

沙漠人工植被区的蒸发蒸腾

张志山, 李新荣, 王新平, 张景光, 刘立超, 谭会娟

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠试验研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 研究于 2003 年 6 月至 8 月在沙坡头沙漠试验研究站的水分平衡观测场进行。利用微型蒸渗仪结合大型称重式土壤蒸渗仪测定了流沙、油蒿 (*Artemisia ordosica*) 和柠条 (*Caragana korshinskii*) 3 类样地的土壤蒸发; 油蒿和柠条的蒸腾利用表面覆盖油毡的大型非称重式蒸渗池和气孔计测定; 同时对降水量、流沙渗漏量、0~200cm 土层的土壤含水量进行了观测。结果表明: 在沙漠人工植被区由于植被比较稀疏, 土壤蒸发不受植株遮阴的影响, 但不同样地的蒸发量是有差异的, 样地和位置间的互作效应差异不显著; 在沙漠区有很大比例的蒸发发生在稀少的降水事件之后。气孔计测定的蒸腾速率经单位换算统一, 用多项式拟合得到日变化曲线均达到显著水平 ($p < 0.05$); 将蒸渗池和气孔计 2 种方法测定结果方差分析表明油蒿的蒸腾均高于柠条的 ($p < 0.05$), 测定方法间 (蒸渗池和气孔计) 差异不显著; 从而说明本研究以叶面积指数和植物冠层盖度为基础进行叶片与种群间的尺度转换是可行的。2003 年 6 月至 8 月期间, 该区的降水量为 159.1mm, 渗漏量为 48.5mm, 裸沙蒸发量为 63.0mm; 油蒿样地的蒸发量、蒸腾量和蒸散量分别为 54.1mm、59.0mm 和 119.4mm; 柠条样地的蒸发量、蒸腾量和蒸散量分别为 59.5mm、56.4mm 和 127.6mm。

关键词: 沙漠人工植被区; 蒸发; 蒸腾; 尺度转换

文章编号: 1000-0933(2005)10-2484-07 **中图分类号:** Q945.1, Q948 **文献标识码:** A

Evaporation and transpiration in re-vegetated desert area

ZHANG Zhi-Shan, LI Xin-Rong, WANG Xin-Ping, ZHANG Jing-Guang, LIU Li-Chao, TAN Hui-Juan
(Shapotou Desert Research and Experiment station, Cold & Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou, 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2484~2490.

Abstract: The experiment was conducted on Water Balance Experimental Field (WBEF) in Shapotou Desert Research and Experiment station, through June to August 2003. The Shapotou of Ningxia Hui Autonomous Region, southeast edge of the Tengger Desert (37.32° N and 105.02°E) with an elevation of 1250m a. m. s. l., is a steppe desert zone with an ecotone between desert and oasis. The annual mean precipitation is 186.2mm and most of this falls between July and September. WBEF which was built in April of 1990 is consisted of *Artemisia ordosica* and *Caragana korshinskii*. Both of *A. ordosica* and *C. korshinskii* vegetation quadrats with 10m×10m were plotted to investigate soil water content, evaporation and transpiration. Soil water contents were investigated by neutron probe, evaporation were determined by home-made micro-lysimeters, and transpirations were measured 4 times by LI-1600 stomas meter in experimental period. A weighting lysimeter with 2m² surface area in west of WBEF is used to measure evaporation and infiltration. To the north of lysimeter, 3 non-weighting lysimeters with size of 2m×2m×2m were covered by bitumen felt to determine transpiration and infiltration, two of which planted 4 *A. ordosica* and *C. korshinskii*, another is bare. The evaporation results determined by micro-lysimeters and lysimeter show that soil evaporation don't suffer to overshadow due to thin vegetation, but evaporation amount between *A. ordosica* and *C. korshinskii* vegetation is different, and the evaporations succedent rare precipitations in desert area are great. The transpiration

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90202015 和 40301008)

收稿日期: 2004-04-14; **修订日期:** 2005-04-26

作者简介: 张志山 (1974~), 男, 甘肃古浪人, 博士生, 主要从事干旱区生态研究. E-mail: zhangzhsh2002@yahoo.com.cn

Foundation item: National Natural Scientific Foundation of China (90202015 and 40301008)

Received date: 2004-04-14; **Accepted date:** 2005-04-26

Biography: ZHANG Zhi-Shan, Ph. D., candidate, mainly engaged in arid ecology. E-mail: zhangzhsh2002@yahoo.com.cn

