

液流—株间微型蒸渗仪法测定新疆杨 蒸发蒸腾量适用性分析

屈艳萍^{1,2}, 康绍忠^{2,3}, 王素芬^{2,3}, 孙洪泉¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国农业大学 中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要: 采用液流—株间微型蒸渗仪法测定人工种植环境下新疆杨蒸发蒸腾量, 并对此方法的适用性进行了分析。结果表明: 在生长季 5—10 月, 新疆杨蒸腾量具有明显的季节变化规律, 总蒸发蒸腾量为 508.26 mm, 蒸发量、蒸腾量所占比率分别为 37.1% 和 62.9%; 树干液流速率与叶片蒸腾速率变化表现出较好的一致性, 热脉冲法能够用于新疆杨蒸腾测定; 液流—株间微型蒸渗仪法和水量平衡法测算结果的相对误差在 $\pm 15\%$ 之内, 液流—株间微型蒸渗仪法能够适用于新疆杨蒸发蒸腾量测定。

关键词: 新疆杨; 蒸发蒸腾量; 热脉冲法; 液流—株间微型蒸渗仪法; 水量平衡法; 适用性

中图分类号: S152.7⁺3; S792.117 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)03-0088-07

Applicability analysis for measuring evapotranspiration of *Populus alba* var. by sap flow and micro-lysimeter method

QU Yan-ping^{1,2}, KANG Shao-zhong^{2,3}, WANG Su-fen³, SUN Hong-quan¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Using the Sap flow and Micro-lysimeter methods have measured the evapotranspiration of *Populus alba* var. and analyzed its applicability. The results showed that: The evapotranspiration of *Populus alba* var. has changed seasonally. In the growing season from May to October, the overall evapotranspiration was 508.26 mm, with the proportion of 37.1% and 62.9% for evaporation and transpiration, respectively. The tree trunk sap velocity was in good agreement with the leaf transpiration rate. It was indicated that heat pulse method can be used to measure the transpiration of *Populus alba* var. . The relative error was within $\pm 15\%$ compared the Sap flow and Micro-lysimeter method with the water balance method. So the Sap flow and Micro-lysimeter methods were suitable to measure the evapotranspiration of *Populus alba* var. .

Keywords: *Populus alba* var. ; evapotranspiration; heat pulse method; Sap flow and Micro-lysimeter methods; water balance method; applicability

植物蒸发蒸腾量既是水量平衡中的重要分量, 又是水文循环不可或缺的环节和水管理的有效依据, 因此, 选择合适的方法测定植物蒸发蒸腾量具有非常重要的意义^[1]。目前, 植物蒸发蒸腾量的测定方法按其种类大体可以分为水文学方法(包括水量平衡法和蒸渗仪法等), 微气象学法(包括波文比—能量平衡法、涡度相关法和空气动力学法等), 植物生理学方法(包括液流法、气孔计法等), 红外遥感法等 4 种方法。所谓液流—株间微型蒸渗仪法, 是指通过液流法和微型蒸渗仪法分别测定植物蒸腾量和土壤棵间蒸发量, 进而换算得到植物蒸发蒸腾量的方法。基于热脉冲法操作简单、可连续监测、环境破坏性小、适用范围广等显著优势^[2-9], 本文采用热脉冲液流测定仪测量新疆杨树树干木质部上升液流流动

收稿日期: 2013-11-06
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51209220); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51109211)
作者简介: 屈艳萍(1981—), 女, 湖南茶陵人, 博士生, 高工, 主要从事农业与生态节水理论及技术研究、旱灾及对策研究。E-mail: ququyc@163.com。

速度及流量,从而间接确定其蒸腾耗水量。然而,由于热脉冲法本身及在测定中存在的一些问题^[10-14],以及因植被冠层结构空间变异性、灌水影响致使土壤棵间蒸发也难以准确测定^[15],液流一株间微型蒸渗仪法测定人工种植环境下新疆杨蒸发蒸腾量的适用性及计算精度还有待进一步核实。鉴于水量平衡法是植物蒸发蒸腾量最基本、最经典的测定方法,本研究拟采用此方法对液流一株间微型蒸渗仪法进行检验或校核。

1 试验概况与测定指标

1.1 试验地概况

试验地位于腾格里沙漠边缘的甘肃省武威市石羊河流域农业与生态节水试验站内,北纬 37°52'20",东经 102°50'50",属于大陆性温带干旱气候。该地区光热资源非常丰富,全年日照时数达 3 000 h 以上,无霜期 150 d 以上,年平均气温为 8℃,大于 0℃的积温为 3550℃以上。但是水资源相对匮乏,地下水埋深达 25 ~ 30 m,干旱指数为 15 ~ 25,多年平均降水

