

# 新疆杨树杆液流密度轴向差异的初步研究

党宏忠<sup>1</sup>, 李 卫<sup>1</sup>, 李永华<sup>1</sup>, 莫保儒<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所,北京 100091;2. 甘肃省林业科学研究院,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**利用热扩散技术(TDP)分别监测新疆杨冠基部、杆基部处液流密度的变化,并结合同步气象观测,分析液流密度与大气蒸发潜力( $ET_0$ )的关系,结果表明:典型晴天日,新疆杨树冠、杆基部的液流密度日变化格局总体上与大气蒸发潜力相一致,但前者与 $ET_0$ 的相关性更强,可用 Hill 函数式得到较好的拟合,而后者与 $ET_0$ 间呈斜率不等的线性关系;在午间,冠基部液流密度是杆基部的3倍以上,在清晨,冠基部液流比杆基部液流提前平均约1 h启动。冠、杆基部边材液流间的“净”量因季节而异,在生长旺盛的7、8月份略有“亏损”,而在6、9月份略有“盈余”,新疆杨单株日吸收水分量与冠层日失水量并不完全一致。6—9各月冠基部液流日平均通量一般呈晴天>云天>阴天的规律,这与太阳辐射及大气蒸发潜力的变化格局相一致,而基部液流有时会呈现出云天>晴天的趋势。

**关键词:**新疆杨;液流密度;轴向差异;热扩散技术

中图分类号:S715.4

文献标识码:A

## Difference of Sap Flow Rate of *Populus bolleana* Lauche along Trunk Axial Direction

DANG Hong-zhong<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LI Yong-hua<sup>1</sup>, MO Bao-ru<sup>2</sup>

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Gansu Academy of Forestry, Lanzhou 730000, Gansu, China)

**Abstract:** The change of sap flow rate along axial direction of trunk is considered to be the important evidence that water storage is involved in internal sap flow circulation. Based on monitoring sap flow rate at both crown base and stem base of half-mature *Populus bolleana* Lauche during the main growth season with thermal dissipation probe technique (TDP), the relationship between sap flow rate ( $J_s$ ) at two typical position and atmospheric evaporation potential ( $ET_0$ ) obtained with synchronous meteorological elements was analyzed. It was found that the diurnal variation pattern of sap flow rate at both crown ( $J_{s,u}$ ) and stem bases ( $J_{s,d}$ ) were consistent with  $ET_0$  in typical sunny days, but the former had more close correlation with  $ET_0$ , which fitted well with the Hill function formula, while that between the latter and  $ET_0$  presented linear relation with different slopes. At noon,  $J_{s,u}$  could be three times of  $J_{s,d}$ , and started about 1 hour earlier than the latter in the early morning. The “net” sap flux between  $J_{s,u}$  and  $J_{s,d}$  changed with season, and was in a slight water-lose status in July and August but a slight water-surplus in June and September instead. Daily total amount of absorbed water was not completely consistent with water loss of crown. The average daily sap flux computed by  $J_{s,u}$  from June to September was in the sequence of sunny > cloudy > overcast, which was consistent with solar radiation and  $ET_0$ , while sap flux computed by  $J_{s,d}$  sometimes was cloudy > sunny, showing the traits of leveling water stress by accelerated water-absorption in cloudy days for mid-serious atmospheric stress.

