

DOI: 10.5846/stxb201503190523

朱绪超,袁国富,邵明安,杜涛.塔里木河下游河岸柽柳林冠层导度变化特征及模拟.生态学报,2016,36(17): - .  
Zhu X C, Yuan G F, Shao M A, Du T. Variation and predictive simulation of canopy conductance of a *Tamarix* spp. stand in the lower Tarim River basin. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): - .

## 塔里木河下游河岸柽柳林冠层导度变化特征及模拟

朱绪超<sup>1,2,\*</sup>, 袁国富<sup>1</sup>, 邵明安<sup>1,3</sup>, 杜涛<sup>1,2</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 西北农林科技大学, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

**摘要:**冠层导度( $G_c$ )对植被的蒸腾和光合作用具有重要影响。利用涡度相关仪器实测了塔里木河下游河岸柽柳林地的蒸散发,以及气象因子(温度、湿度、总辐射、光和有效辐射),并利用 Penman-Monteith 公式计算了柽柳林在 2013 年生长季的冠层导度。结果显示:柽柳林冠层导度日变化过程总体显示,在早晨 8:00 左右迅速增大,于 10:30 左右达到最大值,之后缓慢下降,18:00 左右快速降低;柽柳林冠层导度季节变化过程总体显示,展叶期缓慢上升,落叶期迅速下降,生长盛期缓慢波动下降;研究区,叶面积指数(LAI)是影响柽柳冠层导度季节变化的主要因素,其次为温度( $T$ )、光合有效辐射(PAR)、总辐射( $S$ )、空气饱和差(VPD);多元线性回归方程可以较好地拟合冠层导度与各因子的关系,利用 2013 年奇数天数据建立回归方程,对偶数天冠层导度值进行模拟和验证, RMSE 值为  $0.169 \text{ mm s}^{-1}$ , NSE 值为 0.814, 达到了较高的模拟精度。

**关键词:**冠层导度;时间变化;回归模型;柽柳;塔里木河下游

## Variation and predictive simulation of canopy conductance of a *Tamarix* spp. stand in the lower Tarim River basin

ZHU Xuchao<sup>1,2,\*</sup>, YUAN Guofu<sup>1</sup>, SHAO Ming'an<sup>1,3</sup>, DU Tao<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

**Abstract:** Canopy conductance ( $G_c$ ) has a crucial influence on vegetation transpiration and photosynthesis. In this study, we measured the evapotranspiration ( $ET$ ) of a *Tamarix* spp. stand in the 2013 growing season in the lower Tarim River basin using the eddy covariance technology. Meteorological variables including temperature ( $T$ ), vapor pressure deficit (VPD), solar radiation ( $S$ ), and photosynthetically active radiation (PAR) were also measured. We calculated  $G_c$  using the inverted Penman-Monteith equation and analyzed its daily and seasonal variation. The relationships between  $G_c$  and leaf area index (LAI),  $T$ , PAR and VPD were assessed through monadic and multivariate regression analysis. We used data from odd days of the year (DOY) to build a predictive model and used data for even DOY to evaluate it. The results showed that: (1)  $G_c$  of the *Tamarix* spp. stand had a similar variation pattern during the greening-up period (GP), maturity period (MP), and senescence period (SP).  $G_c$  increased rapidly in the morning, reached a maximum at 10:30 am, and decreased gradually until 6:00 pm at which point there was a sharp decrease; (2) the seasonal variation of  $G_c$  was significant.  $G_c$  increased rapidly, decreased slowly, and decreased rapidly with mean values of 0.56 in GAE, 1.27 in VGS

基金项目:国家自然科学基金(41271050);国家重大科学研究计划(2010CB951002)

收稿日期:2015-03-19; 网络出版日期:2015-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuxc.14b@igsrr.ac.cn

and 0.59 in LSP, respectively; (3) LAI was the main driver of  $G_c$ , the determinative coefficient was 0.746 in the monadic regression analysis and the partial correlation coefficient reached 0.715, followed by  $T$ ,  $PAR$ , and  $VPD$ . Multivariate regression analysis that included all the variables had a determinative coefficient ( $R^2$ ) of 0.79; and finally, (4) the prediction model from odd DOY had a multiple correlation coefficient of 0.885 with a P value less than 0.01. The model test performed using predicted and calculated  $G_c$  over even DOY resulted in a  $R^2$  of 0.790, a root mean square error (RMSE) of  $0.169 \text{ mm s}^{-1}$ , and the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) of 0.814, indicating that the model had a relatively high accuracy.

**Key Words:** canopy conductance; temporal variation; regression model; Tamarisk; lower Tarim River basin

冠层导度是描述植被对地表水、碳交换控制作用的一个关键变量,是影响植被蒸腾和光合作用的重要因素,直接影响着陆地和大气间的碳、水循环,决定着植被冠层和大气间的耦合作用<sup>[1]</sup>。

很多研究者对不同类型植被冠层导度进行过研究<sup>[2-6]</sup>。利用气孔计或者光合仪<sup>[7-8]</sup>等仪器可以直接测定单叶气孔导度,再通过尺度提升方法转换到冠层尺度,然而气孔到冠层的尺度提升上存在一定误差,且不能实现长期的连续观测,在研究中会受到一定的限制。对冠层导度的确定大部分使用间接方法,包括模型模拟法<sup>[4-5]</sup>、茎流计法<sup>[9-11]</sup>和涡度相关法<sup>[12-14]</sup>等,通过模拟或直接观测冠层植被蒸腾量,然后利用 Penman-Monteith 公式反求出植被冠层导度。其中涡度相关法因数据量全面、连续而被广泛使用,但这个方法只有当土壤蒸发占总蒸散的比例较小时才能得到较合理的结果。

