

旱区沙柳蒸腾规律及其对气象因子的响应

王强民^{1,2}, 王文科^{1,2}, 王周锋^{1,2}, 安可栋^{1,2}, 陈立^{1,2}, 宫程程^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 为研究沙柳蒸腾规律及其与气象要素的关系, 采用包裹式茎流计测量沙柳全叶期至落叶期液流速率, 并分析了沙柳蒸腾与气象要素的关系。研究表明: 沙柳枝条液流速率与其直径呈正相关关系; 沙柳液流在早7时开始, 10时至15时处于高值, 16时后急剧减少, 至夜间21时后降至最低(接近0); 沙柳液流速率具有典型的季节性特征, 且受气象要素影响显著, 其受影响强烈程度的大小顺序为: 饱和水汽压差> 太阳辐射> 大气温度> 相对湿度> 风速; 另外, 参考蒸散发量和液流速率呈显著线性关系, 随着潜在蒸散发的增加, 沙柳蒸腾也呈增加趋势。

关键词: 沙柳; 液流速率; 气象因子; 干旱区

中图分类号: S16 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)04-0771-05

Transpiration of *Salix psammophila* and its response to meteorological factors in arid area

WANG Qiang min^{1,2}, WANG Wen ke^{1,2}, WANG Zhou feng^{1,2}, AN Ke dong^{1,2}, CHEN Li^{1,2}, GONG Cheng cheng^{1,2}

(1. College of environmental science&engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to investigate the relationship between the transpiration of *Salix psammophila* and meteorological factors, packaged sap flow gauge was used to measure the sap flow velocities in the full leaf season and defoliation season. The results showed that (1) the sap flow velocity of *Salix psammophila* branch has a positive correlation with branch diameter; (2) sap flow velocity increases gradually from 7 am in the morning, reaches a peak between 10 am in the morning and 3 pm in the afternoon, then decreases gradually from 4 pm in the afternoon to the lowest value (near zero) after 9 pm at night; (3) sap flow velocity of *Salix psammophila* has an obviously seasonal variation with the maximum value in July while the minimum in November; (4) meteorological factors are the most significant factors affecting the sap flow velocity of *Salix psammophila* in the following order: vapor pressure deficit> solar radiation> air temperature> relative humidity> wind speed; and (5) there is a significantly linear relationship between sap flow velocity and reference evapotranspiration with a correlation coefficient of $R^2 = 0.77$

Key words: *Salix psammophila*; sap flow velocity; meteorological factor; arid area

植物蒸散发过程是土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 中的关键环节之一^[1], 尤其在干旱的沙漠地区。研究表明植物从土壤中吸收的水分 99% 通过蒸腾作用散失到大气中^[2], 这对地下水循环起着不可忽视的作用。因此, 在旱区开展优势植物耗水及蒸腾规律研究, 查明植物蒸腾及其影响因素, 对旱区生态保护和水资源合理利用具有重要意义。

研究植物蒸腾量有多种方法, 包括水文学方法^[3] (包括水量平衡法和蒸渗仪法等)、植物生理学方法^[4] (包括茎流

法、气孔计法等)、微气象学方法^[5] (包括波文比-能量平衡法、涡度相关法和空气动力学法等) 和红外遥感法^[6] 等 4 类方法^[7]。由于茎部热量平衡法具有操作简单、环境破坏性小、可连续监测、适用范围广等优势^[8], 目前已成为研究直径较小植物蒸腾的主要方法之一。

近年来, 大量研究者采用热技术法对干旱半干旱地区沙生植物的液流进行了研究, 多集中在油蒿、柠条、黄柳、小叶锦鸡儿、胡杨等^[8-11], 但对沙柳的研究较少。早期对沙柳蒸

收稿日期: 2015-01-29 修回日期: 2015-04-23 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.2034.029.html>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“旱区地表-地下水系统界面动力学与水循环研究(41230314)”；国家自然科学基金青年基金“渭河流域地下水系统对气候变化的响应研究(41202164)”；教育部博士点基金项目“渭河流域地下水对气候变化响应机制研究(20100205110007)”；国土资源公益性行业科研专项经费“鄂尔多斯盆地水与生态环境关系科研平台建设-水与生态关系调查研究(201311076-4)”