**Key words:** *Populus bolleana* Lauche; sap flow rate; axial difference; thermal dissipation probe technique(TDP)

利用热技术来监测树杆液流密度已经成为揭示树木水分利用机制、估算单株、林分蒸腾耗水量的重要手段之一<sup>[1-3]</sup>。研究发现,树木边材液流密度存在着径向差异、方位差异的同时,还可能存在着轴向上的差异<sup>[4-5]</sup>,轴向差异与树木的抗旱机理紧密相关,因为树木日蒸腾耗水量的 7%~15% 可能来自于树杆贮存水分<sup>[6-7]</sup>。目前,有关树杆液流的轴向差异是否具有普遍性,或者在何种条件下诱发,尚未有明确的结论。为此,本文将我国北方优良防护树种新疆杨(*Populus bolleana* Lauche)为研究对象,通过在树杆的 2 个典型高度处(树冠基部、树杆基部)分别安装热扩散探针(TDP)<sup>[8-9]</sup>,连续监测新疆杨单株在整个生长季内的液流密度,以辨识新疆杨液流密度在轴向可能存在的差异及其规律。研究已发现,气象因子(太阳辐射、大气水汽压亏缺等)对液流密度的影响远比土壤水分等因子灵敏<sup>[10-11]</sup>,大气蒸发潜力( $ET_0$ )被认为是在驱动液流变化的因子中表达大气蒸发需求的可靠的综合变量<sup>[12]</sup>,据此,本研究还将结合对同步气象因子的观测,分析冠基部( $J_{s,u}$ )、杆基部( $J_{s,d}$ )液流密度之间的关系,揭示产生轴向差异的机理,这将对于进一步认识树木利用体内贮存水分、应对大气干旱的策略具有重要意义。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于黄土丘陵沟壑第 V 副区的甘肃省定西市石家岔流域,地理位置 35°43'N, 104°39'E, 属中温带半干旱区,平均海拔 2 218 m,多年平均降水量 427 mm,年内分配极不均匀,主要集中在 7、8、9 月份。多年平均气温 7 °C,年均  $\geq 5$  °C 活动积温 2 933.5 °C,年均  $\geq 10$  °C 活动积温 2 239.1 °C,年日照时数 2 409 h,无霜期为 141 d。土壤类型为黄绵土,流域内土地利用类型以梯田、林地、荒山草地为主,灌木为柠条(*Caragana korshinskii* Kom.),乔木为新疆杨、山杏(*Prunus sibirica* L.),这些树种适应性强,长势良好。

### 1.2 研究方法

1.2.1 材料选择 对新疆杨水土保持人工林(农田地边同一年单行栽植,株距 3 m)选择 30 株进行每木检尺,调查胸径(围尺)、树高(标尺)、冠高(标尺)。调查结果显示,林分平均胸径为(13.40 ± 0.2) cm,平均树高(6.16 ± 0.40) m,冠高(1.98 ± 0.40) m。由于立地条件基本一致,胸径生长量差异

较小,加上 TDP 探针线长的限制,本研究中选择了树杆通直、生长旺盛的一株为试验材料来连续测定其不同高度处液流通量的变化。样株胸径、树高分别为 13.32 cm 和 6.10 m,在冠基部与杆基部选定位置做好标记,量取所在位置的高度、直径(表 1)。调查结束后用生长锥分别钻取相应位置处南北、东西向的木芯,用千分尺分别测量皮、韧皮部,边材、心材宽度并计算边材面积。

表 1 新疆杨样株基本情况

探针位置	距地面高度/m	树杆直径/cm	边材面积/cm <sup>2</sup>
冠基部	4.16	8.91	42.37
杆基部	0.43	14.64	134.49

1.2.2 TDP 安装与测定 采用 Granier 原理设计的热扩散探针(TDP),分别在树杆上的冠基部与杆基部位置的正南方位安装,探针直径 1.2 mm,加热电阻 55 Ω,加热电压为 2.0 V。该类型探针用于林木液流测定的可靠性评述见文献[8,13]。安装时间为 2011 年 4 月 27 日,安装、隔热、防水等步骤见文献[13-14]。采用 220 V 交流转接 12 V 铅酸蓄电池连续供电,数据采集间隔时间为 30 s,每隔 5 min 钟记录 1 次平均值(英国 SQ2020 数采器),调试运行正常后记录 6—9 月数据。液流密度( $J_s, g \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$ )的计算采用 Granier<sup>[9]</sup>公式,  $\Delta T_{max}$  时间步长根据文献[9,13]确定为 7 d。

1.2.3 环境要素的测定与记录 选择距林分约 50 m 的空旷地安装 RR-9150 型五要素自动小型气象站,环境要素测定的类目及传感器类型主要包括:太阳辐射(AV-20P 传感器,  $W \cdot m^{-2}$ , 精度: ±5%), 大气温度、湿度(AV-S3TH, 精度分别为 ±0.2 °C 和 ±2%), 风速(AV-30WS,  $m \cdot s^{-1}$ , 精度: ±0.5  $m \cdot s^{-1}$ ), 雨量(AV-3665, mm, 精度: ±2%, 分辨率: 0.2 mm), 各传感器安装高度为 2 m, 数据采集、记录间隔时间同 TDP。

