

# 樱桃冠层导度特征及模拟

李仙岳<sup>1,2</sup>, 杨培岭<sup>1,\*</sup>, 任树梅<sup>1</sup>, 任亮<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:**为了揭示樱桃冠层蒸腾、冠层导度对环境因子的响应规律,评价 Jarvis 模型在樱桃冠层尺度上应用的适用性,利用 Granier 热消散式探针连续监测了北京四季青果林所试验地 3 年生盆栽樱桃 (*Prunus avium L.*) 4—8 月份蒸腾动态变化,同步监测了气象与土壤水分数据。以实测液流为基础,利用 Penman-Monteith 方程反推方法获取了长期连续冠层导度,在分析樱桃冠层蒸腾、冠层导度的动态变化规律的基础上,采用十字交叉法对多元回归模型与 Jarvis 模型进行参数率与误差分析,结果显示盆栽樱桃冠层蒸腾规律性强、时滞效应小,不同辐射条件下,冠层导度随水汽压亏缺增加呈负指数函数下降趋势,采用水汽压亏缺、光合有效辐射、气温的不同组合方式构建了多元回归和 Jarvis 冠层模型,模拟结果显示 Jarvis 模型精度高于多元回归模型,环境因子对模型精度的影响程度依次为:水汽压亏缺 > 光合有效辐射 > 气温,考虑了水汽压亏缺和太阳辐射的 Jarvis 模型精度最高,最低相对误差仅为 12.12%,均方根误差为 0.271。

**关键词:**樱桃; 冠层导度; Jarvis 模型; 模拟

## Characteristics and simulation of canopy conductance of cherry

LI Xianyue<sup>1,2</sup>, YANG Peiling<sup>1,\*</sup>, REN Shumei<sup>1</sup>, REN Liang<sup>1</sup>

1 College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2 College of Water Conservancy & Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

**Abstract:** The objective of this study was to explain the response of cherry's canopy transpiration ( $Tr$ ) and conductance ( $g_c$ ) to different environmental conditions so as to evaluate the application feasibility of Jarvis model on cherry canopy scale modeling. Sapflow of 3 year-old potted cherry trees (*Prunus avium L.*) was continuously monitored using Granier sensors in Sijiqing orchard in Beijing from April to August, 2008. At the same time weather data and soil water content were also measured. Based on sapflow,  $g_c$  was continuously simulated by back-calculated Penman-Monteith model. By analysis of cherry's  $Tr$  and  $g_c$ , multiple regression and Jarvis stomatal models were simulated and analyzed with cross-validation. The results showed that  $Tr$  had strong regularity and weak time lag, the  $g_c$  had negative exponential relationships to vapor pressure deficit ( $VPD$ ) under different radiation condition. The Various compositions of  $VPD$ , photosynthetic active radiation ( $PAR$ ) and air temperature ( $Ta$ ) were also used to obtain multiple regression and Jarvis models, which showed the precision was higher than that of multiple regression, the environment factors order rank affecting the simulation accuracy of model is  $VPD > PAR > Ta$ . The II typal Jarvis model using  $VPD$  and  $PAR$  was the best model for canopy conductance of cherry, with the lowest average relative error of only 12.12% and the lowest RMSE of 0.271.

**Key Words:** cherry; canopy conductance; Jarvis model; simulation

根据果树实际耗水量进行灌溉管理,确定灌溉时间和灌水量等,是果园水分管理的关键。而蒸腾作用是果树耗水的基本形式,主要是通过气孔将植物体内的水分逸失到空气中的过程。而气孔是土壤-植被-大气连续体间( SPAC)物质与能量交换的重要调控通道,调节植物与大气间能量与气体交换,与冠层导度( $g_c$ )密切

基金项目:北京市科委“十一五”重大科技攻关资助项目(D0706007040191-08);北京市科技计划资助项目(Z08040602990807)

收稿日期:2008-10-27; 修订日期:2009-02-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangpeiling@126.com

相关,其准确确定是进行冠层尺度蒸腾模拟的前提,是实现林分尺度耗水计算的基础。

长期以来,冠层导度主要通过气孔计或者光合测量系统测定单叶气孔导度,再通过尺度提升方法进行转换<sup>[1]</sup>,但难以实现长期连续测定。目前对于气孔导度的数值模拟的模型主要两种:一种是以 Jarvis 模型为代表的气孔导度与环境因子间的非线性关系的普遍采用的模拟模型和 Ball-Berry 等首先提出,Leuning 修正,耦合了气孔导度与净光合速率较广泛使用的模拟模型<sup>[2-3]</sup>,它们主要在单叶尺度上进行模拟<sup>[4]</sup>,对于冠层尺度,由于树冠本身的非均匀性导致各部分接收太阳辐射存在明显的差异<sup>[5]</sup>,同时新旧叶片含不同叶绿素也产生吸收辐射的差异,这都将产生不同叶片单位时间吸收能量的差异,叶温的不同,所以通过将单叶气孔导度尺度提升到冠层导度过程中存在较大误差<sup>[6]</sup>。

