

中国西北干旱区树木蒸腾对气象因子的响应

陈仁升, 康尔泗, 赵文智, 张智慧, 杨建平, 张济世

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要:应用数值方法,对中国西北干旱区 5 个主要树种(樟子松、榆树、二白杨、胡杨和沙枣)的叶面蒸腾及气孔导度对气象因子的响应进行了探讨,时间尺度为日。两套综合环境观测系统分别安置在黑河中游的临泽和下游的额济纳旗,每半小时自动记录微气象因子、土壤水分和树汁流量。应用日平均树汁流量、饱和差、总辐射、平均气温和土壤含水量拟合树木叶面蒸腾及气孔导度的经验公式。气孔导度和单个气象因子之间具有很高的相关性。应用多个气象因子所建立的经验公式能够很好的模拟气孔导度,模拟效果比气孔导度与单一因子的相关性高。气孔导度总体上和饱和差和气温呈指数关系,与总辐射的关系多种多样,与土壤含水量的关系较复杂。在中游地区,二白杨气孔导度、叶面蒸腾量和单株树木树汁流量最大。试验期间下游试验点土壤水分充足,耐旱树种胡杨及沙枣树汁流量较大,但其气孔导度及叶面蒸腾量均较小。本次研究没有发现树木叶面蒸腾量和单一环境因子之间具有明显的相关性。叶面蒸腾模拟效果没有气孔导度模拟效果好,原因是叶面蒸腾是气孔导度和饱和差的函数。

关键词:叶面蒸腾;气孔导度;气象因子;响应;模型

Trees transpiration response to meteorological variables in arid regions of Northwest China

CHEN Ren-Sheng, KANG Er-Si, ZHAO Wen-Zhi, ZHANG Zhi-Hui, YANG Jian-Ping, ZHANG Ji-Shi
(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 477~485.

Abstract: A central issue in hydrology today is to establish relationships between hydrological and biological processes in ecosystems. Water availability is a sparse and often restricting factor for plant production in the Arid Regions of Northwest China (ARNC). Owing to the analogy between the transpiration and CO₂ diffusion processes, water shortage may limit CO₂ assimilation and reduce the photosynthetic process. While for the low vegetation density and high soil evaporation, the water use efficiency is very low in ARNC. In order to use the short water resources efficiently to get high plant production, and to protect the deteriorating environments such as desertification and sandstorm in ARNC, where a number of shelterbelts and some riparian forests are in existence, transpiration of the major five tree species in this region are measured using sapflow techniques in the summer and early autumn, 2002. Tree transpiration is the major pathway for both water and energy leaving the forest ecosystems, and it depends on soil moisture and other weather parameters strongly. The scale at which the forest is studied answers different questions in the context of energy and matter. Studies at tree level provide an averaged response of the mostly non-linear physiological processes, and are therefore, more useful for empirical modeling.

The two experimental sites are located in the midstream and downstream of the Heihe river basin that is the second largest inland river basin of ARNC, named Linze and Erjinaqi, respectively. In the Linze site, the Mongol Scotch Pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litvin), Dryland Elm (*Ulmus glaucescens* Franch) and Gansu Poplar (*Populus gansuensis* C. Wang et

基金项目:中国科学院方向性资助项目(KZCX3-SW-329);国家自然科学基金资助项目(40301010、40235053);中国科学院知识创新重大资助项目(KZCX1-10-03-01)

收稿日期:2003-05-15;**修订日期:**2003-12-25

作者简介:陈仁升(1974~),男,山东沂水人,博士,副研究员,主要从事寒旱区水文水资源模拟研究。E-mail:crs2008@ns.lzb.ac.cn

Foundation item: Department Item of CAS(No. KZCX3-SW-329); National Sciences Foundation Item(No. 40301010、40235053); Knowledge Item of CAS (No. KZCX1-10-03-01);

Received date:2003-05-15;**Accepted date:**2003-12-25

Biography: CHEN Ren-Sheng, Ph. D., Associate professor, Major in hydrological model in cold and arid regions. E-mail: crs2008@ns.lzb.ac.cn

H. L. Yang) are the dominated tree species. A desert riparian forest in Erjinaqi is selected where the Euphrates Poplar (*Populus euphratica* Oliv.) and the Russia olive (*Elaeagnus angustifolia* Linn.) are the dominated tree species.

An ENVIS System EERIL 3 (GMBH) was used to measure microclimate variables, soil moisture and sapflow every half an hour in each site. Sapflow was measured using sapflow sensors (UP GMBH) at 1.3m height for each selected tree, and the measuring principle is the heat diffusion method. The leaf area index (LAI, LAI2050,LI-COR INC.) and the projected area (PA) of each observed tree are measured. Fredrik *et al.* summarized the relationship between the sapflow and transpiration, and stated that the sum of transpiration totals could be assumed to equal the sum of transpiration in daily scale in usual conditions. Thus the transpiration per leaf area and the tree conductance (TC) are calculated in daily scale according to the methods:

$$E = F \times 1000 / (PA \times LAI \times 24 \times 60 \times 60)$$

Where E is the tree transpiration per leaf area ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), PA is the tree canopy projected area (m^2), LAI is leaf area index, and F is the daily sapflow ($\text{l} \cdot \text{d}^{-1}$).

Tree conductance (TC, m s^{-1}) is a function of daily averaged vapor pressure deficit (D , Pa) and the tree transpiration per leaf area E :

$$TC = \frac{\lambda E \gamma}{\rho c_p D}$$

where λ is the latent heat of evaporation of water ($2465 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$), γ is the psychrometer constant ($65.5 \text{ Pa} \cdot \text{K}^{-1}$), ρ is the density of the air ($1225 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$), and c_p is the specific heat of air ($1.01 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

In the observed period, the averaged sapflow of Euphrates Poplar is $22.64 \text{ l} \cdot \text{d}^{-1}$ and of Russia olive is $6.95 \text{ l} \cdot \text{d}^{-1}$. The averaged sapflow of Mongol Scotch Pine, Dryland Elm and Gansu Poplar is $4.03 \text{ l} \cdot \text{d}^{-1}$, $4.60 \text{ l} \cdot \text{d}^{-1}$ and $10.93 \text{ l} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. The averaged transpiration per leaf area of Euphrates Poplar and Russia olive is 0.34 and $0.13 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively, while of Mongol Scotch Pine, Dryland Elm and Gansu Poplar is $0.25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, $0.55 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ and $2.19 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. The averaged TC of Euphrates Poplar and Russia olive is 0.00025 and $0.00011 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, while for Mongol Scotch Pine, Dryland Elm and Gansu Poplar, the averaged value is of $0.00037 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $0.00082 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and $0.0033 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively.

