

荒漠绿洲农田防护树种二白杨生长 季节树干液流的变化

常学向, 赵文智

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 临泽内陆河流域综合研究站, 兰州 730000)

摘要:热脉冲技术已经成为确定林木耗水的有力工具。利用澳大利亚 GREENSPAN 技术公司 SF-300 热脉冲树干液流仪, 在生长季节对荒漠绿洲区农田防护树种二白杨树干液流速率进行了连续观测, 结果表明: 二白杨树干液流速率的日变化规律为, 夜间液流速率较低, 其中最低值出现在 2:00~3:00, 7:00~8:30 开始升高, 13:00~14:00 达到最大值, 16:00~18:30 开始下降; 树干液流速率日平均值介于 $10.1 \pm 4.9 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ ~ $23.3 \pm 8.2 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 之间。二白杨树干液流速率 8 月份最高, 7 月份次之, 5 月与 9 月份基本一致。树干液流与边材面积、叶面积指数呈显著线性相关, 而与胸径、胸径平方与树高之积呈复合指数函数关系, 与冠层厚度呈三次幂函数关系。

关键词:树干液流; 叶面积指数; 生长季节; 二白杨; 农田防护林; 荒漠绿洲

Sap flow of Gansu poplar in farmland shelter forest during the growing season in desert oasis

CHANG Xue-Xiang, ZHAO Wen-Zhi (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Linze Inland River Basin Comprehensive Research Station, Lanzhou 730000). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1436~1441.

Abstract: The Gansu Poplar (*Populus gansuensis* C. Wang et H. L. Yang) shelter forest farmland play an important role in protecting and improving in the middle Heihe basin. It covers the area of about 18000 hectares and shelters farmland of 66700 hectares against damages of sandstorm and dry thermal wind. Understanding of water consumption in artificial Gansu Poplar forest is critical for assessing the balancing relation between the ecological function of artificial forest and the consumption of water resources. The heat pulse technique was considered as an effective method for measuring sap flow and transpiration of plant individual, and in turn, assessing water consumption.

We used the heat pulse meter (SF-300, Greenspan technology Pty Ltd., Australian) to measure sap flow of Gansu Poplar individual. The objective is to specify the individual variability of sap flow and to determine water consumption by transpiration. The experimental site is located in the middle of Heihe basin, at Pinchuan town in Linze county, Gansu province (100°07'E, 39°21'N). According to different size of stem classes, 8 standard trees of Gansu Poplar were selected as sample plant, which were planted in 1983. Sap flow was measured by heat pulses lasting 1.6 seconds every 30 minutes from Apr. 20 to May. 21 and from 11th to 21st in July, Aug., and Sept., 2003, respectively. Green leaf area of a sub-sample of leaves per tree was measured every 5 days from Apr. 23 to July 15 using a leaf area meter (model LI-3000, Li-Cor Inc., Lincoln, NE). Total green leaf area was estimated by multiplying leaf area measured by the ratio between the fresh leave weight of the sub-sample and total-sample.

During the growing season, the diurnal sap flow velocity of Gansu Poplar was lower at night, with lowest at 2:00~3:00,

基金项目:中国科学院知识创新资助项目(KZCX3-SW-329, KZCX1-09); 国家自然科学重点基金资助项目(40235053)

收稿日期:2003-12-11; **修订日期:**2004-01-15

作者简介:常学向(1968~), 男, 甘肃高台人, 博士生, 主要从事干旱区生态水文学研究。E-mail: chxx@ns.lzb.ac.cn

Foundation item: the Project of Knowledge Innovation of CAS (No. KZCX3-SW-329, KZCX1-09); National Natural Science Foundation of China (No. 40235053)

Received date: 2003-12-11; **Accepted date:** 2004-04-15

Biography: CHANG Xue-Xiang, Ph. D. candidate, mainly engaged in ecohydrology in arid area. E-mail: chxx@ns.lzb.ac.cn

and started to rise rapidly during 7:00~8:30, and then descend during 16:00~18:30. The maximum of sap flow velocity appears during 13:00~14:00. The maximum of average velocity of the sap flow occurred in August, and the second was in July, and the third was in May and in September. And it was basically consistent in May and September. The diurnal average sap flow velocity was between $10.1 \pm 4.9 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ and $23.3 \pm 8.2 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$. The average cumulative sap flow showed a strong correlation of compound exponential with diameter breast height (DBH) and $(DBH)^2 H$, respectively, and a cubic function relationship with canopy thickness, and a linear correlation with sapwood area and leaf area index, respectively.

