

DOI: 10.5846/stxb201301280172

莫康乐, 陈立欣, 周洁, 方显瑞, 康满春, 张志强. 永定河沿河沙地杨树人工林蒸腾耗水特征及其环境响应. 生态学报, 2014, 34(20): 5812-5822.

Mo K L, Chen L X, Zhou J, Fang X R, Kang M C, Zhang Z Q. Transpiration responses of a poplar plantation to the environmental conditions on a floodplain in Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5812-5822.

永定河沿河沙地杨树人工林蒸腾耗水特征 及其环境响应

莫康乐, 陈立欣, 周洁, 方显瑞, 康满春, 张志强*

(北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 杨树是我国北方最常见的人工造林树种之一。一直以来在干旱、半干旱地区, 速生杨树用材林和生态防护林的耗水问题备受关注。研究不同生长发育阶段杨树人工林蒸腾耗水及其对各环境因子的响应对于实现杨树人工林可持续经营具有重要价值。采用树干液流法结合微气象观测系统和土壤水分观测, 在 2010—2011 年对位于北京南郊大兴林场、林龄为 13a 的杨树人工林林分蒸腾耗水和环境因子进行了同步观测, 以期能够探究该林分的蒸腾耗水及其对环境因子的响应。结果表明, 树干液流密度(J_s) 日变化呈明显的单峰曲线, 单株样木耗水量随着胸径的增加而增大。在半小时尺度上, 单株树木 J_s 与净辐射(R_n)、饱和水汽压差(VPD) 存在时滞, 这种时滞现象随土壤水分条件不同而变化。林分蒸腾耗水总量在 2010 和 2011 年生长季内分别为 113.7 mm 和 174.8 mm, 占同期降雨的 30.2% 和 36.9%, 与该杨树人工林前期研究相比, 随着林龄的增长 2010—2011 年的蒸腾量呈减小趋势。日尺度上, 该人工林蒸腾耗水与净辐射(R_n)、饱和水汽压差(VPD) 和土壤体积含水率(SWC) 显著相关, 在不同土壤水分条件下 R_n 与林分蒸腾的相关关系发生变化, 而 VPD 过高会对林分蒸腾产生抑制。林分月蒸腾和年总蒸腾主要取决于同期降雨量, 因此, 降雨年际差异较大时, 蒸腾的年际变化也相应较大。

关键词: 林分蒸腾; 杨树人工林; 树干液流; 环境因子

Transpiration responses of a poplar plantation to the environmental conditions on a floodplain in Northern China

MO Kangle, CHEN Lixin, ZHOU Jie, FANG Xianrui, KANG Manchun, ZHANG Zhiqiang*

Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation in Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Poplar plantations are the most prevalent and the fastest expanding plantations in Northern China. However, the high water use of poplars necessitates careful consideration of their suitability for water-stressed regions. It is essential to find out the relationships between the water transpired by poplar plantation and environmental factors during different growing periods, which is very important in poplar plantation sustainable management. Many researchers have done a lot of job on this subject, but few referred to a mature fast growing poplar stand. In the current study the water use and response to environmental factors was evaluated by simultaneous measurements of sap flow using the TDP (Thermal Dissipation Probe) method, micrometeorological conditions and soil moisture in a 13-year old poplar (*Populus euramericana* cv. "74/76") plantation located on the floodplain of Yongding River in Daxing district, the southern suburb of Beijing, China from 2010 to 2011. Our objectives were to illustrate the water used for transpiration by this 13-year old fast growing poplar plantation

基金项目: 国家林业行业科研专项(201204102); 北京市教育委员会共建项目; 北京市林业碳汇工作办公室观测运行基金; 教育部重点项目(105027); 高等学校博士专项科研基金(20040022013); 中美碳联盟 USCCC 国际合作项目

收稿日期: 2013-01-28; 网络出版日期: 2014-03-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

and explore how the tree/stand transpiration responses to the different environmental conditions. The results showed that the daily pattern of sap flow was a bell curve. The daily water consumption of individual trees ranged from 6.4 to 59.7 kg/d, varying by season and sapwood which was calculated through the trunk diameter at breast height. On a ground area basis, the growing season transpiration was 114 and 175 mm in 2010 and 2011, respectively. It accounted for 30%—37% of precipitation over the same periods. Compared to earlier reports for poplars in literature, the observed water use was relatively low, likely attributable to growing age and no available irrigation during the study period. A diurnal hysteresis was observed between sap flow and vapor pressure deficit (*VPD*). Similarly, this situation was also true between sap flow and net radiation (*Rn*). The hysteresis was greater with high than low soil moisture, suggesting that transpiration did response to the change of soil moisture though indirectly. On daily scale, significant correlations were observed between daily stand transpiration and *Rn*, *VPD* and soil moisture. Besides, the relationship between transpiration and soil moisture was related to the depth of soil. The soil moisture under the surface 30—90cm affected transpiration most effectively. When the soil moisture changed, the relationship between stand transpiration and *Rn* or *VPD* varied. The growth of *VPD* stimulated the stand transpiration when it was not greater than 1 kPa. The over great value of *VPD* would slow down the growth of stand transpiration. Compared to the data of earlier research at this site, we found that the transpiration of the plantation declined with the stand age. On a monthly and annual scale, transpiration was correlated with rainfall, suggesting limited soil water storage. Simultaneously, we found that during dry months when transpiration could not be satisfied by rainfall, soil water storage offered the water to be transpired. However, the source of soil water storage was also come from rainfall thus the transpiration between 2010 and 2011 were quite different because of great rainfall difference in these two years.

