

黄土高原半干旱区侧柏 (*Platycladus orientalis*) 树干液流动态

于占辉^{1,2}, 陈云明^{1,*}, 杜 盛¹

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:应用热扩散式树干茎流计(TDP)于2008年4~10月对黄土高原安塞县侧柏人工林树干液流速率进行了连续测定,并对周围气象、土壤水分等多个环境因子进行了同步测定。结果表明:侧柏在不同月份晴天树干液流速率变化具有明显的昼夜节律性,呈单峰曲线;且各月液流速率日均值受土壤供水水平限制总体上呈下降趋势,即4月份最大,为 $0.00135\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;10月份最小为 $0.00011\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;树干液流速率与光合有效辐射、大气温度、水汽压差呈极显著正相关,与相对湿度呈负相关,其相关程度:光合有效辐射>水汽压差>大气温度>相对湿度,并可用线性表达式来估算;侧柏边材面积和地径呈幂指数关系,并以此结合密度估算出样地侧柏人工林的边材面积为 4.65 m^2 ,最终估算出侧柏人工林生长季总耗水量为 $1159.6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

关键词:黄土高原;侧柏;树干液流;热扩散式探针;气象因子

文章编号:1000-0933(2009)07-3970-07 中图分类号:Q948 文献标识码:A

The sapflow dynamics of *Platycladus orientali* in the semi-arid Loess Plateau region

YU Zhan-Hui^{1,2}, CHEN Yun-Ming^{1,*}, DU Sheng¹

1 Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Shaanxi, Yangling 712100, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3970 ~ 3976.

Abstract: A thermal dissipation probe (TDP) was used to measure the sapflow dynamics of *Platycladus orientali* in Ansai County on the Loess Plateau of China from April to October, 2008. Soil water content, photosynthetic active radiation (PAR), air temperature, relative air humidity, water vapor pressure deficit (VPD) and wind speed were measured at the same time. The results showed that patterns of diurnal variation of *P. orientalis* sapflow velocity on sunny days were similar with a clear pulse creating a single-peak curve; in the case of restricted soil water levels, the daily average sapflow velocity tended to decline over time so that it was greatest in April and the least in October, being 0.00135 and $0.00011\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively; sapflow velocity showed a significant positive correlation with PAR, air temperature, and water VPD, and had a negative correlation with the relative humidity, the correlation coefficients being in the order PAR > VPD > Temperature > relative humidity, so that these linear expressions can be used to estimate it; the sapwood area of *P. orientali* and the diameter at ground level were used for an index relationship to obtain an estimate of sapwood in the sample plots, which was 4.65 m^2 . Finally, it can be used to estimate the total water consumption used for transpiration by the *P. orientali* plantation in the growing season of April- October, which was $1159.6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$.

Key Words: the Loess Plateau; *Platycladus orientalis*; sapflow; thermal dissipation probe (TDP); climatic factors

基金项目:中国科学院知识创新工程“百人计划”资助项目(KZCX2-YW-BR-02);中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX2-XB2-05)

收稿日期:2008-12-24; 修订日期:2009-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

植被作为重要的生态因子,多年来在我国黄土高原水土流失治理和生态环境建设中发挥着重要作用^[1]。侧柏(*Platycladus orientalis*)因耐旱,耐瘠薄,成活率高等特点,是我国黄土高原地区主要造林树种之一^[2]。然而,半干旱地区营造的人工林在持续生长和更新等方面的问题也十分突出,需要在林木生态需水规律深入了解的基础上加以解决^[3]。因此,研究该地区侧柏林分耗水规律及其与土壤水分动态平衡关系对该区林分管理和造林密度的合理确定等具有重要指导意义。

树种及林分单株之间耗水量的差异取决于叶片蒸腾特性和木质部结构特征,环境因子对树木耗水量也有很大影响^[4]。研究发现,树木边材液流速率与气象因子诸要素^[5]以及土壤水分密切相关^[6]。单木耗水量与树干直径、冠幅和边材面积之间呈良好的线性关系^[7],Kostner 等^[8]、孙龙等^[9]和熊伟等^[10]分别用指数函数、线性函数和幂函数拟合了欧洲水青冈(*Fagus sylvatica*)、红松(*Pinus koraiensis*)和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等树种边材面积与树干间的关系。因此,边材与树干模型很大程度上取决于树种本身的生物学特性,树种不同,模型的表达形式可能不相同。王华田等^[11]和刘德良等^[12]利用热扩散技术分别对北京西山地区和北京林业大学妙峰山试验林场侧柏人工林进行了测量,发现侧柏边材与其树干直径呈显著相关关系。本文应用当前先进的热扩散式技术定量测量了黄土高原半干旱区人工侧柏自然生长条件下的树干液流速率并估算了林分蒸腾耗水量,分析了其蒸腾耗水规律与气象因子、土壤水分之间的关系。旨在定量研究侧柏水分运移规律及其与环境因子内在关系,为当地生态环境建设提供理论依据。