Key words: sap flow; leaf area index; during growing season; Gansu Poplar; farmland shelter forest; desert oasis

文章编号:1000-0933(2004)07-1436-06 中图分类号:S715 文献标识码:A

确定荒漠绿洲区防护林的耗水量对于评价人工林生态功能与水资源消耗的均衡关系,进而对制定流域生态系统管理政策和确定内陆河流域人工生态系统建设规模至关重要。蒸腾作用是干旱区植物水分消耗的主要途径。因此有关蒸腾量测定的方法和手段一直是生态水文研究较为活跃的领域^[1~3]。涉及到林木蒸腾的问题很多,因而用来测定蒸腾过程的技术也很多。至于采用哪种技术,则取决于测定对象的时间和空间尺度^[4]。

液流技术为连续监测蒸腾强度提供了一种方法。通过标准木边材面积或标准木叶面积与森林叶面积关系方面的信息可以估算蒸腾量。Swanson^[5]和Smith & Allen^[6]评述过有关测定液流的一些技术及其局限性。近年来,液流技术在确定林木耗水方面得以广泛应用。美国半干旱区陆面大气计划(The Semi-arid Land-surface-Atmosphere Program)就应用液流技术确定了荒漠河岸林优势树种的耗水量^[7],此外,在确定欧洲云杉(*Picea abies* (L.))和欧洲赤松(*Pinus sylvestris* L.)^[8,9]、油橄榄(*Olea europaea* L.)^[10]、马占相思(*Acacia mangium*)^[11]等树种的蒸腾方面也得到了广泛应用。国内在这方面的工作正在逐步开展。李海涛等综述了热脉冲液流记录仪测定树干液流的研究概况^[12],孙鹏森等、王华田等分别观测了油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)树干液流及其变化规律^[13,14],马履一等应用测液流的方法比较了北京几种造林树种的耗水特性^[15],熊伟等应用液流法测定了宁南山区华北落叶松(*Larix pincipi-rupprechtii*)人工林蒸腾耗水特征^[16]等等。

应用液流法测定杨树的耗水量也在山东省莒县和沂南县、宁夏永宁县^[17,18],以及内蒙古临河市开展过研究^[19],但研究对象多为幼树,而且观测时间短。在荒漠绿洲区这种技术的应用还不多。本文利用热脉冲仪 SF-300 连续监测了荒漠绿洲区农田防护林主要树种——二白杨(*Populus gansuensis* C. Wang et H. L. Yang)的树干液流,据此分析了树干液流与林木生长的关系,旨在为量化农田防护林的耗水量,深入认识荒漠绿洲区人工林建设的水资源消耗,为确定内陆河流域人工生态系统建设规模提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于黑河流域中游的中国生态系统网络临泽内陆河流域综合研究站试验区($100^{\circ}07' E, 39^{\circ}21' N$),行政区划上属于临泽县平川镇。多年平均降水量 116.8 mm ,年蒸发量 2390 mm ;年平均气温 7.6°C ,最高气温 39.1°C ,最低 -27°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 3088°C ,无霜期约 165d 。2003 年生长季节(5~10 月份)平均气温 20.4°C ,降水量为 50.5 mm 。土壤为沙壤土,田间持水量 24.0% ,总孔隙度 47.3% ,容重 1.4 g/cm^3 (表 1)。监测的林带建植于 1982 年,全部由 5 行二白杨组成,株行距 $1.0 \times 1.0 \text{ m}$,平均树高 $17.6 \pm 1.3 \text{ m}$,平均胸径 $23.6 \pm 4.3 \text{ cm}$ 。降水无法满足林带正常生长,所以必须进行补充灌溉。监测期间分别在 7 月 7 日、8 月 7 日灌水 2 次。