The relationships between TC and air temperature, vapor pressure deficit, global radiation or soil relative extractable water are correlated using least square method. In most cases, the relationship between TC and daily averaged air temperature or vapor pressure deficit is exponential, and between TC and global radiation or soil water content is versatile.

The vapor pressure deficit D , global radiation R , air temperature T and soil relative extractable water θ_{REW} are also used together to fit an empirical model of TC for each tree in each observed stage using numerical iteration methods. The function has the form like this:

$$TC = f(D)f(R)f(T)f(\theta_{REW})$$

The relationships between TC and all the selected weather factors are better than the relationships between TC and any single factor. The transpiration per leaf area is also simulated and the results are well too. However, the transpiration could not be simulated as well as the TC, because it is a function of TC and vapor pressure deficit.

The direct relationship between sapflow or transpiration per leaf area and any single meteorological variable is not found in this study.

Key words: transpiration per leaf area; tree conductance; weather variable; response; models

文章编号:1000-0933(2004)03-0477-09 中图分类号:Q143 文献标识码:A

在当今生态水文学领域,一个重要的研究课题就是探讨水文变量和生态变量之间的关系^[1]。我国西北干旱区水资源极度短缺并且往往是限制植被生长的一个控制因子^[2, 3]。鉴于CO₂扩散和蒸腾之间的对比关系,水量短缺将会限制CO₂吸收和植被光合作用过程^[4, 5]。由于低植被覆盖率和高土壤蒸发,西北干旱区水资源利用效率极低^[6]。为充分利用西北干旱区有限的水资源,保护不断恶化的生态环境如荒漠化和沙尘暴,当前在该区已经开展了大量的研究工作,如土壤-植被-大气系统(SVAT)、生态水文^[7]、生态经济^[8]和分布式水文模型^[9]等等。

为防风固沙,在西北干旱区绿洲内部及边缘地带建立了许多防护林。另外,在内陆河河道附近及下游低洼地区也存在一些

荒漠河岸林。树木蒸腾是森林系统能水消耗的主要途径,其大小受控于土壤水分含量和气象条件^[10]。森林研究的尺度不同,所能够回答的能量和物质传输问题也不同^[11]。在单株树木水平上的研究^[12, 13]能够反映多数非线性生理过程的平均响应,因而更有利于经验模型的建立^[10]。Fredrik 等^[10]应用逐步回归法分析了瑞典松树和云杉蒸腾对土壤水分的响应^[10]。本文拟对几种干旱区树木蒸腾对气象因子的响应进行分析。

1 材料和方法

1.1 试验点和林分

黑河发源于祁连山,流经河西走廊最终消失于下游荒漠,是我国第二大内陆河,流域面积 130,000km²。本次研究的两个试验点分别位于黑河中游荒漠绿洲边缘的临泽综合观测研究站(39°09'N,100°00'E)和下游荒漠地区的额济纳旗(42°01'N,101°14'E)。

在临泽试验点,选择了一个人工混交林进行试验,樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litvin)、榆树(*Ulmus glaucescens* Franch)和二白杨(*Populus gansuensis* C. Wang et H. L. Yang)是本区的主要优势种。土壤是沙壤土。

在额济纳旗选择了一个荒漠河岸林,胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)和沙枣(*Elaeagnus angustifolia* Linn.)是本区优势种,生长土壤也为沙壤土。

本次研究中,受观测仪器限制,对每个树种,仅选择一株树进行树汁流量观测,测量每株树的胸径(1.3m 处)、树冠投影面积及叶面积指数(LAI,LAI2050,LI-COR INC.)。

1.2 林区微气象和土壤水分

在每个观测点分别布设一套 IMKO 公司生产的综合环境观测系统 EERIL 3。数采仪每半小时读取一次数据。本次研究中,以日为时间步长。

EERIL3 所测量的数据包括地下 20、40、60、80、120 和 160cm 深度的土壤体积含水量(θ ,%,TRIME-EZ,IMKO)、土壤水吸力(Pa)和地温(℃,T8,IMKO),2.8m 处的大气压(PTB100,Vaisala),2.5m 处的 CO₂ 含量(PPM,GMM222,Vaisala)、气温(℃,HMP45D,Vaisala)和相对湿度(%,HMP45D,Vaisala),3.0m 处的总辐射(R ,W·m⁻²,CM7B,KIPP&ZONE)、风速(m·s⁻¹,LISA,SG GmbH)和风向(RITA,SG GmbH),以及 1.2m 处的降水量(mm,RG50,SH GmbH)。另外,系统尚包含 3 个测量地热通量(W·m⁻²,HFP01,Campbell)的传感器,并能够根据研究需要增减传感器。

Fredrik 等^[10]应用相对释放水量来标准化土壤含水量,由于没有实测土壤田间持水量,本文用土壤饱和含水量代替:

$$\theta_{\text{REW}} = \frac{\theta - \theta_m}{\theta_{\text{sc}} - \theta_m} \tag{1}$$

式中, θ 为土壤 20~160cm 深度的平均体积含水量(%), θ_m 为观测期间最小土壤体积含水量(临泽试验点 3.82%;额济纳旗试验点 3.59%), θ_{sc} 为土壤饱和含水量(临泽点 33%;额济纳旗点 33.8%)(图 1)。