柽柳是我国西北干旱区荒漠植被和荒漠河岸林植被的主要建群种,在塔里木河下游河岸林生态系统中具有重要的地位和作用。目前国内外学者对柽柳水热交换研究较多<sup>[15-16]</sup>,而对影响柽柳水热交换的重要因子,冠层导度的研究相对较少,研究柽柳的冠层导度对于极端干旱区植被-大气间的碳水循环以及耦合作用具有重要的意义。在极端干旱气候下,土壤蒸发微弱,由涡度相关数据测量得到的地表蒸散主要代表了植物蒸腾的贡献<sup>[15,17]</sup>,因此为涡度相关数据分析干旱区荒漠植被冠层导度提供了基础。

研究以塔里木河下游河岸柽柳林为研究对象,利用涡度相关方法和微气象技术实测了柽柳样地的蒸散发和气象因子,计算柽柳的冠层导度,描述并分析柽柳冠层导度的日、季变化特征及影响因素,建立多元回归模拟方程并用实测数据验证结果,来定量分析影响柽柳林冠层导度季节变化的因素,为干旱区荒漠植被冠层导度的研究提供参照和对比。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区塔里木河下游大西海子水库到台特玛湖之间的一段范围(图 1)。本区深居亚欧大陆内部,距离海洋较远,属于暖温带大陆性极端干旱气候,气候干旱降雨稀少。1957—2012 年年均降雨量仅为 33.7 mm,其中降雨最少的是 2001 年的 3.4 mm,最多的是 1974 年的 75.7 mm,一年中降雨主要发生在 6、7、8 三个月份,占年降雨量的 67.8%(铁干里

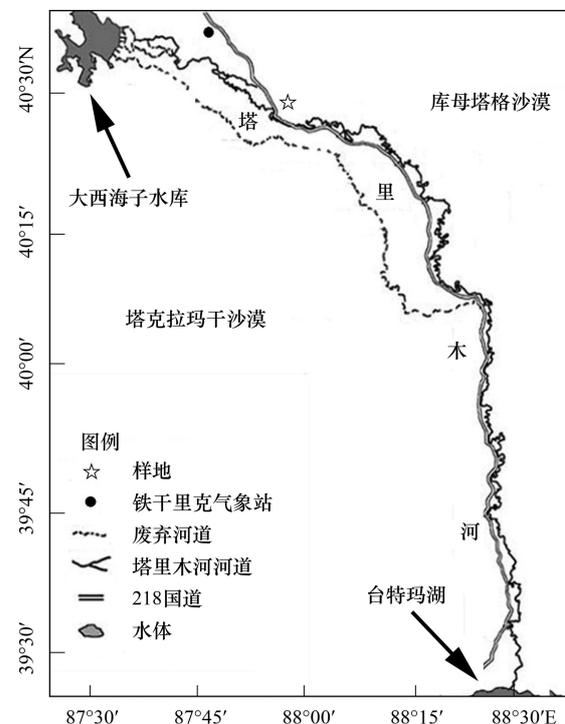


图 1 研究区和研究样地位置图

Fig.1 Location of study region and observation site

克气象站)。研究区气温年较差大,最冷月平均气温出现在 1 月份,为 $-9.3^{\circ}\text{C}$ ,最热月平均气温出现在 7 月,为 $27.0^{\circ}\text{C}$ ,年均温度为 $12.3^{\circ}\text{C}$ (2013 年实测)。由于特殊的地理和气候环境,研究区具有着很大的参考蒸散量<sup>[18]</sup>,2013 年参考蒸散发量为 $1076.2\text{ mm}$ ,是当年降雨量的 25 倍。所选择的柽柳样地位于 218 国道 924 km 处(图 1),总面积大约 $200\text{ m}\times 300\text{ m}$ ,通过对仪器所在的样方( $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ )植被调查可知,其中绝大多数植被为柽柳类(179 株),平均株高为 2 m 左右,包括多枝柽柳、刚毛柽柳、细蕙柽柳等,其次还有少量铃铛刺等灌木植被和骆驼刺、芦苇、甘草等草本植物,辛普森指数为 0.81,样地植被盖度约为 65.5%,叶面积指数为 1.15,地下水水位 4.8 m,主要土壤类型为沙壤土。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 地表蒸散的测量与植物蒸腾的确定

利用涡度相关技术来测定样地潜热通量(LE, latent heat flux)。涡度相关系统由三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific, Utah, USA)和红外气体分析仪(EC150, Campbell Scientific, Utah, USA)两部分组成,分别架设在冠层上方 1.8 m 处,用以测量风速以及水汽和 $\text{CO}_2$ 的浓度。同时,使用 CR3000 数据采集器(Campbell Scientific, Utah, USA)来进行收集原始数据、数据预处理等工作。仪器工作频率为 10 Hz,数据每 30 min 记录一次。在利用数据进行计算前,对原始数据进行了插补、校正、能量闭合等处理,详细的数据处理过程参考文献[15]中的描述。