1 研究区概况与试验方法

1.1 试验区概况

研究区位于陕西安塞县境内的中国科学院安塞水土保持综合试验站的山地试验场,地理位置为 109°19'E,36°51'N,海拔 1010~1431 m,属典型的黄土丘陵沟壑区,水土流失面积占总面积的 96%,属典型的生态环境脆弱区。气候为暖温带半干旱大陆性季风气候,年均气温 8.8℃,极端最高和最低温度分别为 36.8℃和 -23.6℃,年平均降水量 500 mm 左右,其中 6~9 月份为雨季,占全年降水量的 72.9%;土壤以黄绵土为主,约占总面积的 95%,土壤容重为 1.32g·cm⁻³,土壤孔隙度为 57.77%;主要植物有侧柏、柠条、刺槐和白羊草等。

供试验用的侧柏人工林 1982 年栽植,林分密度为 2230 株·hm⁻²、平均地径 8.8 cm、平均树高 5 m,海拔 1198 m。林地坡向东偏北 20°、坡度 25°。林木个体差异不大,地径主要分布在 8~10cm,占整个林分的 86%;林下无植被。

1.2 研究方法

1.2.1 树干液流测定

在林内设置 20 m×20 m 的标准样地,选择不同径阶、生长良好、树体通直、无被挤压的侧柏样木 6 株,应用热扩散茎流计在 4 月下旬至 10 月对其进行了连续监测。为了避免太阳直射引起的测量误差,将探针安装在树干北面。仪器的具体安装如下:(1)用小刀在样木离地面 30cm 处将树干粗死皮刮去;(2)用直径为 2mm 的钻头在探针安装位置上下钻出 2 个 10mm 深的小孔,2 孔间距为 15cm,将 10mm 长的热源探针和感应探针分别逐渐插入上部孔和下部孔;(3)用玻璃胶将探针与树体之间的空隙涂抹封好,以防止树干流下的水分与探针接触;(4)用胶带纸将探针尾部所连的电缆线小心固定在树干上,并与电源(12V 电源适配器)连接;(5)用锡箔护罩将安装探头所在的树干部分包裹起来;(6)将笔记本电脑与 CR1000 数据采集器(*Data Logger*)连接来设置采样程序,数据记录间隔为每 30s 获取一次数据并记录每小时的平均值。根据通用的 Granier 液流计算公式^[13]:

$$V_s = 0.0119K^{1.231} \quad (1)$$

式中, V_s 为液流速率(cm/s); $K = (dT_m - dT)/dT$;其中 dT_m 为无液流时加热探针与参考探针的最大温差值, dT 为瞬时温差值。

1.2.2 树干边材面积的测定

为了避免生长锥取样对树木的损伤,在样木周围按照树干径级大小选取 6 株侧柏,并在样地中随机选取

14 株侧柏,用生长锥取样确定树木边材面积。在确定地径-边材面积数量关系的基础上,根据每木调查数据计算出样地侧柏的总边材面积。

表 1 被测样木基本参数

Table 1 Basic parameters of samples

样木 No. of sample tree	地径(去树皮) Ground diameter (cm)	树高 Height (m)	第一侧枝高 First lateral branch height(cm)	冠幅 Crown width (m)	边材厚度 Sapwood width (cm)	边材面积 Sapwood area (cm ²)
1	8.7	5.2	50	2.1×2.2	2.9	52.8
2	8.7	4.5	30	1.9×2.0	2.7	50.89
3	9.6	5.3	50	2.3×2.6	3.2	64.34
4	9.5	4	35	1.8×1.9	3.1	62.32
5	8.6	4.8	50	1.7×1.9	2.8	51.02
6	10.2	4.6	55	2.2×2.5	3.3	71.53