作者简介: 王强民(1989-), 男, 河南新乡人, 主要从事生态水文地质学的研究。Email: wang_qiangmin@126.com

通讯作者: 王文科(1962-), 男, 陕西岐山人, 教授, 主要从事旱区地下水资源合理开发与生态保护研究。E-mail: wenkew@chd.edu.cn

腾规律的研究多使用光合分析系统和快速称重法^[12-13]。黄振英等人用光合分析系统对沙柳的日蒸腾量进行研究分析,但时间尺度较短,没进行长时间尺度上的研究^[12]。张国盛等人用快速称重法对沙柳的蒸腾速率进行测量,并和温度及小叶含水率做了相关性分析,但也存在观测时间过短及气象要素较少等问题^[13]。近年来,黄金廷等人应用茎流计测定沙柳生长期蒸腾,并对其与气象因子关系进行分析,研究了沙柳蒸腾与地下水水位的关系,但研究周期较短^[14]。

为长期监测沙柳的蒸腾及其气象因子,本次试验采取基于试验场地尺度的研究方法。当忽略植物体内水分变化时,植物蒸腾量近似等于植物的根系吸水量^[2]。因此对沙柳蒸腾耗水特性及其对气象要素响应的研究有助于认识沙柳对水热胁迫的适应机理,进而确定沙柳耗水量,为后期研究沙柳根系吸水奠定基础。试验场地与毛乌素沙地同属干旱半干旱地区,因此研究场地尺度的沙柳蒸腾规律对后期研究沙地沙柳蒸腾规律有相当程度的借鉴与指导作用。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于陕西省西安市长安大学渭水校区水与环境原位试验场,具体位置见图 1。场内专设植物根系耗水研究区,研究区植物(沙柳、油蒿等)幼苗均取自毛乌素沙地南缘,填土采用毛乌素沙地的典型风积沙。西安市属大陆性季风气候,处于暖温带半湿润与半干旱气候的过渡地带。研究区多年平均降雨量 522.4~719.5 mm,多年平均蒸发量 1 000~1 200 mm,干旱指数 1.0~1.7,年平均气温 13.0℃~13.7℃,年日照时数 1 646.1~2 114.9 h。

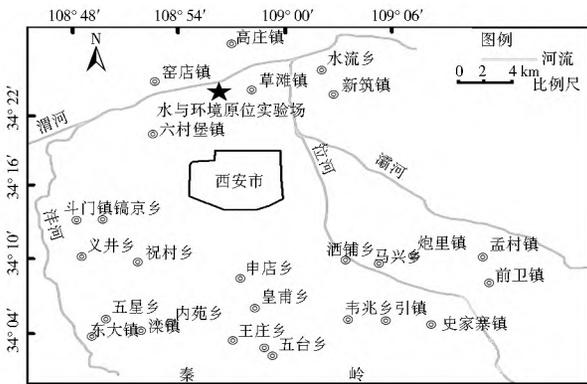


图 1 水与环境原位试验场位置

Fig. 1 Location map of the in situ experiment field for water and environment

1.1.1 气象数据观测

安装在距根系耗水试验区 50 m 的气象站(美国 campbell 公司生产)可同步观测气象资料,包括气压、大气温度、太阳辐射、相对湿度、风速及风向等气象因子。数据采集器为 campbell 公司生产的 CR3000 采集器,监测频率为每 5 min 记录一次。为了综合反映大气温度与湿度的协同作用,引入水汽压差(VPD)指标,饱和水汽压差可由 Goff and Gratch (1946)给出的公式^[15]计算:

$$e_s = \text{EXP} \left[\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.3} \right]$$

