

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20140457

# 柴达木地区沙棘冠层导度特征及模拟

王  辉  贺康宁  徐  特  刘玉娟  刘  颖  张  雪  
(北京林业大学水土保持学院)

**摘要:**为了揭示沙棘冠层导度对环境因子的响应规律,评价 Jarvis 模型在沙棘冠层尺度上的适用性,利用 Granier 热消散式探针连续测定了青海省柴达木盆地实验站内的沙棘灌丛树干液流,并同步观测气象因子,利用 Penman-Monteith 方程反推方法,获得了长期连续的冠层导度。在分析沙棘冠层导度动态变化规律的基础上,采用交叉法对 Jarvis 模型进行参数率定和误差分析。结果表明:研究区沙棘冠层导度日变化呈“单峰型”曲线,冠层导度随饱和水汽压差的增加呈负指数关系下降,并与太阳辐射强度呈正相关。基于饱和水汽压差、太阳辐射强度和气温这3个环境变量的 Jarvis 模型可解释  $g_c$  变化的 81%,且最低相对误差仅 11.01%。环境因子对冠层导度( $g_c$ )模型精度的影响依次为饱和水汽压差(VPD) > 太阳辐射强度( $R_s$ ) > 气温( $T$ )。

**关键词:**沙棘;液流;冠层导度;Jarvis 模型;模拟

中图分类号:S718.43    文献标志码:A    文章编号:1000-1522(2015)08-0001-07

WANG Hui; HE Kang-ning; XU Te; LIU Yu-juan; LIU Ying; ZHANG Xue. **Characteristics and simulation of the canopy conductance of *Hippophae rhamnoides* in Qaidam Region of northwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015)**37**(8) 1-7 [Ch, 32 ref.] School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

The aim of this study was to explain the response of canopy conductance of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) to different environmental conditions so as to evaluate the feasibility of application of Jarvis model in sea buckthorn at the canopy scale. By using Granier's thermal dissipation probe, the sap flow of sea buckthorn in Qaidam Basin in Qinghai Province, northwestern China was continuously measured, and as well, the environmental factors such as incoming solar radiation intensity ( $R_s$ ), air temperature ( $T$ ), relative humidity (RH), wind speed ( $u$ ) and rainfall were synchronically measured. Based on sap flow, canopy conductance ( $g_c$ ) was continuously simulated by back-calculated Penman-Monteith model. By analysis of  $g_c$  of sea buckthorn, Jarvis stomatal model was simulated and analyzed with cross-validation. The results indicated that the diurnal variation in canopy conductance of sea buckthorn showed a single-peaked curve. There was a negative logarithm relationship between canopy conductance and vapor pressure deficit (VPD) under different radiation conditions. And the canopy conductance had a positive relationship with solar radiation intensity. The three variables, VPD,  $T$  and  $R_s$ , explained 81% of the variation in conductance in Jarvis-type mode, with the lowest average relative error of only 11.01%. And the degree of the environmental factors affecting the simulation accuracy of the model is ranked as  $VPD > R_s > T$ .

**Key words**  sea buckthorn; sap flow; canopy conductance; Jarvis model; simulation

在土壤-植被-大气连续体间 (SPAC), 气孔是植物叶片与外界环境的物质交换和能量转换具有重要意义。在水分从土壤经植被到大气的传输过程中, 联系植物与外界环境的重要通道, 其调节作用对植

收稿日期: 2014-12-10  修回日期: 2015-03-26  
基金项目: 青海省科技计划项目(2014-NK-A4-4)。  
第一作者: 王辉, 博士生。主要研究方向: 水土保持、林业生态工程。Email: huihuicao1986@163.com  地址: 100083 北京市清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。  
责任作者: 贺康宁, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 水土保持、林业生态工程。Email: hkn@bjfu.edu.cn  地址: 同上。  
本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

气孔的调控作用对叶片、冠层乃至全球尺度的水汽通量都有着重要影响<sup>[1]</sup>。而作为植物生态系统气孔交换的整体指标,冠层导度(canopy conductance)是进行下垫面物质和能量交换模拟时使用的重要参数,对其进行准确确定是进行冠层尺度蒸腾模拟的前提,也是实现林分尺度耗水计算的基础<sup>[2-3]</sup>。

一直以来,人们主要通过气孔计或光合测量系统测定单叶气孔导度,再通过尺度转换来获得冠层导度<sup>[4]</sup>,但此方法除了存在较大误差<sup>[5]</sup>外还难以实现对冠层导度长期连续的测定。然而随着热耗散探针(TDP)技术的不断成熟以及微气象因子观测技术的进步,通过对树干液流的连续动态观测<sup>[6-7]</sup>,结合气象数据,利用 Penman-Monteith 方程反推方法,即可获取长期连续的冠层导度<sup>[8-9]</sup>。该方法已成功用于求算热带亚热带和温带林木的冠层导度,具有连续、稳定和准确的特点<sup>[10-14]</sup>。

沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为胡颓子科沙棘属的灌木树种,具有耐旱、抗风沙的特性,其含有大量维生素的果实,在生活中具有一定的食用和药用价值。同时在我国西北地区,沙棘是当地造林的先锋树种,在维持区域生态平衡方面发挥着防风固沙、保持水土的重要作用。近年来,关于沙棘蒸腾耗水及其影响因素已有了较为系统的研究<sup>[15-18]</sup>,但对沙棘冠层导度及其与环境因子之间响应关系的研究并不多见。由于在树木<sup>[19-20]</sup>、农作物<sup>[21]</sup>冠层导度的模拟中,以 Jarvis 模型为代表的气孔模型已有了初步研究。为了对沙棘冠层导度变化规律的进一步探索,本文以气象因子为主要输入参数,采用 Jarvis 模型对沙棘冠层导度的变化过程进行模拟,分析其与环境因子的响应关系,筛选出对沙棘冠层导度产生影响的参数,进而为沙棘冠层导度变化规律的准确描述和冠层导度模型的发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地位于青海省都兰县香日德镇(97°48' E、36°04' N),海拔 3 010 m,土壤为沙壤土,属高原大陆性气候,年均气温 3.1 ~ 4.4 °C,年降水量 166.8 mm,且分布极不均匀,多集中在 6—9 月份,占全年总降雨量的 75% 左右。选取试验站内 1970 年栽植的沙棘灌丛作为观测样地,其造林株行距为 1.5 m × 2.0 m,沙棘平均树高 4.5 m,平均胸径 9.8 cm,冠幅 2.1 m × 2.4 m。样地位于农田灌溉水渠旁,灌溉充足,故不考虑土壤水分干旱胁迫的影响。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 整树冠层蒸腾及微气象因子测定

采用 Granier 热扩散法观测树木液流,监测季为 2013 年 6—9 月,于样地内选取具有代表性的生长状况良好的样树 5 株,为了避免太阳光直射,在树干北侧 1.3 m 处选定探针部位,以 5 cm × 5 cm 见方打磨树干,磨平后在垂直方向上、下间隔 3 cm,以边材半径为深度钻孔,然后将 TDP 探针平行插入。TDP 热扩散液流探针(Dynamax, USA)与树干接触处用硅胶密封,然后外部包裹太阳膜,以减少太阳辐射强度和防止雨水渗入影响测量结果。传感器和探针连接到同一数据采集器,数据采集为每隔 10 min 记录 1 次。

在沙棘灌丛样地附近的空地上,布设了 Delta-T 便携式自动气象站,对气象因子进行观测。主要测定指标有大气温度、相对湿度、降雨量、太阳辐射强度、风速、气压等,数据采集器的采样间隔为 10 min,并与茎流计(TDP)测定同步。

冠层蒸腾速率通过平均液流密度乘以边材面积并除以树冠投影面积求得,其中液流密度满足 Granier 经验公式<sup>[6]</sup>:

$$f = 0.0119 \left( \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

$$E_c = f \frac{A_{sw}}{A_c} \quad (2)$$

式中: $f$ 为平均液流密度,cm/s; $\Delta T_{\max}$ 为这一天的 2 个探针的最大温差,°C; $\Delta T$ 为 2 个探针的温度差,°C; $E_c$ 为实测冠层蒸腾速率,mm/h; $A_{sw}$ 为样树边材面积,cm<sup>2</sup>; $A_c$ 为样树冠层的地面投影面积,cm<sup>2</sup>。下同。

### 1.2.2 冠层导度的计算

冠层导度是利用热扩散探针法所实测的蒸腾值通过反算 Penman-Monteith(P-M)公式而得出的。作为计算蒸腾比较成熟和可靠的方法,P-M 公式基于湍流交换和能量平衡原理,将植物冠层假设为一块巨大的叶片(一个整体)并考虑了植物生理与环境因素。在不考虑温度层结问题时,冠层气孔导度可以由 Monteith and Unsworth 提出的简化公式计算<sup>[22]</sup>:

$$g_c = \frac{\gamma \lambda E_c}{\rho C_p VPD} \quad (3)$$

式中: $\gamma$ 为湿度计常数,kPa/K; $\lambda$ 为汽化潜热,J/kg; $\rho$ 为空气密度,kg/m<sup>3</sup>; $C_p$ 为定压比热,J/(kg·K);VPD 为饱和水汽压差,kPa。

研究表明<sup>[23]</sup>,在  $\Omega$ (decoupling factor,去耦系数)≤0.2 时,公式(3)被认为是简单且有效的,Oguntende 同样验证了该公式和 P-M 完整式的换算