量仅为 164.4 mm,而多年平均水面蒸发量约为多年平均降雨量的 12.5 倍,即 2 000 mm 左右。

1.2 试验材料

本研究选用的试验材料为新疆杨。新疆杨 (*Populus alba* var. *Pyramidalis* Bge),属于白杨派,白杨组^[16],是农田防护林和城市绿化的主要树种之一。其树冠呈塔形,树干通直挺拔,树皮光滑、呈灰绿色,叶片呈深绿色,叶背面及叶柄密被绒毛^[17]。它具有喜温、喜光、抗大气干旱等生态特性,且具有生长快、适应性强、抗病虫害等显著优势。

根据长势良好、健康无病虫害的原则,在试验站人工种植园的新疆杨林地选择长势相近的试验树木两株,均为 1998 年栽种,林龄为 7 a,试验树木基本参数见表 1。在全生育期内,对新疆杨林地共进行了 3 次灌水:生长初期的 5 月 8 日夜間进行第一次灌水,灌水量为 150 mm;生长盛期的 6 月 19 日清晨第二次灌水 120 mm;生长中后期的 8 月 8 日为第三次灌水,灌水量为 102 mm。

表 1 试验树木基本参数及探针布置方式
Table 1 The basic parameters and arrangement of probes for the experimental trees

观测年份 Year	树高 Height /mm	胸径 Diameter of trunk /mm	冠幅 Crown width /(mm × mm)	脉冲时间 Pulse duration /s	探针位置 Probe position	探针布置方式 Probe arrangement
2005	700	52	70 × 80	2.0	胸径 Diameter of trunk	南面:5mm、10mm; 北面:5mm、10mm

注:由于两株试验树木长势相近,故有关基本参数取二者的平均值;冠幅是指生长盛期;探针插入深度均指形成层以下的深度。
Note: The basic parameters were measured by the mean of two experimental trees. Crown width was referred to the active growing season. The insert depth of probes were referred to the depth under the cambium.

1.3 测定指标

本试验的主要测定指标有新疆杨树干液流、叶片水平蒸腾速率、林地土壤棵间蒸发量、土壤含水量和降雨量,观测期为 2005 年 5 月 1 日 ~ 10 月 16 日。

1.3.1 树干液流测定 采用 SF200 液流测定仪 (Greenspan Technology, Australia)测定新疆杨树干液流。每株试验树木各安装一套仪器,共计两套,每套仪器有 4 个传感器,其具体布置方式见表 1,取样时间间隔为 30 min,伤口直径为 1.1 mm。

1.3.2 叶片水平蒸腾速率测定 采用 Lci 便携式光合作用测定系统 (ADC BioScientific, England)测定新疆杨叶片蒸腾速率 T_r 。在每株试验树木的东、西、南、北四个方向上,各选取中间层叶片两片,并做好标记进行观测,包括日变化测定 (7:30 ~ 19:30,每隔 2 h 测定 1 次)和定时测定。

1.3.3 土壤棵间蒸发量测定 采用微型蒸渗仪 (Micro-lysimeter, China)测定棵间表土蒸发。在每

株试验树木 1/2 冠幅处,均匀布置 3 个直径为 100 mm、高为 150 mm 的微型蒸渗仪,每天定时 (上午 7:30 ~ 8:00)用精度为 0.01 g 电子天平称重并记录。如有降雨,要扣除降雨量。

1.3.4 土壤含水量测定 采用 TRIME - FM 管式 TDR 系统 (IMKO Micromoduletechink, German)测定新疆杨林地 2.5 m 深土壤体积分含水率,每 10 cm 深度测定 1 次,5 d 为一个测定周期,如有降雨,雨后进行加测。采用挖剖面的方法,测得土壤的容重,并用取土烘干法对管式 TDR 系统测得的土壤含水率进行校正。在新疆杨林地两样木之间,较为均匀地呈线状布置了 3 根 TDR 测管,样木与测管及管与管之间的间距约为 0.8 m。

1.3.5 降雨量测定 利用试验站内自动气象站 (Weather Hawk, Campell Scientific, USA),对降雨量进行同步监测,每 1 h 自动记录数据。

2 研究方法

2.1 液流—株间微型蒸渗仪法测定植物蒸发蒸腾量

日蒸发蒸腾量计算式：

$$ET' = T_r' + E_s' \tag{1}$$

$$T_r' = \frac{SF}{S_T} \tag{2}$$

$$E_s' = \frac{\Delta M}{S_E} \times 10 \tag{3}$$

式中, ET' 为日蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); T_r' 为植物日蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); E_s' 为土壤棵间日蒸发量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); SF 为植物树干日液流量($\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$); S_T 为依据植物种植密度而确定的控制面积, 本研究中新疆杨的控制面积分别为 $1.5 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$; ΔM 为微型蒸渗仪的质量变化($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$); S_E 为微型蒸渗仪蒸发面面积, 本研究中株间微型蒸渗仪直径为 100 mm 。