We thanks Dr. Qing-wu Xue on the Northwestern Agricultural Research Center of Montana State University, USA, for the valuable suggestions and critical review on the paper

rates determined by stomas meter were integrated to unit and simulated by polynomial, the results of diurnal variation curves of transpirations are all significant ($p < 0.05$). Through scale conversion, the transpirations of determined by non-weighting lysimeters and stomas meter are analyzed by ANOVA, the results show that the transpiration of *A. ordosica* is higher than that of *C. korshinskii* ($p < 0.05$), but the difference between methods is not significant. It indicates that the scale conversion between leaves level and population level based on canopy and leaves area index is feasible. From June to August in 2003, the precipitation, evaporation and infiltration of bare sand are 159.1mm, 48.5mm and 63.0mm; The evaporation, transpiration and evapotranspiration in *A. ordosica* vegetation are 54.1mm, 59.0mm and 119.4mm; The evaporation, transpiration and evapotranspiration in *C. korshinskii* vegetation are 59.5mm, 56.4mm and 127.6mm.

Key words:artificially re-vegetated desert area; evaporation; transpiration; scaling

国内外关于蒸散发的研究多采用大型称重式蒸渗仪(Lysimeter)进行长时期的定位观测^[1,2],对较长期土壤蒸发和植被蒸腾的定量研究缺乏有效的方法和手段,原因是自然状态下将植物蒸腾和土壤蒸发分项测定有一定的技术困难^[1,5]。直接测定土壤蒸发的方法是利用微型蒸渗仪(Micro-Lysimeter)^[4~8],Micro-Lysimeter 是一种无扰动、封底、可移动的小型观测器皿,安装于土壤表层测定土壤蒸发^[6,7],安装后不会破坏原来的土壤结构,又可用于测定植物冠层下的土壤蒸发^[7]。植物蒸腾量的研究大多以短时间的仪器测定为主,如利用热脉冲原理的树液流动技术,采用气孔计和红外气体分析仪的直接测定^[9]。气孔计可以较精确的测定短时间内林木叶片的实际蒸腾速率,但很难连续精确测定较长时间的植被蒸腾总量^[7]。另外,目前关于植物与水分关系的研究较多的侧重于植物本身^[11,12],而较少地从植物个体扩展到群落尺度。因此,SPAC 系统中水分循环的各个层面的特点及相应的尺度效应或转换也显得尤为重要^[14,15]。本研究利用自制的微型蒸渗仪测定了流沙、油蒿和柠条样地的土壤蒸发,并与没有栽植植物的大型称重式蒸渗仪结果进行比较。表面覆盖油毡的流沙、栽植油蒿与柠条的大型非称重式蒸渗池用于测定蒸腾;同期用 LI-1600 气孔计测定油蒿与柠条的蒸腾速率,然后经过单位换算统一和尺度转换进行比较。最后,用水量平衡法计算了油蒿和柠条样地的蒸散量。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2003 年 6 月至 8 月在沙坡头沙漠试验研究站(简称沙坡头站)水分平衡观测场进行。沙坡头站位于腾格里沙漠东南缘(37°27'E, 104°57'N),海拔 1250m,处在阿拉善高原荒漠与荒漠草原过渡地带,植被属草原化荒漠。本区格状沙丘由西北向东南倾斜,呈阶梯状分布;沙丘主梁呈新月型沙丘链形态,走向为西北-东南方向,相对高差 15~20m。本区年平均气温 9.6℃,最高气温为 38.1℃,最低气温为-25.1℃,昼夜温差大;年平均降雨量为 186.2mm,一年内的雨量分布很不均匀,主要集中在 7~9 月份;空气平均相对湿度为 40%,最低可到 10%,春季尤其干燥;该地区的年平均风速为 2.8m/s,最大风速为 19m/s,大于 5m/s 的起沙风每年有 200d 左右。土壤以细粒沙为主,地下水埋藏很深,不能为植物所利用,沙丘的持水力很弱。

土壤水分平衡观测场面积 1hm²,是将流动沙丘平整后于 1990 年 4 月初栽植油蒿与柠条,栽植时根据油蒿与柠条的配置和密度不同而形成了 8 种类型的人工植被群落。在土壤水分平衡观测场西部设立了 1 台大型精密称重式土壤蒸渗仪(Lysimeter),表面积 2m²;蒸渗仪内没有栽植植物,用于测量裸沙的蒸发。王新平等^[2]对 Lysimeter 的建造方法、工作原理和数据采集等进行了详细说明。在土壤水分平衡观测场西部即土壤蒸渗仪北部设立了 3 台大型非称重式蒸渗池,每台蒸渗池体积 2m×2m×2m,周边及底部铺设油毡,底部装 40cm 厚的砾石,上层装 150cm 厚的流沙;蒸渗池内埋设 150cm 深的中子管测定土壤水分,在蒸渗池的侧边修建地下室测定渗漏。两个蒸渗池内与土壤水分平衡观测场同期各栽 4 株油蒿与柠条幼苗,第 3 个为裸沙对照处理。