结果<sup>[24]</sup>,发现所得结果非常接近( $r=0.98$ )。

气孔对蒸腾的控制通常用去耦系数  $\Omega$  (decoupling factor) 进行描述,该系数反映了冠层与周围环境的耦合程度。其值介于 0 到 1 之间,公式如下:

$$\Omega = \frac{1 + \Delta/\gamma}{1 + \Delta/\gamma + g_a/g_c} \quad (4)$$

空气动力学导度( $g_a$ )采用以下公式:

$$g_a = \frac{1 + 0.54u}{4.72 \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2} \quad (5)$$

式中: $u$  为相对高度  $z$  处的风速, m/s;  $d$  为地面修正量, m;  $z_0$  为粗糙度, m;  $h_c$  为样树冠层平均高度, m;  $d = 0.67h_c$ ,  $z_0 = 0.1h_c$ ;  $\Delta$  为水汽压与气温变化斜率, kPa/°C。

## 2 模型描述

### 2.1 冠层导度模型

冠层气孔导度预测模型( $g_c$ , m/s)是 Jarvis 和 Stewart 提出的<sup>[25-26]</sup>,它是由一系列环境变量组成的响应方程( $0 \leq f \leq 1$ )。本研究中,影响  $g_c$  的环境变量为 VPD、 $R_s$  和  $T$ :

$$g_c = g_{\max} f(\text{VPD}) f(T) f(R_s) \quad (6)$$

$$f(\text{VPD}) = \exp(-k_1 \text{VPD}) \quad (7)$$

$$f(T) = \exp[-k_2 (T - T_{\text{opt}})^2] \quad (8)$$

$$f(R_s) = R_s (1000 + k_3) / 1000 (R_s + k_3) \quad (9)$$

式中: $g_{\max}$  为最大气孔导度,  $T_{\text{opt}}$  为限制冠层蒸腾的最适温度。 $R_s$ 、 $T$  分别为太阳辐射强度、空气温度,  $k_1 \sim k_3$  表示  $g_c$  对各环境变量的敏感性,根据 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘法获得<sup>[27]</sup>。

### 2.2 数据分析和交互验证

采用 SPSS 19.0 软件对所选 5 株样树的所有数据进行分析。由于降雨会对冠层导度的计算产生影响,所以本文剔除了降雨日的数据。而且早晨出现的露水、雾等都会影响叶表面湿度,加上清晨和傍晚的太阳辐射强度、饱和水汽压差和冠层蒸腾等值都非常低,从而导致计算的冠层导度相对误差较大。为了排除这些因素的影响,提高模拟的精度,本文对太阳辐射强度和整树蒸腾等处于较低水平时段的数据和部分异常数据进行了剔除。

为了更好地验证模型的可靠性,本文采用了交互验证(Cross validation)方法,该法需要时间的连续性,是一种比数据随机分组更严格的模型验证方法<sup>[26]</sup>。为避免循环回算,将所有数据分为奇数天(Database A)和偶数天(Database B)2 组,分别用 A、B 2 组数据进行参数率定得出参数值,然后将另一

组数据交叉带入前一组数据进行参数率定后获得模型,求出模型预测值,并最终将由 sap flow 数据计算出的  $g_c$  值和模型预测的  $g_c$  值进行比较来检验模型<sup>[28]</sup>。

### 2.3 误差分析方法

利用均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)分析冠层导度模拟值( $g_{c(\text{estimated})}$ )与实测值( $g_{c(\text{measured})}$ )之间的误差:

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{1}{N} \sum (g_{c(\text{measured})} - g_{c(\text{estimated})})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum |g_{c(\text{measured})} - g_{c(\text{estimated})}| \quad (11)$$