某时段蒸发蒸腾量计算式：

$$ET = \sum_{i=t_0}^{t_1} ET' \tag{4}$$

式中, ET' 为日蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); ET 为时段 t_0

至 t_1 内的蒸发蒸腾量(mm)。

2.2 水量平衡法估算植物蒸发蒸腾量

水量平衡法的基本原理是根据计算区域内水量的收入和支出的差额来推算植物蒸发蒸腾量, 属于一种间接的测定方法。水量平衡方程式如下：

$$ET = I + P + W - D - \Delta W \tag{5}$$

$$\Delta W = (\theta_{t_1} - \theta_{t_0}) \times h \tag{6}$$

式中, ET 为时段 t_0 至 t_1 内的蒸发蒸腾量(mm); P 为降雨量(mm); I 为灌水量(mm); W 是地下水补给量, 由于本研究中试验所在地地下水位非常深, 地下水埋深达 $25 \sim 30 \text{ m}$, 故忽略不计; D 为深层渗漏量, 忽略不计; ΔW 为时段 t_0 至 t_1 内土壤含水量的变化(mm); θ_{t_0} 、 θ_{t_1} 分别为时段初、末的体积含水量(%); h 为水量平衡计算深度。

3 结果与分析

3.1 液流—株间微型蒸渗仪法测定新疆杨蒸发蒸腾量

人工种植环境下, 液流—株间微型蒸渗仪法测定的新疆杨蒸腾量及林地土壤棵间蒸发量逐日变化情况如图 1 所示。

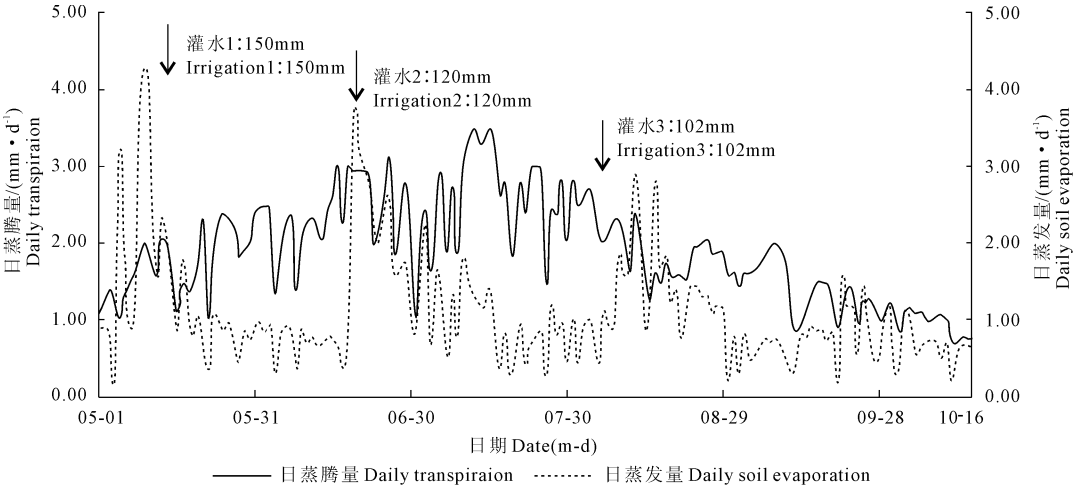


图 1 试验期间新疆杨蒸腾量和蒸发量日际变化(2005 年)

Fig.1 Daily variations of transpiration and evaporation of *Populus alba*. var. in 2005

由图 1 可见, 新疆杨蒸腾量具有明显的季节变化规律, 呈现出抛物线型, 这是新疆杨生长动态过程、气象因素以及土壤水分条件综合作用的结果。5 月和 6 月, 尤其是 6 月, 新疆杨新梢、叶片的生长速率最快, 叶面积指数迅速增加, 再加上气象因素的促进作用以及灌水使土壤水分条件得到较大改善, 蒸腾量处于明显增加阶段; 而 7 月, 新疆杨基本上进入生长停止阶段, 其冠层结构处于相对稳定时期, 其蒸腾量的总体水平最高, 但是由于 7 月底、8 月初即将

