

文章编号: 1001-1498(2008)06-0797-06

华北平原农田毛白杨防护林蒸腾变化规律 及其与气象因子的关系

任庆福¹, 孟平^{1*}, 张劲松¹, 高峻¹, 李春友²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 河北农业大学, 河北保定 071000)

摘要:于 2007 年主要生长季 (4—9 月), 采用热扩散 (TDP) 技术测算了华北平原农田 24 年生毛白杨防护林带的蒸腾速率, 分析了毛白杨蒸腾变化规律及其与气象因子的关系。结果表明: (1) 在晴天日和阴天日, 毛白杨蒸腾速率的日内变化都为单峰曲线趋势, 而在多云日受太阳辐射剧烈变化的影响, 为多峰曲线趋势。在 4、5、6、7、8、9 月份晴天日的单株日平均蒸腾速率分别为 5.44、7.84、8.05、7.87、7.26、7.17 L·h⁻¹, 在多云日分别为 4.10、5.87、6.84、6.68、6.49、5.88 L·h⁻¹, 在阴天日分别为 4.33、3.56、4.14、5.90、3.39、2.66 L·h⁻¹。(2) 毛白杨林带蒸腾量的日际变化或季节变化明显, 从 4 月份开始逐渐升高, 5 月份由于受林网内农作物灌溉量加大的影响, 蒸腾量与 6、7 月份基本持平, 8、9 月份逐渐降低。在 2007 年主要生长季 (4—9 月), 林带蒸腾总量为 488.016 mm, 4—9 月各月蒸腾量所占生长季总蒸腾量的比例分别为 11.17%、18.71%、19.30%、19.29%、16.66%、14.88%。(3) 主要生长期, 毛白杨蒸腾速率与同步观测得到的太阳辐射、空气温度、空气湿度和风速具有很好的复相关性, 回归分析得到的相关模型可通过显著性检验 ($P=0.01$); 且计算偏相关系数表明, 各月影响蒸腾速率的最主要气象因子均为太阳辐射。

关键词:毛白杨防护林带; 热扩散式技术; 蒸腾速率

中图分类号: S727.24 S792.117 **文献标识码:** A

Transpiration Variation of the Poplar Shelterbelts and Its Relation to the Meteorological Factors in the Cropland of North China Plain

REN Qing-fu¹, MENG Ping^{1*}, ZHANG Jin-song¹, GAO Jun¹, LI Chun-you²

(1. Research Institute of Forestry, CAF, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China;
2. Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: The transpiration of 24-year-old *Populus tomentosa* shelterbelts was investigated by Thermal Dissipation sap flow velocity Probe (TDP) in the cropland of north China plain from April to September in 2007. The variation of transpiration and its relationship to meteorological factors were studied. The main results are as follows: (1) The diurnal variations of transpiration demonstrated a single-peak curve in fine and cloudy day in the main growing season, but in the overcast day, it demonstrated a several-peak at the main growing season. And from April to September, the average velocity of transpiration per tree were 5.44, 7.84, 8.05, 7.87, 7.26 and 7.17 L·h⁻¹ in the fine days, 4.10, 5.87, 6.84, 6.68, 6.49 and 5.88 L·h⁻¹ in overcast days, 4.33, 3.56, 4.14, 5.90, 3.39 and 2.66 L·h⁻¹ in the cloudy days. (2) The daily variations of the shelterbelt transpiration (T_r) was characterized with that it rose gradually in April, and reaches a peak during about May, June and July, fell down was readily in Aug and Sep. In the growing season (4—9), the total T_r (T_oT_r) was 488.02 mm, and the ratios of the monthly

收稿日期: 2008-03-21

基金项目: 科技部社会公益性项目 (2004D B4J167)、国家“十一五”科技支撑课题 (2006BAD03A05) 部分研究内容

作者简介:

*通讯作者: 博士, 研究员, E-mail: Mengping@caf.ac.cn

shelbelt transpiration to the $ToTr$ was 11. 17%, 18. 71%, 19. 30%, 19. 29%, 16. 66% and 14. 88%. (3) In all months during the growth season of 2007, the transpiration showed significantly compound correlated with the solar radiation (Ra), air temperature, air relative humidity and wind speed ($r = 0. 01$), and Ra was the most important meteorological factor effecting on transpiration through comparing the partial coefficient