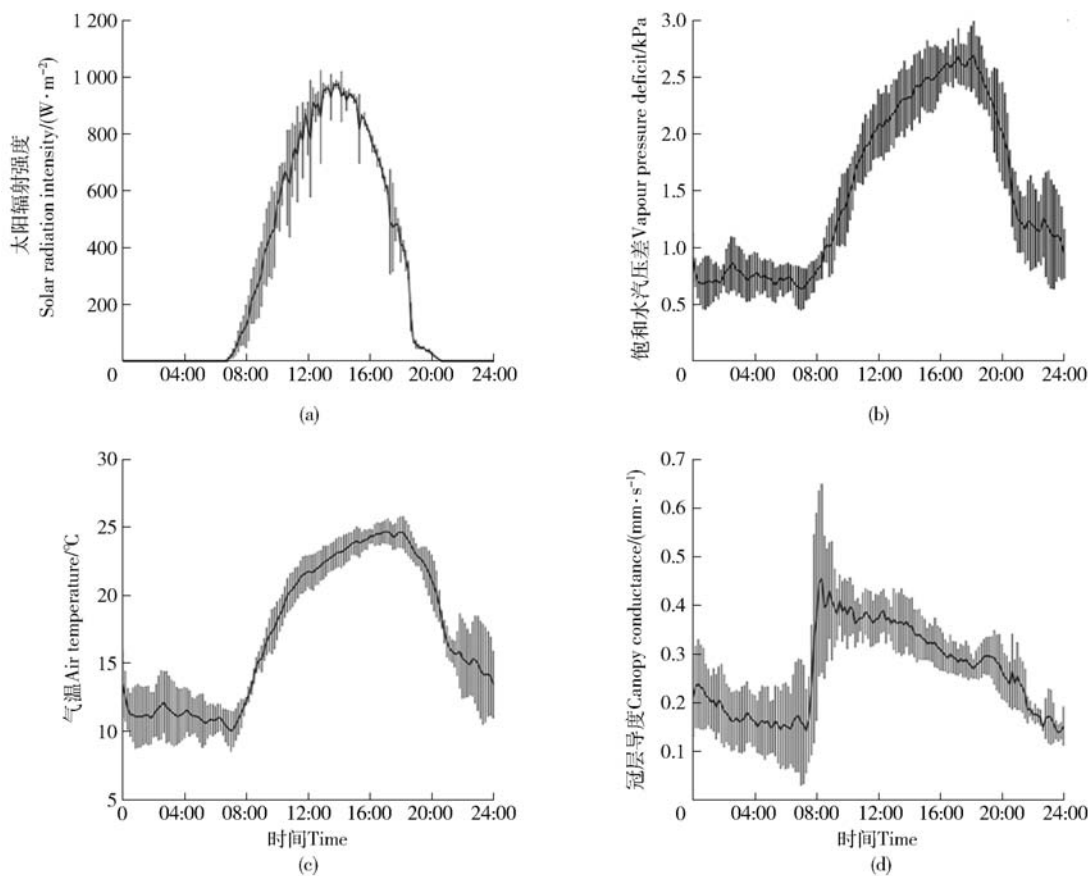
$$\text{MRE} = \frac{\text{MAE}}{g_{c(\text{measured})}} \quad (12)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 沙棘冠层导度及其与环境因子的日变化

试验地 2013 年 6—9 月的实验数据表明,在影响冠层导度日变化的众多环境要素中,太阳辐射强度( $R_s$ , W/m<sup>2</sup>)、饱和水汽压差(VPD, kPa)及空气温度( $T$ , °C)为主导因素。由图 1(a, b, c)可知,试验测定期间环境因子日变化呈现一定的规律性,典型晴天  $R_s$  日变化遵循正态分布。太阳辐射强度从早上 06:00 开始逐渐升高,中午 12:00 前后达到峰值,随后逐渐降低,约 20:00 前后趋于 0;且 VPD 和  $T$  与其有相似的“单峰型”变化规律,但与太阳辐射强度相比,VPD 和  $T$  的启动时间(07:00—08:00)相对滞后,并且峰值出现在下午(17:00)左右,大概比太阳辐射强度晚 5 h;之后随着太阳辐射强度强度的降低,VPD 和  $T$  迅速降低,当 20:00 太阳辐射强度为 0 时,VPD 和  $T$  下降速度变缓,且于次日清晨 05:00—06:00 达到最低值。图 1(d)还给出了沙棘冠层导度的日变化过程,由图 1 可知,沙棘冠层导度日变化呈“单峰型”曲线,其在日出后迅速上升,至 09:00 左右达到峰值,随后逐渐下降。此现象出现的原因可能是早晨随着太阳的升起,太阳辐射强度逐渐增强,从而叶片气孔张开,沙棘开始蒸腾作用和光合作用;而在午后,由于饱和水汽压差不断增大,根系水分吸收无法满足逐渐增大的冠层叶片蒸腾需求,从而沙棘通过降低自身叶片气孔导度来减缓水分运输的压力。

去耦系数( $\Omega$ )能够很好地反映树木对环境因子及本身生理控制的有效性,其值的范围为 0~1,  $\Omega$  越小说明冠层蒸腾受环境因子影响越大。如图 2 所示,  $\Omega$  的日变化趋势与冠层导度相似,其日均值为 0.023,说明大气与沙棘林分冠层之间有很好的耦联



垂直条表示在对应时间点上偏离平均值的标准偏差。下同。The vertical bars indicate the standard deviations from the mean values at the respective time of the day. The same below.