1.2 试验设计

在土壤水分平衡观测场纯油蒿和纯柠条样地分别设置 10m×10m 样方,样方内沿对角线布置了 5 根中子水分测管(CNC503DR,北京核子仪器公司)测定 20~200cm 的土壤水分,0~20cm 土层用烘干法测定。在油蒿和柠条样方内各选取 5 株挂牌标记,每隔 15d 测定油蒿和柠条的冠幅和叶面积指数(CI-110 植物冠层分析仪,美国 CID 公司);植株冠幅以圆形计算,累加后为植物盖度,图 1 描绘了 2003 年 4 月至 9 月油蒿和柠条的叶面积指数和冠幅的生长过程。油蒿和柠条样方 2004 年 4 月调查密度分别为 23 株/100m² 和 103 株/100m²;盖度为 41.2%和 46.9%。

土壤蒸发用微型蒸渗仪和大型称重式土壤蒸渗仪测定。试验前用 PVC 管制作微型蒸渗仪,每套微型蒸渗仪由高 30cm、内径 11cm 的外管和内径 10cm 的内管组成,共计 36 套。每个样方各选两株油蒿和柠条,每一植株沿 3 个方向(约 120°),距离植株 20cm、50cm 和 100cm 处理设外管;测定前内管取原状土用塑料胶带封底并用精度为 0.01g 的电子天平称重,2 次的重量差为其蒸发量;微型蒸渗仪内每 1g 的重量变化相当于 0.127mm 的蒸发量;然后放入外管;每隔一段时间对内管称重测定土壤蒸发。以

上各项每隔半月测定 1 次;蒸发每次连续测定 3d,每天称重 1 次,降水后加测。没有栽植植物的大型称重式土壤蒸渗仪每天测定 2 次(8:00 和 20:00)。

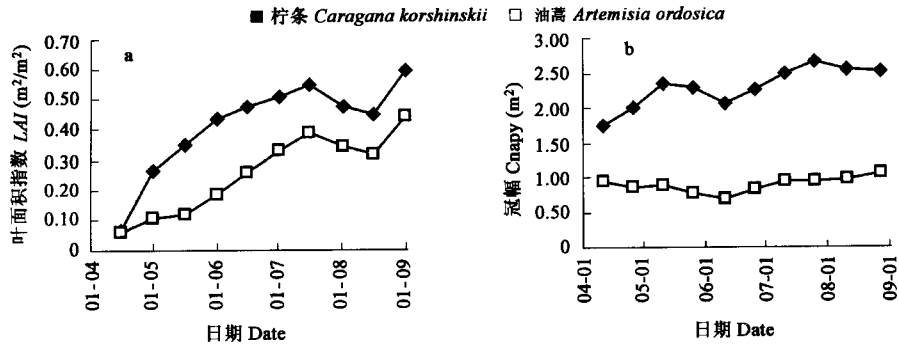


图 1 油蒿和柠条的叶面积指数(a)和冠幅动态(b)

Fig. 1 The dynamics of leaves area index (a) and canopy(b) of *A. ordosica* and *C. korshinskii*

植物蒸腾用非称重式蒸渗池和 LI-1600 气孔计(美国 LI-Cor 公司)测定。试验前 1 月将 3 台蒸渗池表面用油毡覆盖,降雨时揭开油毡使得雨水入渗。试验于 2003 年 6 月 14 日开始,每周测定 1 次土壤水分,0~20cm 土层用烘干法测定,20~150cm 用中子仪测定,降水后加测;每天测定渗漏量;每隔 15d 测定蒸渗池内油蒿和柠条的冠幅和叶面积指数。同期在水分平衡观测场纯油蒿和纯柠条样地各选 1 株油蒿和柠条,用气孔计测定蒸腾速率日变化(7:00~19:00),每隔 2h 测定 1 次;每次测定前选取植株不同部位 10 片叶子挂牌标记,测定完成后用 LI-3050 叶面积仪(美国 LI-Cor 公司)测定叶面积;试验期间共进行了 4 次测定。同期用水分平衡观测场西边的雨量筒测定降水量。