1.2.4 大气蒸发潜力( $ET_0$ )计算  $ET_0$  根据 FAO Penman-Monteith 方法计算(式(1)),在以天为步长计算  $ET_0$  时,参数的选择  $C_n = 900$ ,  $C_d = 0.34$ ; 在以小时步长的计算中,  $C_n = 37$ ,  $C_d$  的取值在白天(6:00—20:00)为 0.24, 晚间(21:00—5:00)为 0.96。土壤热通量  $G$  的计算按照以小时为时间尺度计算时的精度要求,以固定系数乘以净辐射计算而得,该系数在白天、晚间分别取 0.5 和 0.1<sup>[15-16]</sup>。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{c}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d \times U_2)} \quad (1)$$

式中:

- $R_n$ :地表净辐射( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ );  
 $G$ :土壤热通量( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ );  
 $T$ :2 m 高处日平均气温( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $U_2$ :2 m 高处风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  
 $e_s$ :饱和水气压( $\text{kPa}$ );  
 $e_a$ :实际水气压( $\text{kPa}$ );  
 $\Delta$ :饱和水气压曲线斜率( $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  
 $\gamma$ :干湿表常数( $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  
 $C_n$ 、 $C_d$ :根据时间步长变化的常数。

### 1.3 数据分析

采用 OriginPro 8.6 中的线性与非线性拟合方法建立各指标变量间的回归关系及统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 树杆不同高度处液流密度日变化格局的比较

在2011年主要生长季6—9月的连续测定中,选择典型晴天日(36 d)的数据进行统计分析,结果显示(图1):新疆杨冠基部( $J_{s,u}$ )、杆基部( $J_{s,d}$ )边材液流密度均表现出与大气蒸发潜力( $ET_0$ )相一致的日变化格局,表明大气蒸发对供试新疆杨单株液流强劲的驱动,也说明树杆边材内水分上传的连续性;但是,在白天(6:00—20:00), $J_{s,u}$ 随升降而变化的速率要远高于 $J_{s,d}$ , $ET_0$ 在接近日最高值( $(0.65 \pm 0.10) \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )的13:00时, $J_{s,u}$ 达到一日中的最高值( $(18.49 \pm 2.90) \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),是该时刻 $J_{s,u}$ 值的3倍;而在夜间(21:00—5:00),由于大气蒸发潜力较弱( $\leq 0.04 \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),边材液流密度均低于 $1.5 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,以上变化反映了大气蒸发与液流变化间较强的关联性;但是,在日落后至午夜的时段内(21:00—0:00), $J_{s,d}$ 反而超过 $J_{s,u}$ ,这个过程树木体内水分“净”增加,从而维持了体内水分的平衡,到了午夜1:00后,冠基部液流又逐渐恢复了先前相对较高的水平(图2),加快补充冠层在日间的失水。

### 2.2 树杆不同高度处液流密度对大气蒸发驱动响应的差异

大气蒸发潜力( $ET_0$ )是描述驱动树木液流变化气象因子的很好的综合纯量。图3表明:新疆杨树杆冠基部液流密度的变化与 $ET_0$ 间并非呈线性关系,在整个白天(图3a)或上、下午时段(图3c、d),这种关系均可以用 Hill 函数(式(2))得到较好地拟合(图3),但在不同时段其关联性存在差异。上午