Key Words: transpiration; poplar plantation; sap flow; environmental factors

杨树具有生长快、适应性强、易更新等优良特征,是中国北方最常见的用材、生态防护和景观人工造林树种。根据第七次全国森林资源清查,我国杨树人工林面积约为 700 万 hm^2 ,占人工林总面积的 11%,是世界上杨树人工林面积最大的国家^[1-2]。由于杨树的生理特征,其生长对光、水、热都有较高的要求^[3],而我国北方地区多为干旱、半干旱区,虽然光照和热量充足,但水资源缺乏,故在杨树人工林经营过程中,正确处理人工林和水的关系十分重要。因此,杨树人工林蒸腾耗水是研究者们关注的焦点^[3-7]。

树木与林份蒸腾是其生长发育状况与环境因子综合作用的结果。国内外学者从蒸腾耗水及其对太阳辐射、饱和水汽压差(*VPD*)、土壤水分等环境因子的响应等方面研究了杨树人工林蒸腾耗水特征。Hinckley 等发现杂交杨树干液流与太阳辐射有显著的相关关系,且二者之间存在时滞现象^[8]。Vose 等则发现美洲黑杨液流速率对 *VPD* 和太阳辐射均有响应^[9]。苏芳莉等探讨了小钻杨树干液流特征及其与环境因子的关系,发现除了光照强度、空气温度、空气湿度是影响液流速率的主要因子外,土壤含水量

与日平均液流速率也存在显著的相关关系^[10]。Chang 等除了讨论甘肃杨蒸腾速率对环境因子的响应外,还发现单株树木蒸腾耗水与边材面积之间存在正相关关系^[5]。较长时间尺度上(如年尺度)发现林分蒸腾与降雨量密切相关^[11-12]。在树木和林分蒸腾耗水与其生长发育阶方面,有研究表明:随着树木/林份生长发育直至成熟阶段,其蒸腾耗水将呈下降趋势。林龄超过 10a 的速生林,其林木叶面蒸腾、树干液流速率以及林分蒸腾耗水等都出现下降趋势^[13-15]。Delzon 等通过对比 10 年生、32 年生、54 年生和 91 年生的沙地海岸松,发现后三者的单位叶面积蒸腾量均小于 10 年生松的单位叶面积蒸腾量^[13];Si 等人对比了额济纳 15 年生、25 年生和 50 年生胡杨的树干液流速率,发现树干液流速率 15a>25a>50a^[14];赵平等研究发现马占相思人工林种植 15a 后生长速度呈下降趋势,耗水特征亦出现变化^[15]。

位于北京南郊大兴林场林龄为 13 年的欧美 107 (*Populus euramericana* cv. “74/76”)速生杨树人工林长势逐渐减缓,本文从以下两个方面探究其蒸腾耗水特征变化:(1) 树木及林分蒸腾对环境因子的响

应;(2)蒸腾耗水在不同时间尺度上的变化规律。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地位于北京南郊大兴区榆垓镇大兴林场,北纬 39°31'50",东经 116°15'07"。该地区属暖温带亚湿润气候区,年平均气温为 11.5 °C,最低气温 27.4 °C,最高气温 40.6 °C,年平均无霜期 209 d,年平均日照总时数 2772 h;平均风速 2.6 m/s,风向变化显著,夏季主风向为东南风;年平均降雨量为 569 mm,其中 7、8、9 月份降雨占全年降雨总量的 60%—70%。试验区地形平缓,平均海拔 30 m,坡度 <5°。土壤为冲击性沙壤土,土质疏松通透性好,土层厚度 220—240 cm,田间持水率 30.0%,萎蔫系数 1.4%。2001—2011 年平均地下水位 17.2m。

研究区内主要为集约栽培欧美 107 杨树 (*Populus euramericana* cv. "74/76") 人工纯林,总面积 0.8 km²,75% 为 2002 年种植,其余分别为 1998、2001 和 2003 年种植,初始栽植密度为 2500 株/hm²;2008 年冬季进行抚育间伐,调整后平均密度为 1840 株/hm²,且在研究区域内出现 0.165 km²的空地。在本研究中,实际研究区的范围为 0.635 km²。2010—2011 年成年杨树林平均胸径分别为 14.3、16.9 cm;平均树高分别为 16.9 m、17.5 m。林下主要植被为藜科的尖头叶藜 (*Chenopodium acuminatum*) 和菊科的黄花蒿 (*Artemisia annua* L.) 以及紫苜蓿 (*Medicago sativa*) 等。

1.2 试验方法

1.2.1 样木选择

根据林分调查结果,选取径阶分布在 10—30 cm、能够代表该林分 2010—2011 年径阶分布累计频率 90% 以上的样木,径阶分布频率见表 1,在 2010 和 2011 年生长季内 (5—10 月) 进行树干液流测定。2010 年测定 10 株样木;2011 年增加 5 株样木,共测 15 株样木。

1.2.2 树干液流的测定

树干液流采用美国 Dynamax 公司生产的 TDP 热扩散液流探针 (Thermal Dissipation Sap Velocity Probe) 测定,采用 Granier^[16] 提出的热扩散法进行计算。为消除树干液流的方位差异,统一在树干南面距地面 1.3m 处,用小刀将树皮刮去,根据边材厚度

表 1 2010—2011 年林分胸径频率分布

Table 1 The frequency distribution of DBH in 2010—2011

径阶/cm DBH class	频率 Frequency/%	
	2010	2011
0—2	0.0	0.0
2—4	0.0	0.0
4—6	0.7	0.0
6—8	7.7	1.3
8—10	13.2	5.6
10—12	15.8	7.3
12—14	12.1	10.6
14—16	15.0	15.9
16—18	13.6	25.2
18—20	9.2	11.0
20—22	8.1	10.0
22—24	4.0	7.3
24—26	0.4	4.0
26—28	0.4	1.0
28—30	0.0	0.7

钻孔 1—3 cm,插入 TDP 热扩散探针。TDP 探针长度根据样木胸径取 10—30 mm 探针,以尽量减小树干液流的径向差异。在安装探针处用锡箔纸包裹树干,防止太阳辐射、雨水入渗以及机械损伤对探针的影响。探针与 CR1000 数据采集器 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) 连接,数据采集器记录两个探针之间的温差数据,记录的数据为 30 分钟平均值。树干液流测算公式如下:

$$J_s = 0.0119 \left(\frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

式中, J_s 为单株样木液流密度 ($\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$); ΔT 是加热探针和数据传感探针之间的温度差 ($^{\circ}\text{C}$); ΔT_m 是每 1 d 中最大的温度差值 ($^{\circ}\text{C}$)。单株样木日耗水量为:

$$F_s = \frac{24 \times J_s \times A_s \times 3600}{1000} \quad (2)$$

式中, F_s 为单株耗水量 (kg/d); A_s 为样木边材面积 (cm^2)。采用生长锥测定不同胸径样木边材面积,建立二者的关系为: $A_s = 0.5014 \times \text{DBH}^2 + 1.5867 \times \text{DBH} + 12.6846$, $R^2 = 0.98$; DBH 为胸径 (cm)。