1.3 树汁流量

Fredrik 等^[10]总结了国际上对树汁流量和蒸腾关系的研究成果,指出在正常情况下一天的蒸腾量与树汁流量相等。因而在日时间尺度上,可以用树汁流量表征蒸腾量。树汁流量的测量探头由 GMBH 公司提供,分别安装在各选择树种的 1.3m 高度处。每一个树汁流量传感器由两个探针、铜镍合金热电偶和一条专用加热线组成^[14]。测量原理为热扩散法^[15]。数采仪每半小时采集 1 次温差数据,树汁流量计算公式为:

$$u = 0.714 \times ((dT_{\text{night}}/dT_{\text{actual}}) - 1)^{1.231} \tag{2}$$

式中, u 为树汁流量速率(ml·cm⁻²·min⁻¹), dT_{night} 为每日的最大温差(一般在傍晚,从观测数据中确定,℃), dT_{actual} 为实测温差(℃)。

$$F = u \times SA \times 48 \times 30/1000 \tag{3}$$

式中, F 为树汁流量(l·day⁻¹), SA 为加热探头处树干截面积(cm²)。

1.4 叶面蒸腾

$$E = F \times 1000/(PA \times LAI \times 24 \times 60 \times 60) \tag{4}$$

式中, E 为单位叶面积蒸腾量(g·m⁻²·s⁻¹), PA 为树冠投影面积(m²), LAI 为树木叶面积指数(表 1)。

1.5 气孔导度

气孔导度是日平均饱和差(D ,Pa)和单位叶面积蒸腾量的函数^[10,16]:

$$TC = \frac{\lambda E \gamma}{\rho c_p D} \tag{5}$$

式中, TC 为气孔导度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); λ 为蒸发潜热 ($2465 \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$); γ 为干湿表常数 ($65.5 \text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$); ρ 为空气密度 ($1225 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); c_p 为空气比热 ($1.01 \text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。

Fredrik 等^[10]指出, 气孔导度主要受饱和差 $D(\text{Pa})$ 、总辐射 $R(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ 、日平均气温 $T(^{\circ}\text{C})$ 和土壤相对释放水量 θ_{REW} 的影响。Fredrik 等应用逐步回归法来拟合经验函数, 这需要对数据进行严格地筛选, 一项一项排除某段时间内的较小影响因素^[10], 因而极为耗时。为得到气孔导度与气象变量的关系, 本文首先探讨了气孔导度和单个气象因子的关系, 然后再拟合类似文献^[10]的经验公式:

$$TC = f(D)f(R)f(T)f(\theta_{\text{REW}})$$

(6)

模型参数拟合采用数值叠代方法^[17], 这不同于文献^[10]。模拟效果好坏的评价函数为确定系数 $NSE^{[18]}$:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (TC_{i\text{obs}} - TC_{i\text{mod}})^2}{\sum_{i=1}^n (TC_{i\text{obs}} - \overline{TC_{\text{obs}}})^2}$$

(7)

式中, $TC_{i\text{obs}}$ 为 i 时刻实测气孔导度, $TC_{i\text{mod}}$ 为 i 时刻模拟气孔导度, $\overline{TC_{\text{obs}}}$ 为实测序列平均值, n 为序列长度。当 $NSE=1$ 时, 模拟效果最好^[19]。

由于荒漠地区野外工作的实际困难及意外因素, 2002 年的观测数据不连续。树汁流量有效观测期见表 2。下面分别对每株树每个连续观测期的数据进行分析。

表 2 2002 年树汁流量有效观测阶段

Table 2 Effective observed period for each sapflow tree in 2002					
观测阶段 Stages	樟子松 Mongol scotch pine	榆树 Dryland elm	二白杨 Gansu poplar	胡杨 Euphrates poplar	沙枣 Russia olive
观测阶段 1 Stage 1	05-27~06-08 May 27~June 8	05-27~06-08 May 27~June 8	05-27~06-08 May 27~June 8	06-12~07-16 June 12~July 16	06-12~07-16 June 12~July16
观测阶段 2 Stage 2	06-18~07-14 June 18~July 14	06-18~07-14 June 18~July 14	06-18~07-14 June 18~July 14	08-12~09-06 Aug. 12~Sep. 6	08-12~09-06 Aug. 12~Sep. 6
观测阶段 3 Stage 3	07-24~10-11 July 24~Oct. 11	07-24~10-11 July 24~Oct. 11	07-24~10-11 July 24~Oct. 11		

2 结果

2.1 土壤水分特征曲线

为标准化土壤水分含量序列, 分析了观测期内两观测点土壤水分含量与土壤吸力的关系。为节省页面, 仅列出额济纳旗不同深度土壤含水量与吸力的关系(图 1)。

2.2 树汁流量与叶面蒸腾

表 3 为不同观测阶段各树种平均树汁流量及叶面蒸腾量结果。由表 3 知, 单株树木树汁流量以胡杨最大, 二白杨次之, 但由于树龄不同, 横向比较缺乏意义。但就单位叶面积蒸腾量而言, 二白杨最大, 其他树种都较小。单株胡杨树汁流量尽管很大, 但其单位叶面积蒸腾量比榆树的还小。这说明樟子松、榆树、胡杨和沙枣均是良好的抗旱树种。

2.3 气孔导度与环境要素的单相关分析

表 4~表 8 展示了各观测树木气孔导度与环境要素的单相关关系。由表 4 知, 在观测阶段 1, 樟子松气孔导度与各环境因子之间存在一定的单相关关系, 在观测阶段 2 和观测阶段 3, 气孔导度与饱和差和气温的关系相对较好。总体看, 樟子松气孔导度与饱和差和气温的指数关系是存在的, 与总辐射也存在相对较弱的指数关系。

表 5 为榆树气孔导度与各环境因子的统计关系。榆树气孔导度在观测阶段 1 表现出与各环境因子良好的相关性, 在观测阶段 2, 与气温的相关性最好, $R^2=0.60$, 而在观测阶段 3, 与气温、饱和差和土壤含水量关系均较好。在观测阶段 2 和观测阶段 3, 榆树气孔导度与气温和饱和差均存在指数关系。

二白杨气孔导度在观测阶段 1 与气温的相关性最高(表 6), $R^2=0.97$, 与饱和差和土壤含水量也存在较高的统计关系。在观测阶段 2 和观测阶段 3, 二白杨对气温和饱和差的变化较为敏感, 而对土壤含水量的变化较为迟钝, 这说明该段时间土壤水