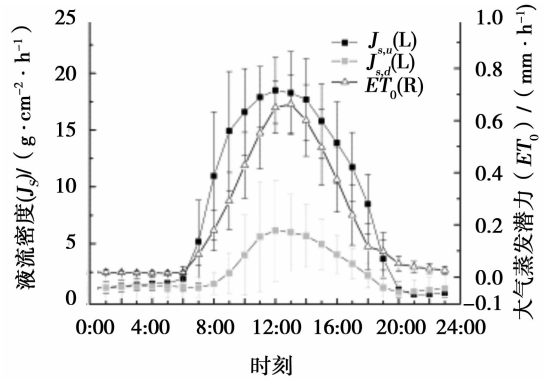


图1 典型晴天日新疆杨冠基部( $J_{s,u}$ )、杆基部( $J_{s,d}$ )液流密度日变化

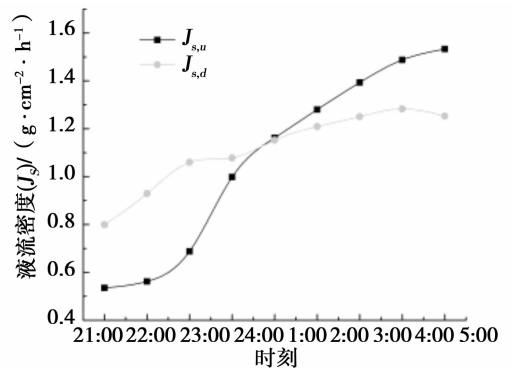


图2 夜间冠基部( $J_{s,u}$ )、杆基部( $J_{s,d}$ )液流密度比较

时段(6:00—12:00), $J_{s,u}$ 与 $ET_0$ 均处于快速上升时期,二者之间的关联更加紧密,而于下午时段(13:00—20:00),其相关性下降,这可能与液流达到峰值后的“迟滞”效应有关<sup>[17]</sup>,液流在达到峰值后的一段时间内尽管大气蒸发需求下降,但液流密度并不同步下降,而是保持一段时间,这种效应削弱了其 $ET_0$ 间的关联性。

$$J_s = J_{\max} \frac{ET_0^n}{k^n + ET_0^n} \quad (2)$$

式中: $k$ 、 $n$ 、 $J_{\max}$ 为参数,其中 $J_{\max}$ 是 $J_s$ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )随 $ET_0$ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )变化的最大值。

在生长季的不同阶段(6—9月),新疆杨冠基部液流与大气蒸发潜力的关系均较紧密(图4),即便试验期间仅有66.4 mm的降水,但6—9月液流密度最大值仍有较小幅的增加(各月分别为15.40、17.81、20.86、21.66  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),这种趋势是源于生理活动的逐渐加强还是降水的累积效应目前尚不能明确辨识,但可以看出新疆杨在干旱年份整个生长季均能保持较强的液流传输能力,这可能是新疆杨在干旱、半干旱区广泛适生的主要

原因之一。

与冠基部液流不同,  $J_{s,d}$  与  $ET_0$  的关系并不十分明确, 但可以看出在 6、7 月份, 液流密度几乎不随大气蒸发潜力的加强而增加, 杆基部液流表现出“脱离”大气蒸发驱动的姿态, 这可能是较低的土壤水分状况及较高的体内贮存水分共同作用的结果。到了

8 月份, 大气蒸发潜力对杆基部液流的驱动逐渐变得紧密, 到了 9 月份这种关系更趋明显 (图 3), 这可能与 8、9 月份连续降水使土壤水分得到较大的改善有关, 同时也与旺盛的蒸腾引起体内贮存水分下降, 加速吸水维持体内水分平衡有关。