步入其生育阶段的中后期, 因而蒸腾量的变化也处于一个过渡期, 即前期略微增大, 后期逐渐表现为下降趋势; 8 月之后, 新疆杨叶片已略显老化特征, 且相比于其它月份, 8 月阴雨天气最为频繁, 月累计降雨量为生育期各月内最大, 因此, 即便有灌水, 蒸腾量仍处于显著下降阶段; 9 月, 叶片渐渐变黄, 并伴有凋零现象, 叶面积指数减小, 再加上气温逐渐降低等对植物蒸腾的抑制作用, 蒸腾作用继续削弱; 而 9 月底、10 月初, 新疆杨基本上已处于末期, 此外, 频

繁的霜降天气致使叶片迅速凋落,到 10 月上旬已基本落叶完毕,蒸腾作用已相当微弱。林地棵间蒸发量,在灌水后一段时间内处于相对较高的水平,而后随着土壤逐渐变干燥,棵间蒸发维持在低而稳定的水平阶段,但在雨后的晴天仍有较大幅度的增加。全生育期内,新疆杨各月月累计蒸发蒸腾量如图 2 所示,全生育期内日平均蒸腾量和蒸发量分别为 $1.82\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $1.07\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,5—10 月总的蒸腾量、蒸发量及蒸发蒸腾量分别为 319.89 mm、188.37 mm 和 508.26 mm,蒸发量、蒸腾量所占比率分别为 37.1% 和 62.9%。

3.2 热脉冲法测定新疆杨树干液流的适用性分析

本研究中,试图采用热脉冲法精确测算新疆杨树干液流来估算植株蒸腾耗水情况,而树干液流速率与叶片水平的蒸腾速率的关系又是如何呢? 很大程度上来讲,这项研究的结果可以用来定性、粗略

地判定热脉冲法测定新疆杨蒸腾量的可靠性。

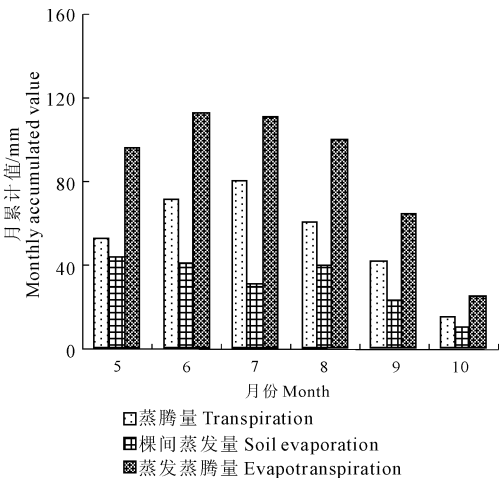


图 2 月累计蒸腾、蒸发及蒸发蒸腾量
Fig.2 Monthly accumulated transpiration, evaporation and evapotranspiration