1.2.3 林分蒸腾估算

由于本林分中树木胸径存在分异,故蒸腾量从单株尺度到林分尺度的扩展采取胸径作为纯量来推

求林分尺度的蒸腾量^[17]。林分蒸腾量推求公式如下:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^m (Q_i \cdot A_{s_i} \cdot 1800)}{A_{\text{ground}}} \times 10^{-9} \quad (3)$$

式中, T 为林分尺度的日蒸腾量 (mm/d); Q_i 为第 i 径阶样木液流量之平均值 (cm^3); m 为径阶分级数目; A_{s_i} 为第 i 径阶树木边材面积之和 (cm^2); A_{ground} 为样地面积 (km^2)。

1.2.4 环境因子的测定

降雨量数据取自布置于林外的自计式雨量筒 (RG3-M, CS, USA) 观测值。土壤体积含水率 (SWC , cm^3/cm^3) 采用 TDR 土壤水分观测仪 (CS616, CS, USA), 其中 2010 年观测深度为 20 cm; 2011 年增加了一套仪器, 观测深度增加到 200 cm, 观测深度分别为 0—30、30—60、60—90、90—120、120—160、160—200 cm。其他气象传感器包括: 空气温湿度传感器 (HMP45C probe, CS, USA), 安装高度 2010 年为 5 m、10 m、15 m、20 m, 2011 年除了上述 4 个高度外, 增加了一套安装高度为 25 m, 温度和湿度取各层平均值; 净辐射仪 (Q7.1, REBS) 2010 年安装高度为 20 m, 2011 年安装高度为 28.5 m。上述各仪器均与数据采集器 CR1000 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) 连接, 每 30 min 对数据进行一次记录。

采用土壤相对有效含水率 REW 对土壤水份状况进行分级^[16], REW 的计算公式如下:

$$REW = \frac{SWC - SWC_{\min}}{SWC_{\max} - SWC_{\min}} \quad (4)$$

式中, SWC (cm^3/cm^3) 为土壤体积含水率, SWC_{\max} (cm^3/cm^3) 和 SWC_{\min} (cm^3/cm^3) 为研究时段内最大和最小土壤体积含水率, 本研究中, 取 2010—2011 年生长季内 (5—10 月) 所测土壤体积含水率的最大值和最小值作为 SWC_{\max} 和 SWC_{\min} 。

1.2.5 数据分析

2010 年的土壤水分数据由 6 月 22 日开始记录。其他环境因子数据通过剔除超过 $\pm 6SD$ 数据的方法剔除异常值。在分析蒸腾与环境因子的关系时, 对不同时间尺度进行了划分。根据单株样木和林分蒸腾对环境变化响应的敏感性不同, 半小时尺度上主要分析了单株样木树干液流与环境因子的关系; 在日、月和年尺度上主要分析了林分蒸腾与环境因子

的关系。分析过程中, 主要应用了 Pearson 相关分析和回归拟合方法。本研究中所有数据的处理及统计分析均采用微软 EXCEL 软件和统计软件 SPSS 进行。

2 结果与分析

2.1 生长季内环境因子的变化

各环境因子的变化趋势如图 1 所示。2010 和 2011 年生长季平均净辐射 (R_n) 分别为 $8.41 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $9.92 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 其中最大值为 $16.05 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $19.07 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 分别出现在 6 月和 7 月; 最小值为 $0.39 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $0.61 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 分别出现于 8 月和 10 月。2010 和 2011 年生长季 (5—10 月) 平均气温 (T_a) 及饱和水汽压差 (VPD) 相差不大, 平均气温分别为 $21.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $20.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 平均饱和水汽压差分别为 0.85 kPa 和 0.88 kPa 。2010 和 2011 年年总降雨量 (P) 分别为 404.8 mm 和 546.8 mm , 其中 5—10 月份的降雨量分别为 376.2 、 505.8 mm , 均占到年总降雨量的 90% 以上。2011 年降雨量较大, 但多集中于少数几场大雨。2010 年 20 cm 土壤体积含水率 (SWC) 为 3.5% — 17.3% ; 2011 年, 各层土壤含水率在 3.9% — 23.2% 间波动。浅层 (20—30 cm) SWC 对降雨的响应比较灵敏, 在雨后迅速增加后又很快的回落; 深层 (60—200 cm) SWC 只有在大雨后才得到补充, 深度越深, SWC 回落速度越慢。

2.2 单株样木耗水特征

生长季内不同径阶样木液流密度 (J_s) 平均值日变化趋势如图 2 所示。样木液流密度呈明显的单峰曲线, 8:00—10:00 液流迅速上升, 大部分大径阶样木液流启动时间早、液流增长快; 各径阶样木液流密度在 11:00—14:00 相继达到最大值, 但大部分样木的峰值点出现在午后; 液流密度在 18:00 后逐渐减小, 且大部分大径阶的样木液流下降速率较为缓慢; 夜间大径阶样木液流比小径阶样木的活跃。

图 3 表明单株树木蒸腾耗水量 (F_s) 随径阶的增大而增大; 2010 年样木胸径为 11.5 — 28.2 cm , 单株样木蒸腾耗水量为 7.2 — 59.7 kg/d ; 2011 年样木胸径为 12 — 30.1 cm , 单株样木蒸腾耗水量为 6.4 — 53.5 kg/d 。此外, 图 3 对比了本研究和中国甘肃石羊河^[4]、中国甘肃林泽^[5]、美国威斯康星州^[7]、美国华盛顿州^[8] 和美国德克萨斯州^[9] 杨树站点单株杨树耗