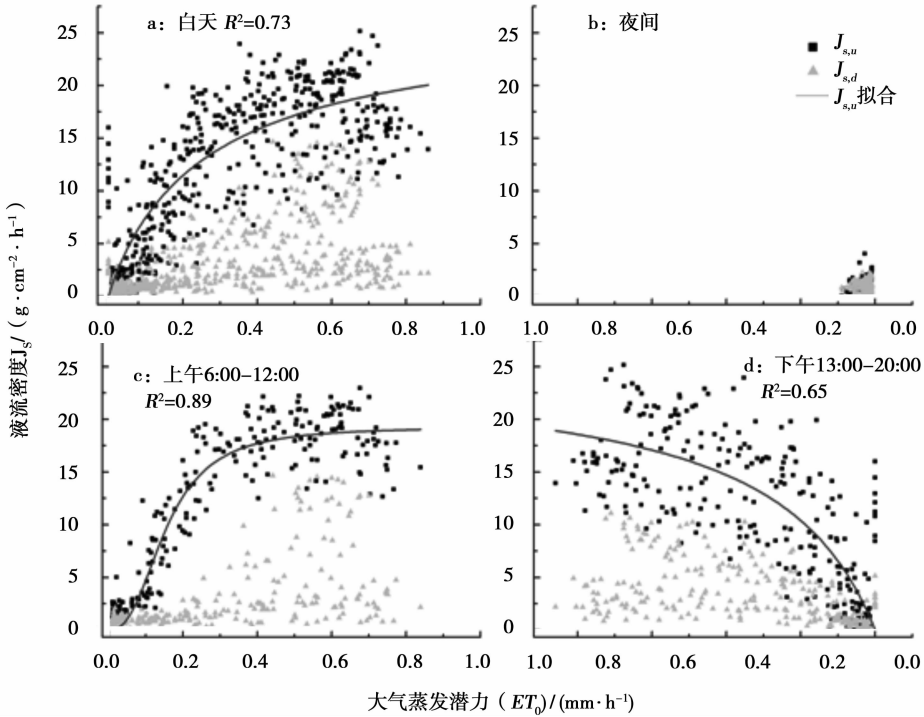


图3 晴天不同时段新疆杨冠基部 ( $J_{s,u}$ )、杆基部 ( $J_{s,d}$ ) 边材液流密度与大气蒸发潜力 ( $ET_0$ ) 的关系

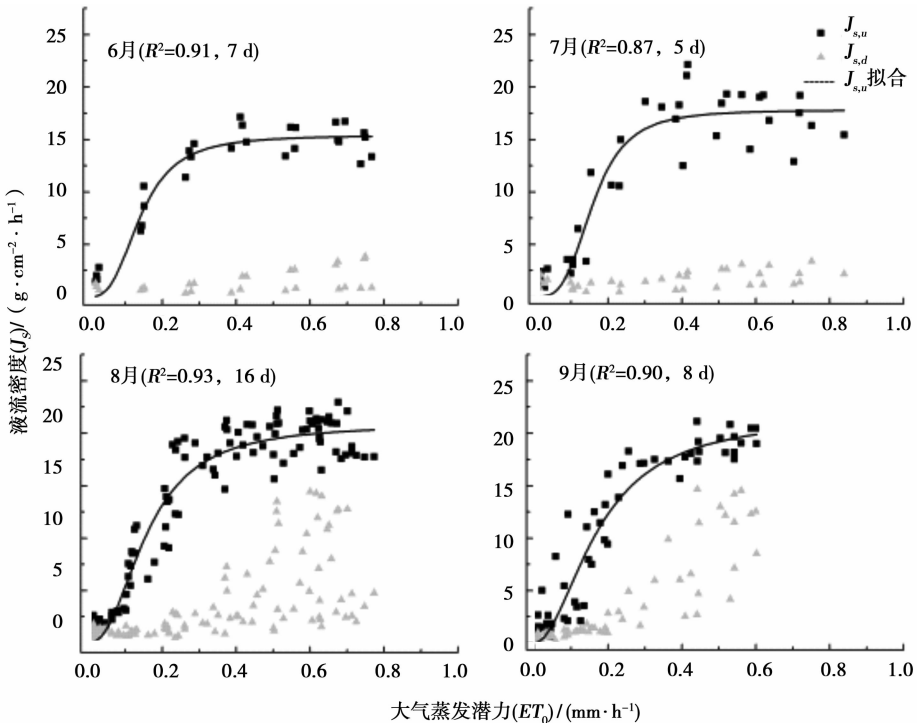


图4 不同月份新疆杨冠基部 ( $J_{s,u}$ )、杆基部 ( $J_{s,d}$ ) 边材液流密度与  $ET_0$  的关系

### 2.3 新疆杨不同高度处液流通量的比较

一般认为液流密度在整个边材厚度上有差异,但更多证据显示,中、幼龄树木整个木质部都具有输水能力<sup>[18]</sup>。据此,以2 cm边材厚度的液流密度估算了单株的液流通量(表3),计算表明:在6—9月典型晴天日,冠基部、杆基部液流通量平均分别达到7.61、7.73 L·d<sup>-1</sup>,云天平均值分别为7.20、7.52 L·d<sup>-1</sup>,阴天平均值分别为4.90、4.70 L·d<sup>-1</sup>,这说明在大气蒸发力较强的晴天、云天,杆基部液流略高于冠基部液流,表明新疆杨可通过较强的吸水能力保证体内水分平衡;而在阴天冠基部液流通量略高于杆基部,缺少强劲的大气蒸发需求驱动,新疆杨吸水量明显降低,其差值指示着冠层蒸腾过程调用了体内贮存水分的量。

表2显示:6、9月份,各种天气状况下杆基部液流通量的日均值均高于冠基部,而在7、8月份却相反,这与新疆杨在7、8月份有着更旺盛的生理活动,每天要利用体内贮存的部分水分参与液流循环有关,而在6、9月份,冠层的生理活动相对受限,而此时,植株从土壤中吸收大量水分用于体内水分的储备。