1.2.3 气象因子测定

距固定样地 200 m 处有中科院安塞试验站自动气象观测站,测定的指标主要有光合有效辐射(Li-COR LI-190SZ PAR Sensor, U. S. A)、大气温度(Vaisala, HMP45D)、相对湿度(Vaisala, HMP45D)、风速(VAA151 Anemometer)、降雨(Vaisala, DRD11A Rain Detector)等指标,每小时记录 1 次。

水汽压差(VPD)是利用以下公式计算的^[14]:

$$e_s(T) = 0.611 \times \exp[17.502T / (T + 240.97)]$$

$$VPD = e_s(T) - e_a = e_s(T)(1 - h_r) \quad (2)$$

式中, $e_s(T)$ 为 T 大气温度下的饱和水汽压(kPa); T 为大气温度(°C); e_a 为周围气体水汽压(kPa); h_r 为相对湿度(%); VPD 为水汽压差(kPa)。

1.2.4 土壤水分测定

在林内矩形样地对角线随机布置 3 个土壤水分监测点。利用中子仪分别在每月 5、15 日和 25 日测定土壤水分。测量深度为 200cm^[15],按层次测量,0~100cm 土层按每 10cm,100~200cm 土层按每 20cm 记录读数一次,并与容重结合,求出每个土壤水分监测点土壤容积含水量,用 3 个测点数据的平均值来表示此一时期的土壤平均含水量,用每月的 3 次测定土壤含水量平均得到月平均值。并用土钻法于每月的 15 日校准中子仪所测量得数据,在样地取 3 次重复。

2 结果与分析

2.1 树干液流速率日变化及季节变化

为了直观反映树干液流速率变化的季节动态,采用每日 24h 的平均值代表单株日平均,并取 6 株日平均的平均值代表侧柏树干日平均液流速率。图 1 是样木 1~6 在 4 月 25 日~10 月 28 日(其中 6 月 6~26 日、7 月 30 日~9 月 2 日未测)树干液流日平均速率的变化曲线图。为了对其日变化动态进行分析与比较,选择地径相互差异较大的样木 1、3、6 对其不同月份典型晴天做树干液流速率日变化图(图 2)。

图 1、2 显示侧柏各月液流速率平均值和峰值会因环境因子的变化而上下波动,从图 2 中可看出,液流速率峰值在整个监测时期呈逐渐减小趋势,4~10 月份侧柏样木 1 典型日(图中标注日期)的最大值分别为 0.00504、0.00312、0.00275、0.00240、0.00211、0.00141、0.00145、0.00097、0.00073、0.00039 cm·s⁻¹;日均值(图中标注日期)也有这一趋势,分别为 0.00135、0.00097、0.00079、0.00072、0.00063、0.00037、0.00032、0.00020、0.00019、0.00011 cm·s⁻¹。分析产生这种变化的原因,一是可能与侧柏本身生物学特性有关,二是研究区由于降水稀少(2008 年 5~8 月总降雨量仅为 203mm),地表蒸发量大,植物根系吸水导致土壤不同层次的含水量逐月降低,4~9 月份月平均土壤含水量分别为 11.33%、10.31%、8.18%、7.82%、6.74%、6.87%,致使侧柏液流速率逐渐降低。在局部时期液流速率峰值明显小于前后时期,与总趋势不相符,原因是雨天林

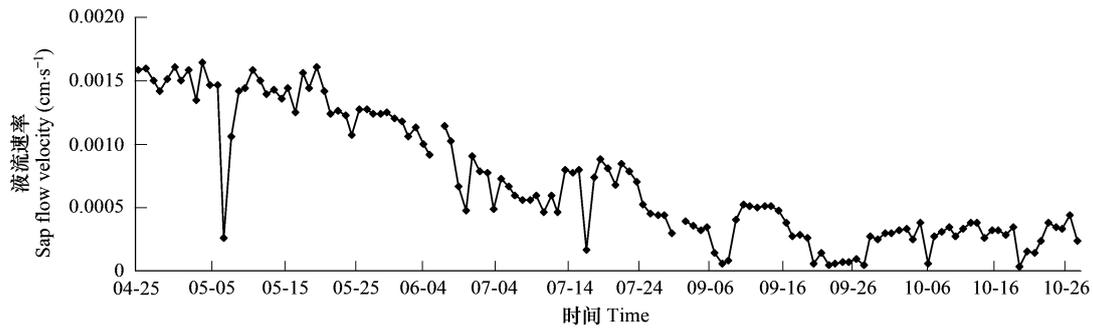


图1 侧柏液流日平均速率季节变化

Fig. 1 Seasonal fluctuation of average sap flow velocity of *Platycladus orientalis*