根据观测,样地地表蒸散主要有植物蒸腾构成,土壤蒸发占总蒸散的比例微弱<sup>[15]</sup>,因此可以直接用涡度相关观测获得的潜热通量值来计算植被冠层导度。

### 1.2.2 气象因子观测

在涡度塔上还安装仪器进行了一些辅助性观测。在冠层上方 1.5 m 高处,安装一套辐射四分量仪(Kipp & Zonen, Delft, Netherlands)用来测量上、下两个方向的长波和短波辐射以及计算净辐射( $R_n$ )和总辐射( $S$ );在同一根杆上安装光合有效辐射传感器(190, Li-cor, Nebraska, USA)用来测量光合有效辐射(PAR);另外,在冠层上方的百叶箱内安放一个空气温湿度探头,用来测量大气的温度( $T$ )和湿度。气象因子的日值数据是将各因子半小时数据进行平均( $T$ 、饱和水汽压差(VPD))或者累加( $S$ 、PAR)获得。

### 1.2.3 $G_c$ 的计算

将 Penman-Monteith 的原始公式进行反向推导,即可得到冠层导度的表达式<sup>[5]</sup>:

$$G_c = \frac{\lambda ET \cdot \gamma}{\Delta \cdot r_a \cdot (R_n - G) + \rho \cdot c_p \cdot VPD - \lambda ET \cdot r_a \cdot (\Delta + \gamma)} \quad (1)$$

式中 $G_c$ 即为冠层导度( $\text{m s}^{-1}$ ), $\lambda ET$ 为植被蒸腾对应的潜热通量( $\text{w m}^{-2}$ ), $\gamma$ 为干湿表常数( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), $\Delta$ 为饱和水汽压随温度变化的斜率( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), $r_a$ 为空气动力学阻抗( $\text{s m}^{-1}$ ), $R_n$ 为净辐射( $\text{w m}^{-2}$ ), $G$ 为土壤热通量( $\text{w m}^{-2}$ ), $\rho$ 为干空气密度( $\text{kg m}^{-3}$ ), $c_p$ 为空气定压比热( $1013\text{ J kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), $VPD$ 为饱和水汽压差(kPa)。

公式(1)中的空气动力学阻抗 $r_a$ 采用如下公式计算<sup>[19]</sup>:

$$r_a = \frac{\ln[(z_m - d)/z_{om}] \ln[(z_h - d)/z_{oh}]}{k^2 u_z} \quad (2)$$

式中 $z_m$ 为风速测量高度(m), $d$ 为零平面位移(m), $z_{om}$ 为动量传输粗糙度长度(m), $z_h$ 为湿度测量高度(m), $z_{oh}$ 为水热传输粗糙度长度(m), $k$ 为 von Karman 常数(0.41), $u_z$ 为高度 $z$ 处的风速( $\text{m s}^{-1}$ )。

式(2)中的零平面位移 $d$ 和粗糙长度 $z_{om}$ 与冠层高度 $h$ 有关:

$$d = 2/3h \quad (3)$$

$$z_{om} = 0.123h \quad (4)$$

$$z_{oh} = 0.1z_{om} \quad (5)$$

将 $G_c$ 的半小时数据进行平均获得 $G_c$ 的日值数据。由于 $G_c$ 的数值较小且波动较大,我们统一将 $G_c$ 的单位换算为 $\text{mm s}^{-1}$ ,同时以 5 日滑动平均值来作为 $G_c$ 的值,并用作下文的分析、模拟和验证。由于降雨期间观测

的地表蒸散中包含了明显的土壤蒸发过程,不满足公式(1)要求的潜热通量应该代表植被蒸腾量的前提,因此在分析  $G_c$  时,我们剔除有降雨当日的  $G_c$  值,并用前后共 4d 的数据取平均代替。

#### 1.2.4 LAI 日值数据的获取

叶面积指数(LAI)是极端干旱区地表蒸散重要的控制因子<sup>[17]</sup>,也是影响  $G_c$  的重要参数,有必要来分析其与  $G_c$  的关系。采用通用的近似方法<sup>[20]</sup>,将 LAI 的变化分为 3 个阶段,在展叶期(包括萌动期和展叶期)从 0 逐日线性增加到最大值(LAI<sub>m</sub>),生长盛期(包括营养生长期、开花期和果熟期)叶面积指数保持 LAI<sub>m</sub> 值不变,落叶期(包括叶黄期与落叶期)叶面积指数从 LAI<sub>m</sub> 逐日线性降低为 0。只需知道柽柳物候期的起止日期和 LAI<sub>m</sub> 的值,就可以获取 LAI 的逐日数值。

2013 年 7 月在柽柳样地内测量的叶面积指数值可作为 LAI<sub>m</sub> 值,采用 LAI-2250 植物冠层分析仪(licor-Inc., USA)测得的 LAI<sub>m</sub> 值为 1.15,具体的样地测量方法参考文章[21]。根据前人研究成果<sup>[22-23]</sup>可知,研究区柽柳展叶期从 4 月 27 日到 6 月 3 日(38d),生长盛期从 6 月 4 日到 9 月 18 日(106d),落叶期从 9 月 18 日到 10 月 18 日(31d)。基于上述的 LAI 季节动态近似估算方法,可建立柽柳展叶期和落叶期 LAI 的计算公式:

$$LAI_D = \begin{cases} (D - 116) \cdot 1.15/38, & (116 \leq D \leq 154) \\ (291 - D) \cdot 1.15/31, & (261 \leq D \leq 291) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $D$  为儒略日天数, $LAI_D$  为第  $D$  天 LAI 的值。