图 1 环境因子(太阳辐射强度、饱和水汽压差、大气温度)和冠层导度的日变化

Fig. 1 Diurnal variations in solar radiation intensity ( $R_s$ ) (a), vapor pressure deficit (VPD) (b), air temperature ( $T$ ) (c) and calculated canopy conductance ( $g_c$ ) (d)

关系,且该值低于 Kumagai 等<sup>[29]</sup>报道的森林  $\Omega$  为 0.1~0.4, Granier 等<sup>[6]</sup>研究表明,岩生栎林的  $\Omega$  值为 0~0.2,这说明研究区周围大气因子对沙棘冠层影响剧烈,其冠层蒸腾极大地受控于气孔导度。

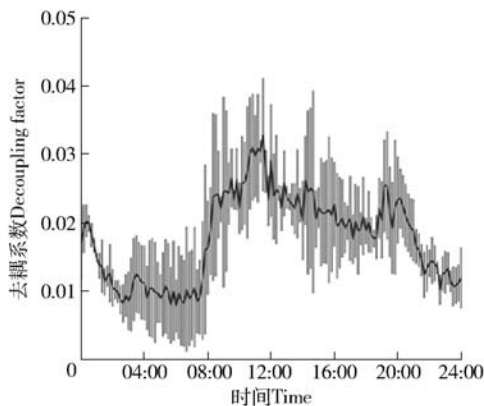


图 2 去耦系数日变化

Fig. 2 Diurnal variations of the decoupling coefficient ( $\Omega$ )

### 3.2 冠层导度对太阳辐射强度、饱和水汽压差和空气温度的响应

太阳辐射强度( $R_s$ )、饱和水汽压差(VPD)和大

气温度( $T$ )是冠层气孔导度变化的主要驱动因子,图 3(a、b、c)分别描述了沙棘冠层导度对上述几个环境变量的响应,结果表明:各环境因子与  $g_c$  之间均呈显著相关( $P < 0.001$ ),但受 VPD 和  $R_s$  影响更加显著,相关系数为  $VPD > R_s > T$ ,这与 Granier 等<sup>[6]</sup>、Kumagai 等<sup>[29]</sup>及 Wallace 等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。

如图 3a 所示,总体上沙棘冠层导度会随着太阳辐射强度的增大而变大,原因可能是随着辐射增强,气孔张开以进行物质与能量的交换,其最高值出现在 200~400  $W/m^2$  之间,同时可以看到,太阳辐射强度升到 300  $W/m^2$  以后,冠层导度的变化趋于平稳,表明叶片气孔已全部开放,此时冠层导度受太阳辐射强度的影响明显降低,即达到光饱和点,随着太阳辐射强度进一步升高,叶片此时失水较多,为了维持自身的水分平衡沙棘进行气孔调节行为,故气孔张开幅度变小,从而导致冠层导度下降。且相比于饱和水汽压差,辐射与冠层导度的  $r$  较低,说明辐射仅在一定程度上影响气孔开度,并没有饱和水汽压差

所起的决定作用大。图 3b 描述了不同太阳辐射强度下冠层气孔导度  $g_c$  与饱和水汽压差 VPD 的关系,总体上冠层导度随饱和水汽压差增大呈负对数曲线的下降趋势。图中 VPD 对冠层导度施加的影响表明,当环境蒸腾需求过高时,为避免过度失水,气孔出现逐渐关闭来保证植物能维持恒定的蒸腾或使自身水势保持在安全范围内,从而避免木质部出

现致命的气穴和栓塞<sup>[31]</sup>。这种机制增大了水流通路的导水阻力 (Hydraulic limit),使植物能通过有效的生理调控以保证自身水分安全,并最终决定了植物能维持的最大蒸腾速率<sup>[32]</sup>。沙棘冠层导度一定程度上也受空气温度的影响 (图 3c),当温度达到 15~25℃ 时,沙棘冠层导度较大,随着温度的增加或降低,冠层导度会明显下降。

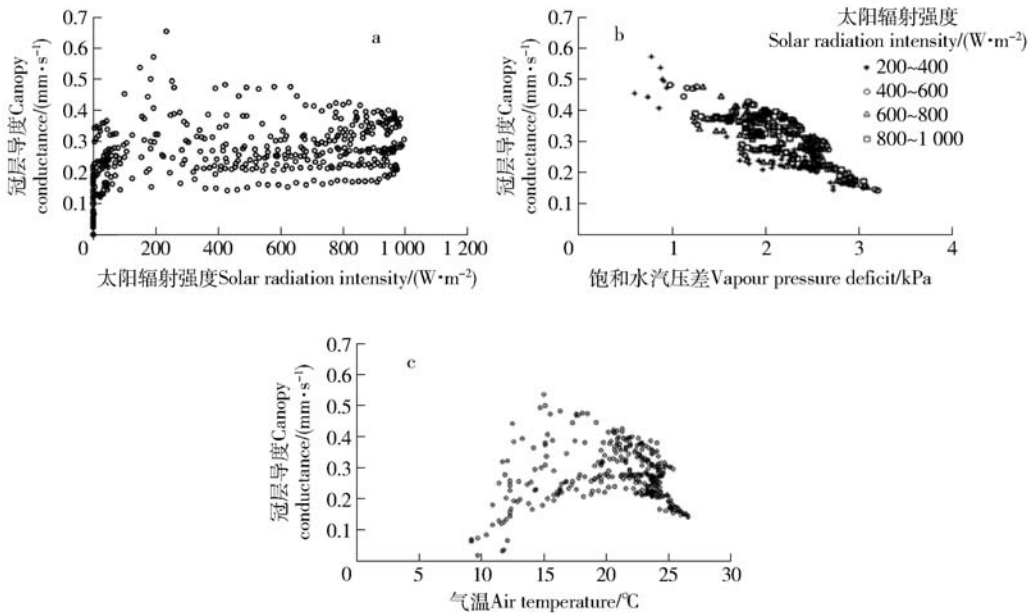


图3 冠层导度( $g_c$ )对环境因子(太阳辐射强度、饱和水汽压差和空气温度)的响应

Fig. 3 Relationships between canopy conductance ( $g_c$ ) and solar radiation intensity ( $R_s$ ), vapor pressure deficit (VPD) and air temperature ( $T$ )