冠层接受的辐射少、相对湿度大、大气温度低,蒸腾速率明显减小,雨后几天的液流速率峰值比雨前大,主要是由于土壤含水量增加有利于树木对水分的吸收。

从图2还可以看出侧柏在不同月份的液流日进程基本一致,表现出明显的昼夜节律变化:8:00 前后开始启动,之后液流流速迅速增加,在 10:00 ~ 12:00 左右达到最大值,16:00 前后开始下降,直至次日液流启动之前降至最低值。夜间仍有微弱的液流存在,这主要是由根压引起的^[4]。根压使水分以主动吸收的方式进入树木体内,补充白天蒸腾丢失的大量水分,恢复体内水分平衡。

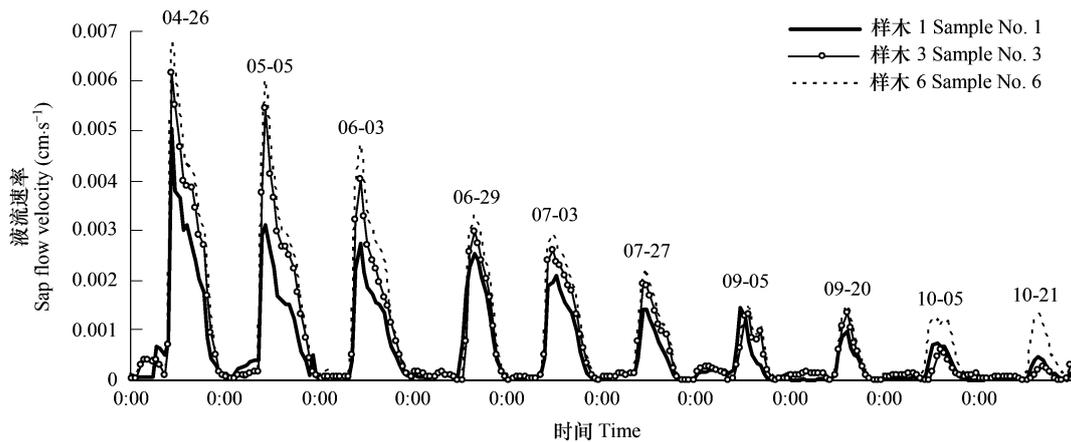


图2 侧柏液流速率不同月份典型日进程

Fig. 2 Diurnal variation of sap flow velocity of *Platycladus orientalis* at different month

2.2 液流速率与气象因子的相关关系

树木液流变化除受到树木的生物学结构、土壤供水水平影响外,还受到周围气象因子的制约^[16]。为直观显示侧柏生长盛期液流与气象因子间的变化特征,选取 7 月 16 ~ 21 日液流数据与气象数据(期间 17 日有 23.2mm 的降雨)作图(图 3)。在这期间光合有效辐射最高为 $1882.88 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;最高温度为 26.7°C ,最低温度为 14.5°C ;VPD 最大为 1.75 kPa ,最小为 0。可以看出:在早晨光合有效辐射弱、大气温度低、相对湿度高,侧柏树干液流小;随着光合有效辐射由弱变强、大气温度逐渐增高、相对湿度降低,树干液流速率上升很快,并在 10:00 ~ 12:00 时达到最大值。其后随着光合有效辐射减弱,大气温度降低,叶内外水汽压差减小,液流速度逐渐降低,至次日液流启动前达到最小值。由于 17 日有 23.2mm 的降水,相对湿度增大,全天接近 100%,光合有效辐射、大气温度和水汽压差降低,导致侧柏树干液流速率(峰值为 $0.00041 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)明显小于降雨前后两个晴天的液流速率,峰值仅为前一天的 7.5%。

为了进一步表达液流速率与气象因子的变化特征,选取土壤水分相对较好的 4 月 25 日至 5 月 31 日侧柏液流速率数据(885 个)和气象数据建立其相关关系模型。

