

皇甫川流域中国沙棘的树干液流量数学模型^{*}

于红博^{1,2}, 杨 劼¹, 徐延达¹, 臧春鑫¹

(1. 内蒙古草地生态重点实验室/省部共建国家重点实验室培育基地, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022)

摘 要: 运用热耗散(TDP)法对皇甫川流域中国沙棘的树干液流速率进行了测定, 用自动气象站同步连续监测太阳总辐射、空气温度、空气相对湿度、风速、10 cm处土壤温度等环境因子, 用LI-6400系列光合仪同步测定每日6:00–19:00的沙棘气孔导度等因子, 并用Excel 2000、Visual C++ 6.0和SPSS 13.0处理所测定数据。经过分析沙棘单位叶干重的液流量与环境因子的关系, 建立了沙棘单位叶干重的液流量 $[gH_2O/(h \cdot gDW)]$ 数学模型, 通过对模型评价指标进行计算及分析, 模型拟合优度较好; 用所建模型对该地区2006年7月23日和2007年7月2日的中国沙棘单位叶干重的液流量进行了预测, 可以获得满意的数值模拟结果。在此基础上, 建立了单株沙棘的日树干液流量 $[gH_2O/(d \cdot \text{株})]$ 模型, 经验证, 模型的模拟效果较好, 模型二的精度更高一些。

关键词: 热耗散法; 液流速率; 模型; 中国沙棘; 皇甫川流域

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)01-0162-05

Mathematical Model of Stem Sap Flow Flux for *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi in Huangfuchuan Basin

YU Hong-bo^{1,2}, YANG Jie¹, XU Yan-da¹, ZANG Chun-xin¹

(1. The Key Lab of Inner Mongolia Grassland/The Province-Ministry Co-constructing Incubation Base of National Key Laboratory, Huhhot 010021, China; 2. College of Geography Science, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China)

Abstract: Sap flow rate of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi in Huangfuchuan Basin was measured using TDP method. Synchronous environmental factors such as incident solar radiation, air temperature, relative air humidity, wind speed, soil temperature at depth of 10 cm were recorded continuously using automatic weather station. Leaf stomatal conductance was also measured at the same time using LI-6400. The data were processed with Excel 2000, Visual C++ 6.0 and SPSS 13.0. Mathematical model $[gH_2O/(h \cdot gDW)]$ of sap flow flux perunit dry foliage mass was developed by analyzing correlation between sap flow flux perunit dry foliage mass and environmental factors. The model is good based on the performance indices. Reasonable forecast result has been achieved by predicting sap flow flux perunit dry foliage mass on 23th July 2006 and on 2nd July 2007. Mathematical models $[gH_2O/(d \cdot \text{tree})]$ of daily sap flow flux for *H. rhamnoides* in Huangfuchuan Basin were developed based on the model of sap flow flux perunit dry foliage mass. The models are good through being validated and the second model is better.

Key words: Thermal Dissipation Probe method; sap flow rate; model; *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi; Huangfuchuan Basin

^{*} 收稿日期: 2008-05-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB106807); 国家自然科学基金项目(30660034); 内蒙古自然科学基金项目(200711020505)

作者简介: 于红博(1977–), 女(满族), 内蒙古呼和浩特市人, 讲师, 博士生, 主要从事生态建模与遥感图像处理方面的研究。E-mail: y_b_fan6@yahoo.com.cn

通信作者: 杨劼(1965–), 女(蒙古族), 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 教授, 从事植物生理和草地生态学研究。E-mail: Jyang@imu.edu.cn

中国沙棘(亚种) (*Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi) 为胡颓子科沙棘属的灌木树种。适应性强, 能固氮, 是重要的薪炭树种和饲料树种。果实含有丰富的维生素, 具有一定的食用、药用价值。同时, 中国沙棘是内蒙古黄土高原地区主要的造林先锋树种, 在防风固沙、保持水土、维持该地区的生态平衡等方面有着重要的作用。