随着热脉冲技术的不断成熟,通过连续动态监测树干液流,精确、实时记录树木蒸腾耗水过程成为可能<sup>[7-8]</sup>,配合微气象技术利用 Penman-Monteith 方程反推方法能够获取长期连续的冠层导度。由于冠层导度主要受到太阳辐射、水汽压亏缺的驱动和土壤水分的抑制同时也受空气温度与湿度和风速的影响<sup>[9]</sup>,并且这些参数容易获得,以 Jarvis 模型为代表的气孔模型已经在树木<sup>[10-11]</sup>、农作物<sup>[12]</sup>冠层导度的模拟进行了初步研究。为了进一步探索樱桃冠层导度的变化规律,本文利用气象因子为主要输入参数采用多元回归与 Jarvis 模型模拟樱桃冠层导度变化过程,筛选影响樱桃冠层导度的关键参数,为冠层导度模型的发展奠定基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

试验在北京市海淀区四季青果林所试验地(北纬 116°13'28"、东经 39°58'12")进行,供试的果树为 3 年生盆栽樱桃(*Prunus avium* L.),盆底宽 60cm,上宽 70cm,高 40cm。土质为砂壤土,0—30cm 为土壤,为了防止水分渗漏,装土前在木盆内壁铺一层塑料膜。试验期间保持充分灌溉。

### 1.2 观测项目与方法

试验开始于 2008 年 4 月下旬,樱桃叶面积已经相对稳定。试验地共有 18 棵樱桃树,选 6 棵生长状况良好的样树安装 TDP 探针(热扩散式探针法)。上下间隔 4cm 安装由一对热电偶组成的 Granier 热扩散探针,上方为加热探针,下方探针不加热,通过记录两探针之间温差变化,测定果树木质部液流密度,探针长为 20mm。

在距樱桃盆栽附近的空地上安装自动气象站(太阳总辐射、光合有效辐射、温湿度、大气压力器、风速、雨量传感器),包括液流在内的所有数据 30s 读 1 次,每隔 30min 进行平均并记录数据到英国 Grant 公司的自动采集器的内存里(Squirrel Date Logger 2040 Series),定期下载数据。在樱桃盆栽冠层上方采集的净辐射(TBB-1 净辐射传感器)也是每隔 30min 记录到净辐射记录仪(PC-2B)中,在离每棵安装 TDP 探针的样树树干 15cm 处,在离土壤表层 10、20、30cm 处埋设 FDS 土壤水分传感器,定期测量土壤水分,取平均值。

整树蒸腾速率通过平均液流密度乘以边材面积并除以样树占地面积求得,其中液流密度通过记录的温差电势数,根据 Granier 的液流密度经验公式求出<sup>[13]</sup>:

$$f = 119 \left( \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (1)$$

$$E_c = f \cdot \frac{A_s}{A_G} \quad (2)$$

式中, $f$  为平均液流密度( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $\Delta T$  为两个探针的温差( $^{\circ}\text{C}$ ), $\Delta T_{\max}$  为这一天的两个探针的最大温差( $^{\circ}\text{C}$ ), $E_c$  为整树蒸腾速率( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $A_s$  为样树边材面积( $\text{cm}^2$ ), $A_G$  为样树冠层的地面投影面积( $\text{cm}^2$ )。

## 2 模型描述

### 2.1 蒸腾模型

樱桃蒸腾速率计算采用 Penman-Monteith 公式<sup>[14]</sup>,它基于湍流交换和能量平衡原理,假设植物冠层是一张巨大叶片并考虑了植物生理与环境因素,是计算蒸腾比较成熟和可靠的方法<sup>[15-16]</sup>。

$$\lambda E_T = \frac{\Delta R_n + \rho C_p VPD g_a}{\Delta + \gamma(1 + g_a/g_c)} \quad (3)$$

式中,  $E_T$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )为冠层蒸腾量,  $\lambda$ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )为汽化潜热,  $\gamma$ ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )为湿度计常数,  $\Delta$ ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )为水汽压与气温变化斜率,  $R_n$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )为冠层净辐射,  $\rho$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )为空气密度,  $C_p$ ( $\text{J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )为空气热容量,  $VPD$ ( $\text{kPa}$ )为饱和水汽压亏缺,  $g_a$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )为空气动力学导度,  $g_c$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )为冠层导度。

空气动力学导度采用以下公式<sup>[17]</sup>:

$$g_a = \frac{k^2 u_z}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z-d}{h_c - d}\right)} \quad (4)$$

式中,  $k$  为 Karman 常数(0.4),  $u_z$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )为相对高度  $z$  处的风速,  $d$ ( $\text{m}$ )为地面修正量,  $z_0$ ( $\text{m}$ )为粗糙长度,  $h_c$ ( $\text{m}$ )为样数冠层平均高度,  $d = 0.67h_c$ ,  $z_0 = 0.1h_c$ 。

水汽压亏缺  $VPD$ (vapor pressure deficit) 表示空气温度、相对湿度对蒸腾的影响效应, 用 Campbell 公式计算<sup>[18]</sup>:

$$VPD = ae\left(\frac{bTa}{ta+c}\right)(1 - RH) \quad (5)$$

式中,  $Ta$ 、 $RH$  分别为空气温度与相对湿度,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数 0.611kPa、17.502°C 和 240.97°C。

令  $E_T = E_c$ , 冠层导度采用反向推导公式(3):

$$g_c = \frac{\gamma \lambda E_T g_a}{\Delta R_n + \rho C_p VPD g_a - \lambda E_T (\Delta + \gamma)} \quad (6)$$