表 1 试验树木的树木学特性					
Table 1 Dendrological properties of the sapflow trees					
基本特征 Items	樟子松 Mongol scotch pine	榆树 Dryland Elm	二白杨 Gansu Poplar	胡杨 Euphrates Poplar	沙枣 Russia olive
直径 Diameter (cm)	15.9	13.7	18.0	25.5	17.5
树高 Height(m)	6.9	10.1	20.4	14.5	6.7
投影面积 Projected area (m ²)	9.6	8.0	3.8	26.0	42.0
叶面积指数 Leaf Area Index	1.65	1.05	1.32	2.56	1.29
叶面积 Leaf area(m ²)	15.8	8.4	5.0	66.6	54.2

分充足。

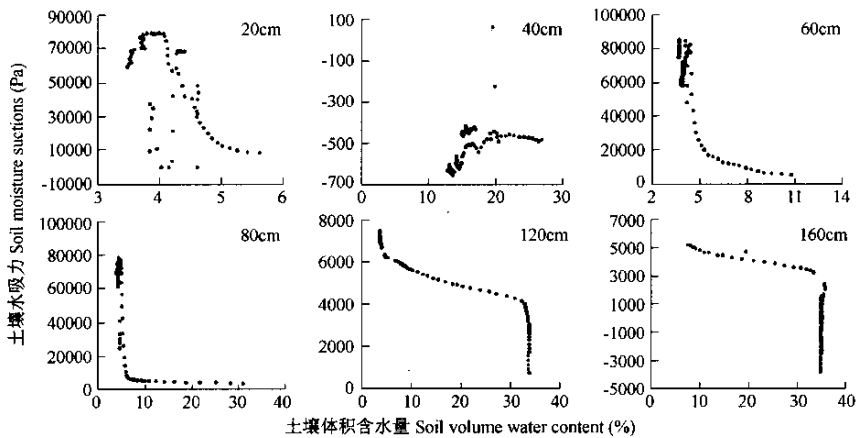


图1 额济纳旗试验点土壤水分特征曲线

Fig.1 Soil moisture characteristic curve in Erjinaqi site

表3 不同观测阶段各观测树木平均树汁流量、气孔导度和单位叶面积蒸腾量

Table 3 Averaged daily sapflow, conductance and leaf area transpiration in Linze and Erjinaqi Experimental sites in 2002				
树种 Tree species	观测阶段 Stages	树汁流量 Sapflow (l·d ⁻¹)	气孔导度 Conductance (m·s ⁻¹)	单位叶面积蒸腾量 Transpiration per leaf area (mm·d ⁻¹)
樟子松 Mongol scotch pine	观测阶段 1 Stage 1	3.88	0.00029	0.25
	观测阶段 2 Stage 2	3.67	0.00032	0.23
	观测阶段 3 Stage 3	4.18	0.00041	0.26
榆树 Dryland elm	观测阶段 1 Stage 1	3.65	0.00048	0.44
	观测阶段 2 Stage 2	2.95	0.00047	0.35
	观测阶段 3 Stage 3	5.36	0.0010	0.64
二白杨 Gansu poplar	观测阶段 1 Stage 1	14.99	0.0035	3.00
	观测阶段 2 Stage 2	10.66	0.0031	2.13
	观测阶段 3 Stage 3	10.32	0.0033	2.06
胡杨 Euphrates poplar	观测阶段 1 Stage 1	28.27	0.00025	0.42
	观测阶段 2 Stage 2	17.47	0.00024	0.26
沙枣 Russia olive	观测阶段 1 Stage 1	5.47	6.03×10 ⁻⁵	0.10
	观测阶段 2 Stage 2	8.31	0.00015	0.15

表4 樟子松气孔导度与各气象因子的关系

Table 4 Relationship between Mongol Scotch Pine conductance TC and weather factors in the whole 3 stages in 2002			
	观测阶段 1 气孔导度 TC in stage 1 (m·s ⁻¹)	观测阶段 2 气孔导度 TC in stage 2(m·s ⁻¹)	观测阶段 3 气孔导度 TC in stage 3(m·s ⁻¹)
饱和差 D (Pa)	TC=−0.0003ln(D)+0.0028 R ² =0.9748	TC=0.0263D ^{−0.6411} R ² =0.7629	TC=0.0009e ^{−0.0008D} R ² =0.6209
总辐射 R(W·m ^{−2})	TC=0.001e ^{−0.0057R} R ² =0.6646	TC=0.0006e ^{−0.0028R} R ² =0.3724	TC=0.0008e ^{−0.0042R} R ² =0.313
气温 T (℃)	TC=0.0085e ^{−0.1599T} R ² =0.849	TC=0.0048e ^{−0.1261T} R ² =0.7033	TC=0.0016e ^{−0.0832T} R ² =0.6439
相对释水量 θ _{REW}	TC=5.9295θ _{REW} ² −0.874θ _{REW} +0.1482 R ² =0.9108	TC=−8335.8θ _{REW} ⁴ +3504.1θ _{REW} ³ −549.4θ _{REW} ² +38.06θ _{REW} −0.983 R ² =0.3313	TC=0.0005e ^{−19.605θ_{REW}} R ² =0.3292

在所有两个观测阶段中,沙枣气孔导度与各环境因子的单相关关系均不密切(表7)。在观测阶段1,沙枣气孔导度与各环境因子单相关关系的R²值相差较小,这说明该段时间各环境因子的变化并没有引起沙枣的生理过程的改变,但各环境因子均对

其正常生理过程产生一定的影响。观测阶段 2,沙枣气孔导度与总辐射没有明显的统计关系,这说明该段时间光能足以维持其正常的生长过程。

表 5 榆树气孔导度与各气象因子的关系

Table 5 Relationship between Dryland Elm conductance TC and weather factors in the whole 3 stages in 2002