近年来, 利用热量平衡原理设计的热耗散 (Thermal Dissipation Probe) 技术测定树木的蒸腾耗水正被越来越多的学者所应用^[1-8]。热耗散法是由法国农科院著名树木生理学家 Andre Granier 博士在 1985 年发明的^[9]。因其系统简单可靠, 应用范围广, 正成为全球植物生态生理学家及森林水文学家最喜爱的树干液流测定系统。但此类技术的研究对象大多集中于高大的乔木、常绿树种及果树等^[10-11], 侧重于对所测树种树干液流速率的日季动态变化进行分析, 以及建立该树种液流量与气象因子的多元线性回归模型。本文应用热耗散法测定内蒙古黄土高原中国沙棘的树干液流速率, 分析了中国沙棘单位叶干重的液流量与环境因子之间的相关关系, 并在此基础上利用相关因子建立单位叶干重的液流量数学模型和单株沙棘的日树干液流量模型, 为该地区的生态植被建设和水分平衡研究打下良好的基础, 并提供理论依据。

1 研究区自然概况

试验是在内蒙古准格尔旗皇甫川水土保持试验站进行的, 该站位于黄河一级支流皇甫川的支流十里长川中游东岸, 位于 $39^{\circ}43' - 39^{\circ}46' \text{N}$, $110^{\circ}07' - 110^{\circ}03' \text{E}$, 平均海拔高度 1 100 m, 属于典型温带半干旱气候, 年平均气温 6.2°C , 年平均降水量 368.7 mm, 其中, 6-9 月降水量占年降水量的 80%, 年平均蒸发量 1 946.6 mm, 冬春季风力强盛而频繁, 年平均风速 $2 \sim 3 \text{ m/s}$, 大风日数 10~30 d。主体地貌为小流域丘陵沟壑地貌, 这里土壤水蚀、风蚀和重力蚀并存, 属于强烈水土流失区, 是水土保持综合治理的主要区域。

天然植被以小半灌木和草本植物居多, 建群种有百里香 (*Thymus serpyllum*)、本氏针茅 (*Stipa bungeana*) 等。人工植被以人工油松 (*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨 (*Populus simonii*)、沙柳 (*Salix psammophylla*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*) 为主。农作物以玉米 (*Zea mays*)、糜子 (*Panicum miliaceum*) 等为主。

2 试验材料和研究方法

2.1 试验材料

试验用的中国沙棘样地坡度 36° , 坡向北偏东 40° , 选取了 3 株沙棘树种, 沙棘 iv 株高为 1.8 m, 冠幅为 $1.4 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$, 全树叶干重 159.19 g, 位于坡的顶部; 沙棘 ⑤ 株高为 1.9 m, 冠幅为 $1.5 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$, 全树叶干重 206.80 g, 位于坡的上部; 沙棘 ⑥ 株高为 1.4 m, 冠幅为 $1.3 \text{ m} \times 1.37 \text{ m}$, 全树叶干重 172.22 g, 位于坡的中下部。

2.2 研究方法

根据 Granier 的热耗散法测定树干液流, 利用位于上方的加热探针与下方的参比探针测量植物茎流线性热源的温度差, 根据茎流速率和温度差之间的关系, 计算出茎流速率^[12]:

$$F_s = 0.0119 \times \left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \times 3600$$

式中: F_s ——液流速率 (cm/h); ΔT ——在任何某一给定时刻的温差 ($^{\circ}\text{C}$); ΔT_{\max} ——当树干液流停止时达到的最大温差值 ($^{\circ}\text{C}$)。将连续 7~10 d 内每天的 ΔT_{\max} 值与时间建立直线回归关系, 去掉所有低于回归线的 ΔT_{\max} 值, 然后用余下的值再作回归, 用回归线估值作为每一特定时刻的 ΔT_{\max} 值。

总液流量 F ($\text{gH}_2\text{O/h}$) 可由 $F = F_s \cdot SA$ 获得; F_s ——液流密度 [$\text{gH}_2\text{O}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$]; SA ——加热探针处测得的边材面积 (cm^2)。

一套 Granier 系统包括有 6 付探头, 每付探头包括 2 个结构一致的感应探针, 采用其中的 3 付同时连续测定 3 株沙棘的树干液流速率, 每 0.5 h 记录 1 次。

用自动气象站同步连续监测太阳总辐射、空气温度、空气相对湿度、风速、风向、10 cm 处土壤温度等环境因子, 每 0.5 h 记录一次。用 LI-6400 系列光合仪同步测定每日 6:00-19:00 的沙棘叶蒸腾速率, 每隔 1 h 或 2 h 测定 1 次。