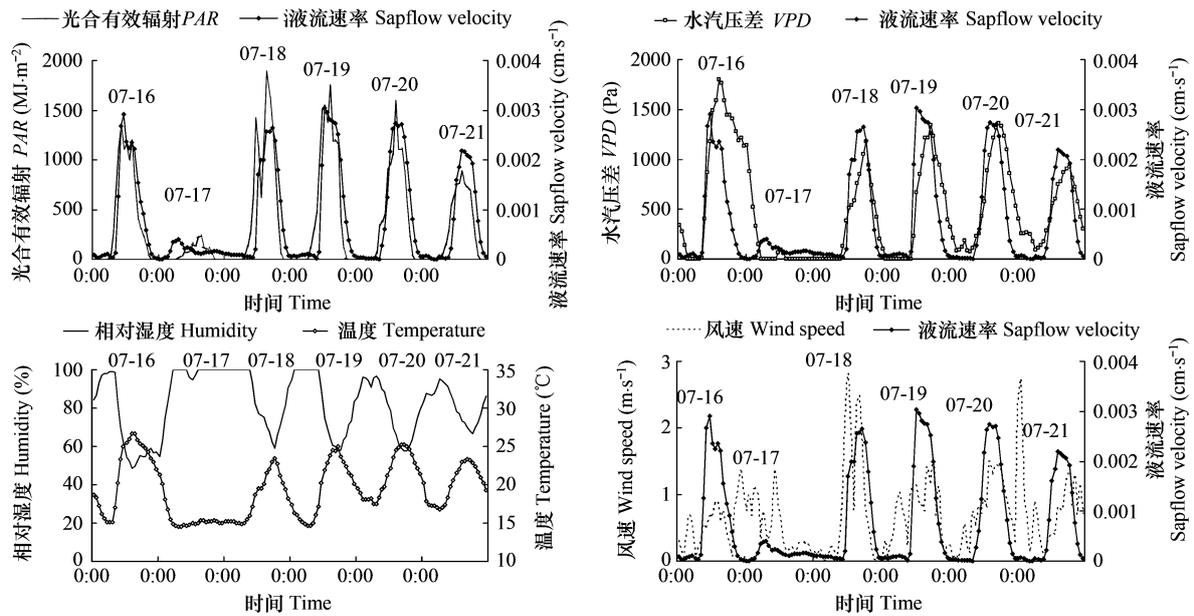


图3 侧柏液流速率与光合有效辐射、大气温度、相对湿度和水汽压差日变化

Fig.3 Diurnal change of sap flow velocity of *Platycladus orientalis* and PAR, air temperature, RH, VPD

表2 侧柏液流速率与气象因子的多元回归模型参数估计

Table 2 Parameters of multivariable model of sap flow velocity and meteorological factors

项目 Item	偏回归系数 $\times 10^{-5}$ Beta	标准误差 SE	t	Sig.	偏相关系数 Partial correlation
常数 Constant	69.08	0.165	4.17	0.000	
光合有效辐射 PAR	0.24	0.000	44.74	0.000	0.832
大气温度 Temperature	13.28	0.014	9.32	0.000	0.450
相对湿度 Relative humidity	-2.33	0.002	-7.95	0.000	-0.272
水汽压差 VPD	-0.11	0.000	-8.29	0.000	-0.541

$$V_c = 6.91 \times 10^{-4} + 2.40 \times 10^{-6} PAR + 1.32 \times 10^{-4} T - 2.33 \times 10^{-5} RH - 1.10 \times 10^{-6} VPD \quad (R^2 = 0.86, P < 0.001)$$

式中, V_c 为液流速率, PAR 为光合有效辐射, T 为大气温度, RH 为相对湿度, VPD 为水汽压差。

从表2给出的回归方程参数估计结果可看出,液流速率与入选各气象因子的关系性显著,各气象因子偏相关系数的显著性检验概率均为极显著相关,可见该回归方程能较好地表达侧柏液流速率与各气象因子变化的相关关系。由偏相关系数绝对值可知,各气象因子与液流速率相关程度大小顺序为光合有效辐射 > 水汽压差 > 大气温度 > 相对湿度。

2.3 侧柏耗水量估算

2.3.1 边材面积的确定

边材作为水分的输导组织,其面积大小与水分的传导能力直接相关,是计算液流及蒸腾的关键参数^[17]。由于树木个体差异大,其边材面积也不均一,这就需要对林分边材的分布作出预估,找出测树因子(如地径)与边材之间的关系。对研究地样方内侧柏样本抽样调查的办法,对边材、心材、地径等经过统计软件对线性、指数、幂、多项式等拟合结果发现:侧柏边材面积与地径之间存在着高度相关的关系(图4), $y = 0.6752x^{1.9984}$ $R^2 = 0.9958, n = 20$ 。其中, x 为侧柏地径; y 为侧柏边材面积。根据林分平均地径和林分密度,算出被测林分样地边材面积为 $4.65m^2$ 。