	观测阶段 1 气孔导度 TC in stage 1 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测阶段 2 气孔导度 TC in stage 2($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测阶段 3 气孔导度 TC in stage 3($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
饱和差 D (Pa)	$TC=4 \times 10^{-10}D^2-2 \times 10^{-6}D+0.0017$ $R^2=0.9882$	$TC=0.0007e^{-0.0004D}$ $R^2=0.3746$	$TC=0.0033e^{-0.0011D}$ $R^2=0.6801$
总辐射 $R(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$TC=2 \times 10^{-8}R^2-1 \times 10^{-5}R+0.0019$ $R^2=0.6618$	$TC=0.0007e^{-0.0022R}$ $R^2=0.1993$	$TC=-3 \times 10^{-8}R^2+6 \times 10^{-6}R+0.0013$ $R^2=0.3699$
气温 $T(^{\circ}\text{C})$	$TC=1 \times 10^{-5}T^2-0.0006T+0.0069$ $R^2=0.9354$	$TC=0.0067e^{-0.1242T}$ $R^2=0.6002$	$TC=0.0093e^{-0.1342T}$ $R^2=0.8079$
相对释水量 θ_{REW}	$TC=8.597\theta_{\text{REW}}-2.718\theta_{\text{REW}}+0.2152$ $R^2=0.9127$	$TC=-14489\theta_{\text{REW}}^2+6069.5\theta_{\text{REW}}-948.47\theta_{\text{REW}}+65.526\theta_{\text{REW}}-1.6882$ $R^2=0.2551$	$TC=-0.0004\text{Ln}(\theta_{\text{REW}})$ -0.0009 $R^2=0.5798$

表 6 二白杨气孔导度与各气象因子的关系

Table 6 Relationship between Gansu Polar conductance TC and weather factors in the whole 3 stages in 2002

	观测阶段 1 气孔导度 TC in stage 1 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测阶段 2 气孔导度 TC in stage 2($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测阶段 3 气孔导度 TC in stage 3($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
饱和差 D (Pa)	$TC=0.0144e^{-0.001D}$ $R^2=0.7597$	$TC=0.0079e^{-0.0008D}$ $R^2=0.7916$	$TC=0.0091e^{-0.001D}$ $R^2=0.6269$
总辐射 $R(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$TC=-0.0038\text{Ln}(R)+0.0241$ $R^2=0.4235$	$TC=-0.0019\text{Ln}(R)+0.013$ $R^2=0.3351$	$TC=0.0082e^{-0.0055R}$ $R^2=0.2987$
气温 $T(^{\circ}\text{C})$	$TC=-0.0152\text{Ln}(T)+0.0505$ $R^2=0.9701$	$TC=0.1881e^{-0.1902T}$ $R^2=0.8592$	$TC=0.0243e^{-0.123T}$ $R^2=0.7599$
相对释水量 θ_{REW}	$TC=-0.5189\theta_{\text{REW}}+0.0848$ $R^2=0.6208$	$TC=6.3579\theta_{\text{REW}}^2-1.3188\theta_{\text{REW}}+0.0707$ $R^2=0.1183$	$TC=-0.0014\text{Ln}(\theta_{\text{REW}})$ -0.0031 $R^2=0.3882$

表 7 沙枣气孔导度与各气象因子的关系

Table 7 Relationship between Russia olive conductance TC and weather factors in the whole 2 stages in 2002

	观测阶段 1 气孔导度 TC in stage 1 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测阶段 2 气孔导度 TC in stage 2($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
饱和差 D (Pa)	$TC=-1 \times 10^{-11}D^2+2 \times 10^{-8}D+9 \times 10^{-5}$ $R^2=0.4126$	$TC=0.0007e^{-0.0011D}$ $R^2=0.3511$
总辐射 $R(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$TC=1 \times 10^{-5}e^{0.005R}$ $R^2=0.3362$	$TC=-2 \times 10^{-7}R+0.0002$ $R^2=0.003$
气温 $T(^{\circ}\text{C})$	$TC=-7 \times 10^{-6}T+0.0002$ $R^2=0.3339$	$TC=0.0035e^{-0.1542T}$ $R^2=0.2671$
相对释水量 θ_{REW}	$TC=0.0017\theta_{\text{REW}}^2-0.0005\theta_{\text{REW}}+9 \times 10^{-5}$ $R^2=0.324$	$TC=0.0034e^{-7.243\theta_{\text{REW}}}$ $R^2=0.4074$

表 8 胡杨气孔导度与各气象因子的关系

Table 8 Relationship between Euphrates Poplar conductance TC and weather factors in the whole 2 stages in 2002

	观测阶段 1 气孔导度 TC in stage 1 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测阶段 2 气孔导度 TC in stage 2($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
饱和差 D (Pa)	$TC=0.0007e^{-0.0004D}$ $R^2=0.7304$	$TC=0.0007e^{-0.0006D}$ $R^2=0.4115$
总辐射 $R(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$TC=0.0001e^{0.0023R}$ $R^2=0.3116$	$TC=2 \times 10^{-5}R^{0.4781}$ $R^2=0.0775$
气温 $T(^{\circ}\text{C})$	$TC=-2 \times 10^{-5}T+0.0008$ $R^2=0.7046$	$TC=0.0009e^{-0.062T}$ $R^2=0.1595$
相对释水量 θ_{REW}	$TC=0.0046\theta_{\text{REW}}-0.0016\theta_{\text{REW}}+0.0004$ $R^2=0.2980$	$TC=0.0048\theta_{\text{REW}}-0.0051\theta_{\text{REW}}+0.0015$ $R^2=0.0728$

胡杨气孔导度在观测阶段 1 明显受气温和饱和差的影响(表 8),与其他两个环境变量也存在相对较弱的统计关系,在观测阶段 2,仅与饱和差存在微弱的指数关系,与其他因子的统计关系很不明显,这说明观测阶段 2 内,土壤水分和光能资源充足。

综合对比表 4~表 8,发现除沙枣气孔导度与环境因子的统计关系不显著外,在多数情况下,各树种气孔导度与气温和饱和差之间存在较好的统计关系,与总辐射也存在一定的指数关系。