采用刈割法对沙棘全树总叶干重进行测定, 将叶烘干, 取其干重。

2.3 数据处理

用 Excel 2000, Visual C++ 6.0 和 SPSS 13.0 分析软件处理所测定数据。

3 沙棘单位叶干重的树干液流量模型建立

3.1 模型概述

取所试验 3 株沙棘的平均值作分析, 对沙棘单

位叶干重的液流量[gH₂O/(h • gDW)] 与气孔导度 [mol/(m² • h)] 作单因子相关分析, 结果表明, 单位叶干重的液流量与气孔导度相关性并不大(*R*² = 0. 06), 因此, 剔除掉这一因子, 将数据量由每日的 6: 00– 19: 00(气孔导度的测量时间范围为每日的

6: 00– 19: 00, 1 h 或 2 h 测一次) 增加到每日的 5: 30 – 20: 30(气象因子 0. 5 h 记录一次), 沙棘单位叶干重的液流量与太阳总辐射、空气温度、空气相对湿度、风速、饱和水汽压亏缺、10 cm 处土壤温度的单因子相关分析结果见表 1。

表 1 沙棘单位叶干重的液流量与环境因子之间相关关系

环境因子	太阳总辐射/ (W • m ^{- 2})	空气相对湿度	空气温度/ ℃	饱和水汽压亏缺/ kPa	风速/ (m • s ^{- 1})	10 cm 处土壤 温度/℃
决定系数 <i>R</i> ²	0. 482	0. 319	0. 333	0. 273	0. 230	0. 211
回归系数	3. 658× 10 ^{- 4}	- 0. 443	0. 021	0. 090	0. 235	0. 014
<i>F</i> 值	268. 384	135. 118	144. 341	108. 603	86. 165	77. 216

结果表明, 单位叶干重的液流量与太阳总辐射相关性较大, 且为正相关, 其次依次为空气温度、空气相对湿度、饱和水汽压亏缺、风速和 10 cm 处的土壤温度, 其中与空气相对湿度呈负相关, 其余为正相关。

利用所测数据(不包括 2006 年 7 月 23 日和 2007 年 7 月 2 日的数据) 建立的沙棘单位叶干重的液流量与环境因子的模型如下:

$$SFF_{DW,h} = \max [a \ln (\frac{\Delta \cdot Q + c \cdot VPD}{\Delta + \gamma}) + b, 0]$$

(1)

式中: *SFF*_{DW,h} ——沙棘单位叶干重的树干液流量 [gH₂O/(h • gDW)], 即每小时每克叶干重蒸腾多少克水。 *a*, *b* ——调整因子; *Q* ——太阳总辐射(W/ m²); *VPD* ——水汽压差(kPa); Δ ——饱和水汽压斜率(kPa/ K); γ ——潜在蒸散常数(kPa/ K)。水汽压差的计算公式^[13] 如下:

$$VPD = es - ed = es (1 - RH) = 0. 61078 \times \exp (\frac{17. 268 \times T_d}{T_d + 237. 3}) \times (1 - RH)$$

式中: *T_d* ——空气温度(℃); *es* ——饱和水汽压(kPa); *ed* ——实际水汽压(kPa); *RH* ——空气相对湿度。

饱和水汽压斜率(饱和水汽压与温度的比率) Δ (kPa/ K) 的计算公式^[13] 如下:

$$\Delta = 21. 25es [\frac{4097. 7}{(T_d + 237. 3)^2 (T_d + 273)} - \frac{1}{(T_d + 273)^2}]$$

干湿球常数(潜在蒸散常数) γ (kPa/ K) 的计算公式^[13] 如下:

$$\gamma = \frac{2. 9}{595 - 0. 51T_d}$$

对于 2006 年, *SFF*_{DW,h} = max [0. 2006ln ($\frac{\Delta \cdot Q + 0. 5VPD}{\Delta + \gamma}$) - 0. 6965, 0] (*R*² = 0. 8896)

对于 2007 年, *SFF*_{DW,h} = max [0. 0999ln ($\frac{\Delta \cdot Q + 0. 5VPD}{\Delta + \gamma}$) - 0. 3008, 0] (*R*² = 0. 8219)