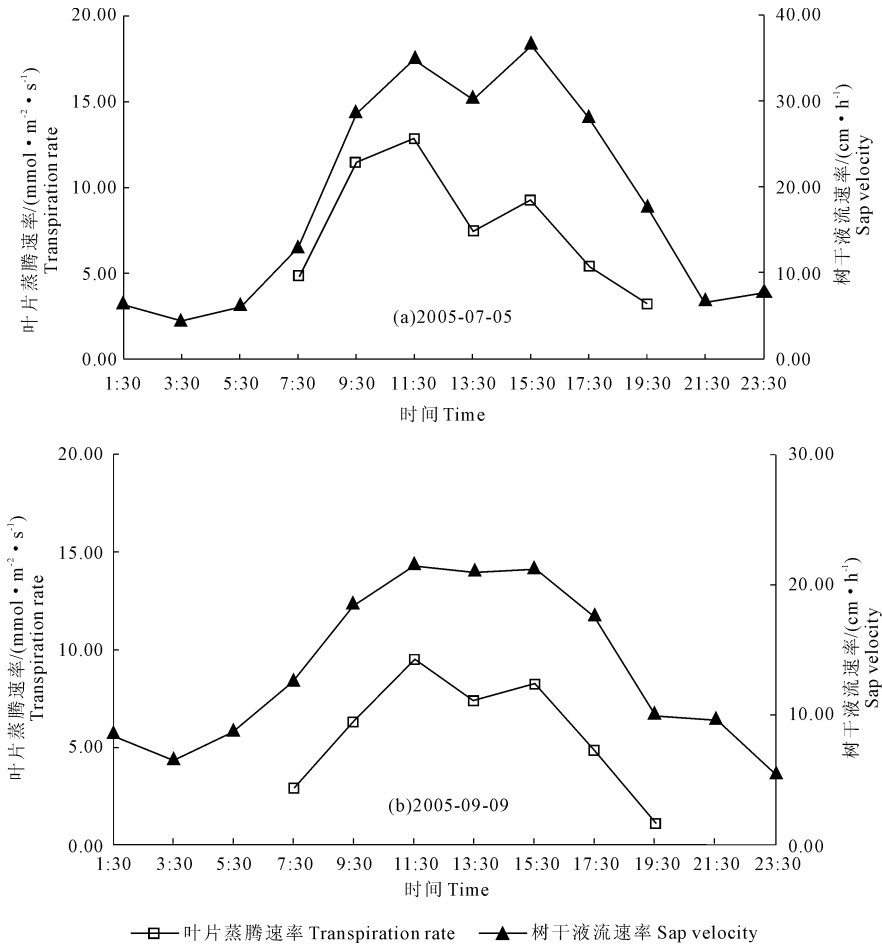


图 3 新疆杨叶片蒸腾速率与对应时刻树干液流速率日变化

Fig.3 The diurnal variation of leaf transpiration rate and sap velocity at corresponding time

在 2005 年试验期间,分别于 7 月 5 日和 9 月 9 日对新疆杨叶片蒸腾速率等进行了日变化测定,测定时段为 7:30~19:30,每 2 h 一次。由图 3 可见,

新疆杨叶片蒸腾日变化呈现为双峰型,存在显著的“午休”现象,峰值分别出现在 11:30 和 15:30 左右,峰谷则出现在气温最高、辐射最强的 13:30 左右。

以 2 h 为时间步长,将对应时刻的树干液流速率绘于同一图中,结果表明:叶片蒸腾速率和树干液流速率日变化规律具有较好的一致性。

此外,还于 2005 年 5 月 23 日、6 月 19 日、6 月 20 日、6 月 21 日、6 月 24 日、6 月 26 日、7 月 5 日、7 月 25 日、8 月 10 日及 9 月 9 日等 10 个测定日,对新疆杨上午 9:30 左右的叶片蒸腾速率进行了定时测定,并将对应时刻的树干液流速率一同绘于图 4 中,结果表明两者变化趋势大体相同。为了更直观地说明新疆杨树干液流速率与叶片蒸腾速率之间的关系,分别以日变化测定和定时测定的数据为依据,可得如图 5(a)、(b) 相关关系图,相关系数分别为 0.6385 和 0.7556。综上所述,新疆杨树干液流速率与叶片蒸腾速率表现出较好的一致性,换言之,热脉

冲法能够用于新疆杨蒸腾测定。

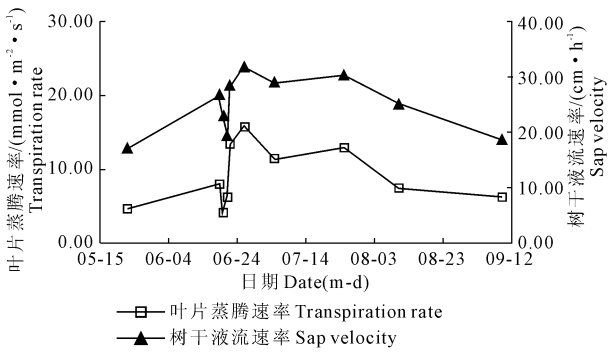
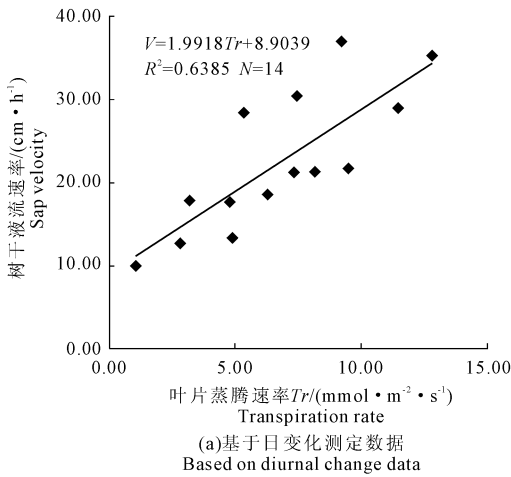
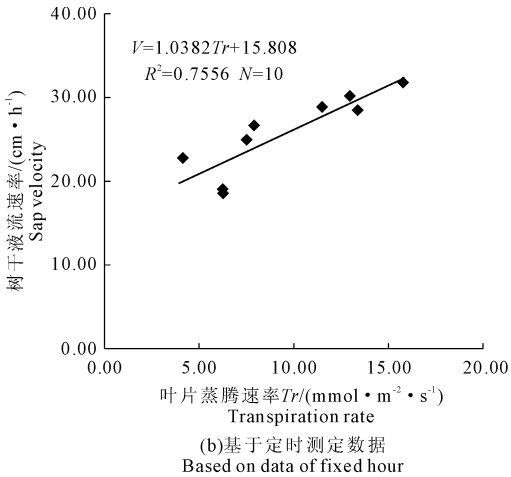