1.3 数据处理

在植物还没有长出新叶前,用 CI-110 植物冠层分析仪测定的数据为植株枝条所占的面积,即枝条面积指数;以后的测定结果减去枝条面积指数即为实际的叶面积指数。

微型蒸渗仪每次测定的蒸发数据进行方差分析,微型蒸渗仪测定数据同土壤蒸渗仪测定数据进行 *t* 测验,比较其差异显著性。以微型蒸渗仪数据为主推算出试验期间油蒿与柠条样地的蒸发量。

试验期间由于油毡覆盖蒸渗池表面,所以不考虑植被区的土壤蒸发;根据水量平衡方程,试验期间的降水量主要消耗于植物蒸腾和深层渗漏。单位土地面积植物蒸腾量(T_s)的表示单位是 $\text{mm}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 土地,如果换算成单位叶面积的日蒸腾量(TL , $\text{mm}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ 叶片),则表示为:

$$TL = T_s / C / LAI \times A \tag{1}$$

式中, C 为盖度, LAI 为叶面积指数, A 为占地面积(即蒸渗池表面积)。

LI-1600 气孔计测定的蒸腾速率($Tr, \mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$),为了单位的一致性,将其换算为每小时单位叶面积的蒸腾速率(Tr_h , $\text{mm}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 叶片),表示为:

$$Tr_h = Tr \times 0.036 \tag{2}$$

用多项式拟合蒸腾速率日变化曲线(TL_h),用下式表示:

$$TL_h = A + \sum B_i \times T_i \quad (2 \leq i \leq 6) \tag{3}$$

式中, A 为常数项, B_i 为 i 次项系数, T 为时间($7 \leq T \leq 19$)。接着,对蒸腾速率日变化曲线在时间段上进行积分,求出单位叶面积的日蒸腾量(TL),即:

$$TL = \int_7^{19} TL_h dT \tag{4}$$

对用蒸渗池和 LI-1600 气孔计测定的日蒸腾量(TL)进行方差分析,并比较差异显著性。以蒸渗池测定的单位叶面积的日蒸腾量(TL)为主,用(1)式反推出土壤水分平衡观测场油蒿和柠条样地的蒸腾量。

根据水量平衡方程,用降水量和土壤水分含量计算出油蒿和柠条样地的实际蒸散量。

2 结果分析

2.1 蒸发测定结果及比较

对微型蒸渗仪每次测定的蒸发量进行方差分析结果表明(表 1):交互间的差异均不显著。除 6 月 9 日的测定结果外,其他

测定结果均表明位置间的差异也不显著;说明沙漠人工植被区植被比较稀疏,不存在明显的遮阴。但样地间的差异因测定日期不同而差异的显著水平不同,这可能与植被区本身的特性有关,如土壤的基础含水量、植物根系分布等因素有关。微型蒸渗仪测定蒸发量同土壤蒸渗仪测定蒸发量比较结果表明(表1):有58.3%微型蒸渗仪测定结果与土壤蒸渗仪测定结果存在差异,由于植株遮荫对蒸发的影响不明显,可能是由于样地间土壤含水量差异所致。没有降水的情况下沙坡头人工植被区土壤蒸发量非常低(表2),柠条样地、油蒿样地和裸沙的日平均蒸发量分别为0.214、0.260 mm/d和0.322 mm/d;然而,降水后蒸发量急剧增加,柠条样地、油蒿样地和裸沙的日平均蒸发量分别为2.687、2.763 mm/d和2.680 mm/d。由此推断,在沙漠人工植被区紧接降水之后的土壤蒸发占总蒸发量的比例是很高的。

2.2 蒸腾测定结果及比较

试验期间,蒸渗池中的油蒿与柠条植被区均未观测到渗漏,流沙有少量渗漏,只有0.9mm(表3)。利用蒸渗池测定蒸腾结果表明:自6月1日到8月31日,油蒿与柠条植被区的蒸腾量为135.5mm和129.8mm;日蒸腾量7月上中旬最高,分别为35.0mm和33.2mm,6月中下旬最低,分别为15.5mm和16.0mm。试验中,对照流沙处理出现了耗水情况,总量为37.5mm,虽然与油蒿与柠条植被区的总蒸腾量相比不多,但悖于常规;这是由于水分入渗到蒸渗池底部40cm厚的砾石层时,中子仪探测不到,从而导致了测定结果的偏高。