## 2.2 冠层导度模型

植物生理研究表明气孔导度主要取决于环境因素比如太阳辐射, 空气温、湿度亏缺, 土壤水分等<sup>[2,19-20]</sup>, 本研究采用多元回归和 Jarvis 两种模型探索樱桃冠层导度的变化规律, 由于 Ball 模型以净光合速率为基础, 普通气象站难以获取, 本研究改为采用普通气象因子为参数的多元回归模型。

(1) 多元回归模型, 建立气象因子与冠层导度的关系, 模型如下:

$$g_c = k_1 + k_2 VPD + k_3 PAR + k_4 Ta \quad (7)$$

式中,  $VPD$ 、 $PAR$ 、 $Ta$  分别是空气水汽压亏缺、空气温度、太阳总辐射,  $k_1$ — $k_4$  是回归系数。

(2) Jarvis 模型

Jarvis 和 Stewart 提出的阶乘型气孔模型<sup>[2,19]</sup>由最大气孔导度与各环境因子响应组成, 其中叶水势通常用土壤含水率代替, 在充分灌溉条件下, 可以不考虑此项, 模型如下:

$$g_c = g_{cmax} f(VPD) f(PAR) f(Ta) \quad (8)$$

$$f(VPD) = \exp(-k_1 VPD)^{[9]} \quad (9)$$

$$f(PAR) = \frac{PAR}{k_2 + PAR}^{[21]} \quad (10)$$

$$f(Ta) = k_3 + k_4 Ta + k_5 Ta^2^{[22]} \quad (11)$$

其中,  $g_{cmax}$  为最大气孔导度,  $VPD$ 、 $PAR$ 、 $Ta$  意义同上, 并利用 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘法确定  $k_1$ — $k_5$  的最优参数。

由于低辐射强度基本在清晨和傍晚居多, 其太阳辐射、水汽压亏缺和蒸腾值都非常低, 在这种条件下计算冠层导度会带来较大的误差<sup>[23]</sup>, 同时雾、露水、雨滴等多会对叶表面湿度产生影响从而影响计算的精度<sup>[9]</sup>, 为了排除这些因素的影响, 本文剔除了  $PAR$  小于  $200 \text{ W/m}^2$  的数据和部分异常数据, 以提高模拟精度。

## 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( $MRE$ )分析计算值与实测值之间误差, 采用 SPASS15 进行方差检验。

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum (g_{c(measured)} - g_{c(estimated)})^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |g_{c(measured)} - g_{c(estimated)}| \quad (13)$$

$$MRE = \frac{\frac{1}{n} \sum |g_{c(measured)} - g_{c(estimated)}|}{g_{c(measured)}} \quad (14)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 樱桃液流受环境影响特征

为了了解较长一段时间内樱桃蒸腾动态变化规律,选取了2008年6月1—20日的观测数据,以树1、树2为研究对象,观测整树液流速率的动态变化(图1),以及同期的PAR和VPD动态变化,可以看出树1与树2变化趋势与PAR、VPD相一致,受到其影响非常大,在低PAR、VPD天气下液流速率也明显较小。由于是3年生小树,液流速率峰值较小,在20d内最大值为 $19.03\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,除阴雨天外,液流速率较平稳。

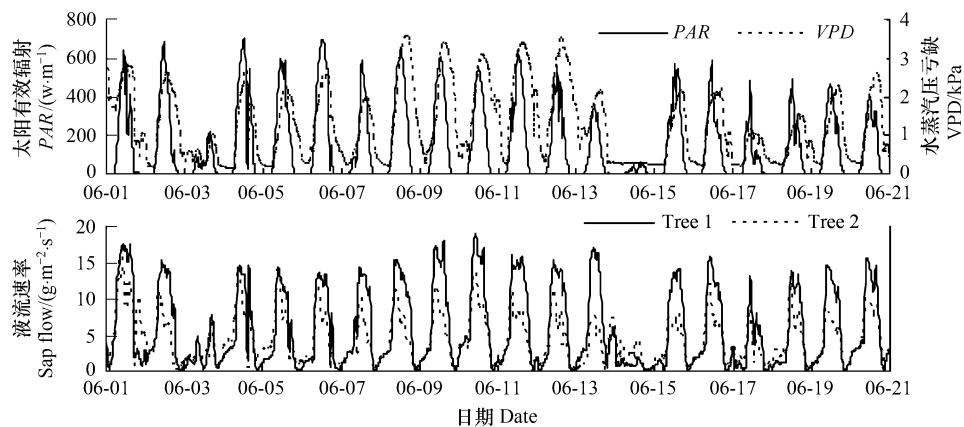


图1 液流速率、太阳辐射和水汽压亏缺日进程  
Fig. 1 Diurnal variation of sap flow density, PAR, VPD

作物受到水分胁迫后会影响水分传导从而抑制冠层导度与蒸腾速率,所以在液流测量期使土壤含水率控制在田持的80%以上,整个生育期土壤含水率变化从19%—26%之间(图2-a)。进一步对土壤含水率与液流进行相关分析,液流速率与土壤含水率相关性极低,样树在试验期间基本不受水分胁迫的影响。可见本试验蒸腾速率与冠层导度可以排除受土壤水分的影响,主要考虑气象环境因素<sup>[24]</sup>。