2 研究方法

2.1 树干液流测定 利用澳大利亚 GREENSPAN 技术公司

生产 SF-300 树干液流仪 2 套 8 个探头,从 2003 年 4 月 20 日至 5 月 21 日,7 月 11 日~21 日、8 月 11 日~21 日、9 月 11 日~21 日,在绿洲边缘选取不同径阶的二白杨 8 株(表 2),把探头插入胸径 3 cm (伤口直径 2.2 mm),用持续时间长 1.6 s 的热脉冲,每隔 30min 测定一次热脉冲速率(V_h'),树干液流速率 V_s 可以用下式计算^[20]:

$$V_s = (0.505F_m + F_t) \times V_h' \quad (1)$$

式中, F_m 为木质体积比, F_t 为水体积比。 F_m 与 F_t 可以从下式计算:

$$F_t = (W_f - W_d)/W_i \quad (2)$$

$$F_m = W_d/1.53W_i \quad (3)$$

万方数据

式中, W_f 为边材鲜重, W_d 为边材干重, W_i 为相同边材体积蒸馏水重量。经计算,供测二白杨的木质体积比为 0.35 ,水体积

表 1 防护林土壤水分物理性质

Table 1 Soil physical properties in farmland shelter forest

土壤深度 Depth (cm)	田间持水量 Field water capacity(%)	土壤总孔隙度 Total porosity (%)	土壤容重 Soil bulk density(g/cm ³)
0~15	19.2	42.2	1.6
15~30	26.6	26.6	1.3
30~60	23.8	47.3	1.4
60~90	26.5	47.3	1.4
平均 Average	24.0 ± 3.9	47.3 ± 4.0	1.4 ± 0.1

比为 0.45。

树干液流量 Q 根据下式计算^[21]:

$$Q = V_s \times A \quad (4)$$

式中, A 为胸径处边材面积。

2.2 叶面积指数测定

测定树种二白杨 2003 年 4 月 20 日展叶, 从 4 月 23 日开始用 Li-3100 叶面积测定仪测定单叶片面积, 每隔 5d 测定 1 次, 每次测定叶片数不少于 50 片; 叶面积测定后, 立即测定叶片的重量及含水量; 9 月 25 日, 对选定标准木测定胸径 (DBH)、树高 (H)、冠幅、枝下高, 然后伐倒, 截成 1m 长的区分段。在每个区分段, 按照树枝直径 $\leq 3\text{cm}$ 的为小枝, $> 3\text{cm}$ 为大枝为标准, 统计小枝和大枝的重量。选取 1kg 小枝样, 摘取全部叶子, 称重, 计算枝叶比(因大枝已没叶片, 不做枝叶比的取样统计), 计算每个区分段上所有叶片的重量。然后用 Li-3100 量测摘下的所有叶片面积, 用来计算每个区分段上所有的叶面积, 计算公式为:

$$S_{\text{leaf}} = W_{\text{总}i} / W_{\text{样叶}} \times S_{\text{样叶}} \quad (5)$$

式中, $W_{\text{总}i}$ 为 i 段上的叶重, $W_{\text{样叶}}$ 为样品叶子重量, $S_{\text{样叶}}$ 为样品叶片面积, i 为分割段编号。

3 结果分析

3.1 树干液流日变化

在生长季节, 树干液流速率日变化呈如下特征: 晚间维持在较低水平, 2:00~3:00 最低, 在 7:00~8:30 开始升高, 13:00~14:00 达到最大值, 16:00~18:30 开始下降, 整个过程呈单峰型或双峰曲线(图 1)。不同月份, 树干液流速率日变化存在差异, 表现在开始升高、达到最大值的时间及开始升高与开始下降的时间间隔不同。5 月 12 日 8:30、7 月 12 日 7:00、8 月 12 日 7:00 及 9 月 12 日 8:30 树干液流速率开始升高, 5 月 12 日 13:30、7 月 12 日 12:30、8 月 12 日 14:00 及 9 月 12 日 13:30