水量,尽管本研究林分大径阶样木多,小径阶样木 水量较小。
少,但与其他同径阶单株树木相比,单株树木蒸腾耗

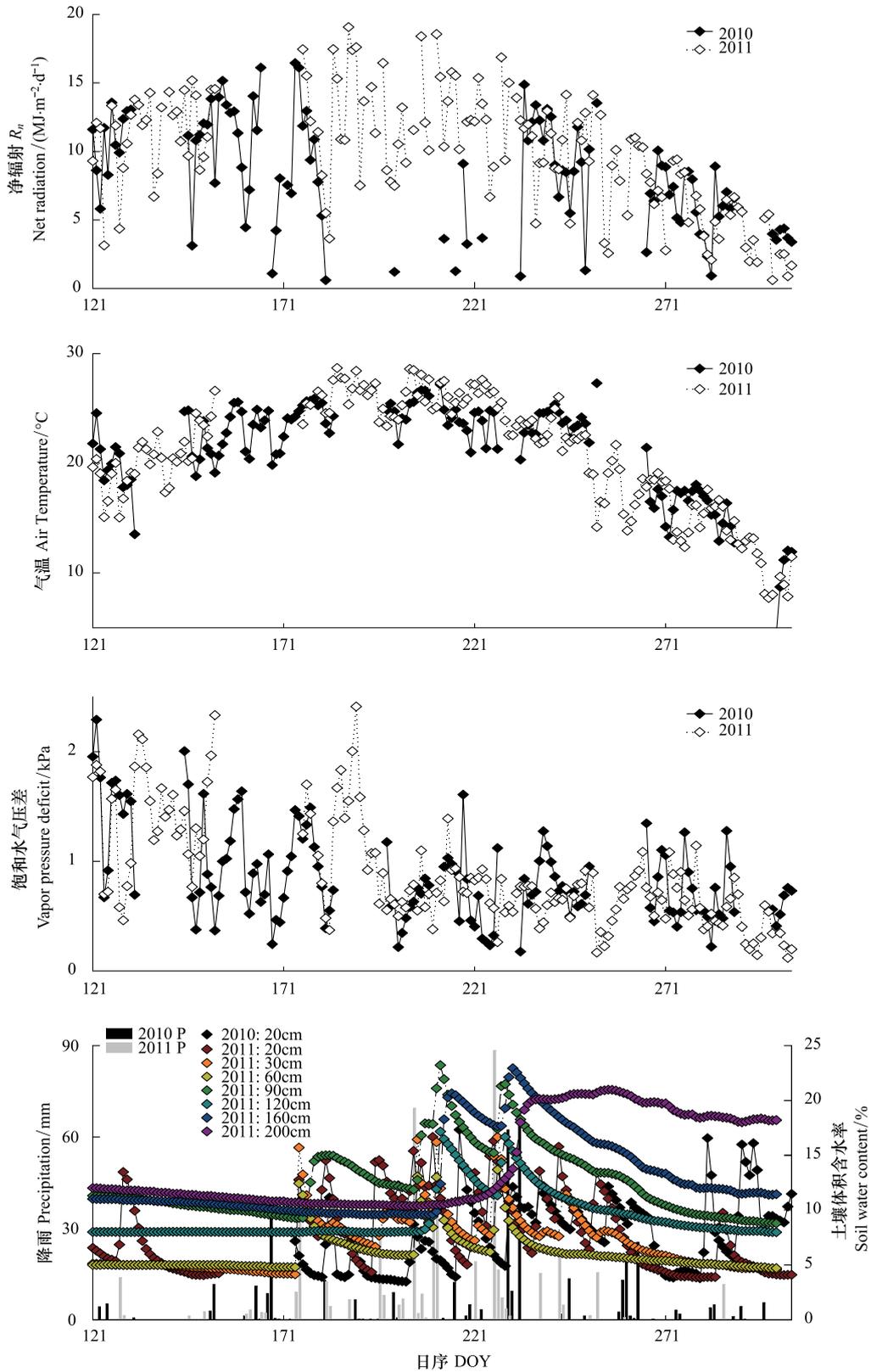


图 1 2010—2011 年各环境因子的变化趋势图
Fig.1 Trends of Environmental Factors in 2010—2011

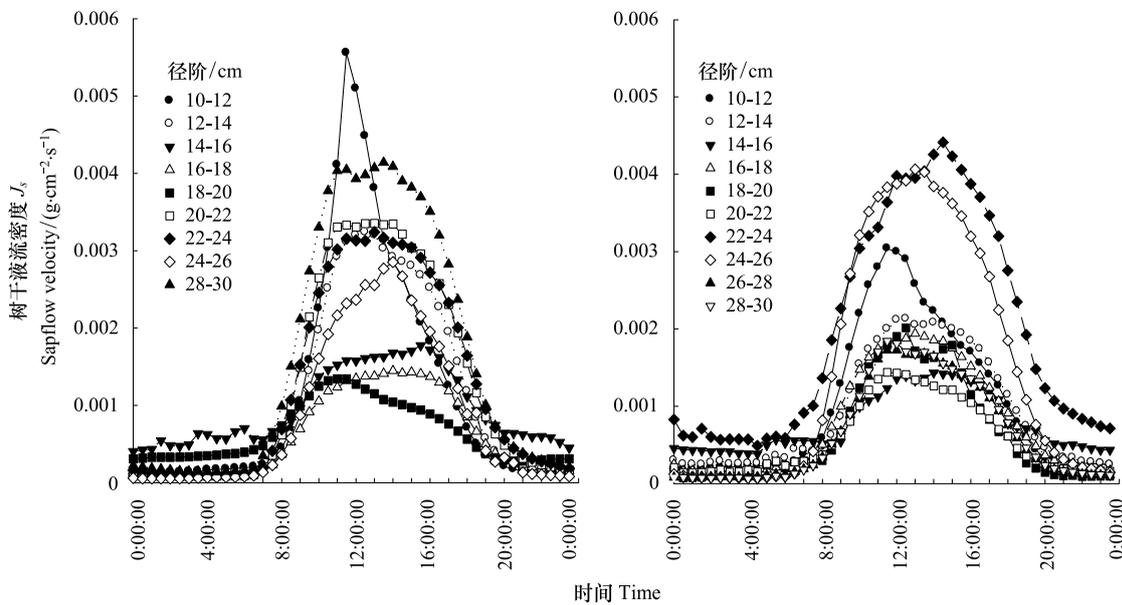


图2 不同径阶样树液流密度的日变化

Fig.2 Daily patterns of sample trees' sap flow

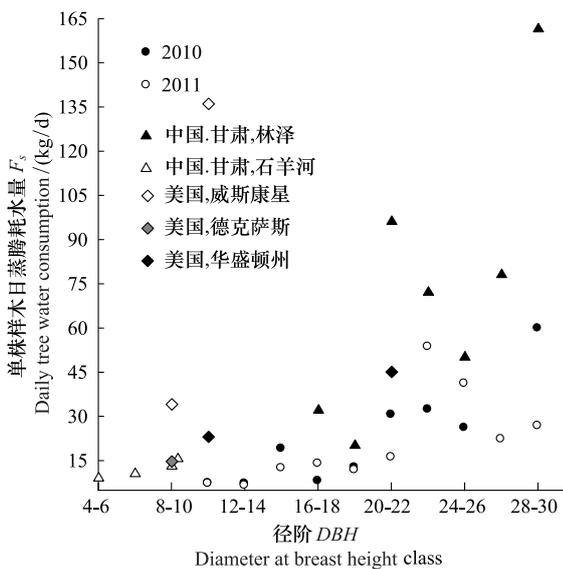


图3 单株杨树耗水量与径阶的关系

Fig.3 Sapflow of single poplar tree of different DBH in several sites

2.3 林分蒸腾耗水

表2给出了2010和2011年生长季内林分蒸腾耗水(T)变化。两年的日蒸腾量均在8月达到最大,且2011年各月的最大日蒸腾量均大于2010年。两年的生长季内,各月总蒸腾量呈现单峰变化,峰值均出现在8月份,2011年这一趋势更为明显,且各月总蒸腾量均大于2010年各月总蒸腾量。而林分蒸腾占同期降雨的比例在生长季内与月总蒸腾量变化趋