由于本文是采用实际液流速率反推冠层导度的方法,所以在计算前必须了解树干液流是否与冠层蒸腾存在时滞效应,通过冠层实际蒸腾量( $E_c$ )与PAR、VPD和潜在蒸腾量( $ET_0$ )的相关性分析(图2-b),寻求不同时滞时间( $\pm 3\text{h}$ )相关系数的变化规律,可以看出 $E_c$ 与PAR相关系数的最高值( $0.5\text{h}, r=0.85$ )与无时滞时( $0\text{h}, r=0.84$ )非常接近,这与马占相思树<sup>[25]</sup>存在较大的滞后效应有一定的区别, $E_c$ 与VPD相关系数的最高值在 $-1.5\text{h}(r=0.76)$ ,并且曲线呈快速下降趋势,比无时滞时( $0\text{h}, r=0.66$ )和时滞 $0.5\text{h}(r=0.58)$ 明显大,而 $E_c$ 与 $ET_0$ 的相关系数最高值与无时滞时一致( $0.5\text{h}, r=0.75$ ),也就是说樱桃实际蒸腾量与潜在蒸腾量不存在时滞效应,这是由于研究对象为3年生盆栽小树,树干直径较小导致植物体内组织在夜间补充和储存水分的量较小,从而水容较小,滞后效应不明显<sup>[9]</sup>,为了简化过程,本研究不考虑树干时滞效应的影响。

#### 3.2 冠层导度与气象因子相关性分析

太阳辐射是作物生长所需能量的主要来源,是提供液态水向气态水转化的主力军,所以太阳辐射的强度会直接影响植物气孔行为,试验期间日平均光合有效辐射为 $13.05\text{--}407.50\text{ W/m}^2$ ,日平均冠层导度为 $0.26\text{--}2.52\text{ mm/s}$ 。通过冠层导度与光合有效辐射的相关分析知(图3-a)太阳辐射增大总体上会导致樱桃冠层导度变大,特别是不同辐射条件下冠层导度的最低值明显是随着辐射强度变大而变大,最高值出现在 $400\text{--}600\text{ W/m}^2$ 之间,同时可以看到当太阳辐射升到 $300\text{ W/m}^2$ 后,太阳辐射对冠层导度的影响明显降低,进

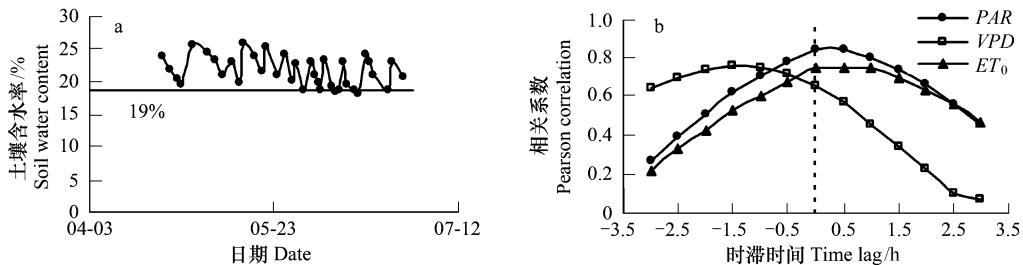


图 2 树 1 土壤含水率随时间的变化及液流对气象因子的时滞变化

Fig. 2 variation of moisture content with time and time lag of sap flow behind the PAR, VPD, ET<sub>0</sub> for tree1

一步提高太阳辐射后,并没有明显提高樱桃平均冠层导度,即达到光饱和点<sup>[9-10,26]</sup>。而冠层导度与辐射的  $R^2$  比较低,说明影响气孔的因素较多,辐射在一定程度上影响气孔开度,但并不起决定作用。空气温度对樱桃冠层导度也有一定的影响(图 3-b),当温度达到 20—30℃ 时,樱桃冠层导度较大,增加温度或降低温度会较明显的导致冠层导度下降。

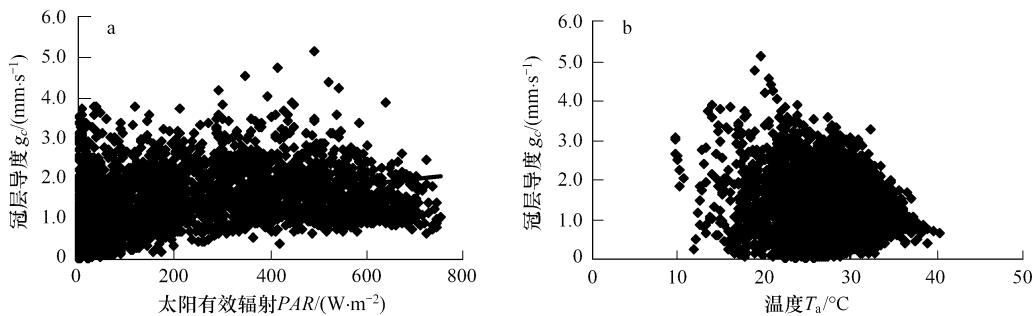


图 3 树 1 冠层导度与光合有效辐射、温度相关性分析

Fig. 3 Relationship between the  $g_c$  and PAR,  $T_a$

总体上冠层导度随水汽压亏缺呈下降趋势(图 4),在不同辐射强度下变化趋势相似,高辐射强度下  $R^2$  较高,在低辐射强度下( $<200\text{W/m}^2$ ),冠层导度与水汽压亏缺相关性很低( $R^2 = 0.1262$ ),这也验证了低辐射强度下会给计算冠层导度会带来较大的相对误差<sup>[7]</sup>。而光合有效辐射在 200—400  $\text{W/m}^2$  范围时,在低水汽压亏缺时冠层导度波动较大,可能在这个辐射条件下仍然存在温湿度较低情况,比如雨天或多雾天气,从而影响气孔波动。