表 2 观测样树的基本参数

Table 2 Some parameters of the sample-trees for sap flow measurement

树号 No.	树高 (m) Height	胸径(cm) Diameter breast height	边材半径 (mm) Sapwood radius	心材半径 (mm) Heartwood radius	边材面积 (cm ²) Sapwood area
1	18.1	28.4	51	80	337.9
2	17.4	21.6	36	61	178.6
3	17.1	17.8	24	54	99.5
4	18.4	31.2	48	96	361.7
5	17.5	23.8	44	64	237.6
6	18.7	26.4	35	86	227.5
7	18.8	24.8	34	79	205.0
8	14.8	18.4	21	60	93.0

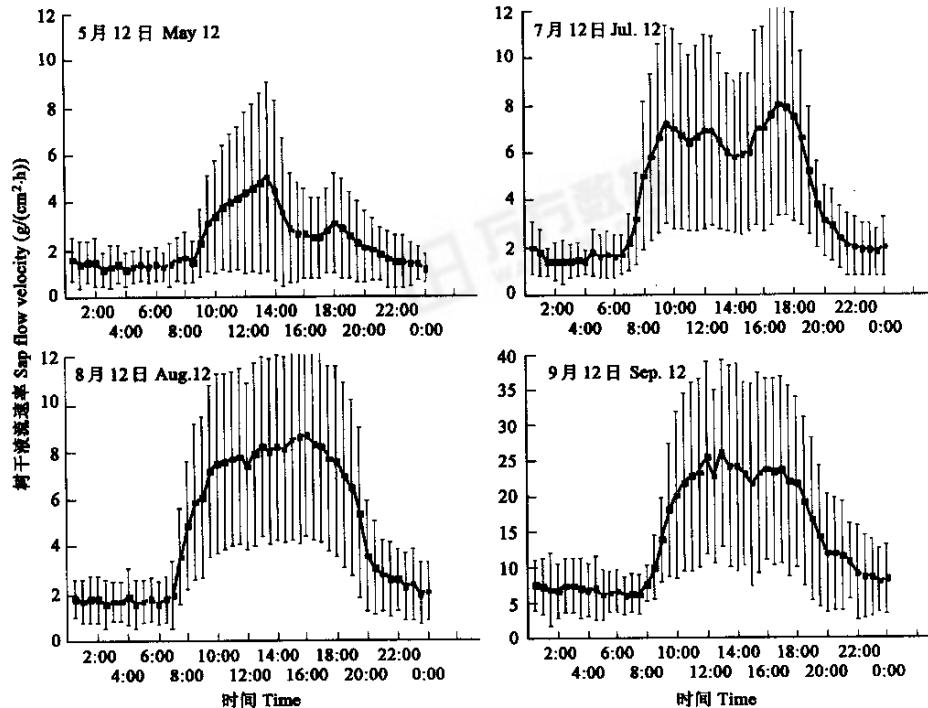


图 1 二白杨树干液流速率日变化

Fig. 1 Diurnal variation of sap flow of Gansu Poplar

树干液流速率达到最大值,开始升高与开始下降的时间间隔 5 月 12 日、7 月 12 日、8 月 12 日和 9 月 12 日分别是 6.5 h、12.5 h、13.0 h 和 7.0 h。

在不同的生长日,二白杨树干液流速率日均值存在差异(见图 2)。二白杨日均值 5 月份介于 $10.1 \pm 4.9 \sim 12.4 \pm 8.8 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 之间,7 月 13 日升高到 $19.6 \pm 5.8 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ (可能与 7 月 7 日灌水有关),之后逐渐下降,8 月 12 日又升高到 $23.3 \pm 8.2 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ (可能与 8 月 7 日灌水有关),9 月 23 日降到 $11.1 \pm 6.9 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。在观测期间,二白杨树干液流速率日均最小值出现在 5 月,为 $10.1 \pm 4.9 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,最大值出现在 8 月,为 $23.3 \pm 8.2 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。