2.4 气孔导度对环境因子的综合响应

气孔导度与各环境因子的单相关分析表明,气孔导度与各环境因子之间具有一定的统计关系,有些关系显著,有些不显著。这就是说,气孔导度受所有或部分气象因子的综合影响。为探讨各树种气孔导度对环境因子的综合响应,式(6)给出了一个典型表达式,模型参数采用数值叠代法^[17]获得。

2.4.1 樟子松 式(8)~(10)分别为观测阶段1~观测阶段3樟子松气孔导度对各环境因子的综合响应式,图2为各观测阶段气孔导度模拟与实测对比图。

$$TC = -0.00023 \ln(D) + 0.0013e^{-0.00011R} - 6.29 \times 10^{-6}T^2 + 0.0027T + 5.65\theta_{\text{REW}}^2 - 1.77\theta_{\text{REW}} + 0.137 \quad NSE = 0.996 \tag{8}$$

$$TC = 1.126D^{1.368} + 9.17 \times 10^{-5}e^{-0.0045R} + 0.016 \times 10^{-5}e^{-0.0009T} + 20.55\theta_{\text{REW}}^3 - 6.56\theta_{\text{REW}}^2 + 0.69\theta_{\text{REW}} - 0.04 \quad NSE = 0.907 \tag{9}$$

$$TC = 0.00057e^{-0.0024D} + 0.00049e^{-0.024R} + 0.0015e^{-0.061T} - 0.00024e^{-19.0\theta} \quad NSE = 0.578 \tag{10}$$

由图2及式(8)~(10)的NSE值知,观测阶段1和观测阶段2模拟效果很好,而观测阶段3模拟效果稍差。各阶段气孔导度对环境因子的综合响应均比与单一因子的相关性高。如在观测阶段3,樟子松气孔导度与气温的指数关系最好, $R^2=0.6439$ (表4),但其NSE值仅为0.438,比综合模拟式的NSE值低(0.578)。

2.4.2 榆树 式(11)~(13)分别为观测阶段1~3榆树气孔导度与影响因子的关系。模拟和实测对比结果见图2。

$$TC = 9.86 \times 10^{-11}D^2 - 6.9 \times 10^{-7}D + 1.03 \times 10^{-8}R^2 - 4.4 \times 10^{-6}R - 2 \times 10^{-6}T^2 + 0.00013T + 8.64\theta_{\text{REW}}^2 - 2.70\theta_{\text{REW}} + 0.21 \quad NSE = 0.987 \tag{11}$$

$$TC = 0.0158e^{-0.01D} + 3.31 \times 10^{-9}R^2 - 1.7 \times 10^{-6}R + 0.0015e^{-0.035T} - 90.07\theta_{\text{REW}}^3 + 28.25\theta_{\text{REW}}^2 - 2.92\theta_{\text{REW}} + 0.10 \quad NSE = 0.904 \tag{12}$$

$$TC = 0.0011e^{-0.0011D} - 5.1 \times 10^{-9}R^2 + 2.39 \times 10^{-6}R + 0.003e^{-0.070T} - 0.0001 \ln(\theta_{\text{REW}}) - 0.00098 \quad NSE = 0.777 \tag{13}$$

同样,模拟和实测对比结果在观测阶段1和观测阶段2较好,而在观测阶段3相对较差,但均好于榆树气孔导度与单一因子的关系。如在观测阶段3,榆树气孔导度与气温的相关性最高,其指数关系的 $R^2=0.808$ (表5),但其NSE值仅为0.725,比式(13)的NSE值(0.777)小。

2.4.3 二白杨 式(14)~(16)分别表征在观测阶段1~3内,二白杨气孔导度与各气象因子的综合关系。模拟和实测对比结果见图2。

$$TC = -0.0034e^{-0.0017D} + 1.14 \times 10^{-5} \ln(R) - 0.019 \ln(T) + 0.0245\theta_{\text{REW}} + 0.059 \quad NSE = 0.977 \tag{14}$$

$$TC = -0.019e^{-0.0084D} - 0.0006 \ln(R) + 0.0757e^{-0.129T} + 0.68\theta_{\text{REW}}^2 - 0.14\theta_{\text{REW}} + 0.0096 \quad NSE = 0.902 \tag{15}$$

$$TC = 0.0054e^{-0.0014D} - 0.0027e^{-0.0186R} + 1.757e^{-0.6144T} - 0.00065 \ln(\theta_{\text{REW}}) - 0.0014 \quad NSE = 0.709 \tag{16}$$

2.4.4 胡杨 式(17)和(18)分别揭示了观测阶段1和观测阶段2内胡杨气孔导度与各影响因子的综合关系,图2为模拟和实测对比图。

$$TC = 0.00011e^{-0.00065D} + 2.27 \times 10^{-7}R - 6.2 \times 10^{-6}T - 0.0017\theta_{\text{REW}}^2 + 0.00072\theta_{\text{REW}}$$

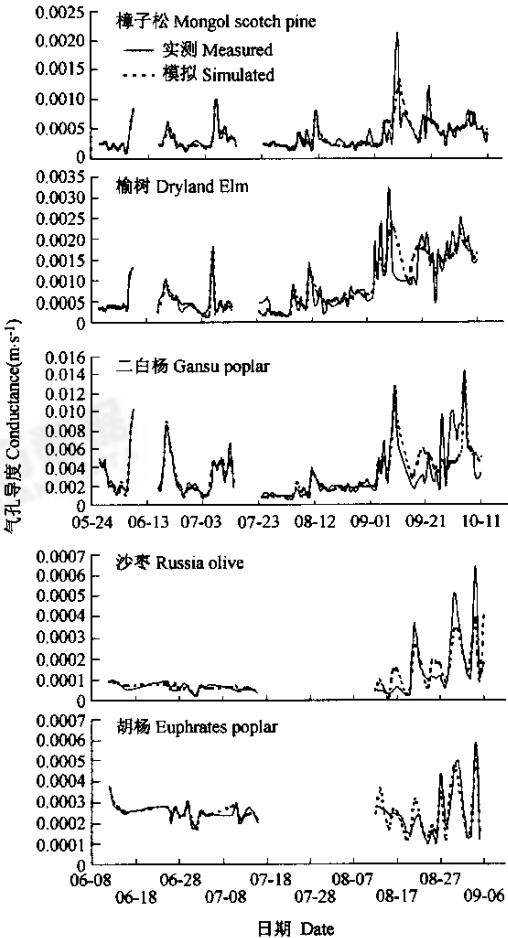


图2 气孔导度模拟与实测对比图

Fig. 2 Simulated and measured tree conductance in the two sites in 2002

$$+ 0.00016 \quad NSE = 0.867 \quad (17)$$
$$TC = 0.007e^{-0.0021D} + 1.11 \times 10^{-5}R^{0.4385} - 0.359e^{-0.381T}$$
$$- 0.0022\theta_{REW}^2 + 0.0022\theta_{REW}$$
$$- 0.00058 \quad NSE = 0.826 \quad (18)$$