## 2 结果

### 2.1 日变化特征

分别将 2013 年柽柳展叶期 5 月 6 日至 10 日、生长盛期 7 月 21 至 25 日和落叶期 10 月 1 日至 5 日连续 5 天的逐时冠层导度数据进行平均,来描述柽柳冠层导度的日变化特征(图 2)。结果显示,三个生长阶段柽柳冠层导度具有相似的变化模式:早晨 8:00 左右, $G_c$  迅速增大,10:30 左右达到最大值,之后开始缓慢下降,于 18:00 左右开始迅速下降(图 2 b & c)。

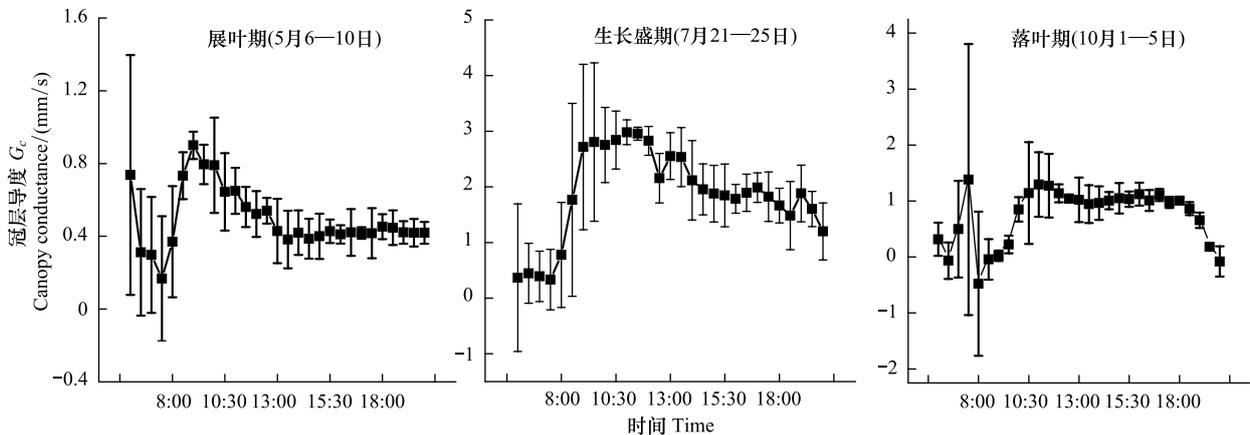


图 2 展叶期、生长盛期和落叶期柽柳林冠层导度日动态

Fig.2 Diurnal processes of hourly  $G_c$  in the greening-up period, the maturity period and the senescence period of the tamarisk

由图 2 可以看出,在柽柳展叶期、生长盛期和落叶期的 3 个阶段, $G_c$  具有大致相似的日变化模式,说明  $G_c$  在柽柳的整个生长季中的日变化模式较为稳定,但在不同的阶段  $G_c$  达到的峰值不同(图 2a、b & c),这除了与大气条件的变化有关外,还可能与植被自身在不同的生长阶段所具有的差异性有关。

### 2.2 季节变化特征

图 3 展示的是柽柳冠层导度在 2013 年整个生长季的变化特征。可以看出, $G_c$  的总体变化与日尺度变化形状相近,但却是由不同因素引起。展叶期, $G_c$  快速增大,此阶段  $G_c$  均值为 0.56;进入生长盛期即达到最高值

(1.90,6月14日),之后开始缓慢下降,此阶段  $G_c$  均值为 1.27;进入落叶期, $G_c$  开始快速下降,此阶段的均值为 0.59。

图 4 展示的是冠层导度与其各影响因子的关系。可以看出  $G_c$  与 LAI 的变化具有较为一致的同步性。而与温度( $T$ )、光和有效辐射(PAR)和总辐射( $S$ )在生长盛期和落叶期具有较好的趋势一致性,在展叶期趋势性较差。 $G_c$  与饱和水汽压差(VPD)仅在落叶期阶段趋势吻合较好,在展叶期和生长盛期均相对较差。主要原因可能是天气因素和植被的物候期所导致,进入 4 月份后各大气要素  $T$ 、PAR、 $S$ 、VPD 均已回升,已经处于较高的阶段,而此时柽柳才刚开始萌动展叶进入展叶期,柽柳物候期对气象因子响应的滞后性是引起在展叶期阶段  $G_c$  与各气象因子变动趋势不吻合的可能原因。

2.3 影响因素分析

基于对柽柳林样地的能量分配分析,以及地下水位对蒸散过程影响的分析,已经证实样地中柽柳的生长不受水分的胁迫,详见文章[15]。因此不考虑土壤水分对  $G_c$  的影响,选择剩下的其他可能影响因子 LAI、 $T$ 、PAR、 $S$  和 VPD,来分析  $G_c$  的影响因素。首先对这 5 个影响因素进行多重共线性诊断,结果显示变量 PAR 与  $S$  间存在高度的相关关系。为保证构建的模型的准确性,我们排除变量  $S$ ,保留对  $G_c$  影响相对较大的变量 PAR。将 LAI、 $T$ 、PAR 和 VPD 4 个影响因子以各种不同的组合方式与  $G_c$  做一元线性回归和多元线性回归分析,来分析各影响因素以及不同的组合对  $G_c$  影响的大小。为消除数据不同量级上的影响,采用 SPSS 20 软件中默认的  $z$ -score 标准化方法对各影响因素数据进行标准化处理,其他相关分析、统计检验等过程也均使用 SPSS 20 来完成。