表1 微型蒸渗仪测定蒸发方差分析及与土壤蒸渗仪测定结果比较

Table 1 The results of ANOVA of evaporations determined by micro-lysimeters and comparing with the results determined by lysimeter							
开始测定时间 Starting time	累计测定时间 Cumulative time(h)	降水量 Precipitation (mm)	样地间 Among vegetations	位置间 Among location	互作 Interaction	土壤蒸渗仪 Lysimeter	
						柠条样地 C.	油蒿样地 A.
						<i>korshinskii</i> vegetation	<i>ordosica</i> vegetation
05-01 May 1, 15:00	72		N	N	N	N	N
05-17 May 17,9:00	72		N	N	N	* *	*
06-01 Jun. 1,10:00	72		N	N	N	* *	* *
06-09 Jun. 9,8:00	53	10.3	* *	* *	N	*	N
06-16 Jun. 1610:00	72		N	N	N	N	*
06-26 Jun. 26,8:00	10	4	N	N	N	N	N
06-30 Jun. 30,9:00	107	57.5	* *	N	N	*	* *
07-11 Jul 11,8:00	32	3.3	N	N	N	N	N
07-31Jul. 31,11:00	72	14.7	N	N	N	* *	* *
08-15 Aug. 1510:00	72	7	* *	N	N	N	* *
08-22 Aug. 22,8:00	36	12.3	* *	N	N	N	* *
08-31 Aug. 3111:00	96		* *	N	N	* *	* *

N 表示差异不显著 Means difference is not significant; * 表示差异显著 Means difference is significant($p<0.05$); * * 表示差异极显著 Means difference is very significant($p<0.01$)

表2 微型蒸渗仪和土壤蒸渗仪测定的日蒸发量(mm/d)

Table 2 Daily evaporations determined by micro-lysimeters and lysimeter					
开始测定时间 Starting time	累计测定时间 Cumulative time(h)	降水量 Precipitation (mm)	柠条样地 C. <i>korshinskii</i> vegetation	油蒿样地 A. <i>ordosica</i> vegetation	土壤蒸渗仪 Lysimeter
05-01 May 1, 15:00	72		0.066	0.071	0.075
05-17 May 17,9:00	72		0.054	0.093	0.124
06-01 Jun. 1,10:00	72		0.089	0.070	0.171
06-09 Jun. 9,8:00	53	10.3	2.811	3.445	3.362
06-16 Jun. 1610:00	72		0.188	0.178	0.147
06-26 Jun. 26,8:00	10	4	3.213	2.948	3.180
06-30 Jun. 30,9:00	107	57.5	4.633	6.747	3.673
07-11 Jul 11,8:00	32	3.3	1.725	1.819	1.725
07-31 Jul. 31,11:00	72	14.7	1.193	1.050	1.525
08-15 Aug. 1510:00	72	7	1.629	0.951	1.575
08-22 Aug. 22,8:00	36	12.3	3.605	2.383	3.717
08-31 Aug. 3111:00	96		0.767	1.065	1.312

将 LI-1600 气孔计测定的蒸腾速率单位换算为每小时单位叶面积的蒸腾速率($Tr_h, \text{mm}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$)后,用多项式拟合得到蒸腾速率日变化曲线(表 4),拟合曲线均达到显著水平($p<0.05$);然后对蒸腾速率日变化曲线在时间段上进行积分,求出单位叶面积的日蒸腾量(TL)(表 5)。

表 3 蒸渗池测定的蒸腾量和渗漏量(mm)

Table 3 The amount of transpiration and infiltration in non-weighting lysimeters during experiment							
	6 月上中旬 1~15 Jun.	6 月中下旬 16~30 Jun.	7 月上中旬 1~15 Jul.	7 月中下旬 16~31 Jul.	8 月上中旬 1~15 Aug.	8 月中下旬 16~31 Aug.	总量 Total
油蒿 <i>A. ordosica</i>	16.5	15.5	35.0	24.8	20.8	23.1	135.5
柠条 <i>C. korshinskii</i>	17.3	16.0	33.2	24.2	22.9	16.2	129.8
流沙 Sand	10.9	2.9	19.5	1.9	1.1	1.3	37.5
渗漏 Infiltration			0.6	0.2			0.9

表 4 多项式拟合的油蒿和柠条蒸腾速率日变化曲线(TL_h)及积分后求得的日蒸腾量(TL)

Table 4 The curves of diurnal variation of transpiration rate of *A. ordosica* and *C. Korshinskii* simulated by polynomial and daily transpiration amount