势相反,在生长季开始和结束时,林分蒸腾耗水占降雨比例大,甚至在有的月份蒸腾耗水超过同期降雨,而在蒸腾量较大的7月和8月,这一比例反而不大,这种现象在2011年尤为明显。

2.4 不同时间尺度上蒸腾对环境因子的响应

2.4.1 半小时尺度上单株样木树干液流对环境因子的响应

各径阶 J_s 平均值与 R_n 和 VPD 存在不同程度的时滞现象(图4)。虽然 J_s 和 R_n 达到峰值的时间差不多,但是在上升阶段, R_n 增长得比 J_s 快;在下降阶段, R_n 亦比 J_s 减小得快。而在土壤水分充足的情况下(以20cm $REW \geq 0.35$ 为例),这种现象更为明显。图4表明 J_s 与 VPD 之间存在时滞现象。当20cm $REW < 0.05$ 、 $VPD \geq 1\text{kPa}$ 时, J_s 的峰值出现时间比 VPD 提前约4h;其他情况下, J_s 的峰值出现时间比 VPD 的峰值出现时间提前约2h。无论土壤水分怎么变化, VPD 越大, J_s 与 VPD 的时滞现象越明显。

2.4.2 日、月和年尺度上林分蒸腾耗水对环境因子的响应

2010—2011年生长季内林分的日蒸腾与 R_n 、 VPD 、20 cm SWC 的Pearson相关系数分别为0.58**、0.25**、0.29**;分析2011年林分日蒸腾与各层 SWC 发现,蒸腾与30 cm SWC 、60 cm SWC 、90 cm SWC 、120 cm SWC 、160 cm SWC 、200 cm SWC 的Pearson相关系数分别为0.49**、0.49**、0.55**、0.44**、

0.35^{**}、-0.14(^{**} 表示双尾检验 Sig<0.01)。说明 R_n 、VPD 和 SWC 是影响林分日蒸腾的主要因子。在不同土壤水分条件下,林分蒸腾与 R_n 、VPD 的关系会发生变化。如图 5,以 20cm REW 分类,当 $REW \geq 0.35$ 时,林分日蒸腾量 T 随 R_n 呈指数幂增长;但当

$REW < 0.05$ 时, R_n 超过 $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 后, T 不但没有继续增大,反而小于 R_n 较小时的值,并且无论 R_n 如何增大, T 都维持在一个相对稳定的范围内波动。从图 5 看,无论是否存在土壤水分胁迫,当 $VPD > 1 \text{ kPa}$ 时 T 都会受到一定的抑制。

表 2 2010—2011 年生长季内各月林分蒸腾量

Table 2 Monthly stand transpiration during growing seasons in 2010 and 2011

月份 Month	月总蒸腾量/mm Monthly T		林分蒸腾与同期降雨之比/% Ratio of T and P		当月最大日蒸腾量/(mm/d) Maximum daily T	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011
5	13.9	23.4	139.3	122.9	0.7	1.0
6	16.7	25.2	22.4	44.1	0.9	1.3
7	14.5	35.4	48.7	15.9	0.7	1.6
8	27.0	40.6	17.1	23.5	1.6	1.9
9	23.1	25.2	29.5	112.6	1.5	1.9
10	18.4	25.0	74.1	215.5	1.0	1.4
总和/总平均 Sum/Average	113.7	174.8	30.4	34.6	1.1	1.5