2.3.2 侧柏耗水量估算

图 1 显示的是侧柏(6 株平均)各天的液流平均速率,通过公式 3 可以计算出日平均液流量,通过累计可以计算出单株侧柏在生长季(4 月 25 日~10 月 28 日;其中 6 月 6~26 日、7 月 30 日~9 月 2 日未测量除外)的总液流量,为 0.52 t(平均值)。在乘以林分密度扩展至林分水平,最终计算耗水量为 1159.6 t·hm⁻²。

单木每日累积液流量(Q)计算式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n v_i \times A_s \times \Delta t \quad (3)$$

式中, n 为每天取样次数; v_i 为第 i 次取样时的液流速率($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); A_s 为边材面积(cm^2); Δt 为取样间隔时间(s)。

3 结论

侧柏日变化呈明显昼夜变化的单峰曲线。每日 8:00 时左右启动,10:00 时左右达到最大值,16:00 时左右迅速下降。另外,研究区侧柏林 2008 年 4~9 月土壤含水量逐渐减少,在生长季,侧柏液流速率峰值与平均值也逐渐降低。

侧柏树干液流速率与光合有效辐射、水汽压差、大气温度和相对湿度呈极显著的线性相关关系,相关程度绝对值顺序为光合有效辐射 > 水汽压差 > 大气温度 > 相对湿度。可用这几项气象因子的简单表达式来估测侧柏树木液流 $V_c = 6.91 \times 10^{-4} + 2.40 \times 10^{-6} PAR + 1.32 \times 10^{-4} T - 2.33 \times 10^{-5} RH - 1.1 \times 10^{-6} VPD$ 。

侧柏边材面积和地径间呈良好的幂指数关系: $y = 0.6752x^{1.9984}$ 。推算出在 4~10 月侧柏人工林的总耗水量为 1159.6 t·hm⁻²。然而,影响林分蒸腾耗水量的因素很多,作用机理复杂,尺度扩展中面临的问题十分复杂。边材液流速率是否会随着深度不同而变化,本文测量侧柏边材时测量深度仅为 1.0 cm,如何更全面地考虑单木边材深度对林分蒸腾耗水尺度转换的影响,还有待进一步研究。

References:

- [1] Huang Y L, Fu B J, Chen L D, *et al.* Effect of soil and water conservation on environment in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(1): 29-32.
- [2] Chen J, Liu W Z, Zhang X C, *et al.* Soil and water conservation benefits and suitability of different forestation trees in tableland-gully area of the Loess Plateau. *Journal of Northwest A & F University*, 2008, 36(6): 97-112.
- [3] Liu G B, Li M, Shangguan Z P, *et al.* Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for loess region in the northwestern China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 16-21.
- [4] Sun H Z, Li Y P, Wang C, *et al.* Comparative study on stem sap flow of non-and ring-porous tree species. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1434-1439.
- [5] Li H T, Chen L Z. A study on the volume and velocity of stem-sapflow of *Betula dahurica* and *Acer mono* Forests by the heat pulse technique. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(1): 1-6.
- [6] Sun H Z, Zhou X F, Kang S Z. Research advance in application of heat technique in studying stem sap flow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6): 1074-1078.
- [7] Braun P, Schmid J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitisvinifera* L.) 1. Stem morphology and use of the heat balance method. *Plant and Soil*, 1999, 215: 39-45.
- [8] Kostner B, Biron P, Siegwolf R, *et al.* Estimates of water vapor flux and canopy conductance of Scots pine at tree level utilizing different xylem sapflow methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 1996, 53: 105-113.
- [9] Sun L, Wang C K, Yang G T, *et al.* Sapflow flux of *Pinus koraiensis* plantation measured by thermal dissipation probes. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(11): 8-14.