Key words: poplar shelterbelts; Thermal Dissipation Probe (TDP); transpiration

蒸腾是植物水分消耗的主要方式,在土壤-植物-大气连续体 (SPAC)水热传输过程中占有极为重要的地位,一直是农学、林学、气象、水文、土壤、地理等相关学科及领域共同关注的重要课题。随着水资源紧缺问题的日益严重,有关蒸腾问题的研究已受国际社会的愈加重视^[1]。揭示林木蒸腾耗水特征及水分供求关系,对水资源紧缺地区林业生产实践等具有重要的理论指导意义。华北平原是我国重要的粮食产区,但由于其地处干旱半干旱季风气候带,水资源紧缺日益严重,已成为制约当地农业、林业可持续发展的主要生态因素。农田防护林一直是该地区农业综合治理与开发、平原绿化工程的重要内容,为农业生产提供了重要的生态保障。杨树 (*Populus Linn.*) 是该区防护林的主栽树种,由于杨树根深叶茂,对比农作物,其个体尺度上耗水相对要高,故可能存在农业、林业用水矛盾等潜在问题,大面积发展杨树是否会进一步恶化水分生态环境是非常值得关注的问题。了解杨树蒸腾耗水特征,不仅可为华北平原农区优化设计与经营管理杨树防护林提供必要的水分生态理论依据,也是进一步研究杨树-作物复合系统种间水分关系的工作基础。

当前,长时期、连续测定植株尺度上林木蒸腾相对最为可靠的技术是热扩散液流法^[1-2],在树木蒸腾研究中已被广泛应用^[3-8]。目前有人采用该方法对 *P. euphratica* Oliv.、山杨 (*P. davidiana* Dode)、中林 46 杨 (*P. deltoides* Bartr. cv. 'zhonglin-46')、107 欧美杨 (*P. xeuram ericana* cv. "74/76")、大叶钻天杨 (*P. balsamifera* Pall.)、美洲黑杨 (*P. deltoides* Bartr.) 等杨树的液流或蒸腾耗水进行初步研究^[9-18],但这些研究基于研究目的及目标等原因,未深入分析蒸腾变化特征及其影响机制;而且由于各地气候条件存在差异,故某一试验地区研究结论不一定能完全适用于另一地区的生产实践。毛白杨 (*P. tomentosa* Carr.) 是杨树系列的一大主要树种,在我国分布面积广,是广大北方地区的主要造林树种,但目前未见基于热扩散液流法研究该品种蒸腾问题的报道文献。为此,本文将采用热扩散式树木液流测定技术,对华北平原农田 24 年生毛白杨防护林蒸

腾变化规律及其与气象因子的关系进行研究,为当地杨树防护林树种选择与结构优化、经营与管理、毛白杨防护林体系水分效益的深入评价提供理论依据。

1 试验地概况

试验区地处黑龙港流域的河北省饶阳县官厅乡 (115°40' E, 40°38' N),属暖温带大陆性气候,年平均气温 12. 2℃,年均日照时数 2 764 h,年均降水量 549. 8 mm,且年内降水量分配不均匀,多集中于 6—8 月份,地下水位 30~50 m,地势平坦,地貌类型为滹沱河决口淤积平原,土壤类型为砂壤质潮土。种植制度一年两熟。

该试验区面积 849 hm²,于 1983 年始建,目前已形成农田林网为主体,辅以各类林(果)间作、单一片林等多种形式结构组成的农林复合系统试验示范区。

2 研究材料及内容

在试验区中部选择一代表性较好的林网,网格面积为 500 m × 250 m,林带树种为 24 年生毛白杨,1 路 2 行 (4 m × 8 m),平均树高 20 m,平均胸径 45 cm,林带疏透度 0. 5~0. 7。林网内作物为冬小麦,其品种为“良星 99”,有灌溉条件。选取林带南北两侧平均样木 6 株。

2.1 小气候观测

2007 年 4 月 1 日—9 月 30 日,在距离防护林东部大约 600 m 处一块开阔地块,采用气候自动监测系统观测太阳总辐射 (Ra)、风速 (V)、降雨量 (P)、空气温度 (Ta) 及相对湿度 (RH)。 Ra 、 V 、 P 、 Ta 和 RH 观测所采用的传感器 (探头) 分别为 L200X、05103、TE525M、HMP45C。数据采集器为 AR5-20 mV,每 2 s 采集 1 次,每 10 min 输出 1 组平均值。