各拟合方程均经过显著性检验,除一元回归中的 VPD 外( $P < 0.05$  水平上显著)都在  $P < 0.01$  水平上显著。由表 1 可以看出,在一元线性回归中模拟效果取决于各因素与  $G_c$  的相关性。LAI 与  $G_c$  相关性最好( $R^2 = 0.746$ ),其次依次为  $T$ 、PAR、VPD。多元线性回归中,将四个变量全用进拟合中时,效果最好( $R^2 = 0.790$ )。只考虑 3 个变量时, $T$ 、PAR、VPD 组合效果稍差( $R^2 = 0.571$ ),其他三个组合的决定系数  $R^2$  均大于 0.7,对比发现其他三个组合均考虑了 LAI 的影响,相关性最好的组合是 LAI、 $T$ 、VPD,判定系数  $R^2$  为 0.783。只考虑两个影响因素时,考虑 LAI 的组合的判定系数均大于 0.74,没考虑 LAI 的组合的判定系数则均低于 0.55,也侧面印证了 LAI 对  $G_c$  的重要影响,相关性最好的组合是 LAI、PAR,判定系数为 0.755。由表 1 可以看出,一元回归和多元回归分析中,相关系数最高的组合均含有 LAI,且随着其他变量的引入相关系数逐渐上升。

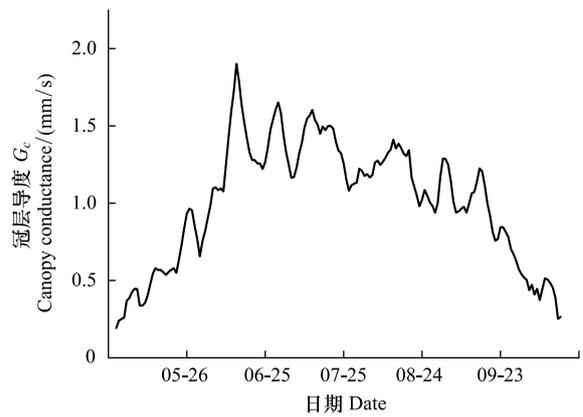


图 3 柽柳冠层导度的季节变化特征

Fig.3 Seasonal vibration characteristics of  $G_c$  of the tamarisk

表 1 不同影响因子组合下的线性回归方程和判定系数

Table 1 Linear regression equations and determinative coefficients

线性回归和多元线性回归方程 Linear regression equation	$R^2$
$G_c = 0.256VPD - 4.354 \times 10^{-8}$	0.065 *
$G_c = 0.425PAR - 8.819 \times 10^{-9}$	0.180 **
$G_c = 0.556T - 1.561 \times 10^{-7}$	0.310 **
$G_c = 0.863LAI + 1.658 \times 10^{-6}$	0.746 **
$G_c = 0.385PAR + 0.096VPD - 7.867 \times 10^{-9}$	0.188 **
$G_c = 1.450T - 1.017VPD - 3.723 \times 10^{-7}$	0.547 **
$G_c = 0.458T + 0.199PAR - 1.156 \times 10^{-7}$	0.340 **
$G_c = 0.875LAI - 0.035VPD + 1.679 \times 10^{-6}$	0.747 **
$G_c = 0.823LAI + 0.104PAR + 1.590 \times 10^{-6}$	0.755 **
$G_c = 0.824LAI + 0.067T + 1.567 \times 10^{-6}$	0.748 **
$G_c = 1.351T + 0.178PAR - 1.005VPD - 3.335 \times 10^{-7}$	0.571 **
$G_c = 0.838LAI + 0.130PAR - 0.077VPD + 1.619 \times 10^{-6}$	0.759 **
$G_c = 0.694LAI + 0.534T - 0.443VPD + 1.201 \times 10^{-6}$	0.783 **
$G_c = 0.809LAI + 0.029T + 0.095PAR + 1.557 \times 10^{-6}$	0.755 **
$G_c = 0.676LAI + 0.500T + 0.102PAR - 0.451VPD - 1.184 \times 10^{-6}$	0.790 **