表2还表明:6—9各月冠基部液流日平均通量总是呈现晴天>云天>阴天的趋势,这与太阳辐射及大气蒸发潜力的变化格局相一致,但杆基部液流日平均通量除在7、8月份与冠基部有较一致的变化格局外,在6、9月份却呈现出多云天>晴天的趋势,这说明新疆杨从土壤中吸收水分的行为并不完全与冠层的需求状态相一致,而是能通过在多云天大气胁迫并不十分强烈的气象条件下加速吸收水分,以

“平抑”晴天高的大气蒸发需求带来的水分胁迫,这可能也是新疆杨气孔调节效应在液流传输过程中的体现。

### 3 结论与讨论

新疆杨冠基部液流比杆基部液流启动时间平均早约1 h,这与文献[19—20]对花旗松(*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco)等树种的研究结果一致,上、下部位在启动时间上的差异指示着树体内贮存水分参与液流循环和冠层的蒸腾活动并带来的时滞现象。

新疆杨不同高度处液流密度的日变化格局总体上与大气蒸发潜力的日变化格局相一致,反应了大气蒸发对液流传输的驱动,但是,冠基部液流密度与大气蒸发潜力的关联较杆基部液流更强,特别是在午间(典型晴天日),冠基部液流密度能达到杆基部的3倍以上。日间冠层失水与根系吸水间的这种不平衡在日落后到午夜间的这段时间内将得到改善,体现在该时段内基部液流密度较冠基部液流密度高,但并非每日体内水分状况都能取得平衡。

冠基部液流密度与大气蒸发潜力的关系可用Hill函数式得到较好的拟合,其中对上午时段的拟合可信度比下午时段拟合的更高,反映出大气蒸发在达到一定强度后液流密度不再会随其而增加,也不会随大气蒸发力等比例的下降,而是维持一定时间的较高速率,液流的这种“惯性”体现了其迟滞效应。与冠基部不同,杆基部液流与大气蒸发潜力的相关性不明显,这种差异反映了体内贮存水分对大气水汽应力驱动液流过程的缓冲特征。

本研究中发现,新疆杨在各个季节其冠、杆基部的“净”液流通量并不相等,在生长旺盛的7、8月份略有“亏损”,而在6、9月份略有“盈余”,表明新疆杨日吸收的水分量并不完全与冠层的日失水量一致,而是会在一定时段内根据气象条件、土壤水分条件来调控。6—9各月冠基部液流日平均通量一般呈晴天>多云天>阴天的规律,这与太阳辐射及大气蒸发潜力的变化格局相一致,而基部液流有时会呈现出多云天>晴天的趋势,这可能是新疆杨单株在大气胁迫并不十分强烈的多云天气下加速吸收水分,缓解晴天时较高的水分胁迫的策略。

尽管许多研究证实了Granier<sup>[8]</sup>方法计算边材液流通量的准确性,但随着对大树边材液流存在径向差异的不断发现,人们对估算精度有了更高的期

表2 新疆杨不同高度处的树杆液流通量

时间 (月份)	天气	天数/d	$ET_0/$ (mm·d <sup>-1</sup> )	液流通量日平均值 /(L·株 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	
				冠基部	杆基部
6	晴天	7	6.16	6.96	8.53
	云天	6	5.57	6.52	9.37
	阴天	17	3.12	5.22	7.10
7	晴天	5	6.04	7.34	5.10
	云天	6	5.91	6.93	4.54
	阴天	20	3.76	6.33	4.34
8	晴天	16	5.06	8.49	8.47
	云天	5	5.76	7.73	5.88
	阴天	10	2.19	4.75	3.59
9	晴天	8	3.71	7.66	8.83
	云天	1	3.14	7.61	10.28
	阴天	21	1.36	3.30	3.77

待。本研究的试材为中龄的新疆杨单株,边材面积较小,没有考虑径向差异,对于大树,就需要增加不同深度处的测定位点,才能更精准地估算出单株的液流通量。另外,由于精确地测定乔木树种叶面积变化比较困难,本研究中没有进一步比较叶面积增长带来的液流通量的动态变化。对于土壤水分与整株液流通量的变化关系,虽然作者在 100 cm 的土层内每隔 20 cm 安装了 ECH<sub>2</sub>O 土壤水分探头(TDR)同步监测土壤水分变化,但除表层 20 cm 土壤水分受降水影响明显外,其它各层土壤水分在整个试验期间变化幅度很小,考虑到树木根系分布的复杂性及土壤水分测定位点的局限,本研究中未作进一步的分析。本试验中供试林分为农田单行林带,其蒸腾环境条件不同于斑块郁闭的林分,对于后者,将在以后的研究中进一步做深入研究。