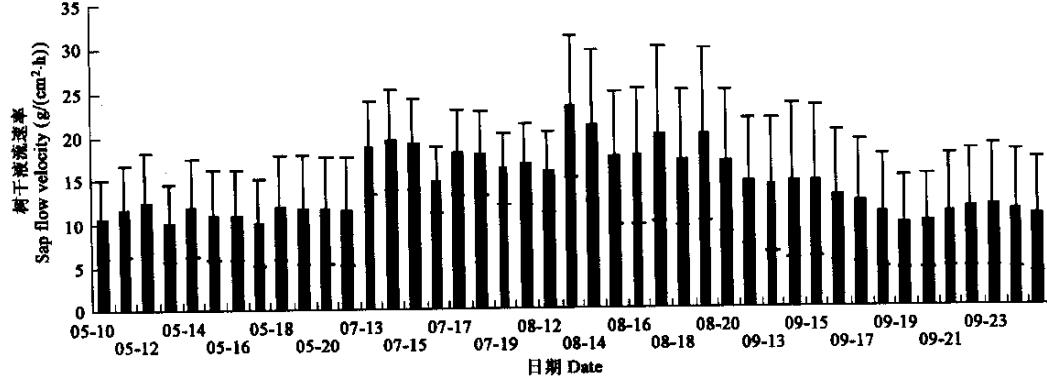


图 2 二白杨树干液流速率日平均值

Fig. 2 The diurnal average of sap flow velocity Gansu Poplar

3.2 树干液流速率月变化

8 株二白杨树干液流速率随月份变化规律存在差异,但总体上表现为 8 月份最高,7 月份次之,5 月与 9 月份基本一致的规律(表 3)。

表 3 树干液流速率的月变化($\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$)

Table 3 Sap flow velocity dynamics during the growing season

月份 Month	样树 Sample trees								平均 Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	
5 May	19.7 ± 12.9	18.4 ± 9.5	8.9 ± 4.7	8.0 ± 3.6	11.8 ± 6.9	11.4 ± 6.8	7.2 ± 2.8	4.3 ± 1.1	11.2 ± 6.0
7 Jul.	22.4 ± 14.8	20.7 ± 8.6	9.2 ± 4.1	18.6 ± 10.6	22.9 ± 13.9	14.2 ± 7.9	17.5 ± 11.7	15.2 ± 7.4	17.6 ± 9.9
8 Aug.	21.5 ± 10.9	27.3 ± 13.0	9.9 ± 4.3	9.5 ± 4.1	13.6 ± 8.5	26.8 ± 16.5	13.6 ± 8.4	28.3 ± 16.5	18.8 ± 10.3
9 Sep.	14.0 ± 8.4	24.7 ± 11.1	4.3 ± 1.3	19.0 ± 12.6	7.2 ± 3.5	9.8 ± 4.7	6.9 ± 2.3	9.0 ± 4.2	11.9 ± 6.0

3.3 树干液流与林木生长关系

3.3.1 树干液流与形态特征的关系 经统计分析,树干液流量日平均值(Q)与胸径、树高、冠层厚度(H_{canopy})和 $(DBH)^2 H$ 的决定系数分别为 0.64、0.50、0.68 和 0.77,经检验树干液流量日平均值与胸径相关性显著($p < 0.10$),与冠层厚度和 $(DBH)^2 H$ 相关性显著($p < 0.05$),而与树高相关性不显著。经回归模拟,得到如下回归关系:

Q 与 BDH

$$Q = e^{(7.27 - \frac{71.13}{BDH})} \quad (P < 0.02, R^2 = 0.65);$$

Q 与 H_{canopy}

$$Q = 59.19 - 0.76H_{\text{canopy}}^2 + 0.06H_{\text{canopy}}^3 \quad (P < 0.05, R^2 = 0.55);$$

Q 与 $(DBH)^2 H$

$$Q = e^{(5.26 - \frac{2.08}{(DBH)^2 H})} \quad (P < 0.01, R^2 = 0.76)$$

3.3.2 树干液流与边材面积的关系 所观测的 8 株二白杨边材面积最小的 93.0 cm^2 ,最大的达 337.9 cm^2 ,43d 树干液流量日均值最小的为 28.2 kg/d ,最大的达到 153.5 kg/d (图 3)。经统计分析,二白杨 43d 树干液流量日均值(Q)与杨树边材面积(S_{sapwood})存在显著线性相关关系:

$$Q = 0.41S_{\text{sapwood}} - 11.40 \quad (P < 0.01, R^2 = 0.78, n = 8)$$

3.3.3 树干液流与叶面积指数的关系 由二白杨组成的农田防护林带尽管林龄比较整齐,但个体间的叶面积指数变化于 1.34~4.95 之间,差异较大,因此个体的树干液流量也存在差异(图 4)。经统计分析,单株树木的叶面积指数(LAI)与其 43d 树干液流量日均值存在显著的线性关系: $Q = 49.46LAI - 41.77$,($P < 0.001, R^2 = 0.95, n = 8$)