2.4.5 沙枣 式(19)和(20)为沙枣气孔导度与影响因子的综合关系。模拟效果如图 2 所示。

$$TC = -1.3 \times 10^{-11}D^2 + 2.6 \times 10^{-8}D - 0.0017e^{-5.3 \times 10^{-5}R}$$
$$- 2.4 \times 10^{-6}T + 2.8 \times 10^{-5}\theta_{REW}^2 + 0.0001\theta_{REW}$$
$$+ 0.0017 \quad NSE = 0.628 \quad (19)$$
$$TC = 8.6 \times 10^{-11}D^2 - 6.6 \times 10^{-7}D + 9.4 \times 10^{-7}R -$$
$$4.3 \times 10^{-6}T^2 + 0.0003T + 0.0025\theta_{REW} - 0.004\theta_{REW}$$
$$- 0.001 \quad NSE = 0.628 \quad (20)$$

由式(8)~(20)的 NSE 值及图 2 知,各树木气孔导度与环境因子综合关系的模拟效果均好于气孔导度与单一因子的综合关系。这说明观测期内,树木蒸腾作用生理过程受各种因子的综合影响,差别在于不同阶段不同树种对同一因子的响应不同,而同一阶段不同树种对同一因子的响应也不一致。

2.5 叶面蒸腾模拟

在 2.4 中,成功模拟了各树种不同观测阶段内气孔导度与各影响因子的综合关系。因此,可以根据式 5 计算树木的叶面蒸腾量($g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$),并将单位换算为 $mm \cdot d^{-1}$ 。计算和实测对比结果见图 3 和表 9。

由表 8 和图 3 知,树木蒸腾模拟效果总体上较好。临泽试验点各树种叶面蒸腾模拟效果比额济纳旗各树种叶面蒸腾模拟效果好。叶面蒸腾总体模拟效果比气孔导度模拟效果稍差。

3 结论与讨论

在临泽观测点,二白杨气孔导度最大,平均为 $0.0033 m \cdot s^{-1}$,榆树次之,为 $0.00082 m \cdot s^{-1}$,樟子松最小,为 $0.00037 m \cdot s^{-1}$ 。在额济纳旗观测点,胡杨平均气孔导度大于沙枣,分别为 0.00025 和 $0.00011 m \cdot s^{-1}$ 。

表 9 各树种叶面蒸腾模型评价标准 NSE 值

Table 9 Evaluation function NSE values for leaf area transpiration models					
观测阶段 Stages	樟子松 Mongol scotch pine	二白杨 Gansu poplar	榆树 Dryland elm	沙枣 Russia olive	胡杨 Euphrates poplar
观测阶段 1 Stages 1	0.912	0.821	0.796	0.464	0.427
观测阶段 2 Stages 2	0.578	0.501	0.452	0.591	0.601
观测阶段 3 Stages 3	0.324	0.503	0.671		

在试验期内,樟子松平均叶面蒸腾量为 $0.25mm \cdot d^{-1}$,榆树为 $0.55 mm \cdot d^{-1}$,二白杨为 $2.19 mm \cdot d^{-1}$,胡杨和沙枣分别为 0.34 和 $0.13 mm \cdot d^{-1}$ 。

就单株树树汁流量而言,观测期内黑河中游的樟子松平均为 $4.03 l \cdot d^{-1}$,榆树为 $4.60 l \cdot d^{-1}$,二白杨为 $10.93 l \cdot d^{-1}$,黑河下游的胡杨和沙枣分别为 $22.64 l \cdot d^{-1}$ 和 $6.95 l \cdot d^{-1}$ 。

因此,从提高水资源利用效率的角度看,黑河中游地区不应种植二白杨,而且它也不是很好的建材。榆树和樟子松消耗水分较少,同样也可以防风护沙。由于下游额济纳旗观测点在试验期内,土壤水分充足,因而其树汁流量较大。但就平均叶面蒸腾量和气孔导度而言,沙枣和胡杨也是良好的抗旱树种。