### 3.3 冠层导度模型参数率定

冠层导度利用液流系统实测蒸腾值通过反求 PM 公式求得,由于滞后效应不明显未进行时间偏移处理,并排除早上、下午低辐射和明显偏离数据后,利用前 1/2 数据对不同辐射强度范围的不同冠层导度模型进行参数率定,多元回归模型利用半小时气象数据(VPD、 $T_a$ 、PAR)预测冠层导度见表 1,从低、中、高 3 个辐射强度的方程回归显示,3 个变量(VPD、 $T_a$ 、PAR)解释了冠层导度依次为 68.2%、74.3%、72.6% 的变化, RMSE 依次 0.642、0.642、0.616。去除空气温度后, $R^2$  与 RMSE 几乎没有变化,这可能是由于 VPD 是通过  $T_a$  与 RH 计算得到,其本身与  $T_a$  存在密切相关性,相似的结论在亚马孙蔬菜中也有报道<sup>[20]</sup>,进一步去除辐射的影响后误差有明显的变大趋势。高、中、低辐射条件下都有类似的结论,高、中辐射条件冠层导度变异性相对较小,低辐射条件下变异性相对较大。

Javis 模型经过参数优化后,可以看出在各辐射强度、各组合模式下都比多元回归模型误差小,决定系数高的特点。从全辐射数据分析结果来看,从低、中、高 3 个辐射强度的方程参数优化显示,3 个变量(VPD、 $T_a$ 、PAR)解释了冠层导度依次为 70.2%、80.7%、87.8% 的变化, RMSE 依次为 0.601, 0.302, 0.173。而排除温度后, $R^2$  与 RMSE 变化较小,如果只考虑 VPD 的影响,绝对误差则变大,但是还是呈极显著相关,可见影响冠层

导度的影响程度为:  $VPD > PAR > Ta$ 。与半湿润热点的柑桔有相似的结论<sup>[9]</sup>,排除温度影响后的 Jarvis 模型具有最好的模拟效果。

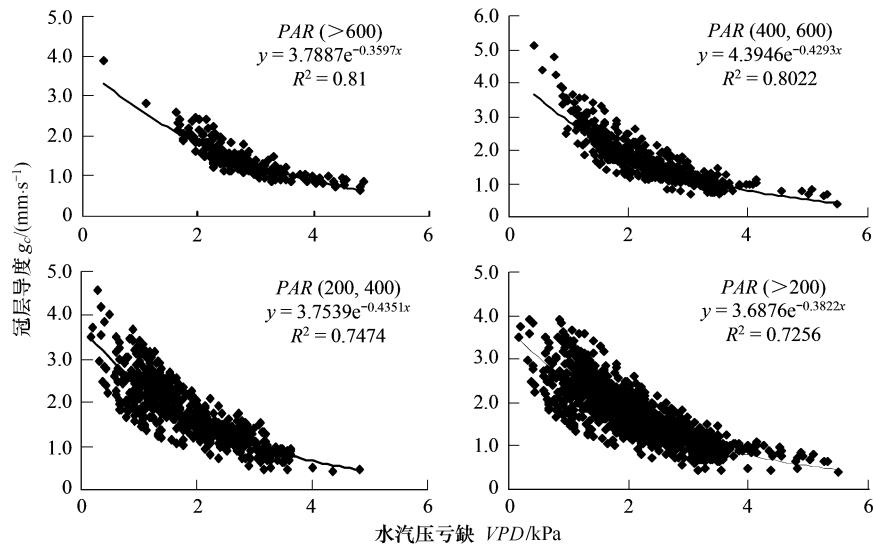


图4 不同辐射强度条件下树1冠层导度与水汽压亏缺的关系

Fig. 4 Relationship between tree1's  $g_c$  and VPD in different radiant intensity

表1 不同辐射条件基于气象因子预测树1冠层导度的最优多元回归和 Jarvis 模型

Table 1 Optimal multiple regression and Jarvis model of tree1's  $g_c$  based on meteorological factors in different radiant

|                     | $R^2$  | 低 $PAR(200,400)$ |          |          | 中 $PAR(400,600)$ |          |          | 高 $PAR(>600)$ |          |          |
|---------------------|--------|------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|---------------|----------|----------|
|                     |        | I                | II       | III      | I                | II       | III      | I             | II       | III      |
| 多元回归                | $R^2$  | 0.682 **         | 0.677 ** | 0.661 ** | 0.743 **         | 0.741 ** | 0.740 ** | 0.726 **      | 0.726 ** | 0.724 ** |
| Multiple regression | $RMSE$ | 0.642            | 0.642    | 0.616    | 0.349            | 0.348    | 0.352    | 0.238         | 0.240    | 0.243    |
|                     | $MAE$  | 0.329            | 0.327    | 0.322    | 0.268            | 0.267    | 0.267    | 0.166         | 0.167    | 0.179    |
| Jarvis 模型           | $R^2$  | 0.702 **         | 0.69 **  | 0.67 **  | 0.807 **         | 0.798 ** | 0.798 ** | 0.878 **      | 0.860 ** | 0.858 ** |
|                     | $RMSE$ | 0.601            | 0.605    | 0.632    | 0.302            | 0.306    | 0.306    | 0.173         | 0.173    | 0.176    |
| Jarvis model        | $MAE$  | 0.294            | 0.33     | 0.313    | 0.223            | 0.232    | 0.232    | 0.14          | 0.135    | 0.137    |