3.3 冠层导度模拟

沙棘冠层导度 Jarvis 模型中的参数和驱动变量变动范围如表 1 所示。基于  $R_s$ 、VPD、 $T$  3 个环境变量的函数模型解释了 81% 的  $g_c$  变量,且误差均小于

0.001 m/s。该方法相比用 Oguntunde 等<sup>[24]</sup>描述的线性模型  $\ln g_c = a_0 + a_1 \text{VPD} + a_2 T + a_3 R_s$  (解释了 67% 的  $g_c$  变量)的模拟结果要好得多。

表 1 沙棘冠层气孔导度基于 Jarvis-type 预测模型参数率定

Tab. 1 Fitted values of parameters for Jarvis-type model optimized to predict the canopy conductance ( $g_c$ ) of *H. rhamnoides*

| 参数 Parameter      | 所有数据 All data  | 奇数天 Database A (odd number days) | 偶数天 Database B (even number days) |
|-------------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 最大气孔导度 $g_{cmax}$ | 0.752 (0.317)  | 0.743 (0.257)                    | 0.761 (0.424)                     |
| 敏感系数 $k_1$        | 0.718 (0.117)  | 0.421 (0.176)                    | 0.963 (0.179)                     |
| 敏感系数 $k_2$        | 0.006 (0.001)  | 0.007 (0.001)                    | 0.005 (0.001)                     |
| 敏感系数 $k_3$        | 10.681 (1.744) | 12.655 (2.543)                   | 9.556 (2.320)                     |
| 最适温度 $T_{opt}$    | 26.836 (2.783) | 21.105 (1.817)                   | 30.114 (3.231)                    |
| 决定系数 $R^2$        | 0.804          | 0.815                            | 0.801                             |
| 均方根误差 RMSE        | 0.033          | 0.031                            | 0.039                             |

注:括号内为标准误。Notes: Values in parentheses are standard errors.

模型中所有参数  $g_{cmax}$ 、 $k_1 \sim k_3$ 、 $T_{opt}$  值由非线性最小二乘法确定。沙棘的理论最大冠层气孔导度  $g_{cmax}$  为  $(0.0007 \pm 0.0001)$  m/s, 这比 Bernier 等<sup>[13]</sup>研究的桉树 0.01 m/s 低,表明沙棘的气孔阻力较高,因而对水汽的向外散失产生了限制,这也是该树

种的一种自我保护机制。沙棘气孔开度最适温为  $(26.8 \pm 2.78)^\circ\text{C}$ , 这与 Oguntunde 等<sup>[24]</sup>的研究结果  $25.5 \sim 28.5^\circ\text{C}$  较为一致。

3.4 模型的交互验证

表 2 给出了沙棘冠层导度模型的误差分析,可

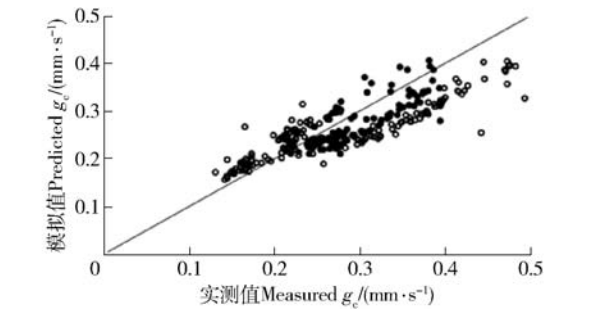
以看到,Jarvis 模型的确定系数达到 0.8 以上,相对误差在 12% 以内,其模拟效果较好。图 4 为采用交互验证法对奇数天(Database A)和偶数天(Database B)的模型预测值和实测值的分析结果,从图 4 中可更清晰地看出,尽管有比较离散的点(由于实验当

天的某一时刻云量突然增多,从而使得  $R_s$  和 VPD 变化剧烈),但沙棘冠层导度的模拟值和实测值存在较好的线性关系,在 1:1 线两侧分布较均匀,模型预测结果良好。

表 2 冠层气孔模型误差分析

Tab.2 Error analysis of the canopy conductance ( $g_c$ ) model

|              | 所有数据 All data | 奇数天 Dataset A (odd number days) | 偶数天 Dataset B (even number days) |
|--------------|---------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 决定系数 $R^2$   | 0.804         | 0.815                           | 0.801                            |
| 均方根误差 RMSE   | 0.033         | 0.031                           | 0.039                            |
| 平均绝对误差 MAE   | 0.028 7       | 0.028 1                         | 0.029 9                          |
| 平均相对误差 MRE/% | 11.31         | 11.01                           | 11.81                            |



实心点:奇数天 Database A;空心点:偶数天 Database B。Odd number days: dataset A (closed symbols) and even number days: dataset B (open symbols).