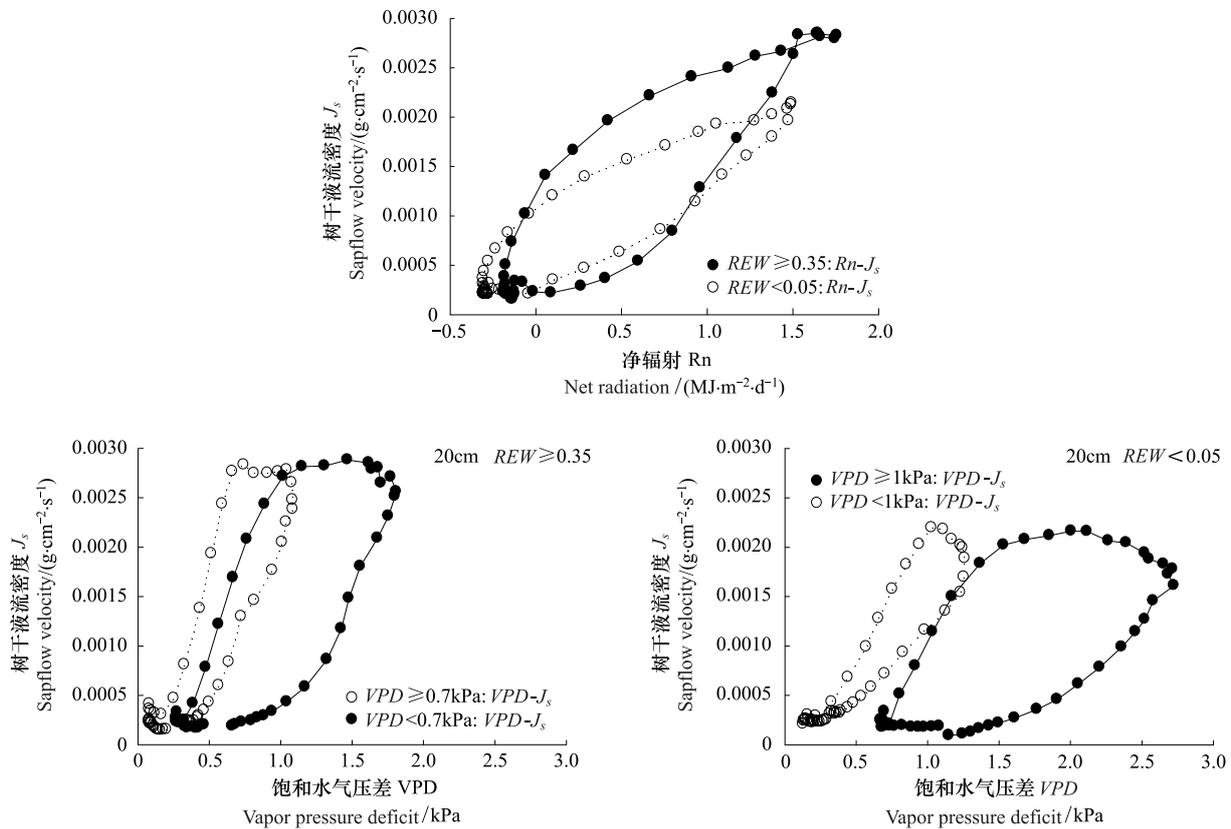


图 4 液流密度与净辐射、饱和水汽压差时滞现象

Fig.4 The hysteresis between sapflow velocity (J_s) and net radiation (R_n), vapor pressure deficit (VPD)

在月尺度上,林分月总蒸腾量与月总降雨量的关系最为密切,分别对 2010 年和 2011 年生长季内月总蒸腾量和月总降雨量进行线性回归拟合, R^2 分

别达到 0.78 和 0.82,置信度为 95%。另外,从表 2 可以看出,在降雨多的 2011 年,各月总蒸腾量均大于降雨较少的 2010 年各月蒸腾量。将该人工林 2006

年至 2009 年生长季^[18]与本研究 2010 年至 2011 年生长季研究结果结合,得出该林份生长季蒸腾量与降雨量成正相关(R^2 为 0.67,置信度为 95%)。由于蒸腾和降雨主要发生在生长季内,其他时段的降雨

量和蒸腾量所占比例很小,故生长季内蒸腾量和降雨量的分析可以代表年总蒸腾量和年总降雨量之关系。

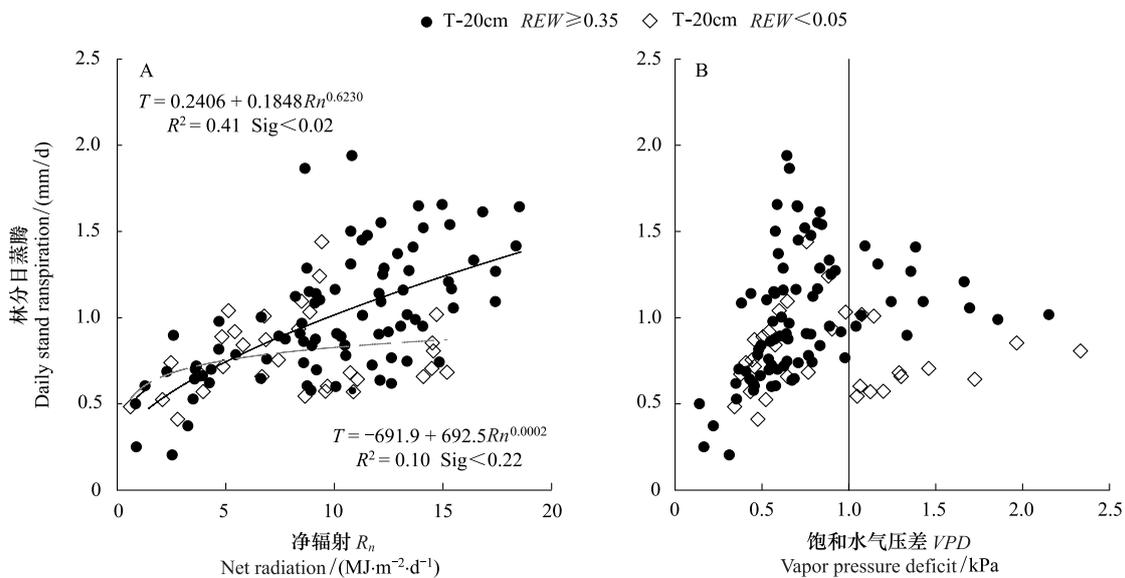


图 5 林分日蒸腾与净辐射、饱和水汽压的关系

Fig.5 The relationships between daily stand transpiration and R_n , VPD

3 讨论

3.1 蒸腾耗水量的对比

虽然各径阶样木的液流密度与径阶之间没有明显的关系(图 2),但从图 3 可以看出,通过(2)式计算得到的单株样木蒸腾耗水量随着胸径的增大而增大,与其他研究结果一致^[4-5,7-9]。与大部分杨树站点相比,本研究中的样木单株耗水量较少,尤其是小径阶样木($DBH < 20$ cm)耗水量与其他站点同径阶样木单株耗水量相差很大。虽然研究表明,杨树的种间与品系间耗水存在很大差异^[3],但林龄对蒸腾的影响也是一个重要的原因。根据 Zalesny 等人的研究,在速生杨树林幼龄阶段,林分蒸腾随树木生长增大很快^[7],对于幼龄林来说,虽然径阶较小,但由于其生长快,故耗水量大。在本研究中,虽然所选样木径阶存在很大差异,但是林龄相同,小径阶样木对光、水分、养分的竞争力较弱,生长较慢,其生理活性定然不如同径阶的幼树,故其蒸腾耗水量较小。

不少研究表明,在成熟林阶段,蒸腾会有明显的减少^[13-15]。对比本站点早期的研究结果,本研究的单株蒸腾耗水量和林分蒸腾总量均低于前期研究:

根据申李华等的研究结果,2006 年 DBH 为 10.0、13.8、16.4 cm 的样木日平均蒸腾耗水量分别为 29.2、44.3、69.3 kg/d^[19];刘晨峰等通过树干液流方法得到 2006 年生长季内该林分蒸腾量为 281 mm,占同期降雨量和灌溉量之和的 51%^[20]。对比 2006 年、2010 年和 2011 年的水热条件:(1)2006 年生长季内(121—304 d)降雨和灌溉总和为 515 mm;2010—2011 年生长季内无灌溉,降雨分别为 376.2、505.8 mm;(2)2006 年、2010 年和 2011 年生长季内净辐射平均值分别为 8.87、8.41、9.92 MJ m⁻² d⁻¹。可见,除了 2010 年水分条件较差,其余年份水热条件均相当,说明进入成熟林后,杨树人工林的蒸腾耗水开始逐渐减少。