3. 2 精度分析

3. 2. 1 模型评价指标^[14] 运用的模型评价指标有相关性指标, 包括决定系数 *R*² 和修正决定系数 *R_a*², 可以定量地反映模型的最优性, 但不能估计模型的无偏性。第二类为绝对误差指标, 包括平均绝对误差 *MAE*、平均误差平方的平方根 *RMSE* 和极值效应 *Outlier*, 可以测定模型的绝对无偏性及极值效应。第三类为相对误差指标: 一致性指数 *d*, 可以定量地描述模型的相对无偏性。这些指标计算式如下:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2]^{0.5} [\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2]^{0.5}} \right\}^2$$

$$R_a^2 = R^2 - \frac{Nv(1 - R^2)}{N - Nv - 1}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|}{N}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad Outlier = RMSE - MAE$$

$$d = 1. 0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

式中: *Q_i*, *P_i* ——实测值和预测值; \bar{P} ——实测值的平均值和预测值的平均值; *N* ——样本总数; *Nv* ——自变量数。

3. 2. 2 模型精度分析 该模型评价指标值如表 2 所示。复相关系数 *R* 用于反映所有自变量和应变量关系的密切程度, 其值在 0~ 1 之间, 越大越好。它的平方称决定系数 *R*²。当根据 *R*² 的大小判断方程的优劣时, 结论总是变量最多的方程最好, 显然存在缺陷。因此, 修正决定系数 *R_a*² 是衡量方程优劣的常用指标之一, 它也反映模型的拟合优度, 但同时考虑了方程中自变量的个数^[15], 它不仅与模型拟合性成正

比, 而且与模型中自变量的数量成反比^[14]。平均绝对误差 MAE 和平均误差平方的平方根 $RMSE$ 这两个指标可检验模型的无偏性。指标值越低, 模型的无偏性越强, 模型也越准确。对同一模型来说, $RMSE$ 一般大于 MAE 。 $RMSE$ 与 MAE 的差异程度 $Outlier$ 可反映数据中极值影响的大小^[14]。一致性指数 d 越接近于 1, 表明模型效率越高^[16]。

从表 2 来看, 决定系数和修正决定系数都在 0.81 以上, 拟合度在 0.94 以上, 绝对误差指标都较

小, 模型的无偏性显著, 拟合程度较好。

3.2.3 预测结果分析 用 2006 年的模型对 2006 年 7 月 23 日和 2007 年的模型对 2007 年 7 月 2 日的数据进行了预测。

表 2 模型评价指标值

时间	R^2	R_a^2	MAE	$RMSE$	$Outlier$	d
2006 年	0.8896	0.8816	0.0537	0.0688	0.0151	0.9694
2007 年	0.8219	0.8176	0.0397	0.0524	0.0127	0.9423

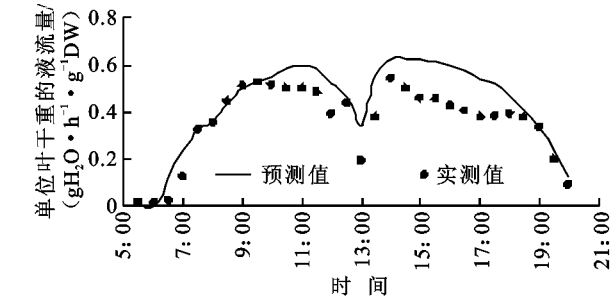


图 1 2006 年 7 月 23 日沙棘单位叶干重的液流量
预测值与实测值对比

图 1, 2 为沙棘单位叶干重液流量的预测值与实测值的对比, 经过分析, 该模型可以较好地模拟该地区沙棘单位叶干重的液流量, 其中, 2006 年的 R^2 值为 0.877 9, 2007 年的 R^2 值为 0.902 6。另分析数据发现, 6:30–7:00 的数据预测不理想, 误差较大, 预测值偏大。据刘惊涛等^[17]研究发现, 在植物处于低蒸腾速率时往往出现较大偏差, 而天或更长时间尺度则误差很小。