$R^2$  为判定系数, \* \* 表示  $P < 0.01$

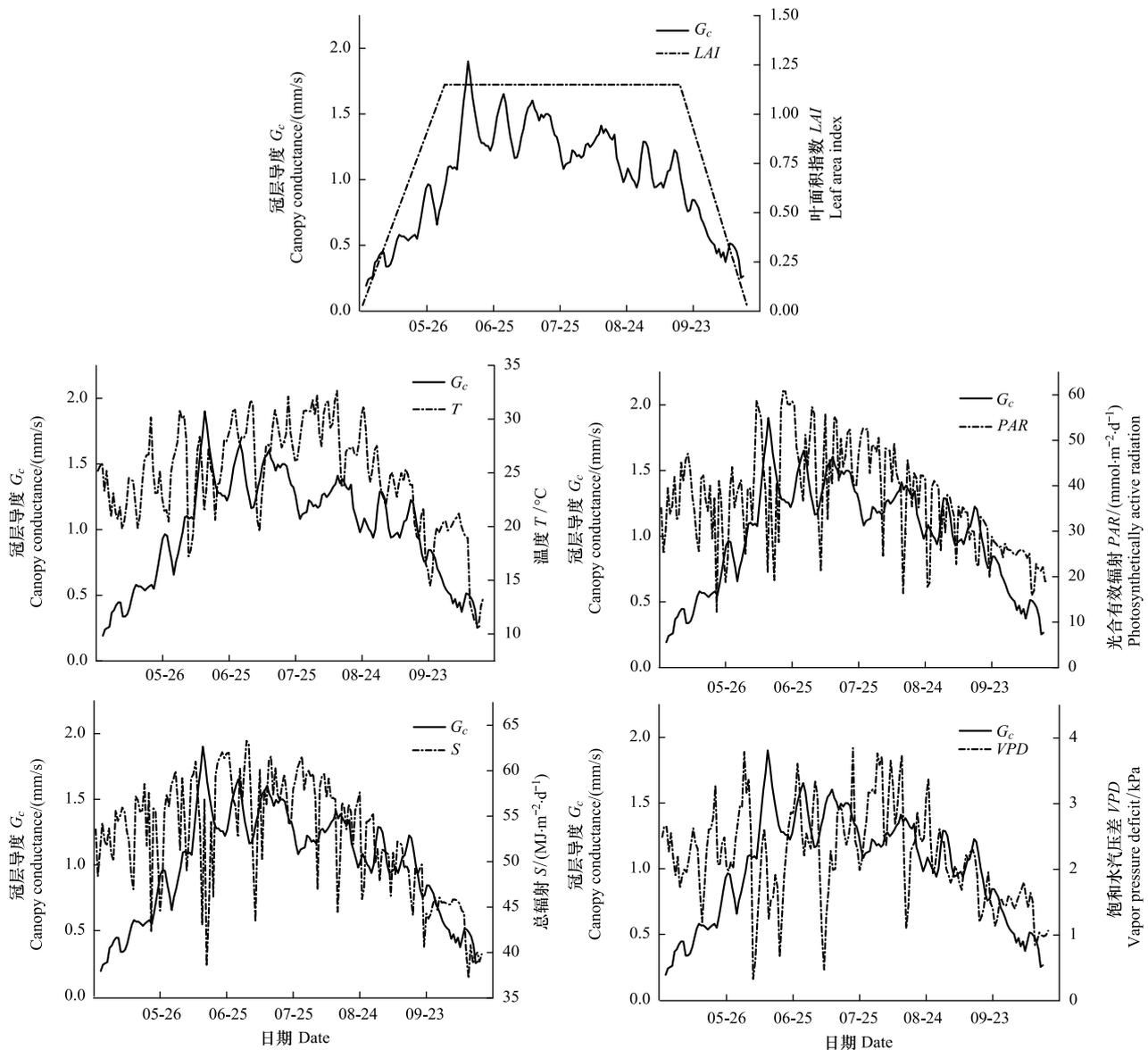


图4  $G_c$ 的季节变化特征及其与叶面积指数、温度、光和有效辐射、总辐射和饱和水汽压差间的关系

Fig.4 Distribution of  $G_c$  during the growing season: (a) relationship between  $G_c$  and LAI; (b) relationship between  $G_c$  and  $T$ ; (c) relationship between  $G_c$  and PAR; (d) relationship between  $G_c$  and  $S$ ; (e) relationship between  $G_c$  and VPD

## 2.4 $G_c$ 计算模型及验证

利用2013年生长季奇数天的数据进行四元线性回归,得到回归方程为:

$$G_c = 0.684LAI + 0.503T + 0.050PAR - 0.451VPD - 0.002, R^2 = 0.784 \quad (7)$$

从方程(7)可看出,4个影响因子前系数与表1中对所有数据进行四元线性回归的系数非常接近,判定系数也较高。计算 $G_c$ 与其影响因素的偏相关系数,可以发现 $G_c$ 与LAI、 $T$ 、PAR的偏相关系数,与其对应的相关系数非常接近,仅VPD稍有差别。对回归方程(7)做统计检验,得到复相关系数 $R=0.885$ , $P$ 值小于显著性水平0.01,说明利用此方程研究冠层导度与叶面积指数、温度、光合有效辐射和空气饱和差的关系是合适的。利用公式(7)来模拟生长季偶数天的 $G_c$ 值,并与计算值进行对比可知,模型模拟值与实测数据计算值吻合较好,尤其在展叶期和落叶期,甚至能较好地体现一些小的波动,生长盛期的模拟值 $G_c$ 值较为平稳,下降趋势较小,与计算值具有一些小的出入。将模拟值与计算值进行线性回归分析,可看到拟合线的斜率为0.738,与1:1线

较为接近,判定系数  $R^2$  为 0.790。选择均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和 Nash-Sutcliffe 模型效率系数<sup>[24]</sup> (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient, NSE) 来评价模拟效果。计算得到 RMSE 值为  $0.169 \text{ mm s}^{-1}$ , NSE 值为 0.814, 说明模拟值与计算值具有非常好的一致性, 模拟效果较好。