2.2 杨树树干液流与蒸腾观测

在所选 6 棵树的南、北 2 个方向处,安装 TDP 树干液流测定系统,采用热扩散液流法测定杨树蒸腾耗水量。液流测算公式^[19]如下:

$$F_s = 0. 0019 \times \left(\frac{dT_m - dT}{dT} \right)^{1.231} \times 3.6 \times SA$$

式中: F_s 为树干液流速率 ($L \cdot h^{-1}$), 可近似为蒸腾速率 (Tr)^[1-2,4], 按 $4 m \times 8 m$ 的密度将单株蒸腾量 (L) 转换为群体或单位土地面积的耗水量 (mm); SA 为胸径处边材面积 (cm^2), dT 为某时刻温差值 ($^{\circ}C$), dT_m 为一日内最大温差值 ($^{\circ}C$)。取 6 棵树的液流平均值为蒸腾最终测定值。数据采集器为 SQ2020, 观测时间与小气候同步。

数据处理与分析采用 Excel 和 SPSS13.0 统计软件。

2.3 叶面积指数

4月中旬开始, 采用 LAI2000 植被冠层分析仪 (LICOR, Inc., Lincoln, NE) 测定杨树防护林叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI), 每隔 10 d 左右测定 1 次。

3 结果与分析

3.1 毛白杨蒸腾速率时间变化特征

3.1.1 毛白杨蒸腾速率的日变化规律 按晴天、多云和阴天 3 种天气, 逐月将相同天气条件下各日对应时刻的蒸腾速率进行平均, 得到各月蒸腾速率的日变化曲线 (图 1~3)。

整个测定阶段, 毛白杨蒸腾速率均表现出明显的日变化规律 (图 1~3)。日内表现为在清晨 (6:30—8:30) 时, 启动并开始缓缓增大, 随着太阳辐射的逐渐增加, 气温逐渐升高, 蒸腾速率逐渐增强, 并于 13:00—15:30 到达峰值, 16:30—17:30 以后太阳辐射减弱, 温度降低, 蒸腾速率迅速下降, 19:30 后蒸腾速率下降变慢, 直至来日日出之前到最低值。

晴天天气条件下, 各月份毛白杨蒸腾速率均表现为单峰曲线 (图 1)。各月不同的是启动时间有明显差异: 5 月份明显早于其他月份, 而 8、9 月份要比 5 月份晚 1.5~2 h, 4、6、7 月份介于二者之间。从曲线上看, 4 月份蒸腾速率上升缓慢, 且峰值出现在 14:00, 数值比其他月份都要低, 仅为 $7.65 L \cdot h^{-1}$; 其他月份蒸腾速率从早上 6:30 左右开始上升, 上升速度很快, 于 13:00—15:30 到达峰值, 随着太阳辐射的减弱, 蒸腾速率逐渐下降。19:30 后蒸腾速率下降变慢, 直至来日日出之前到最低值。4、5、6、7、8、9 月份毛白杨单株最大蒸腾速率分别为 7.65 、 9.80 、 11.00 、 10.97 、 10.71 、 $11.22 L \cdot h^{-1}$, 6:00—18:00 单株日平均蒸腾速率分别为 5.44 、 7.84 、 8.05 、 7.87 、 7.26 、 $7.17 L \cdot h^{-1}$ 。