图 4 新疆杨叶片蒸腾速率与对应时刻树干液流速率季节变化

Fig.4 The seasonal variation of leaf transpiration rate and sap velocity at corresponding time



(a)基于日变化测定数据
Based on diurnal change data



(b)基于定时测定数据
Based on data of fixed hour

图 5 新疆杨叶片蒸腾速率与对应时刻树干液流速率相关关系

Fig.5 Correlativity of leaf transpiration rate and sap velocity at corresponding time

3.3 液流—株间微型蒸渗仪法测定新疆杨蒸发蒸腾量的适用性分析

在 3.2 中,已定性地粗略判断热脉冲液流法可用于测定新疆杨蒸腾量,但为了进一步分析液流—株间微型蒸渗仪法测定新疆杨蒸发蒸腾量的适用性,并定量估计此方法的精度,本文采用传统的、经典的水量平衡法加以验证。

3.3.1 新疆杨林地土壤含水量变化规律 在全生育期内,对新疆杨林地共进行了 3 次灌水,分别于 5 月 8 日、6 月 19 日、8 月 8 日灌水 150 mm、120 mm 和 102 mm,共计灌水 372 mm。试验期间,新疆杨林地 0 ~ 100 cm、110 ~ 200 cm、210 ~ 250 cm 这 3 个土层内的平均含水量随时间的动态变化过程如图 6,结果表明 0 ~ 100 cm 土层内土壤水分变化最为剧烈,110 ~ 200 cm 则变化相对平缓,而 210 ~ 250 cm 土壤含水量除去较为微小的波动之外,基本上可视为不变。因此,在进行新疆杨林地水量平衡计算时,计算深度

h 取 200 cm。图 7 所示的是整个 200 cm 土层内土壤平均含水量随时间的动态变化规律,全生育期土壤平均体积含水量为 25.4%,3 次灌水后土壤水分的平均消耗速率分别为 $3.50 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $3.19 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1.66 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

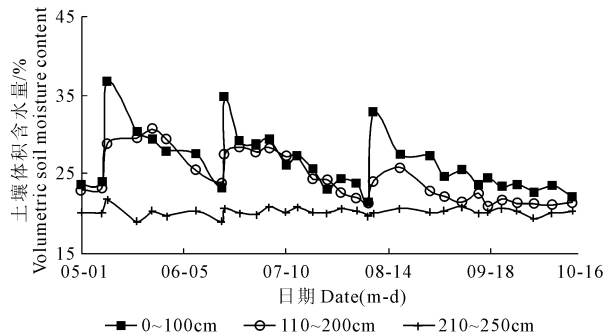


图 6 2005 年各土层平均体积含水量动态变化

Fig.6 The dynamic variation of mean volumetric soil moisture content within soil layers in 2005

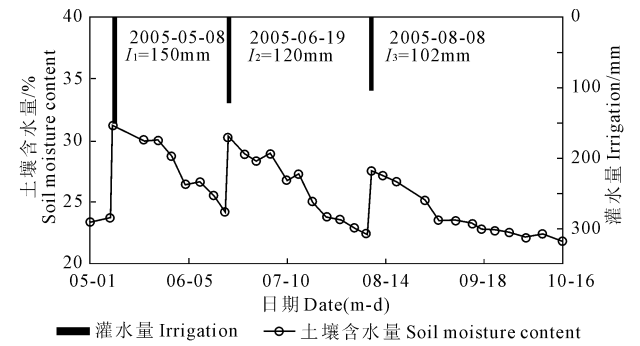


图 7 2005 年 0 ~ 200 cm 土层内土壤平均含水量动态变化规律

Fig.7 The dynamic variation rule of mean soil water content within 0 ~ 200 cm soil layer in 2005

表 2 液流一株间微型蒸渗仪法和水量平衡法计算累计蒸发蒸腾量的对比

Table 2 Comparison between cumulative evapotranspiration measured by Sap flow—Micro-lysimeter and water balance method									
计算时段 Calculation interval	液流一株间微型蒸渗仪法/mm Sap flow and Micro-lysimeter method			水量平衡法/mm Water balance method				绝对误差 Absolute error	相对误差 Relative error
	T_r	E_s	ET_{SL}	I	P	$\triangle W$	ET_{WB}	/mm	/%
5 月 9 日 ~ 6 月 18 日	82.8	47.1	129.8	0	11	- 140.3	151.3	- 21.5	- 14.2
6 月 19 日 ~ 8 月 7 日	126.7	65.1	191.8	0	21	- 156.2	177.2	14.6	8.2
8 月 9 日 ~ 10 月 16 日	97.6	66.1	163.7	0	56	- 112.8	168.8	- 5.1	- 3.0
4 月 30 日 ~ 10 月 16 日	319.9	188.5	508.4	372	96	- 29.0	497.0	11.4	2.3

注:表 2 中 ET_{SL} 和 ET_{WB} 分别代表液流一株间微型蒸渗仪法和水量平衡法所得蒸发蒸腾量。

Note: ET_{SL} and ET_{WB} in Table 2 represented the evapotranspiration measured by Sap flow—Micro-lysimeter method and the water balance method, respectively.