$$VPD = e_s - \frac{e_a \times RH}{100}$$

式中: e_s 为在大气温度 T_a 下的饱和水汽压(kPa); T_a 为大气温度(℃); RH 为相对湿度(%); VPD 为水汽压差(kPa)。

1.1.2 沙柳液流速率观测

本文采用基于热平衡原理的 EMS62 包裹式茎流计对沙柳的液流速率进行连续监测。从试验区选择 2 株长势较好的沙柳(三年生),分别选择 5 枝粗细适中,枝条较直的枝条安装茎流传感器(表 1)。安装前,清洗干净安装部位的茎干,并用游标卡尺测量安装部位直径,按照规范安装相应大小的茎流计。茎流计数据采集间隔设定为 30 min,观测时间从 2012 年 7 月 17 日开始(全叶期),于 11 月 14 日结束(无叶期)。

表 1 探头规格及所测沙柳样本基本特征

Tab. 1 SGB specifications and basic properties of the Salix psammophila samples

编号	传感器型号	枝条直径/cm	株高/cm	冠幅/cm ²
沙柳 A ₁	SGB2	0.89	141	126
沙柳 A ₂	SGB2	1.15	141	126
沙柳 A ₃	SGB2	1.53	141	126
沙柳 A ₄	SGB2	1.87	141	126
沙柳 B	SGB3	1.03	117	93

2 结果与分析

2.1 沙柳液流速率的日变化规律

2.1.1 不同直径沙柳枝条液流速率的日变化规律

为消除土壤含水率对沙柳液流的影响,特选择沙柳 A 的 4 个枝条作为研究对象。以 7 月 29 号为例,图 2 反映了不同直径沙柳枝条的液流速率的日变化规律。不同直径沙柳枝条受相同气象因子的影响,液流速率具有相似的波动趋势。直径不同,沙柳的液流速率存在明显差异,表现出液流速率与其直径呈正相关关系。沙柳液流速率的日动态变化基本呈单峰曲线,液流速率在早 7 时后急剧增加,在 10 时至 15 时处于高值,峰值出现在 12 时左右,16 时后急剧减少,至夜间 21 时以后降至最低。沙柳属“非蒸腾午休型”的水分生态类型^[16],即在良好的水分供给条件下,它的蒸腾速率呈宽大的、单峰型的日变化曲线。但从图 2 可看出沙柳的液流速率并不是严格的单峰曲线,有轻微的蒸腾午休现象,但表现不明显。沙柳的夜间液流速率微弱(接近 0),与同为沙生植物的油蒿相似(夜间液流接近 0)^[8],但不同于柠条(夜间液流明显)^[9]。

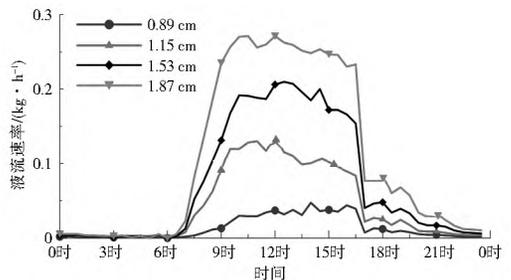


图 2 7 月 29 日不同直径的沙柳枝条液流日变化规律

Fig. 2 Daily variation of sap flow velocity with different branch diameters of Salix psammophila on July 29th

2.1.2 不同天气条件下沙柳液流的日变化规律

由于直径最大沙柳枝条的液流对气象因子的响应最为明显,且误差相对较小,所以选取其为代表进行分析。如图3所示,不同天气情况下,沙柳液流启动及达到最大值的时间不同。阴雨(小雨)天气其液流速率的变化趋势与晴天相似,但日液流量却有大幅度的降低。但在中大雨天气,沙柳的液流速率的变化趋势不呈现“几”字形,液流速率与夜间较为接近,液流量接近0。

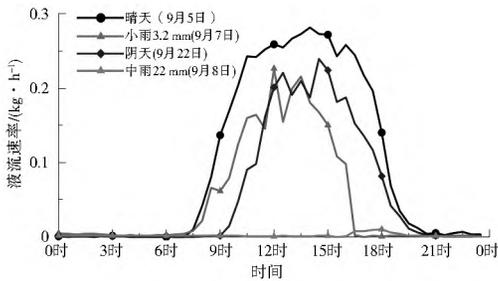


图3 不同天气情况下的沙柳液流日变化规律

Fig. 3 Daily variation of sap flow velocity of *Salix psammophila* under different weather conditions