导致成熟林蒸腾下降的原因为,林分进入成熟期后生长出现下降趋势。赵平等提出,马占相思人工林种植 15 年左右后,出现冠层萎缩、枯立木增加的景象^[15]。根据本站点 2008—2010 年林分生物量调查,林分碳储量年增长量出现逐年下降趋势:2008—2010 年碳储量年增量分别为 0.13、0.06、0.06 t/hm²,说明林分已过了生长旺盛期。另外,根据林分调查自 2008 年后林分胸径分布频率峰值一直稳

定在径阶 14—16 范围内,而本研究中林分蒸腾量是以胸径为纯量进行推求的,因此可以推断若降雨年际变化不大,林分蒸腾将不再有明显的增长。

3.2 不同时间尺度上蒸腾对环境变化的响应

大量研究表明,辐射、VPD 和土壤水分是在较小时间尺度上影响树木蒸腾的主要环境因素^[3-5,21-23],而较长时间尺度上降雨是决定蒸腾的主要因素^[11-12]。

辐射反应了可供植物用于进行蒸腾作用的能量。一些研究者发现辐射与树木蒸腾速率呈线性关系^[4,9],另一些研究者则认为辐射与树木蒸腾速率之关系可以拟合为饱和的指数曲线^[8,23]。本研究中用 R_n 表示辐射的影响, R_n 与日蒸腾量呈指数幂关系,这是因为植物的蒸腾作用仅在一定范围内随辐射增长而变得较为活跃,当辐射过大时,虽然可供植物进行蒸腾作用的能量充足,但其他受限于其他条件,如土壤水分和 VPD,蒸腾不再增长。VPD 反应了大气蒸发能力,蒸腾速率在一定程度上随 VPD 的增大而增大。虽然也有一部分研究对蒸腾速率和 VPD 进行了线性拟合^[4,22,24],但大部分研究还是认为蒸腾速率和 VPD 之间呈饱和曲线关系^[9,23,25-26],说明当 VPD 太大时会对树木蒸腾产生抑制。本研究中当 VPD 超过 1kPa 时,日蒸腾量逐渐减少,这一临界值与 Bovard 等得到的结果一致^[26],而略低于 Vose 等得到的临界值(1.5kPa)^[9]。从图 6 中可以看出,日蒸腾

量与 R_n 、VPD 的关系在不同土壤水分条件下差异很大,因为 R_n 和 VPD 主要反映了植物蒸腾的能量和蒸腾拉力基础,而土壤中可供树木蒸腾的含水量(REW)反映了蒸腾的物质基础。这也解释了本研究中,虽然 2010 年、2011 年的 8 月 R_n 月总量和 VPD 月均值虽然都没有达到生长季内的最大值,但由于 8 月降雨充足,月总蒸腾量在 8 月达到最大。

上述分析表明,土壤水分状况在一定程度上影响蒸腾,而根据图 1,土壤水分随降雨波动较大,故近年来,不少研究者亦开始关注降雨和蒸腾之间的关系。Zeppel 等在讨论澳大利亚不同林分在日、季、年尺度上的蒸腾规律时,提出年蒸腾量与年降雨量存在线性正相关关系^[11]。Llorens 等研究了地中海山区苏格兰松蒸腾的多年变化,认为降雨是造成蒸腾年际变化的主因^[12]。本研究中,在月总蒸腾量和月总降雨量之间存在显著的线性关系,所以 2010 年和 2011 年生长季内降雨总量相差较大,导致林分蒸腾的年际变化较大。另外,从图 1 可以看出,在 2011 年 7—8 月的几场大雨后,深层土壤水分得到了补足,但不同深度土壤水分的逐渐减少趋势是不同的。通过计算 2011 年各月土壤蓄水量(表 3)发现,自 8 月以后,30—120cm 各层的土壤蓄水量开始出现负值,而树木根系吸水在这一区域最为活跃,说明在生长季末降雨不足的情况下,土壤里蓄积的水分开始对树木蒸腾需水量进行补充。

表 3 2011 年生长季内各月不同深度土壤蓄水量/m

Table 3 Soil water storage of different depths during growing season in 2011

月份 Month	土壤层深度 Depth of soil						
	20 cm	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm	160 cm	200 cm
5	-0.07	-0.01	0.00	-0.05	0.00	-0.02	-0.04
6	0.23	0.06	0.12	0.21	0.00	-0.05	-0.04
7	-0.02	0.05	0.11	0.38	0.39	0.15	-0.01
8	0.14	-0.06	-0.18	-0.36	-0.25	0.35	0.56
9	-0.34	-0.03	-0.04	-0.23	-0.11	-0.33	-0.06
10	0.00	-0.02	-0.03	-0.07	-0.04	-0.08	-0.05

4 结论

在本研究中,树龄相同的单株样木蒸腾耗水量与胸径呈正相关关系;对比其他不同树龄的杨树人工林,同径阶内树龄大的单株蒸腾耗水量小于树龄小的单株耗水量。随着林龄的增长,该林分生长趋

势逐渐减缓,2010 与 2011 年大兴林场杨树人工林蒸腾耗水量较林分生长前期出现减小趋势,2010 和 2011 年生长季内林分蒸腾耗水总量分别为 113.7、174.8 mm,占同期降雨的 30.2%、34.6%。在半小时尺度上,单株样木树干液流与 R_n 、VPD 均存在时滞现象,且在不同的土壤水分状况下,这种时滞现象略

有不同。在日尺度上,林分蒸腾与 R_n 和 VPD 在一定范围内存在正相关关系,且这一关系受到土壤水分条件的影响;当 R_n 和 VPD 过大时,这种正相关关系受到抑制。在月尺度及年尺度上,降雨是影响杨树人工林林分总蒸腾量的主要因素,因此当年降雨量变化很大时,杨树人工林林分蒸腾量的年际变化较大。

References:

- [1] Fang Z S. Silviculture of poplar plantation in China: A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2308-2316.
- [2] Forest Resources Management Department of State Forestry Administration. China's forest resources status and dynamic change-based on analysis of the seventh national forest resource inventory results. Forestry Economics, 2010, (2): 66-72.
- [3] Petzold R, Schwärzel K, Feger K H. Transpiration of a hybrid poplar plantation in Saxony (Germany) in response to climate and soil conditions. European Journal of Forest Research, 2011, 130(5): 695-706.
- [4] Xu X Y, Tong L, Li F S, Kang S Z, Qu Y P. Sap flow of irrigated *Populus alba* var. *pyramidalis* and its relationship with environmental factors and leaf area index in an arid region of Northwest China. Journal of Forestry Research, 2011, 16(2): 144-152.
- [5] Chang X X, Zhao W Z, Zhang Z H, Su Y Z. Sap flow and tree conductance of shelter-belt in arid region of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 138(1/4): 132-141.
- [6] Sun D, Guan D X, Yuan F H, Wang A Z, Jin C J, Wu J B. Water consumption of poplar in agroforestry system in western Liaoning, northeastern China. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4): 114-120.
- [7] Zalesny R S Jr, Wiese A H, Bauer E O, Riemenschneider D E. Sapflow of hybrid poplar (*Populus nigra* L. \times *P. maximowiczii* A. Hermy 'NM6') during phytoremediation of landfill leachate. Biomass and Bioenergy, 2006, 30: 784-793.
- [8] Hinckley T M, Brooks J R, Čermák J, Ceulemans, Kučera J, Meinzer F C, Roberts D A. Water flux in a hybrid poplar stand. Tree Physiology, 1994, 14(7/9): 1005-1018.
- [9] Vose J M, Swank W T, Harvey G J, Clinton B D, Sobek C. Leaf water relations and sapflow in eastern cottonwood (*Populus deltoids* Bartr.) trees planted for phytoremediation of a groundwater pollutant. International Journal of Phytoremediation, 2000, 2(1): 53-73.
- [10] Su F L, Zhao H K, Guo C J, Jia Y H. Characters of sap flow of *Populus* \times *xiaozhuanica* and its relations with environment factors. Acta Agriculturae Boreali- Occidentalis Sinica, 2010, 19(1): 164-173.
- [11] Zeppel M J B, Yumusa I A M, Eamus D. Daily, seasonal and annual patterns of transpiration from a stand of remnant vegetation dominated by a coniferous *Callitris* species and a broad-leaved *Eucalyptus* species. Physiologia Plantarum, 2006, 127(3): 413-422.
- [12] Llorens P, Poyatos R, Latron J, Delgado J, Oliveras I, Gallart F. A multi-year study of rainfall and soil water controls on Scots pine transpiration under Mediterranean mountain conditions. Hydrological Processes, 2010, 24(21): 3053-3064.
- [13] Delzon S, Loustau D. Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 129(3/4): 105-119.
- [14] Si J H, Feng Q, Zhang X Y, Chang Z Q, Su Y H, Xi H Y. Sap flow of *Populus euphratica* in a desert riparian forest in an extreme arid region during the growing season. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, 49(4): 425-436.
- [15] Zhao P, Zou L L, Rao X Q, Ma L, Ni G Y, Zeng X P, Cai X. Water consumption and annual variation of transpiration in mature *Acacia mangium* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6038-6048.
- [16] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurement. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- [17] Čermák J, Kučera J, Nadezhdina N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. Trees, 2004, 18(5): 529-546.
- [18] Zhang Y. Energy and Water Budget of a Poplar Plantation in Suburban Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [19] Shen L H, Zhang Z Q, Liu C F, Zhu J Z, Zha T G, Fang X R, Chen J. Sapflow of *P. euramericana* cv plantation trees in sandy soil. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 88-92.
- [20] Liu C F, Zhang Z Q, Sun G, Zha T G, Zhu J Z, Shen L H, Chen J, Fang X R, Chen J Q. Quantifying evapotranspiration and biophysical regulations of a poplar plantation assessed by eddy covariance and sap-flow methods. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 706-718.
- [21] Huang Y Q, Zhao P, Zhang Z F, Li X K, He C X, Zhang R Q. Transpiration of *Cyclobalanopsis glauca* (syn. *Quercus glauca*) stand measured by sap-flow method in a karst rocky terrain. Ecological Research, 2009, 24(4): 791-801.
- [22] Oren R, Phillips N, Ewers B E, Pataki D E, Megonigal J P. Sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest. Tree Physiology, 1999, 19(6): 337-347.
- [23] Du S, Wang Y L, Kume T, Zhang J G, Otsuku K, Yamanaka N, Liu G B. Sapflow characteristics and climatic responses in three

- forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 1-10.
- [24] Chen L X, Zhang Z Q, Li Z D, Tang J W, Caldwell P, Zhang W J. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in Northern China. *Journal of Hydrology*, 2011, 402(3/4): 388-400.
- [25] Ewers B E, Mackay D S, Gower S T, Ahl D E, Burrows S N. Tree species effects on stand transpiration in northern Wisconsin. *Water Resources Research*, 2002, 38(7): 1029-2001.
- [26] Bovard B D, Curtis P S, Vogel C S, Su H B, Schmid H P. Environmental controls on sap flow in a northern hardwood forest. *Tree Physiology*, 2005, 25(1): 31-38.
- 参考文献:**
- [1] 方升佐. 中国杨树人工林培育技术研究进展. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2308-2316.
- [2] 国家林业局森林资源管理司. 中国森林资源第七次清查结果及其分析. *林业经济*, 2010, (2): 66-72.
- [6] 孙迪, 关德新, 袁凤辉, 王安志, 金昌杰, 吴家兵. 辽西农林复合系统中杨树水分耗散规律. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 114-120.
- [10] 苏芳莉, 赵鸿坤, 郭成久, 贾玉华. 小钻杨树干液流特征及其与环境因子的关系. *西北农业学报*, 2010, 19(1): 164-173.
- [15] 赵平, 邹绿柳, 饶兴权, 马玲, 倪广艳, 曾小平, 蔡锡安. 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化. *生态学报*, 2011, 31(20): 6038-6048.
- [18] 张燕. 北京地区杨树人工林能量平衡和水量平衡 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [19] 申李华, 张志强, 刘晨峰, 朱金兆, 查同刚, 方显锐, 陈军. 沙地杨树人工林树干液流特征. *中国水土保持科学*, 2007, 5(1): 88-92.
- [20] 刘晨峰, 张志强, 孙阁, 查同刚, 朱金兆, 申李华, 陈军, 方显瑞, 陈吉泉. 基于涡度相关法和树干液流法评价杨树人工林生态系统蒸发散及其环境响应. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 706-718.