4 讨 论

本研究中,人工种植环境下新疆杨全生育总蒸腾耗水量为 319.89 mm,这与申登峰^[18]、Meiresonne^[19]等人的研究结果较为一致。申登峰等研究表明,胸径为 5.7 cm、树高 9.3 m、林龄 7 a 的新疆杨全生育期内总蒸腾耗水量为 314.2 mm。Meiresonne 在比利时东佛兰德省用液流测定技术测得毛果杨×美洲黑杨杂种 (*Populus trichocarpa* × *P. deltoides*) 生长季的总蒸腾量为 320 mm,约占潜在蒸发蒸腾量的 70%。张小由^[20]等对黑河下游胡杨林耗水规律的研究表明,平均高为 10 m、胸径为 12 cm、林龄为 25 a 的胡杨生长季蒸腾耗水总量为 213.4 mm,较本文新疆杨少 106.49 mm,导致这一差异的可能原因有以下几个方面:(1) 品种差异:新疆杨和胡杨虽均为杨柳科杨属植物,且均为低水势忍耐脱水耐旱树种^[21],但胡杨的耐干旱能力较新疆杨要强很多^[22]。(2) 生长环境差异:本试验是在人工种植环境下进行的,试验期间多次对新疆杨进行灌水,故水分条件得到较大改善,而张小由等的试验是在天然条件下进行的,胡杨可利用的水仅有天然降

3.3.2 液流一株间微型蒸渗仪法和水量平衡法确定新疆杨蒸发蒸腾量的比较分析 以灌水之日为计算时段的分割点,通过液流一株间微型蒸渗仪法和水量平衡法分别计算新疆杨蒸发蒸腾量,计算结果如表 2 所示。结果显示,液流一株间微型蒸渗仪法可能高估新疆杨蒸发蒸腾量,也可能低估其值,两种方法的 最大和最小绝对误差分别为 21.5 mm 和 5.1 mm,相对误差在 ± 15% 之内。总体来说,液流一株间微型蒸渗仪法与水量平衡法计算结果具有较好的一致性,此方法能够适用于人工种植环境下新疆杨蒸发蒸腾量测定中。

水和地下水。刘家琼的研究表明,旱生植物仅在干旱时期保持低蒸腾以节约用水,而当水条件改善时它们便大量蒸腾,加速生长^[23]。(3) 林龄差异:张小由等的试验怪胡杨林龄为 25 a,而本试验中新疆杨的林龄仅为 7 a,正处在生长的旺盛时期,根系吸水机能较强。

本研究中,新疆杨树干液流速率与叶片蒸腾速率表现出较好的一致性,粗略判断热脉冲法能够用于新疆杨蒸腾测定,而后,又用经典的水量平衡法对液流一株间微型蒸渗仪法进行适用性分析,认为此方法可用于人工种植环境下新疆杨耗水规律研究。Nish 等^[24]利用水量平衡法和热脉冲法估算 San Pedro 河畔植物的蒸散,指出在一定的误差范围之内,两种方法计算结果具有较好地一致性。此外, Fernández 等^[25]、Giorio 等^[26]利用热脉冲技术对橄榄树液流进行研究,指出此技术在橄榄树液流测定具有有效性;刘奉觉等^[27]用该技术测定了两年生与六年生 1269 杨树树干的液流动态,并与快速称重法和 Penmen—Monteith 微气象法相比较,取得了较为满意的结果。由以上研究可见,热脉冲液流法用于估测蒸腾耗水的有效性在大量的树种中得到了证实。

5 结 论

1) 在生长季 5—10 月,人工种植环境下新疆杨蒸腾量具有明显的季节变化规律,日平均蒸腾量和蒸发量分别为 $1.82\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $1.07\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,总蒸腾量、蒸发量及蒸发蒸腾量分别为 319.89 mm 、 188.37 mm 和 508.26 mm ,蒸发量、蒸腾量所占比率分别为 37.1% 和 62.9%。