$TL_h = A + \sum B_i \times T_i \quad (2 \leq i \leq 6) \quad (7 \leq T \leq 19)$							R^2	P	日蒸腾量 Daily transpiration ($TL, \text{mm}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$)
A	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6			
Y626	0.0263	0.0611	-0.0106	4.57×10^{-4}			0.9272	0.0326	0.99
N626	0.0374	0.0121	-0.0022	8.34×10^{-5}			0.9881	0.0022	0.46
Y712	0.1370	-0.1175	0.0534	-0.00617	2.11×10^{-4}		0.9847	0.0304	2.45
N712	0.0167	0.0411	-0.0030				0.8334	0.0278	1.47
Y804	0.0341	0.0790	-0.0082	1.86×10^{-4}			0.9706	0.0085	2.39
N804	0.0260	0.0385	-0.0050	1.67×10^{-4}			0.9737	0.0072	1.06
Y811	0.3626	-0.5879	0.3630	-0.09679	0.0126	-7.92×10^{-4}	1.91×10^{-5}	$1.0000 < 0.0001$	0.87
N811	0.3470	-0.5847	0.3473	-0.09083	0.0118	-7.39×10^{-4}	1.79×10^{-5}	$1.0000 < 0.0001$	0.81

Y 表示油蒿的蒸腾速率日变化,N 表示柠条的蒸腾速率日变化;626、712、804 和 811 表示 6 月 26 日、7 月 12 日、8 月 4 日和 8 月 11 日测定 Y means the diurnal variations of transpiration rate o f *A. ordosica*, N means the diurnal variations of transpiration rate of *C. korshinskii*. 626、712、804 and 811 mean them were determined on June 6, July 12, August 4 and August 11

表 5 蒸渗池与气孔计测定日蒸腾量的方差分析结果

Table 5 The ANOVA results of diurnal transpiration amount determined by lysimeter and stomas meter						
变异来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Df	均方 Mean square	F	显著性 Significance	
物种间 Species	3.692	1	3.692	7.522	0.018	
方法间 Methods	0.967	1	0.967	1.971	0.186	
互作 Interaction	0.221	1	0.221	0.450	0.515	
误差 Error	5.890	12	0.491			
总量 Total	10.770	15				

分别选取蒸渗池 6 月 26 日至 27 日、7 月 7 日至 14 日、8 月 4 日至 9 日和 8 月 10 日至 13 日的测定结果,与气孔计测定的日蒸腾量(TL)进行 2 因素方差分析表明:物种间(油蒿和柠条)差异达显著水平($p<0.05$),且油蒿的蒸腾高于柠条的;测定方法间(蒸渗池和气孔计)和互作差异不显著。

2.3 试验期间的蒸发量、蒸腾量和蒸散量

以微型蒸渗仪蒸发测定结果为主推算出了油蒿和柠条样地的蒸发量;用蒸渗池蒸腾测定结果借助公式(1)反推出油蒿和柠条样地的蒸腾量;利用水分平衡观测场油蒿和柠条样地的土壤含水量数据和降水量计算出了两样地的蒸散量,土壤蒸渗仪测定了裸沙的渗漏量和蒸发量,以及观测降水量,图 2 绘出了它们在整个试验期间的累积过程,结果表明:2003 年 6 月、7 月和 8 月的降水量分别为 72.9mm、25.8mm 和 60.4mm,渗漏量分别为 1.4mm、42.5mm 和 4.6mm,裸沙蒸发量分别为 12.6mm、15.2mm 和 35.2mm;油蒿样地的蒸发量分别为 7.7mm、17.7mm 和 28.7mm,蒸腾量为 19.0mm、24.4mm 和 15.6mm,蒸散量为 26.8mm、46.5mm 和 46.1mm;柠条样地的蒸发量分别为 5.6mm、24.1mm 和 30.2mm,蒸腾量为 19.4mm、18.4mm 和 18.7mm,蒸散量为 25.4mm、51.7mm 和 50.5mm。