I :模型包括  $VPD, PAR, T_a$ ; II :模型包括  $VPD, PAR$ ; III :模型只考虑  $VPD$ ; \* \*  $P < 0.001$

为了进行一步验证模型的可靠性,采用十字交叉法验证模型<sup>[10,27]</sup>,这种方法需要时间的连续性,是一种比数据随机分组更加严格的模型验证方法<sup>[19]</sup>。把数据分成2组,A组(4月13—6月28)共709个数据,B组(6月29—8月20)共710个数据,用A组数据进行参数率定,B组进行验证简称A组数据,同时用B组进行参数率定,用A组进行验证简称B组数据,即将模型预测的冠层导度与由液流系统实测数据利用PM反求的冠层导度值进行比较来检验模型。

从表1知II类模型(仅考虑  $VPD, PAR$ )  $R^2$ 、 $RMSE$  与 I 类模型相近甚至精度更高,又明显高于III类模型,所以选择II类模型作为十字交叉法的对象,表2是A组、B组和所有数据采用模型II的多元回归和Jarvis进行参数率定的结果,同不同辐射强度下有相同的结论,Jarvis模型  $R^2$ 要明显大于多元回归模型, $MAE$  小于多元回归模型,可见 Jarvis 模型优于多元回归模型。对于 Jarvis 模型  $k_2$  的标准差相对较大,说明模型对  $VPD$  更敏感,这是由于冠层导度与水蒸汽压存在极强烈相关性所导致,在柑桔研究中也有类似的结论<sup>[28]</sup>。但总体而言,不管是多元回归还是 Jarvis 模型都能比较好的预测樱桃冠层导度。

### 3.4 冠层导度模型的验证

采用十字交叉验证法验证模型后(表3),可以看到多元回归与Jarvis模型决定系数均达到0.7以上相对

表 2 树 1、树 2 II 类模型参数率定

Table 2 The II typal model parameter calibration for tree1 and tree2

|           |       |     | 多元回归 Multiple regression |       |       |        |       | Javis 模型 Javis model |         |            |       |
|-----------|-------|-----|--------------------------|-------|-------|--------|-------|----------------------|---------|------------|-------|
|           |       |     | $R^2$                    | RMSE  | $k_1$ | $k_2$  | $k_3$ | $R^2$                | RMSE    | $g_{\max}$ |       |
| 树 1 Tree1 | A 组数据 | 值   | 0.696 **                 | 0.371 | 2.892 | -0.739 | 0.001 | 0.732 **             | 0.0.346 | 6.047      | 0.458 |
|           |       | 标准差 |                          |       | 0.051 | 0.019  | 0.000 |                      |         | 0.279      | 0.011 |
|           | B 组数据 | 值   | 0.757 **                 | 0.303 | 2.761 | -0.637 | 0.001 | 0.817 **             | 0.259   | 5.974      | 0.435 |
|           |       | 标准差 |                          |       | 0.04  | 0.014  | 0.000 |                      |         | 0.228      | 0.009 |
| 树 2 Tree2 | 所有数据  | 值   | 0.714 **                 | 0.344 | 2.803 | -0.679 | 0.001 | 0.765 **             | 0.355   | 5.977      | 0.444 |
|           |       | 标准差 |                          |       | 0.033 | 0.012  | 0.000 |                      |         | 0.182      | 0.007 |
|           | A 组数据 | 值   | 0.711 **                 | 0.464 | 2.957 | -0.825 | 0.001 | 0.771 **             | 0.377   | 6.707      | 0.634 |
|           |       | 标准差 |                          |       | 0.064 | 0.024  | 0.000 |                      |         | 0.412      | 0.017 |
|           | B 组数据 | 值   | 0.709 **                 | 0.395 | 2.866 | -0.791 | 0.001 | 0.806 **             | 0.304   | 7.497      | 0.655 |
|           |       | 标准差 |                          |       | 0.057 | 0.023  | 0.000 |                      |         | 0.456      | 0.016 |
|           | 所有数据  | 值   | 0.710 **                 | 0.431 | 2.909 | -0.806 | 0.001 | 0.783 **             | 0.346   | 6.827      | 0.633 |
|           |       | 标准差 |                          |       | 0.043 | 0.016  | 0.000 |                      |         | 0.291      | 0.011 |