降雨对沙柳液流的影响是气象要素的间接反应,随着降雨的发生,太阳辐射减小,大气温度降低,相对湿度及土壤含水率增高,从而导致降雨时蒸腾量的减小以及雨后潜在蒸腾量的增大^[7](图4)。如表2所示,降雨事件后,随着土壤含水率的升高,沙柳的最大液流速率较雨前增加明显,表明沙柳的潜在蒸腾量较雨前增大,但沙柳最大液流速率的增加量与降雨量没有明显的正相关关系,如9月15日降雨量为3.4 mm,但最大液流速率的增加比例却是最小。

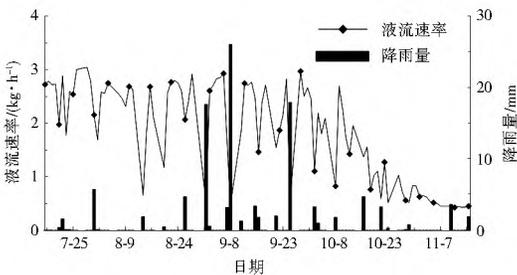


图4 7月17日-11月14日沙柳液流及其降雨量的动态

Fig. 4 Seasonal variation of sap flow velocity of *Salix psammophila* and precipitation from July 17th to November 14th

表2 降雨前后沙柳液流速率最大值及增加比例

Tab. 2 The maximum value of sap flow velocity and increased ratio before and after precipitation

日期	降雨量 /mm	降雨前最大液流速率/(kg·h ⁻¹)	降雨后最大液流速率/(kg·h ⁻¹)	增加比例 (%)
8 14	1.9	0.275	0.282	3
8 26	4.7	0.288	0.307	6.1
9 15	3.4	0.295	0.301	1.9
10 2	3.3	0.260	0.274	5.1

2.2 沙柳液流速率的季节性变化

选取7月17日-11月15日的日液流量与降雨量作图,见图4,从图可知沙柳的液流速率表现出典型的季节性特征。试验期间直径最大的沙柳枝条的液流速率在7月份最大,达

到259 kg/d,8月份次之,为234 kg/d。9月份尽管太阳辐射降低,但由于较多降雨,土壤水分充沛,沙柳的液流速率没有明显降低,仍达到219 kg/d。10月份气温降低,太阳辐射减弱,液流速率显著降低,为1.32 kg/d。11月随着沙柳进入落叶期,液流量在此时达到最低,但由于要维持自身相对微弱的生理活动,仍有一定大小的液流速率。总之,沙柳的蒸腾活动具有典型的季节性特征,而这种季节性既与气象因子有关又受自身的生理特性所影响。

2.3 沙柳液流速率与气象因子的关系

沙柳液流变化除受到自身的生物结构(枝条直径大小、叶面积指数等)、土壤供水能力(土壤含水率、地下水埋深)影响外,还受到周围气象因子的驱动。为研究沙柳液流速率与气象因子的关系,选取9月28日-10月4日的气象数据和5个沙柳样本的液流平均值(统一30 min频率)作图,见图5。

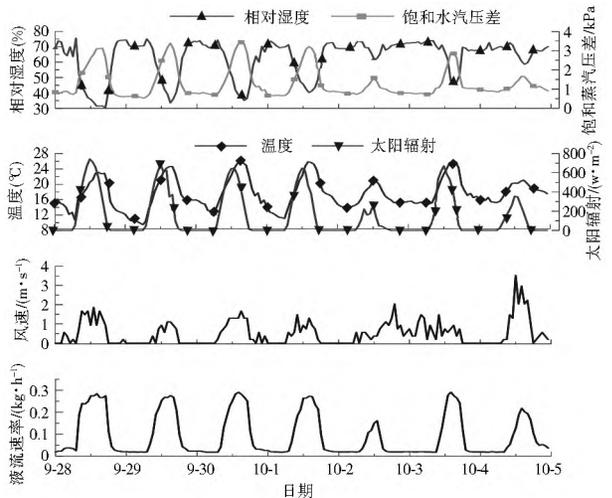


图5 沙柳液流及其气象因子关系

Fig. 5 Daily variation of sap flow velocity of *Salix psammophila* and meteorological factors from September 28th to October 14th