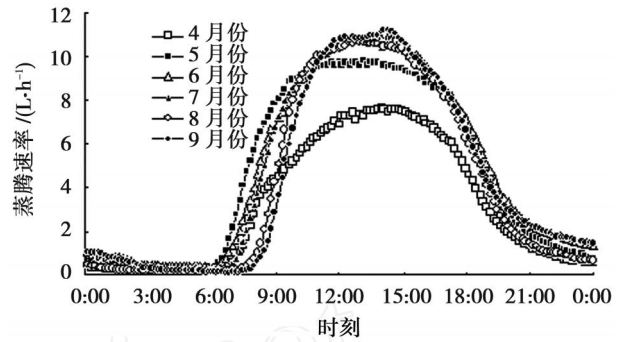


图 1 2007 年 4—9 月晴天毛白杨单株蒸腾速率的日变化

多云天气条件下, 各月蒸腾速率变化趋势没有晴天条件下那么平滑, 表现为多峰曲线趋势 (图 2) 5、6 月尤为明显。这主要是由于多云日云量较多, 太阳辐射变化剧烈。4、5、6、7、8、9 月份多云日单株最大蒸腾速率分别为 6.20 、 9.01 、 9.56 、 10.36 、 10.15 、 $10.05 L \cdot h^{-1}$; 6:00—18:00 日平均单株蒸腾速率分别为 4.10 、 5.87 、 6.84 、 6.68 、 6.49 、 $5.88 L \cdot h^{-1}$, 与晴天日相比, 单株最大蒸腾速率和日平均蒸腾速率均相对要低。

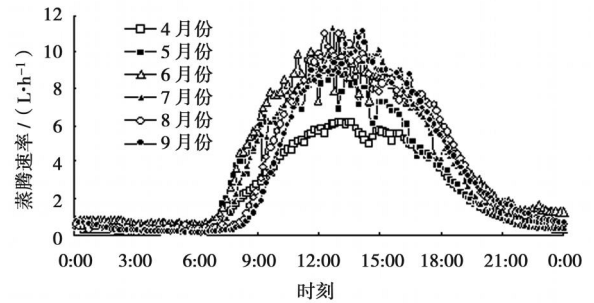


图 2 2007 年 4—9 月多云天气毛白杨单株蒸腾速率的日变化

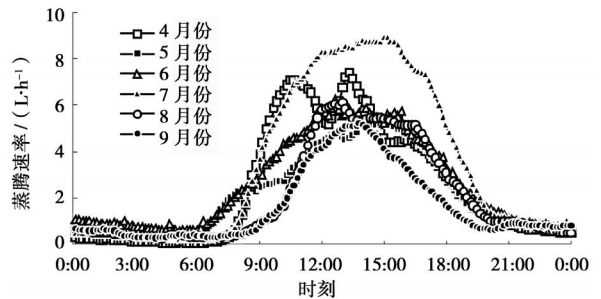


图 3 2007 年 4—9 月阴天天气毛白杨单株蒸腾速率的日变化

阴天天气条件下, 除 4 月份外, 其余各月份毛白杨蒸腾速率变化表现为单峰曲线 (图 3)。受天气影响, 各月份日蒸腾启动时间不尽相同, 其中, 5、6 月份, 蒸腾速率上升时间比其他各月早, 6:00 左右开始启动, 在 11:30—12:00 到达峰值, 峰值持续时间

较长,一直到 16:30—17:00 左右,然后蒸腾速率缓慢下降,单株最大蒸腾速率分别为 4.70 、 $5.97 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$;而 8、9 月份液流启动时间在 8:30 左右,比 5 月份要晚 2.5 h,但是上升速度较快,8 月份也于 12:30 到达峰值,9 月份相对滞后,单株最大蒸腾速率分别为 6.10 、 $5.23 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,明显比晴天条件下的低。在阴天天气条件下,6:00 - 18:00 的单株日平均蒸腾速率在 4、5、6、7、8、9 月份分别为 4.33 、 3.56 、 4.14 、 5.90 、 3.39 、 $2.66 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3.1.2 毛白杨林带蒸腾速率的日际变化 将各日蒸腾速率按 10 min 1 次进行积分,得到了每日蒸腾量,并统计得出林带蒸腾日际变化曲线(图 4)、各月林带蒸腾量及所占全年的比例(表 1)。从图 4、表 1 可以看出,林带日蒸腾量呈现出明显的日际变化或月变化特征。2007 年林带在主要生长季(4—9 月)蒸腾总量为 488.02 mm ,各月蒸腾量所占生长季总量的比例为:11.17%、18.71%、19.30%、19.29%、