\*\*  $P < 0.01$ 

误差在 30% 以内, 模拟效果较好, 同时可以看出两组数据 Javis 模型决定系数要高于多元回归模型, 误差明显小于多元回归模型, 相对误差全部在 20% 以内, 最小为 12.12%。而图 5 更明显看出模型模拟值与实测值的相关性, 多元回归模型模拟值与实测值呈指数增长关系, 由于是曲线型图形, 所以冠层导度较低和较高在 1:1 线两侧分布存在明显的不均匀, 从而导致误差较大, 而 Javis 模型模拟值与实测值有较好的线性关系, 在 1:1 线两侧分布较平均。可见 Javis 模型模拟冠层导度比多元回归模型更能真实反映樱桃气孔的行为。

表 3 树 1、树 2 II 类冠层气孔模型误差分析

Table 3 The error analysis of II typal  $g_c$  for tree1 and tree2

|           |       | 多元回归 Multiple regression |       |       |        | Javis 模型 Javis model |       |       |        |
|-----------|-------|--------------------------|-------|-------|--------|----------------------|-------|-------|--------|
|           |       | $R^2$                    | RMSE  | MAE   | MRE    | $R^2$                | RMSE  | MAE   | MRE    |
| 树 1 Tree1 | A 组数据 | 0.7567 **                | 0.316 | 0.234 | 16.33% | 0.8179 **            | 0.271 | 0.201 | 12.12% |
|           |       | 0.7035 **                | 0.397 | 0.316 | 20.95% | 0.7324 **            | 0.355 | 0.272 | 17.35% |
| 树 2 Tree2 | A 组数据 | 0.7067 **                | 0.399 | 0.330 | 27.16% | 0.8051 **            | 0.316 | 0.222 | 15.62% |
|           |       | 0.7043 **                | 0.459 | 0.371 | 28.11% | 0.7709 **            | 0.392 | 0.299 | 19.69% |

\*\*  $P < 0.01$ 

#### 4 结论

试验结果显示: 盆栽樱桃冠层蒸腾有较强的规律性, 时滞效应并不明显,  $E_c$  与  $ET_0$  的相关系数的最高值是  $r = 0.75$ , 同时出现在无时滞时与滞后 0.5 h,  $E_c$  与 PAR 的相关系数最高值出现在滞后 0.5 h,  $r = 0.85$ , 与无时滞时的值  $r = 0.84$  非常接近。

樱桃冠层导度与气象因子存在很强的相关性, 在不同辐射强度下, 冠层导度与水汽压亏缺呈显著的负指数函数关系, 特别是在光合有效辐射大到  $200 \text{ W/m}^2$  时更显著, 但是到  $300 \text{ W/m}^2$ , 基本处于光饱和点, 再增加辐射并不会明显增大冠层导度, 而温度在 20—30℃ 时, 樱桃冠层导度较大, 增加温度或降低温度会较明显的降低冠层导度。

针对不同辐射强度条件下多元回归模型与 Javis 模型的参数率定后, 对数据的相关分析, 发现高辐射强度下两种模型的  $R^2$  均大于低辐射强度, 并且总体上 Javis 模型  $R^2$ 、RMSE、MAE 均优于多元回归模型, 对樱桃而言 II 型 Javis 模型(仅考虑 VPD、PAR)的精度最高。并采用十字交叉法采用多元回归模型与 II 型 Javis 模型对树 1、树 2 冠层导度进行数值模拟, 多元回归模型 1:1 线两侧分布存在明显的不均匀, 呈半抛物线状。Javis 模型 1:1 线两侧分布均匀, 呈直线状, 明显优于多元回归模型, 最小误差为  $MRE = 12.12\%$ ,  $R^2 = 0.8179$ 。

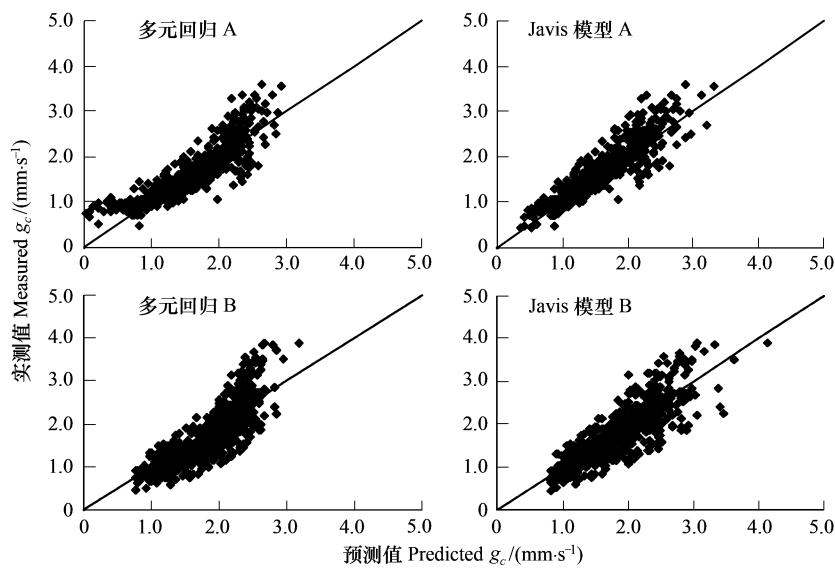


图 5 树 1 II 类冠层导度模型模拟值与实测值相关性分析

Fig. 5 Relationship between simulated and measured value of the II typal  $g_c$  for tree1**References:**