由图5可知,沙柳液流速率与太阳辐射、饱和水汽压差及大气温度变化趋势基本一致,与大气相对湿度波动规律相反,与风速变化关系复杂。统计气象与液流速率数据发现,试验期间温度的最大值、相对湿度的最小值和饱和水汽压差的最大值均滞后于沙柳蒸腾最大值约2 h,沙柳蒸腾最大值却滞后于太阳辐射最大值约1 h,表现出总的变化趋势大致相同,但最大值出现的时间却有先后。对液流速率与同步观测的气象因子进行相关性分析,结果见表3,从中可知沙柳的液流速率与饱和水汽压差、大气温度及太阳辐射呈显著正相关,与相对湿度呈显著负相关,与风速相关性较差。风速对液流速率的影响相对较小,且表现为不稳定性、突变性以及复杂性。各气象因素对植物蒸腾的影响是极其复杂的。当太阳辐射增强、温度随之升高,沙柳吸水活动加快,进而表现出沙柳的蒸腾增大;植物的蒸腾和空气相对湿度是相互影响的过程,空气干燥引起空气相对湿度变小,水汽压差增大,水势梯度增高,植物蒸腾加剧,反过来又造成空气相对湿度增大。

同时空气的对流使更多相对干燥的空气充满于沙柳周围,导致水汽压差增大,从而加剧植物水分吸收,表现出来风速和液流速率的正相关关系^[18]。运用多元线性逐步回归分析得到如下多元回归方程:

$$S_p = 0.12R_s + 4.146T_a + 39.94VPD + 10.63V_w - 1.824RH + 58.72 \quad (R^2 = 0.932)$$

该方程表明液流速率 S_p (g/h) 由大气温度 T_a (°C)、太阳辐射

R_s (w/m^2)、饱和蒸汽压差 VPD (kPa)、空气湿度 RH (%) 及风速 V_w (m/s) 决定。多元线性回归分析表明气象因子基本解释了沙柳液流量的变化, 见图 6。

表 3 沙柳的液流速率与各气象要素相关性

Tab. 3 The correlation between hourly sap flow velocity of *Salix psammophila* and each meteorological factor

气象因子	$T_a / ^\circ C$	$R_s / (w \cdot m^{-2})$	VPD / kPa	$RH (\%)$	$V_w / (m \cdot s^{-1})$
相关系数	0.855**	0.872**	0.946**	-0.833**	0.590**

注: ** 为 0.01 的显著水平(双尾)

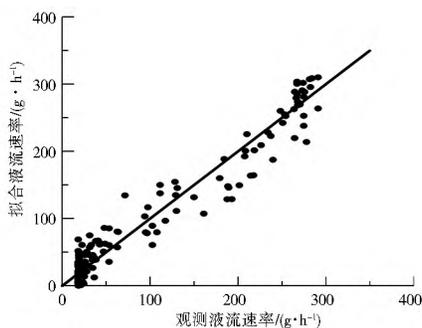


图 6 沙柳液流拟合值与观测值的散点关系

Fig. 6 Scatter plot of measured and fitted values of sap flow velocity

2.4 沙柳液流速率与参考蒸散发量的关系

参考日蒸散发量 ET_0 可利用修正后的彭曼-蒙特斯 (Penman Monteith) 公式^[19] 计算。从天尺度上来看, 参考蒸散发量 ET_0 (mm/d) 和液流速率 S_p (kg/d) 呈显著线性关系(图 7)。由图 7 可知, 试验期间沙柳液流速率与潜在蒸散发量的总体规律为: 随着蒸散发的增加, 沙柳蒸腾也呈增加趋势。线性回归分析表明, 潜在蒸散发与沙柳蒸腾量的拟合度为 77%。