图 4 冠层气孔导度模拟值与实测值的验证  
Fig.4 Comparison of predicted and measured  $g_c$  using independent dataset A (closed symbols) and dataset B (open symbols)

4 结 论

基于微气象数据和沙棘树干液流测定值获得的林冠蒸腾值,借助 Penman-Monteith 公式,求算了冠层导度,为分析沙棘冠层气孔水汽通量与环境的调节提供了合理数据。试验结果显示,冠层导度与气象因子存在很强的相关性,但受饱和水汽压差 (VPD) 和太阳辐射强度 ( $R_s$ ) 及气温 ( $T$ ) 影响更显著,相关系数为  $VPD > R_s > T$ 。冠层导度随 VPD 的增大而降低,且呈显著的负指数函数关系,尤其是在太阳辐射强度到  $200\text{ W/m}^2$  时更为显著;但是当大到  $300\text{ W/m}^2$ ,基本处于光饱和点,冠层导度并不随着辐射继续增大而明显增大;温度在  $15\sim25\text{ }^\circ\text{C}$  时,沙棘冠层导度较大,增加或降低温度均会使其有较明显的降低。通过对 Jarvis 模型进行参数率定,并采用十字交叉法对沙棘冠层导度进行数值模拟,结果表明,Jarvis 模型可取得较好的模拟效果,模拟值与实测值有很好的-一致性,在 1:1 线两侧分布均匀,呈直线状,最小误差为  $MRE = 11.01\%$ ,  $R^2 = 0.815$ ,可见 Jarvis 模型模拟冠层导度能真实反映沙棘的气孔

行为。

参 考 文 献

[ 1 ] TANG J W, BOLSTAD P V, EWERS B E, et al. Sap flux: up scaled canopy transpiration, stomatal conductance, and water use efficiency in an old growth forest in the Great Lakes region [ J ]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111 ( 2 ) : 1-12.

[ 2 ] PATAKI D E, OREN R, KATUL G, et al. Canopy conductance of *Pinus taeda*, *Liquidambar styraciflua* and *Quercus phellos* under varying atmospheric and soil water conditions [ J ]. Tree Physiology, 1998, 18 ( 5 ) : 307-315.

[ 3 ] EWERS B E, GOWER S T, BOND-LAMBERTY B, et al. Effects of stand age and tree species on canopy transpiration and average stomatal conductance of boreal forests [ J ]. Plant, Cell and Environment, 2005, 28 ( 5 ) : 660-678.

[ 4 ] 贺康宁,田阳,张光灿. 刺槐日蒸腾过程的 Penman-Monteith 方程模拟 [ J ]. 生态学报, 2003, 23 ( 2 ) : 251-258.

HE K N, TIAN Y, ZHANG G C. Modeling of the daily transpiration variation in locust forest by Penman-Monteith equation [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23 ( 2 ) : 251-258.

[ 5 ] ALVES I, PERRIER A, PEREIRA L S. Aerodynamic and surface resistances of complete cover crops: how good is the ‘big leaf’? [ J ]. Transactions of the ASAE, 1998, 41 ( 2 ) : 345-351.

[ 6 ] GRANIER A, HUC R, BARIGAH S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors [ J ]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 78 ( 1-2 ) : 19-29.

[ 7 ] TRAMBOUZ W, BERTUZZI P, VOLTZ M. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row cropped vineyard [ J ]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 91 ( 3-4 ) : 193-208.

[ 8 ] MAGNANI F, LEONARDI S, TOGNETTI R, et al. Modelling the surface conductance of a broad-leaved canopy: effect of partial decoupling from atmosphere [ J ]. Plant, Cell and Environment, 1998, 21 ( 8 ) : 867-879.

[ 9 ] GRANIER A, LOUSTAU D, BRÉDA N. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index [ J ]. Annals of Forest Science, 2000, 57 ( 8 ) : 755-765.

[ 10 ] GARCA-SANTOS G, BRUIJNZEEL L A, DOLMAN A J. Modelling

canopy conductance under wet and dry conditions in a subtropical cloud forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149 (10): 1565–1572.

[11] NICOLÁS E, BARRADAS V L, ORTUO M F, et al. Environmental and stomatal control of transpiration, canopy conductance and decoupling coefficient in young lemon trees under shading net[J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 63 (1–3): 200–206.