4 单株沙棘的日树干液流量模型建立

4.1 模型概述

模型一: 在沙棘单位叶干重的液流量 $[gH_2O/(h \cdot gDW)]$ 模型基础上, 建立的单株沙棘的日树干液流量 $[gH_2O/(d \cdot 株)]$ 模型如下:

$$SFF_d = \overline{SFF_{DW,h}} \cdot W \cdot N \tag{2}$$

式中: SFF_d ——单株沙棘的日树干液流量 $[gH_2O/(d \cdot 株)]$; W ——全树总叶干重 $(g/株)$; N ——从日出到日落的时间长度 (h/d) ; $\overline{SFF_{DW,h}}$ ——沙棘单位叶干重的树干液流量 $[gH_2O/(h \cdot gDW)]$, 即式 (1), 只是环境因子都为日均值。

N 由下式获得^[18]:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

式中: ω_s ——太阳时角(弧度)。

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$$

式中: φ ——测点纬度(弧度); δ ——太阳赤纬(弧度)。

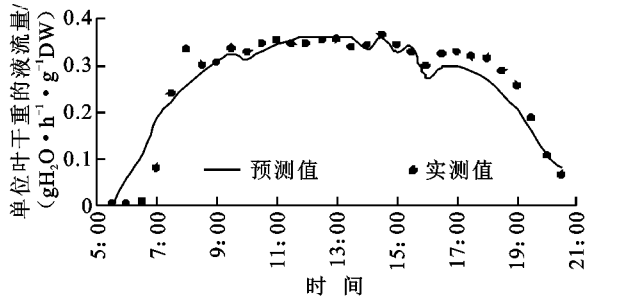


图 2 2007 年 7 月 2 日沙棘单位叶干重的液流量
预测值与实测值对比

$$\delta = 0.4209 \sin(0.0172 DOY - 1.39)$$

DOY 为年内日序, 如 1 月 1 日, $DOY = 1$ 。

模型二: 在晴朗天气条件下, 假定单株沙棘液流量的日变化曲线呈正弦变化形式^[19], 因而任意时刻单株沙棘的液流量 $SFF_i [gH_2O/(h \cdot 株)]$ 的日变化呈下述正弦曲线:

$$\begin{cases} SFF_i = SFF_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{2t_{\max}}\right) & t \leq t_{\max} \\ SFF_i = SFF_{\max} \sin\left[\frac{\pi(t + N - 2t_{\max})}{2(N - t_{\max})}\right] & t > t_{\max} \end{cases} \tag{3}$$

式中: SFF_{\max} ——一天中某一时刻单株沙棘的最大液流量 $[gH_2O/(d \cdot 株)]$; t_{\max} ——从日出到 SFF_{\max} 出现时的时间间隔 (h) ; t ——从日出到 SFF_i 出现时的时间间隔 (h) , N ——从日出到日落的时间长度 (h/d) 。

对 (3) 式进行积分, 可得晴天全天的单株沙棘的日液流量, 即

$$SFF_d = \int_0^{t_{\max}} SFF_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{2t_{\max}}\right) dt + \int_{t_{\max}}^N SFF_{\max} \sin\left[\frac{\pi(t + N - 2t_{\max})}{2(N - t_{\max})}\right] dt = SFF_{\max} \frac{2N}{\pi} \tag{4}$$

4.2 模型验证

用实测环境因子对模型一和模型二进行了验证, 即分别运用式 (1)、(2) 和 (1)、(4) 估算了单株沙棘日液流量, 得到的模拟值和实测值的对比如图 3 所示。模拟值与实测值之间比较吻合, 经统计, 模型