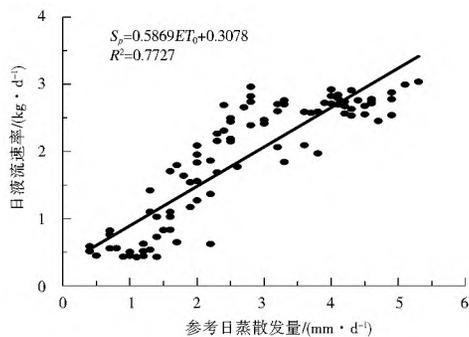


图 7 沙柳液流量与参考日蒸散发量的相关关系

Fig. 7 Relationship between daily sap flow velocity of *Salix psammophila* and daily reference evapotranspiration rate from July 11th to November 14th (93 samples)

3 讨论

利用茎流计研究植物蒸腾对气象要素的响应已经得到广泛的应用^[8-10], 而研究不同直径沙柳枝条的液流变化规律为估算整株的沙柳耗水量奠定基础。本次试验发现, 不同直径沙柳枝条的液流速率具有一致的日变化规律, 但液流速率的大小差异很大。早上随着太阳辐射的增强, 大气温度随之升高, 从而导致大气相对湿度减小, 从而造成叶-气界面上的水势差异, 蒸腾开始^[20]。沙柳的液流速率在夜晚很小(接近 0), 这一点与同为沙生植物的沙蒿^[8, 20]类似, 但却不同于柠条^[9]。吉春容等人认为夜间存在液流可能是白天植物蒸腾

耗水较多, 植物体处于水分亏缺状态; 夜间, 在根压的作用下, 根系吸水由被动变为主动, 以恢复植物体内的水分平衡^[21]。而作为沙区的优势植被, 沙柳在夜间的液流速率却不明显; 从一方面说明了沙柳白天耗水相对较少, 且沙柳根系发达, 经济价值较大, 因此适合作为治理荒漠区的优先选择植物。

在非水分胁迫期, 植物蒸腾主要由气象要素调控^[8]。对沙柳的液流速率与气象因子的相关性分析表明, 影响沙柳液流速率的主要气象因子为太阳辐射、饱和水汽压差、空气温度及相对湿度; Huang 等人对沙蒿的研究发现影响其液流的气象因子顺序为: 太阳辐射 > 饱和水汽压差 > 相对湿度 > 大气温度 > 风速^[20]; Xia 等人对柠条的研究发现其顺序为: 空气水汽压差 > 太阳辐射 > 气温 > 风速^[22]; 许浩等人对多枝怪柳的研究发现在土壤水分充足的条件下, 总辐射、风速、温度是影响怪柳液流变化的主要气象因子^[18]。气象要素对植物蒸腾的影响是一个复杂的过程, 但在干旱区由于太阳辐射较强, 早晚温差大, 因此太阳辐射与饱和水汽压差是影响植物蒸腾最为关键因素^[20]。研究植物蒸腾对气象因子的响应规律, 进而利用统计学方法构建植物液流速率与气象因子的关系, 可以方便的利用气象因子估算植物蒸腾耗水量。

4 结论

(1) 沙柳枝条直径大小只影响液流速率大小, 对日液流规律影响不大, 液流速率正相关于枝条直径。沙柳液流的日变化呈宽大单峰曲线, 液流速率在早 7 时后急剧增加, 在 12 时至 14 时之间达到最高值, 16 时后急剧减少至夜间达到最低。整个观测期, 没有发现明显的午休现象, 沙柳在夜间存在微小的液流速率。不同的天气条件下, 蒸腾速率的日变化规律存在显著差异。晴天蒸腾量最大, 阴雨天次之, 中大雨蒸腾量接近 0。次降雨事件后, 沙柳最大液流速率显著提高。