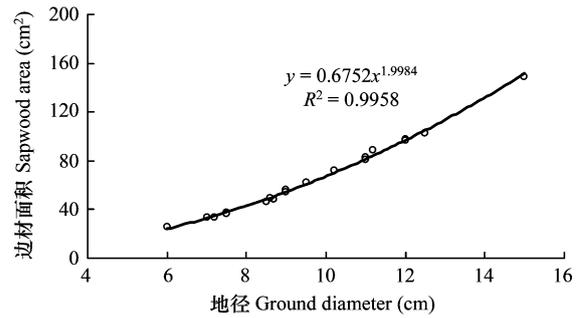


图 4 侧柏地径与边材面积的关系

Fig. 4 Curve fitting for Ground diameter and sapwood area of *Platycladus orientalis*

- [10] Xiong W, Wang Y H, Yu P T, *et al.* Variation of sap flow among individual trees and scaling-up for estimation of transpiration of *Larix principis-rupprechtii* Stand. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(1): 34–40.
- [11] Wang H T, Zhao W F, Ma L Y, *et al.* Spatial variation of sap flow of *Platycladus orientalis* and its affecting factors. *Scientia silvae sinicae*, 2006, 42(7):21–27.
- [12] Liu D L, Li J Y, Ma D, *et al.* Spatial variation pattern of *Platycladus orientalis* stem sap flow. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1262–1286.
- [13] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 7: 309–320.
- [14] Xu W T, Zhao P, Wang Q, *et al.* Calculation and modeling of the canopy stomatal conductance of *Acacia mangium* from sap flow data. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4122–4131.
- [15] Wang J X, Wang D H, Liu G Q, *et al.* Distribution characteristics of effective root density in the planted *Robinia pseudoacacia*. *Acta Bot Boreal-Occident Sin.*, 2004, 24(12): 2208–2214.
- [16] Tu J, Liu Q J, Li H T, *et al.* Dynamics of sap flow of *Pinus elliottii* and its relevant factors in rapid growth season at qianyanzhou experimental station of Jiangxi Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(1): 46–51.
- [17] Ma L Y, Sun P S, Ma L Y, *et al.* Sapwood area calculation and water use scaling up from individual trees to stands of Chinese pine and black locust. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23(4): 1–5.

参考文献:

- [1] 黄奕龙,傅伯杰,陈利顶. 黄土高原水土保持建设的环境效应. *水土保持学报*,2003,17(1):29~32.
- [2] 陈杰,刘文兆,张勋昌,等. 黄土高原沟壑区不同树种的水土保持效益及其适应性评价. *西北农林科技大学学报*,2008,36(6):97~112.
- [3] 刘国彬,李敏,上官周平,等. 西北黄土区水土流失现状与综合治理对策. *中国水土保持科学*,2008,6(1):16~21.
- [4] 孙慧珍,李夷平,王翠,等. 不同木材结构树干液流对比研究. *生态学杂志*,2005,24(12):1434~1439.
- [5] 李海涛,陈灵芝. 应用热脉冲技术对棘皮桦和五角枫树干液流的研究. *北京林业大学学报*,1998,20(1):1~6.
- [6] 孙慧珍,周晓峰,康绍忠. 应用热技术研究树干液流进展. *应用生态学报*,2004,15(6):1074~1078.
- [9] 孙龙,王传宽,杨国亭,等. 应用热扩散技术对红松人工林树干液流通量的研究. *林业科学*,2007,43(11):8~14.
- [10] 熊伟,王彦辉,于澎涛,等. 华北落叶松树干液流的个体差异和林分蒸腾估计的尺度上推. *林业科学*,2008,44(1):34~40.
- [11] 王华田,赵文飞,马履一,等. 侧柏树干边材液流的空间变化规律及其相关因子. *林业科学*,2006,42(7):21~27.
- [12] 刘德良,李吉跃,马达,等. 侧柏树干边材液流空间变化规律. *生态学杂志*,2008,27(8):1262~1286.
- [14] 许文滔,赵平,王权,等. 基于树干液流测定值的马占相思冠层气孔导度计算及数值模拟. *生态学报*,2007,27(10):4122~4131.
- [15] 王进鑫,王迪海,刘广全. 刺槐和侧柏人工林有效根系密度分布规律研究. *西北植物学报*,2004,24(12):2208~2214.
- [16] 涂洁,刘琪璟,李海涛,等. 江西千烟洲湿地松生长旺季树干液流动态及影响因素分析. *林业科学*,2008,44(1):46~51.
- [17] 马李一,孙鹏森,马履一,等. 油松、刺槐单木与林分水平耗水量的尺度扩展. *北京林业大学学报*,2001,23(4):1~5.