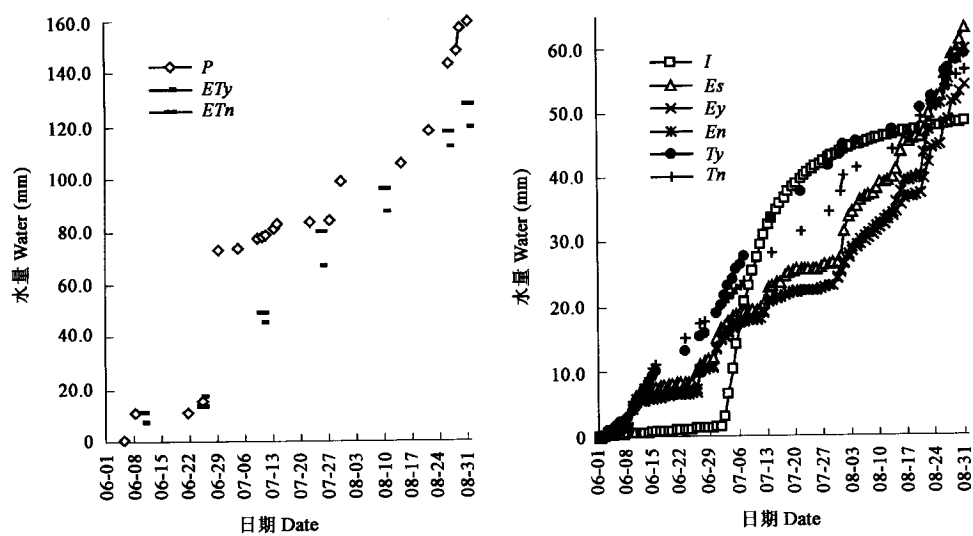


图 2 试验期间的累积降水量、渗漏量、蒸发量、蒸腾量和蒸散量

Fig. 2 The cumulative precipitation, infiltration, evaporation, transpiration and evapotranspiration

P 表示降水量 P means precipitation; I 裸沙渗漏量 I is sand infiltration; E_s 裸沙蒸发量 E_s is sand evaporation; E_y 油蒿样地蒸发量 E_y is evaporation of *A. ordosica*; E_n 柠条样地蒸发量 E_n is evaporation of *C. korshinskii*; T_y 油蒿蒸腾量 T_y is transpiration of *A. ordosica*; T_n 柠条蒸腾量 T_n is transpiration of *C. korshinskii*; E_{Ty} 油蒿样地蒸散量 E_{Ty} is evapotranspiration of *A. ordosica*; E_{Tn} 柠条样地蒸散量 E_{Tn} is evapotranspiration of *C. korshinskii*

3 结论与讨论

(1)土壤蒸发测定结果表明:在沙漠油蒿与柠条人工植被区由于植被比较稀疏,土壤蒸发不受植株的遮阴的影响,但不同样地的蒸发量是有差异的,而样地和位置间的互作差异不显著。通过比较 2 种测定方法说明微型蒸渗仪测定结果同土壤蒸渗仪测定结果存在差异,可能是由于样地间土壤含水量差异所致。微型蒸渗仪测定蒸发应勤于换土^[1~6],避免降水多时(57.5mm)底部的封口对入渗的影响,提高测定精度。

沙漠人工植被区紧接降水之后的土壤蒸发占总蒸发量的比例是很高,降水后柠条样地、油蒿样地和裸沙的日平均蒸发量分别为 2.687、2.763 mm/d 和 2.680 mm/d,无降水时分别为 0.214、0.260 mm/d 和 0.322 mm/d;这与其它研究结果相似,紧接降水之后的土壤蒸发强度高,蒸发量大^[6,7,10]。

(3)蒸渗池测定植物蒸腾过程中,对照流沙处理出现了少量耗水,虽然与油蒿与柠条植被区的总蒸腾量相比不多,但悖于常规;这是由于水分入渗到蒸渗池底部 40cm 厚的砾石层时,中子仪探测不到,从而导致了测定结果的偏高。但这不影响用油毡覆盖测定植物的蒸腾,以往的研究表明沙漠人工植被区从来不发生深层渗漏^[2],这为本研究提供了前提依据。

气孔计测定的蒸腾速率经单位换算统一,用多项式拟合得到日变化曲线均达到显著水平($p < 0.05$);然后对多项式积分进行尺度转换求得日蒸腾量。将蒸渗池和气孔计测定的植物蒸腾转换后进行二因素方差分析,表明物种间(油蒿和柠条)差异达显著水平($p < 0.05$),油蒿的蒸腾高于柠条的;测定方法间(蒸渗池和气孔计)差异不显著;从而说明本研究以叶面积指数和植物冠层盖度为基础进行叶片与种群间的尺度转换是可行的。