4 讨论

二白杨树干液流日变化呈现明显的昼夜规律。表现在夜间液流速率维持在较低的水平,白天较高。日变化过程除7月份为双峰值外,其它观测月份均为单峰曲线,这与孙鹏森、王华田、马履一和熊伟等^[13~16]的研究结论相类似。由于没有同步观测对应叶蒸腾的变化过程,尚无法说明液流与蒸腾的对应关系。土壤湿度影响着液流的变化,例如7、8月份灌水后液流明显增加,但本实验数据尚不能精确地说明土壤湿度对液流的影响规律,需进一步观测研究。

测定二白杨的树干液流速率为估算荒漠绿洲林木耗水提供依据。测定结果表明,在黑河荒漠绿洲区二白杨树干液流日平均值最大为 $23.3 \pm 8.2 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,最小为 $10.1 \pm 4.9 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,比 Schaeffer 和 Williams 测定白棉杨树干液流日均值低。他们在美国亚利桑那州 San Pedro 河岸林的测定结果为:白棉杨树干液流速率日均值最大为 $37.0 \pm 1.5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ (在 San Pedro 河干流)与 $44.4 \pm 12.5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ (在 San Pedro 河支流),最小为 $12.5 \pm 3.2 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ (在 San Pedro 河干流)与 $29.6 \pm 6.1 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ (在 San Pedro 河支流)^[7]。本文观测计算表明黑河流域荒漠绿洲区二白杨日平均树干液流量在 $540 \sim 180 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 之间,比小美旱杨(为 $88 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$)^[19]高,比 I-69 杨低(为 $1100 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$)^[17]。

叶面积指数对树干液流量影响很大。衡量叶面积多少的叶面积指数(LAI)因植物种类、生长阶段、生长季节及管理情况而不同,因此叶面积指数呈动态变化^[23],相应的就必然引起树木树干液流的变化。树高 18.4m、胸径 31.2cm 的二白杨 4 月 23 日,叶面积指数是 0.44,二白杨耗水量为 $42.95 \text{ kg}/\text{d}$;5 月 1 日,叶面积指数增加到 1.37,二白杨耗水量增大到 $58.65 \text{ kg}/\text{d}$;5 月 10 日,二白杨叶面积指数增加到 2.49,二白杨每天的耗水量也增大到 $64.73 \text{ kg}/\text{d}$;6 月 10 日,当叶面积指数增大到 4.74,二白杨日耗水量在 137.88 kg 。接近叶面积指数的最大值 4.94 时,二白杨日耗水量逐渐趋于稳定在 $139.09 \sim 140.30 \text{ kg}/\text{d}$ (图 5)。因此在测定树干液流时应与叶面积指数的动态监测相结合,这样可以对树干液流尺度的扩展提供基础数据。当然决定耗水量的多少还与环境因素有关。

据 Hatton 的研究,边材面积、胸径与树干液流之间均为线性关系^[24];据 Cienciala 和 Kucera 对马占相思的研究,树干液流量与边材面积呈线性关系^[11]。在黑河流域荒漠绿洲区,二白杨树干液流与树木的胸径、 $(DBH)^2 H$ 呈复合指数函数关系,与冠层厚度呈三次幂函数关系,与边材面积、叶面积指数呈线性关系。这些相关关系对单株木的耗水量扩展到林分水平的林地耗水量具有重要意义。但胸径、树高、冠层厚度易于准确测量,比叶面积指数与边材面积测量误差更小,操作方便,因此在特定的立地条件下,用胸径、树高、冠层厚度与树干液流量的相关性经验模型对实现由单株木耗水至林分耗水的尺度扩展更有实际意义。若与环境因子中影响边材液流速率的主导因子相结合,建立多元回归模型,能更好地实现对单株木耗水的动态预测。