16.66%、14.88%。从 4 月份起,随着气温的升高以及叶片的生长、叶面积指数的增加、太阳辐射的增强,蒸腾量逐渐增加,在 6、7 月左右达到最高值,8 月份以后蒸腾量逐渐降低。在 5 月份蒸腾量已经与 6、7 月份基本持平,无显著差异,这是由于 5 月份防护林内小麦处于生长旺期,灌溉量大,土壤水分充足,因此杨树蒸腾量随着增大。8 月份开始,太阳辐射开始减弱,月平均辐射强度下降到 $333.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,且 7 月底开始该地区进入雨季,阴雨日较多,因而林带蒸腾量下降。图 4 中,8、9 月份林带日蒸腾量虽然在某些天超过 $3.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,但从整个月份来看,还是有所降低,在整个生长季中,9 月份蒸腾量所占比例较 7 月份下降了 4.5 个百分点。图 4 中还显示,2007 年 4 月 5、12 日,5 月 22、23 日等日蒸腾值很低,不及 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,主要由于这些时日为阴雨天,例如 5 月 22 日的日平均辐射强度仅为 $3.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

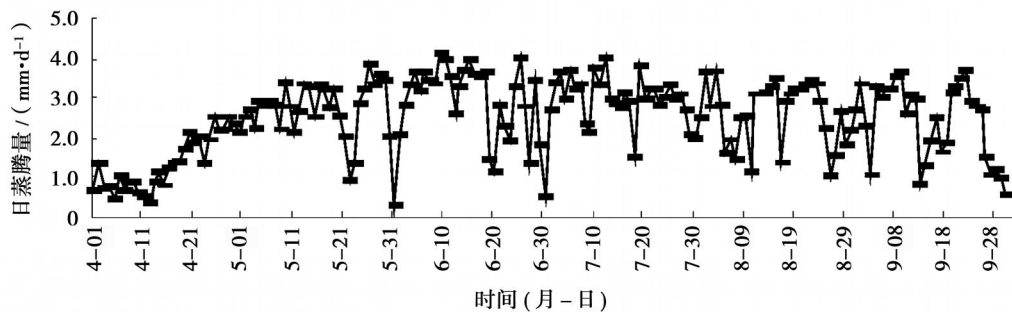


图 4 2007 年主要生长季毛白杨林带蒸腾量日际变化曲线

表 1 各月林带蒸腾量、降雨量及其占全主要生长季的比例

项目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	主要生长季总量
林带蒸腾量 /mm	54.50	91.29	94.18	94.12	81.32	72.61	488.02
各月蒸腾量占全主要生长季总量的比例 /%	11.17	18.71	19.30	19.29	16.66	14.88	100.00
叶面积指数	1.70	2.46	2.74	2.70	2.68	2.56	
降水量 /mm	1.25	63.75	86.60	67.90	93.00	54.25	366.75
月平均辐射强度 /($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	191.22	362.22	373.97	333.50	314.10	251.97	326.08

3.2 毛白杨蒸腾速率与气象因子之间的关系

毛白杨蒸腾速率与同步观测得到的空气温度、空气相对湿度、太阳辐射等气象因子密切相关,对 2007 年 7 月 5—10 日典型的连续 5 d 的日变化(图 5—8)分析表明:太阳辐射与蒸腾速率均呈现单峰曲线,二者呈现基本一致的变化规律(图 5),二者相关系数可达 0.812 1。说明太阳辐射是影响蒸腾速率较为直接的主导因子,而温度和湿度均呈现较宽的波浪曲线(图 6、7),并直

接受太阳辐射的影响。如:在 7 月 5、6、10 日天气晴朗,太阳辐射强度、空气温度较高,相对湿度低,蒸腾速率峰值较大;7 月 8 日为阴雨天气,太阳辐射强度变小,空气温度降低且日变化幅度相对较小,林带相对湿度上升,毛白杨蒸腾速率减少,峰值较小,且出现波峰的时间相对滞后。

进一步将所有观测的气象因子与毛白杨单株蒸腾速率进行回归,得到毛白杨蒸腾速率与气象因子的多元线性回归模型:

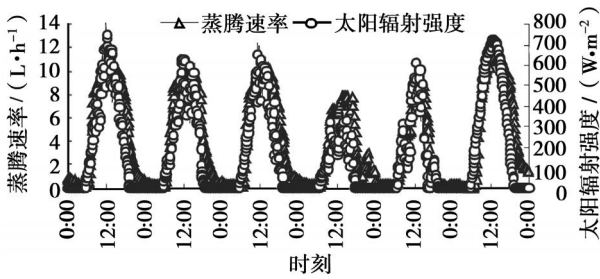


图 5 2007年 7月 5—10日毛白杨单株蒸腾速率与太阳辐射关系曲线

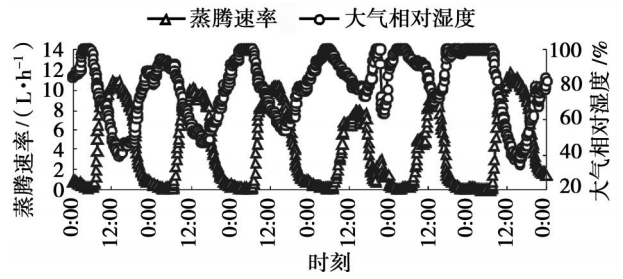


图 7 2007年 7月 5—10日毛白杨单株蒸腾速率与大气相对湿度关系曲线

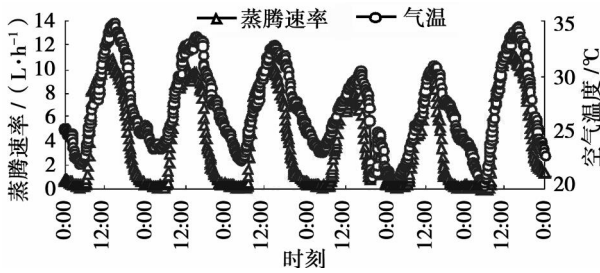


图 6 2007年 7月 5—10日毛白杨单株蒸腾速率与气温关系曲线

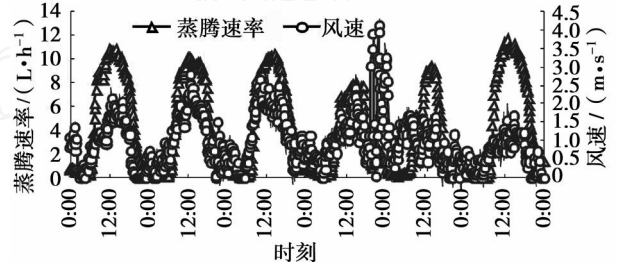


图 8 2007年 7月 5—10日毛白杨单株蒸腾速率与风速 (V)关系曲线

$$Tr = 0.240Ta - 0.035RH + 0.007Ra + 0.026V - 0.734 \quad (n = 25103)$$

$$R^2 = 0.822$$

式中: Tr 为毛白杨单株蒸腾速率 ($L \cdot h^{-1}$); Ta 为空气温度 ($^{\circ}C$); RH 为空气相对湿度 (%); Ra 为太阳辐射强度 ($W \cdot m^{-2}$); V 为风速 ($m \cdot s^{-1}$)。

$F_{(4, 25098)} = 29.001.54 > F_{(0.01)} = 3.32$, 通过显著性检验。 Ta 、 RH 、 Ra 、 V 的偏相关系数分别为 0.723、-0.631、0.815、0.499。可见,影响毛白杨蒸腾速率的最主要气象因子为 Ra 。各月内 Tr 与 Ta 、 RH 、 Ra 、 V 也具有很好的相关关系,回归方程见表 2。

表 2 生长季各月毛白杨树单株蒸腾速率与主要气象因子的回归方程

月份	回归模型	F值	回归系数 R^2
4	$Tr=0.179Ta - 0.019RH + 0.006 Ra - 0.542V - 0.038$	33.876.15	0.815
5	$Tr=0.215Ta - 0.018RH + 0.009 Ra + 0.041V - 1.423$	10.148.97	0.901
6	$Tr=0.324Ta - 0.045RH + 0.003 Ra + 1.264V - 2.680$	6.204.08	0.852
7	$Tr=0.277Ta - 0.061RH + 0.011 Ra - 0.057V + 0.004$	15.726.03	0.934
8	$Tr=0.232Ta - 0.107RH + 0.006 Ra + 0.322V + 6.116$	12.727.12	0.920
9	$Tr=0.259Ta - 0.076RH + 0.006 Ra + 0.307V + 3.792$	10.823.44	0.909

4 结论与讨论

(1)毛白杨蒸腾速率具有明显的昼夜变化规律。在晴天及阴天日,日变化呈单峰曲线趋势,但后者的峰值明显低于前者。在多云天气日,日变化呈多峰曲线趋势,主要原因在于太阳辐射等气象因子的相对不稳定,使得各个时刻蒸腾速率变化幅度较明显。