(2) 沙柳的液流速率具有典型的季节性, 实验期间 7 月份液流量最大, 11 月份液流量最低。冬季由于沙柳落叶, 液流速率十分微弱, 基本可忽略。

(3) 影响沙柳液流变化的主要气象因子是太阳辐射、饱和水汽压差、大气温度与相对湿度, 风速对液流速率的影响较小。参考蒸散发量 ET_0 和液流速率 S_p 呈显著线性关系, 随着潜在蒸散发的增加, 沙柳蒸腾也呈增加趋势。

由于整个观测期间降雨事件较多, 土壤含水率较高, 土壤含水率不是影响沙柳蒸腾的限制性因素, 因此本文没有考虑土壤含水率对沙柳蒸腾量的影响。在干旱期, 沙柳生长受到水分胁迫, 土壤含水量是影响沙柳蒸腾的重要环境因子。因此, 水分胁迫条件下的沙柳蒸腾规律以及沙柳根系吸水机理也是本团队下一个重要研究内容。

参考文献(References):

- [1] 刘昌明, 窦清晨. 土壤-植物-大气连续体模型中的蒸散发计算[J]. 水科学进展, 1992, 3(4): 255-262. (LIU Chang-ming, DOU Qing-chen. Method of evapotranspiration estimation in soil plant-atmosphere continuum (SPAC) [J]. Advances in Water Science, 1992, 3(4): 255-262. (in Chinese)) [12]
- [2] Lapitan RL, Parton WJ. Seasonal variabilities in the distribution of the microclimatic factors and evapotranspiration in a short-grass steppe [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 79: 113-130.
- [3] 张志强, 王盛萍, 贾宝全, 等. 甘肃民勤地区不同地下水埋深花棒蒸腾耗水研究[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 737-742. (ZHANG Zhi-qiang, WANG Sheng-ping, JIA Bao-quan, et al. Tree scale transpiration dynamics of Hedysarum scoparium in response to growth stage, groundwater table depth, and climate in a semi-arid environment in northwestern China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 24(4): 737-742. (in Chinese))
- [4] 张志山, 张小由, 谭会娟, 等. 热平衡技术与气孔计法测定沙生植物蒸腾[J]. 北京林业大学学报: 自然科学版, 2007(1): 60-66. (ZHANG Zhi-shan, ZHANG Xiao-you, TAN Hui-juan, et al. Measurement on the transpiration of xerophylls in the desert area with steady state porometer and stem heat balance technique [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007(1): 60-66. (in Chinese))
- [5] 柯晓新, 杨兴国, 张旭东. 农田蒸发蒸腾测算的微小气象学方法[J]. 干旱地区农业研究, 1995, 13(1): 31-40. (KE Xiaoxin, YANG Xingguo, ZHANG Xudong. Micro Meteorological Methods for Measuring and Estimating Evapotranspiration in Farmland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1995, 13(1): 31-40. (in Chinese))
- [6] 王介民, 高峰, 刘绍民, 等. 流域尺度ET的遥感反演[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(5): 332-338. (WANG Jie-min, GAO Feng, LIU Shaomin, et al. Remote sensing retrieval of evapotranspiration over the scale of drainage Basin [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(5): 332-338. (in Chinese))
- [7] 屈艳萍, 康绍忠, 张晓涛, 等. 植物蒸发蒸腾量测定方法述评[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(3): 72-77. (QU Yanping, KANG Shaozhong, ZHANG Xiaotao, et al. A review of methods for measurement of evapotranspiration from plants [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(3): 72-77. (in Chinese))
- [8] 李思静, 查天山, 秦树高, 等. 油蒿 (*Artemisia ordosica*) 茎流动态及其环境控制因子[J]. 生态学杂志, 2014, 33(1): 112-118. (LI Si-jing, ZHA Tian-shan, QIN Shu-gao, et al. Temporal patterns and environmental controls of sap flow in *Artemisia ordosica* [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2014, 33(1): 112-118. (in Chinese))
- [9] 夏勇秋, 邵明安. 黄土高原半干旱区柠条 (*Caragana korshinskii*) 树干液流动态及其影响因素[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1376-1382. (XIA Yong-qiu, SHAO Ming-an. The sap flow dynamics of *Caragana korshinskii* and the influence of environmental factors in semi-arid region of the Loess Plateau. [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2008, 28(4): 1376-1382. (in Chinese))
- [10] 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[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3205-3213. (YUE Guang-yang, ZHANG Tong-hui, ZHAO Ha-lin, et al. Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejvianii* and *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land, northeast China. [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2006, 26(10): 3205-3213. (in Chinese))