一的 R^2 为 0.786 2, 平均相对误差为 14.76%, 模型总体上高估了实测值; 模型二的 R^2 为 0.834 8, 平

均相对误差为 11.62%, 模型总体上低估了实测值。从以上数据看, 模型二的精度更高一些。

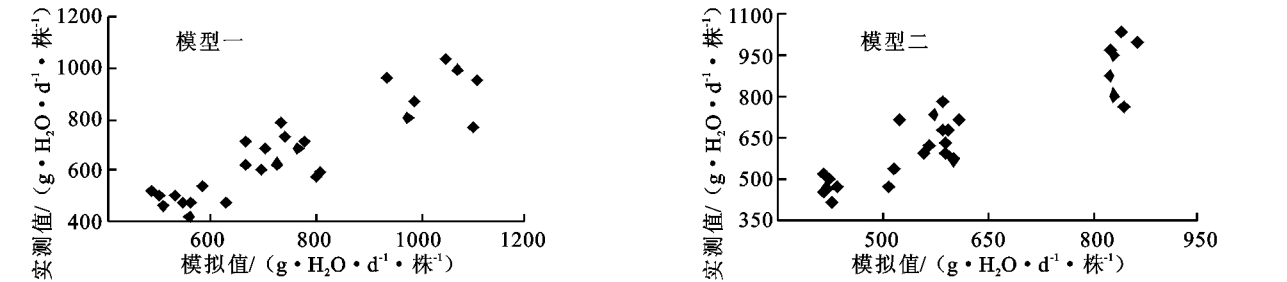


图 3 单株沙棘液流量的模拟值与实测值的对比

5 结论

(1) 在同步观测的环境因子中, 沙棘单位叶干重的液流量与太阳总辐射相关最为密切, 其次为空气温度、空气相对湿度; 与饱和水汽压亏缺、风速和 10 cm 处土壤温度的相关性较小。

(2) 利用太阳总辐射、水汽压差、饱和水汽压斜率和潜在蒸散常数建立了皇甫川流域中国沙棘单位叶干重的树干液流量[$\text{gH}_2\text{O}/(\text{h} \cdot \text{gDW})$]数学模型, 通过对模型评价指标进行计算及分析, 模型拟合优度较好, 用所建模型对该地区 2006 年 7 月 23 日和 2007 年 7 月 2 日的中国沙棘单位叶干重的树干液流量进行了预测, 可以获得满意的数值模拟结果。在沙棘单位叶干重的液流量模型基础上, 建立了单株沙棘的日树干液流量[$\text{gH}_2\text{O}/(\text{d} \cdot \text{株})$]模型, 经验证, 模型的模拟效果较好, 模型二的精度更高一些。

参考文献:

[1] 孙慧珍, 周晓峰, 赵惠勋. 白桦树干液流的动态研究[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1387-1391.

[2] 王华田, 马履一. 利用热扩式边材液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 661-667.

[3] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 乔木蒸腾作用的主要测定方法[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 88-96.

[4] 曹云, 黄志刚, 欧阳志云, 等. 南方红壤区杜仲(*Eucommia ulmoides*)树干液流动态[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2887-2895.

[5] 谷忠厚, 田有亮, 郭连生. 大青山油松人工林树干液流动态及其蒸腾耗水规律研究[J]. 林业资源管理, 2006, (6): 57-61.

[6] 李海涛, 向乐, 夏军, 等. 应用热扩散技术对亚热带红壤

区湿地松人工林树干边材液流的研究[J]. 林业科学, 2006, 42(10): 31-38.

[7] 王华田, 赵文飞, 马履一. 侧柏树干边材液流的空间变化规律及其相关因子[J]. 林业科学, 2006, 42(7): 21-27.

[8] 张友焱, 周泽福, 党宏忠, 等. 利用 TDP 茎流计研究沙地樟子松的树干液流[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 78-80.

[9] Lu P, Urban L, Zhao P. 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.

[10] 孟平, 张劲松, 王鹤松, 等. 苹果树蒸腾规律及其与冠层微气象要素的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1075-1081.

[11] 夏桂敏, 康绍忠, 李王成, 等. 甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1186-1193.

[12] 林平, 李吉跃, 马达. 北京山区油松林蒸腾耗水特性研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 47-50.

[13] 许红梅. 黄土高原丘陵沟壑区小流域植被净第一性生产过程模拟研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2003.

[14] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分空间预测的统计模型[J]. 地理研究, 2001, 20(6): 739-751.

[15] 张文彤. SPSS 11 统计分析教程(高级篇)[M]. 北京: 希望电子出版社, 2002.

[16] 乐通潮, 张万昌. 双参数月水量平衡模型在汉江流域上游的应用[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 97-103.

[17] 刘惊涛, 刘世荣. 植被蒸散研究方法的进展与展望[J]. 林业科学, 2006, 42(6): 108-114.

[18] 刘静, 王连喜, 马力文, 等. 中国西北旱作小麦干旱灾害损失评估方法研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(2): 201-207.

[19] 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量[J]. 环境遥感, 1991, 6(4): 253-260.