(3)以微型蒸渗仪蒸发测定结果为主推算出了油蒿和柠条样地的蒸发量;用蒸渗池蒸腾测定结果借助(1)式反推出油蒿和柠条样地的蒸腾量;利用水分平衡观测场油蒿和柠条样地的土壤含水量数据和降水量计算出了两样地的蒸散量;另外,土壤蒸渗仪测定了裸沙的渗漏量和蒸发量;上述结果表明:2003 年 6 月至 8 月,降水量为 159.1mm,裸沙渗漏量为 48.5mm,裸沙蒸发量为 63.0mm;油蒿样地的蒸发量、蒸腾量和蒸散量分别为 54.1mm、59.0mm 和 119.4mm;柠条样地的蒸发量、蒸腾量和蒸散量分别为 59.5mm、56.4mm 和 127.6mm。

References:

[1] Chen J Y, Wu K. Preliminary analyses for crop water consumption by using lysimeter. *The Journal of Chinese Geography*, 1997, 7(3): 64~71.

[2] Wang X P, Kang E S, Zhang J G, et al. Soil moisture dynamics in an artificially re-vegetated desert area. *Advance in Water Science*,

2003, **15**(2):75~81.

[3] Kang S Z, Liu X M, Xiong Y Z, eds. *Theory of water transport in soil-plant-atmosphere continuum and its application*. Beijing: Chinese Water Conservancy Publishing Company, 1994. 122~147.

[4] Daamen C, Simmonds L P, Wallace J S, *et al.* Use Micro-Lysimeters to measure evaporation from sandy soils. *Agri. And For. Mete.*, 1993, **96**:159~173.

[5] Boast C W, Robertson T M. A micro-lysimeter method for determining evaporation from bare soil; description and laboratory evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, **46**:689~696.

[6] Liu Y, Fernando R M, Pereira L S. Measurement of evaporation from wheat field and bare soil by using micro-lysimeters. *J. Hydrology of China*, 1999, (6):36~39.

[7] Wang H X. Measurement and simulation of evaporation from a bare sand soil. *Chinese Agricultural Meteorology*, 1997, **18**(4):29~35.

[8] Song B Y. Study on evapotranspiration from plant communities of the steppe. *Climatic and Environmental Research*, 1997, **2**(3):222~235.

[9] Baird A J, Wilby R. *Eco-hydrology: Plants and water in terrestrial and aquatic environment*. London and New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 1999.

[10] Berndtsson R, Nodomi K, Yasuda H, *et al.* Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand. *J. Hydrology*, 1996, **185**: 221~240.

[11] He K N, Tian Y, Zang G C. Modeling of the daily transpiration variation in locust forest by Penman-Monteith equation. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(2):251~258.

[12] Su P X, Zhao A F, Zhang L X, *et al.* Characteristic in photosynthesis, transpiration and water use efficiency of *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* of desert species. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2003, **23**(1):11~17.

[13] Yang W B, Ren J M, Jia C P. Study on the relationship between physiological ecology of drought-resistance *Caragana korshinskii* and soil water. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(3):239~244.

[14] Lei Z D, Hu H P, Yang S X. A Review of soil water research. *Advance in Water Science*, 1999, **10**(3):311~318.

[15] Ai X S, Li W H. Research frontiers in some aspects of water sciences. *J. Hydrology of China*, 2002, (7):125~128.

参考文献:

[2] 王新平, 康尔泗, 张景光, 等. 草原化荒漠带人工固沙植丛区土壤水分动态. *水科学进展*, 2003, **15**(2):75~81.

[3] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章, 等著. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用. 北京: 中国水利电力出版社, 1994. 122~147.

[6] 刘钰, Fernando R M, Pereira L S. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究. *水利学报*, 1999, (6):36~39.

[7] 王会肖. 砂土土壤蒸发的测定与模拟. *中国农业气象*, 1997, **18**(4):29~35.

[8] 宋炳煜. 草原群落蒸发蒸腾的研究. *气候与环境研究*, 1997, **2**(3):222~235.

[11] 贺康宁, 田阳, 张光灿. 刺槐日蒸腾过程的 Penman-Monteith 方程模拟. *生态学报*, 2003, **23**(2):251~258.

[12] 苏培玺, 赵爱芬, 张立新, 等. 荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征. *西北植物学报*, 2003, **23**(1):11~17.

[13] 杨文斌, 任建民, 贾翠萍. 柠条抗旱的生理生态与土壤水分关系的研究. *生态学报*, 1997, **17**(3):239~244.

[14] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述. *水科学进展*, 1999, **10**(3):311~318.

[15] 艾学山, 李万红. 水科学若干领域研究前沿. *水利学报*, 2002, (7):125~128.