[12] TESTI L, ORGAZ F, VILLALOBOS F J. Variations in bulk canopy conductance of an irrigated olive (*Olea europaea* L.) orchard[J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 55 (1–2): 15–28.

[13] BERNIER P Y, BARTLETT P, BLACK T A, et al. Drought constraints on transpiration and canopy conductance in mature aspen and jack pine stands [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140 (1–4): 64–78.

[14] KOMATSU H, KANG Y, KUME T, et al. Transpiration from a *Cryptomeria japonica* plantation (II): responses of canopy conductance to meteorological factors [J]. Hydrological Processes, 2006, 20 (6): 1321–1334.

[15] 沈振西, 徐丽宏, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山沙棘液流变化及耗水特性[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12 (3): 59–65.

SHEN Z X, XU L H, WANG Y H, et al. Characteristics of sap flow and water use of *Hippophae rhamnoides* community in Liupan Mountains, Ningxia [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12 (3): 59–65.

[16] 于红博, 杨劫, 藏春鑫, 等. 皇甫川流域中国沙棘树干液流日变化及其相关因子[J]. 生态学杂志, 2008, 27 (7): 1071–1076.

YU H B, YANG J, ZANG C X, et al. Diurnal variation of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi stem sap flow in Huangfuchuan Basin and related environmental factors [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27 (7): 1071–1076.

[17] 于红博, 杨劫, 徐延达, 等. 皇甫川流域中国沙棘的树干液流量数学模型[J]. 水土保持研究, 2009, 16 (1): 162–166.

YU H B, YANG J, XU Y D. Mathematical model of stem sap flow flux for *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi in Huangfuchuan Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16 (1): 162–166.

[18] 阮成江, 李代琼. 黄土丘陵区人工沙棘蒸腾作用研究[J]. 生态学报, 2001, 21 (12): 2141–2146.

RUAN C J, LI D Q. Study on the transpiration of artificial *Hippophae rhamnoides* L. forest in the loess hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21 (12): 2141–2146.

[19] 许文滔, 赵平, 王权, 等. 基于树干液流测定值的马占相思 (*Acacia mangium*) 冠层气孔导度计算及数值模拟[J]. 生态学报. 2007, 27 (10): 4122–4130.

XU W T, ZHAO P, WANG Q, et al. Calculation and modeling of the canopy stomatal conductance of *Acacia mangium* from sap flow data [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (10): 4122–4130.

[20] 夏永秋, 邵明安. 黄土高原半干旱区柠条 (*Caragana korshinskii*) 树干液流动态及其影响因子[J]. 生态学报. 2008, 28 (4): 1336–1382.

XIA Y Q, SHAO M A. The sap flow dynamics of *Caragana korshinskii* and the influence of environmental factors in semi-arid region of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (4): 1336–1382.

[21] IRMAK S, MUTIBWA D, IRMAK A, et al. On the scaling up leaf stomatal resistance to canopy resistance using photosynthetic photon flux density [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148 (6–7): 1034–1044.

[22] MONTEITH J L, UNSWORTH M H. Principles of environmental physics[M]. London: Edward Arnold Press, 1990.

[23] BOSVELD F C, BOUTEN W. Evaluation of transpiration models with observations over a Douglas-fir forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108 (4): 247–264.

[24] OGUNTUNDE P G, VAN DE GIESEN N, SAVENIJE H H G. Measurement and modelling of transpiration of a rain-fed citrus orchard under subhumid tropical conditions [J]. Agricultural Water Management, 2007, 87 (2): 200–208.

[25] JARVIS P G. The interpretation of the variations in water potential and stomatal conductance found in canopies in the field [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, 1976, 273 (927): 596–610.

[26] STEWART J B. Modeling surface conductance of pine forest[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1988, 43 (1): 19–35.

[27] MARQUARDT D W. An algorithm for least square estimation of non-linear parameters[J]. Appl Math, 1963, 11 (2): 441–443.

[28] 韩磊. 黄土半干旱区主要造林树种蒸腾耗水及冠层蒸腾模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.

HAN L. Characteristics and modeling of canopy transpiration of main tree species in semi-arid region of Chinese Loess Plateau [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.

[29] KUMAGAI T, SAITOH T M, SATO Y, et al. Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak [J]. J Hydrol, 2004, 287 (1–4): 237–251.

[30] WALLACE J, MCJANNET D. Processes controlling transpiration in the rainforests of north Queensland [J]. J Hydrol, 2010, 384 (1–2): 107–117.

[31] CHEN L, ZHANG Z, LI Z, et al. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in Northern China [J]. J Hydrol, 2011, 402 (3–4): 388–400.

[32] DAVID T, FERREIRA M, COHEN S, et al. Constraints on transpiration from an evergreen oak tree in southern Portugal [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 122 (3–4): 193–205.

(责任编辑 李 契  
责任编辑 杨晓晖 王彦辉)