- [11] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 胡杨 (*Populus euphratica*) 树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 718-724. (ZHAO Chun-yan, SI Jian-hua, FENG Qi, et al. Xylem sap flow of *populus euphratica* in relation to environmental factors in the lower reaches in Heihe River [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 718-724. (in Chinese))
- [12] 黄振英, 董学军, 蒋高明, 等. 沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究[J]. 西北植物学报, 2002, 22(4): 817-823. (HUANG Zheng-ying, DONG Xue-jun, JIANG Gao-ming, et al. Primary studies on the daily dynamic changes of photosynthesis and transpiration of *Salix psammophila* [J]. Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica, 2002, 22(4): 817-823. (in Chinese))
- [13] 张国盛, 王林和, 董智, 等. 毛乌素沙地几种植物蒸腾速率的季节变化特征[J]. 内蒙古林学院学报: 自然科学版, 1998, 20(1): 7-12. (ZHANG Guo-sheng, WANG Lin-he, DONG Zhi, et al. The Character of seasonal change in transpiration of four plants in Maowusu sands [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry College, 1998, 20(1): 7-12. (in Chinese))
- [14] 黄金廷. 半干旱区蒸散发对地下水变化响应机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. (HUANG Jinting. The responses of evapotranspiration to the groundwater changes in semi-arid area. [D]. Xi'an: Changan University, 2013. (in Chinese))
- [15] Goff JA, Gratch S. Low-pressure properties of water from -160 to 212F [J]. Transactions of the American society of heating and ventilating engineers, 1946, 52: 95-122.
- [16] 董学军, 刘志茂, 郭柯. 几种沙生植物水分生理生态特征的研究[J]. 植物生态学报, 1994, 18(1): 86-94. (DONG Xue-jun, LIU Zhimao, GUO Ke. An investigation on the water physiological characteristic of some psammophytes [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1994, 18(1): 86-94. (in Chinese))
- [17] 周海燕. 降水对青杨蒸腾速率及其内部调节机制的影响[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(2): 62-66. (ZHOU Hai-yan. Effect of rainfall on the transpiration rate and internal factors of *populus Cathayana* [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1998, 12(2): 62-66. (in Chinese))
- [18] 许浩, 张希明, 闫海龙, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地多枝怪柳茎干液流及耗水量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 735-741. (XU Hao, ZHANG Ximing, YAN Hailong, et al. Stem sap flow and water consumption of *Tamarix ramosissima* in hinterland of Taklimakan Desert [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 735-741. (in Chinese))
- [19] 刘钰, L S Pereira J L Teixeira, 蔡林根. 参照蒸发量的新定义及计算方法对比[J]. 水力学报, 1997(6): 27-33. (LIU Yu, L S Pereira L Teixeira, CAI Lin-gen. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(6): 27-33. (in Chinese))
- [20] HUANGL, ZHANG Z S, et al. Sap flow of *Artemisia ordosica* and the influence of environmental factors in a revegetated desert area: Tengger Desert, China [J]. Hydrological Processes, 2010, 24: 1248-1253.
- [21] 吉春容, 邹陈, 李新建, 等. 核桃树干液流特征及其与气象因子的关系[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4): 616-620. (JI Chunrong, ZOU Chen, LI Xinjian, et al. Study on Sap Flow of *Juglans regia* and Its Response to Meteorological Factors [J]. Arid Zone Research, 2010, 27(4): 616-620. (in Chinese))
- [22] XIA G M, KANG S Z, et al. Diurnal and seasonal variations of sap flow of *Caragana korshinskii* in the arid desert region of north west China [J]. Hydrological Processes, 2008, 22: 1197-1205.