### 3 结论与讨论

研究区柽柳冠层导度日变化具有一定的规律: 在 8:00—10:30 时段  $G_c$  值迅速上升, 可能是因为经过一晚上的时间, 植物体内白天损失的水分已经获得补充, 并且气象因子温度、辐射等开始增大, 产生了植物进行光合作用的有利条件; 10:30 左右达到最大值 (展叶期 9:00 左右), 之后开始缓慢下降, 可能是因为正午温度高、辐射强, 柽柳为避免体内水分损失过快, 主动地关闭部分气孔所导致; 18:00 左右开始快速下降, 可能是因为经过了中午强烈的蒸腾作用, 植物体内水分大量减少, 同时随着太阳时角的增大, 温度、辐射等气象因子也逐渐降低所导致。这种变化规律与内蒙古额济纳旗达镇胡杨<sup>[7]</sup>、辽西农林复合系统中杨树<sup>[10]</sup> 以及与南亚热带丘陵山地中马占相思林<sup>[24]</sup> 的冠层导度具有非常相似的变化特征。但  $G_c$  峰值出现的时间均比三者晚, 比胡杨和杨树的晚一个半小时, 比马占相思林晚半个小时, 这可能与植物种自身的生理特征 (光合、呼吸作用等) 和外界环境有关, 还可能是由于各研究区间的经度差所引起。

研究区柽柳冠层导度具有明显的季节变化, 并随着大气因子和自身生理的改变呈现出一定的波动性。展叶期  $G_c$  值快速增大可能与植被 LAI 的增大和各气象因子, 如温度、辐射等的回升有关, 生长盛期  $G_c$  缓慢下降可能与植物自身生理机能 (如光合能力等) 的减弱有关, 落叶期  $G_c$  的快速下降主要与植被落叶有关, 也与各气象因子的降低和植被生理机能的减弱相关。柽柳冠层导度的季节变化模式与辽西农林符合系统中的杨树<sup>[10]</sup> 非常相似, 澳大利亚的樟子松  $G_c$  的季节变化<sup>[25]</sup> 则不具有生长盛期缓慢波动下降的特点, 泰国北部热带落叶森林<sup>[12]</sup> 的  $G_c$  在生长季呈现出缓慢上升, 达到最高值, 迅速下降的变化模式。

研究者对不同的植物种的冠层导度进行分析, 发现太阳辐射、饱和水汽压差和温度是影响冠层导度的主要因子<sup>[9-11]</sup>。对本研究而言, 影响最大的因子是叶面积指数, 其次是温度、光和有效辐射, 而太阳辐射和饱和水汽压差的影响相对较弱。说明对于简单下垫面和大气状况大致均一的研究区, 植被生长主要受到物候期的控制, 而物候期则是柽柳自身生理活动与气候条件长期相互影响相互反馈的结果。对于极端干旱的塔里木河下游地区而言, 叶面积指数是控制柽柳林水热交换的主要因子<sup>[15]</sup>, 因此柽柳冠层导度主要取决于叶面积指数也是合理的。在季节变化中, 冠层导度随着叶面积指数的增减展现出相应的增减变化; 在空间分布上, 研究区植被盖度变异性较大, 研究样地不具有典型性, 未来可根据研究区叶面积指数的空间分布数据, 将本研究结果在整个研究区进行推广。

冠层导度受到多因素的影响, 很多研究者根据影响因素的强弱建立了各种估算模型。最常见的是 Jarvis 模型和多元回归模型, 李仙岳等<sup>[2]</sup> 在对樱桃冠层导度进行模拟时建立了这两种模型, 并提出 Jarvis 模型精度高于多元回归模型。黄辉等<sup>[1]</sup> 以温度和光合有效辐射作为输入变量, 构建潜在气孔导度和相对气孔导度组合模型, 模拟华北平原冬小麦冠层导度, 利用模拟结果估算了冠层潜热通量, 并与实测潜热通量进行对比验证, 显示模拟结果具有较高精度。Hikaru Komatsu 等<sup>[9]</sup> 则研究了生长不受水分胁迫的竹子的冠层导度特征, 利用饱和水汽压差和太阳辐射两个要素构建模型, 取得了较好的模拟结果。本研究分析了影响柽柳冠层导度

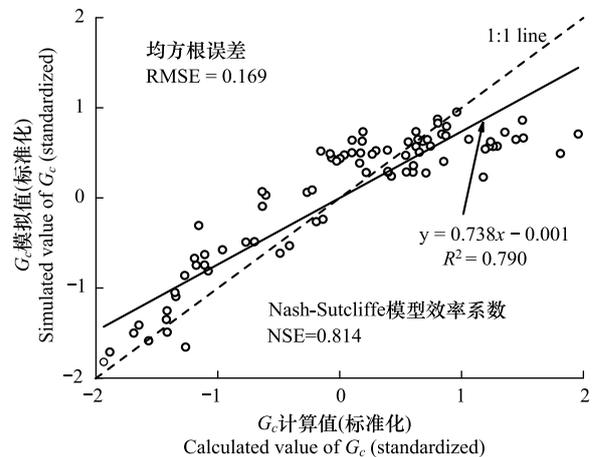


图 5  $G_c$  模拟值与计算值对比 (数据经过标准化处理)  
Fig.5 Comparison of simulated value and calculated value of  $G_c$  which was after processing of standardization

的四个影响因子,构建一元和多元线性回归模型,相关性最高的四元线性回归模型的决定系数可达到 0.790,模型精度较高。多元回归模型具有需要参数少、计算简单、使用方便等特点,在模拟怪柳林冠层导度的季节变化中取得了较好的模拟效果。