2) 新疆杨叶片蒸腾日变化呈现为双峰型,存在显著的“午休”现象,树干液流速率与叶片蒸腾速率表现出较好的一致性,热脉冲法能够用于新疆杨蒸腾测定。

3) 液流—株间微型蒸渗仪法和水量平衡法测算新疆杨蒸发蒸腾量时,两种方法之间最大、最小绝对误差分别为 21.5 mm 和 5.1 mm ,相对误差在 $\pm 15\%$ 之内,计算结果具有较好的一致性,表明液流—株间微型蒸渗仪法能够适用于人工种植环境下新疆杨蒸发蒸腾量测定。

参 考 文 献:

[1] 屈艳萍,康绍忠,张晓涛,等.植物蒸发蒸腾量测定方法的述评[J].水利水电科技进展,2006,26(3):72-77.

[2] Zimmernann M H. Xylem structure and the ascent of sap[M]. Spinger-verlag Berlin, Heideberg, 1983.

[3] Huber B. Beobachtung und measuring proflige sap flow[J]. Rtsch Bot Ges Ber, 1973,50:89-109.

[4] Huber B, Schmidt E. A compensation method for thermoelectric measurement of slow sap flow (in German)[J]. Berichte der Deutschen Gesellschaft, 1937,55:514-529.

[5] Marshall D C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport[J]. Plant Physiology, 1958,33(6):385-396.

[6] Swanson R H, Whitefield D W A. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice[J]. Journal of Experimental Botany, 1981,32:221-239.

[7] Edwards W R N, Warwick N W N. Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat pulse technique and Penman-Monteith equation[J]. New Zealand Journal of Agriculture Research, 1984,27:537-543.

[8] Hatton T J, Catchpole E A, Vertessy R A. Integration of sap flow velocity to estimate plant water use[J]. Tree Physiology, 1990,6(2):201-209.

[9] Thomas J. Hatton. Integration of sap flow velocity in elliptical stems[J]. Tree Physiology,1992,11:185-196.

[10] 龚道枝.苹果园土壤—植物—大气系统水分传输动力学机制

与模拟[D].杨凌:西北农林科技大学,2005.

[11] Lu Ping, Laurent URBAN, Zhao Ping. Granier's thermal dissipation probe(TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. Acta Botanica Sinica, 2004,46(6):631-646.

[12] Braun P, Schmid J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.) 1. Stem morphology and use of the heat balance method[J]. Plant and Soil, 1999,215:39-45.

[13] Braun P, Schmid J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.) 2. Granier measurements[J]. Plant and Soil, 1999,215:47-55.

[14] Zang D Q, Beadle C L, White D A. Variation of sapflow velocity in *Eucalyptus globulus* with position in sapwood and use of a correction coefficient[J]. Tree Physiology, 1996,16:697-703.

[15] Testi L, Villalobos F J, Orgaz F. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004,121:1-18.

[16] 张永诚,张联珠,郭永盛,等.优良树种——新疆杨[J].内蒙古林业科技,1995,(4):52-56.

[17] 王晶莹,杨文斌,姚建成,等.万家寨能源基地不同立地类型对新疆杨生长的影响[J].内蒙古林业科技,2003,(1):45-47.

[18] 申登峰,周晓雷,闫月娥,等.绿洲防护林体系主要造林树种蒸腾特征研究[J].甘肃林业科技,2003,28(1):1-6.

[19] Meiresonne L, Nadezhdinb N, Cermakb J, et al. Measured sap flow and simulated transpiration from a poplar stand in Flanders (Belgium)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999,96:165-179.

[20] 张小由,康尔泗,司建华,等.黑河下游胡杨林耗水规律研究[J].干旱区资源与环境,2006,20(1):195-197.

[21] 张建国,李吉跃.北方主要造林树种耐旱机理及其分类模型的研究——叶保水力及维持膨压[J].河北林学院学报,1995,10(3):187-193.

[22] 曾凡江,宋 轩.新疆绿洲杨树的生理生态学研究展望[J].应用生态学报,2000,11(5):780-784.

[23] 刘家琼,蒲锦春,刘新民,等.我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[J].植物学报,1987,29(6):662-673.

[24] Nish R D Mac, Unkrich C L, Evelyn Smythe, et al. Comparison of riparian evapotranspiration estimates based on a water balance approach and sap flow measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000,105:271-279.

[25] Fernández J E, Palomo M J, D^r az-Espejoa A, et al. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress[J]. Agricultural Water Management, 2001,51:99-123.

[26] Giorio P, Giorio G. Sap flow of several olive trees estimated with heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003,49:9-20.

[27] 刘奉觉,郑世锴,巨关升.用热脉冲速度记录仪(HPVR)测定树干液流[J].植物生理学通讯,1993,29(2):110-115.