### 参考文献:

- [1] Tognetti R, Andria R, Morelli G, *et al.* Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees[J]. *Plant Soil*, 2004(263): 249 - 264
- [2] Kumagai T, Aoki S, Otsuki K, Utsumi Y. Impact of stem water storage on diurnal estimates of whole-tree transpiration and canopy conductance from sap flow measurements in Japanese cedar and Japanese cypress trees[J]. *Hydrol Process*, 2009(23): 2335 - 2344
- [3] 段玉玺, 秦 景, 贺康宁, 等. 白榆、新疆杨液流动态比较研究[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(6): 1136 - 1144
- [4] Phillips N G, Scholz F G, Bucci S J, *et al.* Using branch and basal trunk sap flow measurements to estimate whole-plant water capacitance: comment on Burgess and Dawson (2008) [J]. *Plant Soil*, 2009, 315(1 - 2): 315 - 324
- [5] Phillips N G, Oren R, Licata J, *et al.* Time series diagnosis of tree hydraulic characteristics [J]. *Tree Physiol*, 2004, 24(8): 879 - 890
- [6] Cienciala E, Kucera J, Malmer A. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo[J]. *J Hydrol*, 2000, 236(1 - 2): 109 - 120
- [7] Egea G, Baille A, Martín B, *et al.* Do short term sap flow measurements scale with leaf transpiration? A case study on *Cucumis Sativus* plants[C]. *ISHS Acta Horticulturae 846: VII International Workshop on Sap Flow*, 2009: 127 - 134
- [8] Granier A. A new method of sap flow measurement in tree stems [J]. *Annales Des Sciences Forestieres*, 1985, 42(2): 193 - 200
- [9] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. *Tree Physiol*, 1987, 3(4): 309 - 320
- [10] Gartner K, Nadezhkina N, Englisch M, *et al.* Sap flow of birch and Norway spruce during the European heat and drought in summer 2003[J]. *Forest Ecol Manag*, 2009, 258(5): 590 - 599
- [11] Lei H, Zhi-shan Z, Xin-rong L. Sap flow of *Artemisia ordosica* and the influence of environmental factors in a revegetated desert area: Tengger Desert, China[J]. *Hydrol Process*, 2010, 24(10): 1248 - 1253
- [12] Bequet R, Cermak J, Nadezhkina N, *et al.* Tree water dynamics non-destructively assessed through sap flow measurements and potential evapotranspiration[J]. *Biol Plantarum*, 2010, 54(2): 366 - 368
- [13] Lu P, Urban L, Zhao P. 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
- [14] 党宏忠, 张劲松, 张友焱, 等. 应用热扩散技术对柠条锦鸡儿主根液流速率的研究[J]. *林业科学*, 2010, 46(3): 31 - 38
- [15] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements[J]. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 1998(56): 1 - 465
- [16] Allen R G, Pruitt W O, Wright J L, *et al.* A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference  $ET_0$  by the FAO56 Penman Penman-Monteith method[J]. *Agr Water Manage*, 2006, 81(1 - 2): 1 - 22
- [17] O'Grady A P, Worledge D, Battaglia M. Constraints on transpiration of *Eucalyptus globulus* in southern Tasmania, Australia[J]. *Agr Forest Meteorol*, 2008, 148(3): 453 - 465
- [18] Phillips N, Oren R, Zimmermann R. Radial patterns of xylem sap flow in non-, diffuse- and ring-porous tree species[J]. *Plant Cell Environ*, 1996, 19(8): 983 - 990
- [19] Cermak J, Kucera J, Bauerle W L, *et al.* Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees [J]. *Tree Physiol*, 2007, 27(2): 181 - 198
- [20] Sevanto S, Holttä T, Nikinmaa E. The effects of heat storage during low flow rates on the output of Granier-type sap-flow sensors [C]. *ISHS Acta Horticulturae 846: VII International Workshop on Sap Flow*, 2009: 45 - 52