本文利用通量数据,计算并展示了极端干旱区塔里木河下游一处怪柳林地的冠层导度,描述了其时间(日、季节)变化特征,分析了影响冠层导度的主要因素,构建多元回归模型对其季节动态进行了模拟和验证,为干旱区荒漠植被冠层导度的研究提供参考。对于极端干旱的塔里木河下游地区,植被空间变异较大,通过寻找叶面积指数、植被盖度与冠层导度之间的关系,将冠层导度在研究区空间上进行推广研究将是一个有意义的研究方向。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 黄辉,于贵瑞,孙晓敏,王秋风,赵风华,李俊,欧阳竹.华北平原冬小麦冠层导度的环境响应及模拟.生态学报,2007,27(12): 5209-5221.
- [ 2 ] 李仙岳,杨培岭,任树梅,任亮.樱桃冠层导度特征及模拟.生态学报,2010,30(2): 300-308.
- [ 3 ] 曹庆平,赵平,倪广艳,朱丽薇,牛俊峰,曾小平.华南荷木林冠层气孔导度对水汽压亏缺的响应.生态学杂志,2013,32(7): 1770-1779.
- [ 4 ] 鱼腾飞,冯起,司建华.极端干旱区多枝怪柳叶片气孔导度的环境响应模拟.植物生态学报,2012,36(6): 483-490.
- [ 5 ] 张宝忠,刘钰,许迪,蔡甲冰,赵娜娜.基于夏玉米叶片气孔导度提升的冠层导度估算模型.农业工程学报,2011,27(5): 80-86.
- [ 6 ] 赵平,饶兴权,马玲,蔡锡安,曾小平.马占相思林冠层气孔导度对环境驱动因子的响应.应用生态学报,2006,17(7): 1149-1156.
- [ 7 ] 司建华,常宗强,苏永红,席海洋,冯起.胡杨叶片气孔导度特征及其对环境因子的响应.西北植物学报,2008,28(1): 125-130.
- [ 8 ] 唐凤德,武耀祥,韩士杰,张军辉.长白山阔叶红松林叶片气孔导度与环境因子的关系.生态学报,2008,28(11): 5649-5655.
- [ 9 ] Komatsu H, Onozawa Y, Kume T, Tsuruta K, Shinohara Y, Otsuki K. Canopy conductance for a Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest in western Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 111-120.
- [ 10 ] 李峥,牛丽华,袁凤辉,关德新,王安志,金昌杰,吴家兵.辽西农林复合系统中杨树冠层导度特征.应用生态学报,2012,23(11): 2975-2982.
- [ 11 ] Chang X X, Zhao W Z, Liu H, Wei X, Liu B, He Z B. Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forest transpiration and canopy conductance in the upper Heihe River Basin of arid northwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 198-199: 209-220.
- [ 12 ] Igarashi Y, Kumagai T, Yoshifuji N, Sato T, Tanaka N, Tanaka K, Suzuki M, Tantasirin C. Environmental control of canopy stomatal conductance in a tropical deciduous forest in northern Thailand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 202: 1-10.
- [ 13 ] Zhang G, Zhou G S, Chen F, Wang Y. Analysis of the variability of canopy resistance over a desert steppe site in Inner Mongolia, China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(3): 681-692.
- [ 14 ] Rodrigues T R, Vourlitis G L, Lobo F D A, de Oloveira R G, Nogueira J S. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical savanna ecosystem of south central Mato Grosso, Brazil. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2014, 119(1): 1-13.
- [ 15 ] Yuan G F, Zhang P, Shao M A, Luo Y, Zhu X C. Energy and water exchanges over a riparian *Tamarix* spp. stand in the lower Tarim River basin under a hyper-arid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 194: 144-154.
- [ 16 ] Cleverly J R, Dahm C N, Thibault J R, Gilroy D J, Coonrod J E A. Seasonal estimates of actual evapo-transpiration from *Tamarix ramosissima* stands using three-dimensional eddy covariance. *Journal of Arid Environments*, 2002, 52(2): 181-197.
- [ 17 ] Yuan G F, Luo Y, Shao M A, Zhang P, Zhu X C. Evapotranspiration and its main controlling mechanism over the desert riparian forests in the lower Tarim River Basin. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58(6): 1032-1042.
- [ 18 ] Chen Y N, Zilliacus H, Li W H, Zhang H F, Chen Y P. Ground-water level affects plant species diversity along the lower reaches of the Tarim River, Western China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 66(2): 231-246.
- [ 19 ] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome, Italy: FAO, 1998.
- [ 20 ] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 603-628.
- [ 21 ] 朱绪超,袁国富,易小波,杜涛.基于Landsat 8 OLI影像的塔里木河下游河岸林叶面积指数反演.干旱区地理,2014,37(6): 1248-1256.
- [ 22 ] 白永强.盐池沙地主要灌木种的物候及生长规律研究.干旱区资源与环境,1998,12(2): 82-86.
- [ 23 ] 杨自辉,俄有浩.干旱沙区46种木本植物的物候研究——以民勤沙生植物园栽培植物为例.西北植物学报,2000,20(6): 1102-1109.
- [ 24 ] 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): 4122-4131.
- [ 25 ] Wieser G, Leo M, Oberhuber W. Transpiration and canopy conductance in an inner alpine Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forest. *Flora*, 2014, 209(9): 491-498.