5 结论

在生长季节,树干液流速率在晚间维持在较低水平,2:00~3:00 最低,在 13:00~14:00 达到最大值,16:00~18:30 开始下降,整个过程呈单峰型或双峰型曲线;液流速率开始升高与开始下降的时间间隔 5 月 12 日、7 月 12 日、8 月 12 日和 9 月 12 日分别是 6.5h、12.5h、13.0h 和 7.0h。在不同的生长日,二白杨树干液流速率也存在差异,树干液流速率日均值最大为 $23.0 \pm$

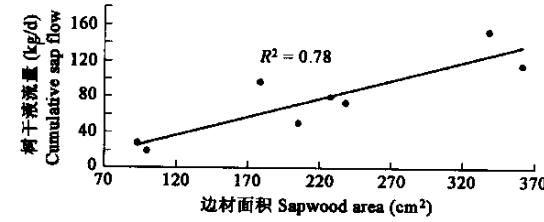


图 3 二白杨树干液流量与边材面积的关系

Fig. 3 The relationship between cumulative sap flow and sapwood area of Gansu Poplar

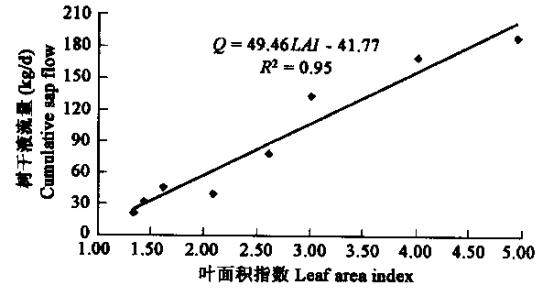


图 4 二白杨树干液流量与叶面积指数的关系

Fig. 4 The relationship between cumulative sap flow and leaf area index of Gansu Poplar

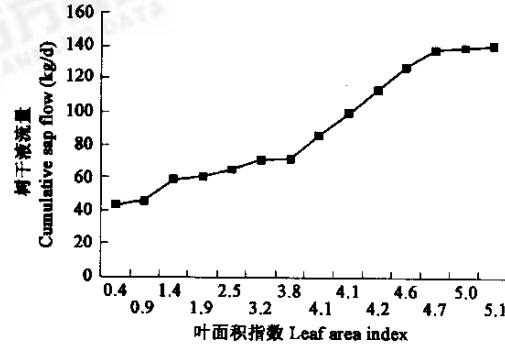


图 5 二白杨耗水量对叶面积指数的响应

Fig. 5 The cumulative sap flow in response to variation in leaf area index of Gansu Poplar

8.2g/(cm²·h),最小为10.1±4.9g/(cm²·h)。

在生长季节,二白杨树干液流速率8月份最高,7月份次之,5月与9月份基本一致。

在黑河流域荒漠绿洲区,二白杨树干液流量与边材面积、叶面积指数呈显著线性相关,而与树木的胸径、胸径平方与树高之积呈复合指数函数关系,与冠层厚度呈三次幂函数关系。

References:

- [1] Loustau D, Berbigier P. Transpiration of a 64-year-old maritime pine. *Oecologia*, 1996, **107**: 33~42.
- [2] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurement. *Tree Physiol.*, 1987, **3**: 309~319.
- [3] Meinzer F C, Goldstein G. Environmental and physiological regulation of transpiration tropical forest gap species: the influence of boundary layer and hydraulic properties. *Oecologia*, 1995, **101**: 514~522.
- [4] Baird A J, Wilby R L, eds. into Chinese Zhao W Z, Wang G H Translated. *Eco-hydrology: Plant and water in terrestrial and aquatic environments*. Beijing: Chinese ocean press, 2002. 136.
- [5] Swanson R H. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, **72**: 113~132.
- [6] Smith D H, Allen S J. Measurement of sap flow in plant stems, *J. Exp. Bot.*, 1996, **47**: 1833~1844.
- [7] Schaeffer S M, Williams D G, Goodrich D C. Transpiration of cottonwood/willow forest estimated from sap flux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **105**: 257~270.
- [8] Moren A S, Lindroth A, FlowerEllis J, et al. Branch transpiration of pine and spruce to tree and canopy using needle biomass distributions. *Tree*, 2000, **14**: 384~397.
- [9] Cermak J, Cienciala E, Kucera J, et al. Individual variation of sap-flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration: a pilot study at the central NOPEX site. *Journal of Hydrology*, 1995, **168**: 17~27.
- [10] Giorio P, Giorio G. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. *Environ. Exp. Bot.*, 2003, **49**: 9~20.
- [11] Cienciala E, Kueerab J, Malmer A. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. *Journal of Hydrology*, 2000, **236**: 109~120.
- [12] Li H T, Chen L Z. An introduction onto the heat-pulse technique and its application to measuring the stem-sapflow in trees. *Chinese Bulletin of Botany*, 1997, **14**(4): 24~29.
- [13] Sun P S, Ma L Y, Wang X P, et al. Temporal and special variation of sap flow of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*). *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, **22**(5): 1~6.
- [14] Wang H T, Ma L Y, Sun P S. Sap flow fluctuations of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* in late autumn. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, **38**(5): 31~37.
- [15] Ma L Y, Wang H T, Lin P. Comparison of water consumption of some afforestation species in Beijing area. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, **25**(2): 1~7.
- [16] Xiong W, Wang Y H, Xu D Y. Regulations of water use for transpiration of *Larix principi-rupprechtii* plantation and its response on environmental factors in southern Ningxia hilly area. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, **39**(2): 1~7.
- [17] Liu F J, Zheng S K, Ju G S, et al. A study on comparison of measuring water-consumption for transpiration in Poplar. *Scientia Silvae Sinicae*, **33**(2): 117~126.
- [18] Liu F J, Zheng S K, Ju G S, et al. The study on temporal and spatial dynamic of the populus. *Forest Research*, 1993, **6**(4): 368~372.
- [19] Gao Y, Zhang R M, Liu J. A study on volume and velocity of stem sap flow of *Populus popularis* by heat-pulse technique. *Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2001, **21**(4): 644~649.
- [20] Edwards W R N, Warwick N W M. Transpiration from a kiwi fruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation. *N.Z.J. Agri. Res.*, 1984, **27**: 537~543.
- [21] Closs R L. The heat pulse method for measuring rate sap flow in a plant stem. *N.Z.J. Science*, 1958, **1**: 281~288.
- [22] Welles J M. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Rem. Sens. Rev.*, 1990, **5**: 31~43.
- [23] Hatton T J, Wu H I. Scaling theory to extrapolate individual tree water use to stand water use. *Hydrolog. Proc.*, 1995, **9**: 527~540.

参考文献:

- [4] Baird A J, Wilby R L 著, 赵文智,王根绪译.生态水文学:陆生环境和水生环境植物与水分关系.北京:海洋出版社,2002. 136.
- [12] 李海涛,陈灵芝.用于测定树干木质部蒸腾液流的热脉冲技术研究概况.植物学通报,1997, **14**(4): 24~29.
- [13] 孙鹏森,马履一,王光平,等.油松树干液流的时空变异性研究.北京林业大学学报,2000, **22**(5): 1~6.
- [14] 王华田,马履一,孙鹏森.油松、侧柏深秋边材木质部液流变化规律的研究.林业科学,2002, **38**(5): 31~37.
- [15] 马履一,王华田,林平.北京地区几个造林树种耗水性比较研究.北京林业大学学报,2003, **25**(2): 1~7.
- [16] 熊伟,王彦辉,徐德应.宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应.林业科学,2003, **39**(2): 1~7.
- [17] 刘奉觉,郑世锴,巨关升,等.树木蒸腾耗水测算技术的比较研究.林业科学,1997, **33**(2): 117~126.
- [18] 刘奉觉,郑世锴,巨关升,等.杨树树干液流时空动态研究.林业科学研究,1993, **6**(4): 368~372.
- [19] 高岩,张汝民,刘静.应用热脉冲技术对小美旱杨树干液流的研究.西北植物学报,2001, **21**(4): 644~649.