- [ 1 ] He K N, Tian Y, Zhang G C. Modeling of the daily transpiration variation in locust forest by Penman-Monteith equation. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2):251-258.
- [ 2 ] Jarvis P G. The interpretation of the variations in water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transpirations of the Royal Society of London B*, 1976, 273: 596-610.
- [ 3 ] Ball J T, Woodrow I E, Berry J A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions// Biggins M, ed. *Progress in Photosyn thesis Research*. Netherlands: Nijhoff Publishers, 1987: 221-224.
- [ 4 ] Wang Y H, He X Y, Zhou C S. Characteristics and quantitative simulation of stomatal conductance of *Aneurolepidium Chinese*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(4):517-521.
- [ 5 ] Steve G, Keith M, Wünsche J N, Clothier B. Modeling light interception and transpiration of apple tree canopies. *American Society of Agronomy*, 2003, 95:1380-1387.
- [ 6 ] Alves I, Perrier A, Pereira L S. Aerodynamic and surface resistances of complete cover crops: how good is the ‘big leaf’?. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41:345-351.
- [ 7 ] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78, 19-29.
- [ 8 ] Ambouze W, Bertuzzi P, Voltz. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a rowcropped vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91, 193-208.
- [ 9 ] Philip G O, Nick G, Hubert H G. Measurement and modeling of transpiration of a rain-fed citrus orchard under subhumid tropical conditions, *Agricultural Water Management*, 2007, 87, 200-208.
- [ 10 ] Xu W T, Zhao P, Wang Q, Rao X Q, Cai X A, Zeng X P. Calculation and modeling of the canopy stomatal conductance of *Acaciamangium* from sap flow data. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10):4122-4130.
- [ 11 ] Xia Y Q, Shao M A. The sap flow dynamics of *Caragana korshinskii* and the influence of environment factors in semi-arid region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4):1336-1382.
- [ 12 ] Irmak S, Mutiibwa D, Irmak A, Arkebauer T J, Weiss A, Martin D L, Eisenhauer D E. On the scaling up leaf stomatal resistance to canopy resistance using photosynthetic photon flux density. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148, 1034-1044.
- [ 13 ] Granier A, Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurement. *Tree Physiology*, 1987, 3, 309-320.
- [ 14 ] Monteith J L, Unsworth M H. *Principles of Environmental Physics*. Arnold, New York, 1990.
- [ 15 ] Gianfranco R, Nader K, Francesca d L. Measurement and modeling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean

- conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 128: 199-209.
- [16] Pereira A R, Green S, Nova N A. Penman-Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. Agricultural Water Management, 2006 (83): 153-161.
- [17] Rana G, Katerji N, Lorenzi F. Measurement and modeling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 128, 199-209.
- [18] Campbell G S, Norman J M. An Introduction to Environmental Biophysics. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998: 40-45.
- [19] Stewart J B. Modeling surface conductance of pine forest. Agriculture and Forest Meteorology, 1988, 43: 19-35.
- [20] Sommer R, Abreu T D, Vielhauer K. Transpiration and canopy conductance of secondary vegetation in the eastern Amazon. Agricultural and Forestry Meteorology, 2002, 112, 103-121.
- [21] Hofstra G, Hesketh J D. The effect of temperature on stomatal aperture in different species. Canadian Journal of Botany, 1969, 47: 1307-1310.
- [22] Joon K, Shashi B V. Modeling canopy stomatal conductance in a temperate grassland ecosystem. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 55: 149-166.
- [23] Granier A, Loustau D, Br da N. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate soil water availability and leaf area index. Annual Forest Science, 2000, 57: 755-765.
- [24] Bauerle W L, Post C J, McLeod M F, Dudley J B, Toler J E. Measurement and modeling of the transpiration of a temperate red maple container nursery. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 114, 45-57.
- [25] Zhao P, Rao X Q, Ma L, Cai X A, Zeng X P. The variations of sap flux density and whole-tree transpiration across individuals of *Acacia mangium*. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4050-4058.
- [26] Oguntunde P G, van de Giesen N. Water flux measurement and prediction in young cashew trees using sap flow data. Hydrol processes, 2005, 19, 3235-3248.
- [27] Lu P, Yunusa I A M, Walker R R, Muller W J. Regulation of canopy conductance and transpiration and their modelling in irrigated grapevines. Function Plant Biology, 2003, 30: 689-698.
- [28] Habermann G, Machado E C, Rodrigues J D, Medina C L. Gas exchange rates at different vapor pressure deficits and water relations of sweet orange plants with citrus variegated chlorosis. Scientia Horticulturae, 2003, 98(3): 233-245.

#### 参考文献:

- [1] 贺康宁,田阳,张光灿.刺槐日蒸腾过程的Penman-Monteith方程模拟.生态学报,2003,23(2):251-258.
- [4] 王玉辉,何兴元,周广胜.羊草叶片气孔导度特征及数值模拟.应用生态学报,2001,12(4):517-521.
- [10] 许文滔,赵平,王权,饶兴权,蔡锡安,曾小平.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.生态学报,2007,27(10):4122-4130.
- [11] 夏永秋,邵明安.黄土高原半干旱取柠条(*Caragana korshinskii*)树干液流动态及其影响因子.生态学报,2008,28(4):1336-1382.
- [25] 赵平,饶兴权,马玲,蔡锡安,曾小平.马占相思(*Acacia mangium*)树干液流密度和整树蒸腾的个体差异,生态学报,2006,26(12):4050-4058.