(2)毛白杨林带日蒸腾量呈现出明显的日际变化或月变化特征。从 4月份开始逐渐升高,5月份由于林网内农作物灌溉量加大的影响,与 6、7月份基本持平,并达到全年最高峰,8—9月份逐渐降低。2007年主要生长季(4—9月)林带蒸腾总值为 488.02 mm,

4—9月各月蒸腾量所占生长季总蒸腾量的比例分别为 11.17%、18.71%、19.30%、19.29%、16.66%、14.88%。蒸腾速率与同步观测得到的太阳辐射、空气温度、空气湿度和风速具有很好的复相关性,回归分析得到的多元线性模型可通过显著性检验 ($\alpha = 0.01$),各月影响蒸腾的最主要气象因子均为太阳辐射。

(3)土壤水分是植物需水的直接来源,是干旱半干旱地区植物生长的限制因子。本研究受测定技术等方面的限制,在测定蒸腾速率及其林带冠层气象参数的同时,没有同步自动观测土壤水分,为更深入了解该地区毛白杨防护林带蒸腾速率变化特征等问题,

需进一步研究根层土壤含水量的变化特征及其与蒸腾量、降水量以及灌溉量之间的关系。

(4)植物蒸腾受气象、土壤和植物自身生长状况的综合影响,为进一步揭示毛白杨防护林带蒸腾速率的影响机制,需深入分析气象因子、土壤水分和叶面积指数的动态变化对蒸腾速率的综合影响。

参考文献:

- [1] 张劲松,孟平,刘尉,等.应用热扩散式树木液流国产化传感器性能分析[J].林业科学研究,2007,20(3):370-374
- [2] 王鹤松,张劲松,孟平,等.华北石质山区山茱萸人工林蒸腾特征及水分供求关系[J].林业科学,2007,43(10):14-18
- [3] Do F, Rocheteau A. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes I. Field observations and possible remedies[J]. Tree Physiology, 2002, 22: 641-648
- [4] Fredrik L, Anders L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden[J]. Agricultural and forest meteorology, 2002, 112: 67-85
- [5] Lu P. Measurement of whole tree water use of some tropical and sub-tropical tree crops and its application in irrigation management[J]. Acta Horticulturae, 2002, 575: 781-789
- [6] Ping Lu, Lauren U, 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
- [7] Fiora A, Cescatti A. Diurnal and seasonal variability in radial distribution of sap flux density: implications for estimating stand transpiration[J]. Tree physiology, 2006, 26(9): 1217-1225
- [8] Nicolas E, Torrecillas A, Alarcon J. Using sap flow measurements to quantify water consumption in apricot trees[J]. Acta horticulturae, 2006, 717: 37-40
- [9] 马长明,管伟,叶兵,等.利用热扩散式边材液流探针(TDP)对山杨树干液流的研究[J].河北农业大学学报,2005,28(1):39-43
- [10] 张小由,康尔泗,张智慧,等.黑河下游天然胡杨树干液流特征的试验研究[J].冰川冻土,2005,27(5):743-746
- [11] 刘文国,袁玉欣,刘玲,等.“中林46杨”林分耗水特性及其与环境因子的关系[J].河北农业大学学报,2007,30(4):40-45
- [12] 申李华,张志强,刘晨峰,等.沙地杨树人工林干液流特征[J].中国水土保持科学,2007,5(1):88-92
- [13] 常学向,赵文智.荒漠绿洲农田防护树种二白杨生长季节树干液流的变化[J].生态学报,2004,24(7):1436-1441
- [14] 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
- [15] 张金池,黄夏银,鲁小珍,等.徐淮平原农田防护林带杨树树干液流研究[J].中国水土保持科学,2004,2(4):21-25,36
- [16] 桑玉强,吴文良,张劲松,等.毛乌素沙地杨树防护林内紫花苜蓿蒸散耗水规律的研究[J].农业工程学报,2006,22(5):44-49
- [17] Bladon K D, Silins U, Landhausser S M, et al. Differential transpiration by three boreal tree species in response to increased evaporative demand after variable retention harvesting [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 138: 104-119
- [18] Gazal R M, Scott R L, Goodrich D C, et al. Controls on transpiration in a semiarid riparian cottonwood forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137: 56-67
- [19] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 8: 309-320