C_i) 也下降，气孔限制值增高时，主要是由于气孔关闭引发光合速率下降的；而如果光合速率降低的同时， C_i 增高，但气孔限制值降低，说明光合速率下降，主要是由非气孔因素引发的。本研究中，6 月、7 月柽柳出现了显著的“光合午休”现象，而 5 月柽柳未出现午休现象，说明主要原因可能是 $Cond$ 下降引发的光合原料不足和光合产物的积累，引起 P_n 降低。干旱高温环境下气孔闭合，防止了植物过度失水，有利于在干旱环境下生长。而 5 月柽柳未出现午休现象，原因可能是：5 月份土壤含水量较高，能满足蒸腾需求， $Cond$ 的降低，对光合作用影响不大。

3.4 水分利用效率

很多研究认为，荒漠植物水分利用效率应当较高，特别是在水分亏缺时，为保证水分的有效利用和抵挡干旱胁迫，但实际上，荒漠植物为了抵抗高温对叶片的灼伤，常常采用很高的蒸腾速率，使叶片温度降低。刘家琮^[22]等人认为，只有多浆旱生植物，只在干旱时期维持低蒸腾速率，以节约有限水分。本研究中，柽柳水分利用效率的高于闫海龙^[23]等对塔克拉玛干沙漠柽柳的研究结果，低于苏培玺等^[24]在巴丹吉林沙漠对柽柳的研究结果。

3.5 结论

(1) 柽柳液流密度受太阳辐射、温度和空气湿度的影响较大，液流密度平均值排序：雨后晴天>雨前晴天>阴雨天。柽柳的枝条尺度与其冠层尺度的蒸腾作用显著相关，且决定系数较大($R^2 = 0.719$)。

(2) 测坑试验和野外试验中， PAR 是柽柳 P_n 的主要决策变量。野外试验， RH 是主要限制变量。测坑、野外试验柽柳 T_r 的均值 7 月最大，柽柳的 WUE 日均值在 1.12 左右。

(3) 测坑试验柽柳 2012 和 2013 年的液流量分别 97mm、103mm；野外试验柽柳（2013 年）液流分别为：45mm、53mm；柽柳耗水高峰期是 6 月和 7 月。

(4) 参考作物蒸发量(ET_0)与柽柳蒸腾耗水量(SF)之间存在着显著的线性关系：

$$ET_0 = 1.495 + 0.737 \cdot SF, \quad R^2 = 0.610。$$

REFERENCE

- [1] Huber B. Beobachtung Messung pflanzlicher Safrströme[J]. Bericht der Deutschen Botanischen Gesellschaft, 1935, 50: 89-109
- [2] Marshall D C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport[J]. Plant Physiology, 1958, 33: 385-396
- [3] Swanson RH, Whitfield DWA. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice[J]. Journal of Experimental Botany, 1981, 32(126): 221-239
- [4] Edwards WR N, Warwick N WM. Transpiration from a Kiwifruit vine as estimated by the heat pulse technique the Penman - Monteith equation[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1984, 27: 2557-2566
- [5] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems. Annales des Sciences Forestieres, 1985, 42(2): 193-200
- [6] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320
- [7] Imma Oliveras and Pilar Llorens. Medium-term sap flux monitoring in a Scots pine stand: analysis of the operability of the heat dissipation method for hydrological purposes[J]. Tree Physiol, 2001, 21(7): 73-80
- [8] Kathy Steppe, Dirk J.W. De Pauw, Tanya M. Doody et al. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150: 1046-1056
- [9] Rubens D. Coelho, Lucas M. Vellame, Eusímio F. Fraga Júnior. Estimation of transpiration of the 'Valencia' orange young plant

using thermal dissipation probe method[J]. SOIL AND WATER ENGINEERING, 2012, Vol.32

- [10] 孙慧珍, 周晓峰, 赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究[J]. 生态学报, 2002, Vol.22(9): 1387-1391
- [11] 赵平, 饶兴权, 马玲, 马占相思(*Acacia mangium*)干液流密度和整树蒸腾的个体差异[J]. 生态学报, 2006, Vol.26(12): 4050-4081
- [12] 刘海军, Shabtai COHEN, Josef TANNY, 等. 应用热扩散法测定香蕉树蒸腾速率[J]. 应用生态学报, 2007, Vol.18(1): 35-40
- [13] 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
- [14] 袁志发, 周静芋, 郭满才, 等. 决策系数——通径分析中的决策指标[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 131-133
- [15] 徐先英, 丁国栋, 孙保平, 等. 内陆河下游民勤绿洲主要防风固沙植被生态需水量研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 144-148
- [16] 夏桂敏, 康绍忠, 李王成, 王锋, 屈艳萍. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化[J]. 生态学报, 2006, 04: 1186-1193
- [17] 许浩, 张希明, 闫海龙, 姚世军. 塔克拉玛干沙漠腹地多枝桠柳茎干液流及耗水量[J]. 应用生态学报, 2007, 04: 735-741
- [18] 屈艳萍, 康绍忠, 夏桂敏, 等. 甘肃石羊河流域人工种植长穗桠柳树干液流量变化规律研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(11): 2259-2265
- [19] 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.
- [20] Hoya J, Moureaux C, Tourneur Dodson B, et al. Extrapolating gross primary productivity from leaf to canopy scale in a winter wheat crop[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(4): 668-679
- [21] Dias M C, Brüggemann W. Differential inhibition of photosynthesis under drought stress in *Flaveria* species with different degrees of development of the C4 syndrome[J]. Photosynthetica, 2007, 45(1): 75-84
- [22] 刘家琮, 蒲锦春, 刘新民. 中国沙漠中部地区主要不同类型植物的水分关系和旱生结构比较研究. 植物学报, 1987, 29(6): 662-667
- [23] 闫海龙, 梁少民, 张希明, 等. 塔克拉玛干沙漠特有灌木光合作用对生境中特殊温度、湿度及辐射变化的响应[J]. 科学通报, 2008, 53: 74-81
- [24] 苏培玺, 周紫鹃, 张海娜, 李善家, 解婷婷. 荒漠植物生理需水量及耗水规律研究[A]. 中国植物学会. 生态文明建设中的植物学: 现在与未来——中国植物学会第十五届会员代表大会暨八十周年学术年会论文集——第2分会场: 植物生态与环境保护[C]. 中国植物学会, 2013: 1

【作者简介】



杨广 (1983-), 男, 汉, 副教授, 石河子大学水利建筑工程学院, 副教授, 主要从事水资源合理配置及生态水文等方面的教学与研究工作。国际水利与环境工程学会会员, 中国地理学会会员。

Email: mikeyork@163.com