总体来看,气孔导度与饱和差之间具有一定的指数关系。气孔导度-饱和差的指数关系已经在很多研究中被发现,如 Cienciala 等^[5]、方方数据^[10]。

总辐射对气孔导度的影响是非常复杂的,有线性关系、指数关系、乘幂关系、对数关系和抛物线关系等,但以指数关系最多。

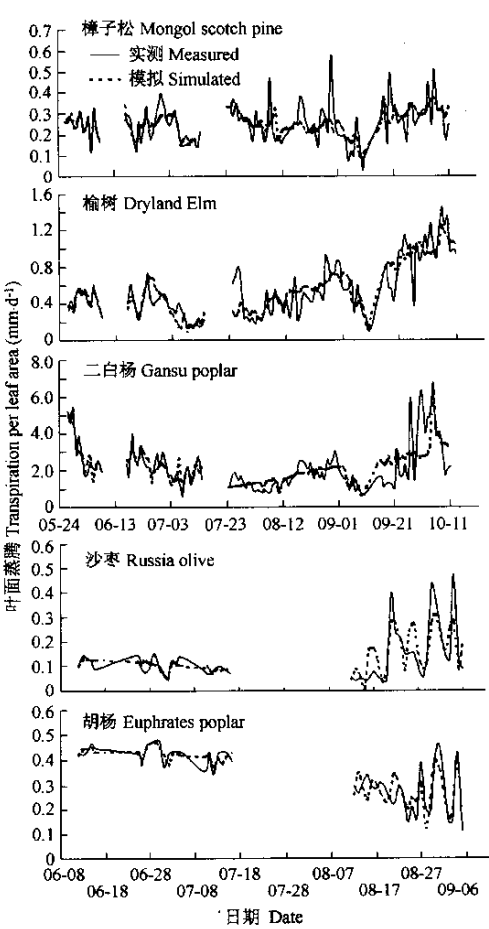


图 3 叶面蒸腾模拟与实测对比图

Fig. 3 Simulated and measured leaf area transpiration in 2002

Fredrik 等^[10]指出,在许多研究中发现气孔导度-气温之间没有明显的统计关系,因而往往不予考虑。Stewart^[23]和 Gash^[24]等发现气孔导度-气温之间存在一种抛物线关系。Granier 等^[25]报道,当气温在 10~17℃ 之间时,气孔导度-气温关系为线性的。Fredrik 等^[10]发现气孔导度-气温关系存在指数和线性关系。在本次研究中,气孔导度-气温关系存在 9 个指数关系、2 个线性关系、1 个对数和 1 个抛物线关系(表 4~表 8)。这说明气孔导度与气温之间的指数关系是普遍的。

气孔导度与土壤含水量的关系较为复杂,在所统计的 13 组关系中有 8 个多项式关系,但总体相关性较差。在观测期内,气温和总辐射变化较平缓且并不总一致,而土壤含水量却往往受人类活动的影响而变化,因而与气象因子的变化更不同步。本次研究中,20~160cm 深度的平均土壤含水量变化较平缓,因而气孔导度-土壤含水量的关系不如气孔导度与其他因子的关系明显。

气孔导度与各影响因子的综合关系比气孔导度与单一影响因子的关系好。这说明气孔导度的变化总体受各种因子的影响,且过程较为复杂。

叶面蒸腾模拟效果明显比气孔导度模拟效果差。这是因为叶面蒸腾量是气孔导度与饱和差的函数,当饱和差的变化与二者的比值同步时,叶面蒸腾模拟效果较好。

本次研究没有发现叶面蒸腾量/树汁流量与单一环境因子之间存在明显的相关性,因而只能间接计算和模拟叶面蒸腾量。

References:

- [1] Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 2000, **36**: 3~9.
- [2] Feng Q, Cheng G D, Masao MK. Trends of water resource development and utilization in arid north-west China. *Environmental Geology*, 2000, **39**(8): 831~838.
- [3] Wang G X, Cheng G D. Fluoride Distribution in water and the Governing Factors of Environment in Arid Northwest China. *Journal of Arid Environment*, 2001, **49**(3): 601~614.
- [4] Salisbury FB, Ross CW. *Plant Physiology*. Wadsworth Biology Series. Belmont, CA, 1985.
- [5] Soegaard H, Boegh E. Estimation of evapotranspiration from a millet crop in the Sahel combining sap flow, leaf area index and eddy correlation technique. *Journal of Hydrology*, 1995, **166**: 263~282.
- [6] Wang G X, Cheng G D. The characteristics of water resources and the changes of the hydrological process and environment in the arid zone of northwest China. *Environmental Geology*, 2000, **39**(7): 783~790.
- [7] Zhao W Z, Cheng G D. Review of Several Problems on the Study of Eco-hydrological Processes in Arid Zones. *Bulletin of Chinese Science*, 2001, **47**(5): 353~360.
- [8] Xu Z M, Cheng G D, Chen D T, et al. Economic diversity, development capacity and sustainable development of China. *Ecological Economics*, 2002, **40**(3): 369~378.
- [9] Chen R S, Kang E S, Yang J P, et al. A distributed runoff model for inland river basin mountainous basin of Northwest China. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, **13**(3): 363~372.
- [10] Fredrik L, Anders L. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **112**: 67~85.
- [11] Jarvis PG. Scaling processes and problems. *Plant Cell Environ*, 1995, **18**: 1079~1089.
- [12] Cermak J, Cienciala E, Kucera J, et al. Individual variation of sapflow 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.
- [13] Granier A, Biron P, Breda N, et al. Transpiration of trees and forest stands: Short and long-term monitoring using sapflow methods. *Global Change Biol.*, 1996, **2**: 265~274.
- [14] UP Umweltanalytische Produkte GmbH. *UP Sap Flow-System User Manual*, Version 2.2, 2001.
- [15] Granier André. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.*, 1985, **42** (2): 193~200.
- [16] Monteith JL, Unsworth MH. *Principles of Environmental Physics*, 2nd Edition. Edward Arnold, London. 1990.
- [17] Levenberg K. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1944, **2**: 164~168.
- [18] Nash JE, Sutcliffe JV. River flow forecasting through conceptual models, 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, **10**: 282~290.
- [19] Loumagne C, Chkir N, Normand M. Introduction of the soil/vegetation/atmosphere continuum in a conceptual rainfall/runoff model. *Hydrological Science Journal*, 1996, **41**(6): 889~902.
- [20] Cienciala E, Lindroth A, Cermak J, et al. Assessment of transpiration estimates for Picea abies trees during a growing season. *Trees*, 1992, **6**: 121~127.
- [21] Cienciala E, Lindroth A, Cermak J, et al. The effects of water availability on transpiration, water potential and growth of Picea abies during a growing season. *Journal of Hydrology*, 1994, **155**: 57~71.
- [22] Cienciala E, Kucera J, Ryan MG, et al. Water flux in boreal forest during two hydrologically contrasting years species specific regulation of canopy conductance and transpiration. *Annales Des Sciences Forestieres*, 1998, **55**: 47~61.
- [23] Stewart JB. Modelling surface conductance of pine forests. *Agric. For. Meteorol.*, 1988, **43**: 19~35.
- [24] Gash JHC, Shuttleworth WJ, Lloyd CR, et al. Micrometeorological measurements in Les Landes forest during HAPEX-MOBILHY. *Agric. For. Meteorol.*, 1989, **46**: 131~147.
- [25] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agric. For. Meteorol.*, 2000, **108**.